HAL
open science

ETUDE GEOCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DES EAUX SUPERFICIELLES DU BASSIN VERSANT DU FURAN ET DES EAUX MINERALES DU GRABEN DU FOREZ, EST DU MASSIF CENTRAL FRANÇAIS

Frédérick Gal

To cite this version:

Frédérick Gal. ETUDE GEOCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DES EAUX SUPERFICIELLES DU BASSIN VERSANT DU FURAN ET DES EAUX MINERALES DU GRABEN DU FOREZ, EST DU MASSIF CENTRAL FRANÇAIS. Géochimie. Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2005. Français. NNT : . tel-00011941

HAL Id: tel-00011941

https://theses.hal.science/tel-00011941

Submitted on 14 Mar 2006

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.

ACADEMIE DE LYON
UNIVERSITE JEAN MONNET – SAINT ETIENNE
ECOLE DOCTORALE DE SAINT ETIENNE
Département de Géologie – Pétrologie – Géochimie

THESE

pour obtenir le grade de docteur de l'Université de Saint Etienne

Discipline : Géologie / Géochimie

Présentée le 03/11/2005 par

Frédérick Gal

ETUDE GEOCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DES EAUX SUPERFICIELLES DU BASSIN VERSANT DU FURAN ET DES EAUX MINERALES DU GRABEN DU FOREZ, EST DU MASSIF CENTRAL FRANÇAIS

Devant le jury composé de :

C. MARLIN	Professeur, Université Paris-Sud, Orsay	Rapporteur
Y. TRAVI	Professeur, Université d'Avignon	Rapporteur
L. AQUILINA	Professeur, Université de Rennes	Examinateur
D. GRAILLOT	Professeur, Ecole des Mines, St-Etienne	Examinateur
R.P. MENOT	Professeur, Université Jean Monnet, St-Etienne	Directeur
C.Y.J. RENAC	Maître de Conférences, Université St-Etienne	Co-Directeur

ACADEMIE DE LYON
UNIVERSITE JEAN MONNET – SAINT ETIENNE
ECOLE DOCTORALE DE SAINT ETIENNE
Département de Géologie – Pétrologie – Géochimie

THESE

pour obtenir le grade de docteur de l'Université de Saint Etienne

Discipline : Géologie / Géochimie

Présentée le 03/11/2005 par

Frédérick Gal

ETUDE GEOCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DES EAUX SUPERFICIELLES DU BASSIN VERSANT DU FURAN ET DES EAUX MINERALES DU GRABEN DU FOREZ, EST DU MASSIF CENTRAL FRANÇAIS

Devant le jury composé de :

C. MARLIN	Professeur, Université Paris-Sud, Orsay	Rapporteur
Y. TRAVI	Professeur, Université d'Avignon	Rapporteur
L. AQUILINA	Professeur, Université de Rennes	Examinateur
D. GRAILLOT	Professeur, Ecole des Mines, St-Etienne	Examinateur
R.P. MENOT	Professeur, Université Jean Monnet, St-Etienne	Directeur
C.Y.J. RENAC	Maître de Conférences, Université St-Etienne	Co-Directeur

Résumé

Ce travail est basé sur l'étude d'un continuum eau de pluie – eau de surface – eau minérale, en utilisant différents outils chimiques et géochimiques. La zone d'étude se situe en bordure Est du Massif Central Français. Elle comprend des entités géographiques et géologiques variées (complexe granito-gneissique et cristallophyllien – Monts du Forez et du Lyonnais d'âge hercynien, graben Oligocène du Forez à venues volcaniques miocènes).

La première partie repose sur l'étude en isotopes stables (^{18}O, ^{2}H) des précipitations locales (3 points de mesures ; prélèvements journaliers sur 1 à 3 ans), dont les contenus en tritium permettent de déterminer le bruit de fond atmosphérique actuel. Les mesures ^{18}O, ^{2}H ont permis de construire une droite locale des eaux météoriques et de quantifier les gradients d'appauvrissement des rapports isotopiques en fonction de l'altitude. Ceci permet aussi de déterminer les temps de transit de l'eau dans les aquifères superficiels et de détecter la présence d'eaux récentes dans des eaux plus minéralisées. De plus, une évaluation des quantités d'eau réellement disponibles à l'infiltration (et de leur signature isotopique) a été entreprise en se basant sur différentes méthodes de calcul de l'évapotranspiration.

La seconde partie consiste en l'étude de rivières et d'aquifères peu profonds, majoritairement situés en zone d'arène granitique et connaissant des variations de débit marquées. La détermination des contenus en éléments majeurs cations et anions donne des gammes de Solides Totaux Dissous variant de 30 à 500 mg/l pour les sources, de pH acide à neutre et de faciès Na-Ca-Cl-HCO_3. Les calculs d'indice de saturation, incluant les phases minérales des sols locaux, montrent une interaction limitée avec les produits d'altération d'une matrice rocheuse granitique. Les rapports isotopiques en carbone 13 indiquent une forte proportion de matière organique dissoute. La détermination des $\delta^{18}O$ et δD permet d'envisager une recharge préférentielle en hiver ainsi que des gradients d'altitude proches de ceux enregistrés par les pluies. L'utilisation de modèles de transit souterrain de type « dispersion » permet d'estimer des temps de transit moyens de 10 à 15 mois en oxygène et 8 à 13 mois en hydrogène.

Enfin, 7 sources minérales, en contexte granitique faillé ou sédimentaire, ont également fait l'objet de prélèvements réguliers. Six d'entre elles sont carbogazeuses, deux ont un caractère thermal. Trois faciès chimiques, marquant une augmentation de la minéralisation, sont représentés : Ca-Mg-HCO_3, Na-HCO_3-Cl et Na-HCO_3. Les indices de saturation indiquent une nouvelle fois une nette interaction avec le socle. Or, les précipitations/dissolutions d'espèces minérales modifient les concentrations en cations. Dès lors, les estimations de température profonde des réservoirs (géothermomètres à cations) donnent une gamme de variation de 150 à 240°C. Les rapports isotopiques en oxygène et hydrogène sont beaucoup plus stables que ceux des eaux de surface, les eaux Na-HCO_3 ayant des deltas appauvris par rapport à leurs altitudes d'émergence. La détermination des altitudes des aires de recharge, en utilisant les gradients déterminés sur les pluies, donne des altitudes compatibles avec celles des reliefs locaux. Les signatures en carbone 13 sont influencées par la signature du CO_2 profond pour les sources carbogazeuses. Une source thermale (faciès Na-Cl-HCO_3) a des valeurs très différentes. Certaines sources du faciès Ca-Mg-HCO_3, par leur contenu en tritium, attestent de mélanges avec des eaux de surface, de faible importance cependant (^{13}C, ^{14}C). Pour l'ensemble des sources minérales, les durées maximales de temps de transit obtenues par le carbone 14 sont de l'ordre de 20000 à 25000 ans, alors que cette durée est de 8000 ans pour la source thermale précédemment mentionnée.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION…….….1

CHAPITRE I

I. CONTEXTE GEOLOGIQUE. 4

I.1 APERÇU DE L'HISTOIRE GEOLOGIQUE DU MASSIF CENTRAL FRANÇAIS. 4

I.1.1 EPISODES HERCYNIENS 5
I.1.2 HISTOIRE POST-HERCYNIENNE 8

I.2 GEOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE. 11

I.2.1 MASSIF DU PILAT (FIG. 3 ET 4) 11
I.2.2 DOME DU VELAY (FIG. 3 ET 4) 12
I.2.3 BASSIN INTRACONTINENTAL CARBONIFERE DE SAINT-ETIENNE (FIG. 3 ET 4) 12
I.2.4 PLAINE OLIGO-MIOCENE DU FOREZ (FIG. 3 ET 4) 13
I.2.4.1 Initiation du fossé d'effondrement du Forez 13
I.2.4.2 Volcanisme du Forez 14
I.2.4.3 Remplissage sédimentaire du graben 15
I.2.5 MONTS DU LYONNAIS (FIG. 3 ET 4) 15
I.2.6 MONTS DU FOREZ (FIG. 3 ET 4) 16
I.2.7 SEUIL DE NEULISE (FIG. 3 ET 4) 17
I.2.8 BASSIN DE ROANNE (FIG. 3 ET 4) 17
I.2.9 FORMATIONS RECENTES 17

I.3 FORMATIONS GEOLOGIQUES ET CONTRAINTES SUR LES AQUIFERES.. 18

CHAPITRE II

II. EAUX METEORIQUES 20

II.1 CLIMATOLOGIE 20

II.1.1 DYNAMIQUE ET ORIGINE DES MASSES D'AIR – CAS GENERAL 20
II.1.2 STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE ET CLIMATOLOGIE DU DEPARTEMENT 22
II. 1.2.1 Plaine du Forez (Fig. 9 et A.1) 23
II. 1.2.2 Monts du Forez (Fig. 9 et A.1) 23
II. 1.2.3 Monts du Lyonnais (Fig. 9 et A.1) 23
II. 1.2.4 Massif du Pilat (Fig. 9 et A.1) 24
II. 1.2.5 Ville de Saint-Etienne (Fig. 9 et A.1) 24
II. 1.2.6 Autres domaines (Fig. 9 et A.1) 24
II.1.3 PLUVIOMETRIE LORS DES ANNEES D'ECHANTILLONNAGE 25

II.2 FRACTIONNEMENT ISOTOPIQUE AU SEIN DES MASSES D'AIR 28

II.3 FACTEURS CONTROLANT LA COMPOSITION ISOTOPIQUE 29

II.3.1 EFFETS DE LA TEMPERATURE 30
II.3.2 EFFET DE LATITUDE 33
II.3.3 EFFET CONTINENTAL 33
II.3.4 EFFET D'ALTITUDE 33
II.3.5 EFFETS SAISONNIERS 35
II.3.6 EFFET DE QUANTITE 35
II.3.7 AUTRES VARIATIONS 36

II.4 RELATION $\delta^{18}O$ – δD (OU $\delta^{18}O$ – $\delta^{2}H$) 36

II.4.1 CAS GENERAL 36
II.4.2 DROITES LOCALES DES EAUX METEORIQUES 38
II.4.2.1 Corrélations journalières 39
II.4.2.2 Corrélations annuelles 41
II.4.2.3 Corrélations saisonnières 42

II.5 EXCÈS EN DEUTÉRIUM (TAB. A.2 À A.4) 43

II.6 AUTRES MARQUEURS DES PLUIES 47
II.6.1 Eléments dissous 47
II.6.2 Eléments radiogéniques 48

II.7 EVAPOTRANSPIRATION 53

II.7.1 CALCUL 53
II.7.1.1 méthode de Thornthwaite 53
II.7.1.2 méthode de Turc 54
II.7.1.3 méthode de Hargreaves 54
II.7.1.4 méthode de Penman 54
II.7.2 QUANTIFICATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION 54
II.7.2.1 Procédures de calcul 55
II.7.2.2 Comparaisons 56
II.7.3 INFLUENCE DE L'EVAPOTRANSPIRATION SUR LA COMPOSITION ISOTOPIQUE DE L'EAU S'INFILTRANT 59

CHAPITRE III

III. SOURCES SUPERFICIELLES ET RIVIERES DU MASSIF CRISTALLIN DU PILAT, DES MONTS ET DE LA PLAINE DU FOREZ 63

III.1 LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DES SOURCES 63
III.1.1 Massif du Pilat 63
III.1.2 Ecoulements et débits 66
III.1.3 Autres ressources superficielles étudiées du département 69
III.2 COMPOSITION CHIMIQUE DES AQUIFERES DE SURFACE 74
III.2.1 Paramètres physiques et faciès chimiques 74
III.2.1.1 Température 74

III.2.1.2 pH *77*
III.2.1.3 Eléments majeurs *78*
III.2.1.4 Diagramme de Piper – composition des eaux de surface *80*
III.2.2 Interactions eau – roche *84*
III.3 CORRELATIONS ELEMENT PAR ELEMENT 90
III.4 TYPE DE SYSTEME AQUIFERE 95
III.5 INDEX DE SATURATION 97
III.5.1 Méthode *97*
III.5.2 Résultats *98*
III.6 COMPOSITION ISOTOPIQUE 105
III.6.1 $^{18}O^{18}/^{2}H$: relation avec les pluies locales *105*
III.6.2 $^{18}O/^{2}H$: gradients d'altitude et relations à l'infiltration *108*
III.6.3 Excès de deutérium *110*
III.6.4 Variations temporelles en oxygène et hydrogène – relations à la température . *111*
III.6.5 Signatures ^{13}C *115*
III.6.6 Eléments radiogéniques *117*
III.7 ESSAIS DE DETERMINATION DES TEMPS DE RESIDENCE MOYENS DANS LES AQUIFERES SUPERFICIELS DU BASSIN VERSANT AMONT DU FURAN 119
III.7.1 Fichier pluie (entrée) *121*
III.7.2 Fichiers lavoirs (sortie) *122*
III.7.3 Modèles et paramètres utilisés *122*
III.7.3.1 Lavoir de Rochetaillée 123
III.7.3.2 Lavoir d'Essertines dauphin 126
III.7.3.3 Lavoir d'Essertines 127
III.7.3.4 Lavoir de Barbanche 128
III.7.3.5 Lavoir du Bessat 129
III.7.3.6 Lavoir de Tarentaise 130
III.7.3.7 Essais de percolation de lavoirs dans d'autres 130
III.8 DISCUSSION SUR LES DONNEES ISOTOPIQUES 132

CHAPITRE IV

IV. EAUX MINERALES DU FOREZ 133
IV.1 LOCALISATION GEOGRAPHIQUE 133
IV.1.1 Définitions *133*
IV.1.2 Provinces minérales en France *134*
IV.1.2 Sources minérales de la Loire *135*
IV.2 COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX MINERALES 137
IV.2.1 Paramètres physiques et faciès chimiques *137*
IV.2.1.1 Température 137
IV.2.1.2 pH 140
IV.2.1.3 Faciès des eaux échantillonnées 141
IV.2.1.4 Eléments dissous 142
IV.2.2 Corrélations entre éléments *144*

IV.2.3 Indices de saturation *149*
IV.2.3.1 Indices de saturation à la température d'émergence……...149
IV.2.3.2 Indices de saturation et dissolution imposée de phases minérales en système ouvert……150
IV.2.3.3 Indices de saturation et dissolution imposée de phases minérales en système clos ……..155
IV.2.3.4 Indices de saturation et comportement vis à vis du CO_2……...157
IV.3 GEOTHERMOMETRIE 158
IV.4 ISOTOPES STABLES 165
IV.4.1 Oxygène et hydrogène *166*
IV.4.1.1 Relation à la Droite Locale des Eaux Météoriques……166
IV.4.1.2 Variations temporelles……169
IV.4.1.3 Variations en profondeur dans l'aquifère multicouche de la plaine du Forez (forage Montrond 1)……172
IV.4.1.4 Altitudes d'infiltration……174
IV.4.2 Oxygène et hydrogène : types d'interactions en profondeur *177*
IV.4.2.1 Exsolution de CO_2……177
IV.4.2.2 Interaction eau – roche……..178
IV.4.2.3 Hydratation de silicates……179
IV.4.2.4 Exsolution de H_2S……180
IV.4.3 Carbone 13 ..... *181*
IV.4.2.1 CO_2 gaz……...181
IV.4.2.2 Carbone Inorganique Dissous……182
IV.4.2.2.1 Signatures carbone 13……182
IV.4.2.2.2 $\delta^{13}C$, alcalinité et p_{CO_2}……183
IV.4.4 Mélanges entre aquifères (forage Montrond 1) *186*
IV.4.4.1 Mélanges entre aquifères : relation oxygène – hydrogène……186
IV.4.4.2 Mélanges entre aquifères : relation oxygène / hydrogène – carbone……190
IV.4.4.3 Mélanges entre aquifères : conclusions partielles……..191
IV.5 ISOTOPES RADIOGENIQUES 192
IV.5.1 Tritium *192*
IV.5.2 Carbone 14 ..... *192*
IV.5.2.1 Méthodologie……..192
IV.5.2.2 Ages calculés……..193
IV.5.2.3 Relation activité ^{14}C - $\delta^{18}O$……197
IV.5.2.4 Conclusions sur la validité des âges calculés……198

CHAPITRE V

DISCUSSION / CONCLUSION……200

BIBLIOGRAPHIE……211

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 : Ensembles tectoniques et lithologiques au sein du Massif Central Français (d'après Roig,1998)……4

Fig. 2 : modèle d'évolution de la chaîne varisque d'Europe (Matte, 1986)……6

Fig. 3 : carte géologique du flanc Est du MCF; d'après Lardeaux, 2001……7

Fig. 4 : coupe Nord – Sud du flanc Est du MCF montrant les principales unités tectoniques et leurs relations structurales ; les âges (en Ma) de certains granites sont indiqués ; d'après Lardeaux et al, 2001……8

Fig. 5 : le rift Ouest-Européen (Nehlig, 2003)……..9

Fig. 6 : extrait de la carte gravimétrique de France (BRGM) ; anomalie de Bouguer dans le système IGSN 71 ; densité de réduction 2,7……...10

Fig. 7 : carte géologique simplifiée et principaux édifices volcaniques de la plaine et des Monts du Forez ; modifié d'après Lenoir (2000) et Genter (2005)……...14

Fig. 8 : principe de la circulation atmosphérique générale dans l'hémisphère Nord, d'après Berner-Kay et Berner, 1987……21

Fig. 9 : découpage climatique du département de la Loire…….……22

Fig. 10 : cumuls pluviométriques et températures minimales (Tmin) et maximales (Tmax) mensuelles entre 1999 et 2003 ; RR représente la quantité d'eau précipitée en mm ; le mois de novembre 2002 est indiqué par * ; la station de Chalmazel a connu des problèmes d'enregistrement en 1999 et 2000 (voir texte)……27

Fig. 11 : relation $\delta^{18}O$ – température mensuelle (point de rosée) pour St-Just-St-Rambert……...31

Fig. 12 : processus d'évaporation – transport – condensation des masses nuageuses et rapports isotopiques associés par fractionnement à 15°C et distillation de Rayleigh ; d'après White (1999) modifié……37

Fig. 13 : droite des eaux météoriques de St-Just-St-Rambert (données journalières) ; les orages sont indiqués par des losanges inclus dans un rectangle……40

Fig. 14 : variations saisonnières de l'excès en deutérium pour les trois stations échantillonnées ; la température moyenne mensuelle en °C est prise à St-Just-St-Rambert et correspond à la température des précipitations……45

Fig. 15 : chronique des teneurs en tritium des pluies à Thonon-les-Bains (Haute-Savoie) ; les données sont issues du réseau GNIP ; échelle semi-logarithmique pour le graphique principal, linéaire pour le cartouche……49

Fig. 16 : a) comparaison des teneurs mensuelles en tritium des pluies pour trois stations du réseau GNIP entre 1996 et 2003 ; b) évolution trimestrielle constatée des teneurs en tritium à St-Just-St-Rambert entre avril 2002 et mars 2004 ; les teneurs de deux stations GNIP à la même échelle temporelle sont indiquées pour référence……...52

Fig. 17 : évolution journalière de l'évapotranspiration calculée selon la formule de Hargreaves……..56

Fig. 18 : évolution mensuelle de l'évapotranspiration calculée pour les stations d'Andrézieux-Bouthéon (400m ; sauf Penman donnée Météo-France) et de Tarentaise (1080m) ; les calculs effectués pour St-Just-St-Rambert ont été entrepris avec les températures des précipitations et non les températures de l'air……..57

Fig. 19 : modification du signal isotopique en oxygène (δ18O) et hydrogène (δD) après prise en compte de l'effet quantitatif de l'évapotranspiration ; les losanges figurent les pluies brutes, les carrés se rapportent aux seules pluies efficaces (quantité de pluie diminuée de la perte par évaporation) ; pas d'événement en décembre 2001……62

Fig. 20 : réseau hydrographique du département de la Loire, d'après RBDE Loire – Bretagne modifié……64

Fig. 21 : profils topographiques le long du cours du Furan et dans le massif du Pilat……...65

Fig. 22 : bassin versant de la rivière Furan de sa source à son embouchure ; sont indiqués les écoulements moyens annuels au sein du bassin (d'après Staron, 1997) ; les deux cartouches en bordure gauche du schéma principal figurent la partie amont du bassin du Furan avec la localisation des différents points d'échantillonnage. Le trait de coupe A fait référence à la figure 21……65

Fig. 23 : bassin versant amont du Furan et relation avec la géologie ; les numéros correspondent à ceux employés dans la figure 22 ; d'après Vitel, 2000……...66

Fig. 24 : relations pluies – débit des lavoirs et ruisseaux du bassin amont du Furan ; la pluviométrie journalière est prise à Tarentaise ; les débits en entrée du barrage de Pas de Riot sont fournis par l'organisme gestionnaire (Stéphanoise des Eaux) ; les lavoirs de Rochetaillée (débit contrôlé), Barbanche et Bessat sont indiqués, ainsi que le ruisseau de Barbarie……...68

Fig. 25 : cyclicité mensuelle des apports au barrage de Pas de Riot ; les rectangles sur les abscisses figurent les mois à apports minimaux (août – septembre) ; les quantités indiquées en mm représentent la hauteur mensuelle précipitée à Tarentaise……..69

Fig. 26 : relations température extérieure (Text) – température de l'eau échantillonnée (Teau) pour les sources superficielles et les ruisseaux du bassin du Furan et des Monts et plaine du Forez……75-76

Fig. 27 : variabilité temporelle des températures mesurées dans les eaux échantillonnées en fonction de la température extérieure moyenne régnant dans le bassin lors de la campagne d'échantillonnage, bassin versant du Furan ; dans chaque figure sont représentées la température moyenne, ainsi que les variations des deux extrêmes catégoriels (lavoirs et ruisseaux)……77

Fig. 28 : variabilité temporelle du contenu en éléments majeurs dissous (ppm) , domaine Furan……...79

Fig. 29 : diagrammes de Piper pour les eaux superficielles du bassin versant amont du Furan et des monts et plaine du Forez. Les points sont classés par teneurs en solides dissous croissantes (TDS en mg/l) ; * indique une moyenne sur 3 points ou moins. Les altitudes des points de prélèvement, ainsi que 3 analyses sur roches totales, sont aussi indiquées……...80-81

Fig. 30 : diagramme de Piper des eaux de pluies d'après Négrel et Roy, 1998 (Ste-Marguerite) ; Celle, 2000 (Vialasse) ; pour la présente étude (St-Just), la composition en bicarbonates a été recalculée. Les variations des domaines de surface du Furan et du Forez sont également reportés……...84

Fig. 31 : diagramme Ca-Mg-SiO_2 sur les eaux de surface du Furan et du Forez ; les compositions des pluies (Fig. 35), des roches (Fig. 34), et de minéraux sont indiquées en référence (concentrations molaires)……85

Fig. 32 : Na^+/Ca^{2+} en fonction de HCO_3^-/H_4SiO_4 (rapports molaires) dans le cas d'une interaction eau – plagioclase – domaine Furan……87

Fig. 33 : apport en éléments dissous des précipitations dans les eaux de surface ; Furan..……88

Fig. 34 : apport en éléments dissous des précipitations dans les eaux de surface ; Forez……..89

Fig. 35 : relation Na – Cl dans le domaine Furan ; A présente l'intégralité des données en meq/l, B seulement les échantillons à teneur inférieure à 0,5 meq/l. Le domaine grisé est extrapolé à partir des données chimiques des pluies de St-Just-St-Rambert (Tab. 9) , des données de Négrel et Roy (1998) dans la Limagne d'Allier, de Sanusi et al. (1996) dans les Vosges et des données de Celle (2000) sur Avignon – Rochefort du Gard – La Vialasse (Mont Lozère)……..91

Fig. 36 : relation Na – Cl dans le domaine Forez ; A présente l'intégralité des données en meq/l, B seulement les échantillons à teneur inférieure à 0,5 meq/l. Le domaine grisé est extrapolé à partir des données chimiques des pluies de St-Just-St-Rambert (Tab. 9), des données de Négrel et Roy (1998) dans la Limagne d'Allier, de Sanusi et al. (1996) dans les Vosges et des données de Celle (2000) sur Avignon – Rochefort du Gard – La Vialasse (Mont Lozère)……..92

Fig. 37 : relation concentration en Cl (mg/l) – altitude ; en italique sont indiqués les échantillons à NO_3 < 6 mg/l……...94

Fig. 38 : évolution temporelle des pressions partielles de CO2 calculées pour les différents lavoirs échantillonnés dans le Furan et le Forez (pCO2 calculées à l'aide du logiciel Diagrammes, Roland SIMLER, Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon)……..96

Fig. 39 : indices de saturation calculés pour les sources superficielles et les ruisseaux drainant le bassin versant du Furan et la plaine du Forez……..…99

Fig. 40 : indices de saturation calculés pour les sources superficielles et les ruisseaux drainant le bassin versant du Furan et la plaine du Forez. Dissolution imposée d'albite, anorthite et phlogopite (SI=–1)……102

Fig. 41 : indices de saturation calculés pour trois sources à TDS > 100mg/l. Dissolution imposée d'albite, anorthite et phlogopite (SI=–1), gamme de variation de température de 20 à 50°C. Les pH indiqués en légende correspondent aux pH calculés pour les différentes incrémentations de hausse de température……...103

Fig. 42 : indices de saturation calculés pour les sources superficielles du Furan et du Forez. Dissolution d'albite, anorthite et phlogopite imposée (SI=–1). Les compositions chimiques des sources employées sont minorées de la composition des pluies de la Limagne d'Allier du 17/06 au 28/07/94 (Négrel et Roy, 1998)……...104

Fig. 43 : rapports isotopiques moyens annuels en oxygène et hydrogène des sources et ruisseaux du bassin versant du Furan ; la droite de référence est la Droite Météorique Locale donnée en II.8.1.1, avec les moyennes annuelles pour les années 2001 à 2003 ; en trait discontinu : corrélation obtenue sur la moyenne de tous les prélèvements (sauf Rochetaillée 14/12/00)…...106

Fig. 44 : distribution des rapports isotopiques moyens des sources et ruisseaux échantillonnés dans la plaine du Forez et ses reliefs bordiers ; les valeurs moyennes des pluies au cours de la période 2001 – 2003 sont indiquées ; l'ellipse grise représente le domaine des eaux du Furan, son grand axe étant aligné sur la régression observée dans ce bassin versant……107

Fig. 45 : variation dans le temps de l'excès de deutérium des sources (A) et rivières (B) dans le département de la Loire. Le trait continu gras représente la valeur mensuelle moyenne de cet excès dans les pluies de St-Just-St-Rambert……110

Fig. 46.1 : variations des rapports isotopiques en oxygène et hydrogène des sources pérennes du massif du Pilat (en grisé) ; les températures minimales et maximales mensuelles enregistrées à Andrézieux-Bouthéon sont indiquées comme référence à la cyclicité climatique annuelle……112

Fig. 46.2 : variations des rapports isotopiques en oxygène et hydrogène des ruisseaux du massif du Pilat (en grisé) ; les températures minimales et maximales mensuelles enregistrées à Andrézieux-Bouthéon sont indiquées comme référence à la cyclicité climatique annuelle……113

Fig. 47 : variations des rapports isotopiques en oxygène et hydrogène de Montarcher, ruisseau Chorsin et Vizézy (en grisé) ; les températures minimales et maximales mensuelles enregistrées à Andrézieux-Bouthéon sont indiquées comme référence à la cyclicité climatique annuelle……113

Fig. 48 : rapports isotopiques $\delta^{13}C$ (‰ VPDB) mesurés pour les sources du Furan et de la plaine du Forez ; les valeurs mesurées sur les ruisseaux et rivières sont reportées dans la partie supérieure ; les valeurs de $\delta^{13}C$ indiquées pour la Matière Organique (MO), le CO_2 du sol, le Carbone Total Dissous, le CO_2 atmosphérique et le CO_2 mantellique proviennent de Amiotte-Suchet et al., 1999 ; Gerlach et Taylor, 1990 ; Poreda et al., 1992……..115

Fig. 49 : modèle de dispersion pour le lavoir de Rochetaillée (oxygène) ; détails dans la figure…….123

Fig. 50 : modèle de dispersion pour le lavoir de Rochetaillée (oxygène) avec prise en compte des précipitations perdues par évapotranspiration ; durant l'été 2003, l'ETP étant supérieure aux précipitations, aucun rapport isotopique n'est préservé ; les mois suivant ne sont en conséquence pas inclus dans le fichier entrée (rupture de cyclicité temporelle) ; autres détails dans la figure…….124

Fig. 51 : modèle de dispersion pour le lavoir de Rochetaillée (hydrogène) ; détails dans la figure…….125

Fig. 52 : modèle de dispersion pour le lavoir d'Essertines dauphin (oxygène et hydrogène) ; a) graphe avec entrée pluies prises à 1100m d'altitude (cf Rochetaillée) ; b) graphe prenant en compte l'ETP ; c) modèle basé sur les rapports $\delta^{2}H$ (les trois premières mesures sont retirées ; voir texte pour explications)…….126

Fig. 53 : modèle de dispersion pour le lavoir d'Essertines (oxygène et hydrogène) ; a) graphe avec entrée pluies prises à 1100m d'altitude ; b) modèle basé sur les rapports $\delta^{2}H$ (voir texte pour explications)……..127

Fig. 54 : modèle de dispersion pour le lavoir de Barbanche (oxygène et hydrogène) ; a) graphe avec entrée pluies prises à 1200m d'altitude ; b) modèle basé sur les rapports $\delta^{2}H$ (voir texte pour explications)……..128

Fig. 55 : modèle de dispersion pour le lavoir de Bessat (oxygène et hydrogène) ; a) graphe avec entrée pluies prises à 1300m d'altitude ; b) modèle basé sur les rapports $\delta^{2}H$ (voir texte pour explications)……..128

Fig. 56 : modèle de dispersion pour le lavoir de Tarentaise (oxygène)……129

Fig. 57 : localisation des principales venues d'eau minérales en France, d'après Faculté de Médecine, Clermont-Ferrand, modifié…….135

Fig. 58 : a) principales sources minérales du Massif Central Français ; b) sources minérales échantillonnées du département de la Loire……136

Fig. 59 : variations temporelles des températures de 3 sources minérales (Chorsin, Salt-en-Donzy, Sail-sous-Couzan) en fonction des températures atmosphériques moyennes mensuelles relevées à Andrézieux-Bouthéon……...140

Fig. 60 : diagramme de Piper des eaux minérales du Forez ; pour comparaison sont indiquées les domaines de 5 districts d'eaux minérales du Massif Central (Serra et al., 2003) et différentes eaux de surface (Furan et Forez)……...142

Fig. 61 : diagramme Na vs Cl (meq/l) pour les eaux du Forez ; compositions des eaux du MCF (Serra et al., 2003)……144

Fig. 62 : diagramme Ca vs Na (µmol/l) pour les eaux du Forez ; contour rond : eaux Na-Cl-HCO_3 ; autre contour : eaux Ca-Mg-HCO_3 ; compositions des eaux du MCF (Serra et al., 2003)……145

Fig. 63 : diagramme K vs Na (µmol/l) pour les eaux du Forez ; contour rond : eaux Na-Cl-HCO_3 ; autre contour : eaux Ca-Mg-HCO_3 ; compositions des eaux du MCF (Serra et al., 2003)……..145

Fig. 64 : diagramme SO_4 vs Ca (mg/l) pour les eaux du Forez ; contour rond : eaux Na-Cl-HCO_3 ; autre contour : eaux Ca-Mg-HCO_3 ; compositions des eaux du Cézallier (Négrel, 1997)……...147

Fig. 65 : diagramme Li vs Na (µmol/l) pour les eaux du Forez ; contour rond : eaux Na-Cl-HCO_3 ; autre contour : eaux Ca-Mg-HCO_3 ; compositions des eaux du MCF (Serra et al., 2003)……147

Fig. 66 : diagramme Br/Cl vs SO_4/Cl (mg/l) pour les eaux du Forez ; les analyses Mont-Dore se rapportent aux eaux de la haute vallée de la Dordogne (Baubron et al., 1979)……148

Fig. 67 : indices de saturation calculés à la température d'émergence des sources minérales….150

Fig. 68 : indices de saturation calculés à différentes températures pour les sources minérales – cas TDS maximal. La dissolution d'albite, anorthite, feldspath-K, quartz, annite, phlogopite, pyrite est imposée. Les flèches indiquent des changements d'état de saturation……...152

Fig. 69 : indices de saturation calculés à différentes températures (T_{source}, 50°C et 250°C) pour Chorsin, Moingt et Salt-en-Donzy – cas TDS maximal. La dissolution de 23,5% de quartz, 27,5% de feldspath potassique, 33% de plagioclase, 10,5% de biotite, 5% de cordiérite et 0,5% de muscovite est imposée (SI = –1) pour les histogrammes à barres blanches (interaction avec granite du Forez) ; pour ceux à barres grises (dissolution de 7 phases minérales), voir légende Fig. 68……...156

Fig. 70 : comparaison des évolutions des indices de saturation vis à vis de la dolomite pour 3 sources CH (faciès Ca-Mg-HCO_3), MGT (Na-HCO_3) et SD (Na-Cl-HCO_3), à température croissante (T_{source} – 250°C) – représentations hors échelle……...157

Fig. 71 : températures déterminées en couplant les géothermomètres Na/Li et Sr/K² (Michard, 1990) ; explications dans le texte……..163

Fig. 72 : coupe schématique du graben du Forez et zones de circulation possibles de l'eau en profondeur……165

Fig. 73.1 : rapports isotopiques $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$ des eaux minérales du Forez ; les compositions moyennes des aquifères de surface sont indiquées ; types d'interactions figurés en cartouche d'après Cartwright et al., 2002…….....168

Fig. 73.2 : rapports isotopiques $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$ relevées dans le forage de Montrond et relation à la droite locale des eaux météoriques……...169

Fig. 74 : variations dans le temps des rapports isotopiques $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$ des eaux minérales du Forez ; le cartouche représente les variations en $\delta^{18}O$ dans le temps pour chaque faciès d'eau minérale……171

Fig. 75.1 : variations en fonction de la profondeur des rapports isotopiques $\delta^{18}O$ des différents aquifères du forage de Montrond ; le rapport de la rivière la plus proche est indiqué en référence……...172

Fig. 75.2 : variations en fonction de la profondeur des rapports isotopiques $\delta^{2}H$ des différents aquifères du forage de Montrond ; le rapport de la rivière la plus proche est indiqué en référence……...173

Fig. 76.1 : aires de recharge déduites des $\delta^{18}O$ des eaux minérales du Forez et des compositions isotopiques des lavoirs du bassin versant du Furan (Monts du Pilat) et des lavoirs des Monts du Forez ; les eaux minérales résultants de mélanges attestés (tritium ou forages) sont indiquées par (mél.)…….…...175

Fig. 76.2 : aires de recharge déduites des δD des eaux minérales du Forez et des compositions isotopiques des lavoirs du bassin versant du Furan (Monts du Pilat) et des lavoirs des Monts du Forez ; les eaux minérales résultants de mélanges attestés (tritium ou forages) sont indiquées par (mél.)……175

Fig. 77 : calcul de la composition isotopique en oxygène d'une **eau initiale** en profondeur, lors de l'exsolution de CO_2 ($\delta^{18}O$ = -9,85‰ VSMOW) ; la composition de l'eau minérale en surface est indiquée, tout comme les proportions maximales de gaz libérables ; voir texte pour explications……...178

Fig. 78 : calcul de la composition isotopique en oxygène d'une **eau finale** en surface à partir de l'altération par phase fluide d'un granite en kaolinite ; voir texte pour explications……...179

Fig. 79 : calcul de la composition isotopique en hydrogène d'une eau en profondeur dans le cas d'une hydratation de silicates ; voir texte pour explications……180

Fig. 80 : $\delta^{13}C$ du Carbone Total Dissous en fonction de la teneur en bicarbonates des eaux minérales du Forez et des aquifères du forage de Montrond……182

Fig. 81.1 : relation différence de pourcentage molaire entre précipité de $BaCO_3$ (HCO_3^- + CO_3^{2-} + CO_2) – précipité de $BaCO_3$ (HCO_3^- + CO_3^{2-}) et $\delta^{13}C$ – eaux du faciès Na-HCO_3……..184

Fig. 81.2 : relation différence de pourcentage molaire entre précipité de $BaCO_3$ (HCO_3^- + CO_3^{2-} + CO_2) – précipité de $BaCO_3$ (HCO_3^- + CO_3^{2-}) et $\delta^{13}C$ – eaux du faciès Ca-Mg-HCO_3……....184

Fig. 82 : relation différence de pourcentage molaire entre précipité de $BaCO_3$ (HCO_3^- + CO_3^{2-} + CO_2) – précipité de $BaCO_3$ (HCO_3^- + CO_3^{2-}) et $\delta^{13}C_{+CO2} - \delta^{13}C_{-CO2}$; la courbe figure la relation pour les eaux du faciès Na-HCO_3……185

Fig. 83 : relation différence de pourcentage molaire entre précipité de $BaCO_3$ (HCO_3^- + CO_3^{2-} + CO_2) – précipité de $BaCO_3$ (HCO_3^- + CO_3^{2-}) et alcalinité des eaux du faciès Na-HCO_3……186

Fig. 84 : $\delta^{13}C$ du Carbone Total Dissous (HCO_3^- + CO_3^{2-} + $CO_{2(gaz)}$) en fonction des $\delta^{18}O$ des eaux minérales du Forez et des aquifères du forage de Montrond (profondeurs indiquées sur le graphe)……...……...187

Fig. 85.1 : tests de mélange $\delta^{18}O$ en fonction de δD : les différents aquifères du forage de Montrond sont indiqués, ainsi que les rapports de Salt-en-Donzy et St-Rambert. Les différentes droites de mélange présentées ont en commun un même pôle de surface (aquifère 20-30m pris à 31m), le pôle profond est indiqué sur le graphe……...188

Fig. 85.2 : tests de mélange $\delta^{18}O$ en fonction de δD : les différents aquifères du forage de Montrond sont indiqués, ainsi que les rapports de Salt-en-Donzy et St-Rambert. Les différentes droites de mélange présentées ont en commun un même pôle de surface (St-Rambert), le pôle profond est indiqué sur le graphe……..188

Fig. 86.1 : tests de mélange $\delta^{18}O$ en fonction de $\delta^{13}C$: les différents aquifères du forage de Montrond sont indiqués, ainsi que les rapports de Salt-en-Donzy et St-Rambert. Les différentes droites de mélange présentées ont un pôle de surface St-Rambert ou aquifère 20-30m ; le pôle profond est indiqué sur le graphe……..190

Fig. 86.2 : tests de mélange δD en fonction de $\delta^{13}C$: les différents aquifères du forage de Montrond sont indiqués, ainsi que les rapports de Salt-en-Donzy et St-Rambert. Les différentes droites de mélange présentées ont un pôle de surface St-Rambert ou aquifère 20-30m ; le pôle

profond est indiqué sur le graphe. La flèche indique un calcul avec un pôle profond δD = –110‰……191

Fig. 87 : activité ^{14}C en fonction de la teneur en ^{3}H ; ces activités sont utilisées dans le calcul de temps de résidence ("âge") en utilisant différents modèles. Les modèles retenus dans l'évaluation des temps de transit souterrains des eaux sont ceux de Pearson et l'approche en système mixte (ouvert puis clos) ; (détails de calcul en annexes CHAP 4, paramètres utilisés voir Tab. 26)….196

Fig. 88 : activité ^{14}C en fonction de $\delta^{18}O$……198

Fig. 89 : représentation schématique des écoulements sur une nappe d'arène……..……..203

Fig. 90 : mélanges calculés pour les aquifères du forage Montrond 1 ; explications dans le texte ……207

Fig. 91 : courbes de mélange possibles mises en relation avec la teneur en bicarbonates (minéralisation croissante) ; les températures profondes calculées par géothermométrie et les gammes d'âge ^{14}C sont indiquées……207

Fig. 92 : représentation schématique des écoulements dans le bassin du Forez. Les écoulements sont représentés par les particules bleues (espacement : 20m). Les Monts du Forez et du Lyonnais présentent des nappes d'arènes et des écoulements par faille ; le graben comprend quatre aquifères principaux sur sable, des passées gréseuses et d'épais horizons argileux (logiciel Topodrive). Les durées sont uniquement fournies à titre indicatif……...209

Fig. 93 : représentations schématiques du graben du Forez (A) et d'une section entre Montrond et Salt-en-Donzy (B). Le logiciel utilisé (Basin2 5.0 ; http://www.geology.uiuc.edu/~bethke/hydro_b2.htm) rend compte de la géométrie du bassin et de son remplissage (propriétés physiques et hydrologiques).Sont calculées l'évolution de la pression de fluide dans le bassin, la direction des écoulements des fluides et la température (contrôlée par le gradient géothermique)……..210

LISTE DES TABLEAUX

Tab. 1 : répartition des pluies efficaces dans le département de la Loire entre 1998 et 2003……...25

Tab. 2 : relations entre températures atmosphériques et signatures isotopiques des précipitations…….30

Tab. 3 : relations $\delta^{18}O$ – température (en °C) pour St-Just-St-Rambert et Tarentaise ; pour St-Just-St-Rambert, les températures sont soit la moyenne de la température de la pluie prise à St-Just-St-Rambert soit le point de rosée calculé à partir des données Météo-France d'Andrézieux-Bouthéon (T prise à Bouthéon) ; pour Tarentaise, la température prise est le point de rosée à la station Météo-France (500m du point de prélèvement)……..32

Tab. 4 : appauvrissement des rapports isotopiques de l'oxygène par effet d'altitude……..…34

Tab. 5 : gradients d'altitude en δD et $\delta^{18}O$ (‰ VSMOW) entre les trois stations étudiées…..34

Tab. 6 : récapitulatif des différentes corrélations $\delta D - \delta^{18}O$ pour les trois sites de prélèvements des précipitations ; les corrélations ayant des erreurs supérieures aux limites fixées sont indiquées en grisé……41

Tab. 7 : récapitulatif des différentes corrélations $\delta D - \delta^{18}O$ pour les trois sites de prélèvements des précipitations en fonction des saisons météorologiques et calendaires ; l'hiver météorologique s'étend d'octobre à mars, l'été d'avril à septembre ; les corrélations ayant des erreurs supérieures aux limites fixées sont indiquées en grisé……..43

Tab. 8 : moyennes saisonnières de l'excès de deutérium pondéré ; les valeurs des stations de Brest, Orléans, Avignon et Thonon sont calculées à partir des valeurs $\delta^{18}O$ et δD données par le réseau GNIP ; entre parenthèses sont indiquées les températures saisonnières moyennes……..45

Tab. 9 : mesures de composés dissous et comparaisons avec des références géographiquement proches ; données en mg/l…….48

Tab. 10 : contenu en Unités Tritium des pluies lors des périodes d'échantillonnage……...51

Tab. 11 : comparaison des valeurs d'ETP calculées par différentes méthodes par rapport aux références Hargreaves et Penman ; pour St-Just-St-Rambert les températures employées sont celles des précipitations ; les cumuls annuels sont en mm/an ; entre italique sont indiquées les valeurs partielles : septembre à décembre 2000 et janvier à juillet 2001……..59

Tab. 12 : bilan annuel de pluviométrie et d'ETP à St-Just-St-Rambert ; RR – ETP représente la quantité potentiellement disponible pour l'infiltration; * : ETP de Hargreaves calculée à Tarentaise ; a : ETP de Thornthwaite calculée à St-Just-St-Rambert ; les colonnes en grisé correspondent aux bilans en considérant les seules ETP lors des jours de pluie (voir texte pour explications)……..60

Tab. 13 : compositions en mg/l extrêmes des lavoirs et rivières du bassin versant amont du Furan et du bassin du Forez ; les températures sont en °C, les conductivités en µS/cm, les débits en l/s, les rapports isotopiques en ‰ VSMOW……..70 à 73

Tab. 14 : rapports isotopiques annuels moyens des pluies à St-Just-St-Rambert (moyenne pondérée) et des sources pérennes du Furan……...107

Tab. 15 : gradients d'altitude déterminés sur les sources pérennes de la bordure Ouest du graben du Forez……...109

Tab. 16 : teneurs en tritium mesurées en octobre 2002 dans les sources et ruisseaux du Furan et du Forez, sauf St-Rambert en novembre 2003, associée à une mesure de l'activité en ^{14}C en septembre 2004 (89,7% de Carbone Moderne)……...117

Tab. 17 : récapitulatif des différents temps moyens de transit (en mois) calculés pour les sources alimentant le bassin versant supérieur du Furan……131

Tab. 18 : comparaison d'analyses d'eaux de la Loire (données en mg/l)……...137

Tab. 19 : compositions en mg/l extrêmes des eaux minérales du Forez ; les températures sont en °C, les conductivités en µS/cm, les débits en l/s, les rapports isotopiques ^{18}O et ^{2}H en ‰ VSMOW, ^{13}C en ‰ VPDB……138-139

Tab. 20 : changements d'indices de saturation calculés à différentes températures pour les sources minérales – cas TDS maximal ; + pour un SI positif (sur-saturation), – pour un SI négatif (sous-saturation)……..153

Tab. 21 : températures calculées par géothermométrie cations ; détails dans le tableau……159

Tab. 22 : teneurs en tritium (Unité Tritium) et activités ^{14}C (% Carbone Moderne) des eaux minérales et des eaux du forage Montrond 1 ; deux eaux (CH et MGT) ont fait l'objet de mesures de l'activité ^{14}C avant et après dégazage de l'eau. Les âges maximaux possibles sont également indiqués……..166

Tab. 23 : comparaison des compositions isotopiques moyennes des sources minérales au cours des années 2001-2002 et 2003……170

Tab. 24 : aires de recharge des eaux de surface du bassin versant du Furan (champ gris) et d'aquifères des Monts du Forez prises en référence pour le calcul des altitudes moyennes des aires de recharge des eaux minérales du Forez ; la composition isotopique moyenne des sources est indiquée. Les altitudes de recharge pour les eaux minérales du Forez sont déduites des figures 76.1 ($\delta^{18}O$) et 76.2 (δD) ; pour comparaison sont données les altitudes déterminées en utilisant les précipitations locales et les seuls lavoirs du bassin versant du Furan…….176

Tab. 25 : rapports isotopiques $\delta^{18}O$ et $\delta^{13}C$ du CO_2 gaz échantillonné à Chorsin……..181

INTRODUCTION

Le présent travail a pour objet l'étude de précipitations, d'eaux souterraines peu profondes et d'eaux minérales.

L'hydrosphère est une interface qui met en relation l'atmosphère et la lithosphère. En retour, elle est fortement dépendante de ces deux enveloppes terrestres. L'action des courants atmosphériques permet la genèse de masses nuageuses par évaporation, qui, au terme d'un trajet plus ou moins long, produisent des précipitations. Leurs compositions chimiques et isotopiques sont le résultat de plusieurs phénomènes, dont les principaux sont la distillation de Rayleigh (e.g. Rozanski et al., 1993), la nature des territoires traversés par les masse d'air (e.g. Sanusi et al., 1996) et les modifications par cycle d'évaporation – condensation (e.g. Rozanski et al., 1993). Le suivi isotopique de précipitations locales permet des comparaisons avec la Droite Mondiale des eaux Météoriques (Craig, 1961), et ainsi de détecter des phénomènes secondaires (évaporation) voire de déterminer l'origine des nuages.

En surface, une partie des précipitations est reprise directement par évaporation, une autre profite à la végétation locale, et une troisième s'infiltre plus profondément dans le sol et le sous-sol. Durant ce dernier trajet, l'eau est progressivement soustraite à l'influence atmosphérique. Ceci a pour conséquence de modifier sa composition chimique, voire isotopique, à mesure que les interactions avec les formations encaissantes s'intensifient. Deux grands domaines du cycle de l'eau s'individualisent alors.

Le premier domaine est celui des réservoirs de surface, caractérisé par de faibles interactions eau – roche (e.g. Sanjuan et al., 2001). Ces aquifères comportent une zone non saturée, communicant encore avec l'atmosphère, et une zone saturée plus en profondeur. Les débits plus ou moins réguliers de ces aquifères sont fonction de l'impluvium dans la zone de recharge. Elle contribue, en complément aux ressuyages de surface consécutifs aux précipitations, à l'alimentation des réseaux de ruisseaux et de rivières assurant le drainage des bassins versants.

Le second domaine accessible à la fraction des précipitations s'infiltrant en profondeur est celui des eaux minérales. Ces eaux, caractérisées par une minéralisation, un chimisme et des caractéristiques isotopiques à variabilité plus faible, constituent le domaine d'action privilégié d'interactions eau – roches plus importantes (e.g. Serra et al., 2003).

L'étude présentée ici a donc pour objectif de décrire les trois composantes du cycle de l'eau précédemment évoquées. L'objet choisi pour ce travail est la partie Est du Massif Central Français, plus précisément le département de la Loire. Trois pluviomètres ont été installés au cours de l'étude, en plaine et en domaine de moyenne montagne. Un bassin versant de taille réduite (bassin versant du Furan) a été le lieu d'étude de lavoirs le quadrillant. Enfin, des eaux minérales de la plaine du Forez ou des reliefs bordiers ont été échantillonnées. Elles s'insèrent dans la province des eaux bicarbonatées françaises, qui ceinture l'arc alpin depuis les Basses Cévennes jusqu'à la plaine du Rhin.
Une méthodologie commune a été appliquée à ces trois ensembles réunis par une origine commune (Blavoux, 1995). Un suivi journalier des précipitations, mensuel des eaux de surface et ponctuel des eaux minérales, a été réalisé pour construire une base de données isotopique en oxygène et hydrogène, voire carbone pour les eaux s'y prêtant. En complément, des analyses chimiques anions – cations ont été réalisées sur les eaux de surface et minérales. Enfin, des mesures ponctuelles des teneurs en isotopes radiogéniques (tritium et carbone 14) ont été réalisées.

L'objectif de ce travail est dans un premier temps de définir un signal isotopique caractérisant les précipitations locales. Ce signal est ensuite utilisé dans l'étude d'un bassin versant de surface, dans lequel relargages d'aquifères et ruissellements collectés par les ruisseaux ont fait l'objet d'un suivi des compositions isotopiques et chimiques. Ce deuxième jeu de données permet également de définir un signal isotopique et chimique pour les eaux de surface. Ce signal est à son tour employé pour contraindre les mécanismes d'évolution possibles des eaux minérales en profondeur.

La présente étude s'articule en cinq parties.
La première est une rapide introduction à la géologie du département de la Loire, marquée par l'orogenèse hercynienne puis par les contrecoups de l'érection de la chaîne alpine.
Le second chapitre est une étude quantitative et isotopique des précipitations. Après description des conditions climatiques locales, sont définies la droite des eaux météoriques locales, les gradients isotopiques en fonction de l'altitude et les variations saisonnières des rapports isotopiques. Des essais de quantification des quantités d'eau disponible à l'infiltration sont également menés, en se basant sur les effets de l'évapotranspiration.
La troisième partie se rapporte au suivi de lavoirs et ruisseaux du bassin versant du Furan et de la plaine et des Monts du Forez. Les contenus en éléments majeurs permettent de définir

des signatures moyennes pour le pôle surface, dont le caractère superficiel est attesté par les contenus en tritium et les rapports isotopiques en carbone. Les compositions isotopiques en oxygène et hydrogène sont étudiées en relation avec la droite des eaux locales précédemment établie, notamment pour localiser les zones d'impluvium. Les compositions isotopiques en oxygène et hydrogène sont également utilisées pour déterminer les temps de transit moyens de l'eau dans les aquifères de surface, en utilisant un modèle basé sur des transferts par dispersion de l'eau dans l'aquifère.

L'avant dernier chapitre est consacré au suivi de sept sources minérales du graben du Forez, dont six sont carbogazeuses. Les caractéristiques chimiques de ces eaux sont mises en relation avec les données disponibles dans la limagne voisine de Clermont-Ferrand (e.g. Serra et al., 2003), voire celle du graben plus important du Rhin (Aquilina et al., 1997). Les températures possibles atteintes en profondeur par ces eaux minérales sont calculées par géothermométrie, en relation avec l'examen des états de saturation vis à vis des phases minérales. Les rapports isotopiques des eaux (oxygène, hydrogène, carbone) indiquent l'existence d'interactions avec la matrice rocheuse en profondeur, et soulignent également l'influence des gaz profonds (CO_2). Les teneurs en isotopes radiogéniques (^{3}H, ^{14}C) permettent d'identifier des sources plus sujettes à l'interaction avec des aquifères superficiels. Pour les eaux jaillissant en contexte sédimentaire, les rapports isotopiques sont interprétés en termes de mélange entre aquifères, pour essayer de déterminer les caractéristiques d'un pôle minéralisé profond.

La cinquième et dernière partie fait le point sur les résultats obtenus et aborde les interrogations qui subsistent à l'issue de ce travail.

I. CONTEXTE GEOLOGIQUE.

Cette première partie est subdivisée en deux unités. L'une se propose de dresser un rapide aperçu de la géologie d'ensemble du Massif Central Français, avant de s'attarder sur les structures géologiques majeures reconnues dans le département de la Loire. L'autre s'attache aux relations des différents ensembles auparavant présentés avec les ressources en eau qui forment l'objet principal de l'étude.

I.1 APERÇU DE L'HISTOIRE GEOLOGIQUE DU MASSIF CENTRAL FRANÇAIS.

Le département de la Loire est situé dans la partie Est du Massif Central Français (appelé par la suite MCF), partie centrale de la chaîne hercynienne Ouest européenne. Deux ensembles s'individualisent, rapportés à l'orogenèse hercynienne (reliefs bordiers) et au développement du rift Ouest européen (plaine d'effondrement du Forez et bassin de Roanne) (Fig. 1).

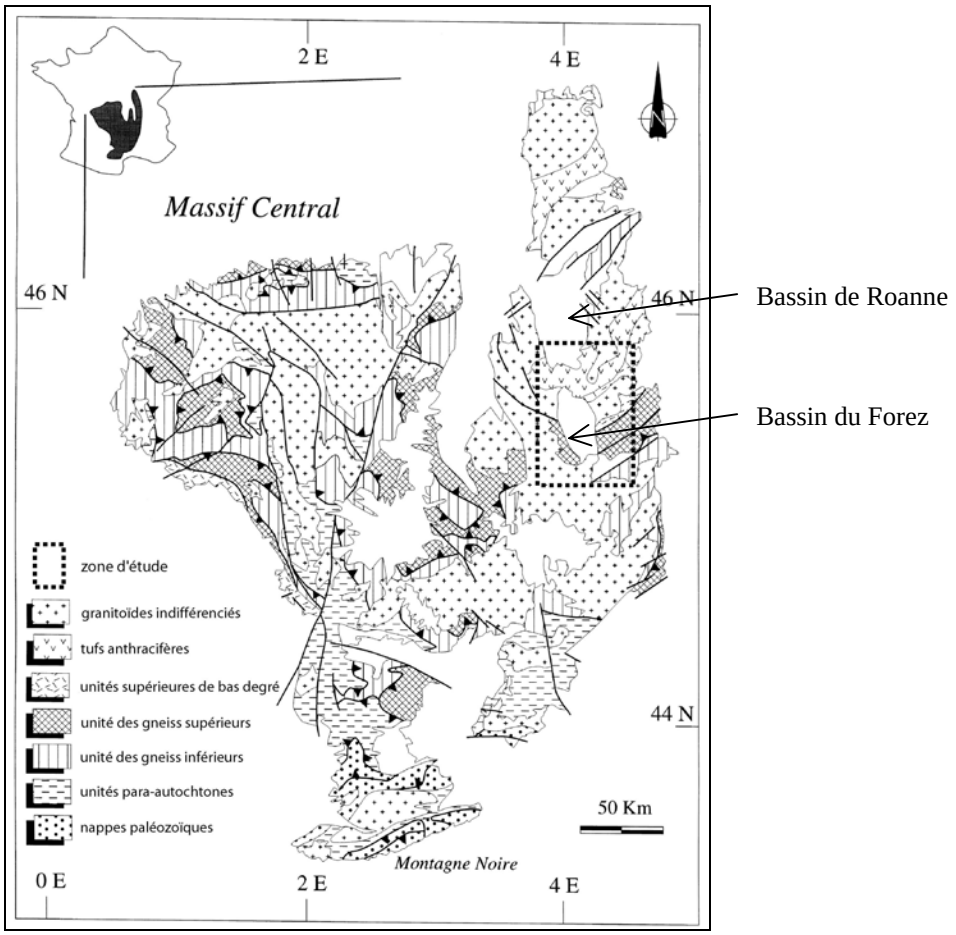


Fig. 1 : Ensembles tectoniques et lithologiques au sein du Massif Central Français (d'après Roig et Faure, 1998) ; le rectangle localise la zone d'étude.

I.1.1 Episodes hercyniens

La structuration de la chaîne hercynienne est intervenue au Paléozoïque, en plusieurs étapes (Fig. 2) qui ont formé un assemblage de roches et de formations différentes (Fig. 3 et 4). La succession des évènements est la suivante (Gardien, 1990 ; Lardeaux et al., 2001 ; Vitel, 1997) :

- Cambrien – Ordovicien : événements magmatiques et distension (rhyolites).

- Cycle Varisque (450 – 300 Ma) :
    - Silurien : fermeture, amorcée vers 450 Ma, de deux domaines océaniques Est-Ouest (océan Rhéique au Nord, océan Galice-Massif Central au Sud). Cette disposition explique la double vergence de l'orogène (Fig. 2 ; Matte, 1986). La résorption des océans par subduction du SW vers le NE (conditions de haute pression dans la croûte océanique subduite) s'achève au Silurien (420 Ma).
    - Dévonien : mise en place des séries de la Brévenne en contexte de bassin arrière-arc. Métamorphisme moyenne pression. Période de transition entre déplacements liés à une subduction et tectonique transpressive liée à une collision arc – continent.
    - Carbonifère inférieur : dès 380 Ma, un stade d'obduction puis de subduction continentale structure la chaîne, induisant un empilement de nappes à vergence Sud sur un autochtone froid. Cet épaississement crustal Dévonien moyen – Carbonifère inférieur est connu via l'empilement de deux unités gneissiques (Lardeaux et al., 2001). L'unité supérieure correspond à une nappe à matériel d'origine profonde (reliques de granulites et éclogites). La base est soulignée par un groupe leptyno-amphibolique. Le régime transpressif régnant alors permet le chevauchement de l'unité de la Brévenne sur les Monts du Lyonnais et la mise en place de granites syntectoniques. C'est le résultat d'une collision arc – continent oblique. Des dépôts de séquences pyroclastiques et calco-alcalines associées à des sédiments sur une plate-forme marine peu profonde (tufs anthracifères) se produisent également.
    - Carbonifère supérieur : l'ensemble subit une rééquilibration dans le faciès amphibolite lors de l'épisode de déformation varisque majeur. L'unité supérieure admet pour autochtone relatif l'unité inférieure des gneiss (Gardien,

1990). Cette unité inférieure a subi un métamorphisme de basse pression – haute température lors de l'extension tardi-orogénique provoquée par l'effondrement gravitaire de la chaîne (320Ma). Cette extension s'est traduite par l'exhumation de dômes thermiques granito-gneissiques (Velay vers 300Ma) issus de la fusion partielle de la croûte en profondeur. L'extension s'achève par le jeu de grands décrochements comme le sillon houiller et par l'ouverture de bassins sédimentaires intra-continentaux (bassin de St-Etienne) au toit de la zone de détachement principale.

- Permien inférieur : fin de l'orogenèse hercynienne, injection de leucogranites plus superficiels que les granites d'anatexie vellave.

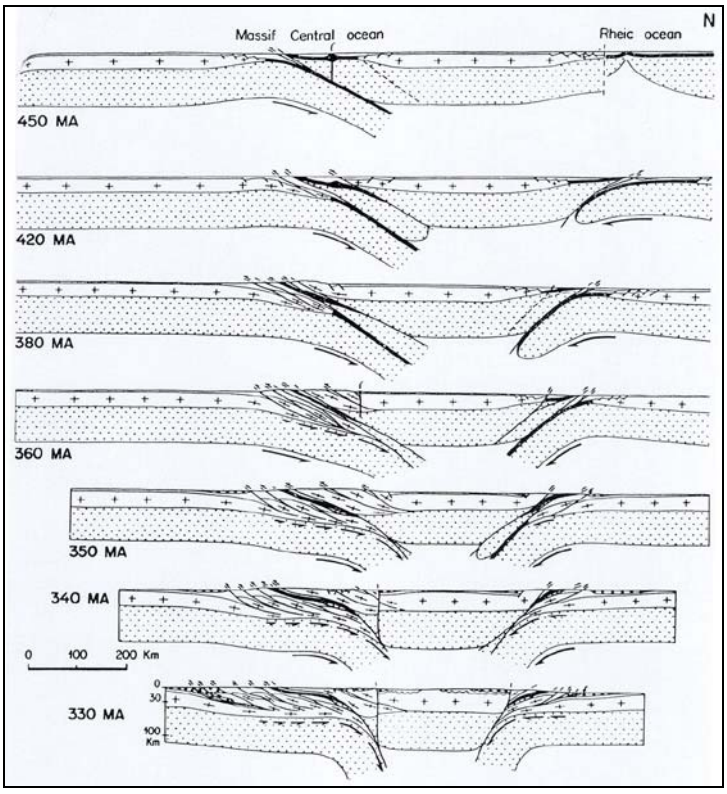


Fig. 2 : modèle d'évolution de la chaîne varisque d'Europe (Matte, 1986)

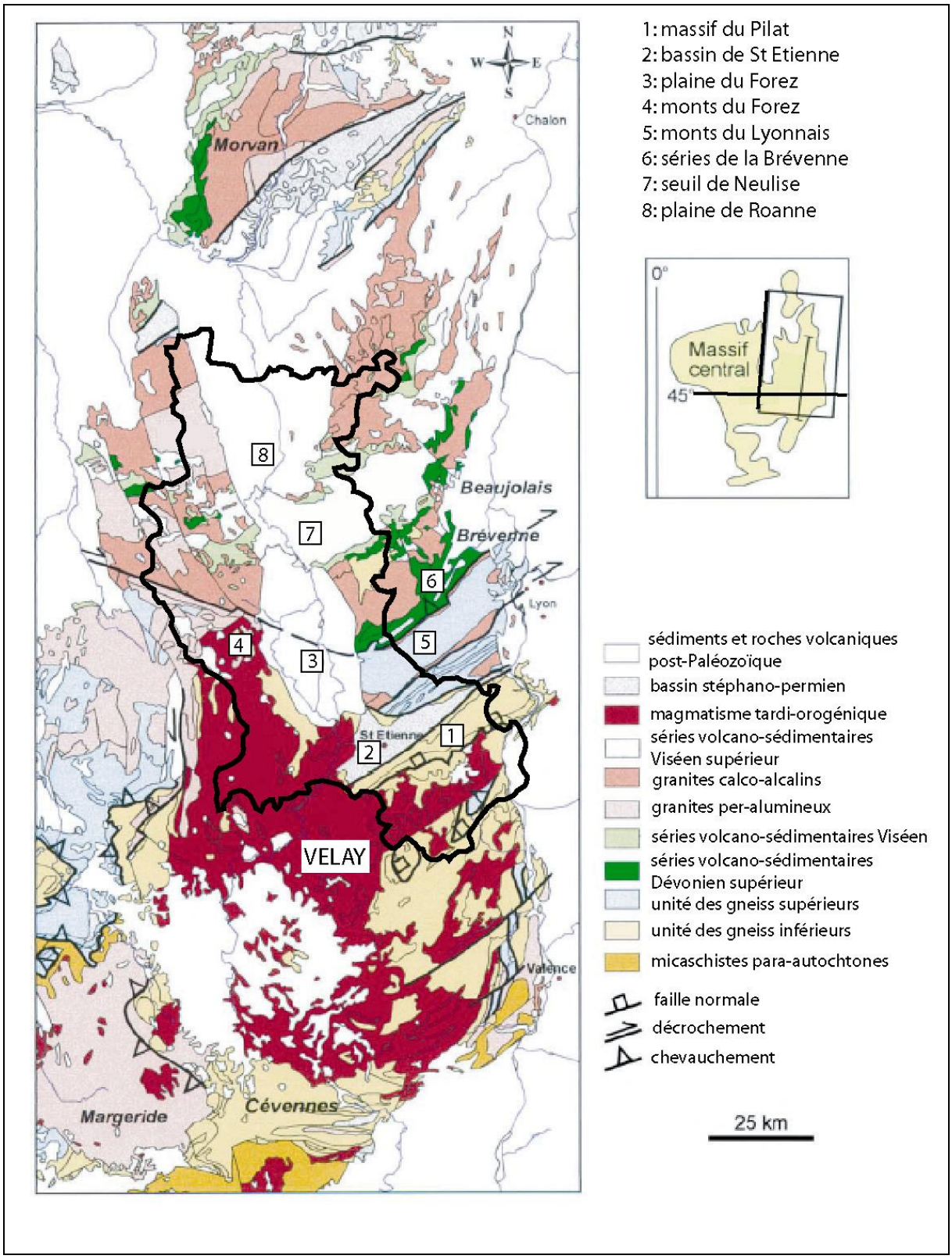


Fig. 3 : carte géologique du flanc Est du MCF d'après Lardeaux et al., 2001 ; les contours du département de la Loire sont indiqués en trait plein.

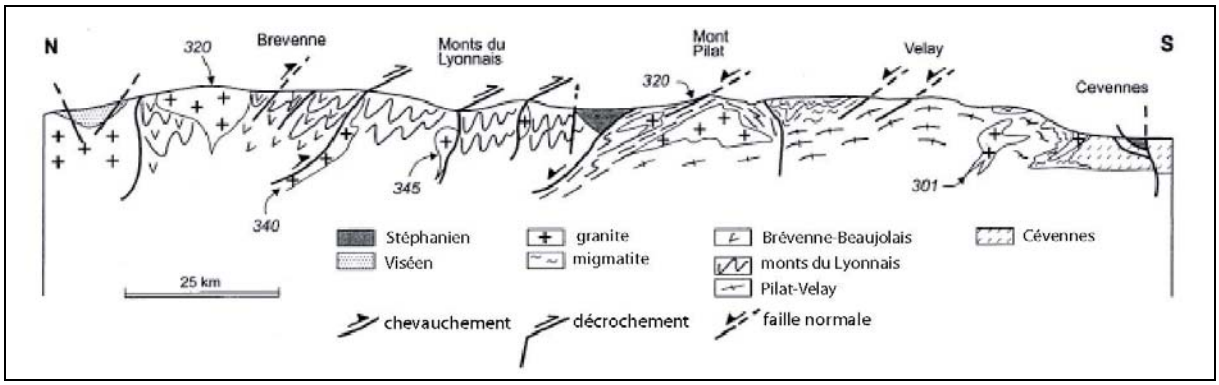


Fig. 4 : coupe Nord – Sud du flanc Est du MCF montrant les principales unités tectoniques et leurs relations structurales ; les âges (en Ma) de certains granites sont indiqués ; d'après Lardeaux et al., 2001

I.1.2 Histoire post-hercynienne

Le Mésozoïque, après la pénéplénation de l'orogène hercynien, est marqué une sédimentation de plate-forme au Jurassique. Quelques reliques sont observables dans la région de Roanne.

Le Cénozoïque (Eocène supérieur – Oligocène) est caractérisé par les contre-coups de l'orogenèse alpine, qui réactive l'Est du MCF et provoque la formation de fossés d'effondrement ou limagnes (Fig. 1 et 5 : Forez, Roannais). Les failles bordières des bassins sont de direction N à NW, globalement parallèles aux structures alpines. La formation de grabens s'est accompagnée d'une surélévation du Nord du MCF, l'amenant à son altitude moyenne actuelle (env. 715m, http://fr.encarta.msn.com). La dénudation du socle a alors alimenté une sédimentation détritique continentale, qui comble progressivement les bassins. Une activité volcanique (Fig. 5), principalement Miocène, est associée aux bassins d'effondrement.

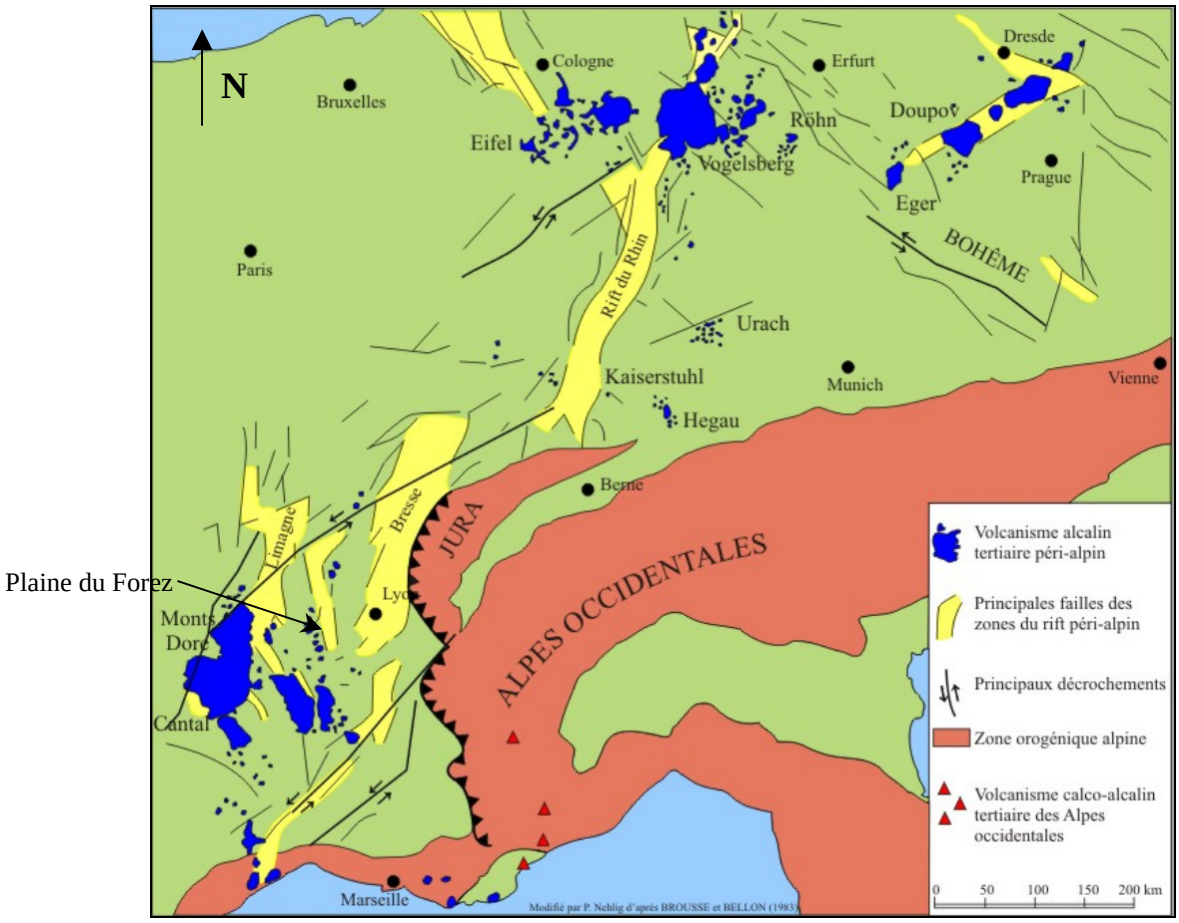


Fig. 5 : le rift Ouest-Européen (d'après Nehlig et al., 2003)

La structure profonde du MCF est connue par diverses méthodes géophysiques. Ce massif est caractérisé par une anomalie de Bouguer négative (–70 mgal ; Fig. 6), attribuée à la présence d'un corps de faible densité à 50 km de profondeur (Perrier et Ruegg, 1973). Le Moho gravimétrique oscille entre 24 et 30km (Guilbert, 1999), profondeurs semblables à celles connues sous le graben du Rhin. Des directions d'ondulations du Moho associées aux domaines alpin (NNE–SSW), armoricain (NNW–SSE) et pyrénéen (WNW–ESE) peuvent être mises en évidence (Lefort, 2002).

De forts flux de chaleur sont connus sous la Limagne d'Allier (80 à 105mW/m² ; Lucazeau et al., 1984), similaires à ceux observés dans d'autres régions actives (Eifel, Eger). La seule radioactivité crustale ne peut expliquer ces flux : la contribution mantellique est évaluée entre 35 mWm^{-2} sur les bords de l'anomalie thermique et 60-70 mWm^{-2} sous l'axe du "rift", en réponse aux effets de la collision alpine (Sobolev et al., 1997).

La nature amincie de la croûte du MCF est également visible en sismique réfraction (Perrier et Ruegg, 1973) : Moho sismique à 24 km sous la Limagne de Clermont, lié à un bombement de

cette limite (Werling et Altherr, 1997 ; Zeyen et al., 1997). Les modèles d'inversions présentés par Granet et al. (1995) suggèrent une structure en diapir entre 100 et 270 km de profondeur (vitesses plus lentes de 2 à 2,5%), en accord avec les travaux de Souriau (1976). Cette variation de vitesse est attribuée à une anomalie positive des températures mantelliques (150 à 250°C), hypothèse compatible avec les données géophysiques (Hurtig et al., 1991) et géochimiques. Des diapirs lithosphériques sont ensuite émis pour engendrer le volcanisme de surface (fusion partielle au niveau du Moho).

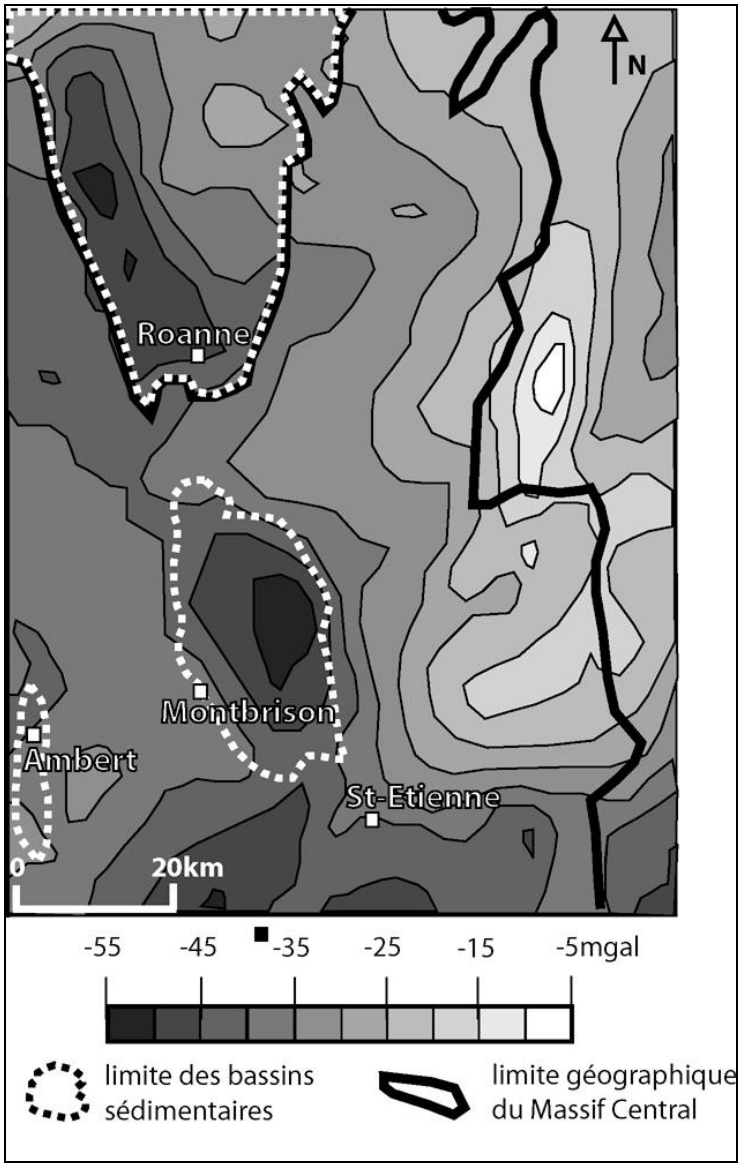


Fig. 6 : extrait de la carte gravimétrique de France (BRGM) ; anomalie de Bouguer dans le système IGSN 71 ; densité de réduction 2,7

I.2 GEOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE.

Les grands ensembles structuraux sont bien individualisés dès le XIXème siècle (Antoine, 1883) : à l'Ouest les monts granitiques du Forez, se prolongeant vers le Nord par les monts de la Madeleine. A l'Est les monts du Lyonnais, moins élevés et plus arrondis. Ces deux ensembles hercyniens sont séparés par le graben du Forez. Au Sud de cette plaine se dresse le massif du Pilat, "*où les monts du Velay se rejoignent à ceux du Forez*" (Antoine, 1883).

Les grands ensembles lithologiques et morpho-tectoniques du département de la Loire et des zones limitrophes actuellement identifiés sont représentés sur les fig.3 et 4. En partant du Sud vers le Nord, les ensembles suivants sont distingués (paragraphes I.2.1 à I.2.9) :

I.2.1 Massif du Pilat (Fig. 3 et 4)

Ce massif cristallin est l'apophyse orientale du complexe migmatitique du Velay. Par la suite y seront étudiées des sources superficielles. Il est dominé par des crêtes de directions héritées de la tectonique tardi-hercynienne (NE-SW à ENE-WSW). La série se présente comme une voûte anticlinale à cœur granitique (Pitiot, 1984) et affleure comme une série monoclinale à plongement vers le N-NW (Gardien, 1990). Les ensembles suivants sont définis (Duthou et al., 1998 ; Gardien, 1990 ; Gardien et al., 1997 ; Pitiot, 1984 ; Vitel, 2001 ; Yousif, 1980) :

- des chloritoschistes à albite, quartz, phengite (transition entre Lyonnais et Pilat) ;
- un ensemble micaschisteux et gneissique (2000m d'épaisseur) issu d'une série sédimentaire cambrienne à intercalations volcaniques acides et basiques. Y sont définies les isogrades + biotite, + cordiérite, – albite, + andalousite, + sillimanite et – andalousite ;
- un ensemble quartzo-feldspathique (quelques dizaines à quelques centaines de mètres d'épaisseur) à gneiss œillés et leptynites, affecté à la base par l'anatexie et où s'intercalent des gneiss à cordiérite et des amphibolites ;
- un dôme granito-migmatitique, formé du granite du Pilat et d'anatexites à cordiérite, constitue la base de la série ;
- en partie occidentale du massif apparaissent des lentilles de granite, concordantes dans les micaschistes et contemporaines de l'extension tardi-orogénique (granite du Gouffre d'Enfer à 322 ± 9Ma (Rb/Sr sur roche totale) – Caen Vachette et al., 1984).

Le Pilat s'est structuré au cours de différents évènements (Dufour, 1982 ; Vitel, 2001) :

- phase Acadienne (vers 380 Ma) : évolution tectono-métamorphique majeure, métamorphisme de moyenne pression – moyenne température.
- 330-320 Ma : métamorphisme thermique et de basse pression (gradient de 55°C/km – Chenevoy et Ravier, 1971) lié à la mise en place du dôme du Velay en contexte d'amincissement crustal ; injection de granites syntectoniques (Gouffre d'Enfer).
- 300 Ma : le dôme du Velay se fige, la fusion partielle en base de croûte (leucogranite d'anatexie de Planfoy vers 290 Ma – Pitiot, 1984).
- 280-275 Ma : fin de l'orogenèse hercynienne et mise en place de leucogranites tardifs à deux micas (274 ± 7 Ma – Caen Vachette, 1979).

L'ensemble est fortement tectonisé par des accidents verticaux NE-SW et par un système secondaire à orientation méridienne (Duthou et al., 1998).

I.2.2 Dôme du Velay (Fig. 3 et 4)

Les séries du massif du Pilat comprennent donc une partie du complexe migmatitique du Velay, le plus gros dôme granito-gneissique de France (120 par 100km ; Lardeaux et al., 2001). C'est un massif formé de granites anté-anatectiques apparaissant en enclaves dans les granitoïdes anatectiques à cordiérite, et de leucogranites post-anatectiques recoupant les précédents (e.g. massif de Montarcher ; Duthou et al., 1989). Le dôme du Velay s'est développé durant un événement de fusion partielle à l'échelle de la lithosphère (Lardeaux et al., 2001). L'initiation de la fusion partielle (340Ma ; Ledru, 2001) est contemporaine de l'épaississement crustal caractérisé par le chevauchement de l'unité de gneiss supérieurs sur le dôme. Suit une phase tectonique en extension (320-300Ma), contemporaine du fonctionnement du bassin houiller stéphanien.

I.2.3 Bassin intracontinental Carbonifère de Saint-Etienne (Fig. 3 et 4)

Limité au Sud par le massif du Pilat (faisceau de failles ENE-WSW) et au Nord par les Monts du Lyonnais, son origine et son fonctionnement sont liés à ceux de ces massifs. C'est un bassin intracontinental limnique (Mattauer et Matte, 1998), d'âge Stéphanien supérieur (300 Ma) à Autunien (270 Ma), contemporain d'une soixantaine de bassins identiques connus dans le MCF à cette période (Bruguier et al., 2003).

L'apparition de ce demi-graben dissymétrique est sujette à deux types d'interprétations, qui diffèrent sur le rôle de la faille du Pilat : effondrement gravitaire et analogie avec le "Basin and Range" pour Malavieille et al. (1990), bassin fonctionnant en "pull-part" pour Mattauer et Matte (1998). La forte subsidence du bassin a permis l'accumulation sur une épaisseur atteignant le kilomètre, des brèches de la Fouillouse à blocs de gneiss, granite, micaschiste des Monts du Lyonnais (De Maistre, 1963) et du Pilat (Malavieille et al., 1990), de grès fluviatiles et pélites de faciès d'inondation et enfin de silts et schistes noirs à lentilles de charbon.

I.2.4 Plaine oligo-miocène du Forez (Fig. 3 et 4)

Le fossé tectonique du Forez fait partie du rift Ouest européen (Fig. 5) ouvert à l'Eocène et individualisé à l'Oligocène, après la pénéplénation mésozoïque (Gerbe et al., 1998). Ce graben est entouré de fragments hérités de la chaîne hercynienne (Monts du Forez, du Lyonnais et massif du Pilat). Ses limites structurales reprennent les grandes directions hercyniennes NE-SW et NW-SE (Duclos, 1967). C'est un fossé dissymétrique, plus profond à l'Est (au moins 700m vers Montrond-les-Bains), ce que reflètent les courbes isanomales de Bouguer (Fig. 6).

I.2.4.1 Initiation du fossé d'effondrement du Forez

Au Paléocène, un magmatisme anté-rift (65-38Ma), de volume très réduit mais connu à l'échelle du MCF et du graben rhénan, se développe le long des accidents bordiers délimitant les fossés, et indique le développement d'une anomalie thermique et de processus conduisant à la fusion partielle (Lenoir et al., 2000). Cette intumescence thermique (Froidevaux et al., 1974) sous le Massif Central pourrait être soit un large diapir asthénosphérique soit un ensemble de petits diapirs individuels remontant à 35-45 km sous la surface (Nicolas et al., 1987). L'existence d'une zone à faible vitesse dans le manteau supérieur et d'une remontée mantellique est confirmée par les modèles tomographiques (Granet et al., 1995).

Michon et Merle (2001) et Merle et Michon (2001) distinguent trois épisodes magmatiques, reliés 1) à la flexure de la lithosphère européenne lors des premières compressions alpines (épisode pré-rift), puis 2) à une décompression du manteau lors de l'amincissement de l'avant-pays alpin (épisode syn-rift) et enfin 3) un épisode majeur post-rift provoqué par la remontée

asthénosphérique lors de la formation de la racine lithosphérique des Alpes. D'autres modèles minimisent la part alpine et impliquent la convergence Europe-Afrique (compression NNE-SSW engendrant une extension ESE-WNW ; Thomas, 2001), ou des déformations lithosphériques de grande longueur d'onde (Wyns et Guillocheau, 1999).

I.2.4.2 Volcanisme du Forez

Les principales venues volcaniques du Forez sont reportées en figure 7. La phase ancienne antérieure au rifting est représentée par les basanites de Marcoux (62,3 ± 1,4 Ma ; Bellon et Hernandez, 1979 ; Lenoir et al., 2000). Les autres édifices, necks et dykes essentiellement, datent du Miocène inférieur (22 à 13 Ma) et proviennent d'une série alcaline sodique à laves déficitaires en silice. Deux phases sont identifiées (21-17Ma et 14-12Ma ; Bellon et Hernandez, 1979), la période de calme pouvant être favorable au développement de paléosols rouges à smectite et kaolinite (Gerbe et al., 2000).

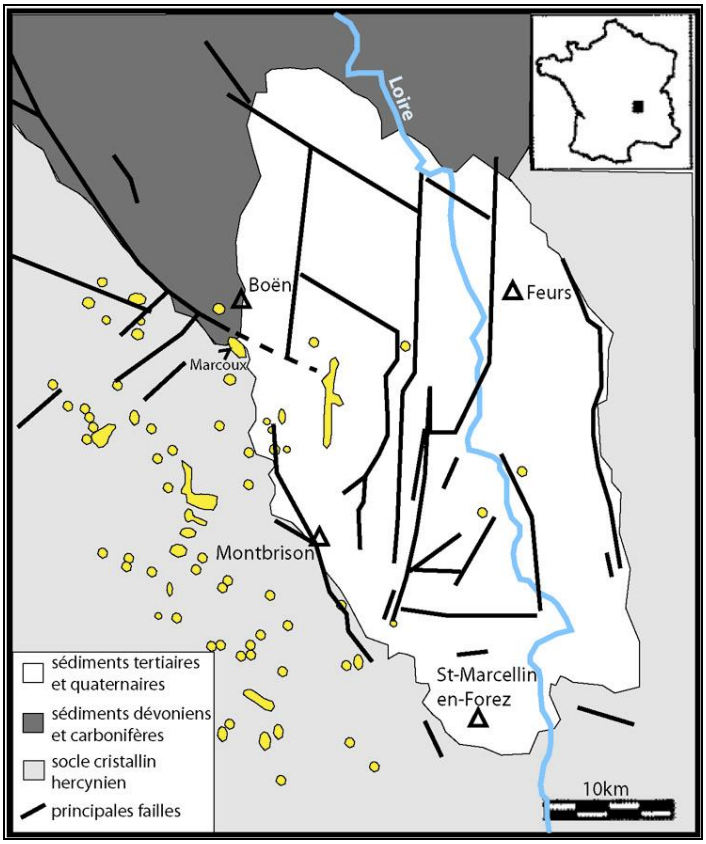


Fig. 7 : carte géologique simplifiée et principaux édifices volcaniques de la plaine et des Monts du Forez ; modifié d'après Lenoir et al. (2000) et Genter et al. (2003).

I.2.4.3 Remplissage sédimentaire du graben

La base des séries est constituée par un conglomérat grossier à blocs variés (granites, gneiss des Monts du Forez et du Lyonnais) et intercalations argilo-sableuses (puissance : 150m ; Larqué et Weber, 1969), transgressif sur le socle paléozoïque. Les plus anciens sédiments connus (carrière de St-Marcellin-en-Forez ; Fig. 7) ont fourni une faune vertébrée datée à environ 35 Ma et reposant sur le socle altéré (altérations fersialitiques et rubéfaction en milieu continental sous climat chaud et sec ; épaisseur 30m env.). Les dépôts sus-jacents sont caractéristiques d'une évolution en milieu continental, avec sédimentation en contexte lacustre, palustre ou fluviatile sous faible tranche d'eau : grès grossiers mêlés à des lits argileux et alternants avec des conglomérats (anciens chenaux – Vitel, 2001). Deux mégaséquences, l'une Eocène supérieur – Oligocène inférieur, et l'autre Miocène de moindre puissance, sont distinguées (Gerbe et al., 1998), démarquant la sédimentation du Forez de celle de la Limagne d'Allier (Clermont-Ferrand). Le jeu majeur des failles normales du graben est rapporté à l'Oligocène (34 à 24 Ma), avec la fin des épisodes sédimentaires importants au Miocène (vers 10 Ma).

I.2.5 Monts du Lyonnais (Fig. 3 et 4)

Les Monts du Lyonnais font partie de l'unité des gneiss supérieurs. Ils constituent un ensemble cristallophyllien de plus haut degré métamorphique que le Pilat, structuré par d'importantes failles de direction générale NE-SW (Peterlongo, 1960).

La série comprend des gneiss à reliques de haute pression (éclogites, granulites, péridotites) qui marquent un stade initial de subduction continentale (Duthou et al., 1989 ; Lardeaux et al., 2001 ; Pitiot, 1984). L'évolution tectonométamorphique de cette zone interne de la chaîne hercynienne se poursuit dans le faciès granulite (450 Ma ; Duthou et al., 1981) lors du stade de collision continentale (raccourcissement NW-SE) et marque le début de l'exhumation des Monts du Lyonnais (anatexie au cœur de la série). L'évolution intra-continentale, correspondant à la fermeture du domaine océanique de la Brévenne, est marquée par une évolution rétrograde vers 380 Ma sous faciès amphibolite (Costa et al., 1989). La fin de l'évolution est soulignée par la mise en place de granites syn-cinématiques vers 332 ± 10 Ma (Gay et al., 1981). Le stade final est associé à la fracturation houillère.

Au Nord des Monts du Lyonnais se trouvent les formations métamorphiques volcano-sédimentaires de la Brévenne et de Violay. Cette unité à caractère ophiolitique a été créée en environnement sub-marin (intercalations calcaires récifaux – laves acides et tufs anthracifères), avant d'être déformée dans le faciès schistes verts. Les associations pétrologiques et géochimiques rencontrées sont actuellement connues dans les zones d'extension arrière-arc (Faure et al., 2002). L'unité de la Brévenne est charriée sur les Monts du Lyonnais par l'intermédiaire d'un chevauchement, balisé par des granites syntectoniques se sont mis en place (faille du Grand Chemin à 340-345 Ma – $^{39}Ar/^{40}Ar$; Costa et al., 1990).

I.2.6 Monts du Forez (Fig. 3 et 4)

Limités au Nord par la dépression de Noirétable, au SW par le bassin d'Ambert, au Sud par la vallée de la Loire et à l'Est par la limagne du Forez, les Monts du Forez constituent un ensemble structuré en horst, principalement formé par les granites du dôme du Velay.

Les monts du Forez se scindent en deux sous-ensembles : Forez Nord et Forez Central. Le Forez central est une apophyse septentrionale du dôme du Velay (granites et migmatites), bordé à l'Est par son encaissant gneissique. Les sommets sont riches en diorite (Pierre sur Haute), les versants en granite à deux micas et les fonds de vallée ou dépressions en granite d'anatexie (Chalmazel). Un âge moyen de 370 ± 73 Ma est proposé par Clavaud et Ratsimba (1972) pour le granite du Forez, les roches anatectiques étant rapportées entre 440 et 400Ma, en accord avec les âges obtenus sur le granite du Velay (385 ± 22 Ma ; Vachette et al., 1971) et les migmatites du centre Velay (477 ± 27 Ma ; Vachette et al.,1971).
Cet ensemble interne est entouré de granites dits péri-Forez, appartenant à deux types principaux (Barbarin, 1983) : 1) granites à biotite, souvent porphyroïdes, d'origine mixte crustale majoritaire et mantellique (enclaves de diorite) ; 2) granites à deux micas issus de la croûte moyenne.
Au SW, jouxtant la terminaison du bassin houiller de Saint-Etienne, se trouvent le granite alcalin leucocrate de Chambles (297 ± 9 Ma ; Roig et Faure, 1995) et le pluton de St-Just, granite calco-alcalin intrusif plus ancien (Couette, 2000).
Au Nord d'une importante faille mylonitique (faille de l'Hermitage), le panneau de granite de Sail est imbriqué dans un ensemble dévono-dinantien (conglomérats, passées amphiboliques et quartzeuses), relais entre le socle du Forez et les microgranites d'Urfé plus au Nord.

I.2.7 Seuil de Neulise (Fig. 3 et 4)

Il est situé au Nord du graben du Forez, entre Monts du Forez et Monts du Lyonnais. C'est une structure allongée NE-SW qui résulte d'une activité tectonique au Viséen moyen. Un rift continental fut alors progressivement comblé par les produits d'épisodes volcaniques acides successifs, auxquels sont associés quelques microgranites potassiques filoniens.

I.2.8 Bassin de Roanne (Fig. 3 et 4)

Le bassin forézien étant émergé au Mésozoïque (pénéplénation sous climat aride semi-désertique), les seuls témoins de la sédimentation secondaire dans la Loire sont situés au Nord du département, dans le graben de Roanne (région de Charlieu). Ces séries marines calcaires à marneuses s'étagent du Lias (205 Ma) au Bajocien (165 Ma). Au Tertiaire, tout comme le graben du Forez, la plaine du Roannais a connu une phase extensive avec un comblement par des séries sédimentaires à affinité continentale, comparables à celles précédemment décrites.

I.2.9 Formations récentes

Si les épisodes tectoniques et sédimentaires majeurs sont actuellement en phase de rémission dans le graben du Forez, une sédimentation quaternaire active est apportée par le fleuve Loire. Les sédiments alluviaux présentent des galets de basalte, phonolite, quartz, granite et roches métamorphiques (Larqué et Weber, 1969). Six niveaux de terrasses sont connus sur la rive droite de la Loire, s'étageant du Quaternaire ancien à l'Actuel et marquant cinq phases de creusement sur une puissance totale de 75m (Couette, 2000 ; Le Griel, 1984).

Au Pliocène (2 Ma), des langues glaciaires se sont installées sur les Monts du Forez, principalement dans les hautes vallées du Lignon et de Chorsin (affluent du Vizézy). Le massif du Pilat, moins haut, n'a connu que des phénomènes d'érosion périglaciaire et de gélifraction liés à la présence de névés. Les gneiss leptynitiques, fragmentés par les alternances cycliques de gel/dégel, ont donné des chirats. Ces formations particulières (ou tabliers de blocs ; Etlicher, 2005) recouvrent la bordure orientale du MCF jusqu'en Ardèche, au-delà de 800m d'altitude. Vers l'aval, les chirats viennent en recouvrement des formations de type arène, et se distinguent par une absence de matrice silteuse. La porosité des roches constituant les chirats est faible (pores majoritairement inférieurs à 5000Å ; Etlicher, 2005).

Ces altérations récentes ont initié le développement de sols formés à partir de l'arénisation du socle. Ainsi les cours supérieurs des rivières étudiées traversent des bassins versants où dominent les nappes d'arènes perchées peu profondes, susceptibles de connaître d'importantes variations de leur niveau par battement de la zone vadose.

I.3 FORMATIONS GEOLOGIQUES ET CONTRAINTES SUR LES AQUIFERES

Cette étude a deux buts principaux. Le premier est d'essayer de définir les caractéristiques (chimie, aire de recharge, temps de résidence) des eaux de surface à partir de contraintes apportées par l'étude des précipitations locales. Le second est l'étude d'eaux minérales du département de la Loire, en utilisant le signal chimique et géochimique des eaux de surface. Les points de prélèvements d'eaux de surface durant les trois années d'échantillonnage sont situés dans le massif du Pilat (cf I.2.1 ; bassin versant du Furan), dans les Monts du Forez et leur débouché dans le graben (cf I.2.6). Les eaux minérales échantillonnées sont situées soit en limite du graben, soit en son sein. Ces localisations différentes des ressources hydriques peuvent en partie trouver leur origine dans la topographie variée du département. Les reliefs ont en effet une influence sur les quantités de précipitations reçues annuellement (chapitre II), mais aussi sur les types d'aquifères rencontrés (chapitres III et IV).

Les reliefs les plus affirmés sont en domaine cristallin, seuls les Monts du Forez et du Pilat dépassant 1000m. A l'Ouest, les monts du Forez culminent à 1634m (Pierre-sur-Haute), puis s'abaissent rapidement vers l'Est, donnant une retombée de 900m en 10 à 15km (Clavaud et Ratsimba, 1972). Le réseau hydrographique suit de profonds couloirs faillés, dictés par la structuration interne du massif, dont les principaux collecteurs sont les rivières Lignon, Vizézy et Curaize. La direction de fracturation NW est la direction majeure et permet le raccordement à la plaine, tandis que la direction NE-SW induit un découpage en "touches de piano" des granites (Clavaud et Ratsimba, 1972). Ces directions hercyniennes structurent également le massif du Pilat au Sud, qui culmine à 1434m (Crêt de la Perdrix). A l'Est de la plaine du Forez, les Monts du Lyonnais ont une altitude moyenne de 800m (sommet : Signal de St-André-la-Côte, 934m). La nature ouverte ou fermée de ces réseaux de fractures n'est malheureusement pas connue.

Deux types d'aquifères de surface existent dans le massif du Pilat (Batton-Hubert et Tardy, 1997), et par extension dans les Monts du Forez :

- des aquifères de type arène granitique, ponctuels et de faible envergure. Ce sont des nappes pelliculaires de quelques centimètres à quelques mètres d'épaisseur. Leur perméabilité moyenne s'étale entre 10 (recouvrement) et 100 mm/h (réservoir). Ces réserves permettent une alimentation gravitaire des sources, procurant de faibles débits : 0,1 à 40 m^3/h.
- des aquifères hétérogènes, où la circulation d'eau est conditionnée par une perméabilité de fissures et de fractures dans les granites.

La plaine du Forez et le graben de Roanne présentent pour leur part peu de variations topographiques, leur altitude moyenne étant proche de 400m. La protection par les reliefs bordiers donne un climat plus tempéré et de plus faibles précipitations (chapitre II). Les lithologies différentes ont pour conséquence l'existence d'aquifères sédimentaires plus importants que les aquifères sur nappe d'arène des reliefs. Plusieurs niveaux d'aquifères sableux, séparés par des niveaux argileux, sont reconnus en forage (forage de Montrond ; chapitre IV). Cette structuration verticale des aquifères, les caractéristiques thermiques de la zone (remontée de CO_2 profond), et la présente d'importantes failles en bordure de bassin, sont à mettre en relation avec l'existence d'eaux minérales (chapitre IV).

II. EAUX METEORIQUES

Cette partie est consacrée à l'étude isotopique des précipitations dans le département de la Loire, grâce aux relevés effectués sur trois pluviomètres, un dans la plaine du Forez et deux dans le massif du Pilat. Ces relevés permettent de préciser les caractéristiques météorologiques de la zone d'étude. Ils permettent également de définir les caractéristiques isotopiques (^{18}O, ^{2}H, ^{3}H) et chimiques des précipitations locales, afin de définir le signal d'entrée des aquifères de surface.

II.1 CLIMATOLOGIE

II.1.1 Dynamique et origine des masses d'air – cas général

Les précipitations sont issues de la condensation de vapeur d'eau transportée par la circulation atmosphérique globale. Sous les tropiques, l'air s'élève et se déplace vers des latitudes plus hautes (Fig. 8), où il se refroidit et s'enfonce, créant de larges cellules convectives (basses pressions à l'équateur et hautes pressions à 30° de latitude). Aux latitudes moyennes, les masses d'air subtropical chaudes s'élèvent au dessus des masses polaires froides (front polaire ; Fig. 8). Cette élévation provoque le développement d'anticyclones, qui produisent des pluies frontales lorsque l'air est refroidi à son point de rosée (point où l'humidité est de 100%). Ce refroidissement, causé par une expansion adiabatique de l'air chaud ascendant, intervient soit par décroissance de la pression atmosphérique avec l'altitude, soit par perte de chaleur par radiation (IHP vol.2, 2000). En été, des pluies formées par convection dans une atmosphère surchauffée (pluies convectives) peuvent également se produire.

Lors des interactions entre masses d'air thermiquement différentes, les précipitations sont engendrées soit par condensation d'air chaud (front chaud avec réchauffement et baisse de pression), soit par refroidissement et hausse de pression (front froid avec irruption d'air froid à l'arrière d'une perturbation).

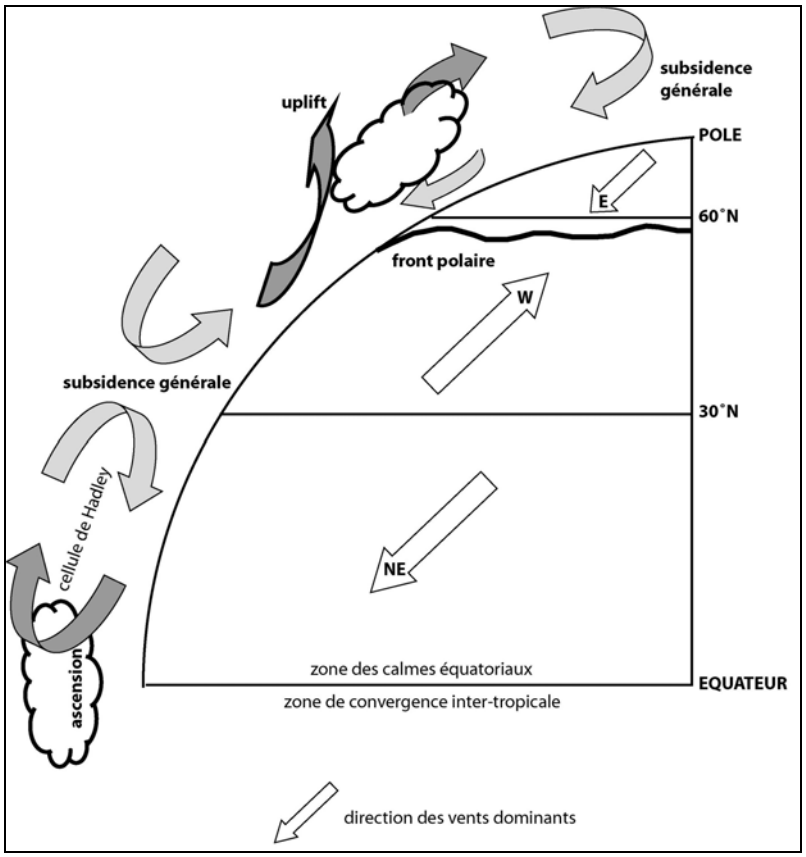


Fig. 8 : principe de la circulation atmosphérique générale dans l'hémisphère Nord, d'après Berner-Kay et Berner, 1987

Les circulations atmosphériques en Europe Occidentale sont régies par ces mécanismes, où alternent l'influence des anticyclones (zones de divergence chassant l'air dans le sens horaire) et l'influence des dépressions (zones de convergence aspirant l'air dans le sens anti-horaire). Les centres de dépression sont l'Islande, la Mer du Nord, le golfe de Gênes ; les centres anticyclonaires les Açores et le Nord Atlantique (Pedelaborde, 1982).

En France, les précipitations sont majoritairement issues des pôles Atlantique et Méditerranée. Dans le Massif Central, les précipitations au Sud-Est de Clermont-Ferrand (Ste-Marguerite, 340m d'altitude) reflètent l'origine variée des masses d'air (Jaffrezo, 1987 ; Colin, 1988 ; Négrel et Roy, 1998) : origine marine (W et SE-SW ; 79%), origine marine et continentale (NE-NW ; 16%), et en moindre importance continentale (Est ; 5%).

La répartition des précipitations est également fonction de la localisation et de l'altitude des stations de mesures, les reliefs connaissant fréquemment des pluies orographiques que les plaines expérimentent peu. Pour les stations méditerranéennes, les maxima de pluie sont en mars-avril et octobre-novembre, alors que ceux-ci sont décalés en juin et août dans les Alpes (e.g. station de Thonon). Examinons maintenant les caractéristiques de la zone d'étude.

II.1.2 Stratégie d'échantillonnage et climatologie du département

Trois sites (Fig. 9) ont fait l'objet de prélèvements journaliers des précipitations en vue d'une étude en isotopes stables oxygène et hydrogène : St-Just-St-Rambert (440m) depuis octobre 2000 ; Rochetaillée (770m) d'avril 2003 à janvier 2004 ; Tarentaise (1100m) de mars 2003 à janvier 2004. Le premier poste (pluviomètre d'ouverture 11cm) est situé à 20km au Nord du massif du Pilat, en partie Sud de la plaine du Forez. Les autres collecteurs sont placés dans le massif du Pilat pour essayer de documenter la variabilité isotopique des pluies en fonction de l'altitude. Des sous-estimations des quantités sont possibles lors des pluies sous vent fort (Court, 1960) et lors des épisodes neigeux (e.g. Fetter, 2001). Avant d'examiner les résultats isotopiques, examinons les caractéristiques climatiques du département de la Loire.

Le département est constitué de plusieurs entités climatiques (Fig. 9), coïncidant assez bien avec la mosaïque des formations géologiques et des reliefs (Fig. 3). L'hiver est la saison la plus sèche, conséquence du climat continental. Les périodes avril – mai et surtout octobre – décembre sont marquées par une forte pluviométrie (Météo France, 2004), dénotant l'influence d'épisodes méditerranéens importants, surtout dans le Sud du département. Les écarts de pluviométrie entre année pluvieuse et année sèche vont jusqu'à 40% (Météo France, 2004). Détaillons maintenant les caractéristiques propres à chaque domaine.

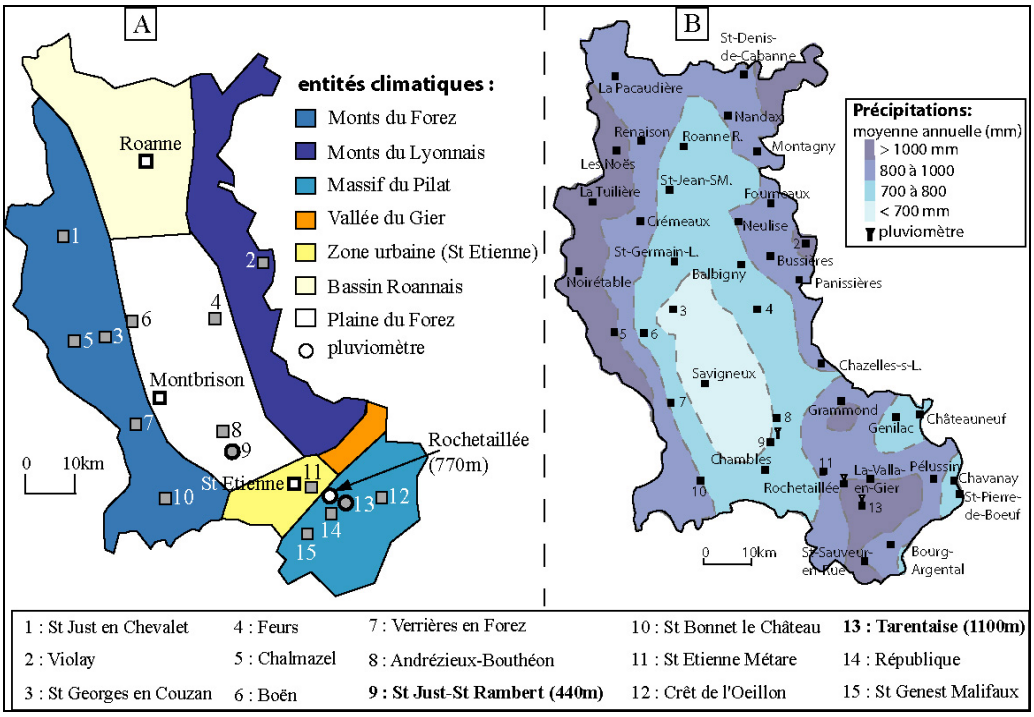


Fig. 9 : A : découpage climatique du département de la Loire ; B : précipitations annuelles (d'après http://www.meteo.fr); les données pluviométriques des 38 stations sont données en annexe (Fig. A.1)

II. 1.2.1 Plaine du Forez (Fig. 9 et A.1)

La plaine du Forez est abritée des régimes océaniques par les Monts du Forez, protégée des flux de Sud par le massif du Pilat et des courants de N-NW par le seuil de Neulise. Elle connaît des hivers froids et des étés chauds et secs, caractéristiques du climat continental. Les amplitudes thermiques sont importantes, de –1,4°C pour les minima de janvier à 25,8°C pour les maxima de juillet (station automatique Météo-France d'Andrézieux-Bouthéon ; n°8 Fig.9). Les précipitations moyennes sont définies par la normale pluviométrique 1973-2002 (Fig. A.1 d'après Gagnard, 2004) pour lisser les effets des sécheresses ou des épisodes torrentiels.
Pour Bouthéon (n°8 Fig. 9), la normale est proche de 700mm de précipitations par an, avec des extrêmes de 490mm en 1997 et 990mm en 1977. Les quantités mesurées à St Just – St Rambert (n°9 Fig. 9) entre 2001 et 2003 donnent une moyenne de 790mm, l'année la plus sèche (2003, 530mm) succédant à la plus humide de la période d'échantillonnage (2002, 970mm). Les températures minimale de janvier (1.7°C) et maximale d'août (21°C) ont une amplitude réduite car elles représentent uniquement la température de la pluie lors des précipitations.

II. 1.2.2 Monts du Forez (Fig. 9 et A.1)

Les Monts du Forez, qui se prolongent au Nord par les Monts de la Madeleine, forment une barrière engendrant un milieu continental affirmé, avec des hivers rigoureux et enneigés. La normale pluviométrique pour la station de Chalmazel (860m ; n°5 Fig. 9) est de 1130mm (min. : 800mm en 1985 ; max. : 1460mm en 1999), les quantités diminuant sur les contreforts : 760mm à St Georges en Couzan (500m; n°6 Fig. 9) avec des minima de 490mm en 1989 et maxima de 1000mm en 1981. L'amplitude thermique est semblable à celle de la plaine : –2,7°C (Chalmazel, janvier) à 24°C (juillet).

II. 1.2.3 Monts du Lyonnais (Fig. 9 et A.1)

Les Monts du Lyonnais, qui se poursuivent au Nord par les Monts du Beaujolais moins élevés, ont des reliefs doux aux versants Ouest bien exposés. Les étés sont moins chauds qu'en plaine (23,9°C en août à Violay, 830m ; n°2 Fig. 9) et les hivers moins rudes (–0,8°C en janvier) que dans les Monts du Forez. Les quantités précipitées (période 1993-2003 à Violay) sont en moyenne de 980mm, les extrêmes de 780mm en 1997 et 1080mm en 1994.

II. 1.2.4 Massif du Pilat (Fig. 9 et A.1)

Le massif du Pilat, au versant Nord froid et souvent enneigé l'hiver, peut connaître d'abondantes chutes de pluies en automne (cumul de 220mm les 01 et 02/12/2003). La station de La République (1048m ; n°14 Fig.15) reçoit en moyenne 1050mm par an (normale 1973-2002). Ce cumul est très voisin de celui de Tarentaise (1080mm à 1000m ; n°13 Fig.15), où les variations s'étagent de 710mm (1985) à 1390mm (2002). Les extrêmes de température relevés à La République s'étendent de –3,2°C (janvier) à 22,3°C (août).
Les deux pluviomètres installés à Rochetaillée (04/03 à 01/04) et Tarentaise – Les Palais (03/03 à 01/04) ont fourni des quantités respectives de 770mm et 875mm, ce qui fait de l'année 2003 l'une des plus sèches des trente dernières années. En année normale, Rochetaillée est plus arrosée que Tarentaise, bien qu'étant topographiquement plus basse. Ceci est lié à sa localisation sur une barre rocheuse Est-Ouest barrant la vallée Nord-Sud de la rivière Furan (Fig. 22). La situation de déficit pluviométrique relevé en 2003 ne s'est produite qu'à trois reprises entre 1973 et 2002.

II. 1.2.5 Ville de Saint-Etienne (Fig. 9 et A.1)

Les stations de l'agglomération donnent des résultats comparables entre 1999 et 2003. La température minimale de janvier est de –0,1°C, la maximale d'août 26,7°C. Les précipitations sont en moyenne de 870mm (714mm en 2003, 1060mm en 2002).

II. 1.2.6 Autres domaines (Fig. 9 et A.1)

Le découpage climatologique du département inclut aussi le bassin de Roanne, la vallée du Gier et la partie Est des monts du Pilat qui est caractérisée par un climat type vallée du Rhône, plus chaud. Ces trois ensembles sont cités pour mémoire, aucun prélèvement n'y ayant été effectué. Le Roannais et les contreforts de la vallée du Rhône sont arrosés de manière semblable (820 – 830mm par an en moyenne entre 1973 et 2002) ; la vallée du Gier, coincée entre les monts du Lyonnais et du Pilat, est moins humide (730mm).

II.1.3 Pluviométrie lors des années d'échantillonnage

Les échantillonnages ayant débuté au second semestre de l'année 2000, la répartition des précipitations (depuis 1998) a été étudiée à partir des Bulletins de Situation Hydrologique édités par le Réseau National des Données sur l'Eau (http://www.rnde.tm.fr/). Les données sont disponibles pour l'année hydrologique s'étendant de septembre à août de l'année suivante. Afin d'avoir une vision centrée sur les quantités d'eau disponibles pour la recharge des aquifères, ce sont les pluies efficaces (précipitations diminuées de l'évapotranspiration) qui servent de référence. Les traits marquants pour la plaine du Forez et les massifs limitrophes sont reportés dans le tableau suivant (Tab. 1) :

Septembre à Août	Pluies efficaces / Normale pluviométrique (%)	Normale de référence
1998 – 1999	110 à 130%	1946 – 1999
1999 – 2000	env. 100%, soit une quantité de pluie efficace de : 50-200mm en plaine 400-800mm massifs	1946 – 2000
2000 – 2001	110 à 130%, soit une quantité de pluie efficace de : 100-200mm en plaine 400-800mm massifs	1946 – 2000
2001 – 2002	jusqu'à 10% en plaine, soit une quantité de pluie efficace de : 0-25mm en plaine 100-600mm massifs	1946 – 2001
2002 – 2003	150 à 200% en plaine 100 à 130% sur les massifs	1946 – 2002
2003 – 2004	env. 130% (sommets) > 200% (plaine)	1946 – 2003

Tab. 1 : répartition des pluies efficaces dans le département de la Loire entre 1998 et 2003

Les études menées entre 2000 et 2003 sont donc marquées par des situations météorologiques et hydrologiques très contrastées. Si les premières années (2000, 2001) peuvent être qualifiées de normales, 2002 et 2003 sont particulières. Comme les données du tableau 1 sont présentées de septembre à août, les effets d'une sécheresse de plusieurs mois peuvent être masqués par une surabondance de pluviométrie intervenant en fin d'année météorologique (cas des périodes 2002 – 2003 et 2003 – 2004).

Pour s'affranchir de ce biais, l'utilisation des quantités de précipitations et des moyennes de températures mensuelles a été privilégiée entre janvier 1999 et fin décembre 2003 (Fig. 10). Sur les huit stations représentées (sept du réseau Météo France et une – Violay – particulière), les trois premières années sont conformes aux normales pluviométriques et de température. Les relevés de précipitations disponibles pour Chalmazel sont chaotiques (vent : Fetter, 2001 et problèmes de jauge signalés par Météo France).

Les températures minimales et maximales montrent une évolution synchrone, les variations saisonnières sont marquées (domaine continental). L'année 2002 (Fig. 10) connaît une pluviométrie supérieure à la moyenne pour l'ensemble des stations. Un excès de 100 à 130% (augmentation vers le Sud) est relevé en 2002, lié à un mois de novembre très arrosé (signalé par * dans la Fig. 10). A l'inverse, 2003 se singularise avec une période estivale plus chaude, associée à un important déficit pluviométrique : 10 à 25% pour l'ensemble de l'année, les pluies des 01 et 02 décembre (épisode de type cévenol) représentant à elles seules 18 à 24% du cumul annuel.

Le cadre climatique et les disparités géographiques étant maintenant définies, l'étude isotopique des précipitations va être abordée, toujours selon une optique cas général – application à la zone de travail.

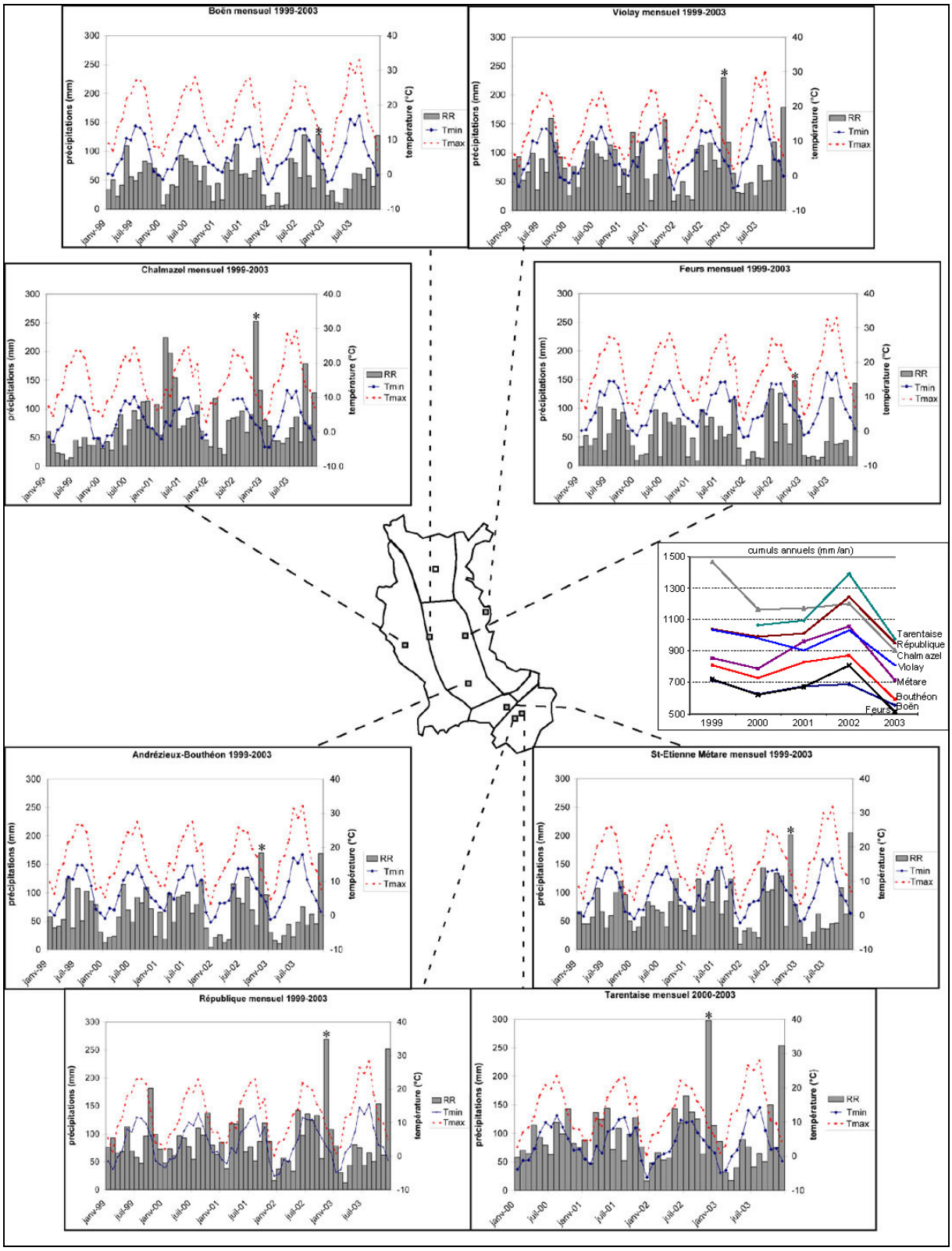


Fig. 10 : cumuls pluviométriques et températures minimales (Tmin) et maximales (Tmax) mensuelles entre 1999 et 2003 ; RR représente la quantité d'eau précipitée en mm ; le mois de novembre 2002 est indiqué par * ; la station de Chalmazel a connu des problèmes d'enregistrement en 1999 et 2000 (voir texte).

II.2 FRACTIONNEMENT ISOTOPIQUE AU SEIN DES MASSES D'AIR

Les variations isotopiques enregistrées par les précipitations sont le reflet de mécanismes générant des effets isotopiques lors des interactions vapeur d'eau – eau liquide. La distribution des isotopes stables de l'hydrogène et de l'oxygène est fortement dépendante du fractionnement existant entre les phases solide, liquide et vapeur. L'eau est un dipôle électrique, caractère lié à l'existence de liaisons hydrogènes dont la force dépend des isotopes engagés (e.g. Banton et Bangoy, 1999). Une liaison avec un isotope léger (^{16}O, ^{1}H) a une pression de vapeur plus faible qu'une liaison avec un isotope lourd (^{18}O, ^{2}H). En conséquence, lors d'une évaporation, le passage de la phase liquide à la phase vapeur est favorisé pour les molécules à contenu isotopique léger. La phase vapeur est ainsi enrichie en isotopes légers. L'énergie nécessaire à la conversion endothermique d'eau en vapeur (2,44 kJ/g à 15°C) est fournie par les radiations solaires et la chaleur de l'atmosphère. Le processus est inverse lors d'une condensation.

Mathématiquement, le fractionnement à l'équilibre entre liquide et vapeur est décrit par un coefficient de fractionnement α (e.g. O'Neil, 1986) :

$$\alpha_{l\text{-}v} = R_l / R_v = (1000 + \delta_l) / (1000 + \delta_v)$$

où les indices l et v se réfèrent aux phases liquide et vapeur ; les notations δ caractérisent la signature isotopique des deux phases (cf annexes méthodologie). Une autre expression est celle de l'enrichissement isotopique $\varepsilon_{l\text{-}v}$ (en ‰) de la phase liquide (l) par rapport à la phase vapeur (v), définit comme suit :

$$\varepsilon_{l\text{-}v} = (\alpha_{l\text{-}v} - 1) * 1000$$

Les fractionnements isotopiques à l'équilibre étant caractérisés par des valeurs très légèrement supérieures à l'unité (α = 1,00XX), le terme $\alpha_{l\text{-}v} - 1$ tend vers des valeurs très faibles, d'où l'approximation suivante :

$$\alpha_{l\text{-}v} - 1 \cong \ln \alpha_{l\text{-}v}$$

Il vient alors :

$$\varepsilon_{l\text{-}v} \cong 1000 * \ln \alpha_{l\text{-}v} \cong \delta_l - \delta_v$$

La forte dépendance à la température ambiante des $\delta^{18}O$ des pluies a été établie par Dansgaard (1964) dans l'hémisphère Nord. Depuis, les enrichissements isotopiques à l'équilibre thermodynamique ont été déterminés expérimentalement (cf notamment Majoube, 1971) :

$$^{18}O/^{16}O : \quad \ln \alpha_{v\text{-}l} = -\ln \alpha_{l\text{-}v} = 2{,}0667 \cdot 10^{-3} + 0{,}4156 / T - (1{,}137 \cdot 10^{3}) / T^{2} \quad (T \text{ en } °K)$$

$$^{2}H/^{1}H : \quad \ln \alpha_{v\text{-}l} = -\ln \alpha_{l\text{-}v} = -52{,}612 \cdot 10^{-3} + 76{,}248 / T - (24{,}844 \cdot 10^{3}) / T^{2}$$

Lors d'une évaporation en conditions naturelles, l'existence d'une couche intermédiaire entre colonne d'eau et atmosphère ne permet pas toujours d'atteindre l'équilibre. Cette couche limite, en équilibre avec la colonne d'eau sous-jacente, est le siège d'un transport (cinétique) par diffusion moléculaire. De tels enrichissements cinétiques non à l'équilibre se produisent surtout si l'humidité est faible (Araguas Araguas, 2000) et leur effet s'ajoute à ceux du fractionnement à l'équilibre (l'indice cl représente la couche limite) :

$$\delta^{18}O_{l} - \delta^{18}O_{v} = \varepsilon^{18}O_{l\text{-}v} + \Delta\varepsilon^{18}O_{cl\text{-}v}$$

Couche limite et eau sont alors enrichies en espèces isotopiques lourdes. La dépendance à l'humidité h de ce fractionnement cinétique a été décrite par Gonfiantini (1986) selon :

$$\Delta\varepsilon^{18}O_{cl\text{-}v} = (\alpha^{18}O_{cl\text{-}v} - 1) \cdot 10^{3} = 14{,}2\ (1-h)\ ‰$$

$$\Delta\varepsilon^{2}H_{cl\text{-}v} = \Delta\varepsilon D_{cl\text{-}v} = (\alpha^{2}H_{cl\text{-}v} - 1) \cdot 10^{3} = 12{,}5\ (1-h)\ ‰$$

Cette dépendance a des effets notables sur la pente et l'ordonnée à l'origine des droites des eaux météoriques. Les déterminations de droites locales des eaux et de corrélations à diverses échelles de temps, qui seront abordées ultérieurement (cf II.4), ne sont pas les seuls enseignements apportés par les mesures des rapports isotopiques $\delta^{18}O$ et δD. Ceux-ci sont influencés par plusieurs facteurs, dont certains vont maintenant être abordés.

II.3 FACTEURS CONTROLANT LA COMPOSITION ISOTOPIQUE

Six effets principaux ont une incidence sur les signatures isotopiques des pluies. Ce sont 1) la température atmosphérique ; 2) la latitude du point d'échantillonnage, ces deux points étant inter-dépendants ; 3) la distance à la mer de ce point ; 4) son altitude ; 5) la période de l'année examinée ; et 6) en moindre mesure sous nos latitudes les quantités précipitées. De plus, afin de biaiser le moins possible les compositions isotopiques (ré-évaporations éventuelles en été), la collecte s'est effectuée le plus tôt possible après chaque précipitation. La composition isotopique est considérée comme reflétant celle de la pluie à échelle locale (quelques kilomètres carrés ; Mook et al., 1974), la soustraction à l'influence atmosphérique étant rapide (Jacob et Sonntag, 1991 ; Araguas Araguas, 2000).

II.3.1 Effets de la température

Ils sont associés à la thermodépendance des processus d'échange isotopique (à l'équilibre ou cinétique). Ceci est prédit par les modèles, notamment par condensation de Rayleigh avec refroidissement isobarique des masses d'air (Rozanski et al., 1993). La pente de la relation T – $\delta^{18}O$ augmente quand la température de condensation du nuage diminue. La moyenne européenne de l'effet de température est de 0,59‰ /°C en $\delta^{18}O$ (Tab. 2), entre 0 et 20°C.

Les variations de température et de composition isotopique montrent, à échelle mensuelle ou annuelle, des corrélations assez nettes (Tab. 2), qui masquent les irrégularités provoquées par variations physiographiques (EIH, 2001). Au pas de temps journalier, les corrélations sont médiocres, avec une forte influence des empreintes du climat et des masses d'air. Ces influences peuvent être atténuées en considérant uniquement les évènements pluvieux importants (volume supérieur à 5mm), moins sensibles à l'évaporation. La dépendance à la température est plus importante en été (faibles volumes et évaporation des gouttes en atmosphère sèche) qu'en hiver, période où la signature des pluies n'est pas dépendante des conditions atmosphériques des zones de précipitation.

Lieu	Relation δ - T	Référence
stations océaniques froides de l'IAEA	$\delta^{18}O = 0,695 * T_{annuelle} – 13,6‰$ $\delta^{2}H = 5,6 * T_{annuelle} – 100‰$	Dansgaard, 1964
30 ans de mesures IAEA	$\delta^{18}O = 0,59 (\pm 0,08) * T_{annuelle} – 14,24‰$	Rozanski et al, 1992
	$\delta^{18}O = 0,338 (\pm 0,028) * T_{mensuelle} – 11,99‰$	Yurtsever et Gat, 1981
GNIP	$\delta^{18}O = 0,521 (\pm 0,014) * T_{mensuelle} – 14,96 (\pm 0,21)‰$	Yurtsever, 1975
Thonon, pluies > 5mm	$\delta^{18}O = 0,51\ T_{pluie} – 13,83 (\pm 2,57)$ (n=109 ; r^2=0,76)	Blavoux, 1978
Avignon, pluies > 5mm	$\delta^{18}O = 0,44\ T_{pluie} – 14$ (n=24 ; r^2=0,83)	Freslon, 1980
Ventoux, pluies > 5mm	$\delta^{18}O = 0,32\ T_{pluie} – 10,78$ (n=38 ; r^2=0,62)	Lastennet, 1994
Avignon	$\delta^{18}O = 0,24\ T_{pluie} – 8,79$ (n=118 ; r^2=0,47)	Celle, 2000
Avignon, pluies > 5mm	$\delta^{18}O = 0,33\ T_{pluie} – 10,97$(n=118 ; r^2=0,57)	Celle, 2000
Carpentras	$\delta^{18}O = 0,23\ T_{pluie} – 8,6$ (n=110 ; r^2=0,42)	Celle, 2000
Carpentras, pluies > 5mm	$\delta^{18}O = 0,32\ T_{pluie} – 10,87$ (n=110 ; r^2=0,52)	Celle, 2000

Tab. 2 : relations entre températures atmosphériques et signatures isotopiques des précipitations

Les corrélations $\delta^{18}O$ et δD – température relevées dans la zone d'étude sont reportées dans le tableau 3. Les corrélations journalières sont mauvaises (cf infra). Néanmoins, les tendances suivantes se dégagent :

- la thermodépendance des échanges isotopiques est variable dans le temps et l'espace ;

- les variations en $\delta^{18}O$ et δD montrent une thermodépendance renforcée en été par évaporation dans une atmosphère sèche et chaude ;
- les effets de la température sont d'autant plus forts que l'altitude augmente ;
- les erreurs constatées sur les pentes et ordonnées à l'origine sont améliorées par les corrélations mensuelles et annuelles, qui lissent l'impact des pluies par pondération avec la quantité précipitée ;
- la prise en compte des évènements pluvieux importants (> 5mm) n'améliore pas la corrélation pour St-Just-St-Rambert, mais l'améliore pour Tarentaise ;
- la prise en compte des températures des précipitations ou des températures atmosphériques fait apparaître une différence pour les corrélations r^2, tandis que les corrélations MSWD (Mean Square of Weighted Deviates ; cf II.4.2) sont similaires ;
- en moyenne mensuelle, les effets de température sont proches pour les deux stations étudiées et sont (régression MSWD) :
    - St-Just-St-Rambert (44 mois ; Fig. 11) :
        - $\delta^{18}O = 0,49\ T – 13,7$
        - $\delta D = 3,76\ T – 100$
    - Tarentaise (10 mois) :
        - $\delta^{18}O = 0,47\ T – 14,3$
        - $\delta D = 4,7\ T – 101$

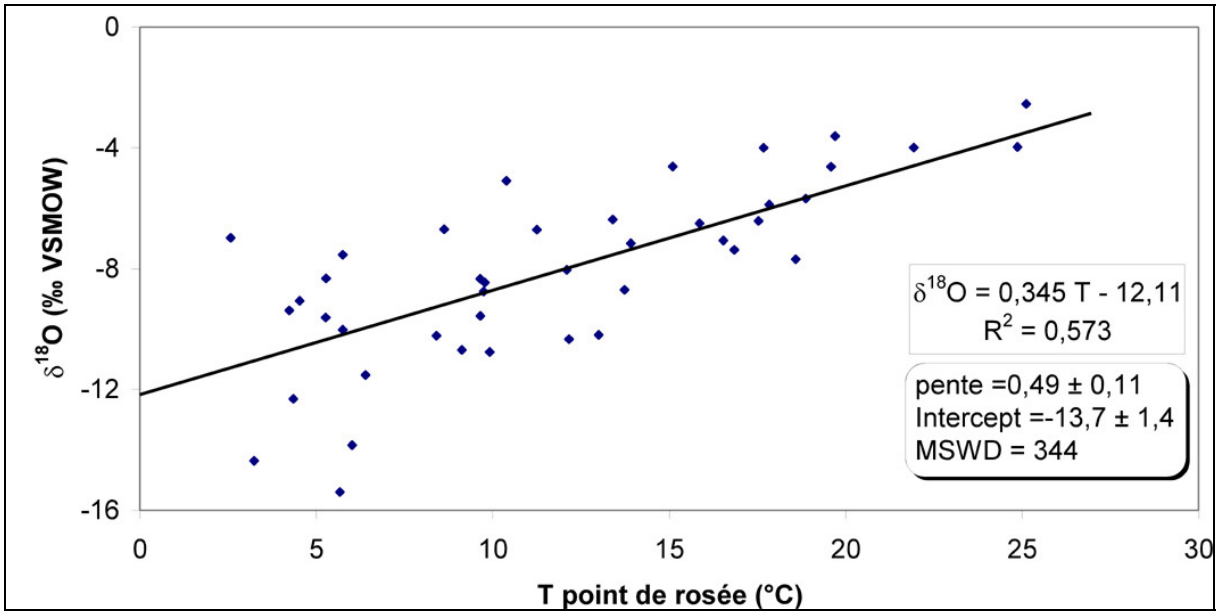


Fig. 11 : relation $\delta^{18}O$ – température mensuelle (point de rosée) pour St-Just-St-Rambert

Site	Evènements observés	Régression linéaire	Régression "Mean Square Weighted Deviates"
St-Just-St-Rambert données journalières	**toutes pluies**	$\delta^{18}O$ = 0,415 T – 12,31 r^2 = 0,439 ; n = 277	$\delta^{18}O$ = 0,691 (± 0,075) T – 15,51 (± 0,96) MSWD = 737 ; n = 277
		δD = 2,975 T – 88,16 r^2 = 0,375 ; n = 277	δD = 5,96 (± 0,73) T – 122,5 (± 9,2) MSWD = 551 ; n = 277
	pluies > 5mm	$\delta^{18}O$ = 0,446 T – 13,31 r^2 = 0,439 ; n = 154	$\delta^{18}O$ = 0,74 (± 0,11) T – 16,4 (± 1,3) MSWD = 664 ; n = 154
		δD = 3,278 T – 95,79 r^2 = 0,366 ; n = 154	δD = 6,6 (± 1,1) T – 131 (± 13) MSWD = 539 ; n = 154
St-Just-St-Rambert données mensuelles	**toutes pluies**	$\delta^{18}O$ = 0,345 T – 12,11 r^2 = 0,573 ; n = 44	$\delta^{18}O$ = 0,49 (± 0,11) T – 13,7 (± 1,4) MSWD = 344 ; n = 44
		δD = 2,6 T – 87 r^2 = 0,56 ; n = 44	δD = 3,76 (± 0,9) T – 100 (± 11) MSWD = 217 ; n = 44
	toutes pluies ; T St-Just pondérée	$\delta^{18}O$ = 0,357 T – 12,07 r^2 = 0,565 ; n = 44	$\delta^{18}O$ = 0,51 (± 0,12) T – 13,7 (± 1,5) MSWD = 347 ; n = 44
		δD = 2,65 T – 86,3 r^2 = 0,537 ; n = 44	δD = 3,96 (± 0,98) T – 100 (± 12) MSWD = 227 ; n = 44
	toutes pluies T prise à Bouthéon	$\delta^{18}O$ = 0,261 T – 10,85 r^2 = 0,441 ; n = 44	$\delta^{18}O$ = 0,46 (± 0,13) T – 13,1 (± 1,6) MSWD = 273 ; n = 44
		δD = 2,11 T – 78,19 r^2 = 0,426 ; n = 44	δD = 3,9 (± 1,2) T – 98 (± 14) MSWD = 195 ; n = 44
	toutes pluies hiver	$\delta^{18}O$ = 0,219 T – 9,98 r^2 = 0,401 ; n = 23	$\delta^{18}O$ = 0,45 (± 0,19) T – 12,9 (± 2,5) MSWD = 284 ; n = 23
		δD = 1,78 T – 72,35 r^2 = 0,386 ; n = 23	δD = 3,6 (± 1,8) T – 94 (± 23) MSWD = 212 ; n = 23
	toutes pluies été	$\delta^{18}O$ = 0,354 T – 12,36 r^2 = 0,59 ; n = 21	$\delta^{18}O$ = 0,49 (± 0,17) T – 13,9 (± 2,1) MSWD = 194 ; n = 21
		δD = 3,13 T – 93,14 r^2 = 0,612 ; n = 21	δD = 4,2 (± 1,4) T – 105 (± 17) MSWD = 142 ; n = 21
St-Just-St-Rambert données annuelles	**toutes pluies 2001-2003**	$\delta^{18}O$ = 0,545 T – 14,53 r^2 = 0,991 ; n = 3	$\delta^{18}O$ = 0,55 – (± 0,67) T – 14,6 (± 8,4) MSWD = 7 ; n = 3
		δD = 4,68 T – 110,91 r^2 = 0,9998 ; n = 3	δD = 4,68 (± 0,37) T – 110,9 (± 4,7) MSWD = 0,091 ; n = 3
Tarentaise données journalières	**toutes pluies**	$\delta^{18}O$ = 0,412 T – 12,39 r^2 = 0,387 ; n = 59	$\delta^{18}O$ = 0,77 (± 0,2) T – 15,6 (± 2,1) MSWD = 894 ; n = 59
		δD = 3,349 T – 86,35 r^2 = 0,371 ; n = 59	δD = 6,8 (± 2) T – 116 (± 21) MSWD = 661 ; n = 59
	pluies > 5mm	$\delta^{18}O$ = 0,385 T – 13,03 r^2 = 0,439 ; n = 32	$\delta^{18}O$ = 0,65 (± 0,22) T – 15,5 (± 2,5) MSWD = 847 ; n = 32
		δD = 2,76 T – 88,25 r^2 = 0,391 ; n = 32	δD = 5,4 (± 2) T – 113 (± 22) MSWD = 576 ; n = 32
Tarentaise données mensuelles	**toutes pluies**	$\delta^{18}O$ = 0,4 T – 13,51 r^2 = 0,74 ; n = 10	$\delta^{18}O$ = 0,47 (± 0,21) T – 14,3 (± 2,7) MSWD = 249 ; n = 10
		δD = 2,87 T – 91,95 r^2 = 0,737 ; n = 10	δD = 3,4 (± 1,5) T – 98 (± 20) MSWD = 140 ; n = 10
	toutes pluies T pondérée	$\delta^{18}O$ = 0,38 T – 13 r^2 = 0,636 ; n = 10	$\delta^{18}O$ = 0,5 (± 0,27) T – 14,2 (± 3,3) MSWD = 353 ; n = 10
		δD = 2,68 T – 87,72 r^2 = 0,611 ; n = 10	δD = 3,6 (± 2,1) T – 98 (± 25) MSWD = 209 ; n = 10

Tab. 3 : relations $\delta^{18}O$ – température (en °C) pour St-Just-St-Rambert et Tarentaise ; pour St-Just-St-Rambert, les températures sont soit la moyenne de la température de la pluie prise à St-Just-St-Rambert soit le point de rosée calculé à partir des données Météo-France d'Andrézieux-Bouthéon, distante de 5km de St-Just (T prise à Bouthéon) ; pour Tarentaise (25km de St-Just), la température prise est le point de rosée à la station Météo-France (située à 500m du point de prélèvement).

II.3.2 Effet de latitude

Il est en moyenne de –0,6‰ $\delta^{18}O$ par degré de latitude Nord en Europe (IHP vol.2, 2000). C'est le résultat d'un effet cumulé de la diminution des températures atmosphériques et de la situation géographique, le processus de distillation de Rayleigh approchant de son terme à mesure que la latitude croît. Il n'est pas quantifiable dans le cas de cette étude d'échelle spatiale trop restreinte.

II.3.3 Effet continental

Cet effet se traduit par un appauvrissement progressif des δ de la pluie avec l'augmentation de la distance à l'océan (IHP vol.1, 2000). Il résulte donc d'une soustraction progressive de l'humidité des masses d'air lorsqu'elles se déplacent dans les terres (Rozanski et al., 1993). Les précipitations des îles océaniques montrent les caractéristiques d'un premier condensat de la vapeur ($\delta^{18}O$ entre 0‰ et –5‰), avec des changements saisonniers faibles mais une dispersion assez grande des valeurs de l'excès de deutérium. En zone continentale, la variation saisonnière est plus prononcée. L'effet continental est fortement corrélé à la température, à la topographie et au régime climatique : 7‰ en hiver entre Irlande et Oural, un quart seulement de cette valeur en été (ré-évaporation des pluies ; Eichler, 1964). A l'échelle européenne, Rozanski (1982) a estimé un gradient de –2‰ $\delta^{18}O$ / 1000 km.

Le calcul du rapport *étalement de l'excès de deutérium / gamme de variation en ^{18}O* $\left(\frac{d_{max}-d_{min}}{\delta^{18}O_{max}-\delta^{18}O_{min}}\right)$ fournit également une approche de l'effet de continentalité. Proche de 2 pour les stations côtières, il diminue avec la continentalité (ex : 0,4 à Berlin, 0,7 à Vienne).

A échelle spatiale plus réduite, lors d'une étude de pluies dans le Vaucluse, Celle (2000) a mis en évidence l'effet de continentalité à partir d'observations d'images satellites, aussi bien pour des précipitations d'origine Atlantique appauvries par un long trajet que pour des pluies d'origine Méditerranée.

II.3.4 Effet d'altitude

C'est une accentuation de l'effet de continentalité se produisant au contact des reliefs. Comme la pression diminue avec l'altitude (–1,2% / 100m), une baisse de température plus forte est

nécessaire pour atteindre les conditions de pression de vapeur saturée (point de rosée) qu'en conditions isobares (effet latitudinal). Le refroidissement adiabatique résultant entraîne une condensation et des pluies orographiques, de plus en plus négatives, la vapeur s'appauvrissant en ^{18}O et ^{2}H par condensations successives (IHP vol.2, 2000). L'effet moyen est de –0,2‰ /100m en $\delta^{18}O$ et –1,5‰ /100m en δD, et décroît fréquemment avec l'altitude (influence des températures locales ; Tab. 4). Cet effet peut être renforcé par enrichissement évaporatoire des gouttes d'eau durant leur chute, qui est plus fort à basse altitude, où la base des nuages est plus élevée par rapport au sol. A l'inverse, les pluies orographiques sommitales peuvent réduire l'effet d'altitude en oblitérant les effets des pluies frontales (Gat et al, 1962).

Lieu	Relation $\delta^{18}O$ / 100m (‰)	Référence
Vaucluse (plaine – Ventoux)	–0,14 à –0,25	Celle, 2000
Mont Blanc	–0,5 (2000-5000m) ; calculé à partir δD et pente 8	Moser et Stichler, 1970
Espagne	–0,3	Andréo et al, 2004
Forêt Noire (Suisse)	–0,19 (250-1250m)	Dubois et Flück, 1984
piedmont alpin italien	–0,31 (500-2000m)	Bortolami et al, 1978
moyenne	–0,15 à –0,5	Araguas Araguas, 2000

Tab. 4 : appauvrissement des rapports isotopiques de l'oxygène par effet d'altitude

L'effet d'altitude dans la zone d'étude a été déterminé à partir des moyennes pondérées annuelles et saisonnières. Un récapitulatif est fourni dans le tableau suivant (Tab. 5).

	MOYENNES	HIVER		ETE		ANNUEL	
Année		**$\delta^{18}O$**	**δD**	**$\delta^{18}O$**	**δD**	**$\delta^{18}O$**	**δD**
2000 - 2004	**St-Just-St-Rambert**	-10,1	-73,1	-6,1	-40,6	-8,2	-57,6
2003	**Rochetaillée**	-13	-92,9	-6,8	-45,4	-9,3	-64,4
2003	**Tarentaise**	-12,8	-89	-7	-44,7	-9,6	-64,8
	GRADIENTS / 100m	**HIVER**		**ETE**		**ANNUEL**	
écart d'altitude (m)		**grad $\delta^{18}O$**	**grad δD**	**grad $\delta^{18}O$**	**grad δD**	**grad $\delta^{18}O$**	**grad δD**
310	**Tarentaise/Rochetaillée**	0,05	1,26	-0,06	0,20	-0,12	-0,15
350	**Rochetaillée/St-Just**	-0,83	-5,64	-0,20	-1,35	-0,31	-1,93
660	**Tarentaise/St-Just**	-0,41	-2,40	-0,13	-0,62	-0,22	-1,09

Tab. 5 : gradients d'altitude en δD et $\delta^{18}O$ (‰ VSMOW) entre les trois stations étudiées

Les gradients hivernaux sont très importants entre massif du Pilat et bordure de la plaine du Forez. Les précipitations neigeuses sont en effet plus fréquentes et abondantes dans le massif qu'à sa périphérie. Bien que Tarentaise soit à une altitude plus élevée, les gradients observés sont moins forts que pour Rochetaillée. Cette dernière connaît une plus grande pluviométrie

que Tarentaise (Fig. A.1), induite par une topographie accidentée, une importante barre rocheuse Est-Ouest bloquant les perturbations. Des pluies orographiques marquées s'y produisent sans doute, comme précédemment évoqué (Gat et al, 1962), même en 2003 (770mm de précipitations à Rochetaillée contre 820mm à Tarentaise).

La période estivale voit une réduction des variations des gradients d'altitude. La moyenne annuelle s'étend de –0,12 à –0,31‰ en $\delta^{18}O$ et de –0,15 à –1,9‰ en δD, proche des valeurs européennes (Araguas Araguas, 2000).

II.3.5 Effets saisonniers

Sous les latitudes moyennes, les précipitations sont isotopiquement appauvries en hiver et enrichies en été. Ces changements saisonniers des rapports isotopiques peuvent avoir diverses causes (Araguas Araguas, 2000 ; Rozanski et al., 1993) :

- un changement de température sur le site qui entraîne un changement de la quantité d'eau précipitable avec la saison :
    - période chaude : faible humidité et évaporation à la base du nuage donnant un $\delta^{18}O$ élevé et un excès de deutérium faible à négatif. La masse nuageuse n'est donc pas isotopiquement homogène (stratification) ;
    - période froide : forte humidité et températures basses : évaporation réduite, la pluie a la signature du nuage, qui présente une signature isotopique homogène, et les phénomènes d'échanges prédominent ;
- un changement de l'origine des masses humides ;
- l'humidité relative et la température durant l'évaporation de l'océan, principale source de vapeur atmosphérique (Gonfiantini, 1998) ;
- une variation des flux d'évapotranspiration, surtout pour les pluies en domaine continental.

II.3.6 Effet de quantité

L'effet de quantité est prépondérant dans les régions tropicales (IHP vol.1, 2000). Il existe également en Europe , durant des pluies convectives. Des changements allant jusqu'à –7‰ en 1 heure ont été mesurés. Cet effet, quantifiable en ayant recours à une analyse fractionnée d'évènements pluvieux (prélèvements horaires lors d'un épisode long), correspond à un

appauvrissement en isotopes lourds avec l'augmentation de la quantité de pluie précipitée. Lors des grosses averses, les stades successifs de condensation font appel à des parties de plus en plus hautes du nuage (donc plus froides) jusqu'en milieu d'averse (intensité maximale car le degré de condensation augmente avec le froid) : la température diminuant, les pluies sont graduellement appauvries. En début de pluie, les couches basses sont sollicitées et les pluies, en période sèche, sont enrichies par évaporation dans une atmosphère insaturée (Gat, 1980). En fin de pluie survient un ré-enrichissement lié à la perte d'altitude de la zone de formation des gouttes (Celle-Jeanton, 2001). Cet appauvrissement régulier jusqu'en milieu d'averse serait caractéristique des fronts froids, les fronts chauds et orages étant par contre caractérisés par des teneurs stables (Miyake et al., 1968).

II.3.7 Autres variations

Les moyennes $\delta^{18}O$ annuelles varient d'année en année, généralement de moins de 1‰ en climat tempéré, cet écart étant surtout provoqué par les variations de température annuelle (IHP, 2000).

II.4 RELATION $\delta^{18}O$ – δD (OU $\delta^{18}O$ – $\delta^{2}H$)

II.4.1 Cas général

Une pluie est produite par une baisse de température (cf II.1). Lorsque le point de rosée est dépassé, la vapeur d'eau se condense en pluie ou neige pour maintenir l'équilibre thermodynamique (Fig. 12). Les variables isotopiques mesurées dans les précipitations sont alors le résultat du processus de genèse de la vapeur et des phénomènes intervenants lors du transport de la masse d'air vers et sur le continent (Rozanski et al., 1993).

En atmosphère saturée, le fractionnement à l'équilibre dans le nuage, entre vapeur et phases condensées, enrichit préférentiellement la pluie (ou la neige) en isotopes lourds. La phase vapeur évolue donc vers des termes de plus en plus appauvris isotopiquement en ^{18}O et ^{2}H, conformément à une distillation de Rayleigh (condensation adiabatique). En conséquence leurs valeurs se déplacent le long d'une droite.

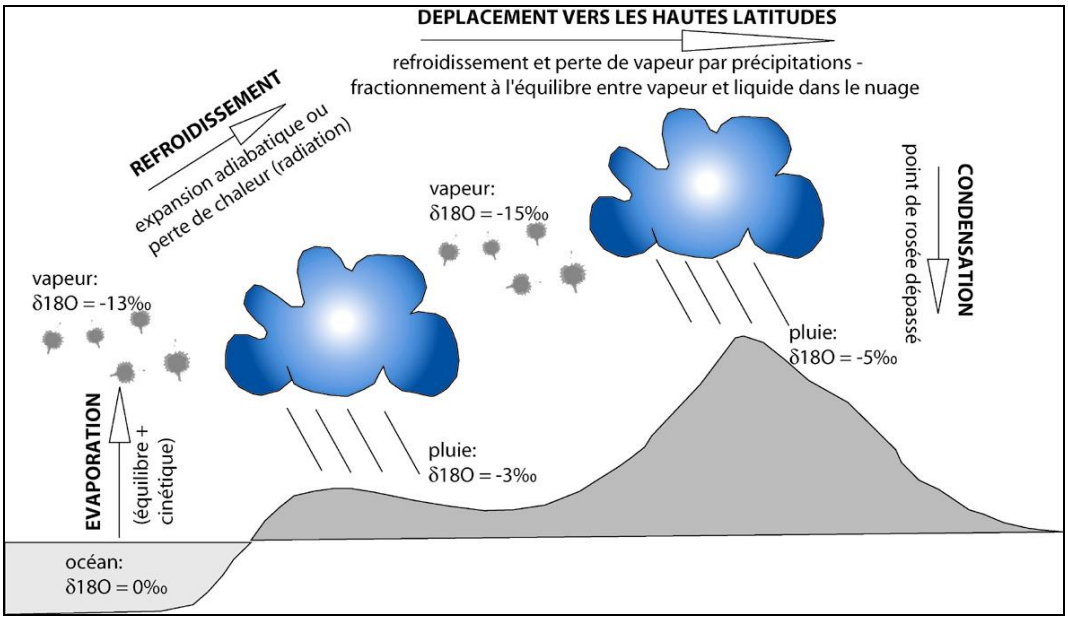


Fig. 12 : processus d'évaporation – transport – condensation des masses nuageuses et rapports isotopiques associés par fractionnement à 15°C et distillation de Rayleigh ; d'après White (1999) modifié.

Une relation linéaire entre rapports isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène est donc induite par la thermodépendance des fractionnements isotopiques à l'équilibre (II.2). Cette relation a été montrée par Friedman (1953) et établie par Craig (1961) à partir des données de stations réparties à travers le monde. Cette Droite des eaux Météoriques Mondiale (DMM ou Global Meteoric Water Line) a pour équation :

$$\delta D = 8\ \delta^{18}O + 10$$

Cette droite peut être considérée comme une mesure du degré moyen de "rain-out" d'une masse d'air donnée entre sa région source et le site où elle se transforme en précipitations.

La relation a été précisée en 1993 par Rozanski et coauteurs (stations du réseau GNIP : Global Network of Isotopes in Precipitation) :

$$\delta D = 8{,}17\ (\pm\ 0{,}06)\ \delta^{18}O + 10{,}35\ (\pm\ 0{,}65) \quad \text{(moyenne arithmétique ; } r^2 = 0{,}99 \text{ ; } n = 206)$$

$$\delta D = 8{,}20\ (\pm\ 0{,}07)\ \delta^{18}O + 11{,}27\ (\pm\ 0{,}65) \quad \text{(moyenne pondérée ; } r^2 = 0{,}98 \text{ ; } n = 205)$$

Ces relations sont reproduites aussi bien par des modèles de circulation atmosphérique générale que par des approches basées sur la condensation des masses d'air par processus de Rayleigh (Rozanski et al., 1993).

La pente est contrôlée par le rapport des coefficients de fractionnement isotopiques à l'équilibre du deutérium et de l'oxygène 18 (constante si condensation à l'équilibre dans un

milieu saturé). La pente est inférieure à 8 lorsque les gouttes de pluies subissent une évaporation lors de leur chute, ou sont affectées par des phénomènes de continentalité à haute latitude (vapeur très appauvrie).
L'ordonnée à l'origine (excès de deutérium) est fonction de la température de surface de la zone d'évaporation (donc de l'origine de la vapeur), de l'humidité de l'air, de la vitesse du vent, de la trajectoire des masses d'air et éventuellement de l'évaporation durant la chute des gouttes d'eau (Rozanski et al., 1993 ; IHP vol.2, 2000).
Pour des lieux géographiques donnés (quelques km²), pentes et ordonnées à l'origine peuvent varier de manière significative, en fonction des facteurs précédemment évoqués (Annexes Tab A.1 – réseau IAEA : Yurtsever et Gat, 1981 ; Rozanski et al., 1982 ; Gonfiantini et al., 2001 – réseau GNIP : Celle, 2000 ; Celle et al., 2000 ; IHP, 2000 – pourtour méditerranéen : Bortolami et al.,1978 ; Fouillac, 1991 ; Andréo et al., 2004).

Diverses droites des eaux météoriques vont être définies à partir des observations pluviométriques réalisées au cours de cette étude. Trois droites seront établies pour chaque point de prélèvement. Elles correspondent à des degrés variables de précipitation à partir d'une masse d'air ayant son propre caractère isotopique. La plupart du temps, les effets précédemment évoqués se combinent pour donner une droite de plus faible pente qu'une droite des eaux regroupant les données de plusieurs stations (IHP vol.2, 2000).

II.4.2 Droites locales des eaux météoriques

Les prélèvements des précipitations étant disponibles à un pas de temps journalier, les corrélations $\delta^{18}O$ – δD ont été étudiées dans un premier temps en utilisant chaque donnée disponible. Deux stratégies sont envisageables pour établir les corrélations :

- soit chaque point est considéré de manière individuelle : la relation entre les données est alors exprimée par régression linéaire. La qualité de la corrélation est représentée par un coefficient r^2, qui doit être proche de l'unité (corrélation considérée comme médiocre si $r^2 < 0,8$, indépendamment du nombre de données). Cette méthode a l'inconvénient de ne pas rendre compte des erreurs liées aux méthodes employées pour déterminer les rapports isotopiques (erreurs lors des extractions de gaz et lors de la mesure au spectromètre de masse ; cf annexes).

- soit il est fait appel à une corrélation intégrant les erreurs de mesure (à 2σ) : les corrélations établies permettent d'obtenir la barre d'erreur affectant les valeurs de la pente et de l'ordonnée à l'origine. La dispersion des données est indiquée par la somme des carrés des écarts (Mean Square of Weighted Deviates MSWD). C'est une mesure du rapport de la dispersion observée sur les points à la dispersion attendue en fonction des erreurs sur les mesures. Ce paramètre ne se compare pas à r^2 et n'est pas une mesure du degré de corrélation entre les points. Les calculs de MSWD ont été réalisés grâce à la macro Isoplot 2.49 de K. Ludwig (Berkeley Geochronology Center).

Deux équations sont donc données dans les tableaux récapitulatifs. Comme l'utilisation d'une régression intégrant les erreurs de mesure est préférable, les corrélations choisies sont définies à partir des erreurs maximales acceptées dans la littérature (Tab A.1). Toute droite possédant une erreur sur la pente supérieure à 0,5 (Celle-Jeanton et al., 2001) et une erreur sur l'ordonnée à l'origine supérieure à 4,5 (Gonfiantini et al., 2001) est considérée comme mal contrainte et non utilisée (en grisé dans Tab. 6).

II.4.2.1 Corrélations journalières

St-Just-St-Rambert est le site possédant la plus longue chronique : 312 évènements pluvieux ont été répertoriés du 02/10/2000 au 30/06/2004. 304 ont été analysés, et 19 de ces valeurs ont vu leur $\delta^{18}O$ ou leur δD recalculé à partir de la Global Meteoric Water Line (GMWL) de Craig (1961), pour être employées dans les pondérations mensuelles. Les déviations obtenues sont respectivement de 0,36 pour la pente et 3,1 pour l'intercept à l'origine (Fig. 13 et Tab. 6) :

$$\delta D = 7{,}8\ \delta^{18}O + 5{,}5$$

Cette droite des eaux a une pente très proche de la GMWL (Craig, 1961) et de la droite des eaux du Massif Central (Fouillac, 1991 ; Tab. A.1), avec une ordonnée à l'origine plus faible. En intégrant les erreurs sur ces deux paramètres, la droite obtenue est très semblable à celle relevée par Rozanski et coauteurs (1982) pour les stations européennes en période hivernale (Gonfiantini et al, 2001) (Tab. A.1).

Les corrélations (Tab. 6) obtenues à Rochetaillée (65 points) et Tarentaise (67 mesures) font ressortir une augmentation de la pente et de l'ordonnée à l'origine en fonction de l'altitude.

L'établissement d'une droite des eaux locales dans l'acception stricte de la définition peut être tenté en utilisant les données des trois stations (St-Just-St-Rambert, Rochetaillée et Tarentaise), distantes de 25km. En utilisant les données journalières, la régression est tout à fait semblable à la corrélation établie pour St-Just-St-Rambert : celle-ci a donc valeur de droite locale des eaux météoriques (DLM) :

$$\delta D = 7{,}82\ (\pm\ 0{,}25)\ \delta^{18}O + 6{,}9\ (\pm\ 2{,}3)$$

$$MSWD = 80\ ;\ n = 436$$

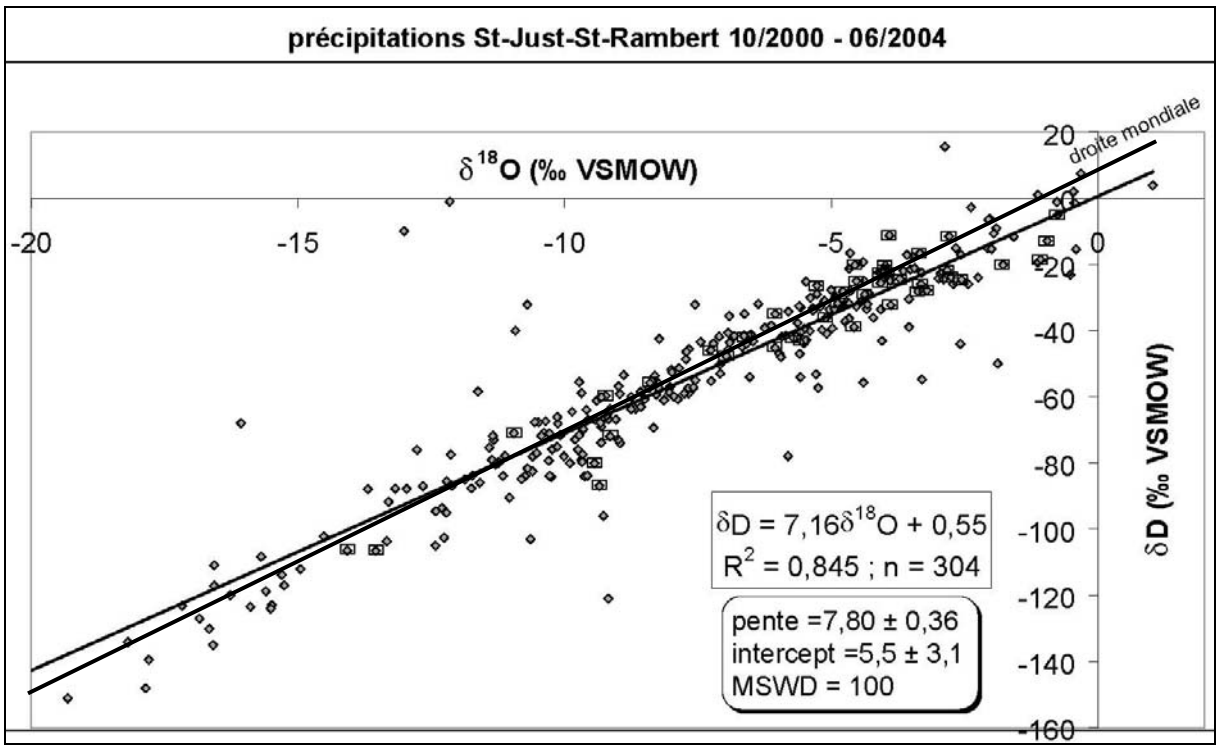


Fig. 13 : droite des eaux météoriques de St-Just-St-Rambert (données journalières) ; les orages sont indiqués par des losanges inclus dans un rectangle

Site	Evènements observés	Régression linéaire	Régression "MSWD"
St-Just-St-Rambert *(400m)* **données journalières**	toutes pluies	$\delta D = 7{,}16\ \delta^{18}O + 0{,}55$ $r^2 = 0{,}845$; n = 304	$\delta D = 7{,}8\ (\pm 0{,}36)\ \delta^{18}O + 5{,}5\ (\pm 3{,}1)$ MSWD = 100 ; n = 304
	toutes pluies sauf 2001	$\delta D = 7{,}48\ \delta^{18}O + 2{,}28$ $r^2 = 0{,}946$; n = 194	$\delta D = 7{,}69\ (\pm 0{,}26)\ \delta^{18}O + 3{,}8\ (\pm 2{,}1)$ MSWD = 34 ; n = 194
	pluies hors orages	$\delta D = 7{,}12\ \delta^{18}O + 0{,}25$ $r^2 = 0{,}831$; n = 241	$\delta D = 7{,}78\ (\pm 0{,}42)\ \delta^{18}O + 5{,}3\ (\pm 3{,}8)$ MSWD = 119 ; n = 241
	orages seuls	$\delta D = 7{,}52\ \delta^{18}O + 2{,}55$ $r^2 = 0{,}906$; n = 44	$\delta D = 7{,}9\ (\pm 0{,}77)\ \delta^{18}O + 4{,}6\ (\pm 4{,}7)$ MSWD = 34 ; n = 44
	pluies > 5mm	$\delta D = 7{,}29\ \delta^{18}O + 1{,}31$ $r^2 = 0{,}825$; n = 154	$\delta D = 7{,}96\ (\pm 0{,}56)\ \delta^{18}O + 6{,}9\ (\pm 5{,}2)$ MSWD = 267 ; n = 154
	pluies > 10mm	$\delta D = 6{,}98\ \delta^{18}O + 0{,}42$ $r^2 = 0{,}779$; n = 93	$\delta D = 7{,}95\ (\pm 0{,}86)\ \delta^{18}O + 8{,}9\ (\pm 8{,}2)$ MSWD = 135 ; n = 93
St-Just-St-Rambert **données mensuelles**	toutes pluies	$\delta D = 7{,}4\ \delta^{18}O + 3{,}1$ $r^2 = 0{,}946$; n = 44	$\delta D = 7{,}61\ (\pm 0{,}56)\ \delta^{18}O + 4{,}8\ (\pm 4{,}9)$ MSWD = 18 ; n = 44
	toutes pluies sauf 2001	$\delta D = 7{,}55\ \delta^{18}O + 4{,}2$ $r^2 = 0{,}982$; n = 30	$\delta D = 7{,}62\ (\pm 0{,}39)\ \delta^{18}O + 4{,}7\ (\pm 3{,}5)$ MSWD = 7,5 ; n = 30
	année 2001	$\delta D = 5{,}8\ \delta^{18}O - 7{,}9$ $r^2 = 0{,}737$; n = 11	$\delta D = 6{,}8\ (\pm 2{,}8)\ \delta^{18}O + 0\ (\pm 23)$ MSWD = 48 ; n = 11
	année 2002	$\delta D = 8{,}08\ \delta^{18}O + 9{,}05$ $r^2 = 0{,}966$; n = 12	$\delta D = 8{,}2\ (\pm 1{,}1)\ \delta^{18}O + 10{,}1\ (\pm 8{,}3)$ MSWD = 9 ; n = 12
	année 2003	$\delta D = 7{,}19\ \delta^{18}O + 0{,}95$ $r^2 = 0{,}989$; n = 12	$\delta D = 7{,}23\ (\pm 0{,}52)\ \delta^{18}O + 1{,}3\ (\pm 4{,}6)$ MSWD = 5 ; n = 12
Rochetaillée *(770m)* **données journalières**	toutes pluies (2003)	$\delta D = 7{,}74\ \delta^{18}O + 7{,}49$ $r^2 = 0{,}976$; n = 65	$\delta D = 7{,}84\ (\pm 0{,}3)\ \delta^{18}O + 8{,}3\ (\pm 2{,}9)$ MSWD = 19 ; n = 65
Rochetaillée **données mensuelles**	toutes pluies (2003)	$\delta D = 7{,}53\ \delta^{18}O + 5{,}61$ $r^2 = 0{,}983$; n = 10	$\delta D = 7{,}6\ (\pm 0{,}82)\ \delta^{18}O + 6{,}2\ (\pm 8{,}1)$ MSWD = 9 ; n = 10
Tarentaise *(1100m)* **données journalières**	toutes pluies (2003)	$\delta D = 7{,}97\ \delta^{18}O + 12{,}57$ $r^2 = 0{,}961$; n = 67	$\delta D = 8{,}13\ (\pm 0{,}39)\ \delta^{18}O + 14\ (\pm 4)$ MSWD = 34 ; n = 67
Tarentaise **données mensuelles**	toutes pluies (2003)	$\delta D = 7{,}46\ \delta^{18}O + 7{,}15$ $r^2 = 0{,}987$; n = 11	$\delta D = 7{,}51\ (\pm 0{,}65)\ \delta^{18}O + 7{,}6\ (\pm 6{,}6)$ MSWD = 7 ; n = 11
Synthèse *(3 stations)* **données journalières**	toutes pluies	$\delta D = 7{,}35\ \delta^{18}O + 3{,}14$ $r^2 = 0{,}887$; n = 436	$\delta D = 7{,}82\ (\pm 0{,}25)\ \delta^{18}O + 6{,}9\ (\pm 2{,}3)$ MSWD = 80 ; n = 436
Synthèse *(3 stations)* **données mensuelles**	toutes pluies	$\delta D = 7{,}36\ \delta^{18}O + 3{,}55$ $r^2 = 0{,}959$; n = 65	$\delta D = 7{,}53\ (\pm 0{,}39)\ \delta^{18}O + 5\ (\pm 3{,}6)$ MSWD = 106 ; n = 65

Tab. 6 : récapitulatif des différentes corrélations $\delta D - \delta^{18}O$ pour les trois sites de prélèvements des précipitations ; les corrélations ayant des erreurs supérieures aux limites fixées sont indiquées en grisé

II.4.2.2 Corrélations annuelles

Les compositions isotopiques mensuelles sont calculées par pondération de la valeur isotopique de chaque pluie par le rapport volume de la précipitation / cumul mensuel. Les corrélations établies pour St-Just-St-Rambert sur les trois années de chronique sont proches de celles établies avec les données ponctuelles non pondérées (Tab. 6).

Bien que conforme aux normales annuelles de précipitations et ne connaissant ni un nombre d'orages importants (Tab. A.2) ni des températures éloignées des normales, l'année 2001 se singularise nettement (points très dispersés sur la Fig. 13). Les points ne s'alignent pas sur une droite d'évaporation. Aucun paramètre météorologique enregistré ne permet d'expliquer la dispersion de certains points. L'explication pourrait venir de précipitations de fin de printemps plus abondantes, qui auraient une exposition forte à l'évaporation dans une atmosphère qui se réchauffe.

Les années 2002 et 2003, anormales en termes de quantités de pluie, admettent des corrélations plus classiques, les valeurs mensuelles étant moins dispersées. L'année 2002 ($\delta D = 8{,}08\ \delta^{18}O + 9{,}05$) est très proche de la droite des eaux mondiales. L'année 2003 ($\delta D = 7{,}19\ \delta^{18}O + 0{,}95$) possède une pente et une ordonnée à l'origine plus faibles, résultat d'une évaporation plus prononcée des gouttes d'eau lors de leur chute dans une atmosphère moins humide et plus chaude (12,8°C de moyenne annuelle en 2003 contre 12,2°C en 2002 et 11,6°C en 2001).

II.4.2.3 Corrélations saisonnières

Outre la prise en compte des précipitations en base de temps annuelle, il est fréquent de scinder les données entre hiver (octobre à mars) et été (avril à septembre) météorologiques (Tab. 7). Le principal effet visible sur les régressions est celui des variations de température associées aux cycles saisonniers (St-Just-St-Rambert). Les mois d'hiver s'alignent sur une corrélation proche de la DLM. Les étés, plus chauds, sont caractérisés par d'importants phénomènes évaporatoires : la pente diminue de 1,7 (7,82 – 6,1), l'excès de deutérium de presque –10‰ (–6,1–3,7 ; Tab. 7), soit une humidité relative chutant de presque 100% à 85–88% (Gonfiantini, 1986). Il n'a pas été noté de concomitance entre année fortement neigeuse et excès en deutérium ; par contre, l'année 2001 apparaît toujours comme particulière, avec une relation hivernale digne de mois d'été.

Pour les deux stations d'altitude (Rochetaillée et Tarentaise), ces calculs saisonniers ne sont possibles que pour l'été 2003 : ils traduisent la diminution de la température en fonction de l'altitude, Tarentaise donnant des pluies moins évaporées ($\delta D = 7{,}27\ \delta^{18}O + 6{,}08$).

Site	Evènements observés	Régression linéaire	Régression "MSWD"
St-Just-St-Rambert *(400m)* **données mensuelles**	**hiver météo**	**$\delta D = 7,66\ \delta^{18}O + 4,44$ $r^2 = 0,959$; n = 23**	**$\delta D = 7,82 \pm 0,73\ \delta^{18}O + 6,1 \pm 7,6$ MSWD = 9,4 ; n = 23**
	hiver 2000-2001	$\delta D = 8,78\ \delta^{18}O + 13,74$ $r^2 = 0,951$; n = 5	$\delta D = 9 \pm 2,8\ \delta^{18}O + 16 \pm 27$ MSWD = 9,5 ; n = 5
	hiver 2001-2002	$\delta D = 5,2\ \delta^{18}O - 14,1$ $r^2 = 0,62$; n = 6	$\delta D = 6,8 \pm 8,6\ \delta^{18}O - 1 \pm 72$ MSWD = 18 ; n = 6
	hiver 2002-2003	$\delta D = 7,5\ \delta^{18}O + 1,51$ $r^2 = 0,986$; n = 6	$\delta D = 7,56 \pm 1,2\ \delta^{18}O + 2,1 \pm 1,3$ MSWD =3,1 ; n = 6
	hiver 2003-2004	$\delta D = 7,53\ \delta^{18}O + 3,91$ $r^2 = 0,964$; n = 6	$\delta D = 7,7 \pm 2\ \delta^{18}O + 6 \pm 25$ MSWD = 10,3 ; n = 6
St-Just-St-Rambert données mensuelles	**été météo**	**$\delta D = 5,47\ \delta^{18}O - 7,27$ $r^2 = 0,824$; n = 21**	**$\delta D = 6,1 \pm 1,3\ \delta^{18}O - 3,7 \pm 8,2$ MSWD = 20 ; n = 21**
	été 2001	$\delta D = 3,4\ \delta^{18}O - 23$ $r^2 = 0,494$; n = 6	$\delta D = 4,6 \pm 4,5\ \delta^{18}O + 14 \pm 34$ MSWD = 42 ; n = 6
	été 2002	$\delta D = 6,98\ \delta^{18}O + 3,1$ $r^2 = 0,85$; n = 6	$\delta D = 7,6 \pm 4,2\ \delta^{18}O + 6 \pm 25$ MSWD = 15 ; n = 6
	été 2003	$\delta D = 5,9\ \delta^{18}O - 4,74$ $r^2 = 0,993$; n = 6	$\delta D = 5,91 \pm 0,5\ \delta^{18}O - 4,7 \pm 2,8$ MSWD = 0,9 ; n = 6
Rochetaillée *(770m)* **données mensuelles**	été 2003	$\delta D = 6,36\ \delta^{18}O - 2,1$ $r^2 = 0,929$; n = 6	$\delta D = 6,6 \pm 0,25\ \delta^{18}O + 0 \pm 17$ MSWD = 9,2 ; n = 6
Tarentaise *(1100m)* **données mensuelles**	été 2003	$\delta D = 7,27\ \delta^{18}O + 6,08$ $r^2 = 0,974$; n = 6	$\delta D = 7,4 \pm 1,7\ \delta^{18}O + 7 \pm 12$ MSWD = 3,6 ; n = 6
Synthèse *(3 stations)* **données mensuelles**	**hiver météo**	**$\delta D = 7,32\ \delta^{18}O + 1,81$ $r^2 = 0,955$; n = 32**	**$\delta D = 7,49 \pm 0,6\ \delta^{18}O + 3,7 \pm 6,7$ MSWD = 30 ; n = 32**
	été météo	**$\delta D = 5,84\ \delta^{18}O - 4,93$ $r^2 = 0,962$; n = 33**	**$\delta D = 6,35 \pm 0,9\ \delta^{18}O - 1,7 \pm 6$ MSWD = 126 ; n = 33**

Tab. 7 : récapitulatif des différentes corrélations $\delta D - \delta^{18}O$ pour les trois sites de prélèvements des précipitations en fonction des saisons météorologiques et calendaires ; l'hiver météorologique s'étend d'octobre à mars, l'été d'avril à septembre ; les corrélations ayant des erreurs supérieures aux limites fixées sont indiquées en grisé.

Connaissant les compositions isotopiques des précipitations, un autre paramètre est maintenant abordé et défini, l'excès en deutérium.

II.5 EXCES EN DEUTERIUM (TAB. A.2 A A.4)

Il a été défini par Dansgaard (1964) comme étant une valeur acquise lors de l'évaporation de l'eau de mer. Il est conservé durant le trajet de la masse nuageuse, les processus au sein des nuages ne modifiant pas significativement sa valeur (Rozanski et al., 1993). Cet excès en deutérium (d) est défini comme suit :

$$d = \delta D - 8\ \delta^{18}O$$

Il varie de manière saisonnière, avec un maximum en hiver. Gonfiantini (1998) rapporte ainsi, pour les stations comprises entre 30 et 60° de latitude Nord :

$$\text{été} : d = 5{,}8 \pm 0{,}5‰$$

$$\text{hiver} : d = 10{,}7 \pm 0{,}6‰$$

Cette saisonnalité est due à une humidité relative (h) de l'air en moyenne 10% plus basse en hiver (Merlivat et Jouzel, 1979), conséquence d'interactions réduites entre océan et masse d'air froide. Cette faible humidité relative renforce le fractionnement par diffusion durant le transport atmosphérique de la vapeur, et qui s'ajoute au fractionnement isotopique à l'équilibre à l'interface liquide – vapeur (Rozanski et al., 1993 ; Gonfiantini, 1998). L'excès de deutérium augmente ainsi avec (1–h) : d = 10‰ correspond à une humidité moyenne de 81%, caractéristique des perturbations océaniques à parcours atmosphérique simple (Celle, 2000). En hiver, les valeurs des excès en deutérium peuvent aussi augmenter par effet d'un fractionnement cinétique additionnel lors de la formation de neige (Rozanski et al., 1993).

Malgré le large spectre de valeurs d'excès de deutérium enregistré dans l'hémisphère Nord, il reste schématiquement possible de localiser l'origine des masses d'air en Europe de l'Ouest :

- $d \approx 10‰$: origine Atlantique
- $d \approx 22‰$: origine Méditerranée Est
- $d \approx 14‰$: origine Méditerranée Ouest

Les fortes valeurs enregistrées en Méditerranée sont liées à la formation de vapeur dans une mer quasi fermée (Araguas Araguas, 2000). A contrario, des valeurs inférieures à 10‰ peuvent indiquer des processus d'évaporation secondaire, notamment l'évaporation de gouttes tombant dans une atmosphère chaude et sèche.

Les excès de deutérium sont déterminés pour chacun des trois pluviomètres disposés dans la zone d'étude. Les valeurs journalières et mensuelles sont reportées en annexe (Tab. A.2 à A.4). La Fig. 14 présente les variations de l'excès de deutérium (moyenne mensuelle pondérée des quantités de précipitations) en fonction des saisons et de l'altitude. Les variations saisonnières (cf infra), avec des valeurs plus importantes en hiver (Rozanski et al., 1993), existent pour les années 2002 et suivantes. Par contre, l'année 2001 présente encore des évolutions erratiques et non corrélées aux variations de température.

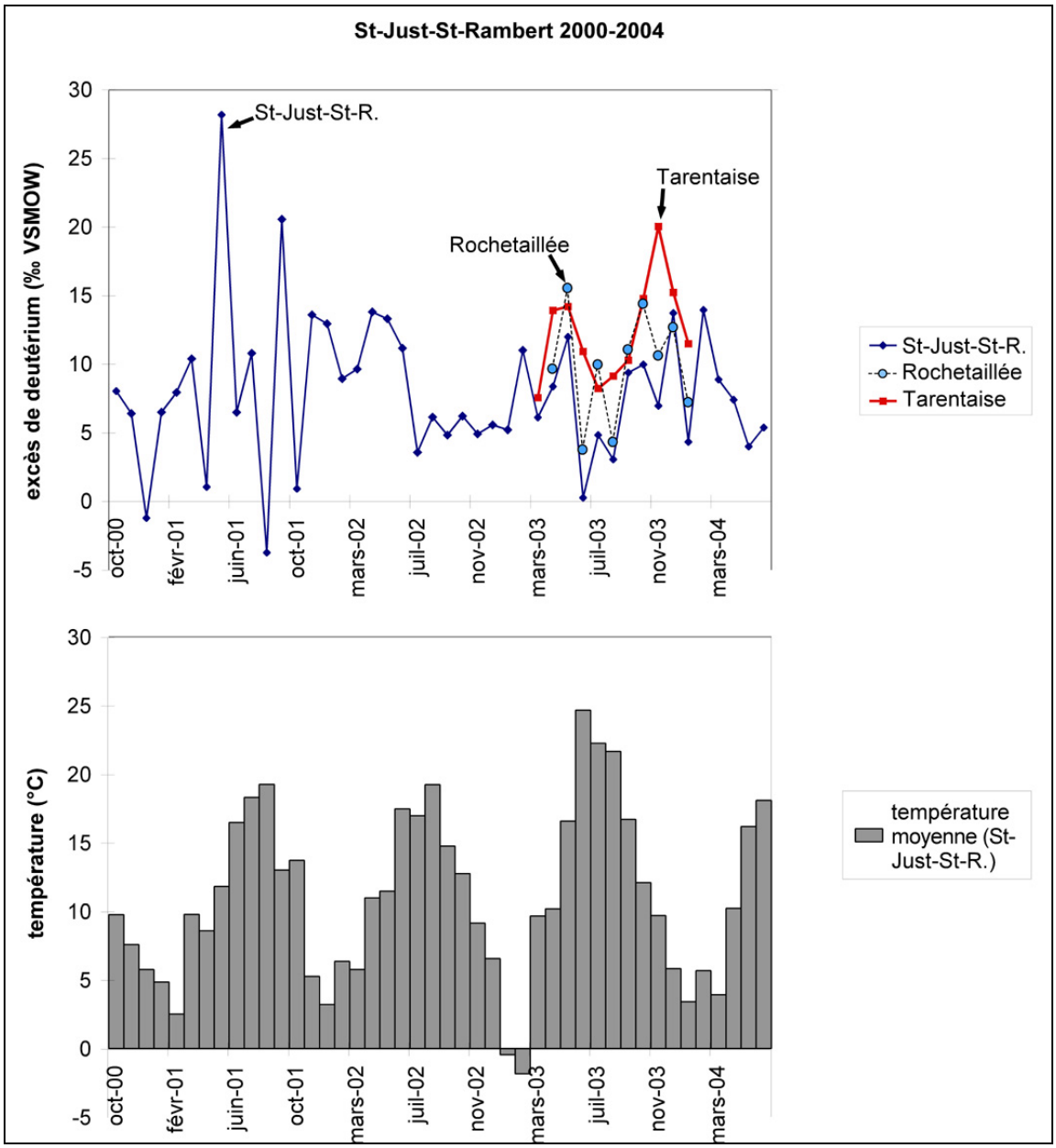


Fig. 14 : variations saisonnières de l'excès en deutérium pour les trois stations échantillonnées ; la température moyenne mensuelle en °C est prise à St-Just-St-Rambert et correspond à la température des précipitations

excès de deutérium (‰ VSMOW)	St-Just-St-Rambert (2000-2004)	Rochetaillée (2003)	Tarentaise (2003)		Brest (04/96 à 12/00)	Orléans (03/96 à 12/01)	Avignon (04/97 à 12/01)	Thonon (02/92 à 11/00)
Altitude (m)	*420*	*770*	*1080*		*80*	*109*	*21*	*435*
hiver	7,9 *(6,6°C)*	11,3 *(2,2°C)*	13,8 *(1,2°C)*		10,42	9,92	7,52	7,83
été	7,8 *(15,9°C)*	9,1 *(17,5°C)*	11,1 *(13,5°C)*		7,07	8,54	7,51	7,1
hiver sauf 2001	8,5							
été sauf 2001	6,9							
moyenne annuelle	**7,9**	**9,9**	**12,4**		**8,65**	**9,21**	**7,516**	**7,46**

Tab. 8 : moyennes saisonnières de l'excès de deutérium pondéré ; les valeurs pour Brest, Orléans, Avignon et Thonon sont calculées à partir des $\delta^{18}O$ et δD du réseau GNIP ; les températures saisonnières moyennes sont indiquées entre parenthèses.

L'augmentation selon l'altitude des excès en deutérium est aussi liée à des variations de température (Fig. 14 et Tab. 8). Les hausses varient de +0,57‰ /100m entre plaine et contreforts du Pilat à +0,8‰ /100m au sein du massif. Cette hausse de l'excès de deutérium avec l'altitude existe aussi pour les stations du réseau GNIP (http://isohis.iaea.org/GNIP.asp) de Thonon-les-Bains (435m) et Avignon (21m). Si la station la plus basse a des valeurs faibles, Thonon et St-Just-St-Rambert, proches en altitude, fournissent des excès similaires en hiver mais différents en été. Cette plus forte amplitude saisonnière à Thonon est probablement liée à une plus grande fréquence d'épisodes neigeux en hiver.

Compte tenu des valeurs mesurées, il s'avère difficile de déterminer l'origine des masses d'air de manière globale, les excès de deutérium moyens étant faibles par rapport aux valeurs classiquement rapportées. Toutefois, les stations de St-Just-St-Rambert et Rochetaillée semblent être plus influencées par des pluies à signature Atlantique que Tarentaise, où une influence Ouest-méditerranéenne est tangible.

Aucune tendance ne se dégage à l'échelle de l'évènement (Tab. A.2 à A.4) : de fortes valeurs d'excès de deutérium, attribuées à une origine méditerranéenne, sont calculées aussi bien en été qu'en hiver. La détermination de l'origine des masses d'air n'est donc possible qu'en ayant recours à des cartes météorologiques précises. Pour la station de Tarentaise, six situations météorologiques à excès de deutérium supérieur à 20 ont été analysées (10/04/03, 19/05/03, 20/05/03, 21/05/03, 24/10/03 et 28/11/03) à partir de cartes des nébulosités (www.noaa.gov) et de cartes des dépressions (www.lachainemeteo.com). Ces six évènements sont caractérisés par des dépressions centrées sur l'Atlantique et/ou le Nord Irlande, l'anticyclone des Acores étant au large du Portugal. L'enroulement des dépressions peut amener à un passage des nuages au dessus de la Méditerranée, ce qui pourrait expliquer les excès en deutérium plus forts de Tarentaise (station la plus haute et la plus méridionale). Cependant des excès de deutérium aussi forts n'ont pas été relevés par Celle (2000) lors de l'examen de pluies d'origine méditerranéenne. Il faudrait donc systématiser ces analyses pour tester cette hypothèse.

Comme les évènements analysés ne sont pas des précipitations neigeuses, les effets isotopiques liés à la sublimation de neige n'existent pas. Une cause pourrait être une évaporation des gouttes durant leur chute, cinq des six évènements étant inférieurs à 1,3mm, ou une re-condensation de vapeur évaporée. Ceci pourrait expliquer un excès de 51,9‰ le 19/05/03 (quantité : 0,3mm ; température : 21°C), mais pas ceux des autres précipitations ($T_{atmosphère} < 9°C$).

La quantification de l'effet continental n'est pas aisée avec des stations distantes de 25km et situées à différentes altitudes. Un moyen d'évaluation de cet effet est l'utilisation du rapport *étalement de l'excès en deutérium / gamme de variation en ^{18}O*. En prenant comme référence les années 2002 – 2003 (24 mois), les écarts entre extrêmes sont respectivement de 13,7 et 12,9, soit un rapport de 1,06, qui situe la station de St-Just-St-Rambert entre les stations côtières et les stations fortement continentales. La comparaison avec les quatre stations citées dans le tableau 4 donne en effet les rapports suivants : Avignon : 1,58 (49 mois) ; Brest : 1,72 (57 mois) ; Thonon : 1,38 (99 mois, février 2000 excepté) ; Orléans : 1,6 (68 mois, février 1997 et 1998 exceptés). Ces stations affichent donc le même mécanisme, les villes côtières possédant un rapport étalement de l'excès en deutérium / gamme de variation en ^{18}O plus fort que celles plus à l'intérieur. Ce rapport n'est de plus pas fonction de l'origine des masses d'air.

II.6 Autres marqueurs des pluies

II.6.1 Eléments dissous

Quelques mesures du contenu en éléments chimiques dissous ont été réalisées. Les principaux éléments contenus dans les précipitations sont des aérosols (Junge, 1963) soustraits de l'atmosphère par les processus de condensation dans les nuages et par admixtion avec les gouttes de pluies lors de leur chute (e.g. Négrel et Roy, 1998). Les composés dissous sont classés en trois groupes selon leur origine : aérosols marins (Na, Cl, Mg, K), terrestres (Ca, HCO_3) ou anthropiques (K, NO_3, SO_4, NH_4). Le signal marin est mieux préservé en domaine rural cristallin. La proximité de zones sédimentaires renforce les impacts terrigènes, celle des villes les facteurs anthropiques (Celle, 2000). Pour les pluies de St-Just-St-Rambert de la fin d'année 2004 (Tab. 9), l'origine marine est prépondérante (Na, Mg : 42 à 87% de la teneur totale en cations), l'origine terrigène étant beaucoup plus faible (Ca, K : 8 à 19%). L'impact des facteurs anthropiques est fort variable suivant les évènements (1 à 50% de la teneur totale en cations).

Le caractère acide d'une pluie est défini par rapport à la référence pH = 5,7 (Berner-Kay et Berner, 1987), qui est le pH d'une goutte en équilibre avec le CO_2 atmosphérique. Les eaux échantillonnées dans la Limagne (Sainte Marguerite ; Négrel et Roy, 1998) ont une valeur moyenne de 5,22 ±0,65 (gamme de variation : 4,29 à 6,2). Celles du Mont Lozère (La

Vialasse ; Celle, 2000) sont en moyenne à pH = 4,52. Les valeurs faibles peuvent être reliées à la présence d'acides (H_2SO_4 et/ou HNO_3), les valeurs élevées à la dissolution de $CaCO_3$. La pluie du 12 septembre 2003 a fourni les pH et conductivités suivants : pH entre 5,86 (St-Just) et 6,51 (Rochetaillée) ; conductivités entre 8,5 (St-Just) et 46 µS/cm (Tarentaise).

Le non-équilibre entre contenu en cations et anions des pluies (Tab. 9) récoltées en France est connu depuis les années 1980 (Galloway et al., 1982), et interprété par une non-mesure du contenu en NH_4 (jusqu'à 40% des cations), en H_3PO_4 et en espèces organiques (acétate, formate, acide humique…). Dans le cas des pluies échantillonnées, c'est surtout la non détermination des bicarbonates qui provoque le non – équilibre de la balance ionique.

Lieu	Période	Quantité (mm)	HCO_3	Cl	SO_4	NO_3	Ca	Na	Mg	K	Al	NH_4	SiO_2	balance
Rochetaillée	02/12/03	229	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.31	n.d.	n.d.	0.39	n.d.	n.a.	n.d.	
Tarentaise	02/12/03	259	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.34	0.38	n.d.	0.40	n.d.	n.a.	n.d.	
St-Just-St-Rambert	07/2002-01/2003	613.8	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.61	0.41	0.05	0.45	n.d.	n.a.	0.04	
	02/2003-11/2003	348.5	n.a.	1.03	1.53	n.d.	1.81	0.61	0.20	1.22	0.07	n.a.	0.21	46%
	02/12/03	159	n.a.	0.03	0.12	0.39	0.21	n.d.	n.d.	0.19	n.d.	n.a.	n.d.	22,8%
	09-19/10/04	16.5	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.18	0.32	0.92	0.19	n.a.	0.33	n.a.	
	26/10/04	67	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.06	0.28	0.32	0.09	n.a.	0.37	n.a.	
	03/11/04	20	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.02	0.09	0.14	0.03	n.a.	0.16	n.a.	
	04/11/04	23	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.02	0.13	0.13	0.03	n.a.	0.31	n.a.	
	30/11/04	13	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.08	0.33	0.79	0.19	n.a.	0.80	n.a.	
	30/11/04-01/12/04	3	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.11	1.63	1.65	0.33	n.a.	0.04	n.a.	
	25-26/12/04	20	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.13	0.70	0.83	0.14	n.a.	0.15	n.a.	
Sainte Marguerite [1,*]	03/1995-03/1996		1,2[a]	0,69	2,14	1,55	0,59	0,33	0,08	0,22	0,009			-32%
La Vialasse (Lozère)[2]	08/1998-12/1998		0,42	1,28	2,28	1,41	1,58	0,74	0,11	0,18		0,28		4,8%

[a] : 5 mesures seulement (13 pour les autres données)
[*] : conductivité variant entre 5 et 52µS/cm
[1] : Négrel et Roy, 1998
[2] : Celle, 2000
n.a. : non analysé
n.d. : non détecté

Tab. 9 : mesures (mg/l) de composés dissous et comparaisons avec des références géographiquement proches.

II.6.2 Eléments radiogéniques

Carbone 14 et tritium sont produits par bombardement neutronique sur des atomes d'azote dans la haute atmosphère. Le ^{14}C intègre le cycle de l'eau en s'oxydant en CO_2 puis en se dissolvant dans la vapeur d'eau atmosphérique. Le tritium est incorporé de manière directe en

s'oxydant sous la forme $^{1}H^{3}HO$. La réaction de production de ^{3}H est moins fréquente que celle du ^{14}C et cet atome se désintègre rapidement ; en conséquence le contenu de l'atmosphère est faible en tritium.

Si le contenu en carbone 14 des pluies n'a pas été examiné, des mesures ponctuelles de teneur en tritium ont été menées, afin de quantifier le bruit de fond "radiogénique" de l'atmosphère lors des périodes d'échantillonnage. La pratique de tests nucléaires au XXème siècle a énormément modifié les teneurs naturelles (pic de plus de 5000 Unités Tritium dans l'hémisphère Nord en 1963 ; Fig. 15). Toutefois les mesures effectuées depuis les années 1990 montrent un retour aux valeurs naturelles issues de la production cosmogénique, estimée à environ 5UT (Begemann, 1959). Ce retour rapide à la normale est lié à la courte demi-vie de l'élément et à un vigoureux brassage atmosphérique (IHP vol.2, 2000).

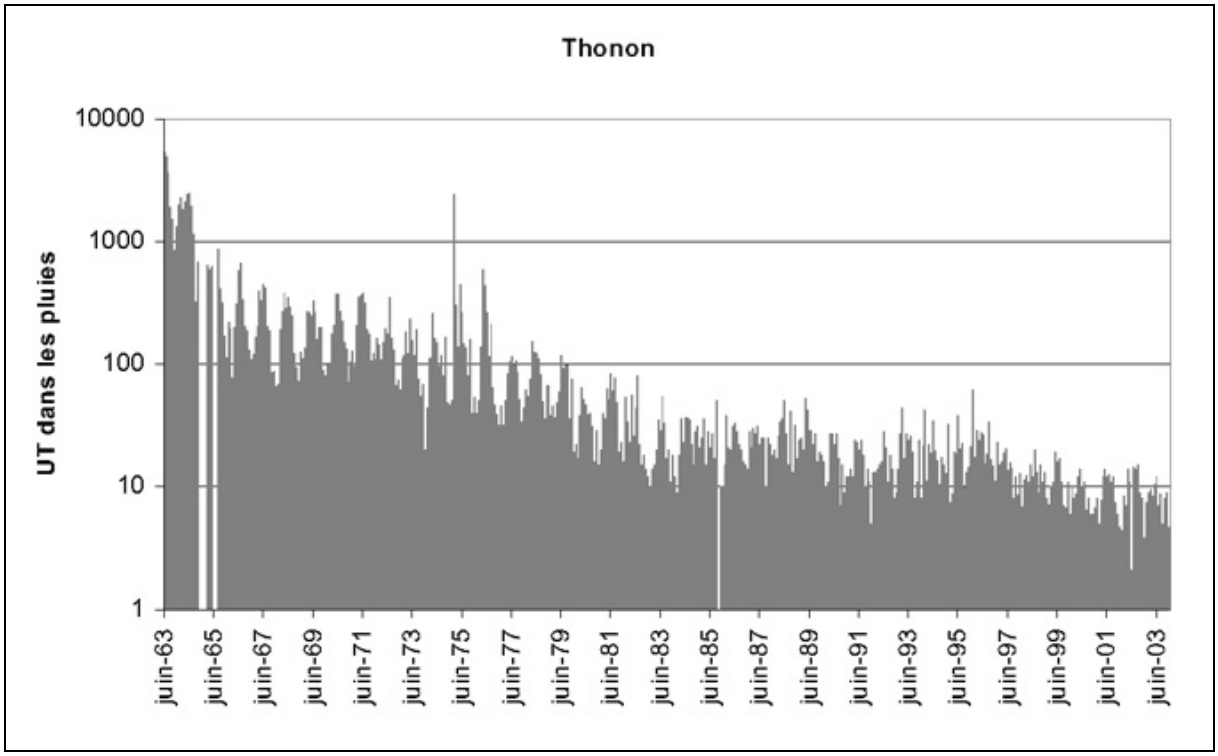


Fig. 15 : chronique des teneurs en tritium des pluies à Thonon-les-Bains (Haute-Savoie) ; les données sont issues du réseau GNIP ; échelle semi-logarithmique.

Le court temps de résidence atmosphérique explique aussi l'existence de variations saisonnières prononcées, les valeurs étant en moyenne deux fois plus élevées en hiver qu'en été. Sous les latitudes Nord moyennes, ce phénomène s'explique par une dépendance marquée à la latitude. Les concentrations des éléments dans l'atmosphère sont fonction des échanges

entre masses d'air stratosphérique et troposphérique, à la fin de l'hiver et au printemps. Les temps de résidence estimés de la vapeur sont de quelques années dans la stratosphère, mais seulement de 5 à 20 jours dans la troposphère. Cette période est trop courte pour engendrer une répartition homogène du tritium dans l'atmosphère. Le tritium se dépose donc selon des bandes de latitude à la surface terrestre. Le délai entre apparition du pic dans les pluies (juin ; Fig. 15) et période de son injection dans l'atmosphère (fin de l'hiver) est attribué à la ré-évaporation de l'humidité sur le continent, qui produit une source additionnelle de tritium atmosphérique (IHP, 2000).

Il existe aussi une variation liée à la continentalité des points de mesure. Les masses d'eau océaniques (principal réservoir de vapeur atmosphérique ; Rozanski et al., 1993) sont toujours marquées par de faibles contenus en tritium liés à un temps de résidence important de l'eau dans l'océan. Les pluies côtières possèdent en conséquence les plus faibles valeurs. Les quantités d'atomes radiogéniques augmentent à mesure de la pénétration des masses d'air au dessus des continents (Fig. 16a). Les augmentations moyennes quantifiées entre Brest – Orléans et Brest – Thonon sont respectivement de 0,84 et 1,1 UT / 100km.

Les extrêmes enregistrés sur les échantillons de cette étude entre 2001 et 2003 sont respectivement de 2 ± 1 et 12 ± 1 UT (Tab. 10 et Fig. 16b). Ces données constituent une première estimation de l'évaluation des temps de transfert au sein des aquifères superficiels, et signent d'autre part la recharge récente des aquifères profonds par des eaux de surface. Les teneurs estivales en tritium sont enrichies par rapport aux teneurs hivernales (Tab. 10 et Fig. 16b), surtout en 2002. Pour l'année 2003, la décroissance graduelle des teneurs en tritium dans l'atmosphère se rapproche du seuil de production naturelle (Begemann, 1959 ; Chery, 2003), avec des valeurs estivales proches de celles de l'hiver. Une explication possible est un lessivage partiel de l'atmosphère au cours de cet été très sec.

Les variations constatées à St-Just-St-Rambert sont similaires à celles constatées à Orléans et Thonon (Fig. 16b). Les valeurs intermédiaires mesurées rendent aussi compte de l'effet de continentalité, bien que l'origine des masses d'air puisse différer d'une station à l'autre. L'examen des teneurs en tritium à 3 mois permet de plus de lisser les effets des apports exceptionnels, comme l'évènement méditerranéen de décembre 2003.

St-Just-St-Rambert	activité (UT)	erreur (±UT)
2001 à 2002	*9*	*1*
04/2002 à 06/2002	9	1
07/2002 à 09/2002	12	1
10/2002 à 12/2002	7	2
dont 24/11/02	*2,9*	*0,9*
01/2003 à 03/2003	6	3
04/2003 à 06/2003	7	2
07/2003 à 09/2003	6	1
10/2003 à 12/2003	5,6	0,8
dont 01-02/12/03	*4*	*1*
01/2004 à 03/2004	5	1
Tarentaise	**activité (UT)**	**erreur (±UT)**
01-02/12/03	2	1

Tab. 10 : contenu en Unités Tritium des pluies lors des périodes d'échantillonnage.

Bien que le tritium soit aussi fractionné par processus d'évaporation – condensation (2 fois plus que ^{2}H), les variations sont de l'ordre de 16% soit juste 1 an de décroissance radioactive. Ne pouvant être clairement distinguées, elles sont donc négligées (IHP, 2000).

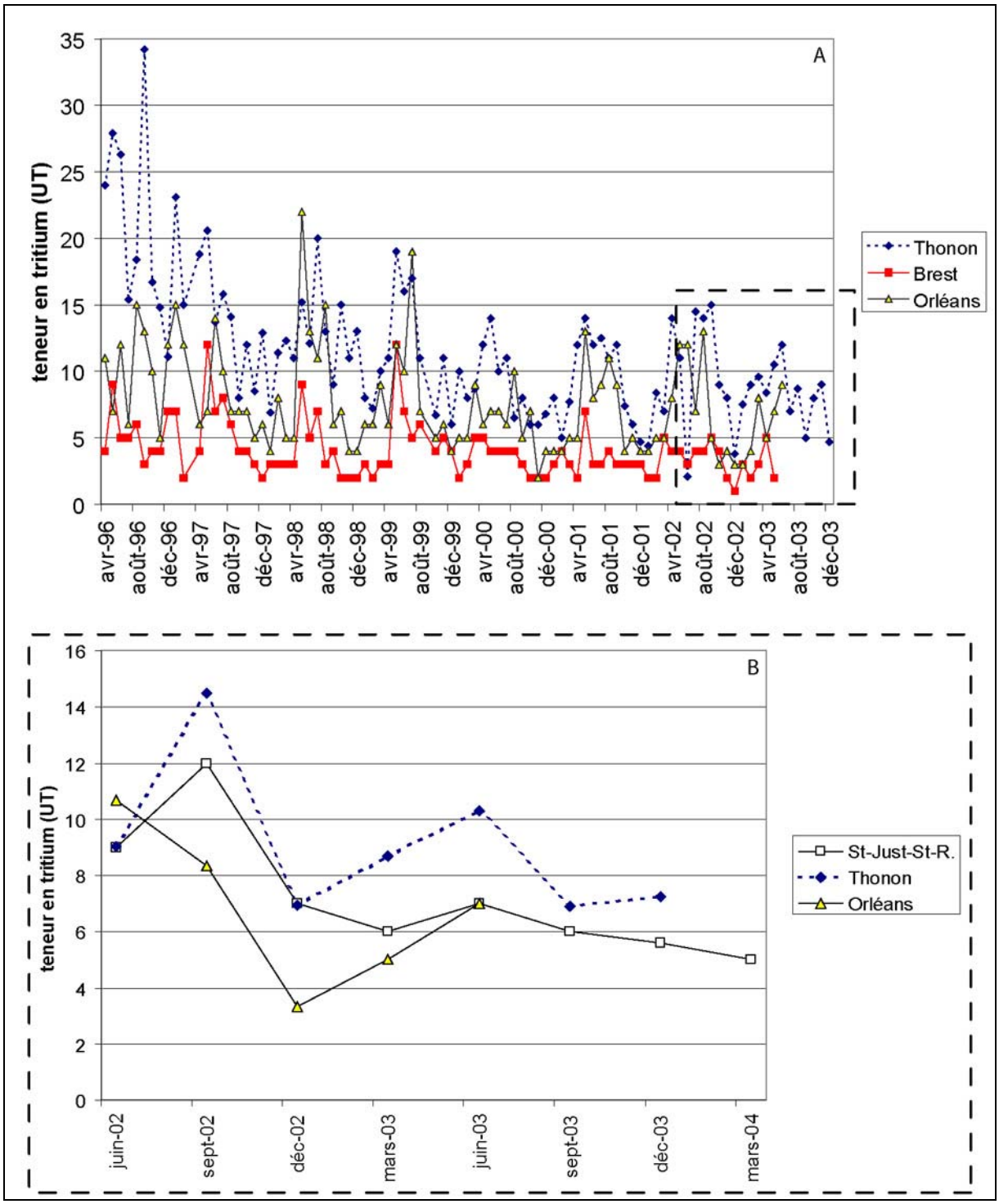


Fig. 16 : a) comparaison des teneurs mensuelles en tritium des pluies pour trois stations du réseau GNIP entre 1996 et 2003 ;
b) évolution trimestrielle constatée des teneurs en tritium à St-Just-St-Rambert entre avril 2002 et mars 2004 ; les teneurs de deux stations GNIP à la même échelle temporelle sont indiquées pour référence.

II.7 EVAPOTRANSPIRATION

II.7.1 Calcul

Les précipitations sont, en domaine cristallin de moyenne montagne, la principale source d'eau disponible pour l'infiltration et la recharge des aquifères superficiels. L'eau disponible en surface subit plusieurs évènements avant passage dans le cycle souterrain. Le premier phénomène est une reprise par évaporation de l'eau dans les horizons supérieurs du sol, avant d'atteindre de la zone saturée. Les quantités réellement disponibles pour l'infiltration sont par conséquent réduites, l'évapotranspiration potentielle (ETP) pouvant être non négligeable surtout en été. Cette ETP résulte de flux d'énergie à la surface du sol : énergie solaire reçue, déséquilibres hydriques entre air et surface du sol, intensité des échanges air – surface (fonction de la vitesse du vent). L'ETP est définie comme l'évapotranspiration d'un couvert végétal bas, continu et homogène dont l'alimentation en eau n'est pas un facteur limitant (Grimbert, 2003).

Dans les estimations de flux hydriques, le calcul de l'ETP fournit une information sur la possibilité ou non de recharge du milieu sous-jacent. C'est la connaissance de cette possibilité de recharge qui est le but de cette partie. Pour être rigoureux, les calculs d'évapotranspiration potentielle représentent la borne supérieure du système : c'est la quantification de l'évapotranspiration réelle ETR (quantité d'eau effectivement évaporée) qui donne la meilleure approche des flux qui percolent en profondeur. En effet, l'ETR tient compte de l'occupation des sols, de la teneur en eau des sols, de leur nature et enfin du climat. En climat tempéré, Nolting et coauteurs (1995) ont évalué l'ETR comme équivalente à 30 – 70% des précipitations annuelles. Le calcul des cumuls de précipitations perdus par évapotranspiration peut se faire selon plusieurs méthodes, suivant les données météorologiques disponibles. Par ordre croissant de paramètres impliqués, il peut être fait référence aux méthodes suivantes (cf méthodologie pour le détail des calculs) :

II.7.1.1 méthode de Thornthwaite

Elle ne nécessite que la connaissance des températures moyennes (journalière, décadaire ou mensuelle) au point de mesure. Elle est applicable dans les zones tempérées humides (e.g. Petrescu Maftei, 2002) et se définit comme suit :

$$\text{ETP (mm/jour)} = 1{,}6 \times \left(\frac{10}{I}\right)^{a} \times T^{a} \times L$$

avec I indice thermique annuel, T la température moyenne mensuelle, L le nombre d'heures d'ensoleillement journalier rapporté à la durée du jour, a étant un coefficient fonction de I.

II.7.1.2 méthode de Turc

Elle prend en compte de manière plus complète l'influence des radiations solaires globales (R_g en cal/cm²/jour) et de l'insolation journalière (R_f) :

$$\text{ETP (mm/jour)} = 0{,}031 \times C \times (R_g + 209) \times \left(\frac{T}{T+15}\right)$$

C est un facteur dépendant de l'insolation journalière. Cette méthode surestime d'environ 20% les valeurs réelles d'ETP en milieu humide (e.g. Petrescu Maftei, 2002).

II.7.1.3 méthode de Hargreaves

Elle nécessite la connaissance de données thermiques mais fournit une bonne estimation (e.g. Grimbert, 2003), à telle enseigne qu'elle a été choisie comme référence par la CEE en 1992 (réf. EUR 14223).

$$\text{ETP (mm/décade)} = 0{,}0023N \times R_g/L \times (T + 17{,}8) \times (T_x - T_n)^{0,5}$$

avec N le nombre de jours dans la décade, L la chaleur latente de vaporisation (J/kg), T la température moyenne, T_x la température maximale et T_n la minimale.

II.7.1.4 méthode de Penman

C'est une combinaison d'équations de transfert de masse et de conservation d'énergie thermique, qui fournit la meilleure approche possible de l'évapotranspiration. Les données d'ETP Penman ont été obtenues à partir de la station Météo-France d'Andrézieux-Bouthéon.

II.7.2 Quantification de l'évapotranspiration

Les évaporations n'étant importantes que pour les eaux de surface, dont les temps de recharge sont plus faibles que ceux des sources minérales, tous les lieux où des informations pluviométriques sont disponibles n'ont pas fait l'objet de calculs d'ETP. Seules les stations d'Andrézieux-Bouthéon (station Météo-France donnant l'ETP de Penman), de Tarentaise et

de St-Just-St-Rambert ont été utilisées dans les estimations en utilisant les méthodes de Hargreaves, Thornthwaite et Turc. Les comparaisons entre les différents résultats permettront de déterminer la méthode la plus appropriée, choisie pour calculer l'évapotranspiration maximale et définir une limite supérieure aux variations isotopiques.

II.7.2.1 Procédures de calcul

Pour être précis, les calculs d'ETP s'effectuent sur des données journalières. L'obtention de telles données (pluviométrie, températures minimales et maximales) couvrant les années 2000 à 2003 n'a été possible que pour Tarentaise, grâce au concours de l'Université du Mans (laboratoire GREGUM). Pour Andrézieux-Bouthéon, seuls les mois de septembre 2000 à juillet 2001 sont au pas de temps journalier (pas décadaire ensuite). Par contre, le jeu de données obtenu pour Andrézieux-Bouthéon est plus complet, et inclut notamment l'ETP calculée selon Penman et l'insolation. Nous admettrons arbitrairement l'insolation comme constante dans la zone géographique étudiée. Nous l'utiliserons comme représentant l'ensoleillement à St-Just-St-Rambert (5km de distance, altitude identique) et à Tarentaise (incertitude plus grande car située à 25km et 700m plus haut). Enfin, les calculs pour St-Just-St-Rambert sont effectués à partir de données de températures minimales et maximales de l'eau lors d'un évènement pluvieux, et non sur les températures de l'air. Dans ce cas, les données sont à pas de temps journalier, mais elles sont cependant temporellement limitées et minimisent l'évapotranspiration potentielle calculée sur 365 jours.

Pour les stations à mesures journalières, l'ETP de Thornthwaite a été calculée à partir de la formule citée par Hörmann (2002 ; cf méthodologie). Ces données ont été sommées pour obtenir les évaluations à pas décadaire et mensuel. Dans le cas d'Andrézieux-Bouthéon, les données disponibles incluant l'insolation étant décadaires, la formule donnée par exemple par Petrescu Maftei (2002) est utilisée, et le paramètre L estimé en rapportant les durées d'insolation aux durées astronomiques de la décade correspondante (éphéméride http://ephemeride.com/).

Ce rapport durée d'insolation / durée d'insolation maximale est aussi au cœur des deux formules utilisées pour déterminer l'ETP de Turc, l'une à pas décadaire, l'autre à pas mensuel. Les radiations R_{ga} issues du rayonnement extra-terrestre ont été déterminées à partir

des valeurs mensuelles fournies par Beauchamp (2002). Une approximation a été faite pour les estimations décadaires, en divisant les quantités reçues par trois.

Pour les calculs selon Hargreaves, le programme ETP version 1.0.2 de M. Acutis est utilisé (http://www.acutis.it/eng_versonframes.htm). Il permet un calcul à pas journalier ou décadaire ; les données mensuelles sont alors les sommes des données discrètes.

II.7.2.2 Comparaisons

Les ETP journalières sont fortement dépendantes de l'amplitude thermique. A titre d'exemple, la figure 17 présente les variations de l'ETP de Hargreaves pour Tarentaise (1080m). La corrélation à la température est très nette : les valeurs hivernales sont minimales et augmentent pour atteindre leur apogée durant les chaudes périodes estivales. Ces tendances peuvent cependant être perturbées par un couvert nuageux réduisant les flux thermiques reçus en surface et les quantités d'eau réinjectées dans le cycle atmosphérique.

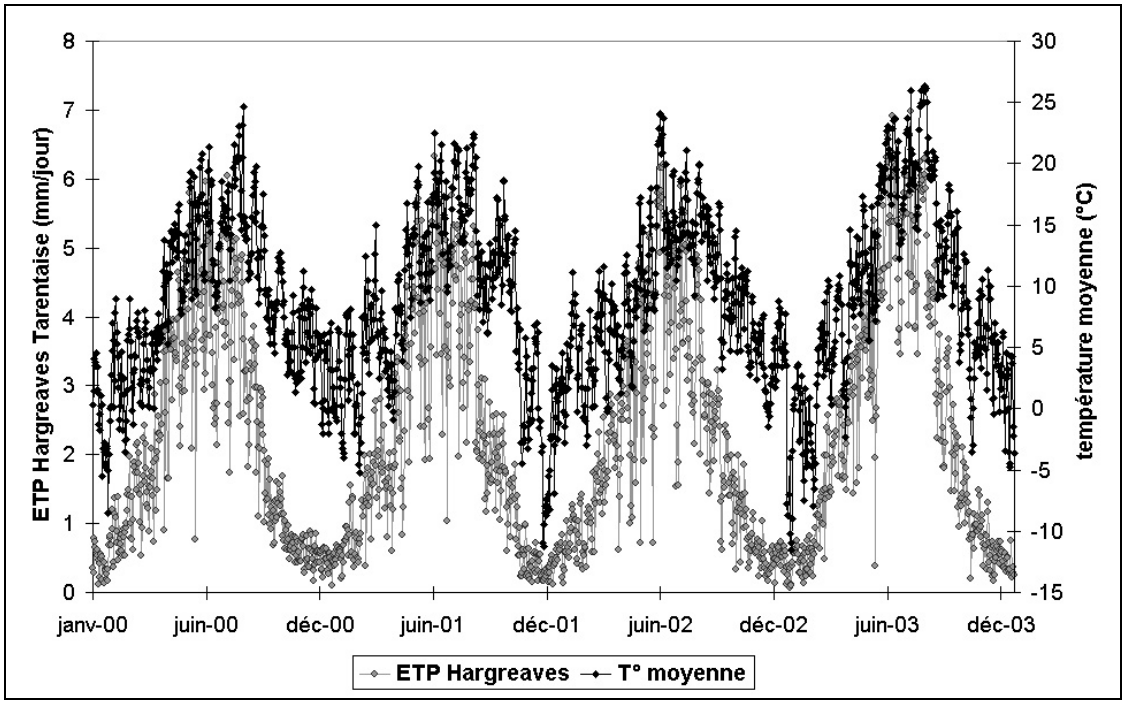


Fig. 17 : évolution journalière à Tarentaise de l'évapotranspiration calculée selon la formule de Hargreaves.

A plus grande échelle, les évolutions définies selon les diverses méthodes de calcul sont heureusement similaires ; à cet effet l'on pourra consulter la figure A.2 en annexe qui rend compte de l'évolution décadaire des ETP calculées par les méthodes auparavant exposées. La figure 18 reflète ces évolutions à échelle mensuelle.

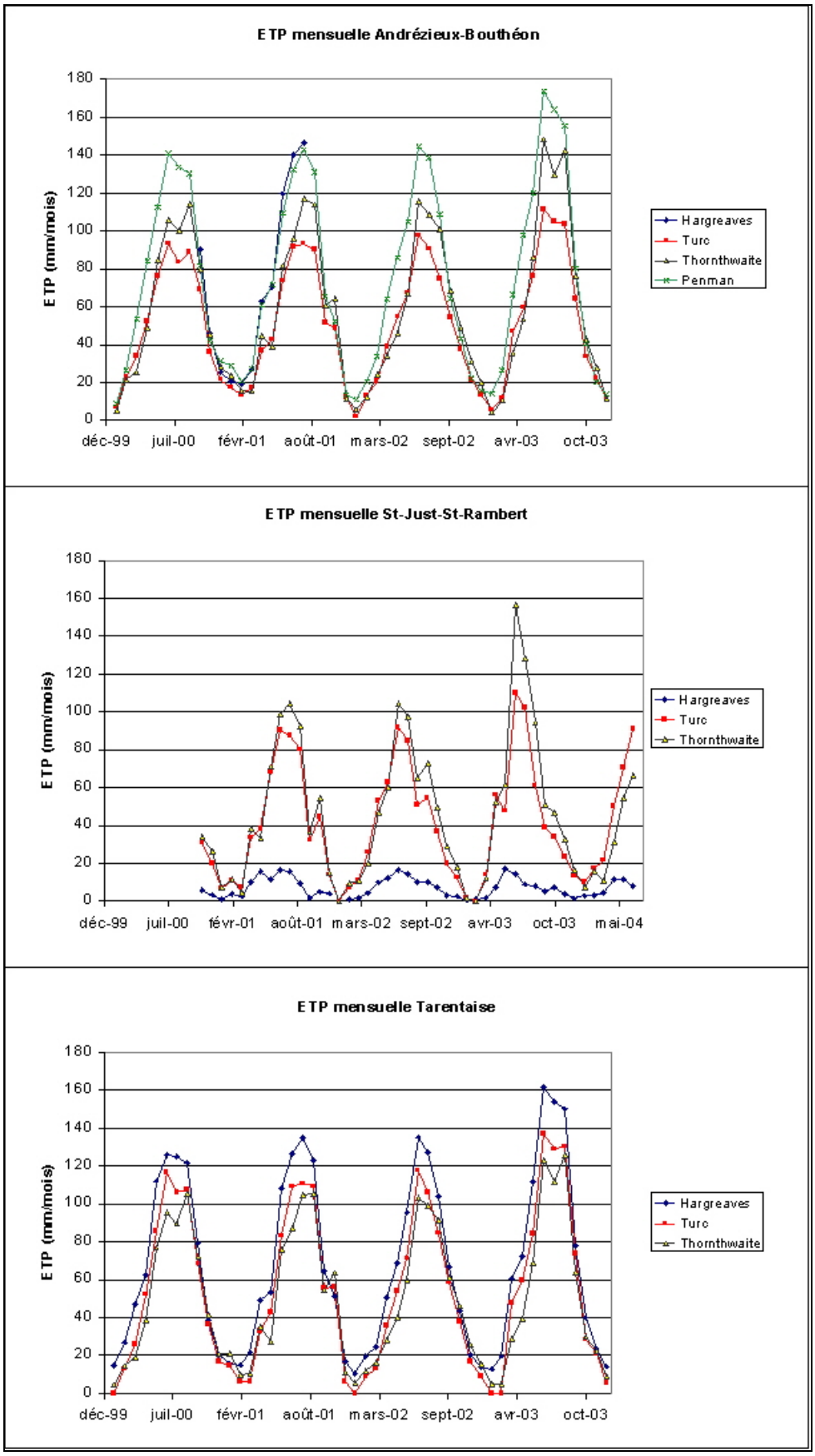


Fig. 18 : évolution mensuelle de l'évapotranspiration calculée pour les stations d'Andrézieux-Bouthéon (400m ; sauf Penman donnée Météo-France) et de Tarentaise (1080m) ; les calculs effectués pour St-Just-St-Rambert ont été entrepris avec les températures des précipitations et non les températures de l'air.

Plusieurs points importants apparaissent (Fig. 18) :

- l'ETP calculée selon Penman, qui décrit au mieux les conditions physiques de l'atmosphère, possède des valeurs très proches de celles de Hargreaves (Tab. 11). Les écarts sont faibles en automne et au printemps (≤ 5%), plus forts en hiver (ETP Hargreaves ≈ 90% ETP Penman) et en été (ETP Hargreaves ≈ 105 à 110% ETP Penman). L'estimation de l'ETP par la méthode de Hargreaves est donc un bon compromis (Grimbert, 2002).

- les évapotranspirations de Hargreaves – Penman donnent les valeurs les plus élevées en été et en hiver, toutes les méthodes donnant des résultats semblables au printemps et en automne. Par contre, la première formule se révèle inefficace avec l'emploi des températures des précipitations : Turc et Thornthwaite donnent des résultats annuels représentant 67 à 69% de l'ETP de Penman mesurée à Andrézieux-Bouthéon (5 km de distance), alors que l'écart est énorme avec Hargreaves (6 à 33%).

- les évapotranspirations calculées en utilisant les formules de Turc et Thornthwaite donnent des valeurs plus faibles (Tab. 11), qui diffèrent seulement en été. Les augmentations printanières sont plus tardives que celles données par les méthodes de Hargreaves et Penman, alors que les baisses automnales sont synchrones. En été, St-Just-St-Rambert et Andrézieux-Bouthéon présentent des ETP Thornthwaite plus fortes que les ETP Turc, la situation à Tarentaise étant contraire. Cet écart peut s'expliquer par l'approximation faite sur les durées d'insolation lors du calcul par la méthode de Turc. En effet, ces données n'étant pas disponibles à Tarentaise, les valeurs d' Andrézieux-Bouthéon ont été utilisées. De ce fait le calcul de l'ETP de Turc se traduit par une incertitude plus importante, les deux sites de Tarentaise et Andrézieux se distinguant par leur altitude et leur contexte (massif / plaine).

- la comparaison des ETP Penman d'Andrézieux-Bouthéon et Hargreaves de Tarentaise fait apparaître un écart stable de 7,2 à 9,7% suivant les années, conséquence de la diminution de la température atmosphérique avec l'augmentation d'altitude. En atmosphère standard (http://www.ae.su.oz.au/aero/atmos/atmos.html), la différence de température entre les deux stations (différence d'altitude 680m) est de 4,42°C, soit un gradient de –0,65°C/100m. Les mesures de températures 2000 à 2003 conduisent à un

gradient moindre de –0,52°C/100m. Si l'on impute à la seule variation de température l'écart d'ETP constaté, on peut donner une variation moyenne annuelle de –21mm d'ETP pour une diminution de 1°C de la température atmosphérique (–17mm/°C en atmosphère standard). En altitude, ceci correspond à un gradient de –11mm d'ETP par élévation de 100m.

Les valeurs d'évapotranspiration calculées selon la méthode de Hargreaves seront donc considérées comme étant la meilleure approximation des quantités réelles maximales potentiellement évaporables.

lieu	année	Harg.	Turc	Thorn.	Pen.		Turc/Pen.	Thorn./Pen.	Harg./Pen.		pluviométrie
Andrézieux-Bouthéon	2000	*182 (septembre à décembre)*	603	682	875 *(184)*		69%	78%	*99% (septembre à décembre)*		728
	2001	*586 (janvier à juillet)*	575	665	839 *(565)*		69%	79%	*103% (janvier à juillet)*		829
	2002		584	677	846		69%	80%			872
	2003		651	767	973		67%	79%			593
St-Just-St-Rambert	2001	97	506	560							860
	2002	94	512	583							993
	2003	77	504	653							556
							Turc/Harg.	**Thorn./Harg.**			
Tarentaise	2000	790	643	599			81%	76%			1064
	2001	775	619	590			80%	76%			1095
	2002	770	613	598			80%	77%			1392
	2003	898	716	633			80%	70%			978

Tab. 11 : comparaison des valeurs d'ETP calculées par différentes méthodes par rapport aux références Hargreaves et Penman ; pour St-Just-St-Rambert les températures employées sont celles des précipitations ; les cumuls annuels sont en mm/an ; entre italique sont indiquées les valeurs partielles : septembre à décembre 2000 et janvier à juillet 2001.

II.7.3 Influence théorique de l'évapotranspiration sur la composition isotopique de l'eau s'infiltrant

Le signal isotopique du flux d'entrée des aquifères est fortement dépendant des apports atmosphériques. Les quantités de pluie pouvant s'infiltrer pour constituer la réserve utile du sol sont indissociables de l'influence de l'évaporation en surface. La démarche entreprise ici ne vise pas à refléter les bilans de masse entre les différents phénomènes (évaporation, ruissellement), mais plutôt à cerner les éventuelles modifications, par effet d'évapotranspiration, des compositions isotopiques des eaux en entrée d'aquifère.

Comme les jours de pluie sont moins fréquents que les jours secs en climat tempéré, on peut soit considérer uniquement les évaporations se déroulant les jours de précipitations, soit aborder ces phénomènes à l'échelle mensuelle, sous forme d'un bilan pluie moins ETP. Ces deux approches vont être évoquées, ainsi que les conséquences sur les valeurs isotopiques.

La seule station pour laquelle les enregistrements s'étendent sur une durée suffisante est St-Just-St-Rambert. Par ailleurs, il a été observé d'après les quantités annuelles de précipitations que le nombre de jours pluvieux varie fortement selon les années (Tab. 12). Pour calculer un effet maximal de l'évapotranspiration sur les signatures isotopiques, les valeurs de l'ETP (et non de l'ETR) sont utilisées. En conséquence, les quantités d'eau disponibles à l'infiltration sont soit minimisées si l'on considère que toute l'eau échappant à l'évapotranspiration percole vers un aquifère, soit surestimées dans le cas d'une perte supplémentaire par reprise racinaire.

				←----- Hargreaves -----→					←---- Thornwaite ----→		
année	nombre de jours de pluie	pluviométrie St-Just-St-R. (RR en mm)	nombre de jours où RR–ETP>0*	ETP* (mm/an)	RR–ETP* (mm/an)	RR–ETP*		nombre de jours où RR–ETP>0[a]	ETP[a] (mm/an)	RR–ETP[a] (mm/an)	RR–ETP[a]
2001	77	861,85	65	781,37	80,48	733,13		68	590,48	271,37	756,33
2002	91	993,23	79	778,91	214,32	841,5		84	597,73	395,5	844,02
2003	68	556,24	44	904,32	-348,08	452,76		48	632,75	-76,51	465,91

Tab. 12 : bilan annuel de pluviométrie et d'ETP à St-Just-St-Rambert ; RR – ETP représente la quantité potentiellement disponible pour l'infiltration; * : ETP de Hargreaves calculée à Tarentaise ; [a] : ETP de Thornthwaite calculée à St-Just-St-Rambert ; les colonnes en grisé correspondent aux bilans en considérant les seules ETP lors des jours de pluie (voir texte pour explications).

Les énormes quantités RR – ETP figurées en grisé (Tab. 12, ETP calculée seulement les jours de pluie) impliqueraient une saturation permanente en eau des sols, ce qui n'est pas le cas. A l'opposé, l'utilisation des ETP journalières donne des ordres de grandeur plus raisonnables. Pour Tarentaise, les recharges ainsi déterminées sont de l'ordre de 80mm en année normale (2001) et de 200mm en année pluvieuse (2002). En 2003, la recharge paraît fortement compromise (-350mm).

Pour comparer les quantités disponibles à celles mesurées aux émergences des sources, on peut établir un bilan des flux pour le bassin versant du Furan. En entrée sont utilisés les volumes annuels de pluie à Rochetaillée et Tarentaise, en sortie les débits des ruisseaux drainant le bassin amont. En année normale les nappes délivrent un débit continu : les sources pérennes échantillonnées dans le bassin versant entre 2000 et 2003 n'ont connu le tarissement qu'en 2003. La partie amont de ce bassin est drainée vers un barrage dont les flux entrants

sont évalués par l'exploitant (Stéphanoise des Eaux). Pour 2002 par exemple, un apport annuel total de $10{,}3 \times 10^6$ m^3 est estimé, pour 3110 ha de surface drainée, ce qui donne une quantité de 3310 m^3/ha/an. Les hauteurs de précipitations mesurées vont de 9930 m^3/ha/an pour St-Just-St-Rambert à 13910 m^3/ha/an pour Tarentaise. Un facteur de 3 à 4,2 existe donc entre quantité précipitée et quantité déterminée au barrage, qui résulte des écoulements directs après la pluie et des relargages des nappes. Ce facteur constitue la limite supérieure reconnue pour la quantité de précipitations atteignant la nappe phréatique (5 à 25% ; Clark et Fritz, 1997). En première approche, on peut attribuer cette différence entre entrée (pluie) et sortie (sources, écoulements) du système à une consommation par évapotranspiration, par les plantes, par infiltration profonde (failles) et en moindre mesure par les activités anthropiques, ici limitées (bassin peu peuplé à agriculture extensive limitée).

En se référant au tableau 12, il apparaît une infiltration potentielle d'environ 20% en retenant un calcul à pas de temps journalier, alors que le calcul pour les seuls jours de pluie conduit à une fraction disponible d'environ 80%. Cet énorme pourcentage n'est pas raisonnable dans une optique d'évaluation réaliste des flux dans le bassin. Cependant l'objectif poursuivi est bien d'obtenir la plus forte modification possible du signal isotopique. Il faut donc employer la méthode qui permet d'exagérer les flux. Aussi a-t-on délibérément choisi l'ETP de Heargreaves, calculée seulement les jours de pluie, pour obtenir des modifications de composition isotopique sur un volume plus important.

Dans cette optique, les rapports isotopiques mensuels en oxygène et hydrogène des pluies ont été recalculés en utilisant une pondération non basée sur les volumes résiduels (RR – ETP). Dès lors, les évènements les plus réduits n'apportent plus leur contribution à la signature mensuelle, une gamme de 66 à 90% de pluies constatées étant alors susceptibles de s'infiltrer. Les compositions isotopiques mensuelles sont alors sensiblement modifiées pour les mois les plus sujets à forte évapotranspiration, c'est à dire ceux s'étendant de février à octobre, avec un pic d'avril à juillet (Fig. 19).

Il est à noter qu'une approche par distillation de Rayleigh ne peut pas être utilisée dans notre cas car elle nécessite l'existence d'une surface d'eau libre.

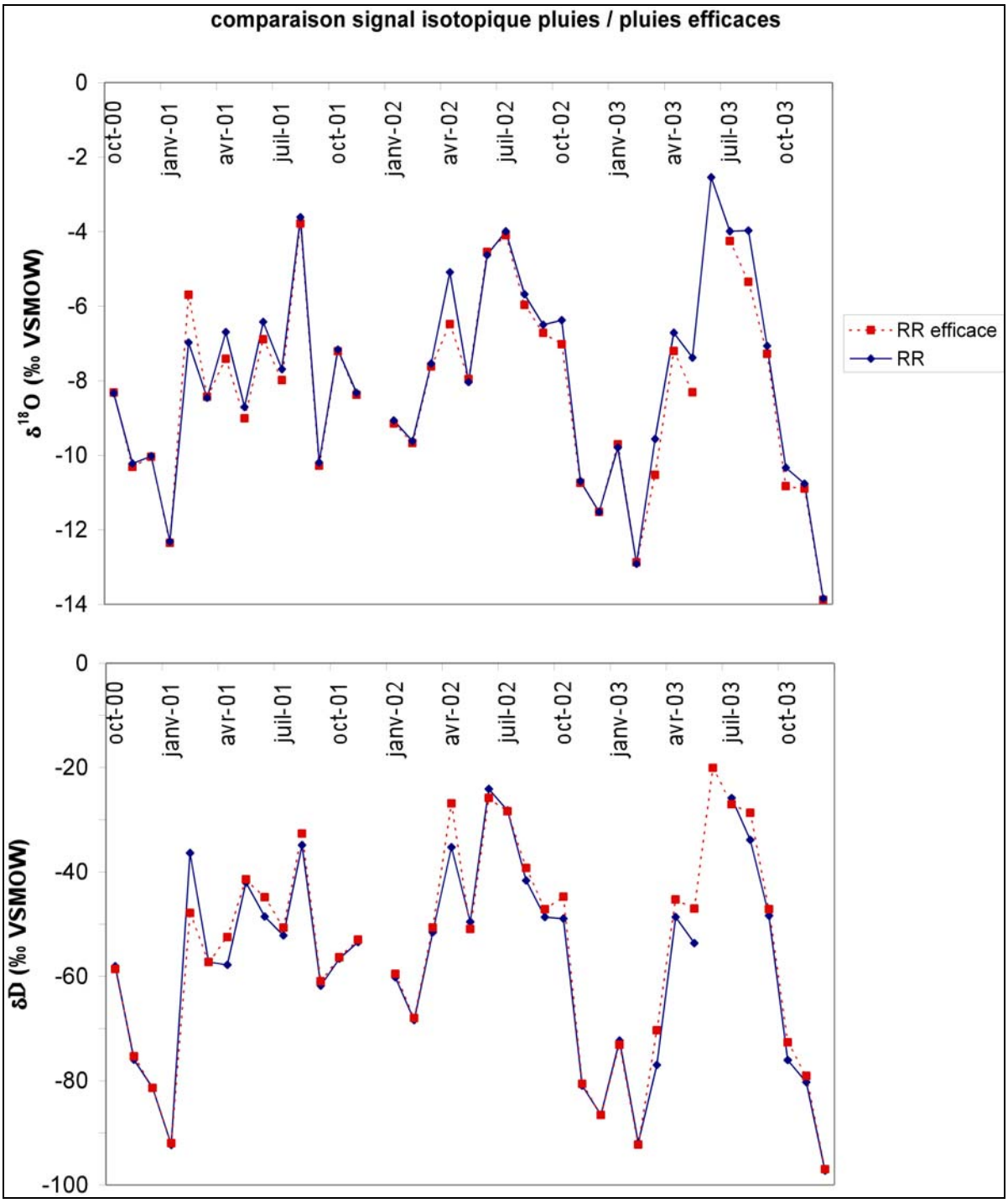


Fig. 19 : modification du signal isotopique en oxygène ($\delta^{18}O$) et hydrogène (δD) après prise en compte de l'effet quantitatif de l'évapotranspiration ; les losanges figurent les pluies brutes, les carrés se rapportent aux seules pluies efficaces (quantité de pluie diminuée de la perte par évaporation) ; pas d'événement en décembre 2001.

III. SOURCES SUPERFICIELLES ET RIVIERES DU MASSIF CRISTALLIN DU PILAT, DES MONTS ET DE LA PLAINE DU FOREZ

Cette troisième partie est basée sur l'étude chimique (éléments majeurs) et géochimique (isotopes stables O, H, C et radiogénique ^{3}H) de sources pérennes et de rivières en contexte de socle cristallin. L'objectif est d'essayer de déterminer des temps de transit moyens au sein d'aquifères peu importants.

III.1 LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DES SOURCES

III.1.1 Massif du Pilat

Le massif du Pilat est situé sur la ligne de partage des eaux entre d'une part le bassin versant du Rhône et d'autre part celui de la Loire (Fig. 20). A l'Est d'une ligne St-Etienne – crêts sommitaux, les ruisseaux sont collectés par le Gier, qui se jette ensuite dans le Rhône (exutoire : mer Méditerranée). A l'inverse, les ruisseaux à l'Ouest de la ligne St-Etienne – sommets du Pilat se déversent dans la Loire (exutoire : océan Atlantique). La partie supérieure du bassin versant du Furan (Fig. 20), qui a fait l'objet d'une campagne de prélèvements entre 2001 et 2003, appartient à ce second domaine.

Le Furan est une rivière courte avec peu d'affluents : 36 km jusqu'à sa confluence avec la Loire à Andrézieux. Il naît au Sud du Bessat et coule avec une pente moyenne de 2,1 cm par mètre (dénivelée de 1120m à 359m), pour une superficie totale de son bassin versant de 178 km² (Staron, 1997). Les profils topographiques sont contrastés le long du cours de la rivière (Fig. 21). Le cours supérieur admet une pente proche de 5,6cm/m (entre Le Bessat et Rochetaillée), qui diminue en allant vers la plaine du Forez et le fleuve Loire. L'extraction de profils topographiques à partir d'images géoréférencées (http://srtm.csi.cgiar.org) permet ainsi d'établir des pentes moyennes de 3,3 cm par mètre de dénivelée entre Le Bessat et St-Etienne.

Le cours supérieur du Furan suit le cheminement NW-SE des failles du socle jusqu'au barrage du Pas-de-Riot (Fig. 22). Une fois les micaschistes du Gouffre d'Enfer atteints, il suit un trajet N-S jusqu'à Rochetaillée où une barre rocheuse l'amène E-W (Fig. 22 et 23). Ainsi la partie Est du bassin versant du Furan définit-il la ligne de partage des eaux Atlantique/Méditerranée.

Le massif du Pilat est riche de nombreuses sources qui lui confèrent un caractère de "château d'eau". Ce caractère a été exploité au XIXème siècle (1859-1863) lors de la construction de "l'aqueduc des sources", où plus de 800 sources superficielles sont drainées par tranchées de 0,8 à 1,5 mètre de profondeur. Le débit s'étalait de 3 000m^3 à l'étiage à 28 000m^3 par jour lors de crues (Gay, 1997). Le cours de la rivière fut ensuite barré par deux retenues : Gouffre d'Enfer en partie basse (1866 ; capacité totale : 1 600 000m^3) et Pas-de-Riot en partie amont de la zone étudiée (1878, 1 350 000 m^3). Le débit réservé (débit minimal à l'exutoire du barrage) au sortir du Pas-de-Riot est de 15 litres par seconde (Stéphanoise des Eaux).

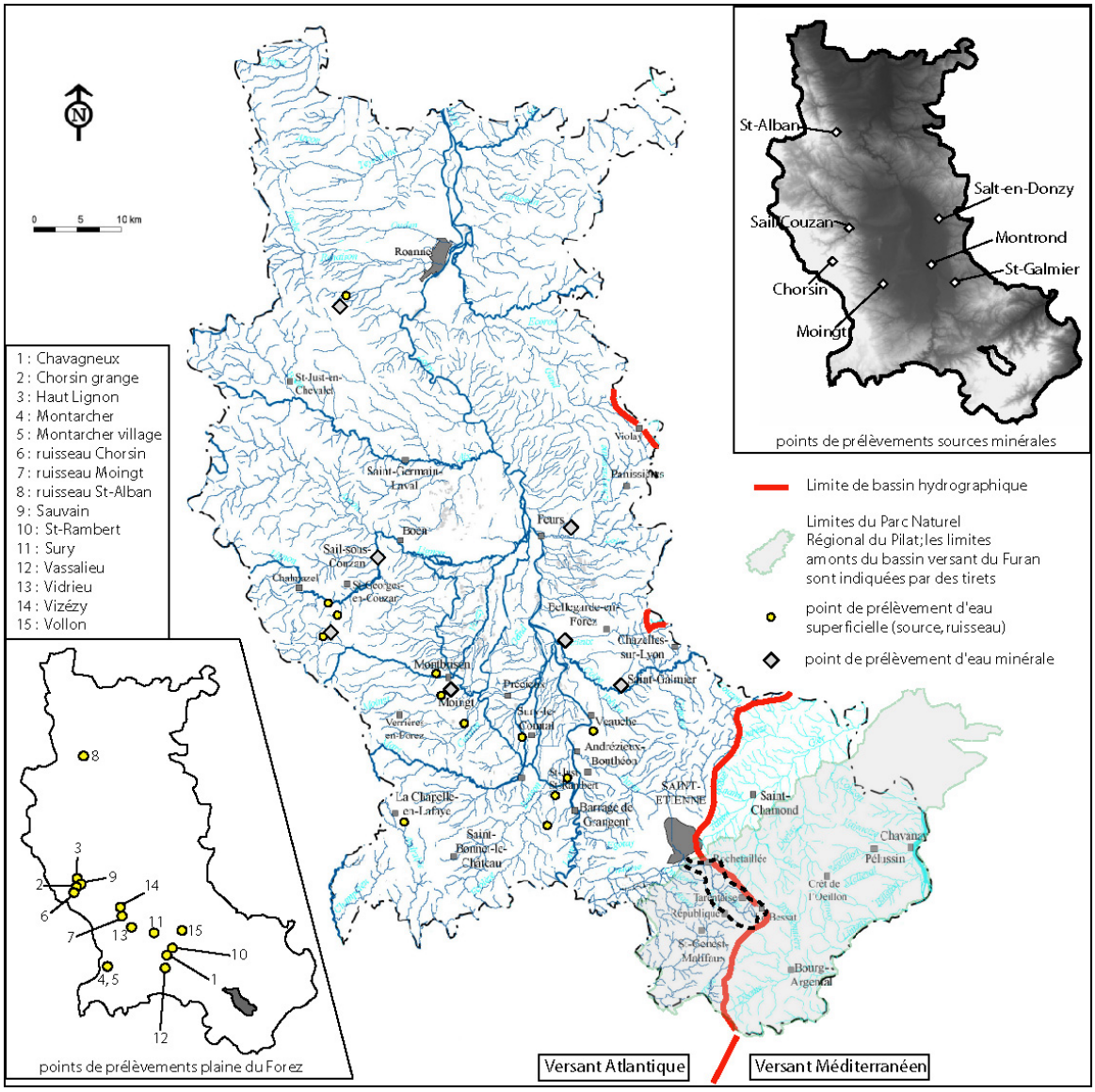


Fig. 20 : réseau hydrographique du département de la Loire, d'après RBDE Loire – Bretagne modifié (http://www.eau-loire-bretagne.fr/rbde/).

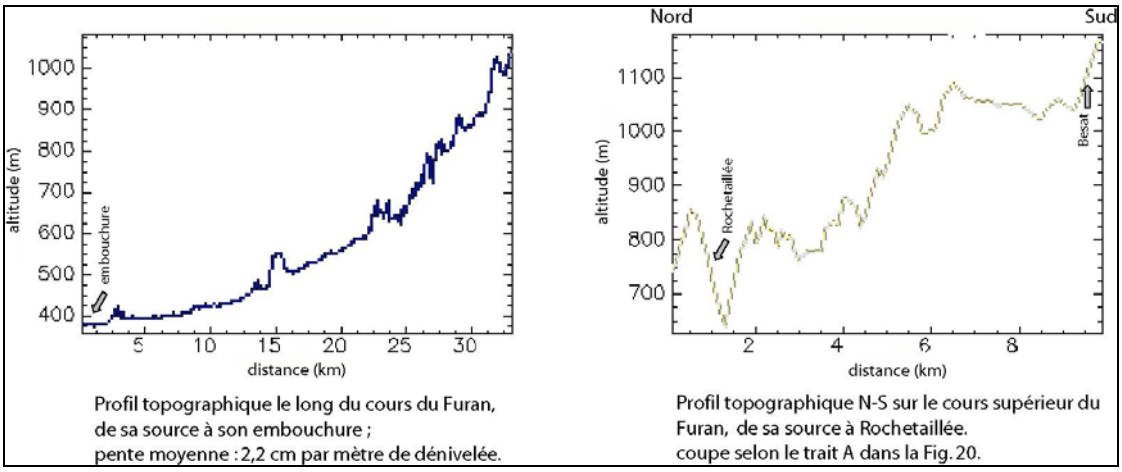


Fig. 21 : profils topographiques le long du cours du Furan et dans le massif du Pilat.

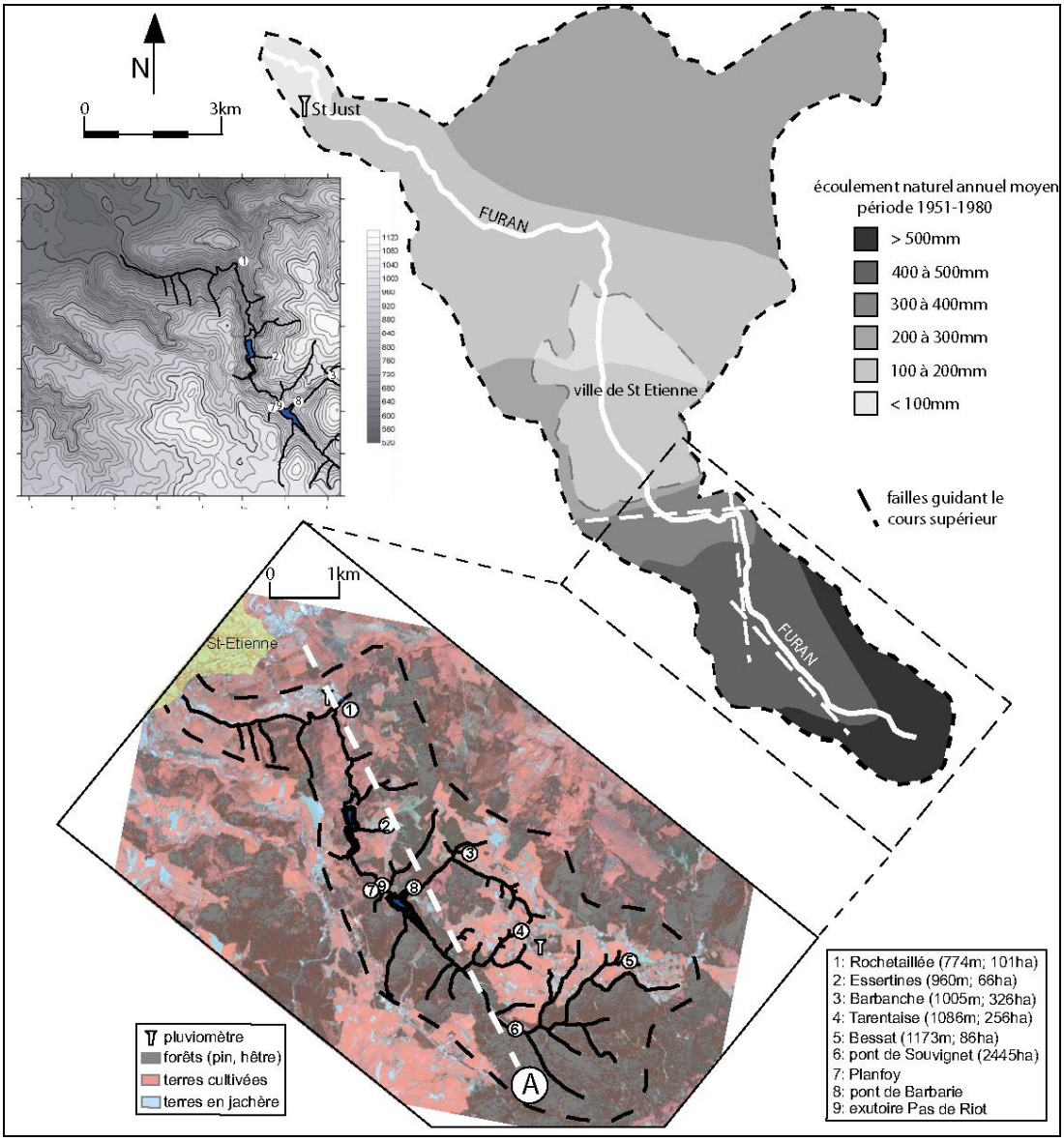


Fig. 22 : bassin versant du Furan et écoulements moyens annuels dans le bassin (d'après Staron, 1997) ; les deux cartouches à gauche du schéma principal figurent l'amont du bassin avec la localisation des points d'échantillonnage. Le trait de coupe A fait référence à la figure 21.

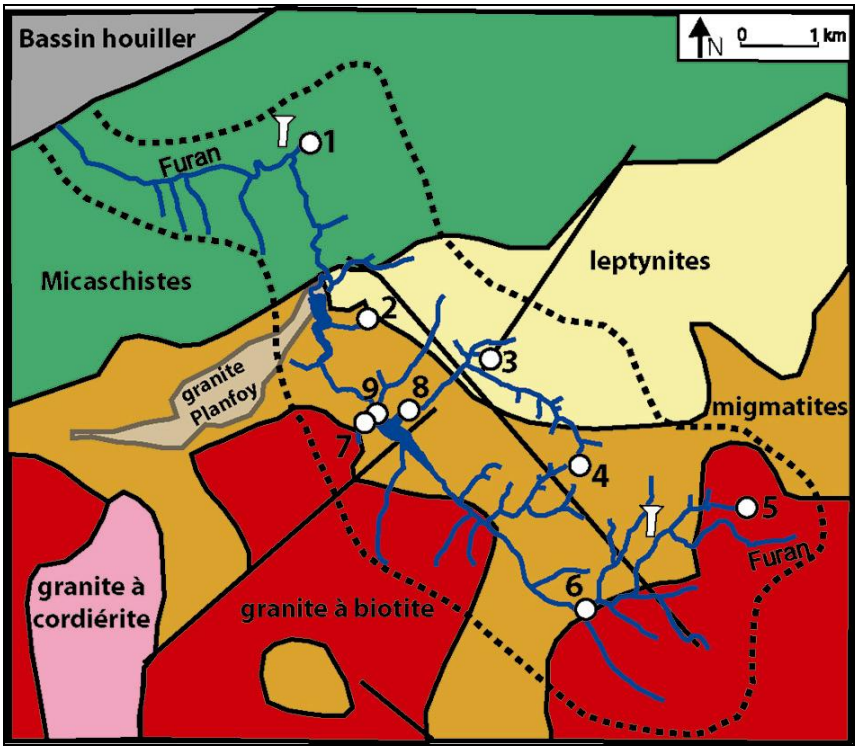


Fig. 23 : bassin versant amont du Furan et relation avec la géologie ; les numéros correspondent à ceux employés dans la figure 22 ; d'après Vitel, 2000.

III.1.2 Ecoulements et débits

Les débits du Furan sont particuliers : au lieu d'être maximaux entre mars et avril, comme pour la plupart des rivières du bassin de la Loire, ils le sont en mai (4,1m^3/s sur la période 1951-1980). L'aire d'alimentation du Furan n'est pourtant pas caractérisée par un régime nival de haute montagne (Staron, 1993). L'été présente un étiage marqué (1,5m^3/s en août, moyenne sur 30 ans), lié à la forte densité sylvicole en amont et à la nature cristalline du substratum. En octobre, souvent lors d'évènements de type cévenol, la reprise de l'écoulement est très nette (2,6m^3/s en moyenne trentenaire, ce qui correspond également au débit moyen annuel). Pour expliquer cette cyclicité des débits, Staron (1997) considère qu'ils résultent de l'écoulement direct des précipitations minorées de l'évapotranspiration et du ressuyage des sols et des nappes. En été, la composante profonde est mise à contribution pour soutenir le débit, puis se reconstitue en hiver. Durant les autres saisons, c'est l'excédent de pluie par rapport à l'évapotranspiration qui alimente le Furan.

L'estimation des variations de débit, faute d'un échantillonnage journalier, s'est faite en utilisant les volumes calculés par l'organisme gestionnaire (Stéphanoise des Eaux) en entrée

du barrage amont (Fig. 24). Les variations de volumes collectés au barrage, tout comme les variations de débits enregistrés sur les ruisseaux (pont de Barbarie, n°8 Fig.22), sont en effet fortement dépendants des précipitations journalières et des ruissellements associés. La cyclicité saisonnière des apports n'est cependant pas nette, l'année 2003 très sèche succédant à l'année 2002, plus humide et aux débits estivaux importants. Cependant, entre 2000 et 2003, les étiages se situent préférentiellement en août et septembre (Fig. 25). Les maxima d'écoulement constatés correspondent soit au mois de mai (2001), soit à des épisodes cévenols en fin d'automne (2002, 2003).

Les lavoirs admettent plusieurs comportements. Les débits du lavoir de Rochetaillée, tout comme Essertines, ne montrent que des variations relatives, puisque régulés par tubage. Le captage de Barbanche connaît peu de variations de débit, contrairement à celui du Bessat qui admet des variations soudaines. Ce dernier a donc une réponse rapide aux fortes pluies, caractéristique soit d'un aquifère très superficiel soit d'une faible composante profonde perturbée par les ressuyages de surface lors d'intempéries. Des modèles basés sur l'évolution isotopique des lavoirs seront établis par la suite, pour essayer de déterminer quel régime prédomine (cf III.7).

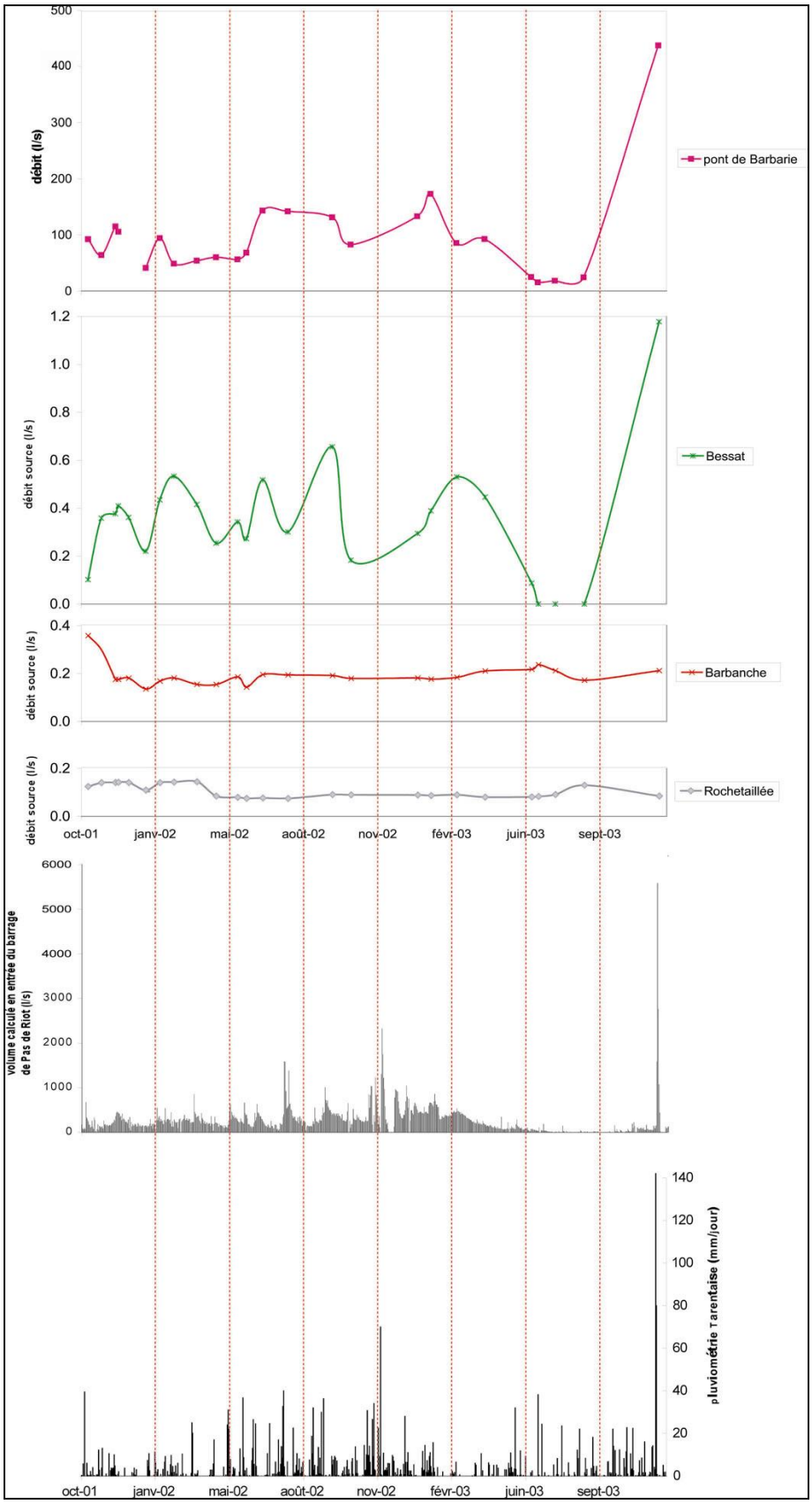


Fig. 24 : relations pluies – débit des lavoirs et ruisseaux du bassin amont du Furan ; la pluviométrie journalière est prise à Tarentaise ; les débits en entrée du barrage de Pas de Riot sont fournis par la Stéphanoise des Eaux ; les lavoirs de Rochetaillée (débit contrôlé), Barbanche (débit stable) et Bessat (fortes variations de débit) sont indiqués, ainsi que le ruisseau de Barbarie (fortes variations de débit).

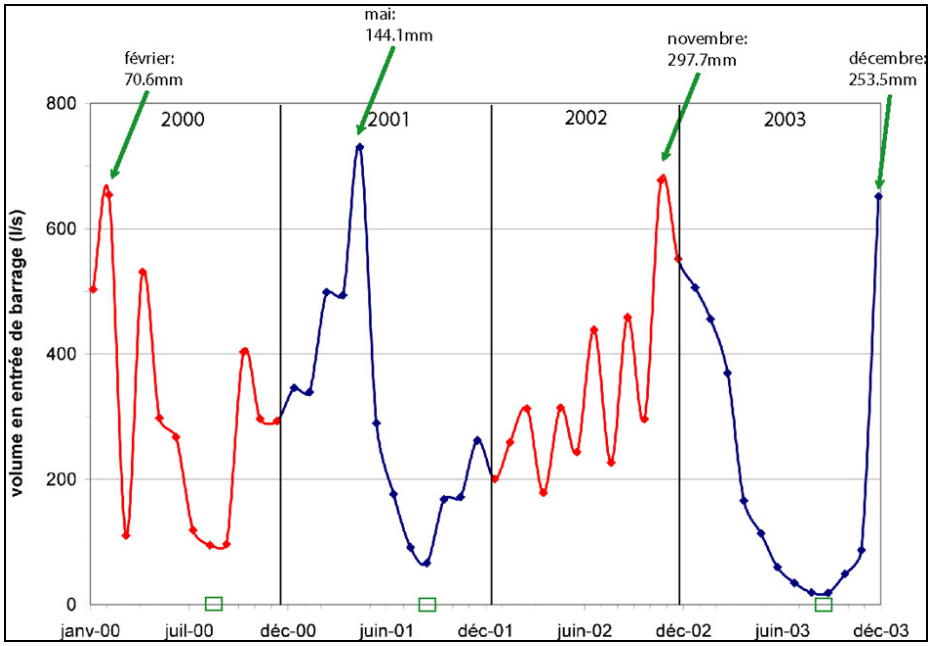


Fig. 25 : cyclicité mensuelle des apports au barrage de Pas de Riot ; les rectangles sur les abscisses figurent les mois à apports minimaux (août – septembre) ; les quantités indiquées en mm représentent la hauteur mensuelle précipitée à Tarentaise.

III.1.3 Autres ressources superficielles étudiées du département

Les ressources superficielles du département ne sont pas limitées au seul bassin versant du Furan. Les Monts du Lyonnais et surtout les Monts du Forez recèlent de nombreuses rivières, dont les cours sont influencés par des directions structurales majeures (NNW – NNE et ENE – WNW). Les autres sources superficielles et rivières suivies durant la période d'échantillonnage sont indiquées sur la Fig. 20 (monts du Forez et partie Sud de la plaine). Les débits n'ont pas été suivis, le parti pris étant d'utiliser ces points comme référence du pôle "aquifères de surface" pour comparaison avec le pôle "eaux minérales" du bassin. Ils serviront donc de point de repère tant au niveau composition chimique qu'au niveau composition isotopique.

La qualité des principales rivières drainant les reliefs bordiers de la plaine du Forez (http://www.cg42.fr) est surtout marquée, en plaine, par une concentration non négligeable en dérivés azotés issus des amendements agricoles. Les pH sont conséquemment neutres à basiques, les conductivités s'étageant de 100µS.cm^{-1} (Lignon à Boën) à 600-800µS.cm^{-1} (Volvon à St-Galmier). Les variations de composition enregistrées dans les eaux de surface se retrouvent aussi dans les aquifères superficiels (RN SISEAU).

Tab. 13 : Domaine Furan

	Rochetaillée	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO3	PO4	SO4	HCO3	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	débit	dO	dD	eh	électroneutralité (%)	TDS
moyenne		0.05	0.01	0.05	0.03	0.08	0.02	•	3.29	1.04	6.22	0.63	3.13	0.03	•	0.06	3.31	3.06	1.37	7.88	3.81	12.90	12.55	-0.48	53.12	-0.02	6.38	0.10	-9.40	-61.00	-1.50	-3.39	31.62
dév. std		0.03	•	0.06	0.004	•	0.03	•	0.45	0.07	0.37	0.24	0.13	0.01	•	0.06	1.07	0.58	3.26	0.34	•	6.23	4.70	22.13	10.68	0.91	0.44	0.02	0.30	4.00	22.45	1.75	3.08
erreur std		0.01	•	0.02	0.003	•	0.01	•	0.11	0.02	0.09	0.06	0.03	0.002	•	0.01	0.26	0.14	1.33	0.08	•	1.51	1.14	5.37	2.59	0.22	0.11	0.01	0.10	1.00	5.61	0.44	0.77
minimum	11/01/2002	0.03	•	0.00	0.03	0.07	0.01	•	2.29	0.95	4.97	0.42	2.96	0.03	•	0.04	2.29	2.30	0.00	7.30	•	-2.50	5.40	-48.90	43.00	-2.03	5.55	0.08	-10.10	-69.00	-48.90	-5.21	28.33
maximum	05/12/2003	0.11	•	0.14	0.03	0.08	0.10	•	4.25	1.16	6.67	1.43	3.50	0.06	•	0.28	6.33	4.13	8.02	8.60	•	23.00	19.30	34.30	73.00	1.40	7.51	0.14	-8.90	-57.00	34.30	2.57	41.39
nombre	17	8	1	7	2	2	9	0	17	17	17	17	17	12	0	17	17	17	6	17	1	17	17	17	17	17	17	17	17	17	16	16	16

	Essertines dauphin	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO3	PO4	SO4	HCO3	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	débit	dO	dD	eh	électroneutralité (%)	TDS
moyenne		0.10	•	0.12	0.10	0.58	0.05	•	5.14	1.66	5.32	2.43	6.36	0.05	•	0.04	5.51	19.19	0.01	8.61	2.29	12.49	12.93	45.49	68.90	1.85	5.59	0.17	-9.10	-62.00	45.07	0.21	59.73
dév. std		0.01	•	0.24	0.07	0.94	0.07	•	7.30	0.75	0.92	3.64	2.49	0.01	•	0.01	6.74	12.97	•	3.33	•	5.36	6.58	25.40	10.64	1.05	0.54	0.25	0.40	4.00	26.30	6.01	38.83
erreur std		0.01	•	0.09	0.03	0.54	0.02	•	1.89	0.19	0.24	0.94	0.64	0.003	•	0.003	1.74	3.35	•	0.86	•	1.38	1.70	6.56	2.75	0.27	0.14	0.06	0.10	1.00	7.03	1.61	10.38
minimum	11/01/2002	0.09	•	0.002	0.05	0.01	0.02	•	2.07	1.06	4.17	0.90	4.72	0.04	•	0.03	2.36	7.24	•	4.86	•	3.00	3.60	-30.50	54.00	-1.26	4.76	0.004	-9.90	-71.00	-30.50	-16.40	38.57
maximum	05/12/2003	0.11	•	0.65	0.22	1.66	0.26	•	31.45	4.17	8.41	15.47	14.72	0.07	•	0.07	28.02	60.11	•	19.92	•	19.70	23.30	79.20	98.00	3.24	7.20	0.88	-8.60	-57.00	79.20	11.46	190.26
nombre	15	2	0	7	5	3	12	0	15	15	15	15	15	11	0	15	15	15	1	15	1	15	15	15	15	15	15	15	15	15	14	14	14

	Essertines	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO3	PO4	SO4	HCO3	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	débit	dO	dD	eh	électroneutralité (%)	TDS
moyenne		0.05	•	0.01	0.16	0.10	0.02	•	4.49	1.09	5.86	1.00	5.52	0.04	•	0.07	2.75	9.59	0.10	8.36	7.63	12.92	12.20	18.95	62.36	0.77	6.00	0.02	-9.40	-63.00	18.95	0.32	46.30
dév. std		0.01	•	0.003	0.07	•	0.02	•	1.59	0.11	0.63	1.02	0.78	0.01	•	0.09	0.74	1.16	0.13	0.39	•	5.09	6.03	19.84	3.26	0.82	0.48	0.01	0.50	3.00	19.84	3.53	6.37
erreur std		0.01	•	0.002	0.02	•	0.01	•	0.48	0.03	0.19	0.31	0.23	0.002	•	0.03	0.22	0.35	0.05	0.12	•	1.54	1.82	5.98	0.98	0.25	0.15	0.002	0.10	1.00	5.98	1.06	1.92
minimum	11/01/2002	0.04	•	0.004	0.07	•	0.01	•	3.83	0.96	5.42	0.60	4.73	0.03	•	0.04	1.83	8.25	0.02	7.87	•	3.00	4.60	-22.50	58.00	-0.94	5.33	0.01	-10.20	-67.00	-22.50	-5.78	33.07
maximum	18/07/2003	0.06	•	0.01	0.30	•	0.06	•	9.26	1.36	7.69	4.06	7.18	0.05	•	0.35	4.29	11.03	0.36	9.12	•	19.70	21.30	42.50	68.00	1.75	7.06	0.04	-8.80	-59.00	42.50	5.57	60.87
nombre	11	2	0	4	11	1	6	0	11	11	11	11	11	8	0	11	11	11	6	11	1	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11

	Barbanche	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO3	PO4	SO4	HCO3	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	débit	dO	dD	eh	électroneutralité (%)	TDS
moyenne		0.08	•	0.02	•	0.00	0.06	•	11.58	2.43	4.75	2.23	7.24	0.07	•	0.04	28.32	10.70	0.05	5.86	3.05	12.02	10.42	72.29	133.95	2.96	5.12	0.19	-9.90	-64.00	70.94	-2.05	78.65
dév. std		0.09	•	0.02	•	•	0.03	•	1.33	0.15	0.26	0.47	0.38	0.004	•	0.01	4.06	4.23	0.05	0.85	•	7.14	2.58	17.88	3.13	0.74	0.41	0.03	0.40	2.00	17.55	3.82	9.52
erreur std		0.03	•	0.01	•	•	0.01	•	0.32	0.04	0.06	0.11	0.09	0.001	•	0.003	0.99	1.03	0.02	0.21	•	1.73	0.63	4.34	0.76	0.18	0.10	0.01	0.10	1.00	4.39	0.96	2.38
minimum	11/01/2002	0.01	•	0.005	•	•	0.04	•	9.35	2.30	4.45	1.79	6.78	0.07	•	0.02	23.85	8.23	0.01	5.19	•	-6.20	6.40	14.50	130.00	0.60	4.50	0.14	-10.60	-68.00	14.50	-11.24	71.28
maximum	05/12/2003	0.29	•	0.04	•	•	0.17	•	15.23	2.87	5.52	3.82	8.24	0.08	•	0.07	41.19	26.33	0.10	8.56	•	22.80	14.70	93.90	140.00	3.86	6.41	0.24	-9.20	-60.00	89.00	4.32	111.97
nombre	17	8	0	7	0	1	17	0	17	17	17	17	17	16	0	17	17	17	4	17	1	17	17	17	17	17	17	17	17	17	16	16	16

	Bessat	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO3	PO4	SO4	HCO3	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	débit	dO	dD	eh	électroneutralité (%)	TDS
moyenne		0.04	•	0.02	•	0.01	0.05	•	5.94	1.17	6.43	1.66	3.20	0.03	•	0.07	7.98	11.41	0.04	5.23	5.34	8.99	9.14	2.53	42.75	-0.10	5.83	0.44	-10.30	-65.00	34.58	0.30	48.09
dév. std		0.03	•	0.03	•	•	0.03	•	6.86	0.36	1.09	1.85	2.25	0.01	•	0.10	13.77	15.50	0.05	2.20	•	6.90	1.71	112.50	2.18	4.82	0.47	0.29	0.40	2.00	19.05	6.07	40.87
erreur std		0.02	•	0.02	•	•	0.01	•	1.98	0.10	0.31	0.53	0.65	0.004	•	0.03	3.98	4.47	0.03	0.63	•	1.99	0.49	32.48	0.63	1.45	0.14	0.08	0.10	1.00	5.74	1.75	11.80
minimum	11/01/2002	0.02	•	0.002	•	•	0.01	•	3.13	0.89	5.31	0.66	2.19	0.03	•	0.02	2.54	3.50	0.01	3.72	•	-7.00	6.60	-350.00	39.00	-14.45	5.15	0.09	-10.90	-70.00	-11.50	-11.40	30.60
maximum	05/12/2003	0.07	•	0.08	•	•	0.09	•	27.03	2.25	9.00	6.04	10.28	0.06	•	0.39	51.08	53.27	0.10	11.89	•	17.00	13.40	57.30	46.00	2.35	6.86	1.18	-9.70	-61.00	57.30	6.67	171.08
nombre	12	3	0	5	0	1	5	0	12	12	12	12	12	8	0	12	12	12	3	12	1	12	12	12	12	11	11	12	12	12	11	12	12

	Tarentaise	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO3	PO4	SO4	HCO3	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	débit	dO	dD	eh	électroneutralité (%)	TDS
moyenne		0.14	0.06	0.05	•	0.26	0.07	•	32.63	1.32	4.38	2.33	8.67	0.04	•	0.11	58.40	9.40	0.06	11.96	0.76	11.61	12.15	39.55	226.68	1.61	5.38	0.12	-9.60	-63.00	55.13	-1.38	132.63
dév. std		0.07	0.05	0.04	•	•	0.05	•	13.89	0.71	0.59	1.51	4.98	0.02	•	0.05	33.28	3.64	•	3.70	•	6.57	5.52	61.65	80.59	2.55	0.35	0.08	0.40	4.00	20.86	3.19	59.20
erreur std		0.03	0.02	0.01	•	•	0.01	•	3.71	0.19	0.16	0.40	1.33	0.01	•	0.01	8.89	0.97	•	0.99	•	1.82	1.48	16.48	21.54	0.68	0.10	0.02	0.10	1.00	5.79	0.85	15.82
minimum	18/02/2002	0.06	0.000	0.003	•	•	0.02	•	19.51	0.62	3.53	1.08	3.79	0.02	•	0.06	26.28	3.89	•	7.47	•	-2.00	6.70	-163.00	137.00	-6.76	4.70	0.004	-10.30	-70.00	17.30	-4.58	80.21
maximum	05/12/2003	0.27	0.14	0.12	•	•	0.15	•	68.93	2.90	5.40	6.66	18.46	0.10	•	0.25	133.32	18.42	•	22.21	•	21.80	20.60	82.10	390.00	3.37	6.06	0.21	-9.00	-52.00	82.10	4.97	280.15
nombre	14	7	9	7	0	1	13	0	14	14	14	14	14	9	0	14	14	14	1	14	1	13	14	14	14	14	13	14	14	14	13	14	14

	Souvignet	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO3	PO4	SO4	HCO3	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	débit	dO	dD	eh	électroneutralité (%)	TDS
moyenne		0.13	•	0.06	•	0.10	0.02	•	6.50	1.62	5.11	1.42	5.08	0.04	•	0.04	12.79	10.27	0.24	6.65	5.34	10.98	9.14	-24.89	83.54	-1.02	6.79	127.00	-9.70	-62.00	-24.89	-1.80	55.08
dév. std		0.11	•	0.08	•	•	0.03	•	0.99	0.11	0.38	0.17	0.23	0.002	•	0.01	3.42	7.64	0.15	0.66	•	4.96	3.80	27.33	4.25	1.13	0.58	157.70	0.40	3.00	27.33	9.33	11.50
erreur std		0.05	•	0.02	•	•	0.01	•	0.26	0.03	0.10	0.05	0.06	0.001	•	0.003	0.91	2.04	0.05	0.18	•	1.32	1.02	7.31	1.14	0.30	0.16	47.60	0.10	1.00	7.31	2.49	3.07
minimum	11/01/2002	0.02	•	0.01	•	•	0.01	•	4.79	1.30	4.32	1.13	4.63	0.03	•	0.03	8.53	6.20	0.05	5.76	•	1.50	2.80	-73.60	75.00	-3.03	5.68	25.00	-10.20	-69.00	-73.60	-32.81	45.20
maximum	05/12/2003	0.30	•	0.20	•	•	0.10	•	8.00	1.72	5.72	1.72	5.34	0.04	•	0.07	21.62	36.36	0.47	8.14	•	17.80	14.50	26.40	91.00	1.09	7.94	495.00	-9.10	-58.00	26.40	6.80	92.02
nombre	14	5	0	11	0	1	10	0	14	14	14	14	14	11	0	14	14	14	8	14	1	14	14	14	14	14	14	11	14	14	14	14	14

	Planfoy	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO3	PO4	SO4	HCO3	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	débit	dO	dD	eh	électroneutralité (%)	TDS
moyenne		0.09	•	0.05	•	0.09	0.03	•	3.46	0.89	6.94	0.71	3.60	0.02	•	0.10	3.58	7.56	0.05	14.41	1.53	11.76	9.42	13.89	48.91	0.54	6.14	•	-9.30	-62.00	13.89	-8.32	41.39
dév. std		0.12	•	0.06	•	•	0.02	•	0.41	0.08	1.54	0.15	0.25	0.002	•	0.02	3.33	12.22	0.06	2.06	•	6.45	3.85	21.21	4.37	0.86	0.40	•	0.40	4.00	21.21	17.45	16.83
erreur std		0.04	•	0.02	•	•	0.01	•	0.10	0.02	0.37	0.04	0.06	0.000	•	0.004	0.81	2.96	0.04	0.50	•	1.56	0.93	5.30	1.06	0.21	0.10	•	0.10	1.00	5.30	4.23	4.08
minimum	11/01/2002	0.02	•	0.001	•	0.07	0.01	•	2.41	0.75	5.43	0.45	3.15	0.02	•	0.08	2.07	2.44	0.01	12.86	•	-2.40	3.60	-32.30	33.38	-1.35	5.28	•	-10.00	-73.00	-32.30	-58.89	32.66
maximum	05/12/2003	0.37	•	0.14	•	0.11	0.09	•	4.00	1.05	12.71	1.07	3.94	0.02	•	0.14	15.96	40.44	0.09	20.76	•	19.50	15.60	49.50	53.00	2.04	7.21	•	-8.80	-57.00	49.50	2.30	88.64
nombre	17	9	0	7	0	2	14	0	17	17	17	17	17	10	0	17	17	17	2	17	1	17	17	16	17	17	16	0	17	17	16	17	17

	Barbarie	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO3	PO4	SO4	HCO3	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	débit	dO	dD	eh	électroneutralité (%)	TDS
moyenne		0.11	•	0.06	•	0.07	0.05	•	11.24	1.84	5.03	2.95	6.37	0.04	•	0.10	23.26	13.92	•	8.54	3.81	10.70	9.47	2.34	106.66	0.10	6.41	94.00	-9.50	-62.00	2.34	-2.53	77.24
dév. std		0.04	•	0.06	•	0.05	0.04	•	7.13	0.28	1.22	2.29	2.06	0.002	•	0.08	12.57	18.00	•	1.89	•	5.68	3.81	37.28	9.41	1.48	0.59	99.20	0.40	3.00	37.28	5.87	45.00
erreur std		0.02	•	0.02	•	0.03	0.01	•	1.73	0.07	0.29	0.55	0.50	0.001	•	0.02	3.05	4.37	•	0.46	•	1.38	0.93	9.32	2.28	0.36	0.15	24.10	0.10	1.00	9.32	1.42	10.92
minimum	11/01/2002	0.05	•	0.01	•	0.01	0.02	•	6.87	1.51	3.94	1.96	5.47	0.04	•	0.06	15.39	0.87	•	7.31	•	-2.40	2.80	-34.00	84.75	-1.39	4.45	15.70	-10.20	-69.00	-34.00	-20.42	50.13
maximum	05/12/2003	0.15	•	0.19	•	0.10	0.15	•	38.37	2.86	9.49	11.73	14.26	0.05	•	0.41	69.63	81.24	•	15.60	•	18.80	15.60	94.70	121.00	3.89	6.99	437.50	-9.10	-60.00	94.70	5.76	247.35
nombre	17	5	0	11	0	3	16	0	17	17	17	17	17	11	0	17	17	17	0	17	1	17	17	16	17	17	16	17	17	17	16	17	17

	exutoire Pas de Riot	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO3	PO4	SO4	HCO3	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	débit	dO	dD	eh	électroneutralité (%)	TDS
moyenne		0.31	0.08	0.44	0.03	0.06	0.04	•	6.22	1.51	5.26	1.43	5.07	0.04	•	0.08	11.00	6.01	•	7.62	7.63	11.98	9.85	-20.94	77.53	-0.80	6.72	286.00	-9.40	-61.00	-20.94	-0.22	52.11
dév. std		0.42	0.05	1.07	•	0.05	0.07	•	1.00	0.09	0.43	0.37	0.41	0.004	•	0.08	1.85	1.62	•	0.47	•	6.78	3.87	27.13	6.72	1.10	0.60	•	0.50	4.00	27.13	4.73	4.31
erreur std		0.21	0.03	0.31	•	0.03	0.02	•	0.26	0.02	0.11	0.09	0.11	0.001	•	0.02	0.48	0.42	•	0.12	•	1.75	1.00	7.25	1.80	0.28	0.16	•	0.10	1.00	7.25	1.22	1.11
minimum	11/01/2002	0.01	0.05	0.002	•	0.004	0.01	•	4.37	1.29	4.03	0.98	4.37	0.03	•	0.05	8.32	3.76	•	6.60	•	-2.40	4.50	-76.90	61.69	-3.21	5.60	•	-10.30	-69.00	-76.90	-9.00	45.15
maximum	05/12/2003	0.92	0.14	3.76	•	0.11	0.26	•	7.84	1.63	5.84	2.47	5.71	0.05	•	0.37	14.38	9.16	•	8.21	•	19.40	15.00	29.50	89.00	1.22	7.99	•	-8.80	-55.00	29.50	5.54	59.15
nombre	15	4	3	12	1	3	12	0	15	15	15	15	15	14	0	15	15	15	0	15	1	15	15	14	14	15	14	1	15	15	14	15	15

Tab. 13 : Domaine Forez

	Chavagneux		Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	F	Cl	NO_3		SO_4		balance ionique (%)	TDS (mg/l)	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)
moyenne			6.35	2.17	4.75	0.65	14.25	0.07	0.26	8.50	0.15		19.48		0.13	77.29	12.7	13.05	32	137	1.30	5.8	-7.4	-51.5
dév. std			1.63	0.40	1.43	0.23	2.42	0.01	0.04	0.29	0.003		2.35		0.35	2.84	•	5.445	12	6	0.50	0.4	0.9	8.5
erreur std			1.15	0.28	1.01	0.16	1.71	0.01	0.03	0.21	0.002		1.66		0.24	2.01	•	3.85	8	5	0.36	0.3	0.7	6.0
minimum	29/08/2002		5.20	1.89	3.74	0.49	12.54	0.06	0.23	8.29	0.14		17.81		-0.12	75.28	•	9.2	24	132	0.94	5.5	-8.1	-57.5
maximum	25/03/2003		7.51	2.46	5.76	0.81	15.96	0.08	0.29	8.71	0.15		21.14		0.37	79.30	•	16.9	40	141	1.65	6.1	-6.7	-45.5
nombre	2		2	2	2	2	2	2	2	2	2		2		2	2	1	2	2	2	2	2	2	2

	Haut Lignon		Na	Mg	Si	K	Ca			Cl	NO_3		SO_4	HCO_3	balance ionique (%)	TDS (mg/l)	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)
moyenne			3.50	0.66	3.86	1.22	2.65			4.78	3.39		2.70	3.71	5.92	28.20	15.129	11.414	-24	49	-0.97	6.5	-8.9	-60.5
dév. std			1.06	0.15	0.27	0.57	0.69			0.67	0.79		0.93	1.02	8.91	4.87	6.612	5.697	47	23	1.95	0.6	0.5	3.8
erreur std			0.40	0.06	0.10	0.22	0.26			0.25	0.30		0.35	0.38	3.37	1.84	2.499	2.153	18	9	0.74	0.2	0.2	1.4
minimum	20/03/2003		2.83	0.49	3.42	0.77	2.06			3.76	2.43		2.18	2.29	-2.67	22.83	5.6	4.6	-122	32	-5.05	5.8	-9.4	-65.9
maximum	06/11/2003		5.82	0.87	4.24	2.37	3.66			5.60	4.28		4.80	5.33	24.44	36.48	23.1	18.2	18	98	0.72	7.8	-7.9	-53.6
nombre	7		7	7	7	7	7			7	7		7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7

	Montarcher		Na	Mg	Si	K	Ca		F	Cl	NO_3	PO_4	SO_4	HCO_3	balance ionique (%)	TDS (mg/l)	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)
moyenne			7.61	1.13	8.89	1.23	5.08		0.05	3.31	2.37	3.78	3.38	22.52	4.06	46.72	10.889	11.36	9	90	0.27	6.2	-9.3	-60.9
dév. std			5.46	0.34	1.66	0.15	1.34		0.03	2.13	1.64	8.45	0.97	7.94	6.22	15.26	6.355	2.634	31	47	1.30	0.6	0.6	5.3
erreur std			1.73	0.11	0.52	0.05	0.42		0.01	0.67	0.55	2.67	0.31	2.51	1.97	4.82	2.118	0.833	10	15	0.43	0.2	0.2	1.7
minimum	01/03/2002		2.80	0.68	4.76	0.95	3.39		•	1.42	0.60	0.07	2.40	12.96	-3.28	28.50	0.7	8.3	-47	51	-1.92	5.4	-9.9	-66.9
maximum	06/11/2003		21.99	1.96	10.30	1.48	7.99		0.07	8.97	4.83	26.98	5.04	36.60	17.16	73.33	19.1	16.5	46	205	1.87	7.2	-7.9	-48.5
nombre	10		10	10	10	10	10		9	10	9	10	10	10	10	10	9	10	10	10	9	9	10	10

	Montarcher village		Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	F	Cl	NO_3	PO_4	SO_4	HCO_3	balance ionique (%)	TDS (mg/l)	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	dC (‰ VPDB)
moyenne			4.28	1.59	9.43	1.41	6.41	0.06	0.09	2.20	4.79	0.06	5.07	19.22	8.13	55.03	12.78	14.08	0	76	0.01	6.2	-9.5	-63.2	-20.5
dév. std			0.51	0.07	0.43	0.13	0.51	0.00	0.01	0.37	1.36	0.05	0.37	4.43	1.82	2.98	4.305	3.939	17	3	0.70	0.4	0.0	3.1	0.5
erreur std			0.23	0.03	0.19	0.06	0.23	0.00	0.00	0.16	0.61	0.02	0.17	1.98	0.91	1.49	1.925	1.762	8	1	0.31	0.2	0.0	1.4	0.2
minimum	17/10/2002		3.46	1.52	8.93	1.19	5.66	0.06	0.09	1.85	3.96	0.00	4.80	15.25	5.87	52.56	9	10.5	-17	74	-0.68	5.7	-9.5	-67.5	-21.3
maximum	06/11/2003		4.80	1.68	9.97	1.51	6.97	0.06	0.11	2.70	7.20	0.12	5.60	26.69	9.84	59.22	19.4	18.4	23	81	0.96	6.5	-9.4	-58.7	-19.9
nombre	5		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5

	ruisseau Chorsin		Na	Mg	Si	K	Ca			Cl	NO_3		SO_4	HCO_3	balance ionique (%)	TDS (mg/l)	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)
moyenne			1.35	0.35	3.31	0.54	1.08			1.30	0.80		1.50	3.17	2.77	12.41	11.2	8.6	-8	28	-0.32	6.5	-9.3	-63.9
dév. std			0.28	0.10	0.39	0.12	0.37			0.31	0.22		0.37	1.85	6.11	2.24	3.837	3.188	21	11	0.87	0.6	0.4	3.3
erreur std			0.09	0.03	0.12	0.04	0.12			0.10	0.07		0.12	0.62	1.93	0.71	1.213	1.008	7	3	0.27	0.2	0.1	1.1
minimum	24/04/2002		0.63	0.25	2.80	0.31	0.70			0.87	0.47		1.11	1.52	-3.45	9.86	5.6	4	-35	17	-1.42	5.6	-9.8	-68.8
maximum	06/11/2003		1.60	0.51	4.06	0.68	1.72			1.76	1.16		2.36	7.63	15.89	16.28	16	13.8	29	52	1.19	7.3	-8.7	-58.2
nombre	10		10	10	10	10	10			10	10		10	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

	ruisseau Moingt		Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	F	Cl	NO_3	PO_4	SO_4	HCO_3	balance ionique (%)	TDS (mg/l)	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)
moyenne			6.79	3.22	7.66	3.29	7.81	0.06	0.09	10.03	7.25	0.21	8.46	16.47	5.672	75.12	18.6	14.75	-28	109	-1.13	6.9	-8.1	-58.3
dév. std			1.14	0.75	1.71	1.51	1.56	0.03	0.03	1.59	3.76	0.22	3.82	4.66	5.743	17.31	7.791	6.05	35	19	1.39	0.4	1.0	6.4
erreur std			0.47	0.31	0.70	0.62	0.64	0.01	0.01	0.65	1.53	0.09	1.56	2.08	2.345	7.07	3.484	2.47	14	8	0.57	0.2	0.4	2.6
minimum	29/08/2002		5.33	2.40	5.82	1.93	5.76	▪	0.06	8.03	4.26	▪	5.87	10.68	-1.19	57.74	6	5.7	-60	88	-2.38	6.5	-9.0	-62.9
maximum	06/11/2003		8.27	4.61	10.87	6.22	10.53	0.08	0.14	12.09	14.42	0.53	15.40	23.64	12.6	107.23	26.5	21.2	35	144	1.43	7.5	-6.3	-46.1
nombre	6		6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5	6	6	5	6	6	6	6	6	6	6

	Sauvain		Na	Mg	Si	K	Ca			Cl	NO_3		SO_4	HCO_3	balance ionique (%)	TDS (mg/l)	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)
moyenne			2.08	0.46	4.60	0.89	2.40			1.62	4.41		1.48	5.35	1.382	24.01	16.2	16.86	-7	38	-0.26	6.3	-9.0	-61.7
dév. std			0.37	0.03	0.21	0.12	0.36			0.36	1.10		0.19	1.09	2.736	3.78	6.766	6.671	23	8	0.92	0.4	0.4	1.4
erreur std			0.17	0.01	0.10	0.05	0.16			0.16	0.49		0.09	0.55	1.223	1.69	3.026	2.984	10	4	0.41	0.2	0.2	0.6
minimum	09/04/2003		1.46	0.42	4.42	0.72	2.06			1.36	3.21		1.28	3.81	-2.44	20.32	6	6.5	-41	33	-1.63	5.9	-9.3	-63.3
maximum	29/08/2003		2.39	0.50	4.84	1.04	2.97			2.25	5.66		1.75	6.15	4.17	30.41	24.6	22.2	11	52	0.45	6.8	-8.4	-60.3
nombre	5		5	5	5	5	5			5	5		5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

	St Rambert	Ba	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	F	Cl	NO_3	PO_4	SO_4	HCO_3	balance ionique (%)	TDS (mg/l)	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	dC (‰ VPDB)
moyenne		0.10	37.29	17.87	16.63	38.47	53.02	0.50	0.38	61.10	65.98	1.29	69.56	128.59	0.634	494.2	20.625	15.96	-77	702	-3.09	7.4	-8.2	-58.0	-16.3
dév. std		0.02	3.76	1.61	1.09	1.44	4.08	0.02	0.03	4.77	5.67	0.27	6.52	29.47	2.031	53.77	9.84	2.129	21	24	0.81	0.3	0.1	2.6	0.6
erreur std		0.01	1.68	0.72	0.49	0.64	1.83	0.01	0.01	2.13	2.53	0.12	2.92	14.74	0.908	24.05	4.92	0.952	9	11	0.36	0.1	0.0	1.2	0.3
minimum	25/03/2003	0.08	33.47	15.74	15.41	36.72	47.51	0.47	0.35	55.18	59.94	0.82	62.52	100.21	-0.93	403.43	11	14.3	-108	668	-4.30	7.1	-8.3	-61.0	-17.1
maximum	06/11/2003	0.12	41.51	19.53	17.54	40.02	56.64	0.52	0.43	68.01	73.30	1.49	79.15	159.27	4.03	537.61	29.6	18.8	-55	734	-2.20	7.9	-8.2	-55.0	-15.4
nombre	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5

	Sury le Comtal		Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	F	Cl	NO_3	PO_4	SO_4	HCO_3	balance ionique (%)	TDS (mg/l)	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)
moyenne			15.13	3.00	6.91	3.79	22.02	0.11	0.15	19.21	4.31	0.38	17.09	40.41	0.31	122.20	19.367	14.933	-40	227	-1.58	6.9	-8.5	-57.0
dév. std			7.74	0.63	0.55	1.89	11.40	0.04	0.05	10.67	2.38	0.21	9.09	29.12	0.191	56.76	8.456	8.462	28	120	1.06	0.4	0.5	1.9
erreur std			4.47	0.36	0.32	1.09	6.58	0.02	0.03	6.16	1.38	0.12	5.25	20.59	0.11	32.77	4.882	4.885	16	69	0.61	0.2	0.3	1.1
minimum	25/03/2003		9.49	2.39	6.27	1.96	11.72	0.07	0.11	10.93	2.38	0.18	10.22	19.82	0.11	73.21	11.1	9.8	-71	126	-2.75	6.4	-8.9	-59.0
maximum	06/11/2003		23.95	3.65	7.29	5.73	34.26	0.15	0.20	31.25	6.97	0.59	27.40	61.00	0.49	184.39	28	24.7	-17	360	-0.69	7.3	-8.0	-55.2
nombre	3		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

	Vassalieu	Ba	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	F	Cl	NO_3	PO_4	SO_4		balance ionique (%)	TDS (mg/l)	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)
moyenne		0.04	7.41	2.52	8.96	3.93	14.09	0.07	0.07	11.67	34.31	0.30	18.46		-0.56	106.44	18.4	12.2	62	164	2.55	5.1	-8.5	-55.0
dév. std		0.02	0.55	0.39	1.76	0.49	1.46	0.01	0.003	1.26	1.55	0.26	0.46		3.355	8.32	10.465	3.551	30	11	1.23	0.5	0.2	2.7
erreur std		0.01	0.32	0.23	1.02	0.29	0.84	0.004	0.002	0.73	0.89	0.15	0.27		1.937	4.80	7.4	2.05	17	6	0.71	0.3	0.1	1.5
minimum	25/03/2003	0.03	6.93	2.29	7.44	3.56	13.08	0.07	0.07	10.47	33.17	0.14	18.00		-2.65	100.82	11	10.1	28	153	1.13	4.8	-8.6	-57.9
maximum	26/06/2003	0.07	8.01	2.97	10.89	4.49	15.77	0.08	0.08	12.99	36.07	0.59	18.93		3.31	115.99	25.8	16.3	83	175	3.38	5.7	-8.3	-52.6
nombre	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		3	3	2	3	3	3	3	3	3	3

	Vidrieu		Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	F	Cl	NO_3	PO_4	SO_4	HCO_3	balance ionique (%)	TDS (mg/l)	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)
moyenne			10.34	4.50	8.48	5.85	11.09	0.09	0.12	18.20	10.04	0.44	10.99	28.02	1.318	123.58	19.25	15.3	-42	163	-1.69	6.7	-7.4	-50.7
dév. std			0.86	0.50	2.05	2.33	0.78	0.003	0.02	2.54	5.56	0.20	2.97	6.86	3.087	20.85	8.767	6.578	10	14	0.43	0.2	1.0	6.6
erreur std			0.43	0.25	1.02	1.17	0.39	0.002	0.01	1.27	2.78	0.10	1.49	3.43	1.543	10.43	4.383	3.289	5	7	0.21	0.1	0.5	3.3
minimum	26/06/2003		9.13	4.10	7.02	4.07	10.54	0.09	0.09	15.20	6.09	0.17	8.36	21.35	-3.19	108.75	6.5	5.8	-51	149	-2.12	6.6	-8.5	-57.5
maximum	06/11/2003		11.17	5.20	11.43	9.03	12.25	0.09	0.15	21.09	17.90	0.62	15.05	34.31	3.7	154.01	26.5	20.9	-33	182	-1.30	7.0	-6.1	-42.2
nombre	4		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

	Vizézy		Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	F	Cl	NO_3		SO_4	HCO_3	balance ionique (%)	TDS (mg/l)	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)
moyenne			4.33	1.50	5.28	1.86	4.08	0.04	0.05	6.60	5.27		4.07	13.74	3.224	43.47	16.767	12.278	-27	97	-1.09	6.7	-9.1	-63.1
dév. std			0.93	0.51	0.44	0.51	0.93	0.01	0.01	2.30	2.76		0.95	5.11	4.966	8.67	7.329	5.226	18	39	0.72	0.4	0.6	4.3
erreur std			0.31	0.17	0.15	0.17	0.31	0.003	0.004	0.77	0.92		0.32	1.70	1.655	2.89	2.443	1.742	6	13	0.24	0.1	0.2	1.4
minimum	24/04/2002		3.58	1.11	4.67	1.29	3.09	0.03	0.04	4.89	0.99		3.08	4.46	-3.12	34.44	6.7	5.8	-47	57	-1.90	6.2	-10.1	-72.7
maximum	06/11/2003		6.59	2.82	6.02	2.53	6.32	0.06	0.07	12.29	10.65		6.11	19.82	10.78	62.55	25.8	19.5	-1	163	-0.05	7.3	-8.0	-59.6
nombre	9		9	9	9	9	9	9	9	9	9		9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9

	Vollon	Ba	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	F	Cl	NO_3	PO_4	SO_4	HCO_3	balance ionique (%)	TDS (mg/l)	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	dC (‰ VPDB)
moyenne		0.96	33.94	10.67	7.68	7.26	42.38	0.23	0.18	64.03	27.59	1.23	50.08	88.90	-0.177	339.27	15.333	14.025	-59	515	-2.39	7.1	-6.1	-46.5	-13.4
dév. std		1.74	25.34	2.27	1.85	1.15	8.99	0.07	0.04	48.50	15.77	1.55	7.97	43.43	5.193	118.37	11.23	6.009	10	149	0.45	0.2	2.0	12.6	1.5
erreur std		0.87	12.67	1.14	0.93	0.57	4.49	0.03	0.02	24.25	7.89	0.78	3.98	21.72	2.596	59.19	6.484	3.004	5	74	0.22	0.1	1.0	6.3	0.8
minimum	25/03/2003	0.07	17.40	7.39	5.42	6.28	31.73	0.14	0.15	27.66	15.59	0.33	42.22	34.85	-4.55	210.69	7.5	7.9	-74	362	-3.06	7.0	-8.2	-60.3	-15.5
maximum	06/11/2003	3.56	71.58	12.65	9.91	8.89	51.45	0.30	0.24	135.20	50.70	3.55	57.71	135.55	6.43	482.25	28.2	21	-51	695	-2.10	7.5	-4.2	-33.3	-11.9
nombre	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4

Tab. 13 : compositions en mg/l extrêmes des lavoirs et rivières du bassin versant amont du Furan et du bassin du Forez ; les températures sont en °C, les conductivités en µS/cm, les débits en l/s, les rapports isotopiques en ‰ VSMOW (erreurs : ± 0.1‰ $\delta^{18}O$: ± 0.2‰ $\delta^{13}C$: ± 1‰ $\delta^{2}H$).

III.2 COMPOSITION CHIMIQUE DES AQUIFERES DE SURFACE

Les compositions chimiques, isotopiques et les paramètres mesurés sur le terrain sont reportées en annexe (Tab. A.5), les moyennes étant présentées dans le tableau 13.
Il faut signaler que les ruisseaux et lavoirs du Furan n'ont fait l'objet que d'une seule détermination du contenu en bicarbonates. Cependant la quantité alors mesurée permet d'obtenir une balance ionique correcte (<10%) pour tous les autres échantillons. Pour les eaux du Forez, l'alcalinité a été déterminée à chaque échantillonnage, à de rares exceptions près.

III.2.1 Paramètres physiques et faciès chimiques

III.2.1.1 Température

Les températures des rivières sont fortement dépendantes des conditions climatiques extérieures, contrairement aux eaux issues d'aquifères qui sont moins sensibles (Fig. 26). Néanmoins, les sources pérennes du Furan connaissent des variations saisonnières de température (Fig. 27), dont l'ampleur est parfois importante (Essertines dauphin). Les sources à contenu ionique plus important (Barbanche, Tarentaise) sont moins dépendantes de la température aérienne, signe d'un aquifère soit plus profond, soit plus volumineux. Toutefois, aucun décalage temporel n'est noté entre les variations de température de l'eau et de l'air, soulignant le caractère rapide de la réponse de l'aquifère. Dans le bassin du Furan, le point le plus fidèlement représentatif des variations climatiques est l'exutoire du barrage de Pas de Riot. Les échantillons récoltés résultent d'un délestage à mi-hauteur de barrage, dans une zone sensible aux mélanges d'eaux de surface et d'eaux profondes, qui reflète assez fidèlement les effets des variations locales (température, oxygénation,…) sur la masse d'eau.

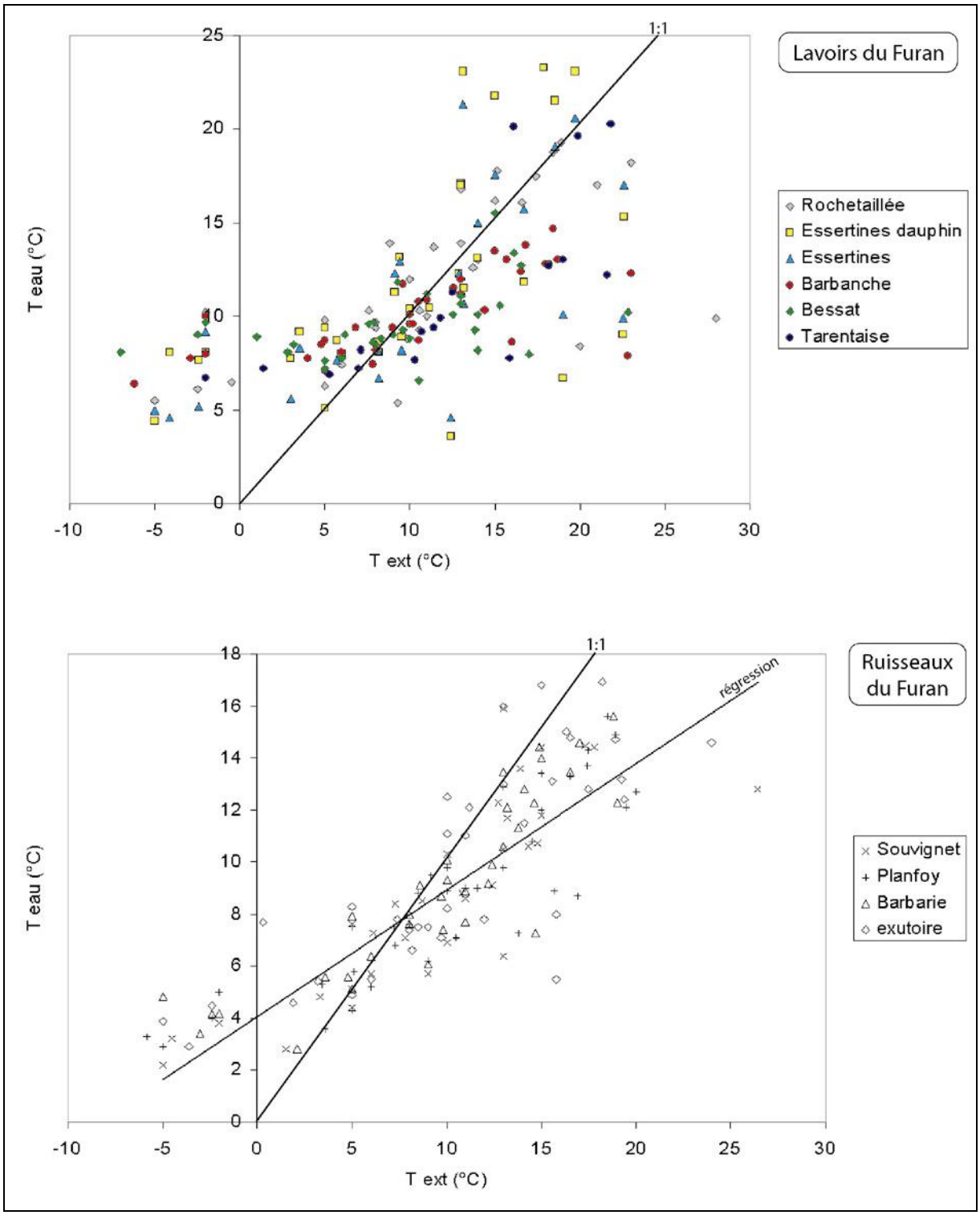


Fig. 26 : relations température extérieure (T_{ext}) – température de l'eau échantillonnée (T_{eau}) pour les sources superficielles et les ruisseaux du bassin du Furan et des Monts et plaine du Forez.

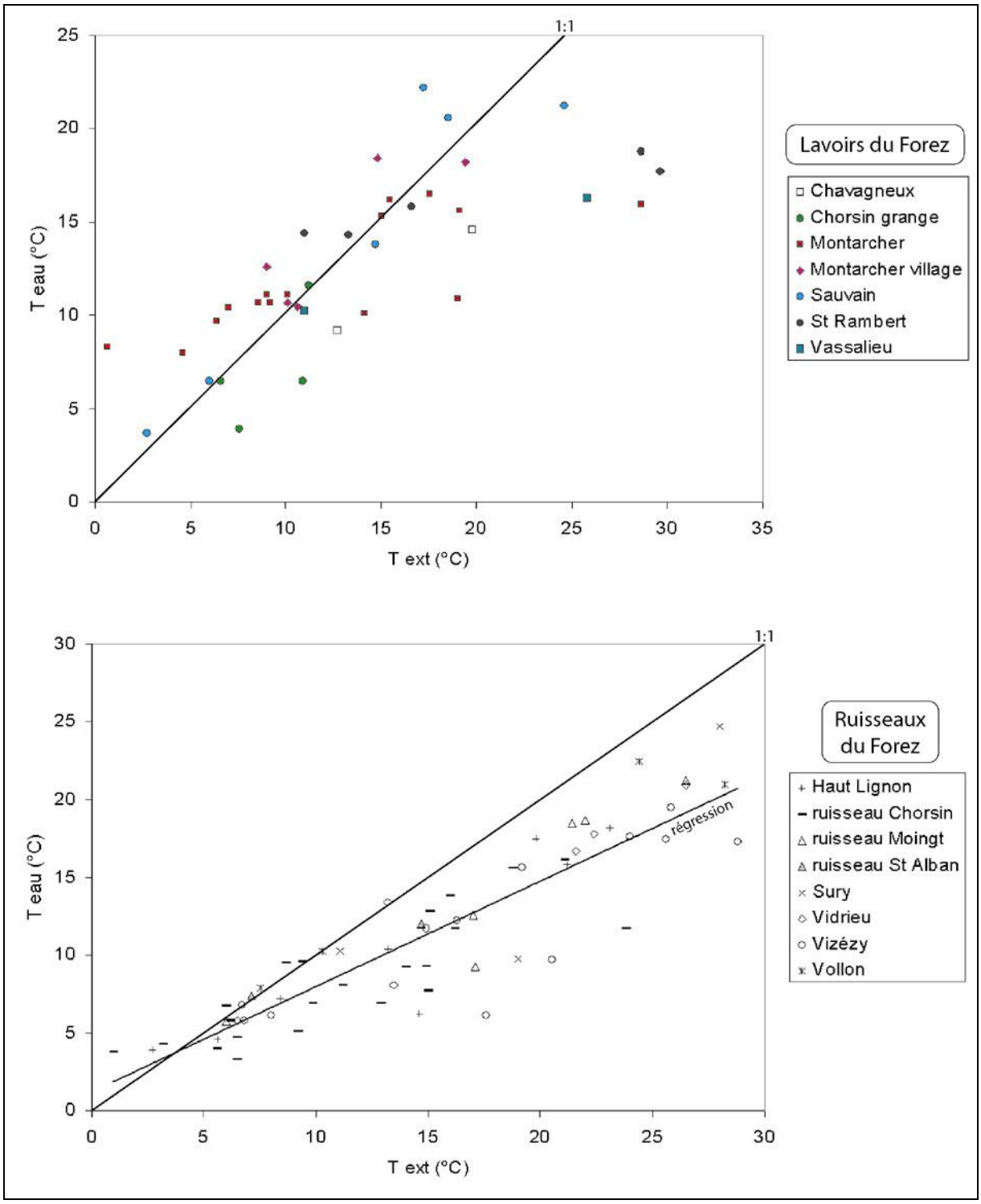


Fig. 26 suite : relations température extérieure (T_{ext}) – température de l'eau échantillonnée (T_{eau}) pour les sources superficielles et les ruisseaux du bassin du Furan et des Monts et plaine du Forez.

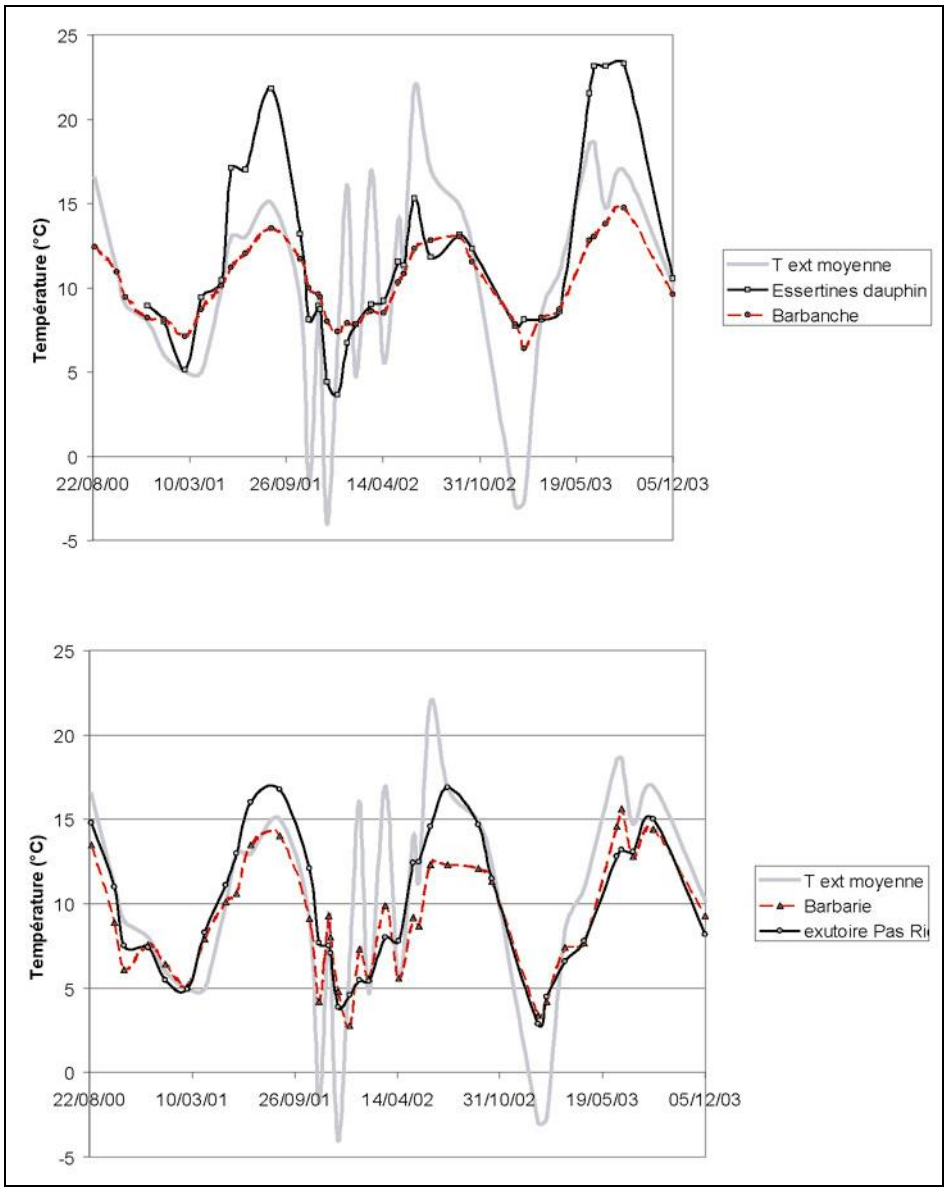


Fig. 27 : variabilité temporelle des températures mesurées dans les eaux échantillonnées en fonction de la température extérieure moyenne régnant dans le bassin lors de la campagne d'échantillonnage, bassin versant du Furan ; dans chaque figure sont représentées la température moyenne, ainsi que les variations des deux extrêmes de chaque catégorie (lavoirs et ruisseaux).

III.2.1.2 pH

Les pH mesurés sont compris entre 5,1 et 6,4 sur le Furan et entre 5,1 et 7,4 dans la plaine. Les pH les plus élevés du Pilat sont relevés pour le lavoir de Rochetaillée (faible contenu ionique), résultat opposé aux pH mesurés dans le Forez, où les prélèvements à plus fort contenu ionique sont aussi ceux à fort pH. Pour les aquifères du Furan, la combinaison pH faible – concentration en oxygène dissous relativement élevée (9 à 10 mg/l ; LBAA, 1994) – TDS modéré semble indiquer une origine principale de recharge par des eaux météoriques

(percolation rapide dans le sol et dans l'arène). Pour les aquifères plus minéralisés (Forez), la modification du pH initial des précipitations (cf II.8.5.1) implique un temps d'interaction plus important, permettant, par consommation de CO_2 lors de l'hydrolyse de silicates et libération d'ions H^+, de modifier les équilibres acide – base de la solution initiale.

III.2.1.3 Eléments majeurs

Dans le domaine amont du Furan, les TDS (Tab. 13) sont compris entre 31 (Rochetaillée) et 130 mg/l (Tarentaise). Pour les eaux de surface du domaine Forez, le contenu en anions – cations varie entre 12 (ruisseau Chorsin, en altitude) et 500 mg/l (St-Rambert : aquifère plus important, proche de la plaine).

Aucune source ou ruisseau ne montre de relation temps – teneur en un élément caractéristique (Fig. 28). Il en est de même pour les relations température de l'eau – teneur en solide dissous (TDS). Seule la sortie du barrage de Pas de Riot semble montrer une cyclicité, où les mois de janvier sont marqués par un pic en chlore et nitrates. La surface du lac étant plus ou moins partiellement gelée lors de ces périodes, l'origine de ces pics est liée soit aux apports des ruisseaux (Barbarie, Souvignet), soit à un mécanisme interne, par le jeu d'inversions de température et de mouvements convectifs associés (variation de densité).

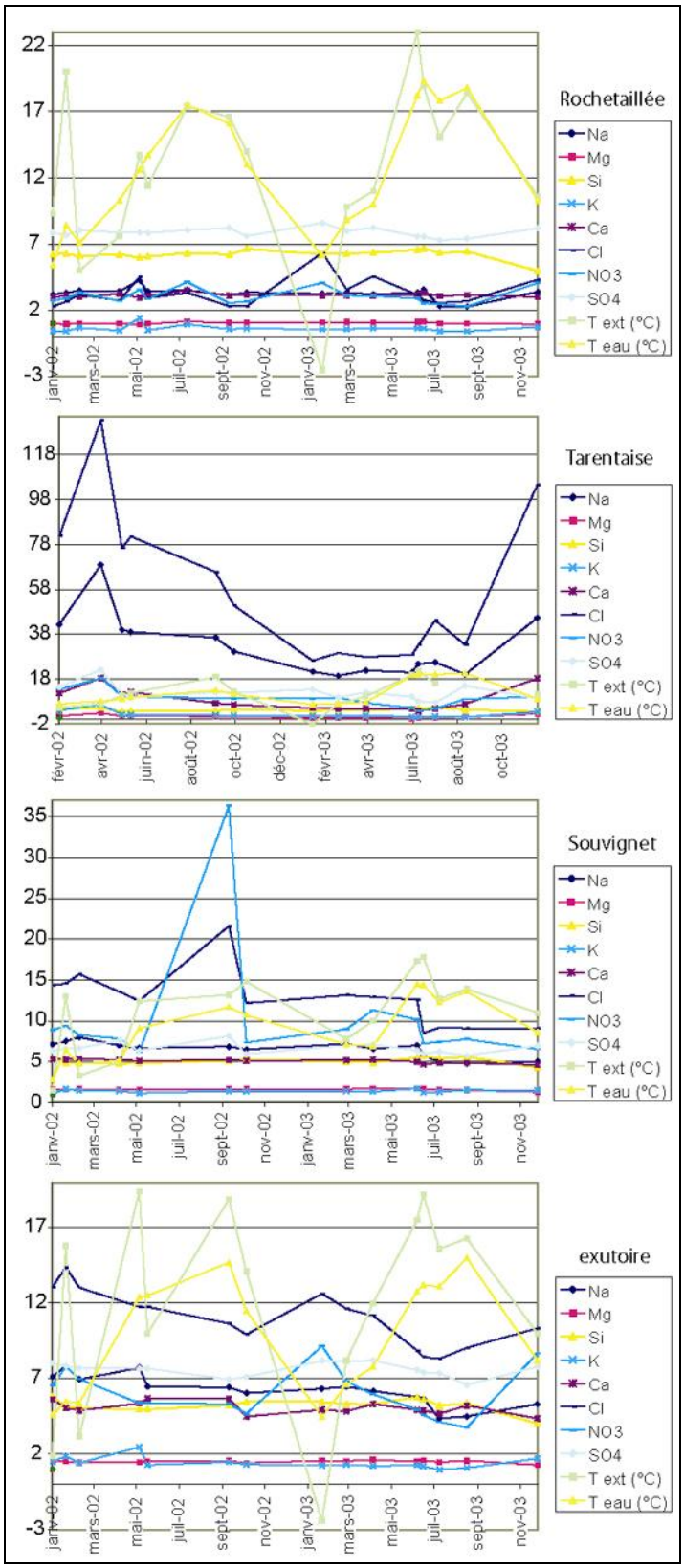


Fig. 28 : variabilité temporelle du contenu en éléments majeurs dissous (ppm) , domaine Furan

III.2.1.4 Diagramme de Piper – composition des eaux de surface

Les gammes d'évolution en composition de chaque point de prélèvement sont synthétisées dans les diagrammes de Piper de la figure 29. Cette représentation, qui a l'inconvénient de représenter les analyses sous forme de pourcentages (dilutions éventuelles masquées), permet cependant d'accéder à une vision globale du contenu chimique d'un échantillon et de cerner les évolutions éventuelles entre plusieurs pôles de contenus différents.

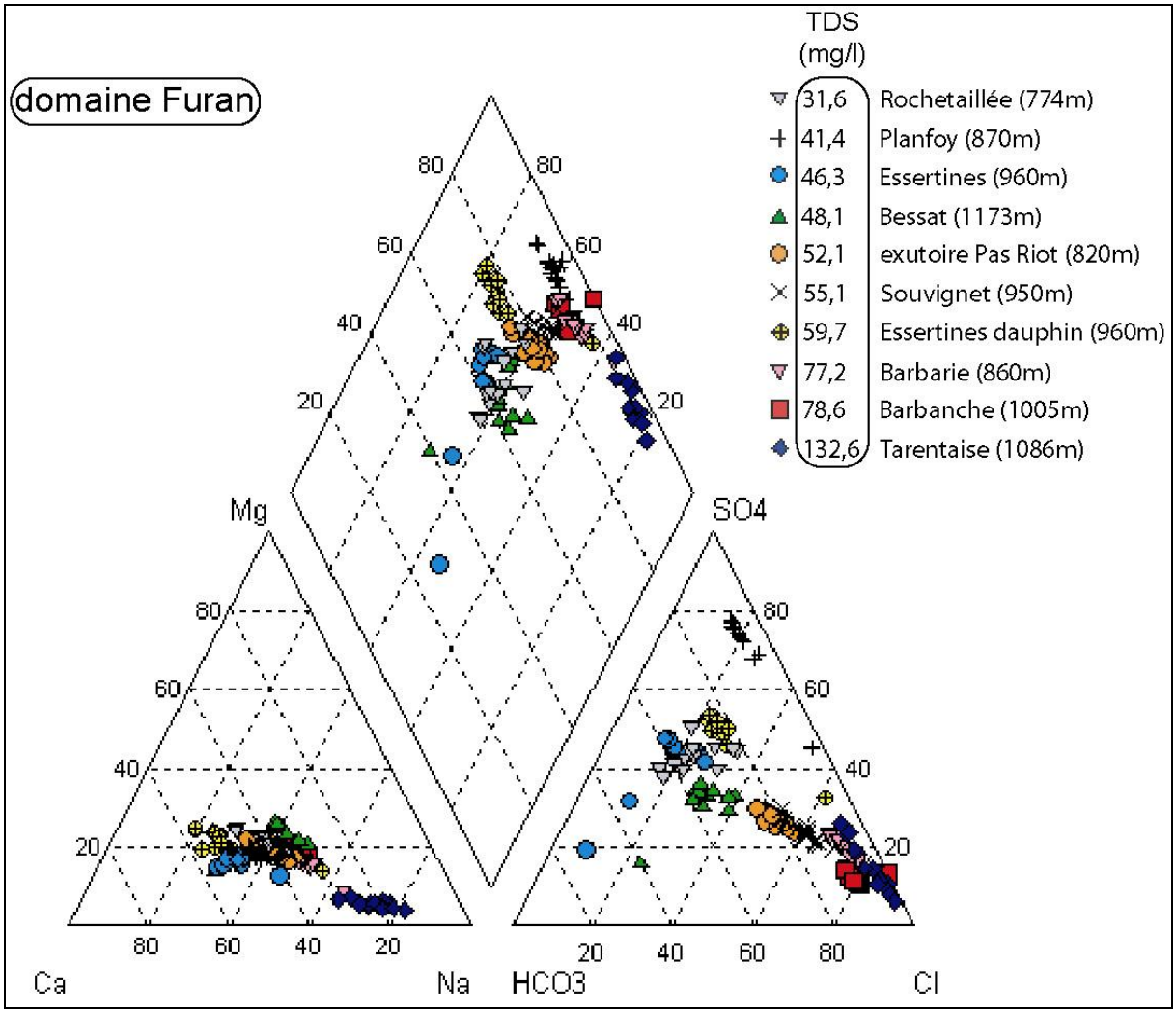
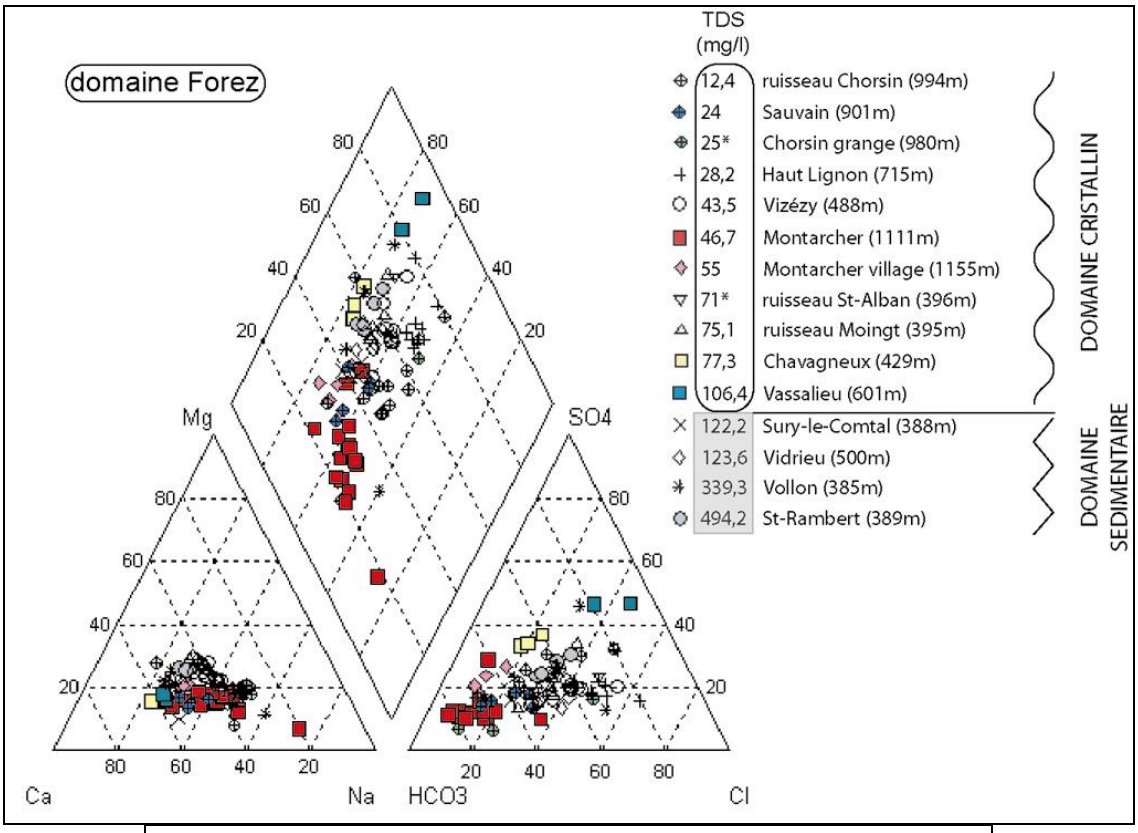


Fig. 29 : diagrammes de Piper pour les eaux superficielles du bassin versant amont du Furan et des monts et plaine du Forez. Les points sont classés par teneurs en solides dissous croissantes (TDS en mg/l) ; * indique une moyenne sur 3 points ou moins. Les altitudes des points de prélèvement, ainsi que 3 analyses sur roches totales, sont aussi indiquées.



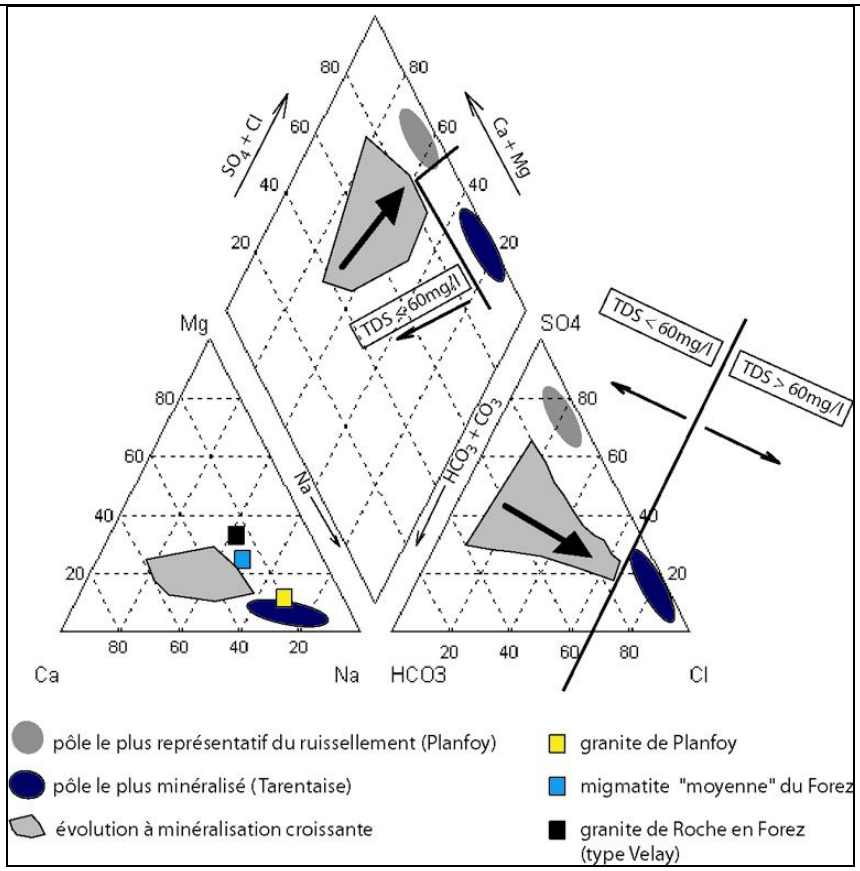


Fig. 29 suite : diagrammes de Piper pour les eaux superficielles du bassin versant amont du Furan et des monts et plaine du Forez. Les points sont classés par teneurs en solides dissous croissantes (TDS en mg/l) ; * indique une moyenne sur 3 points ou moins. Les altitudes des points de prélèvement, ainsi que 3 analyses sur roches totales, sont aussi indiquées.

Le dénominateur commun entre tous les échantillons est un pôle cationique à Ca et Na et un pôle anionique à Cl, auquel s'ajoute HCO_3 dans la partie Forez. Ceci appelle plusieurs remarques :

- pour les eaux de surface du Furan, le pôle le plus minéralisé est riche en Cl et Na. Le sodium est un élément libéré tardivement lors d'une interaction eau – roche (Beaucaire, 1999). En l'absence d'évaporites, l'origine du chlore est principalement atmosphérique. Les quelques analyses chimiques sur roches totales disponibles dans la zone (Clavaud et Ratsimba, 1972 ; Pitiot, 1984) indiquent, hormis une grande présence de silice, une richesse importante en K et Na, Ca et Mg étant moins abondants. Cette relation Na-Cl sera plus amplement abordée en III.3.

- le pôle cationique (Furan et Forez) est pauvre en Mg. Les roches riches en phyllosilicates du flanc Nord du Pilat (Rochetaillée) n'ont donc pas d'incidence forte sur les faciès chimiques des eaux y circulant (Beaucaire, 1999). De plus amples informations sur les interactions eau – roche seront apportées dans la partie III.4, où seront calculés des indices de saturation pour différentes espèces minérales.

- le contenu en anions est variable dans les secteurs étudiés. Bien que les bicarbonates dissous dans des eaux de surface soient majoritairement produits par hydrolyse de silicates en présence de CO_2 atmosphérique et/ou par dissolution de CO_2 du sol (Amiotte Suchet, 1993), les eaux du Furan sont pauvres en bicarbonates. En effet, à solides dissous croissants (Fig. 29), une tendance menant vers un pôle riche en Cl (et non bicarbonate) existe. Pour le groupe Forez, la richesse en Cl n'est pas corrélée à une minéralité croissante. Les teneurs en bicarbonates les plus importantes en proportion sont caractéristiques de sources peu minéralisées. Comme les processus d'hydrolyse ne peuvent être développés pour des sources à faible minéralité, une influence plus forte du CO_2 du sol est donc à supposer (p_{CO2} plus forte ?).

- dans le domaine Furan, le ruisseau de Planfoy et le lavoir de Rochetaillée présentent un rapport sulfates/nitrates proche de 2 (autres points de mesure : 0,5 à 1). Cela peut traduire des processus d'oxydation bactérienne du couple sulfate/sulfure par interaction avec la matière organique du sol, dans un sens favorisant la production de sulfates, ou des processus de nitrification/dénitrification moins poussés pour ces deux

localités. De plus, l'interaction avec la matière organique tamponne le pH du sol et pourrait expliquer les pH mesurés à Rochetaillée (6,4 en moyenne). Un approvisionnement multiple (ruissellements, apports d'eau des horizons du sol) pourrait tamponner la signature à pH acide des lavoirs, permettant aux rivières d'avoir un pH quasi neutre (le Furan au pont de Souvignet par exemple). Le cas du barrage de Pas de Riot est différent, l'eau récoltée résultant de mélanges de multiples sources et de brassage dans la retenue.

La détermination des eaux de composition proche des eaux météoriques est estimée par rapport aux contenus en éléments dissous des précipitations (Fig. 30 ; Celle, 2000 ; Négrel et Roy, 1998). Excepté un point très éloigné relevé dans la Limagne d'Allier, les précipitations ont des contenus en éléments dissous proches. Par comparaison avec la figure 29, les compositions chimiques des lavoirs d'Essertines, Chavagneux, Vassalieu, Rochetaillée, et du ruisseau de Planfoy (TDS = 30-100 mg/l) sont proches du pôle atmosphérique. Alors que dans le Furan, les points de compositions proches des pluies ont un faible contenu en éléments dissous, dans le Forez, les échantillons peu concentrés (ruisseau Chorsin, Chorsin grange) ne reflètent plus la chimie initiale des précipitations. Soit la chimie des pluies est différente, soit la percolation dans l'interface sol/sous-sol, bien que limitée, modifie la composition chimique initiale.

Pour le bassin versant du Furan et les eaux du Forez, les cations majeurs sont respectivement, et par ordre de corrélation décroissante avec TDS : Na, Mg, Ca, en moindre importance K et Sr. Un trait commun à toutes les eaux, qui se retrouve aussi pour les eaux minérales, est une quantité de silice limitée à 20-25 mg/l (équilibre rapide eau – silice), sans corrélation avec la minéralisation totale.

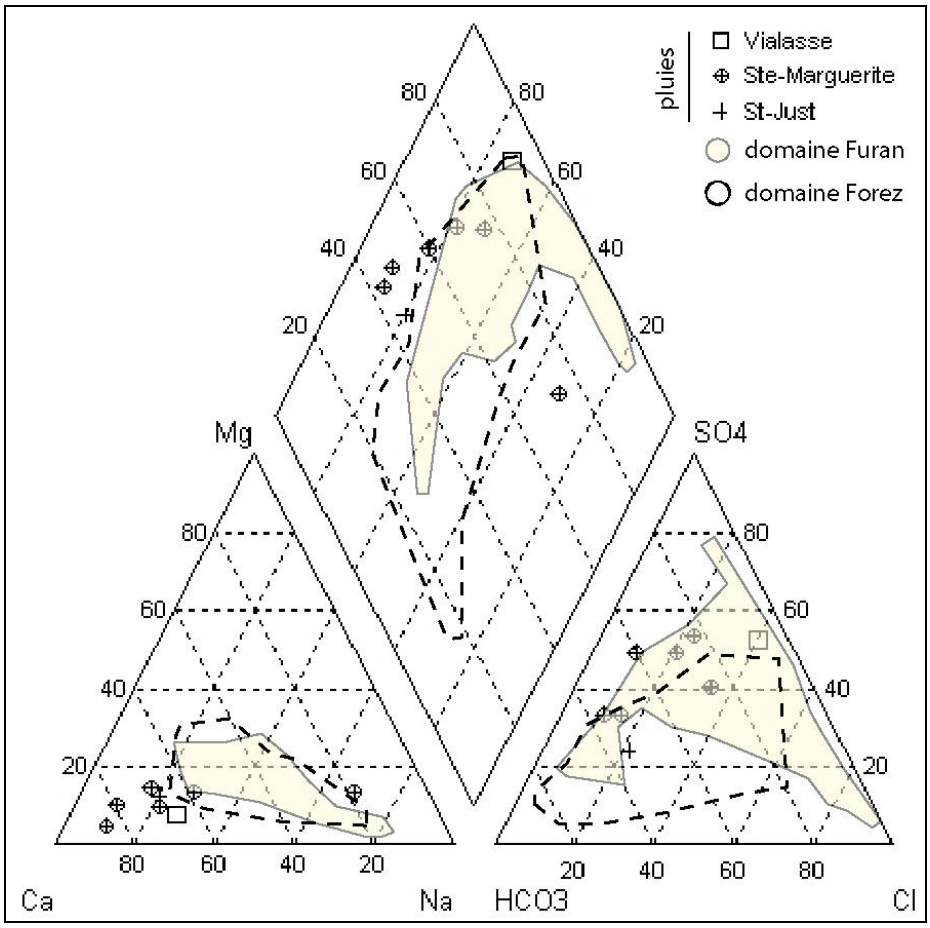


Fig. 30 : diagramme de Piper des eaux de pluies d'après Négrel et Roy, 1998 (Ste-Marguerite) ; Celle, 2000 (Vialasse) ; pour la présente étude (St-Just), la composition en bicarbonates a été recalculée. Les variations des domaines de surface du Furan et du Forez sont également reportés.

III.2.2 Interactions eau – roche

Dans le diagramme molaire Ca-Mg-SiO_2 (Fig. 31) ont été reportées les compositions molaires de différents minéraux et roches. Deux évolutions différentes peuvent être détectées (1 et 2 Fig. 31). La première correspond à une interaction de l'eau avec la fraction riche en silice de la matrice granitique, la seconde souligne des échanges avec des pôles plus magnésiens des aquifères (minéraux ferro-magnésiens type biotite, amphibole, chlorite).

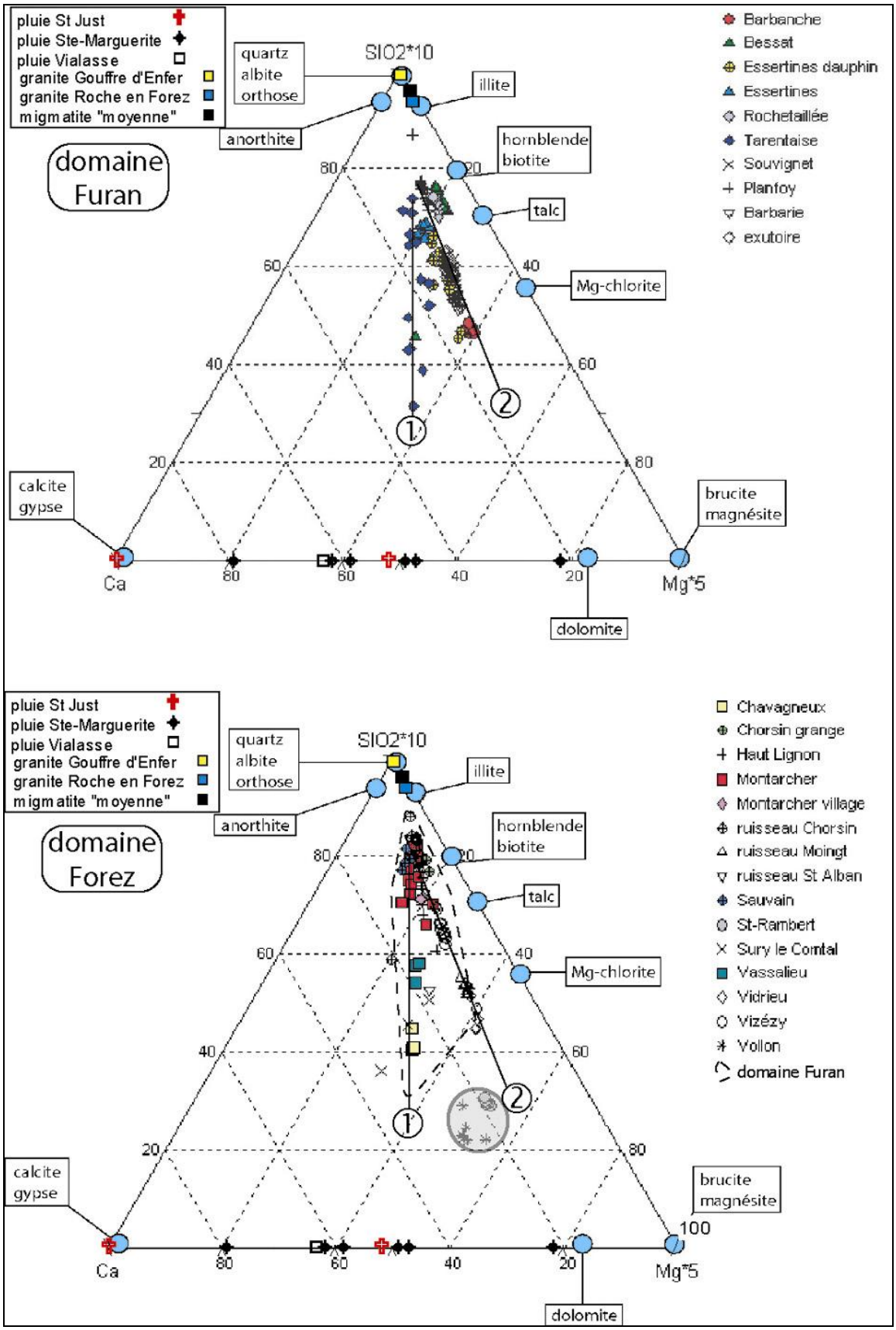


Fig. 31 : diagramme Ca-Mg-SiO_2 sur les eaux de surface du Furan et du Forez ; les compositions des pluies (Fig. 30), des roches (Fig. 29), et de minéraux sont indiquées en référence (concentrations molaires).

Pour déterminer quelle espèce minérale ou produit d'altération de la roche mère contribue à l'enrichissement de l'eau en un ion, l'examen de diagrammes d'activité est utile. Ces diagrammes sont basés sur des rapports logarithmiques des concentrations (en g/kg). Comme les eaux étudiées sont peu chargées, l'approximation g/kg # g/l est faite. La concentration en ions H^+ est extrapolée à partir des mesures de pH (selon $[H^+] = 10^{-pH}$), celle de H_4SiO_4 est supposée égale à celle de SiO_2 (White, 1999). Les calculs des champs de stabilité des minéraux sont déterminés en référence à la base thermodynamique de Helgeson et al. (1978). La température est celle de l'état standard (25°C), les eaux n'exprimant pas d'interaction à des températures supérieures, comme il sera vu plus tard. Les diagrammes sont reportés en annexes (Fig. A.4 et A.5) et se rapportent aux espèces majeures K, Na, Mg, Ca et SiO_2.

Les eaux sont notamment en interaction avec la gibbsite, la kaolinite et la silice amorphe, ce qui traduit une évolution en domaine superficiel de basse température. Ce constat est similaire à celui apporté, dans le cas des interactions avec les plagioclases, par la figure 32 (rapports molaires de Na^+/Ca^{2+} en fonction de ceux de HCO_3^-/H_4SiO_4). Les eaux du domaine Furan ne montrent aucune tendance particulière, sans doute en raison de la pauvreté en bicarbonates. La teneur en H_4SiO_4 contrôle alors en grande partie les espèces dissoutes dans l'eau. Pour les eaux du domaine Forez, il existe une tendance menant d'un pôle superficiel (Chavagneux) vers un pôle à TDS élevé (Vollon et St-Rambert). Dans ces interactions eau – roche, le pôle le moins chargé (ruisseau Chorsin) est dominé par les pluies (Gibbs, 1970), alors que le pôle plus minéral (St-Rambert, Vollon) est marqué par des interactions plus poussées liées à l'aquifère sédimentaire (argiles, marnes, marno-calcaires).

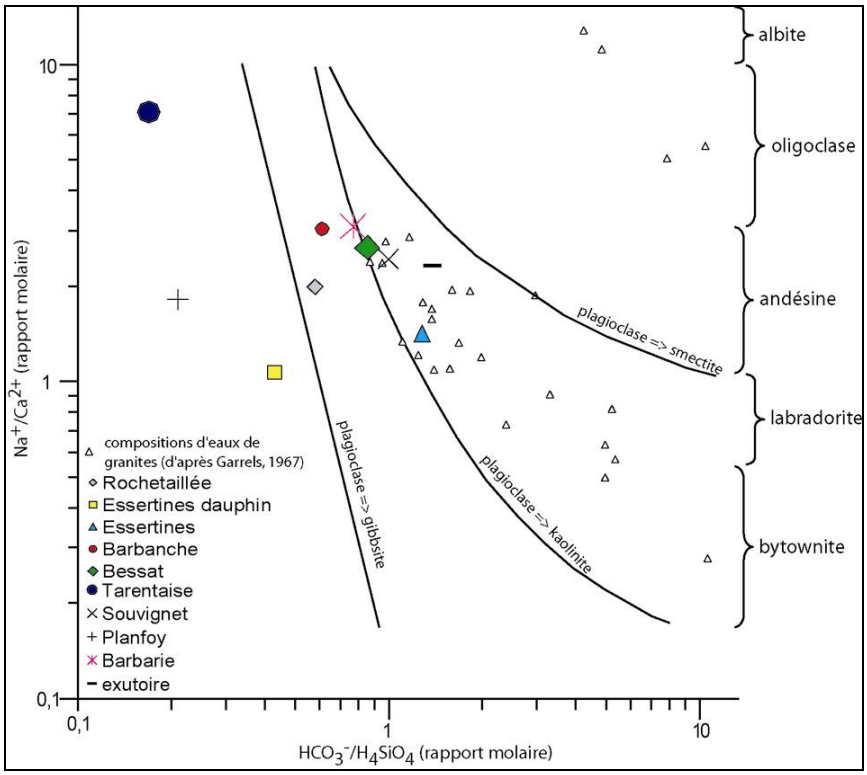


Fig. 32 : Na^+/Ca^{2+} en fonction de HCO_3^-/H_4SiO_4 (rapports molaires) dans le cas d'une interaction eau – plagioclase – domaine Furan.

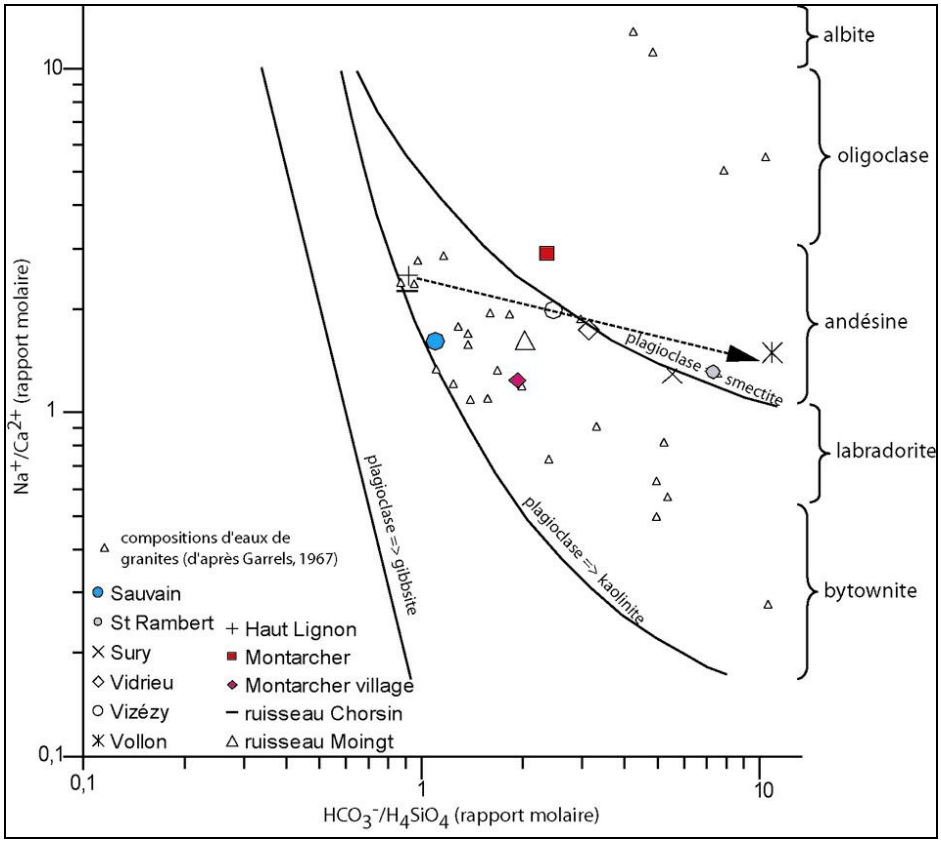


Fig. 32 suite : Na^+/Ca^{2+} en fonction de HCO_3^-/H_4SiO_4 (rapports molaires) dans le cas d'une interaction eau – plagioclase – domaine Forez.

La conservation ou la modification du signal chimique des précipitations peut s'évaluer simplement à l'aide des compositions chimiques des eaux de surface et des compositions chimiques des précipitations. Les deux cas envisagés correspondent aux pluies de St-Just-St-Rambert et Ste-Marguerite (Tab. 9 ; Négrel et Roy, 1998) : on soustrait alors le contenu en éléments majeurs dissous des pluies à celui des eaux (Na, K, Ca, Cl, NO_3, SO_4, et Mg, Si, HCO_3 si mesurés). Les résultats sont présentés dans les figures 33 et 34.

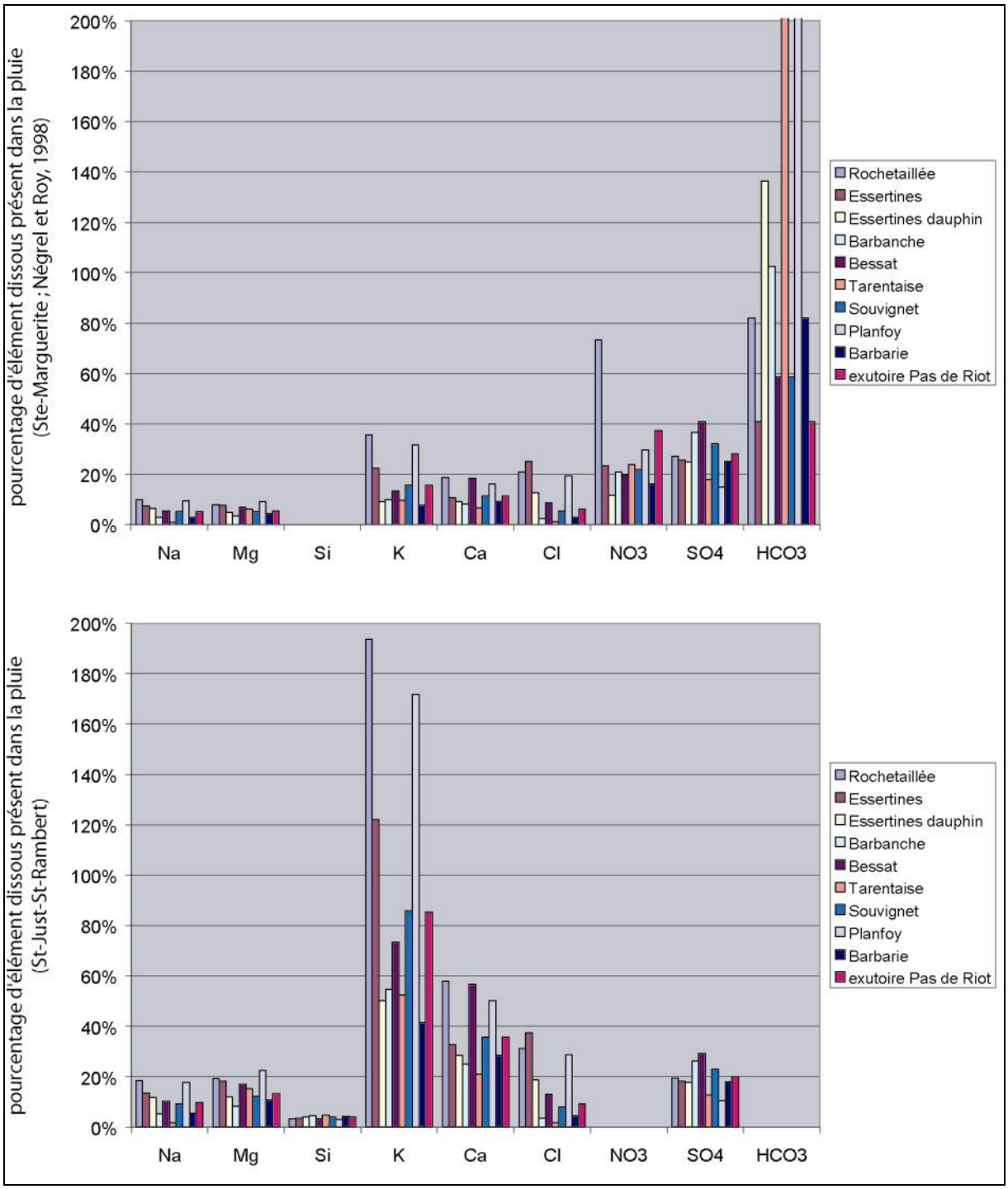


Fig. 33 : apport en éléments dissous des précipitations dans les eaux de surface ; Furan.

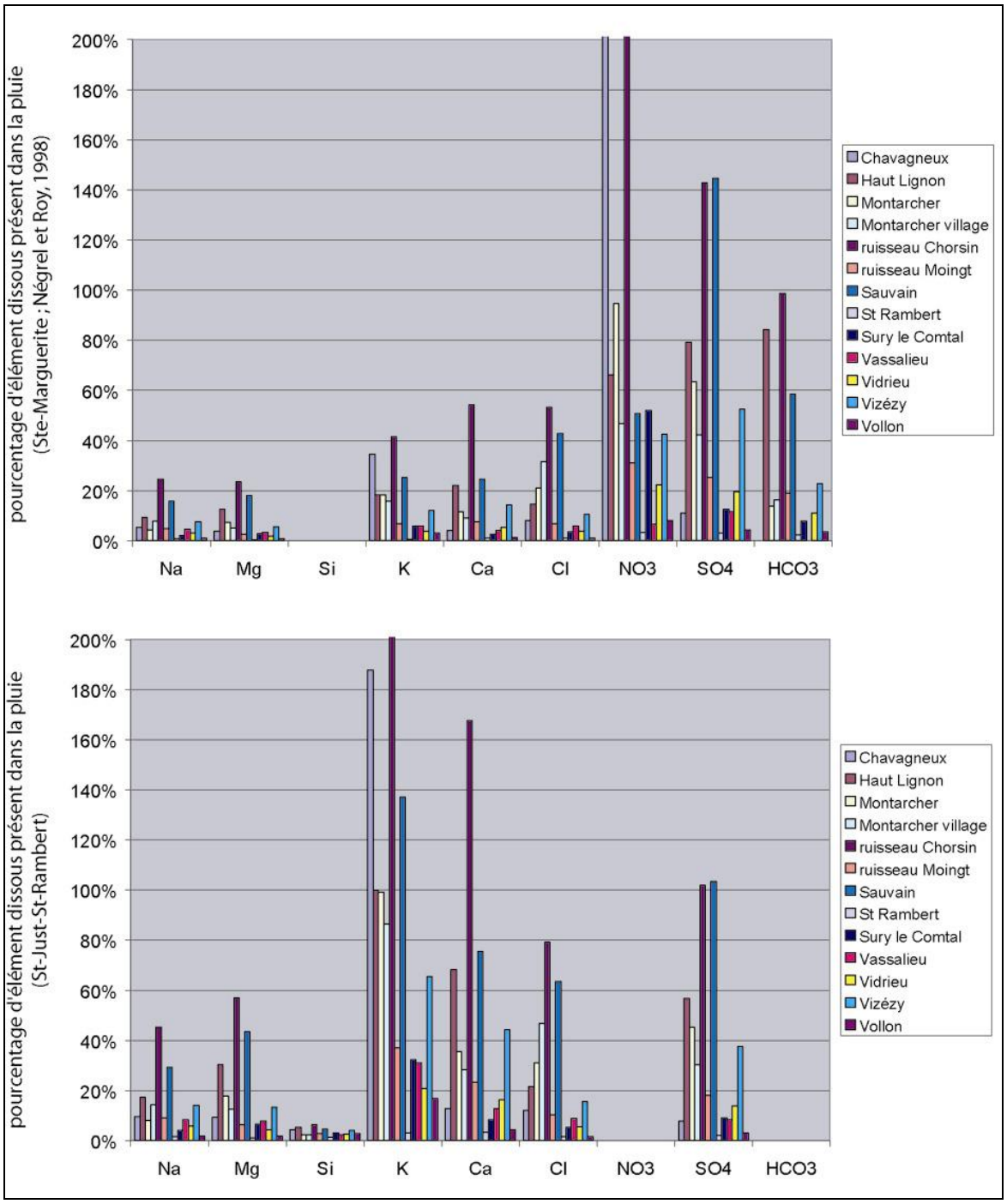


Fig. 34 : apport en éléments dissous des précipitations dans les eaux de surface ; Forez.

Les contenus en potassium, calcium, chlore, nitrates, sulfates, voire bicarbonates peuvent être apportés en abondance par les eaux météoriques (trafic routier, aérosols ; Sanusi et al., 1996). Une part supérieure à 20% est quantifiable pour les eaux à faible TDS. Par contre, sodium, magnésium et silice proviennent majoritairement d'une interaction avec les roches ou de lessivages de sols, la part des précipitations étant souvent inférieure à 10%. Cet apport important est possible en regard de la composition moyenne du socle du Pilat et du Forez

(82% Si, 9% K, 6% Na, et 2% Mg et Ca ; Clavaud et Ratsimba, 1972 ; Etlicher, 2005 ; Pitiot, 1984). Potassium et calcium peuvent également voir leurs concentrations initiales modifiées par les interactions dans le sol / sous-sol.

III.3 CORRELATIONS ELEMENT PAR ELEMENT

La première relation étudiée est celle liant Na et Cl (Fig. 35 et 36), deux éléments responsables d'une part importante de la minéralisation d'une eau de surface et ayant des comportements différents en solution. Le chlore est reconnu comme un élément très mobile, peu apte à précipiter lors du parcours souterrain de l'eau. Le sodium est libéré par l'altération de phases minérales. Le seuil d'abondance naturelle du chlore dans l'atmosphère est de l'ordre de 6 mg/l (e.g. Chéry, 2003). Sur les figures 35 et 36 est également reportée la droite d'abondance relative de Na et Cl dans l'eau de mer (10800mg/l Na ; 19500mg/l Cl ; Taylor et McLennan, 1985). Pour la majorité des points, les rapports Na/Cl sont proches de celui de l'eau de mer. Ceci suggère une faible interaction eau – roche (faible contenu en Na), qui permet donc de conserver des teneurs en sodium et chlore proches de celles des précipitations, quelles soient locales (St-Just-St-Rambert) ou plus éloignées (se référer aux légendes des figures 35 et 36). Pour le Furan notamment, un enrichissement en Cl existe (Barbanche, Tarentaise, Essertines ; Fig. 35), ce qui peut provenir d'une percolation dans une arène granitique (échange OH – Cl avec les argiles). A l'inverse, les sources de Montarcher (Fig. 36) ont un comportement différent, avec un enrichissement en Na, qui semble être caractéristique de ce réservoir.

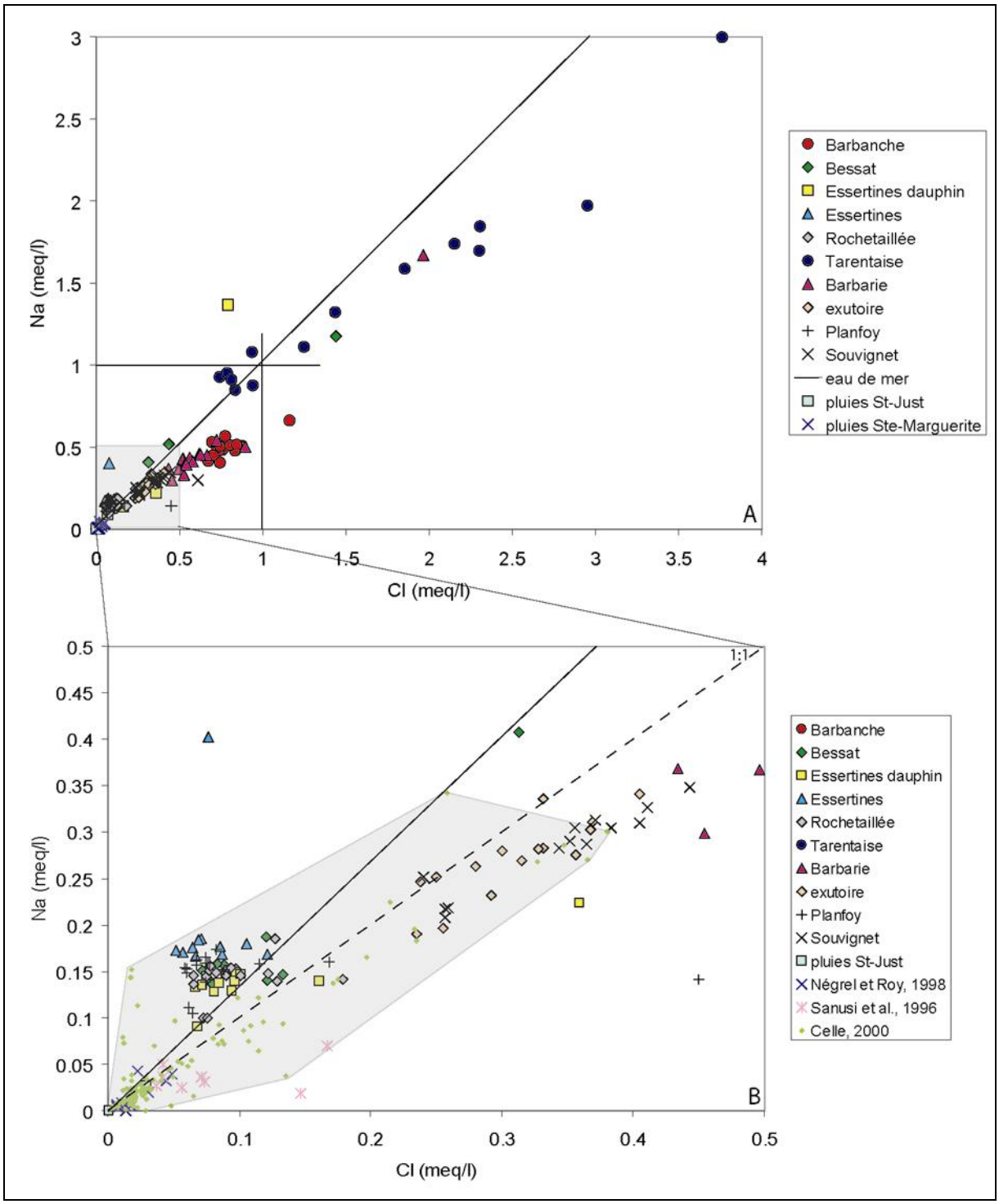


Fig. 35 : relation Na – Cl dans le domaine Furan ; A présente l'intégralité des données en meq/l, B seulement les échantillons à teneur inférieure à 0,5 meq/l. Le domaine grisé est extrapolé à partir des données chimiques des pluies de St-Just-St-Rambert (Tab. 9), des données de Négrel et Roy (1998) dans la Limagne d'Allier, de Sanusi et al. (1996) dans les Vosges et des données de Celle (2000) sur Avignon – Rochefort du Gard – La Vialasse (Mont Lozère).

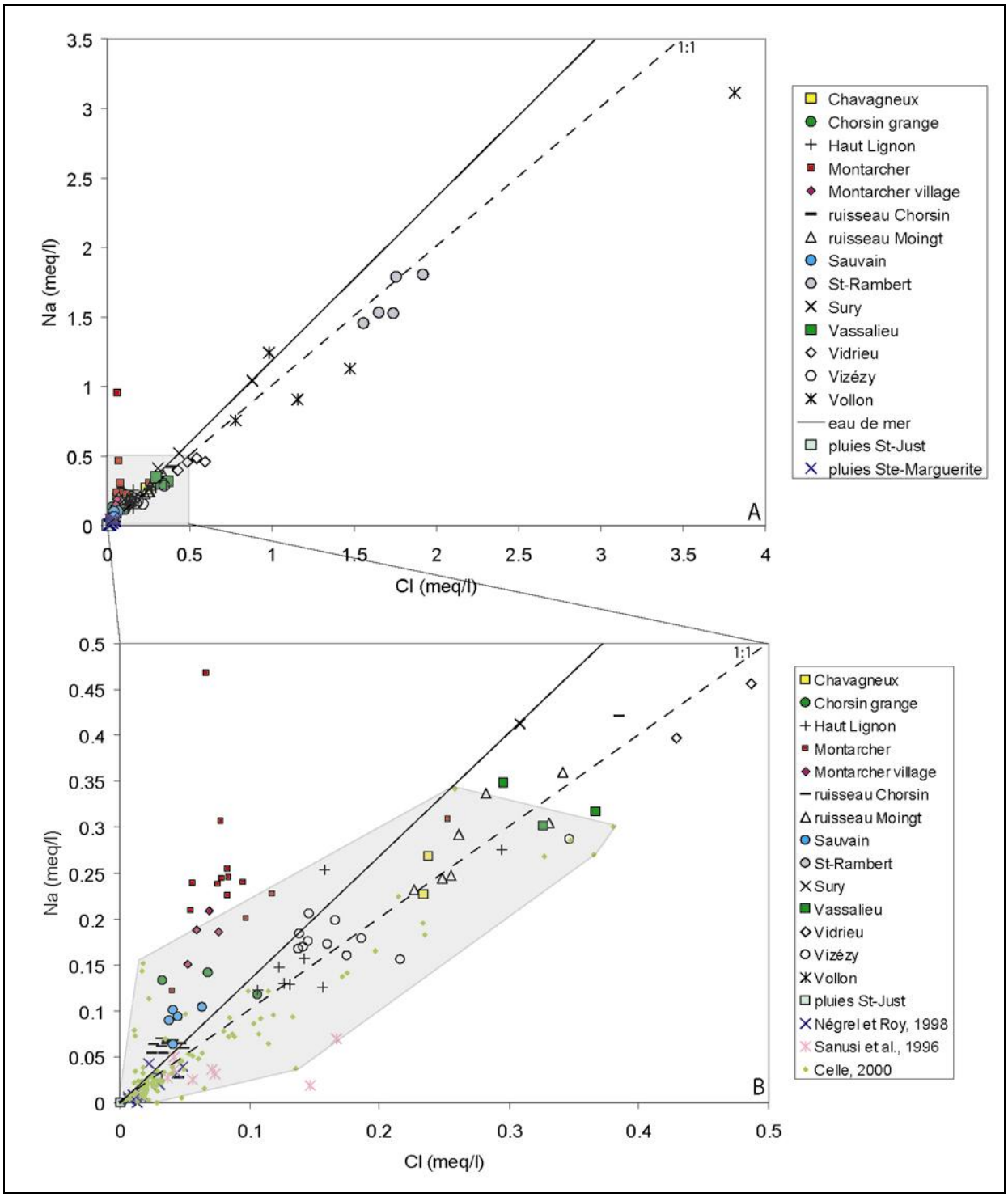


Fig. 36 : relation Na – Cl dans le domaine Forez ; A présente l'intégralité des données en meq/l, B seulement les échantillons à teneur inférieure à 0,5 meq/l. Le domaine grisé est extrapolé à partir des données chimiques des pluies de St-Just-St-Rambert (Tab. 9), des données de Négrel et Roy (1998) dans la Limagne d'Allier, de Sanusi et al. (1996) dans les Vosges et des données de Celle (2000) sur Avignon – Rochefort du Gard – La Vialasse (Mont Lozère).

Chlore et calcium ont également un comportement similaire dans les eaux du Furan et du Forez, le contenu en Ca augmentant plus vite dans ces dernières. La corrélation est surtout marquée par les pôles minéralisés des zones sédimentaires (Vollon et St-Rambert), également enrichis en Mg. Calcium et magnésium proviennent de l'altération des roches granitiques encaissantes (2% des cations ; III.2.2), et/ou des roches sédimentaires dans lesquelles circulent les eaux. De manière générale, les quantités de Ca relevées dans les eaux sont trois fois plus importantes que celles de Mg.

La teneur en bicarbonates des eaux du domaine Forez augmente graduellement avec celle en Na, donc avec l'augmentation de l'interaction avec la matrice rocheuse et/ou l'augmentation de la durée de contact. Cette augmentation de teneur avec l'interaction se retrouve aussi pour des éléments peu concentrés, comme Sr et F.

Dans le secteur du Furan, le lavoir de Tarentaise se démarque de tous les autres prélèvements par un déficit en Mg. Cet appauvrissement relatif est lié soit à la nature des roches percolées, peu riches en Mg – ce qui exclut notamment des interactions fortes avec les faibles volumes d'amphibolites du Pilat – soit à la précipitation de phases d'altération riches en Mg.

Le lavoir d'Essertines dauphin (Furan) se distingue nettement des autres par sa richesse en nitrates relativement à sa faible teneur en sodium, signe d'une possible contamination de surface d'origine organique (épandage agricole).

Les contenus en chlore sont également connus pour être anti-corrélés à l'altitude des sources (Barbier, 2005). Cette relation altitude – concentration en chlore est valide pour des eaux à teneur en nitrates inférieure à 6 mg/l, ce qui en fait aussi un indicateur de contamination (agricole notamment). L'application aux eaux souterraines et rivières du Furan et du Forez est présentée dans la figure 37. La relation telle que définie par Barbier (2005) est vérifiée pour les eaux à Cl < 10 mg/l (proche du seuil atmosphérique moyen ; e.g. Chéry, 2003) et peu minéralisées (TDS < 55 mg/l).

Les points les plus proches d'un pôle « précipitation » sont : Bessat, Essertines, Rochetaillée, Montarcher, Sauvain pour les lavoirs et Planfoy, Haut Lignon et Vizézy pour les rivières.

Les eaux plus riches en éléments dissous, même si elles sont pauvres en nitrates (Chavagneux), s'écartent trop de la relation altitude – Cl. L'augmentation des teneurs en chlore reflète l'enrichissement de l'eau lors de son trajet souterrain, qui oblitère la diminution de concentration en solutés des précipitations lorsque l'altitude augmente (Barbier, 2005).

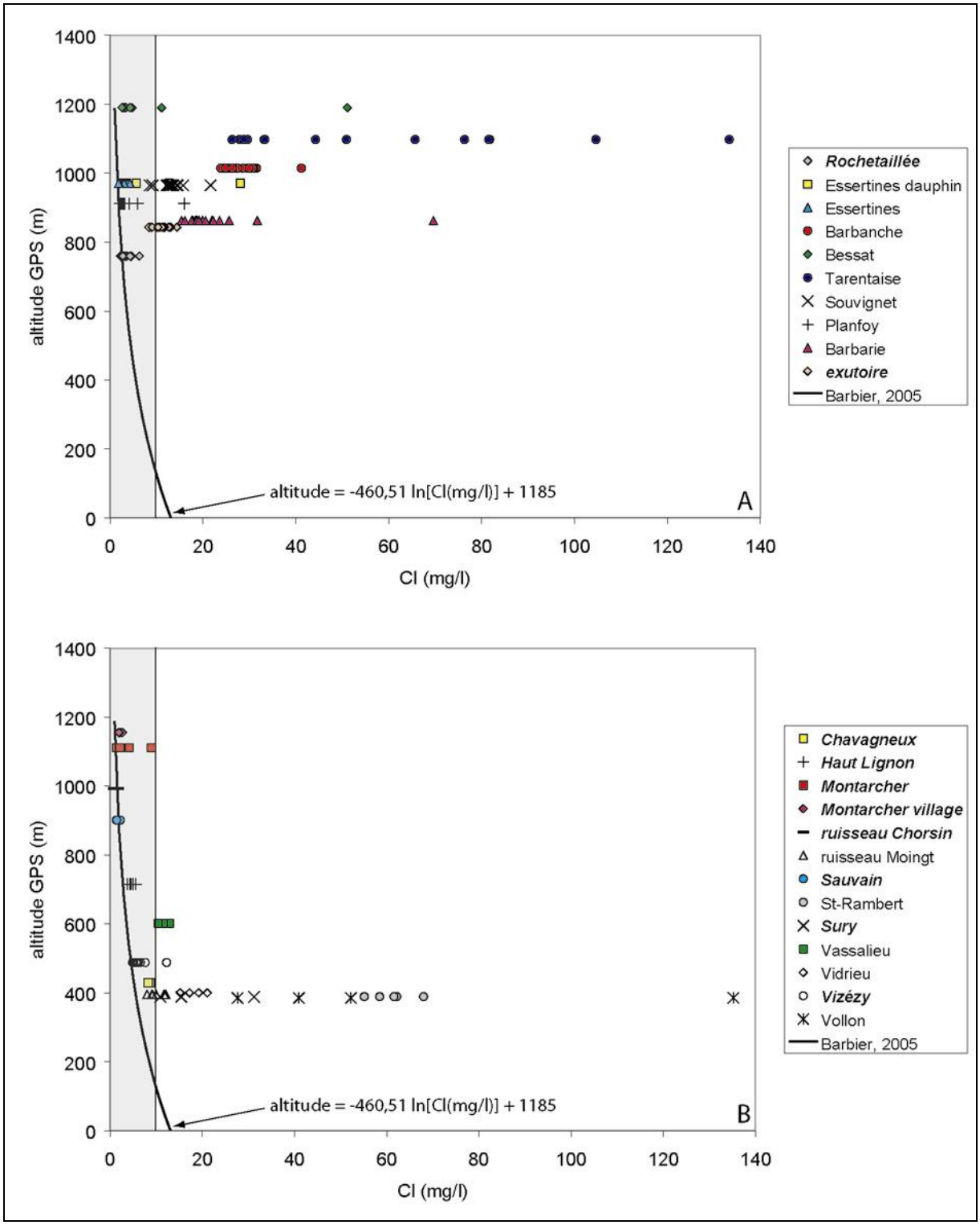


Fig. 37 : relation concentration en Cl (mg/l) – altitude ; en italique sont indiqués les échantillons à NO_3 < 6 mg/l. La zone grisée représente les eaux à teneur en chlorures inférieure à 10 mg/l (teneur proche du seuil atmosphérique moyen ; e.g. Chéry, 2003).

L'examen des paramètres physico-chimiques des rivières du Furan et du Forez indique une forte influence des variations climatiques externes. Cette sensibilité décroît fortement pour les aquifères à mesure que leur minéralisation augmente.

Les sources étudiées sont caractérisées par des pH acides, sauf St-Rambert, pôle minéralisé (500 mg/l) légèrement basique. Les compositions chimiques de ces différentes sources ne connaissent pas de variations corrélées aux changements de conditions environnementales externes. Les cations prépondérants sont Na, Ca et Mg, les anions Cl (Furan) et HCO_3 (Forez). La teneur en silice est limitée à 20 – 25 mg/l au maximum. Ces traits sont caractéristiques d'eaux de surface en domaine de basse température. Une part importante de K, Ca, Al, Cl, NO_3 et SO_4 peuvent être apportés par les précipitations. L'hydrolyse de silicates et la consommation de CO_2 (augmentation de la teneur en bicarbonates) enrichissent les contenus en Na, Mg et Si. Toutefois, les rapports Na/Cl restent proches de ceux des précipitations, quelles soient locales ou à l'échelle de la France.

Ces données chimiques permettent donc de définir un pôle "eaux de surface", qui nous sera utile lors de l'étude des eaux minérales, objet du chapitre IV. Ce caractère de surface est affirmé par l'examen des pressions partielles de CO_2, point maintenant abordé.

III.4 TYPE DE SYSTEME AQUIFERE

Les données chimiques montrent, en particulier pour les eaux à faible TDS, une influence notable des précipitations. Pour évaluer l'influence de la zone de battement sur la composition chimique des lavoirs, les pressions partielles de CO_2 des prélèvements sont calculées (logiciel Diagramme ; LHA, Avignon) et comparées à celles de l'atmosphère (3.10^{-4} atm) et du sol (3.10^{-3} à 3.10^{-2} atm ; Fig. 38).

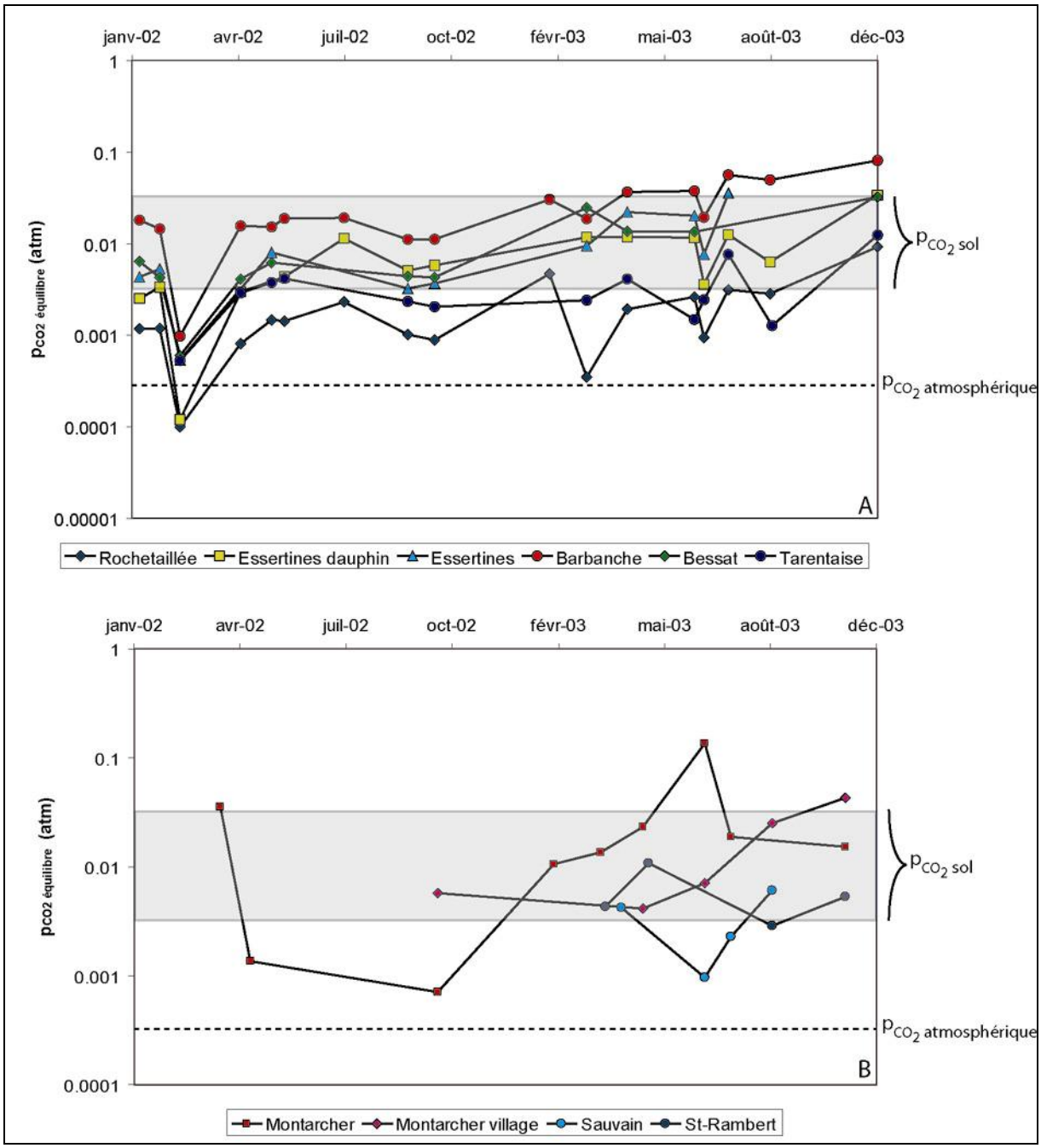


Fig. 38 : évolution temporelle des pressions partielles de CO2 calculées pour les différents lavoirs échantillonnés dans le Furan et le Forez (pCO2 calculées à l'aide du logiciel Diagrammes, Roland SIMLER, Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon).

La majorité des lavoirs apparaissent fortement influencés par une interaction avec le gaz du sol. Rochetaillée et Tarentaise connaissent une exposition à l'atmosphère plus sensible. Cette dernière est aisément compréhensible pour Rochetaillée (lavoir ayant le plus faible TDS), moins pour Tarentaise (le plus minéralisé du Furan). Dans le Forez, Montarcher est fort

variable, mais il peut s'agir d'un effet de brassage à l'air, le point de prélèvement étant situé en aval de l'usine d'embouteillage.
Dans tous les cas, les pressions de CO_2 les plus faibles correspondent aux pH mesurés les plus forts, sans relation avec la température de l'eau. Les eaux échantillonnées ne sont plus des eaux en équilibre avec l'atmosphère. Elles subissent une évolution en milieu clos (partie saturée de l'aquifère), Rochetaillée étant sans doute le lavoir dont l'eau y séjourne le moins.

III.5 INDEX DE SATURATION

III.5.1 Méthode

Afin de mieux cerner les évolutions des eaux et les modifications chimiques qu'elles subissent dans les aquifères de surface, on recourt au calcul d'indices de saturation des minéraux (SI). L'utilisation de ces indices (précipitation/dissolution) est utile pour déterminer l'environnement géologique dans lequel percolent des eaux. Les SI sont définis par (Chapelle, 1993) :

$$SI = \log (PAI / K_{sp})$$

avec PAI le Produit d'Activité Ionique et K_{sp} le Produit de Solubilité de l'espèce minérale considérée. Une valeur positive de SI indique une sur-saturation de l'espèce minérale vis à vis du fluide considéré, donc une précipitation possible. A l'inverse, une valeur négative implique une sous-saturation de la solution en cette espèce minérale et sa possible dissolution.
Dans cette partie, seules des eaux faiblement minéralisées sont traitées. On peut donc considérer qu'elles n'ont été en contact et n'ont interagi qu'avec les roches connues à l'affleurement ou leurs produits d'altération.

Les calculs d'indice de saturation sont effectués en utilisant la base thermodynamique la plus complète (Llnl) incluse dans le programme PhreeQC 2.10 (http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc/). Ce programme est basé sur l'équilibre chimique de solutions aqueuses interagissant notamment avec des minéraux, et permet de déterminer les phases pouvant précipiter ou être dissoutes pour atteindre l'équilibre avec le fluide, ainsi que la prise en compte des effets d'un changement de température.

Qu'il s'agisse des sources et ruisseaux du Furan ou de la plaine du Forez, la stratégie de calcul utilisée est identique. Dans un premier temps, chaque composition est employée, en ne tenant compte que des éléments majeurs et du fluor. Ensuite, puisque les percolations se font majoritairement en domaine de socle, la dissolution de trois phases (albite, anorthite et phlogopite) est imposée. Ces phases peuvent expliquer une part non négligeable de la minéralisation des eaux de surface, par libération de Na, Ca, Mg, K, F et Si. Enfin, les derniers calculs prennent en compte le signal chimique de l'impluvium, pour cerner son influence sur les sources les moins minéralisées. Les résultats des estimations d'indice de saturation sont reportés en annexe, l'approche graphique étant privilégiée dans le texte.

Afin d'être cohérent avec les lithologies observées à proximité des sources et rivières échantillonnées, les phases minérales non vraisemblables en contexte granitique faillé et en contexte sédimentaire détritique sont exclues. Ainsi, les phases feldspathiques (albite, anorthite, feldspath K), carbonatées (aragonite, calcite, dolomite), les polymorphes de la silice (calcédoine, cristobalite basse température (α), quartz, silice amorphe), les phases micacées (muscovite, phlogopite), les oxydes (gibbsite, goethite), les sels (halite), les sulfures/sulfates (gypse, pyrite) et les argiles (illite, kaolinite, montmorillonite) sont privilégiées.

III.5.2 Résultats

Les indices de saturation (SI) calculés sans restriction sur la nature des roches encaissantes sont présentés sous forme de moyennes dans la figure 39 (moyenne calculée sur toutes les analyses complètes disponibles –les échantillons à mauvaise balance ionique n'induisent pas de changements significatifs dans le calcul des SI). Ces SI sont calculés en utilisant la composition de l'eau en sortie de l'aquifère ou celle du ruisseau au point de prélèvement, en tenant compte du pH, de la température et du pe lors du prélèvement. En première approche, les spectres obtenus dans les secteurs Furan et Forez sont similaires. La précipitation des sels et carbonates est peu vraisemblable dans ces eaux et non observée dans l'environnement granito-gneissique de la zone d'étude.

St-Rambert et la rivière Vollon, circulant respectivement dans les terrasses de la Loire et dans des marnes et marno-calcaires, ont des SI proches de zéro pour les sels et carbonates. Ces eaux sont plus proches de la saturation que les eaux de granites situées en altitude (Furan et Forez ont des SI plus négatifs).

Les polymorphes de la silice sont soit proches de la saturation, soit légèrement sur-saturés (calcédoine, quartz) ou sous-saturés (silice amorphe, cristobalite). Si quartz et silice amorphe ont un comportement homogène quelque soit l'eau examinée, la calcédoine est le polymorphe dont le SI varie le plus. Les points peu riches en silice (Barbanche, Tarentaise) sont aussi légèrement sous-saturés en calcédoine. Les lavoirs les plus minéralisés du Furan sont donc déficitaires en silice par rapport aux eaux moins chargées.

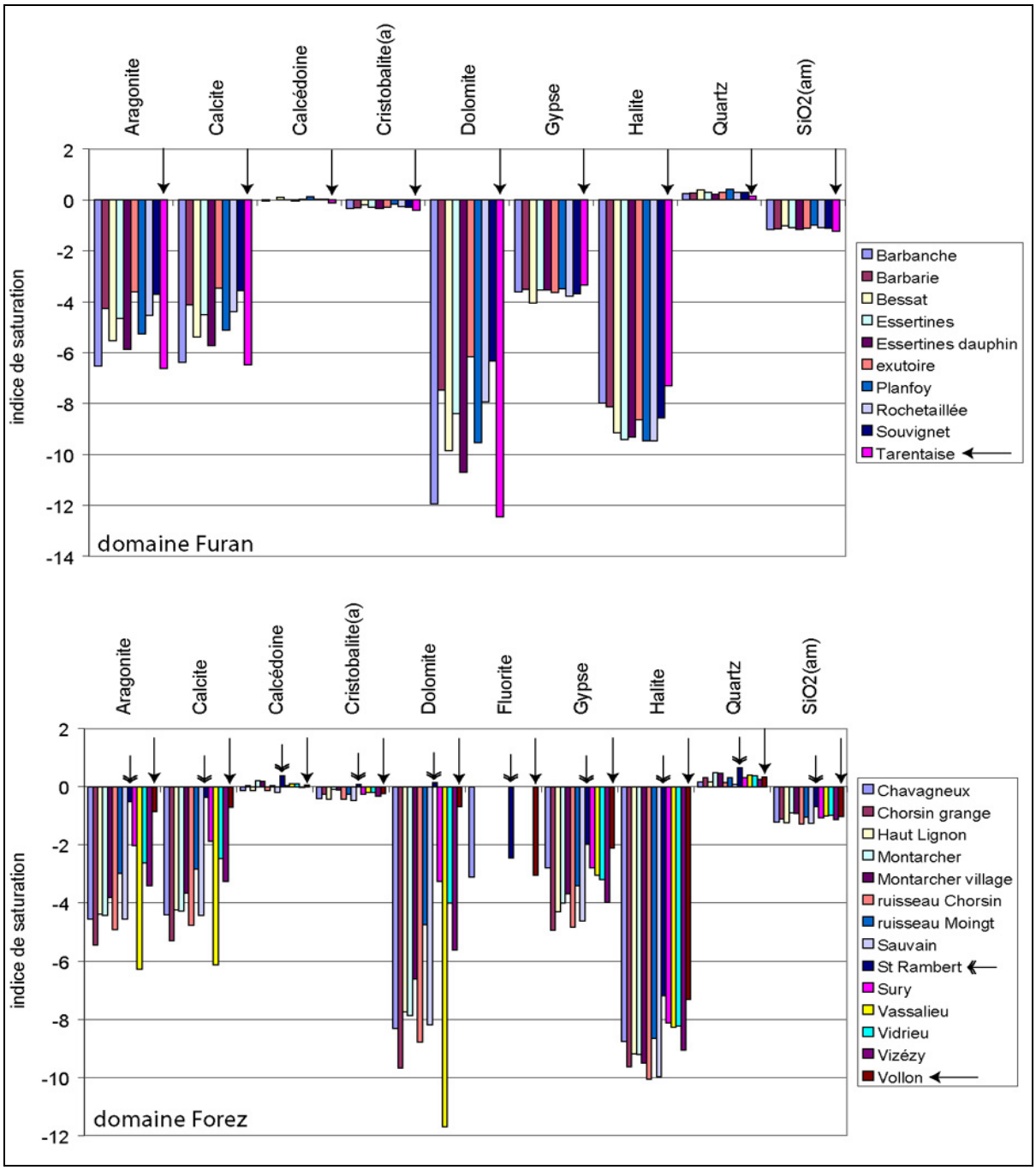


Fig. 39 : indices de saturation calculés pour les sources superficielles et les ruisseaux drainant le bassin versant du Furan et la plaine du Forez.

La deuxième étape abordée lors du calcul des indices de saturation permet de mieux définir la minéralogie des zones percolées. Puisque la grande majorité des points de prélèvement est caractérisée par des interactions avec les altérites de socle, il semble raisonnable d'imposer, lors du calcul des SI, la dissolution de trois phases ubiquistes dans un granite. Ces trois phases dissoutes sont l'albite et l'anorthite pour le pôle feldspath, la phlogopite pour le pôle mica. Le quartz n'est pas pris en compte, sa dissolution étant peu vraisemblable compte tenu de la saturation des eaux vis à vis de la silice (Fig. 39). Un SI égal à –1 (pas de précipitation possible) est donc imposé pour les trois minéraux précédents, dans une proportion maximale de 10 moles à la température d'émergence. Les modifications engendrées par cette hypothèse sont présentées dans la figure 40.

Ce calcul n'a pas d'influence sur les SI des phases évaporitiques, ce qui conforte l'idée d'une présence hypothétique. Par contre, la présence de sulfures (minéralisations secondaires en pyrite notamment), d'argiles pouvant contrôler des substitutions (Cl) et de feldspaths libérant du sodium est plus réaliste. La présence des phases argileuses issues de la dissolution de feldspaths est bien mise en évidence (Fig. 40). Néanmoins, cette simulation ne peut refléter fidèlement les processus de précipitation / dissolution au sein des aquifères. En effet, il faudrait alors déterminer la Capacité d'Echange Cationique et Anionique pour Na et Cl respectivement, et procéder à des lixiviations de sols ou d'arènes, ce qui n'a pas été entrepris. Les résultats marquants de ces nouveaux calculs sont les suivants :

- les phases carbonatées sont moins sous-saturées que dans le cas présenté Fig. 39. Les augmentations de SI s'étagent de +4 (passage de SI = –6 à SI = –2 pour la calcite à Tarentaise) pour les phases calciques à +9 (–12 à –3 pour la dolomite à Vassalieu) pour les phases à calcium et magnésium ; voire, pour St-Rambert et Vollon, un passage dans le domaine des SI positifs. Cet état de sur-saturation vis à vis du calcium dans ces eaux traduit la présence de carbonates dans l'aquifère.

- les polymorphes de la silice sont dorénavant sous-saturés, ce qui est peut-être à relier avec la relative faible charge en silice dissoute observée dans les prélèvements. La précipitation de phases amorphes ou microcristallines à basse température régulerait donc la quantité de silice dissoute (Busenberg, 1978).

- la précipitation d'oxydes (gibbsite, goethite) résultant de l'altération de la matrice rocheuse est indiquée par les calculs. Fer et aluminium sont présents en faible quantité, et la précipitation d'oxydes et les variations de p_{CO2} diminuent leur teneur dans les eaux.

- enfin apparaissent plusieurs phases argileuses (Fig. 40). Illite, kaolinite et montmorillonite sont en état de sur-saturation, ce qui entraîne vraisemblablement une néoformation d'argiles au sein du réservoir rocheux. Les phases qui peuvent précipiter sont donc identiques à celles présentes dans les produits d'altération des roches et sols.

Cependant, ces calculs donnent des valeurs de pH plus élevées que celles mesurées en sortie (pH calculés atteignant 8 à 9), surtout pour les prélèvements du Furan. Si le pH est dépendant des espèces en solution, il est aussi dépendant de la température du milieu lors des interactions fluide – roche. Aussi, à titre d'exemple et uniquement pour les pôles les plus minéralisés (Barbanche, Tarentaise et St-Rambert), des variations de la température ont été introduites dans le modèle, afin d'observer les variations de pH induites par une augmentation de température. Les températures utilisées sont entre 20 et 50°C, valeurs suggérées par l'utilisation des géothermomètres à cations sur les trois eaux considérées (Quartz Fournier, 1977 et K/Mg Giggenbach 1983 ; voir chapitre IV).

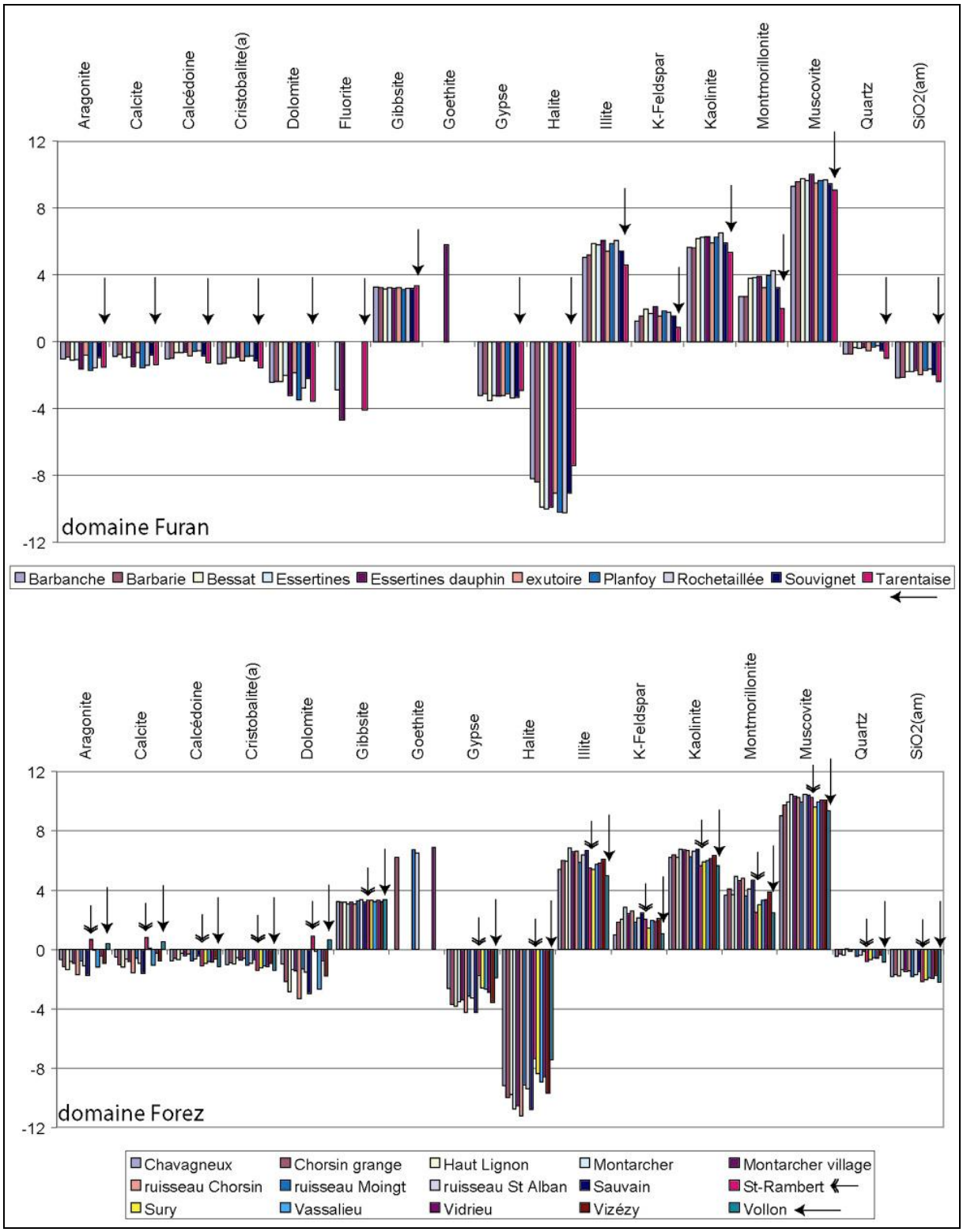


Fig. 40 : indices de saturation calculés pour les sources superficielles et les ruisseaux drainant le bassin versant du Furan et la plaine du Forez. Dissolution imposée d'albite, anorthite et phlogopite (SI=–1).

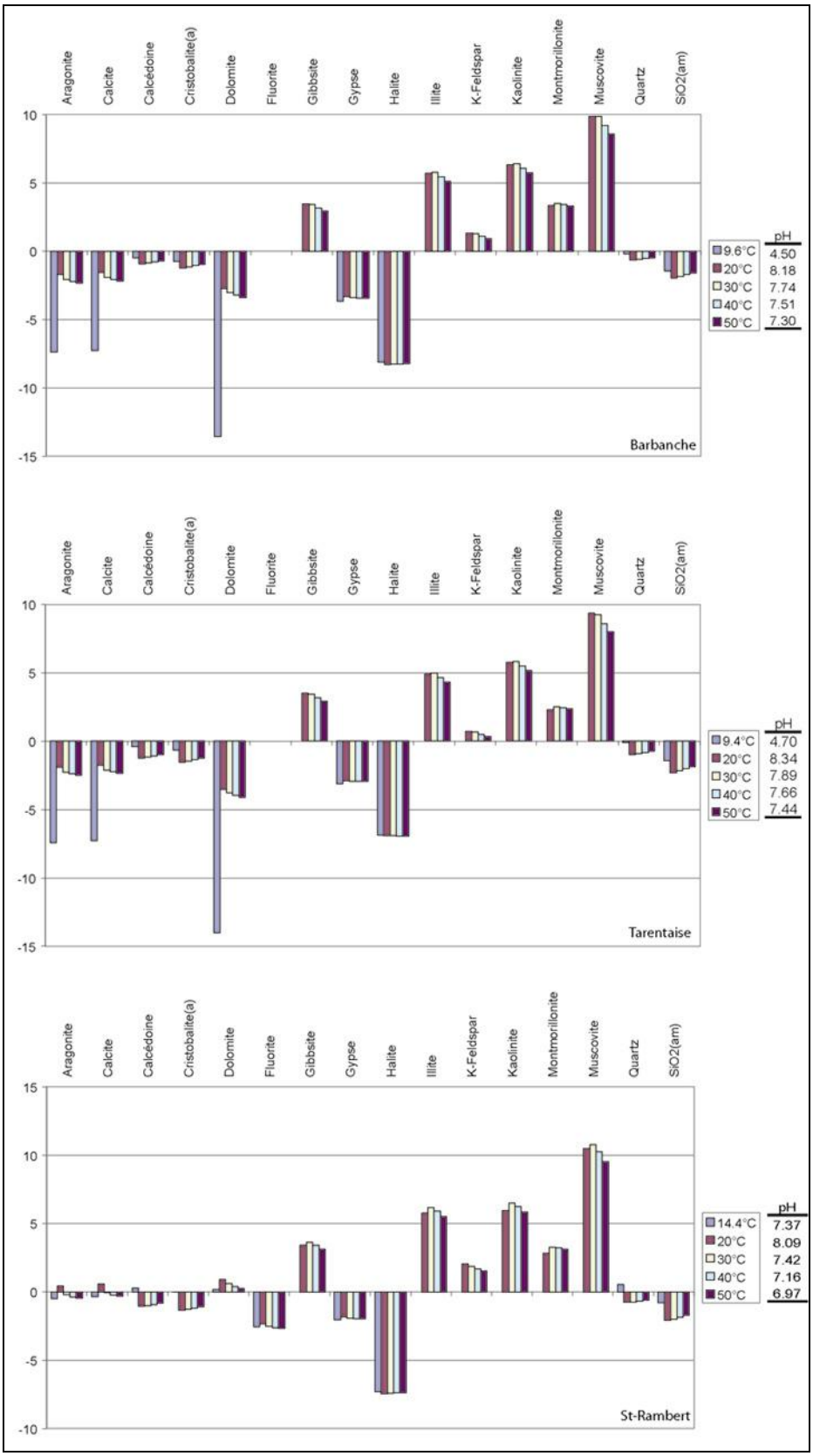


Fig. 41 : indices de saturation calculés pour trois sources à TDS > 100mg/l. Dissolution imposée d'albite, anorthite et phlogopite (SI=–1), gamme de variation de température de 20 à 50°C. Les pH indiqués en légende correspondent aux pH calculés pour les différentes incrémentations de hausse de température.

Les variations d'indice de saturation en fonction d'une augmentation de température sont reportées dans la figure 41. Pour les trois sources considérées, les SI sont maximaux vers 20 à 30°C, et indiquent soit une sous-saturation renforcée soit une sur-saturation suivant les espèces considérées (St-Rambert). Cette méthode n'est pas appropriée pour les eaux à faible minéralisation et teneur élevée en tritium (Barbanche et Tarentaise) (III.6.6), l'obtention d'un pH proche de celui mesuré à l'émergence nécessitant des températures trop élevées. Par contre, le pôle de surface le plus riche en éléments dissous (St-Rambert) donne, pour des températures raisonnables (30°C), un pH conforme à celui mesuré (Fig. 41).

Enfin, on peut aussi retrancher les compositions chimiques des pluies de la Limagne d'Allier à celles de nos sources (TDS = 23mg/l ; Négrel et Roy, 1998). Les calculs sont présentés figure 42. Certaines sources, auparavant sur- ou sous-saturées vis à vis d'espèces minérales (aragonite, calcite, dolomite), ne sont plus "réactives". Le contenu en élément de ces pluies devient supérieur ou égal au contenu de la source : certains éléments peuvent disparaître (Ca, K et HCO_3), sauf pour St-Rambert (minéralisation météorique de 0,6 à 7,6% du TDS). Cette approche de calcul des SI n'induit, hormis ce qui précède, pas de changement majeur dans les interprétations préalablement proposées.

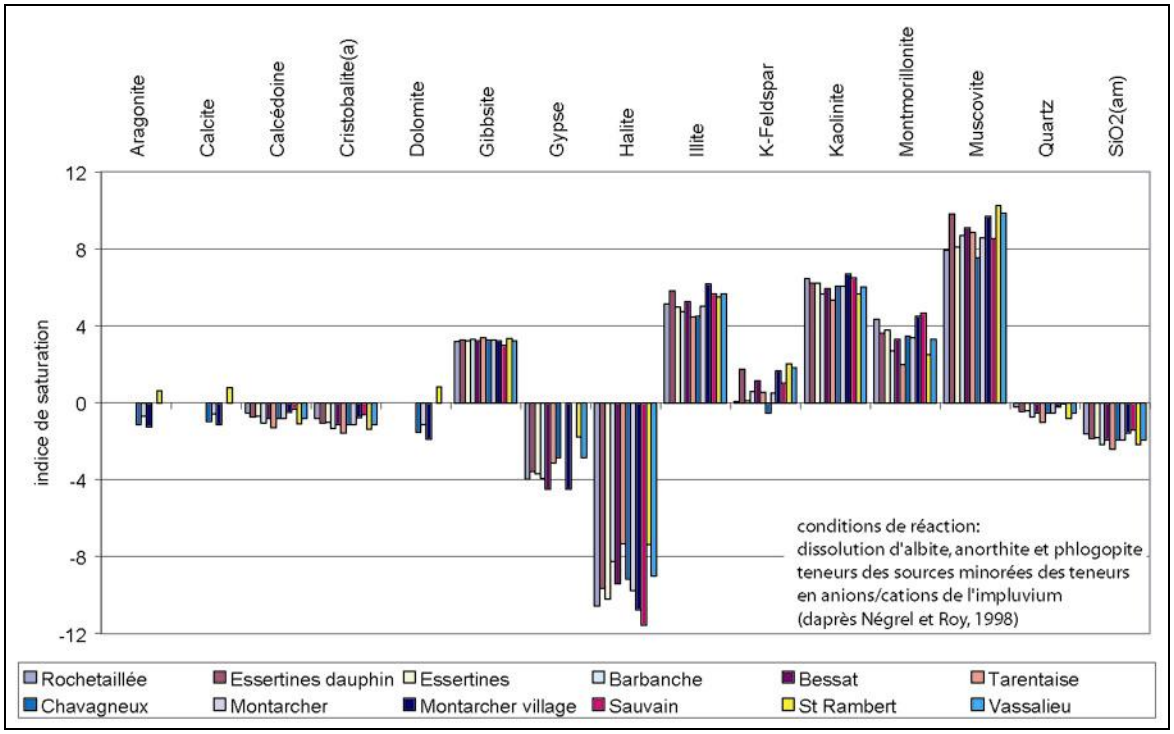


Fig. 42 : indices de saturation calculés pour les sources superficielles du Furan et du Forez. Dissolution d'albite, anorthite et phlogopite imposée (SI=–1). Les compositions chimiques des sources employées sont minorées de la composition des pluies de la Limagne d'Allier du 17/06 au 28/07/94 (Négrel et Roy, 1998).

Les différents calculs d'indice de saturation permettent d'exclure pour la quasi totalité des points de prélèvement une interaction avec des sels et des carbonates. Ceci est en accord avec les lithologies observées en surface (cf chapitre I). La dissolution imposée des trois phases minérales (feldspaths et micas), que l'on prenne ou non en compte les éléments chimiques apportés par les précipitations, induit la présence d'oxydes, de sulfures et de phases argileuses néoformés. Ces dernières constituent en effet une part non négligeable des arènes observées en surface.

Les systèmes étudiés montrant encore une fois des caractères superficiels, il est intéressant d'observer les éventuelles relations eau météorique – eau de surface d'un point de vue isotopique (III.6).

III.6 COMPOSITION ISOTOPIQUE

III.6.1 $^{18}O/^{2}H$: relation avec les pluies locales

Les eaux de surface peuvent être issues de ressuyages et ruissellements rapides après des épisodes pluvieux, mais aussi de relargages d'aquifères peu profonds. Les débits variables mesurés aux lavoirs permettent d'envisager un temps de parcours souterrain assez court. Comme il n'y a pas d'interaction eau – roche à haute température (cf III.5), on devrait retrouver une signature isotopique proche de celle des pluies locales, en prenant aussi en compte le facteur évapotranspiration. De plus, l'écoulement gravitaire est plus important dans le bassin du Furan (Bessat 1190m, Tarentaise 1097m) que dans la plaine (Chavagneux 430m, Vassalieu 600m). Les lavoirs du Furan sont donc plus aptes à refléter les variations isotopiques ($\delta^{18}O$, δD) temporelles des précipitations. L'enregistrement des précipitations durant 3 ans devrait donc permettre d'estimer des durées moyennes d'écoulement.

Sur la figure 43 sont reportées, année par année, les moyennes calculées pour chaque point de prélèvement (Tab. 13) dans le bassin du Furan. Par comparaison avec les conclusions sur le comportement des pluies au cours des trois années complètes de suivi, on peut distinguer :

- 2001 : il n'existe aucune corrélation, comme avec les précipitations. Ces variations de $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$ ne peuvent s'expliquer par une décharge quasi-instantanée des eaux de pluie par les aquifères, comme le prouve le débit régulier des lavoirs. Pour les ruisseaux, les variations des valeurs isotopiques peuvent être induites par une

composante d'eau ruisselante. De plus, la minéralité plus importante des lavoirs induit la dissolution de matériaux lors d'interactions eau-roche (cf. calculs de SI).

- 2002 : durant cette année, la dispersion des valeurs est moindre, avec des rapports plus appauvris l'altitude augmentant. D'autre part, les valeurs isotopiques des points d'émergence semblent corrélées. L'alignement des valeurs de $\delta^{18}O$ en fonction de $\delta^{2}H$ des lavoirs semble indiquer que les réservoirs alimentant ces sources ont un fonctionnement et/ou des temps de transit similaires. Le décalage des valeurs isotopiques entre les lavoirs et pluies de l'année précédente suggère un temps d'infiltration et d'écoulement de plusieurs mois voire un an.

- 2003 : la différence des $\delta^{18}O$ observée entre pluies de 2001 et mesures aux lavoirs en 2002 (Tab. 14) est de nouveau perceptible. Pour l'hydrogène, les variations sont moins nettes, sans doute par effet d'un fractionnement plus fort que pour l'oxygène lors de l'évaporation.

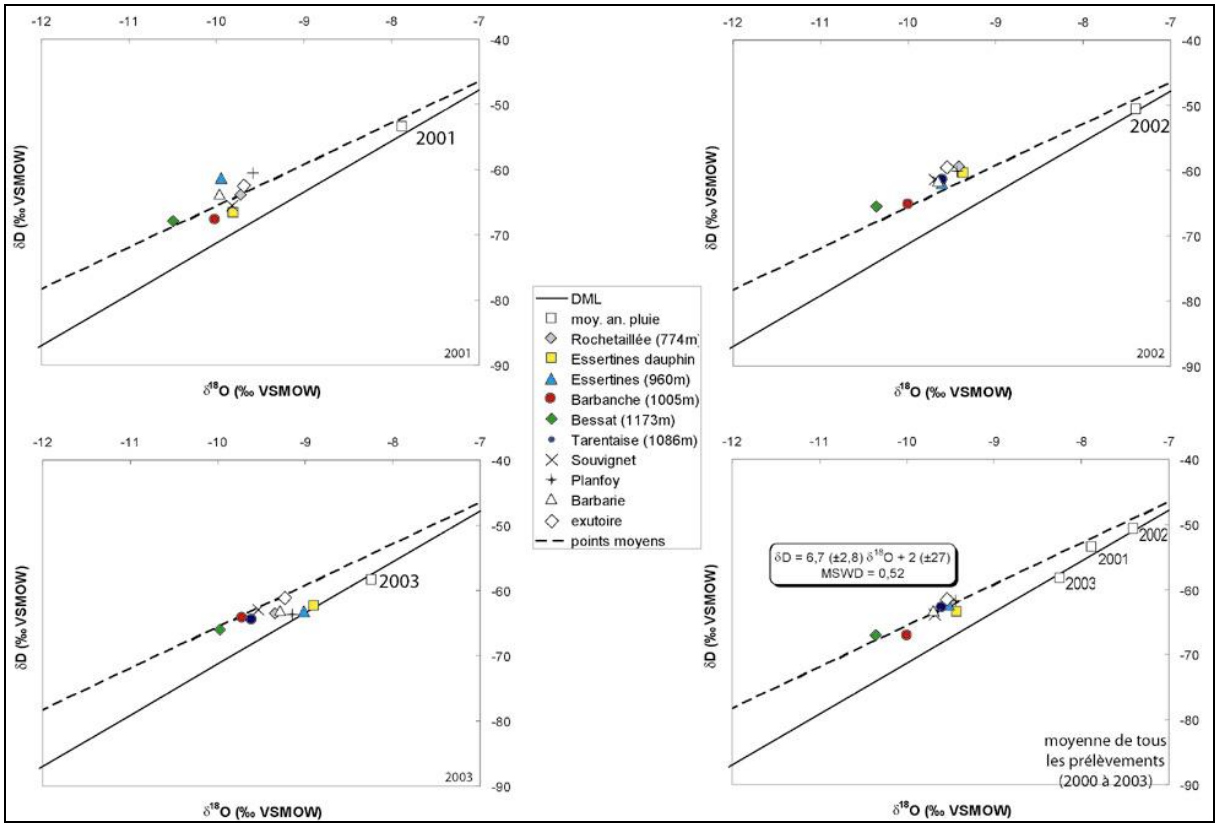


Fig. 43 : rapports isotopiques moyens annuels en oxygène et hydrogène des sources et ruisseaux du bassin versant du Furan ; la droite de référence est la Droite Météorique Locale donnée en II.8.1.1, avec les moyennes annuelles pour les années 2001 à 2003 ; en trait discontinu : corrélation obtenue sur la moyenne de tous les prélèvements (sauf Rochetaillée 14/12/00).

année	$\delta^{18}O$ pluie	δD pluie	$\delta^{18}O$ Furan	δD Furan
2001	-7,8	-53,6	-10	-65,5
2002	-7,4	-50,7	-9,7	-62,4
2003	-8,2	-58,3	-9,4	-64

Tab. 14 : rapports isotopiques annuels moyens des pluies à St-Just-St-Rambert (moyenne pondérée) et des sources pérennes du Furan.

Pour la partie Forez, seule la source de Montarcher a été suivie sur près de 3 ans. La variation des valeurs en isotopes stables suit celle enregistrée sur les pluies (enrichissement entre 2001 et 2002, fort appauvrissement entre 2002 et 2003), ce qui suggère un temps de percolation plus court que pour les sources du Furan.

Néanmoins, l'ensemble des sources et ruisseaux échantillonnés dans le Forez s'alignent suivant une droite de pente plus faible que la droite locale des eaux de pluie (Fig. 44). La répartition selon l'altitude d'émergence est nette : les points élevés (Montarcher, ruisseau Chorsin, Chorsin grange), proches de 1100 mètres, présentent les rapports isotopiques les plus négatifs. Ces valeurs sont semblables à celles déterminées pour le Furan (Fig. 44) à altitude de recharge similaire.

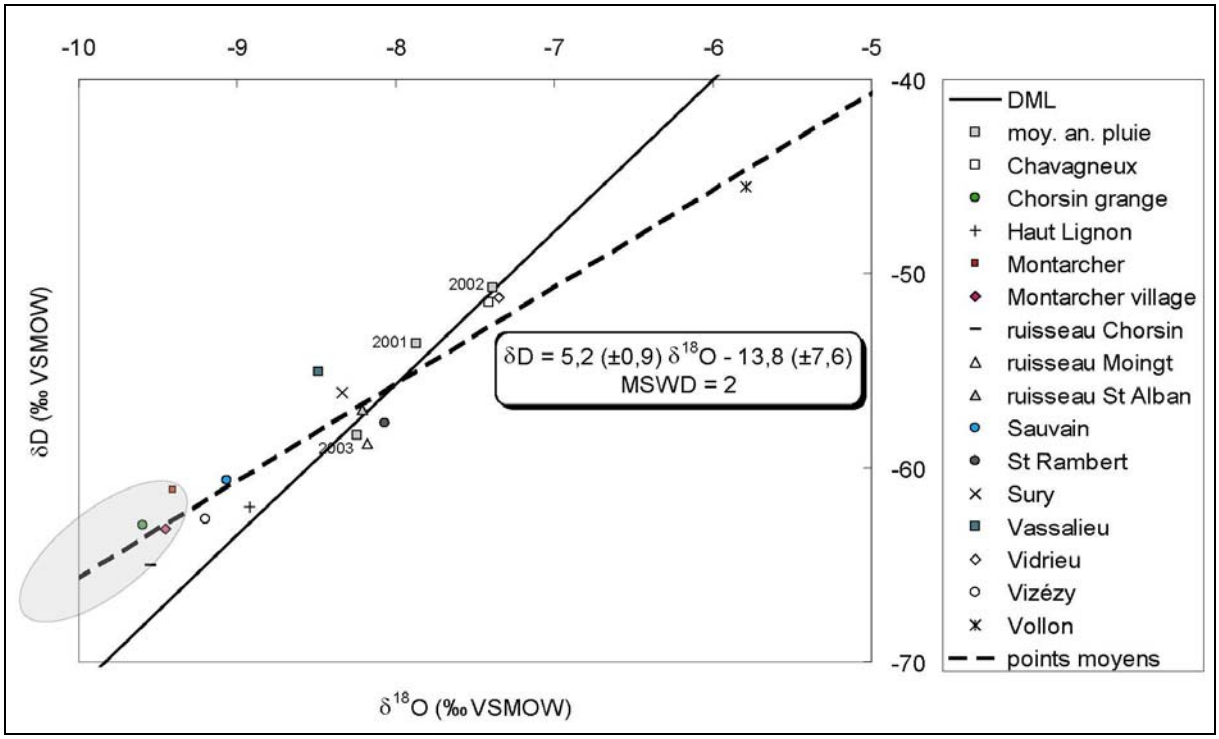


Fig. 44 : distribution des rapports isotopiques moyens des sources et ruisseaux échantillonnés dans la plaine du Forez et ses reliefs bordiers ; les valeurs moyennes des pluies au cours de la période 2001 – 2003 sont indiquées ; l'ellipse grise représente le domaine des eaux du Furan, son grand axe étant aligné sur la régression observée dans ce bassin versant.

III.6.2 $^{18}O/^{2}H$: gradients d'altitude et relations à l'infiltration

Le calcul des gradients d'altitude est moins direct que pour les précipitations. Dans le cas des sources, soit on sélectionne l'altitude de l'émergence, soit celle de l'aire de recharge. Cette dernière est responsable de la signature isotopique en l'absence d'interactions fortes dans le sol et le sous-sol (Araguas Araguas, 2000). Dans le cas du bassin versant du Furan, les deux méthodes conduisent à des résultats similaires. L'analyse cartographique des sous-bassins versants drainant chaque source permet de déterminer une altitude moyenne supérieure de 100 à 200 mètres à celle des exutoires. L'incertitude en prenant l'altitude du lavoir est donc mineure ; cette voie est donc celle employée ci-après.

Afin d'essayer d'estimer des gradients représentatifs, la dénivelée minimale est fixée à 200m entre deux sources. Les calculs se limitent à une comparaison entre les trois lavoirs sommitaux (Barbanche, Bessat et Tarentaise) et Rochetaillée (écarts d'altitude d'au moins 220m). Les deux premiers donnent en oxygène un appauvrissement de 0,22‰ par 100m d'élévation, alors qu'entre Tarentaise et Rochetaillée la variation est de –0,034‰ par 100m. Cette dernière valeur peut être expliquée par l'effet topographique observé dans les pluies de Rochetaillée (chap. 2). Les deux premiers gradients sont identiques au gradient moyen calculé sur les précipitations entre Tarentaise et St-Just-St-Rambert (Tab. 7). Les aquifères sur socle cristallin échantillonnés peuvent donc servir à caractériser les pluies locales, lorsque les enregistrements directs ne sont pas suffisants.

L'écart entre les valeurs isotopiques de la pluie et d'une source est en moyenne de 2‰ ($\delta^{18}O$) à un an d'intervalle (Tab. 14). Soit en raisonnant en altitude moyenne du bassin versant amont du Furan (environ 1000m) et en se rapportant aux valeurs météoriques mesurées à 400m (St-Just-St-Rambert), un gradient apparent de –0,33‰ pour 100m d'élévation. Cette valeur est supérieure à tous les gradients déterminés, notamment la valeur moyenne (–0,21 à –0,22‰ pour 100m). Les valeurs isotopiques des aquifères échantillonnés sont donc plus appauvries que celles des pluies à altitude comparable. Il est vraisemblable que la recharge s'effectue préférentiellement lors des périodes hivernales, quand les deltas des précipitations sont minimaux (Andreo et al., 2004). Ce constat implique aussi une moindre ampleur des variations saisonnières des sources par rapport à celles décrites sur les précipitations.

Les gradients d'altitude calculés dans les Monts du Forez sur les aquifères de surface ($\delta^{18}O$, δD moyen) donnent des valeurs proches de celles du Furan (Tab. 15), en moyenne de –0,19‰ en $\delta^{18}O$ en référence à St-Rambert et Vassalieu. Les gradients calculés par rapport à Chavagneux sont plus élevés, peut-être à cause de l'influence plus forte des recharges hivernales pour cette source. Les valeurs de gradient obtenues en deutérium sont fortement variables et sans corrélation aux variations de $\delta^{18}O$. Il faut toutefois noter que les gradients calculés en référence à St-Rambert sont hypothétiques, cette source présentant une teneur en tritium plus forte (III.6.6) que les précipitations actuelles. Les gradients calculés pour St-Rambert peuvent donc être modifiés par une circulation nettement plus longue que celle des autres lavoirs du Furan et du Forez.

Point haut	altitude GPS (m)	Point bas	altitude GPS (m)	gradient $\delta^{18}O$ (point haut / point bas)	gradient δD (point haut / point bas)
Chorsin grange	1120	**Chavagneux**	429	-0.32	-1.66
Montarcher	1111			-0.29	-1.42
Montarcher village	1155			-0.28	-1.61
Sauvain	901			-0.35	-1.94
Chorsin grange	1120	**St Rambert**	389	-0.21	-0.72
Montarcher	1111			-0.19	-0.48
Montarcher village	1155			-0.18	-0.72
Sauvain	901			-0.20	-0.58
Chorsin grange	1120	**Vassalieu**	601	-0.21	-1.52
Montarcher	1111			-0.18	-1.20
Montarcher village	1155			-0.17	-1.47
Sauvain	901			-0.19	-1.87

Tab. 15 : gradients d'altitude déterminés sur les sources pérennes de la bordure Ouest du graben du Forez ; les erreurs d'altitude (mesure directe en GPS non différentiel) sont de ± 5m.

III.6.3 Excès de deutérium

Comme vu précédemment, les sources de surfaces étudiées reflètent de manière atténuée les variations des eaux météoriques. Il est donc possible de déterminer un excès en deutérium, qui doit être en relation avec celui enregistré par les précipitations lors de la formation des masses nuageuses, s'il n'y a pas de forte ETP (hiver). L'excès de deutérium mensuel moyen des précipitations est figuré en trait continu gras dans la figure 45.

Si l'évolution des excès en deutérium des pluies ne suit pas de tendance nette hormis les variations saisonnières évoquées en II.8.3, il apparaît une tendance à la diminution de la valeur de l'excès dans le temps pour les sources et ruisseaux, alors qu'une telle diminution

n'est pas détectée dans les précipitations. D'autre part, les variations saisonnières des sources sont conformes à celles des pluies, avec des valeurs plus fortes en hiver. A la lecture de la Fig. 45, il n'apparaît pas d'écart temporel net entre pic d'excès en deutérium dans les pluies et apparition d'une anomalie comparable dans les eaux des aquifères de surface.

Les valeurs de l'excès en deutérium sont proches de celles déterminées sur les précipitations, en général supérieures en valeur absolue, ce qui est le reflet de l'augmentation de ce paramètre avec l'altitude (EIH, 2000). Comme constaté lors de l'étude des précipitations, il n'est pas non plus aisé de déterminer l'origine géographique des pluies. L'utilisation de ce paramètre sur les sources, même superficielles, ne semble donc pas être d'une grande aide.

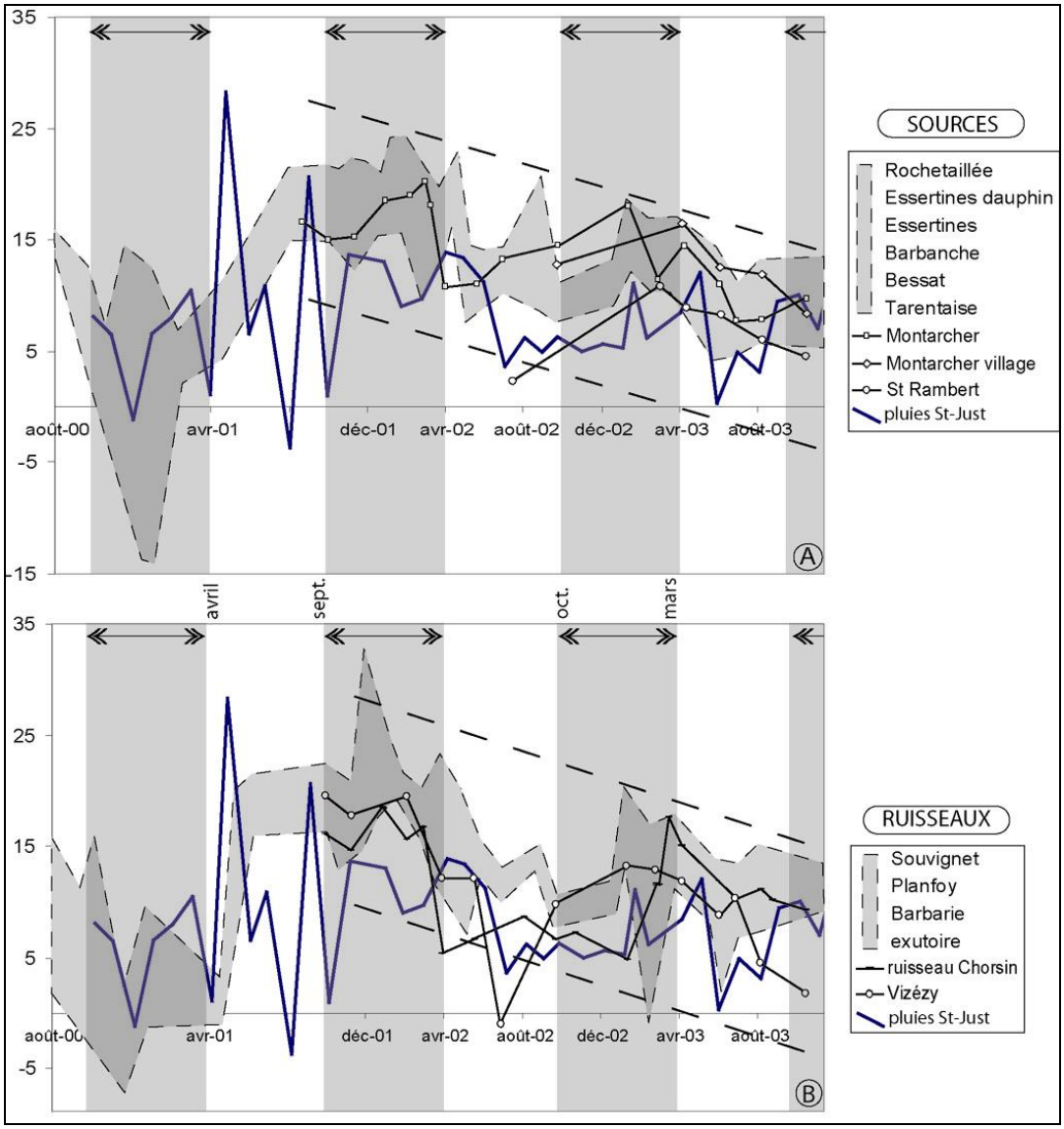


Fig. 45 : variation dans le temps de l'excès de deutérium des sources (A) et rivières (B) dans le département de la Loire. Le trait continu gras représente la valeur mensuelle moyenne de cet excès dans les pluies de St-Just-St-Rambert.

III.6.4 Variations temporelles en oxygène et hydrogène – relations à la température

Comme évoqué au III.6.2, il existe une diminution des rapports isotopiques corrélée avec une augmentation de l'altitude. Afin de ne pas surcharger les figures suivantes, il a été choisi non pas de représenter les variations temporelles de chaque source, mais de figurer une enveloppe regroupant lors de chaque échantillonnage les valeurs extrêmes mesurées.
Deux cas de figure sont à envisager :

- le premier correspond aux eaux du massif du Pilat (Furan), et voit une relation "variation des rapports isotopiques – variations climatiques" peu marquée. Les lavoirs échantillonnés (Fig. 46.1) ont des rapports variant dans le temps, d'une amplitude de 1‰ en oxygène et de 10 à 15‰ en hydrogène, mais avec une cyclicité différente des changements climatiques externes. Les années 2000 et 2001 sont ainsi marquées par des rapports plus appauvris (–10 ‰ $\delta^{18}O$) que les années 2002-2003 (–9,7 à –9,4 ‰ $\delta^{18}O$). A contrario, décembre 2003 est marqué par une nette baisse des rapports, consécutive au fort épisode pluvieux du début de mois : épisode supérieur à 100mm entraînant une ré-alimentation forte des sources taries au cours de l'été. Les rapports isotopiques en hydrogène reflètent des variations plus proches de celles du cycle saisonnier, mais les valeurs les plus élevées sont atteintes lors des mois froids. Ceci est une autre indication de temps de percolation de plusieurs mois au sein des aquifères.

- les valeurs isotopiques des ruisseaux du Furan (Fig. 46.2) et des sources et rivières du Forez (Fig. 47) sont plus étroitement reliées aux conditions climatiques externes. Les mois froids sont marqués par des rapports plus faibles, influencés par des précipitations plus froides (évaporation limitée). Il est même envisageable d'essayer de repérer les périodes où le débit des ruisseaux est surtout influencé par le ruissellement de surface, des périodes où les sources soutiennent ce débit. Par exemple, en 2003 (Fig. 46.2), il a été montré au chapitre II que les précipitations sont très inférieures aux normales pluviométriques. Or il n'a pas été constaté d'à sec sur les ruisseaux, ce qui implique une alimentation par les aquifères et donc des rapports isotopiques proches de ceux des sources (Fig. 46.1), sans pic estival. Cette explication n'apparaît cependant pas valide pour expliquer les rapports forts négatifs de l'année 2001. L'on doit donc évoquer une recharge par des pluies plus négatives avant 2001.

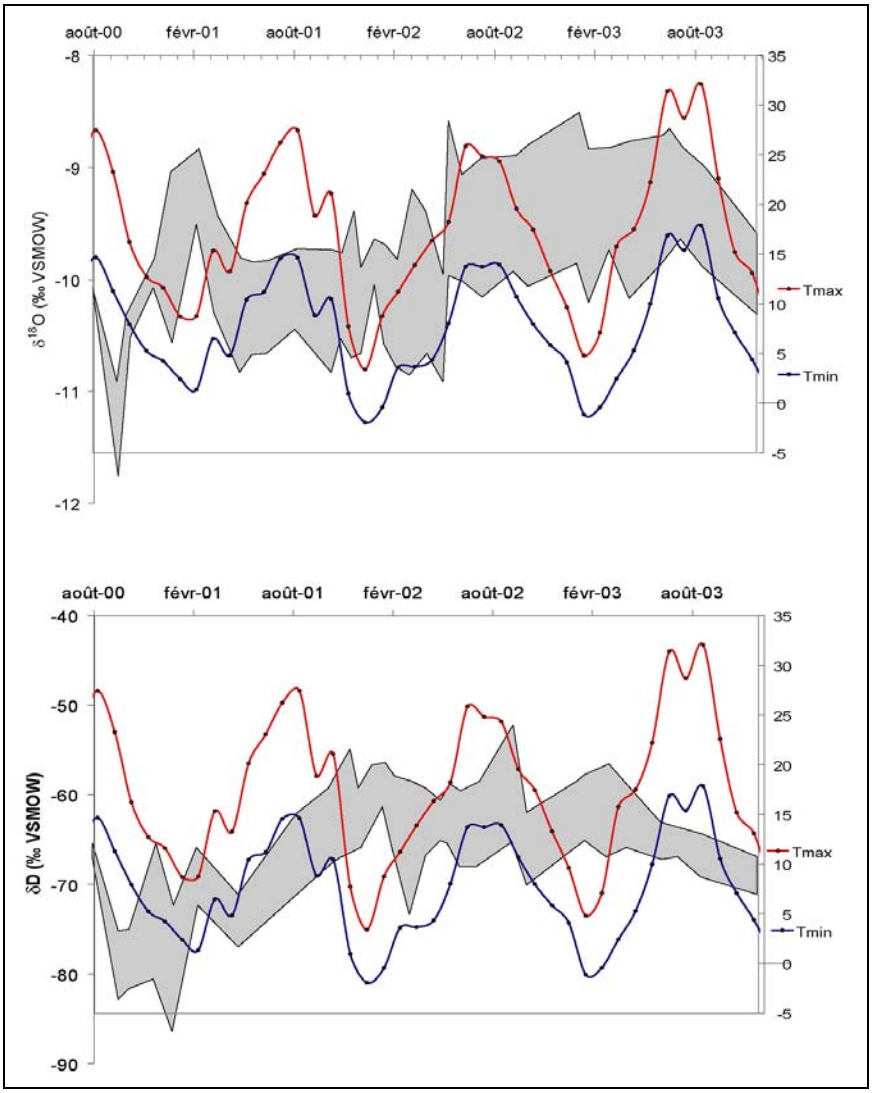


Fig. 46.1 : variations des rapports isotopiques en oxygène et hydrogène des sources pérennes du massif du Pilat (en grisé) ; les températures minimales et maximales mensuelles enregistrées à Andrézieux-Bouthéon sont indiquées comme référence à la cyclicité climatique annuelle.

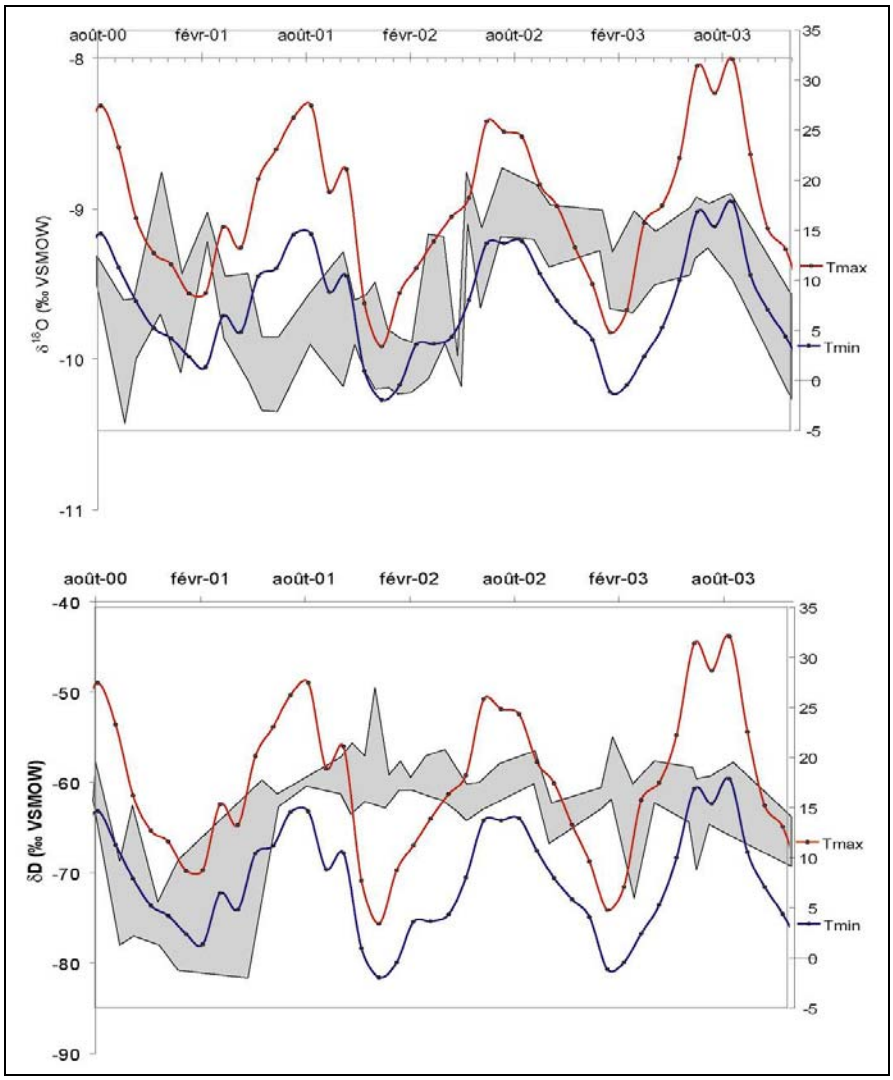


Fig. 46.2 : variations des rapports isotopiques en oxygène et hydrogène des ruisseaux du massif du Pilat (en grisé) ; les températures minimales et maximales mensuelles enregistrées à Andrézieux-Bouthéon sont indiquées comme référence à la cyclicité climatique annuelle.

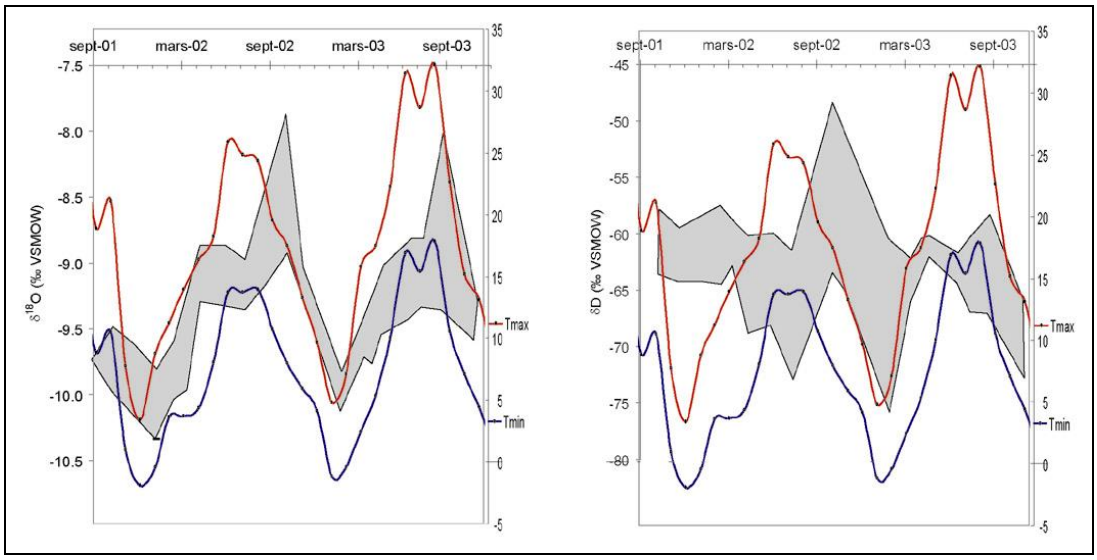


Fig. 47 : variations des rapports isotopiques en oxygène et hydrogène de Montarcher, ruisseau Chorsin et Vizézy (en grisé) ; les températures minimales et maximales mensuelles enregistrées à Andrézieux-Bouthéon sont indiquées comme référence à la cyclicité climatique annuelle.

III.6.5 Signatures ^{13}C

Les rapports isotopiques du carbone 13 ont été mesurés sur le Carbone Total Dissous (CTD), regroupant la fraction de Carbone Organique (TOC) et la fraction de Carbone Inorganique (CITD). Les rapports mesurés correspondent donc à un signal moyen recouvrant toutes les sources possibles de carbone dans les eaux de surface. Trois provenances principales sont usuellement distinguées pour le CITD (e.g. Amiotte-Suchet et al., 1999) : 1) la dissolution de CO_2 du sol lors de la percolation durant l'infiltration ; 2) la dissolution des minéraux carbonatés potentiellement présents dans le sol et l'aquifère ; 3) enfin l'incorporation de CO_2 atmosphérique soit lors du trajet aérien antérieur à l'infiltration soit lors de l'écoulement en surface pour les rivières et ruisseaux. A ces sources s'ajoutent l'interaction avec la matière organique possible dans les stades aérien et sub-aérien, les phénomènes de respiration (racinaire dans le sol ou par les plantes aquatiques dans les rivières) et les mécanismes d'échange isotopique avec le réservoir de CO_2 atmosphérique. En moyenne mondiale, la contribution du CO_2 du sol à la signature en ^{13}C des eaux de surface est proche de 67% (e. g. Amiotte-Suchet et al., 1999).

Les rapports isotopiques en ^{13}C résultant de ces processus sont suffisamment différents pour préciser l'origine du Carbone Total Dissous (CTD) dans l'eau. La plupart des sols sont considérés comme étant en état quasi-stable : la composition du CO_2 du sol est très proche de celle des contributeurs biologiques à ce même sol (e.g. Amundson et al., 1998). L'importance du fractionnement isotopique dépend du cycle de photosynthèse mis en action par les plantes. La plupart des plantes des zones tempérées ont un cycle en C3 (production d'une molécule à trois atomes de carbone suivant le cycle de Calvin), excepté le maïs en C4 (cycle de Hatch-Slack). Ainsi les couverts végétaux rencontrés dans les zones d'étude (tourbières, prairies et landes à bruyères, peuplement arboricole en feuillus et résineux) sont des contributeurs à cycle C3. Les rapports isotopiques produits par cette matière organique sont proches de –27‰ VPDB (Deines, 1980) pour les plantes C3 (–12‰ pour les plantes C4).

La signature isotopique du gaz du sol ressort alors entre –22 et –25‰ (Bakalowicz, 1979) par suite d'un enrichissement de 4,4‰ entre gaz du sol et matière organique (Cerling, 1984), ce qui entraîne pour le CTD des valeurs entre –17 et –19‰, suivant que le réservoir de CO_2 représente un système ouvert ou fermé (Fontes, 1978). Des rapports plus appauvris sont produits lors d'interaction avec des gaz (méthane). A l'inverse des valeurs plus enrichies en isotope lourd sont enregistrées par le CO_2 atmosphérique en atmosphère non polluée (–7‰ ; Craig, 1953), ce qui donne pour le Carbone Inorganique Dissous en équilibre avec ce gaz des

valeurs de $\delta^{13}C$ entre 0 et +2‰ (e.g. Amiotte Suchet, 1999). Les rapports isotopiques de CO_2 produits par dégazage mantellique se situent entre –4 et –8‰ (Blavoux et al., 1982), les CO_2 échantillonnés dans les districts volcaniques basaltiques actuels donnant des valeurs entre –3,4 et –3,8‰ VPDB (Gerlach et Taylor, 1990 ; Javoy et Pineau, 1991 ; Poreda et al, 1992).

Les rapports isotopiques en carbone 13 ($\delta^{13}C$) mesurés sont reportés dans la figure 48. Les points de mesure du Furan ont fait l'objet de deux prélèvements aux printemps 2002 et 2003 (cf annexes). Pour les échantillons du Forez, la fréquence de mesure est plus grande. Il n'est pas constaté de cyclicité annuelle dans la variation de la signature isotopique en carbone, hormis pour le Vollon qui admet des valeurs plus appauvries en été (–15,5‰ le 29/08/03) et plus enrichies en fin d'hiver (–11,9‰ le 25/03/03). Il n'est cependant pas aisé de rattacher ces fluctuations à des variations de la composition isotopique du CO_2 du sol (Cerling, 1984). En effet, elles sont enregistrées sur une rivière circulant sur des sédiments argileux contenant des passées carbonatées ($\delta^{13}C$ = –6 à +1‰ VPDB).

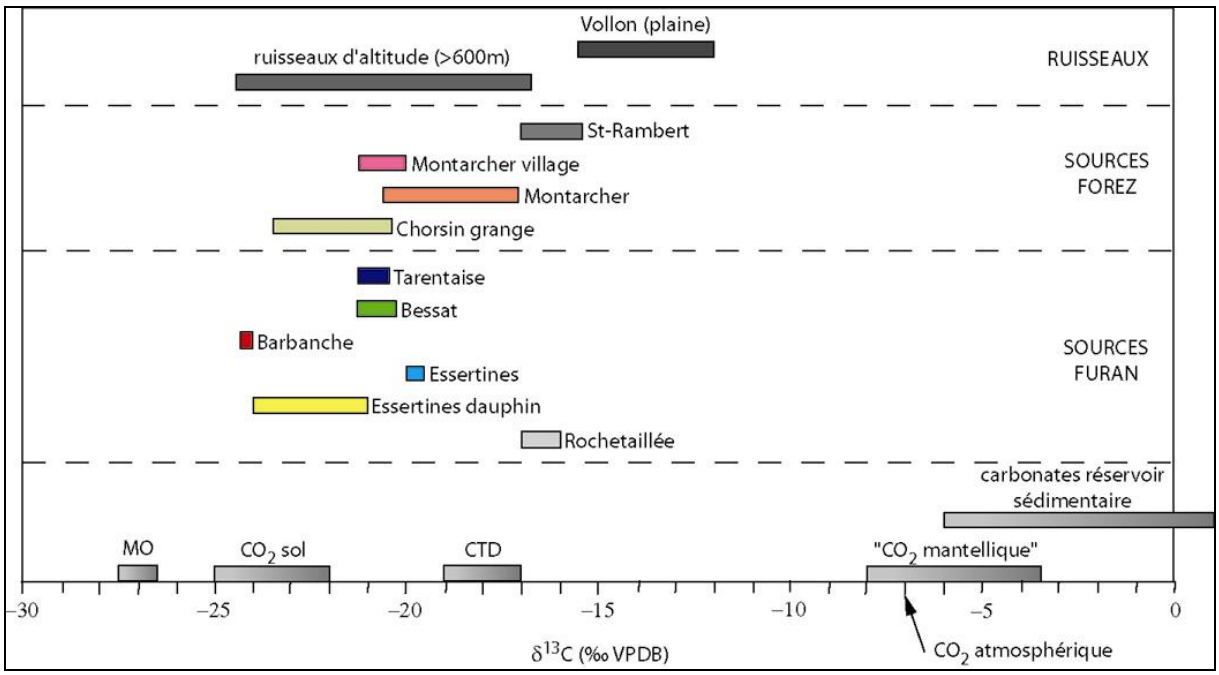


Fig. 48 : rapports isotopiques $\delta^{13}C$ (‰ VPDB) mesurés pour les sources du Furan et de la plaine du Forez ; les valeurs mesurées sur les ruisseaux et rivières sont reportées dans la partie supérieure ; les valeurs de $\delta^{13}C$ indiquées pour la Matière Organique (MO), le CO_2 du sol, le Carbone Total Dissous, le CO_2 atmosphérique et le CO_2 mantellique proviennent de Amiotte-Suchet et al., 1999 ; Gerlach et Taylor, 1990 ; Poreda et al., 1992.

Les rapports isotopiques du carbone signent une interaction forte avec la matière organique lors de la percolation de l'eau dans le sol. La dissolution de carbonates présents dans le sol n'est pas prépondérante. L'équilibre avec le CO_2 atmosphérique n'est préservé : les valeurs

mesurées s'inscrivent dans une plage de –11,9 à –24,4‰ VPDB. Les sources, qu'elles appartiennent au bassin versant du Furan (–20,7‰) ou à la plaine du Forez (–20,9‰), ont en moyenne un rapport légèrement plus bas que les ruisseaux qu'elles alimentent (respectivement –18,5 et –19,7‰ VPDB). Ces rapports traduisent une mise en contact du CTD avec le CO_2 atmosphérique lors de l'écoulement. Deux sources ont des valeurs sortant du champ CO_2 du sol – CTD. Rochetaillée collecte des infiltrations dans une zone majoritairement composée d'un substratum métamorphique. Pour cette source, les écarts entre les prélèvements (–17,1‰ à 16,1°C et –15,9‰ à 19,3°C) ne peuvent pas seulement être expliqués par un effet de température de l'eau. Les différences de coefficient de fractionnement $\alpha_{HCO3(aq)-CO2(g)}$ (Deines et al., 1974) pour les températures précédentes sont en effet de 0,3‰, loin des 1,2‰ constatés (soit une différence de 13°C). Pour St-Rambert, l'interaction dans un réservoir de type sédimentaire peut expliquer des signatures moins appauvries. Néanmoins, l'interaction avec la matière organique reste prépondérante.

III.6.6 Eléments radiogéniques

A l'image des analyses effectuées sur les pluies (cf II.8.5.2), seules les teneurs en tritium ont été déterminées sur les sources et ruisseaux du bassin du Furan et de la plaine du Forez, à l'exception du point le plus minéralisé (St-Rambert), pour lequel une détermination du pourcentage de carbone moderne dissous dans l'eau a été faite courant 2004.

Les mesures du contenu en ^3H ont été faites en automne et montrent des teneurs très similaires à celles enregistrées sur les précipitations (tab. 16). Les extrêmes sont entre 6 et 11 UT, toutes les sources et ruisseaux ayant des valeurs inférieures ou égales à 9 UT, à l'exception de St-Rambert à 11 UT. Pour les sources autres que St-Rambert, un temps de parcours proche d'un an permet de refléter les teneurs mesurées.

Deux explications peuvent rendre compte de la teneur en tritium mesurée à St-Rambert. Soit l'on considère que cette source voit sa recharge majeure pendant les mois estivaux, auquel cas le temps de transit serait très bref (2 à 4 mois). Cependant, il est peu vraisemblable qu'un temps de percolation aussi faible puisse suffire à acquérir une minéralisation assez conséquente (TDS # 500mg/l). La deuxième explication peut être à contrario un temps de percolation plus important (dizaine d'années ou plus). Dans ce cas, l'eau pourrait s'être

infiltrée lors d'une période où l'atmosphère possédait un contenu en ^{3}H supérieur aux quantités actuelles. Par jeu de décroissance radioactive, une eau initialement à 30UT peut ressortir à 10UT après 25 à 30 ans de parcours souterrain, en l'absence de mélange avec un pôle actuel. Cette hypothèse permet en outre d'acquérir une certaine minéralité lors du trajet hors atmosphère, et pourrait être vérifiée ou infirmée en utilisant les datations par CFC.

	Date	activité (UT)	erreur (±UT)
Rochetaillée	15/10/2002	8,7	0,6
Essertines dauphin	15/10/2002	8	1
Essertines	15/10/2002	7,8	0,7
Barbanche	15/10/2002	8	1
Bessat	15/10/2002	6,9	0,7
Tarentaise	15/10/2002	7	1
Souvignet	15/10/2002	7,7	0,9
Planfoy	15/10/2002	8	1
Pont de Barbarie	15/10/2002	9	1
exutoire Pas de Riot	15/10/2002	8	1
Montarcher	17/10/2002	5,9	0,8
Montarcher village	17/10/2002	9	1
ruisseau Chorsin	17/10/2002	6	1
Vizézy	17/10/2002	6	1
St-Rambert	06/11/2003	11	1

Tab. 16 : teneurs en tritium mesurées en octobre 2002 dans les sources et ruisseaux du Furan et du Forez, sauf St-Rambert en novembre 2003, associée à une mesure de l'activité en ^{14}C en septembre 2004 (89,7% de Carbone Moderne).

Néanmoins, dans le cas de St-Rambert, on peut opposer la valeur de l'activité en carbone 14 mesurée en 2004. Celle-ci ressort à 89,7% de Carbone Moderne, soit un temps de percolation maximum dans l'aquifère de 900 ans, très supérieur aux temps précédemment évoqués. Mais nous rentrons là dans le cas d'un aquifère peu protégé des agressions extérieures (teneurs en nitrates et sulfates conséquentes), ce qui rend peu raisonnable le calcul direct d'un âge sans corrections. Plusieurs méthodes existent pour essayer de tenir compte de l'interaction du carbone total dissous dans l'eau avec le sol dans un premier temps, les carbonates de l'aquifère ensuite et enfin d'éventuelles contaminations. Cette partie sera traitée ultérieurement (chapitre IV), et permettra de constater que dans la grande majorité des cas, les modèles employés avec St-Rambert donnent un âge futur.

Les rapports isotopiques en oxygène et hydrogène des sources sont plus négatifs que ceux des pluies (Blavoux, 1978). Les corrélations des rapports sources – pluies suggèrent des temps de transit proches d'un an. Les gradients d'altitude sont similaires à ceux calculés pour les

précipitations. Les interactions eau – roche permettant aux eaux d'acquérir leur signature chimique en sub-surface ne sont donc pas suffisantes pour modifier fortement les rapports isotopiques des précipitations. Les aquifères apparaissent peu sensibles aux changements climatiques saisonniers, au contraire des rivières les drainant. Les cyclicités observées sont différentes, sauf dans le cas d'épisodes torrentiels.

La faible profondeur atteinte par les eaux est également envisageable lors de l'examen des rapports en carbone 13. Ceux-ci montrent une forte interaction avec la matière organique, ce qui est à rapprocher des pressions partielles de CO_2 des eaux, proches de celles de sols.

Enfin, des durées réduites de parcours souterrains sont suggérées par les teneurs en tritium des eaux souterraines, dans la gamme actuelle des précipitations. Seul St-Rambert, plus minéralisé et plus riche en tritium, peut admettre des temps de percolation supérieurs.

La partie III.7 se propose justement d'essayer de déterminer les temps de transit moyens au sein de différents aquifères de surface du massif du Pilat.

III.7 ESSAIS DE DETERMINATION DES TEMPS DE RESIDENCE MOYENS DANS LES AQUIFERES SUPERFICIELS DU BASSIN VERSANT AMONT DU FURAN

La détermination des temps moyen de transfert dans le cas d'eaux de surface est un paramètre important dans la gestion de la ressource en eau, car elle permet d'estimer la vulnérabilité et la sensibilité aux changements extérieurs de cette ressource. L'utilisation de méthodes basées sur les traceurs isotopiques n'est utile que dans le cas des eaux dont le temps de transit est inférieur à 5 ans (Clark et Fritz, 1997). En effet, les variations isotopiques saisonnières associées aux précipitations par effet essentiellement thermique, s'atténuent très nettement après 2 à 3 ans de résidence dans un aquifère, bien que seulement 5 à 25% des pluies atteignent la nappe en climat tempéré (Clark et Fritz, 1997 ; chap. II.9.3). Cette faible fraction disponible pour la recharge est le résultat de phénomènes d'interception par la canopée lors des précipitations et de reprise par évapotranspiration. Brodersen et al. (1998) ont montré que l'interception par la canopée ne laisse passer sous le couvert végétal qu'entre 27 et 46% de l'impluvium, selon que la végétation est composée de hêtres ou d'épicéas. Si écoulement et transpiration végétale sont reconnus comme n'ayant pas d'effet sur la composition isotopique de l'eau infiltrée, il n'en est pas de même lors de phénomènes d'évapotranspiration (Sueker, 2003). De fait, les oscillations périodiques des rapports isotopiques visibles au niveau des

lavoirs, pourraient résulter de temps de parcours brefs dans les aquifères, ce qui suggère également que la zone insaturée a une puissance relativement limitée (inférieure à 3 à 5m ; Sueker, 2003).

Pour essayer de contraindre les temps moyens de transfert au sein des aquifères, il est fait appel au programme FlowPC (Zuber et Maloszewski, 2000), basé sur une approche du système par paramètres localisés (« lumped parameters »). Cette approche est utilisée avec les rapports isotopiques en oxygène et deutérium mesurés sur les sources du Furan. Ces mesures représentent le signal de sortie de l'aquifère, le signal d'entrée correspondant aux rapports déterminés sur les précipitations de St-Just-St-Rambert (corrigées de plusieurs paramètres comme il sera vu par la suite). Le choix s'est donc porté sur des aquifères pour lesquels l'on dispose d'une chronique d'enregistrement suffisamment longue pour essayer de minimiser les erreurs d'estimation de temps moyen de transit.

Le logiciel utilisé permet de décrire un système à l'aide de plusieurs paramètres ajustables. La pertinence du modèle bâti est vérifiée mathématiquement lorsque le calcul et l'observation sont aussi semblables que possible. Cette pertinence est décrite par un paramètre dénommé "efficacité du modèle" (en %), qui détermine l'écart entre le modèle et l'observation. Dans le cas des isotopes stables, l'efficacité rend compte de la capacité du modèle à refléter les variations saisonnières des rapports isotopiques.
L'écoulement dans l'aquifère est considéré de manière globale, et pris comme constant. Cela constitue certes une limite aux résultats obtenus, mais permet néanmoins des estimations raisonnables. La relation entre concentration initiale du traceur (C_{in}) et concentration en sortie (C) est donnée par (Zuber et Maloszewski, 2000) :

$$C(t) = \int_0^{\infty} C_{in}(t-t')g(t')\exp(-\lambda t')dt'$$

avec t' la date d'entrée dans le système, (t-t') le temps moyen de transit et g(t') la fonction réponse décrivant la concentration en sortie du traceur, permettant une estimation du temps de transit moyen dans l'aquifère. Selon l'intervalle d'intégration choisi, il est nécessaire d'utiliser toute la quantité initiale de traceur pour décrire le système en sortie, ce qui exclut de fait des pertes au sein de l'aquifère (faille par exemple). Les possibilités de mélange avec des eaux pré-existantes peuvent être envisagées à l'aide d'une proportion de contaminant de composition isotopique fixe, définie par l'utilisateur.

Le programme FlowPC comporte plusieurs voies pour estimer les temps de transit, selon la réponse mathématique choisie (annexes Fig. A.4.2). Des estimations de temps de transfert par modèle de type piston sont ainsi possibles. Dans ce cas, la quantité de traceur en entrée est retrouvée en sortie après un temps de parcours t-t' (le traceur se déplace comme dans un cylindre). Ce modèle n'est pas retenu car il implique un apport constant de traceur, or les pluies sont par définition erratiques et peuvent se mélanger à des eaux déjà existantes dans le sol (Jones, 2000). Le deuxième modèle possible est de type exponentiel, et se rapporte en première approximation à un réservoir totalement mélangé. Ce modèle n'est pas non plus retenu car il suppose une infinité de temps de parcours différents suivant les lignes d'écoulement considérées.

Le choix s'est orienté vers un modèle de dispersion (Fig. A.4.2), les tests sur les modèles précédents conduisant à des erreurs bien supérieures. La solution d'un tel modèle en milieu semi-infini est de type uni-dimensionnelle. Elle comporte également un paramètre dépendant de la distribution des temps de transit, ou paramètre de dispersion numérique du modèle. Il varie entre 0,05 et 0,5, une valeur forte signifiant une forte variabilité des temps de transit, une valeur faible une gamme de variation plus restreinte des temps de transit. Dans les cas traités par la suite, on a choisi de fixer ce paramètre à 0,05. Le prendre plus élevé ne change pas le temps de transit moyen (temps calculé par le modèle) ; la seule influence concerne l'efficacité du modèle qui diminue (déviation à la moyenne plus importante).

Le signal isotopique d'entrée des aquifères est donc conditionné par les signatures des précipitations locales. La localité pour laquelle la chronique d'enregistrement est suffisamment longue est St-Just-St-Rambert. Pour prendre en compte la différence d'altitude entre ce point et le bassin versant du Furan, on utilise le gradient d'altitude moyen enregistré sur les pluies (–0,22‰ / 100m d'élévation en ^{18}O ; –1,09‰ en ^{2}H). Dans cette première étape de modélisation, l'altitude de l'aire de recharge est prise entre 200 et 300m au dessus de l'exutoire. Ensuite, les effets de l'évapotranspiration seront envisagés, non en terme de modification des signatures isotopiques, mais en terme de quantité d'eau disponible à l'infiltration, ce qui revient à considérer que la majorité de la recharge s'effectue en hiver.

III.7.1 Fichier pluie (entrée)

La chronique d'enregistrement des rapports isotopiques des pluies de St-Just-St-Rambert est disponible d'octobre 2000 à décembre 2003, les données ultérieures n'étant pas nécessaires,

l'échantillonnage des lavoirs ayant cessé fin 2003. L'origine du système est octobre 2000, et tous les lavoirs sont référencés par rapport à cette date. 39 mois sont utilisables pour décrire la fonction entrée des aquifères (rapports isotopiques mensuels pondérés des quantités de précipitation); parmi eux, aucune valeur de précipitation n'a été mesurée en décembre 2001. Pour ce mois, une valeur correspondant à la moyenne des mois de décembre 2000, 2002 et 2003 est attribuée (–11,79‰ $\delta^{18}O$ en valeur brute).

Les données pluviométriques disponibles pour Rochetaillée et Tarentaise ne sont pas employées, la durée d'échantillonnage étant trop brève.

III.7.2 Fichiers lavoirs (sortie)

L'origine commune des mesures utilisées dans les modèles est janvier 2001, 3 mois après le début de suivi des précipitations. Les mois durant lesquels aucun échantillonnage n'a été réalisé sont inclus dans le fichier sans valeur. Le programme ne fonctionnant qu'à pas de temps régulier, on a attribué le rapport isotopique mesuré au jour i du mois au mois entier. Dans le cas de plusieurs mesures durant un mois donné, c'est la moyenne des rapports des prélèvements qui est utilisée. Cette approche a l'inconvénient d'induire une certaine distorsion temporelle dans les variations isotopiques enregistrées en sortie du système aquifère. C'est cependant, de par les fonctions mathématiques employées, le seul moyen raisonnable d'introduire les rapports isotopiques mesurés. En effet, on aurait pu décrire les modèles en utilisant un pas de temps journalier, puisque c'est le rythme de collecte des précipitations. Plusieurs problèmes seraient apparus : premièrement, il ne pleut pas tous les jours, d'où un fichier entrée très chaotique. En second lieu, le fichier d'observations sur les lavoirs n'aurait pas assez de points pour être significatif. Enfin, l'utilisation d'un signal moyen permet aussi de prendre partiellement compte l'effet d'accumulation et de mélange des précipitations dans le sol, à défaut de disposer d'informations isotopiques à partir de lysimètres implantés sur le terrain.

III.7.3 Modèles et paramètres utilisés

Comme souligné en préambule à cette partie, il est rapidement apparu lors du calcul de différents modèles que la seule voie permettant de lisser les variations isotopiques saisonnières enregistrées par les précipitations est l'emploi d'un modèle de dispersion. En

effet, les autres modèles ne permettent pas d'atténuer significativement les amplitudes des variations. Ces dernières ne s'atténuent qu'en employant des temps de transit de plusieurs années, qui ne sont pas compatibles avec les variations isotopiques annuelles observées les eaux des lavoirs (Clark et Fritz, 1997).

III.7.3.1 Lavoir de Rochetaillée

Pour ce point de prélèvement implanté à 800m d'altitude, on a déterminé cartographiquement une aire de recharge moyenne située vers 1100m. Pour les modèles $\delta^{18}O$, ceci impose une diminution des rapports isotopiques des précipitations de St-Just-St-Rambert de 1,54‰ (700m de dénivelée positive). Dans un premier temps, on utilise directement les pluies corrigées du gradient d'altitude moyen en entrée de système et les mesures du lavoir en sortie. Ce qui revient à ne considérer aucune modification du signal pluviométrique lors du trajet canopée – sol puis lors du trajet sol – sous-sol – aquifère. Le calcul par modèle de dispersion (sur $\delta^{18}O$), en ne prenant en compte aucune interaction avec des eaux pré-existantes, et avec un paramètre de dispersion fixé à 0,05 (cf III.7), donne des modèles à efficacité réduite (11%) pour des temps de transit de 11 mois (11,4 précisément). Ce calcul est donné en exemple dans la figure 49. L'augmentation du paramètre de dispersion donne des efficacités plus réduites mais toujours pour le même temps de transit. Il apparaît dès lors difficile d'obtenir de meilleurs résultats en conservant cette approche, le signal pluviométrique étant beaucoup plus variable que le signal du lavoir par effet d'atténuation lors du trajet souterrain. De même, l'emploi de cette procédure de calcul avec les gradients d'altitude minimal (–0,12‰ $\delta^{18}O$ / 100m) et maximal (–0,31‰ $\delta^{18}O$ / 100m) donne des temps de parcours similaires (11 mois), l'efficacité des modèles ne connaissant pas d'évolution notable.

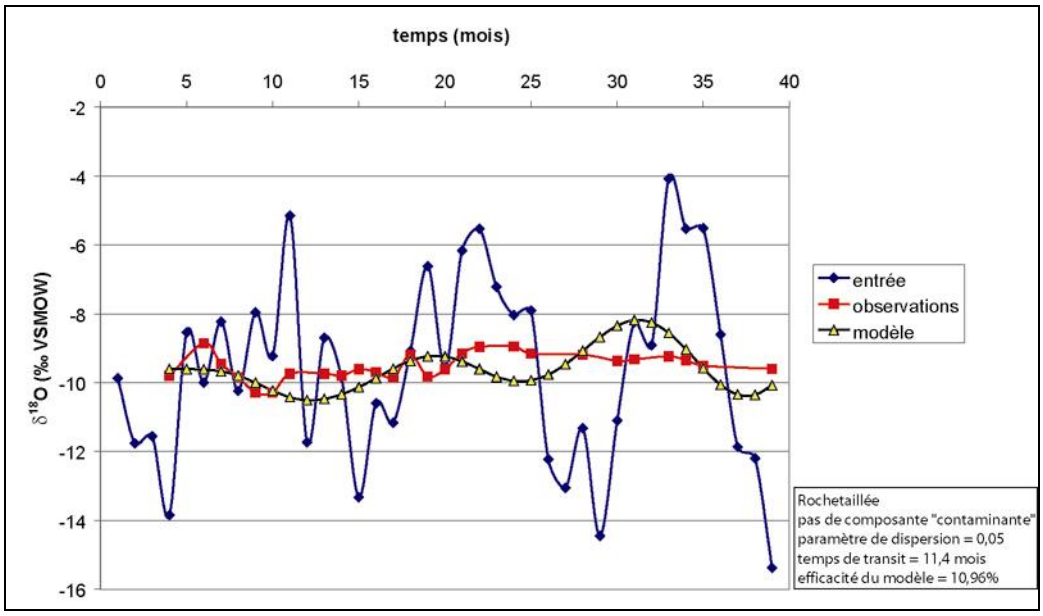


Fig. 49 : modèle de dispersion pour le lavoir de Rochetaillée (oxygène) ; détails dans la figure.

On peut essayer de prendre en compte cette atténuation en introduisant une composante d'eau pré-existante dans le réservoir. Comme la majorité de la recharge s'effectue durant les mois d'hiver, une valeur de –10‰ $\delta^{18}O$ pour cette composante est raisonnable. En supposant un stock égal à 20% du flux entrant, le modèle donne une réponse efficace à 21% (dispersion : 0,05%) pour un temps moyen proche de 11 mois (10,8). L'avantage de cette approche n'est donc pas de trouver un temps de transit différent, mais d'améliorer l'efficacité du modèle.

D'autres approches ont aussi été envisagées : comme signalé en II.9.3, on peut essayer de quantifier l'influence de l'évapotranspiration (ETP) sur la signature isotopique de l'eau s'infiltrant. Dans cette optique, les rapports isotopiques ont été recalculés en soustrayant les quantités de précipitations non disponibles pour l'infiltration, en utilisant la formule d'ETP de Hargreaves. Comme déjà mentionné au chapitre II, l'influence se fait surtout ressentir durant la période estivale. Le meilleur accord modèle – observations est obtenu pour une durée de percolation de 10 mois, l'efficacité ressortant presque à 20%.

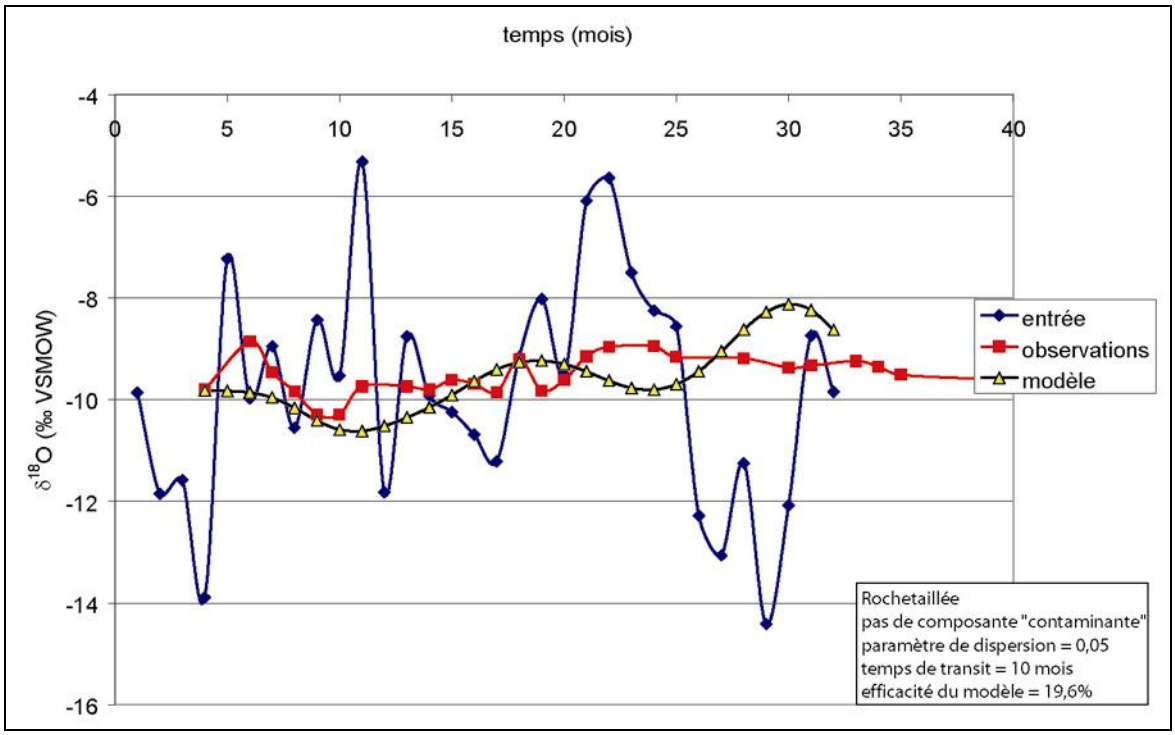


Fig. 50 : modèle de dispersion pour le lavoir de Rochetaillée (oxygène) avec prise en compte des précipitations perdues par évapotranspiration ; durant l'été 2003, l'ETP étant supérieure aux précipitations, aucun rapport isotopique n'est préservé ; les mois suivant ne sont en conséquence pas inclus dans le fichier entrée (rupture de cyclicité temporelle) ; autres détails dans la figure.

Enfin, on peut aussi envisager de tracer les temps de parcours moyens en utilisant les données disponibles en hydrogène. Comme le fractionnement avec cet atome est plus sensible qu'avec l'oxygène, les variations sont plus franches et l'on peut s'attendre à une meilleure approche des variations lors de la modélisation. Le résultat présenté dans la figure 51 représente le meilleur accord possible entre fichier pluviométrique (recalculé à 1100m d'altitude avec un gradient de –1,09‰ δ^2H par 100m) et observations en sortie du système aquifère. Celui-ci est obtenu sans composante contaminante, qui, si elle est introduite (20% à –70‰), produit une forte dégradation de l'efficacité du modèle, au contraire des essais faits sur l'oxygène.

En conclusion pour le lavoir de Rochetaillée, l'aire de recharge se situe aux alentours de 1000 à 1100m d'altitude, les temps de transit moyens convergent vers 11 mois avec δ^{18}O et 8 mois avec δ^2H. Ces résultats sont en accord avec une circulation souterraine d'une durée proche de 10 mois, ce qui, dans un petit bassin versant (101 ha) en environnement cristallin métamorphique, paraît compatible avec les faibles minéralisations mesurées. Néanmoins, ce type de modèle ne peut pas prendre en compte la fracturation et les circulations fluides associées.

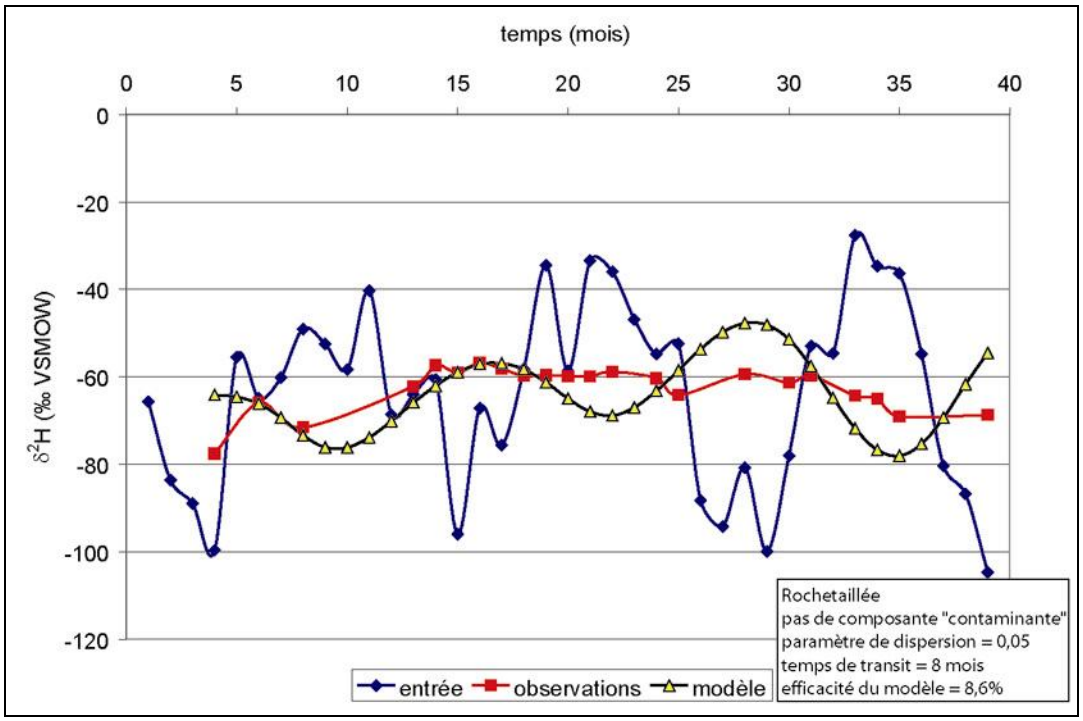


Fig. 51 : modèle de dispersion pour le lavoir de Rochetaillée (hydrogène) ; détails dans la figure.

III.7.3.2 Lavoir d'Essertines dauphin

Le processus de traitement est identique à celui employé pour Rochetaillée. On utilise les rapports O et H modifiés par le gradient d'altitude moyen (respectivement –0,22‰ et –1,09‰ par 100m d'élévation), ainsi que les modifications engendrées par l'hypothèse d'une recharge soumise à l'influence de l'évapotranspiration.

Les efficacités des différents modèles établis pour le lavoir d'Essertines dauphin sont meilleures que celles présentées en III.7.3.1. Deux exemples sont donnés dans la figure 52, avec des temps de transit moyens proches de 12 mois, avec dans un cas une aire de recharge prise à 1100m sans traitement supplémentaire (Fig. 52a), et dans l'autre cas les précipitations prises à la même altitude mais corrigées de l'effet de l'évapotranspiration (Fig. 52b).
Les tests effectués avec les rapports isotopiques en hydrogène ont conduits à une efficacité de 32% pour un temps de parcours de 10 mois (Fig 52c). Comme dans le cas de Rochetaillée, les modèles basés sur l'isotopie de l'hydrogène donnent un temps de transit plus bref que ceux construits à partir des isotopes de l'oxygène.

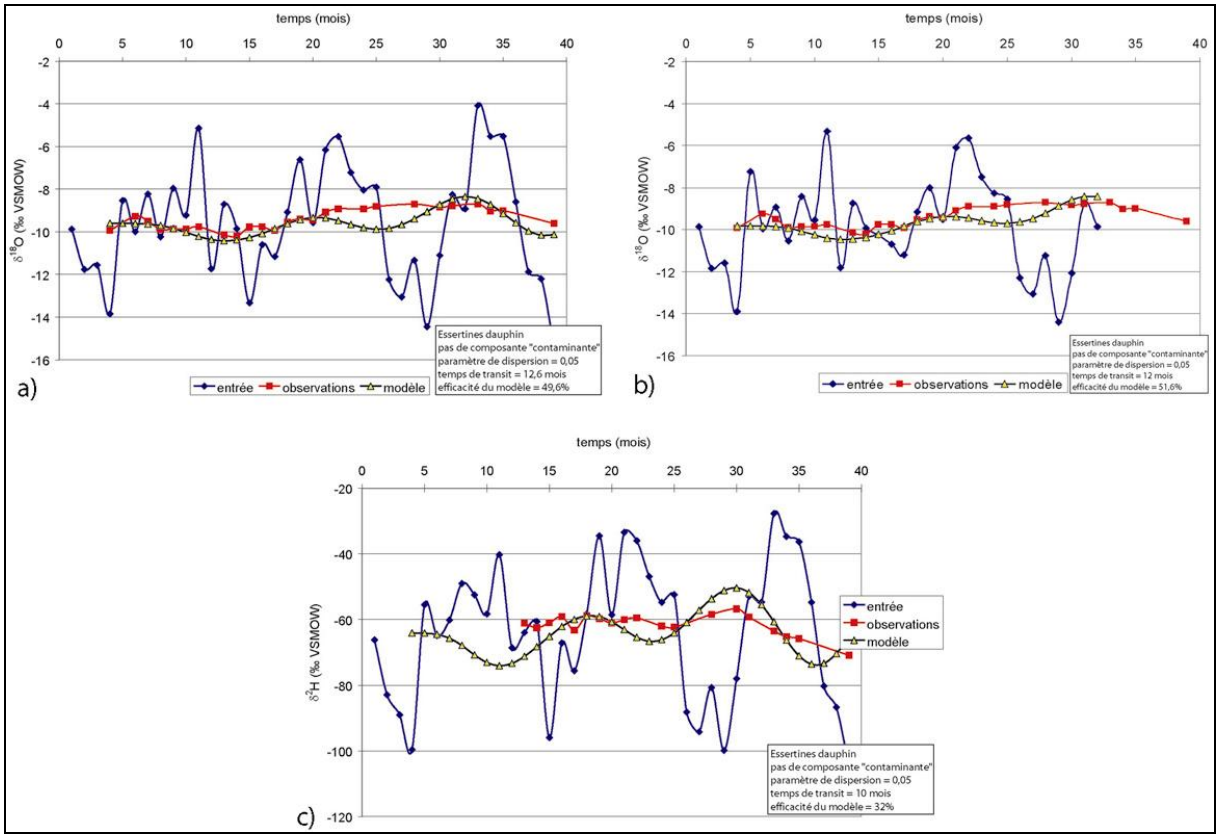


Fig. 52 : modèle de dispersion pour le lavoir d'Essertines dauphin (oxygène et hydrogène) ; a) graphe avec entrée pluies prises à 1100m d'altitude (cf Rochetaillée) ; b) graphe prenant en compte l'ETP ; c) modèle basé sur les rapports δ^2H (les trois premières mesures sont retirées ; voir texte pour explications).

III.7.3.3 Lavoir d'Essertines

Tout comme pour le lavoir d'Essertines dauphin, les compositions isotopiques des pluies ont été recalculées à 1100m. L'accord des modèles avec les observations est le meilleur obtenu pour tous les lavoirs du bassin versant du Furan. Ainsi (Fig. 53a), l'utilisation en entrée des pluies juste modifiées par le gradient d'altitude moyen conduit à un temps de résidence moyen de 14 mois et une efficacité de 67%. En d'autres termes, les précipitations tombées dans la zone d'alimentation de cette source expliquent les 2/3 du signal isotopique enregistré au lavoir. Donc ce signal est peu sujet à modifications lors de son trajet souterrain : il est vraisemblable que l'aire de recharge se situe en milieu relativement ouvert (peu d'interception par la canopée) et bien drainé (faible influence de l'évapotranspiration).

La faible influence de l'ETP sur les compositions isotopiques peut être appréhendée en utilisant en entrée le fichier pluviométrique pondéré des effets de l'ETP. On obtient un temps de 13,9 mois et une efficacité de 71,6%, proches de ceux précédemment obtenus.

Enfin, les modèles basés sur les isotopes de l'hydrogène (Fig. 53b) donnent des temps de transit plus faibles, de l'ordre de 9 mois, avec une efficacité moindre (26%).

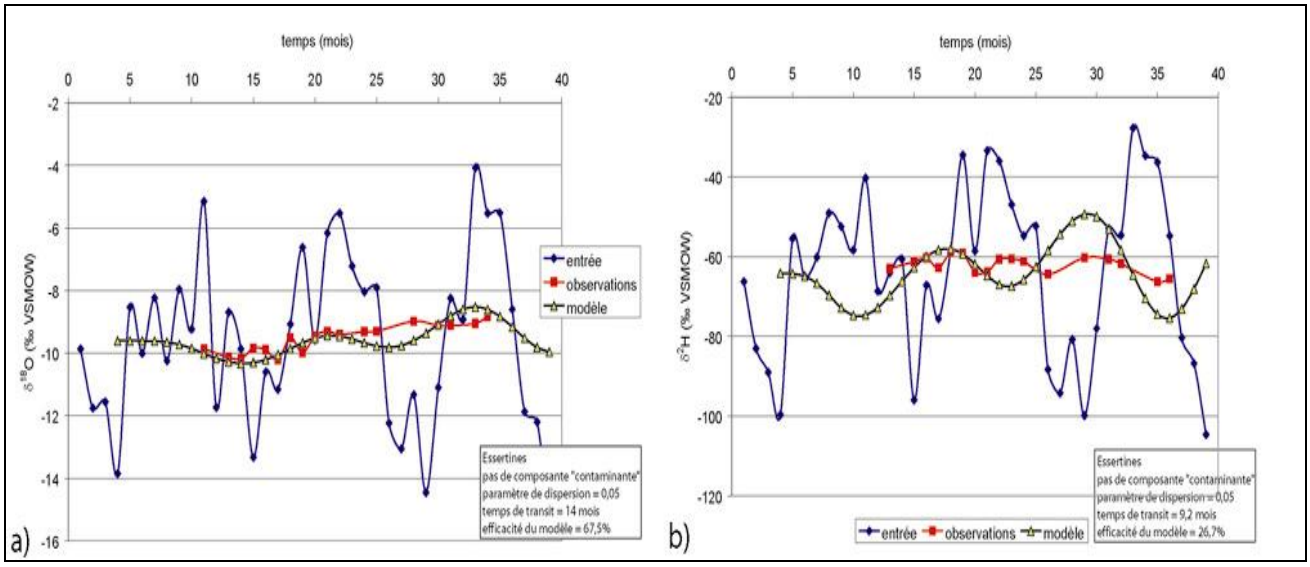


Fig. 53 : modèle de dispersion pour le lavoir d'Essertines (oxygène et hydrogène) ; a) graphe avec entrée pluies prises à 1100m d'altitude ; b) modèle basé sur les rapports δ^2H (voir texte pour explications).

III.7.3.4 Lavoir de Barbanche

Comme ce lavoir est situé plus en altitude que les précédents, une altitude de 1200m, compatible avec la topographie locale, est prise comme référence pour l'impluvium.

Les résultats principaux sont représentés dans la figure 54. L'utilisation des pluies brutes recalculées du gradient d'altitude (Fig. 54a) donne un temps moyen proche de 13,4 mois, l'efficacité étant faible (7,9%). Une légère amélioration est apportée avec les pluies retraitées de l'ETP (10,9%). En hydrogène (Fig. 54b), le temps de transit moyen ressort toujours avec quelques mois de moins qu'en utilisant l'oxygène, soit 10 mois (18,5% d'efficacité).

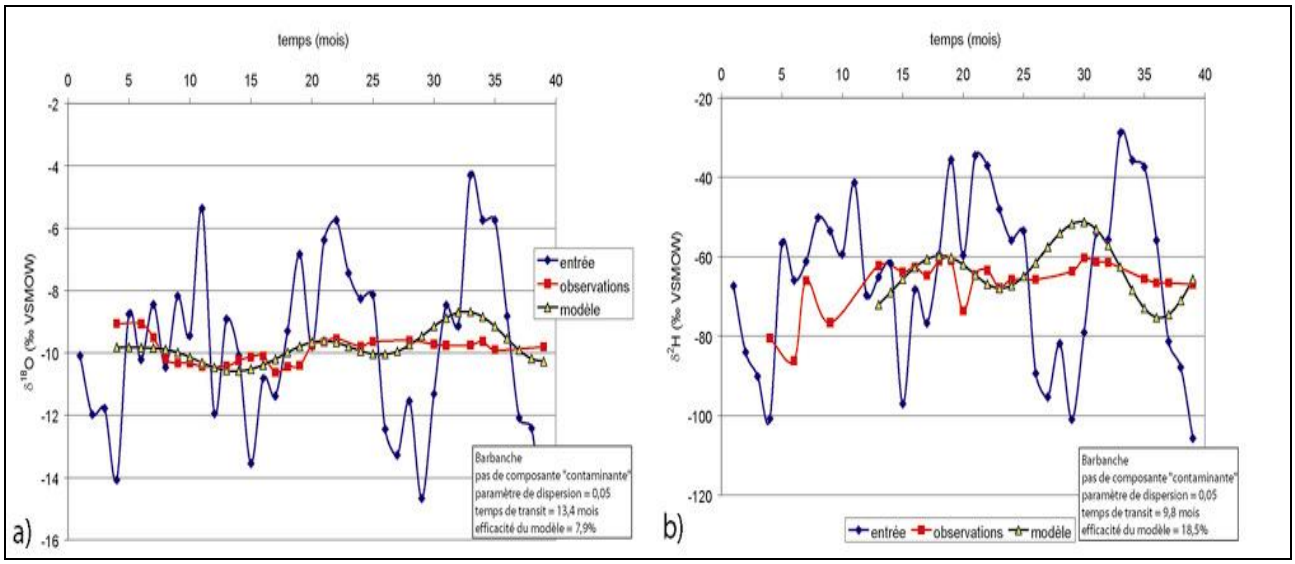


Fig. 54 : modèle de dispersion pour le lavoir de Barbanche (oxygène et hydrogène) ; a) graphe avec entrée pluies prises à 1200m d'altitude ; b) modèle basé sur les rapports δ^2H (voir texte pour explications).

III.7.3.5 Lavoir du Bessat

Ici, l'aire de recharge est recalculée à 1300m d'altitude, par correction des rapports isotopiques des pluies. On obtient un modèle donnant un temps de transit de 13,5 mois (efficacité 14,7% ; Fig. 55 a). L'application avec les précipitations retraitées de l'effet de l'ETP donne un temps de transit légèrement supérieur (14,5 mois) avec une efficacité doublée. Comme dans les précédents cas, l'utilisation de l'hydrogène (Fig. 55b) fournit un temps de transit inférieur (9 mois à 11,7% d'efficacité).

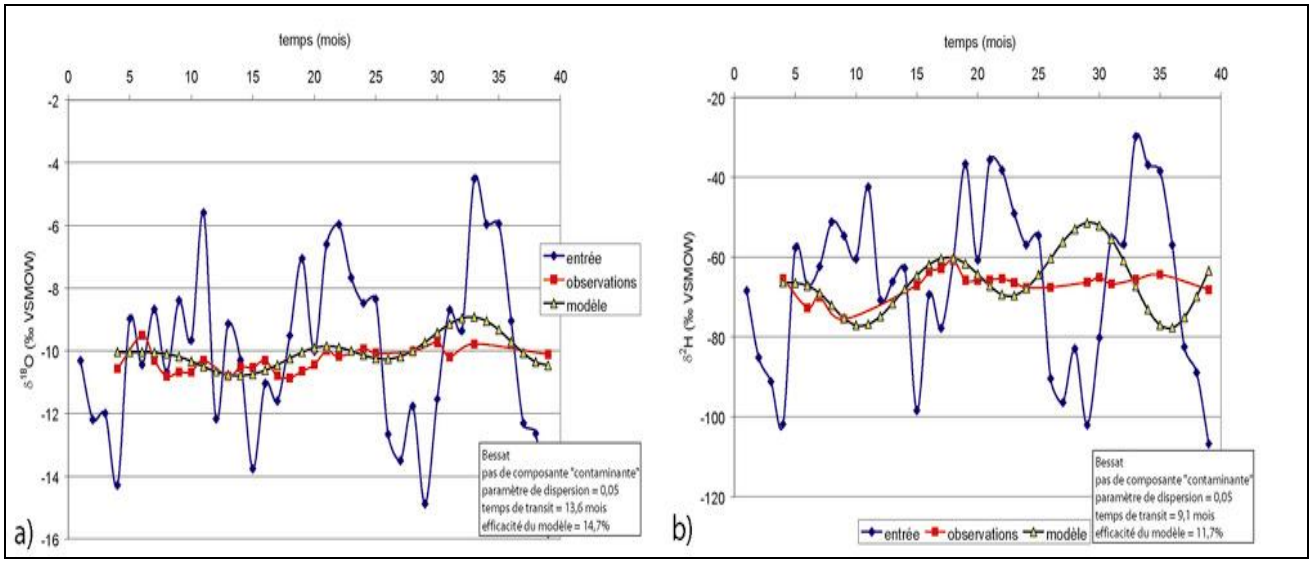


Fig. 55 : modèle de dispersion pour le lavoir de Bessat (oxygène et hydrogène) ; a) graphe avec entrée pluies prises à 1300m d'altitude ; b) modèle basé sur les rapports δ^2H (voir texte pour explications).

III.7.3.6 Lavoir de Tarentaise

Contrairement à ce que l'altitude du lavoir laisse présager (1086m), les meilleures corrélations sont obtenues avec une aire de recharge d'altitude moyenne 1200m et non 1300m. Cela est sans doute un effet de la topographie douce au dessus de 1000m dans le massif du Pilat. Le premier cas traité (mêmes conditions que pour les 5 précédents lavoirs) donne un temps de transit moyen plus long, proche de 15 mois (Fig. 56). Ceci paraît concevable puisque Tarentaise est la source possédant le plus fort TDS. Tous les essais avec la précipitations corrigées de l'ETP se sont révélés non productifs dans le cas de Tarentaise, de même que l'utilisation des rapports en hydrogène. Sans doute le fait que la chronique d'enregistrement sur Tarentaise soit plus courte d'une année n'est pas étranger à ce constat.

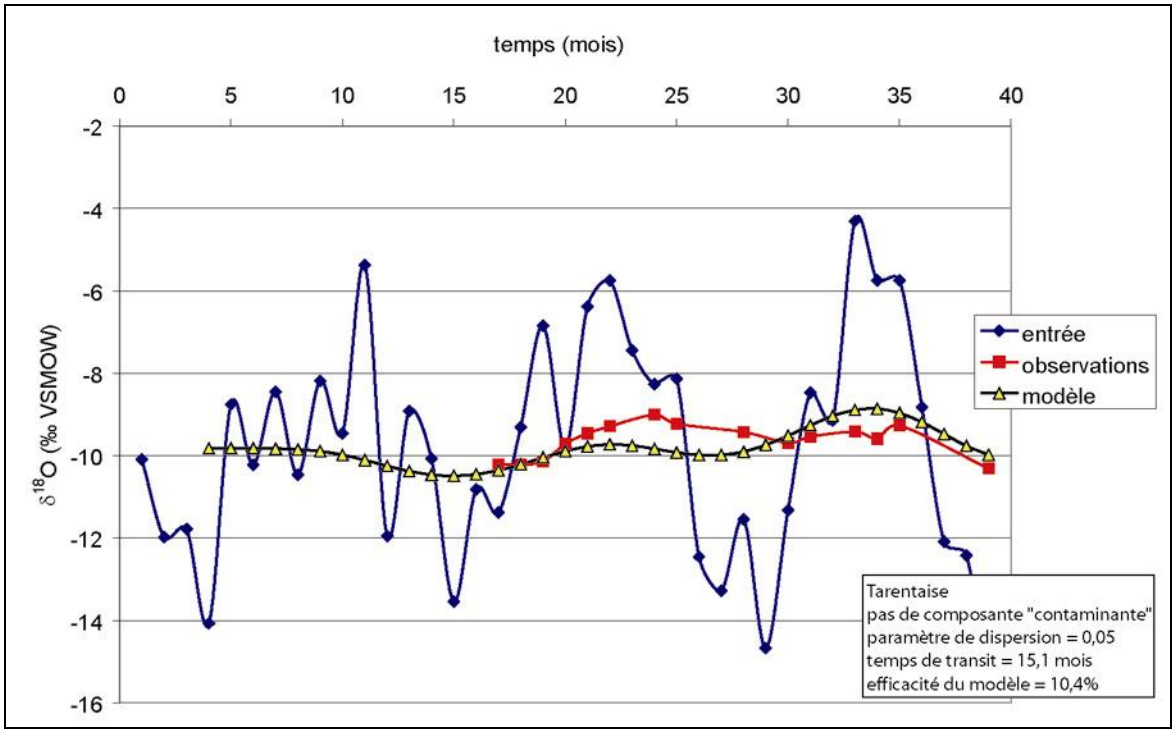


Fig. 56 : modèle de dispersion pour le lavoir de Tarentaise (oxygène).

III.7.3.7 Essais de percolation de lavoirs dans d'autres

Les tests précédents sont basés sur des pluies qui s'infiltrent, dont la signature isotopique est plus ou moins modifiée lors du trajet souterrain, et qui ressortent par un mécanisme de type dispersif. Le but de cette modélisation est d'estimer une composante d'eau "résidente", en

prenant comme eau originelle celle d'un lavoir d'altitude et comme résultante une eau plus chargée en éléments dissous, provenant d'un lavoir situé plus bas en altitude.
Cette approche permet d'appréhender la composante d'eau de l'aquifère qui restant en contact avec la roche, dont le relargage supposé constant permet à certains lavoirs d'acquérir une minéralisation plus importante pour des temps de transit à peine plus longs que ceux des lavoirs moins minéralisés. Cette composante résidente atténue les variations isotopiques des pluies, en lissant le signal.

On considèrera les cas suivants : Bessat "donnant" Tarentaise et Essertines dauphin "engendrant" Essertines. On a précédemment montré que les lavoirs d'Essertines avaient une zone d'approvisionnement d'altitude moyenne semblable (vers 1100m), alors qu'un écart d'une centaine de mètre semble exister entre Tarentaise et Bessat. Pour Tarentaise, les valeurs de Bessat ont été recalculées 100 mètres plus bas. Une différence de temps de transit d'environ 2 mois est utilisée dans ce modèle (Tab. 17).
La quantification de la composante à long temps de transit dans les comparaisons Bessat – Tarentaise n'est possible. Le cas des lavoirs d'Essertines est plus intéressant. Certes, on a pris Essertines dauphin donnant Essertines, mais pour tenir compte de l'enregistrement plus long sur le premier lavoir, la différence de TDS n'apparaissant pas rédhibitoire (20 mg/l). Pour un écart temporel plus proche de 3 mois que de 2, on obtient les efficacités suivantes, fonction des proportions de contaminant utilisées :

- 0% de contaminant : 76%
- 40% à –10‰ : 28%
- 20% à –10‰ : 68%
- 20% à –11‰ : 49%
- 20% à –12‰ : 29%

Les signatures isotopiques du contaminant présentées ci-dessus ont été déduites de plusieurs tests successifs, durant lesquels on a fait varier la signature de –8‰ à –12‰ $\delta^{18}O$ VSMOW (rapports isotopiques d'eaux potentiellement infiltrées en saison froide). Les meilleures corrélations sont obtenues pour des signatures plus négatives ou égales à –10‰. Il est donc possible de faire apparaître une certaine proportion d'eau de composition isotopique stable, à temps de résidence important (plus de 3 ans). D'autre part, la signature est plus négative, ce qui suggère toujours une recharge principale de ce contaminant en hiver.

III.8 DISCUSSION SUR LES DONNEES ISOTOPIQUES

Le tableau 17 présente un résumé des différents temps de percolation déduits des modèles précédents. On remarque en première approche une grande homogénéité dans les valeurs calculées, qui s'étendent pour les isotopes de l'oxygène de 11 mois pour le lavoir le moins minéralisé à 15 mois pour le plus minéralisé. Ce classement est respecté avec l'introduction des précipitations minorées des quantités potentiellement transpirées par évaporation. Les efficacités des modèles ne sont correctes que pour les lavoirs d'Essertines, mais la comparaison avec les autres sources permet d'être relativement confiant dans ces estimations.

		temps de transit					
		$\delta^{18}O$				$\delta^{2}H$	
lavoir	aire de recharge moyenne	pluies avec grad alti	efficacité	pluies - ETP + grad	efficacité	pluies avec grad alti	efficacité
Rochetaillée	1100m	11	11,4%	10	13,6%	8	8,6%
Essertines dauphin	1100m	12,6	49,6%	12	51,6%	10	32%
Essertines	1100m	14	67,5%	13,9	71,6%	9,2	26,7%
Barbanche	1200m	13,4	7,9%	13,3	10,9%	9,8	18,5%
Bessat	1300m	13,6	14,7%	14,6	29,8%	9,1	11,7%
Tarentaise	1200m	15,1	10,4%	-	-	-	-

tous les résultats s'entendent sans composante contaminante et avec un paramètre de dispersion de 0,05

Tab. 17 : récapitulatif des différents temps moyens de transit (en mois) calculés pour les sources alimentant le bassin versant supérieur du Furan.

Le deuxième fait marquant est l'écart de quelques mois qui existe entre modèles basés sur l'oxygène et modèles basés sur l'hydrogène, les seconds donnant des temps de résidence plus brefs. Deux explications peuvent être envisagées, selon que l'on considère les rapports isotopiques en hydrogène comme les plus représentatifs du système ou au contraire les rapports de l'oxygène :

- dans le premier cas, l'écart de temps de percolation pourrait être relié aux interactions et échanges isotopiques entre CO_2 du sol et eau qui percole, qui a une influence sur les rapports en oxygène mais pas sur les rapports en hydrogène. En effet, les échanges isotopiques entre eau et CO_2 du sol sont connus pour avoir de forts effets, même s'ils sont plus faibles que dans le cas d'échanges avec du CO_2 dissous dans un fluide (Stern, 1999) et même si la signature isotopique de l'eau présente dans le sol domine toujours celle du gaz du sol. De plus, les taux d'échanges isotopiques sont aussi fonction de la température.
- dans le second cas, on peut se baser sur l'effet produit par l'évapotranspiration sur les rapports isotopiques en hydrogène. En effet, à 25°C, les fractionnements liquide / vapeur sont de –9,29‰ et –73,5‰ respectivement en oxygène et hydrogène (Majoube,

1971). Dès lors, les effets d'une évaporation seront beaucoup plus sensibles sur l'hydrogène que sur l'oxygène. Le signal mesuré en sortie de l'aquifère sera alors plus modifié en hydrogène qu'en oxygène, modifiant donc les temps de transit que l'on peut calculer. Cela conduit donc à un encadrement de 3 à 4 mois dans les temps de percolation que l'on peut donner (Tab. 17).

Enfin, on peut aussi avancer une autre hypothèse pour expliquer les disparités dans les efficacités des modèles calculés. Il faut peut-être y voir l'influence de l'eau pré-existante du sol ou de l'aquifère, et dont il est difficile de tenir compte même en ayant recours à l'introduction d'une telle proportion d'eau lors des calculs. La modification des rapports isotopiques en oxygène par effet de la température lors des échanges eau – roche n'est absolument pas une hypothèse satisfaisante, les températures atteintes étant très faibles (proches des températures de surface) et les durées de contact trop brèves.

IV. EAUX MINERALES DU FOREZ

Cette quatrième partie utilise les mêmes méthodes chimiques et géochimiques que le chapitre consacré aux eaux de surface. L'objectif est de cerner les points communs et les différences de composition chimique et isotopique (isotopes stables O, H, C et radiogéniques ^{3}H, ^{14}C) de 7 sources minérales réparties autour ou au sein du graben tertiaire du Forez. En se référant aux données préalablement acquises sur les aquifères de surface, les questions de l'origine des eaux, de l'existence de mélanges, de temps de transit souterrain, seront abordées.

IV.1 LOCALISATION GEOGRAPHIQUE

IV.1.1 Définitions

Au sens hydrologique, une eau minérale est une "*eau d'origine souterraine se distinguant par une composition physico-chimique et souvent par sa température*" (Pomerol et Ricour, 1992). Légalement, elle est soumise à l'agrément du Ministère de la santé et de l'Académie de Médecine, qui la définissent comme une "*eau souterraine naturellement pure, de composition physico-chimique constante, contenant des éléments, sels, gaz et boues, susceptibles d'agir efficacement sur la santé*". Ceci a amené à la définition des ressources en eau minérale sous la forme d'un gisement, qui regroupe la ressource fluide et toutes les structures géologiques entre zone d'alimentation et zone d'émergence (Lopoukhine, 1994).

Une eau thermale n'a pas de définition officielle, mais l'étymologie lui attribue une "*température supérieure à celle des eaux phréatiques de la région*" (Pomerol et Ricour, 1992). Pour certains, c'est une eau utilisée dans un établissement thermal. Pour d'autres, c'est une eau de température supérieure de 6°C à la température moyenne annuelle (Mazor, 1991), voire une eau supérieure à 35°C.

On a donc fait le choix d'attribuer le terme minéral aux eaux reconnues comme telles depuis longtemps, parfois depuis les Romains, et de distinguer deux sources à caractère thermal, Montrond-les-Bains (mélange de plusieurs aquifères) et Salt-en-Donzy dont les températures sont supérieures à 23°C et se classent dans la gamme des eaux tièdes. Les cinq autres sources étudiées sont froides ou hypothermales (T<20°C).

Les caractères physico-chimiques sont représentatifs de types d'eaux minérales, et il est couramment admis de les détailler comme suit :

- la teneur en éléments dissous (carte d'identité de la source), souvent supérieure à la limite de 1,5 g/l admise pour les eaux de distribution publique. Ces éléments se scindent en majeurs, mineurs, traces et gaz.
- les éléments majeurs qui regroupent bicarbonates, sulfates, chlorures, silicium, cations alcalins type sodium et potassium et cations alcalino-terreux calcium et magnésium ;
- les éléments mineurs dont la concentration avoisine le mg/l : anions de type bromures, iodures, fluorures. Cations alcalins type lithium et alcalino-terreux : strontium, baryum, béryllium ;
- les éléments traces : oligo-éléments très peu concentrés (µg/l), recherchés pour leurs effets thérapeutiques dans les eaux : fer, manganèse, cuivre, vanadium, arsenic, molybdène, sélénium. Rentrent aussi dans cette catégorie les éléments radioactifs ;
- les gaz : le CO_2 est le plus fréquent. Il est maintenu en sursaturation sous l'effet de la pression en profondeur, surtout dans les eaux riches en bicarbonates (maintien en solution de Ca). Azote, hélium, radon peuvent aussi être présents, souvent en quantités moindres.

IV.1.2 Provinces minérales en France

La localisation des ressources en eau minérale de la France est fortement dépendante de l'environnement géologique (Fig. 57). Les grands bassins secondaires sont pratiquement exempts de sources minérales, au contraire des massifs montagneux. Les eaux des massifs se distinguent selon leur caractéristiques chimiques, et on peut retenir la subdivision suivante :

- les massifs récents (Alpes, Pyrénées) présentent une majorité d'eaux de type sulfaté ou sulfuré ;
- les massifs hercyniens ayant subit les contrecoups des orogenèses tertiaires (Massif Central, Vosges) recèlent une majorité d'eaux à faciès bicarbonaté, souvent carbogazeuses.

Fig. 57 : localisation des principales venues d'eau minérales en France, d'après Faculté de Médecine, Clermont-Ferrand, modifié.

IV.1.2 Sources minérales de la Loire

Les sources minérales de la Loire appartiennent au bassin hydrominéral du Forez, qui fait partie de la grande famille des eaux à caractère endogène dominant (Boineau et Maisonneuve, 1971). Le Forez appartient en grande majorité à la province bicarbonatée sodique, la plus représentée dans le Massif Central. La fracturation du bassin et de son encaissant (directions structurales NW-SE), qui a permis l'apparition de venues volcaniques (chapitre I), a aussi favorisé l'émergence d'eaux minérales.

Connues pour certaines des Romains (Moingt l'antique Aquae Segetae), ces sources furent redécouvertes à partir des XVIIème et XVIIIème siècles, lors d'un inventaire dressé en 1778 par Marin de Laprade, qui remarqua que "*la province du Forez est fertile en eaux minérales*". En 1974, l'abbé Canard se livre à un recensement des ressources hydrominérales du département de la Loire ; il identifie 34 sources minérales distinctes, dont seules St-Alban, St-Galmier, Sail-les-Bains, St-Romain-le-Puy et Montrond sont encore exploitées.

Parmi cet ensemble de sources, sept ont été échantillonnées entre 2001 et fin 2003 (Fig. 58). Certaines sont encore en exploitation (Montrond [MTD], St-Alban [SA] et St-Galmier [SG]), ce qui a notamment pour inconvénient d'aboutir à un échantillonnage d'eaux pouvant résulter du mélange de plusieurs forages ou horizons (MTD, SG). D'autres ont fait l'objet dans le passé d'une exploitation (Sail-sous-Couzan [S/C], Moingt [MGT]), voire n'ont jamais été exploitées (Chorsin [CH], Salt-en-Donzy [SD]). D'autres sources, comme Say, gazeuse et ferrugineuse (résurgence de Chorsin ?), ou Verrières-en-Forez, riche en acide carbonique, ont maintenant disparues ou sont devenues marécages. Leur suivi n'a donc pas été possible.

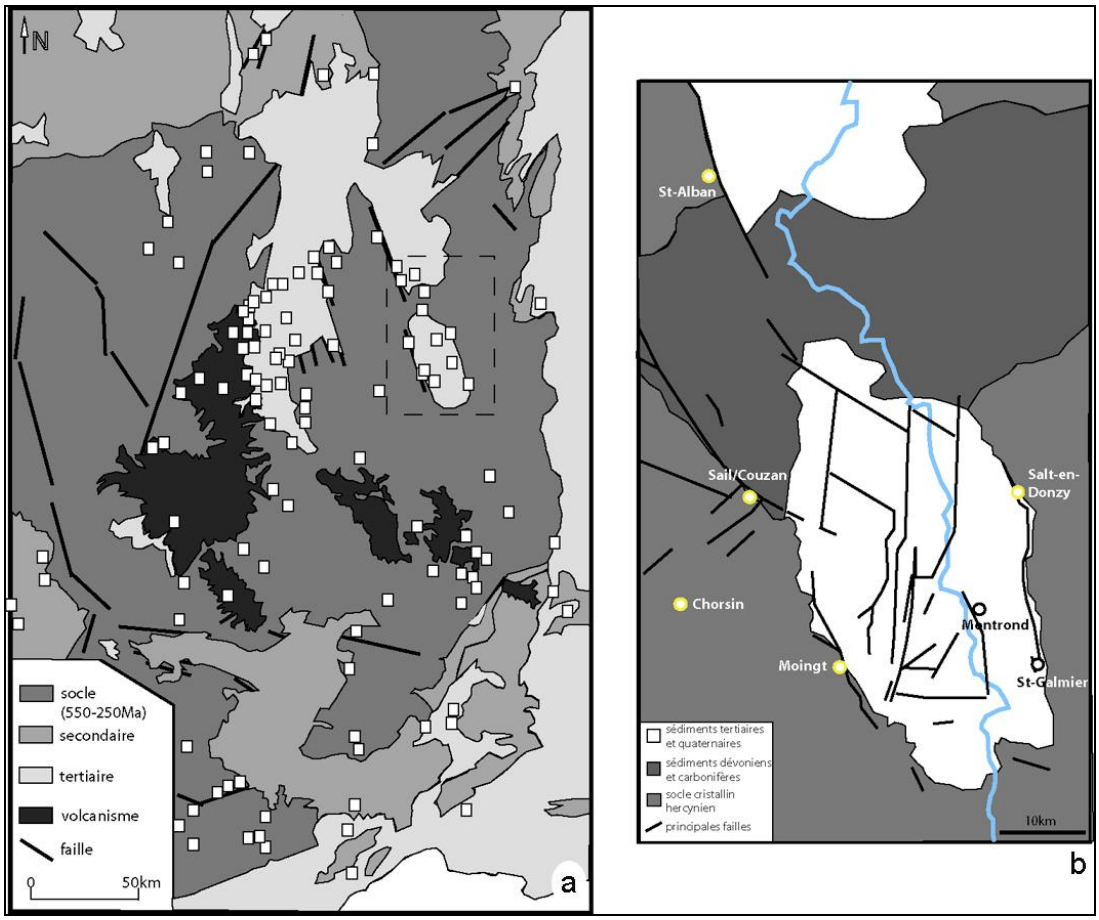


Fig. 58 : a) principales sources minérales du Massif Central Français ; b) sources minérales échantillonnées du département de la Loire ; les principales failles reconnues sont également indiquées.

IV.2 COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX MINERALES

IV.2.1 Paramètres physiques et faciès chimiques

Quelques caractéristiques des ressources étudiées ou de sources voisines sont données dans le tableau suivant (Tab. 18). Les données de la littérature sont peu nombreuses et souvent limitées à de succinctes ou anciennes analyses, sauf peut-être pour les sources Badoit à St-Galmier (voir par exemple à ce sujet la synthèse du BRGM liée au projet COPGEN, notamment Genter et al., 2003 ; Serra et al., 2003). Outre la nécessité d'une connaissance plus détaillée des eaux profondes du bassin du Forez, cette étude vise donc aussi à compléter le jeu de données sur la province carbogazeuse de l'Est du Massif Central.

lieu	émergences	captage	faciès	température	résidu sec	débit
Sail-les-Bains	7	10 à 61,5m	Na-HCO_3 à Na-Cl	19,2 à 32°C	336 à 382 mg/l	2,2 à 800 l/min
St-Alban-les-Eaux	4	7,5m	Na-HCO_3 + CO_2	17,3 à 17,6°C	1576 à 1816 mg/l	6,5 à 13 l/min
Sail-sous-Couzan	14		Na-HCO_3 + CO_2	12,1 à 13°C	1695 à 1952 mg/l	43 à 90 l/min
Montrond-les-Bains	6	560m (Geyser)	Na-HCO_3 + CO_2	12 à 47°C (483m)		110 à 250 l/min
Montbrison / Moingt	3	5m (Fonforte à Moingt)	Na-HCO_3 + CO_2	13°C		< 0,3 l/min
St-Galmier	15	40 à 150m	Ca-Mg±Na-HCO_3 + CO_2	12 à 16°C	1350 mg/l	500 l/min
St-Romain-le-Puy	2	21,9 à 80m	Na-HCO_3 + CO_2	13,5 à 13,8°C	3330 à 3442 mg/l	50 à 91 l/min
Renaison	1		Na-HCO_3 + CO_2	10°C		4 l/min
Salt-en-Donzy	1	surface	basique sans CO_2	27°C		700 l/min

sources : Bellon (1980), Canard (1974), Clavaud et Ratsimba (1972), Kocher, Merley (1994), Pomerol et Ricour (1992), Surmely (2005)

Tab. 18 : comparaison d'analyses d'eaux de la Loire (données en mg/l)

IV.2.1.1 Température

Les paramètres physico-chimiques et les compositions isotopiques des eaux sont reportés en annexe (Tab. A.5). La version synthétique (Tab. 19) n'utilise que les données à balance ionique correcte.

La plupart des sources échantillonnées sont des eaux froides, de températures moyennes 9,7 ± 4°C (CH) à 19,7 ± 3,6°C (SA). Deux sources à caractère thermal ont des températures supérieures : 23,6 ± 2,2°C (MTD) et 28 ± 4,3°C (SD). Certaines sources connaissent des variations saisonnières de température (Fig. 59). Celles de la source de Chorsin sont similaires avec celles de l'air. Cet effet est soit lié à des interactions avec le ruisseau dans lequel est situé le griffon, soit au faible débit de la source (rééquilibrage rapide avec l'atmosphère). En revanche, les ressources plus protégées (forage Brault 3 à S/C) ou plus chaudes (SD) ont des variations moindres (Fig. 59), soit en relation directe avec une meilleure protection (S/C : bâtiment), soit avec un débit plus important (SD : 700l/min en 1935 ; Tab. 18).

Chorsin

	date	pH	eh	T	cond	18O	2H	3H	14C	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	Br	NO3	P04	SO4	HCO3	CO3	balance	TDS
Moy.		5.46	54.62	9.77	635.5	-9.6	-67.9	5	4.78	.39	.55	12.64	•	.80	.15	.14	11.35	32.59	22.48	5.2	74.36	.30	•	.31	4.87	•	1.09	•	7.76	416.39	•	1.70	587
Dév. Std		.36	12.76	4.04	71.91	.32	2.75	•	•	.42	.16	10.14	•	.62	.08	•	1.01	2.96	2.52	1.9	8.12	.02	•	.04	6.47	•	.46	•	1.70	52.37	•	3.30	68
Erreur Std		.08	3.01	0.95	25.42	.07	.65	•	•	.30	.06	4.14	•	.44	.06	•	.36	1.05	.89	.68	2.87	.01	•	.01	2.29	•	.17	•	.60	18.52	•	1.17	
Nombre	18	18	18	18	8	18	18	2	1	2	8	6	0	2	2	1	8	8	8	8	8	7	0	8	8	0	7	0	8	8	0	8	8
Minimum	26/10/2001	4.8	31.4	4.40	489	-10.1	-74.8	5	•	.09	.33	1.29	•	.37	.09	.14	10.04	26.55	17.75	2.8	59.12	.28	•	.25	1.55	•	.39	•	6.42	304	•	-3.57	440
Maximum	06/11/2003	6.3	76.6	15.9	746	-9.1	-61.9	5	•	.69	.76	26.26	•	1.2	.21	.14	13.06	35.92	25.28	7.1	82.69	.33	•	.36	20.57	•	1.47	•	11.86	476	•	5.12	668

Moingt

	date	pH	eh	T	cond	18O	2H	3H	14C	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	Br	NO3	P04	SO4	HCO3	CO3	balance	TDS
Moy.		6.40	0.03	15.16	4387.14	-9.57	-65.45	2.40	3.88	.88	.22	1.48	•	.38	1.68	4.85	944.05	70.02	21.77	90.86	99.47	2.75	•	1.32	103.07	.37	1.98	•	17.44	3182.14	2.96	3.01	4603
Dév. Std		.15	12.09	1.50	297.31	.41	3.45	•	•	•	.03	1.95	•	.04	.14	.49	103.92	5.32	1.53	5.87	9.17	.12	•	.12	10.75	.05	.69	•	5.59	308.38	4.10	4.40	339
Erreur Std		.04	3.12	.39	112.37	.10	.86	•	•	•	.02	.97	•	.03	.05	.18	39.28	2.01	.58	2.22	3.47	.05	•	.04	4.06	.02	.26	•	2.11	116.56	1.55	1.66	
Nombre	16	16	15	15	7	16	16	1	1	1	3	4	0	2	7	7	7	7	7	7	7	7	0	7	7	7	7	0	7	7	7	7	7
Minimum	20/09/2001	6.06	-20.20	12.90	3760.00	-10.15	-72.73	2.40	•	.88	.19	.24	•	.35	1.49	4.05	793.54	61.13	19.86	81.71	89.36	2.53	•	1.10	79.68	.28	1.44	•	9.39	2750.00	.80	-1.90	4189
Maximum	06/11/2003	6.60	26.00	17.50	4690.00	-8.44	-60.09	2.40	•	.88	.25	4.38	•	.41	1.84	5.34	1109.84	75.69	23.88	100.42	114.16	2.90	•	1.46	111.21	.44	3.44	•	25.67	3650.00	12.20	8.42	5083

Montrond

	date	pH	eh	T	cond	18O	2H	3H	14C	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	Br	NO3	P04	SO4	HCO3	CO3	balance	TDS
Moy.		6.58	-15.58	23.63	2977.78	-9.97	-73.57	1.10	8.33	.25	•	.30	•	.30	.93	3.50	742.44	9.28	14.81	7.81	19.07	.55	•	1.19	24.55	•	.34	.27	7.47	2146.67	1.49	1.55	3114
Dév. Std		.28	7.19	2.27	92.30	.22	3.87	•	•	•	•	.18	•	.17	.14	.17	161.67	.74	.59	1.56	1.17	.02	•	.19	.60	•	.23	.14	.35	304.51	1.05	7.41	335
Erreur Std		.08	2.00	.61	30.77	.06	0.97	•	•	•	•	.10	•	.10	.05	.06	53.89	.25	.20	.52	.39	.01	•	.06	.20	•	.09	.06	.12	101.50	.35	2.47	
Nombre	16	13	13	13	9	16	16	1	1	1	0	3	0	3	9	9	9	9	9	9	9	9	0	9	9	0	7	6	9	9	9	9	9
Minimum	01/07/2001	6.21	-28.20	17.70	2800.00	-10.28	-80.40	1.10	•	.25	•	.15	•	.17	.79	3.21	363.88	8.25	13.87	5.52	17.33	.53	•	1.09	23.30	•	.10	.12	6.96	1690.00	.60	-15.80	1749
Maximum	06/11/2003	6.97	-5.70	26.30	3100.00	-9.45	-68.24	1.10	•	.25	•	.50	•	.49	1.20	3.73	865.21	10.39	16.02	9.98	21.36	.59	•	1.70	25.16	•	.78	.49	7.99	2490.00	3.10	10.75	3387

Sail-sous-Couzan

	date	pH	eh	T	cond	18O	2H	3H	14C	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	Br	NO3	P04	SO4	HCO3	CO3	balance	TDS
Moy.		6.17	15.59	14.92	3.2E3	-9.67	-65.13	3.10	4.51	.20	•	2.12	•	.14	.19	4.03	607.38	63.27	17.81	137.01	77.80	1.68	•	2.91	63.59	.33	1.58	1.52	43.59	2.2E3	2.15	4.60	3287
Dév. Std		.15	14.09	.94	90.69	.26	2.57	•	•	.11	•	.40	•	•	.06	.14	35.26	3.79	1.33	8.20	23.86	.25	•	.08	2.02	.22	1.11	1.45	1.35	171.42	4.71	2.65	204
Erreur Std		.04	3.91	.26	34.28	.07	.71	•	•	.06	•	.18	•	•	.03	.05	12.47	1.34	.47	2.90	8.43	.09	•	.03	.71	.09	.39	.84	.48	60.61	1.67	.94	
Nombre	14	13	13	13	7	14	13	1	1	3	0	5	0	1	4	8	8	8	8	8	8	8	0	8	8	6	8	3	8	8	8	8	8
Minimum	26/10/2001	5.98	-1.30	12.60	3120	-10.11	-69.71	3.10	4.51	.11	•	1.64	•	.14	.13	3.77	553.17	58.80	15.97	128.31	19.99	1.10	•	2.74	61.53	.15	.19	.42	41.54	2060	.30	.56	2996
Maximum	15/03/2004	6.40	49.10	16.60	3400	-9.30	-61.92	3.10	4.51	.32	•	2.67	•	.14	.27	4.27	660.37	69.68	20.46	154.10	94.36	1.88	•	2.98	67.69	.75	3.61	3.16	45.59	2560	13.80	8.15	3639

Salt-en-Donzy

	date	pH	eh	T	cond	18O	2H	3H	14C	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	Br	NO3	P04	SO4	HCO3	CO3	balance	TDS
Moy.		7.72	-89.21	28.02	1153.89	-8.90	-64.55	1.30	•	•	•	.22	•	.23	.21	.74	228.83	.61	9.59	7.17	9.34	.20	•	9.15	106.11	.47	1.36	•	25.49	457.78	2.68	-.93	401.63
Dév. Std		.30	12.91	4.32	19.70	.22	1.37	•	•	•	•	•	•	.14	.06	.04	8.17	.23	1.85	1.87	4.63	.01	•	.16	1.55	.13	1.25	•	.91	39.54	.97	2.74	13.37
Erreur Std		.10	4.30	1.44	6.57	.07	.46	•	•	•	•	•	•	.10	.03	.01	2.72	.08	.62	.62	1.54	2.27E-3	•	.05	.52	.05	.42	•	.30	13.18	.32	.91	4.46
Nombre	9	9	9	9	9	9	9	1	0	0	0	1	0	2	6	9	9	9	9	9	9	8	0	9	9	7	9	0	9	9	9	9	9
Minimum	26/03/2002	7.35	-110.00	16.70	1110.00	-9.39	-66.09	1.30	•	•	•	.22	•	.13	.13	.70	218.93	.22	5.89	4.78	5.54	.19	•	8.94	104.43	.32	.28	•	24.03	405.00	.70	-4.48	386.52
Maximum	06/11/2003	8.29	-74.30	30.30	1180.00	-8.59	-61.51	1.30	•	•	•	.22	•	.33	.31	.83	241.11	.88	11.50	10.36	18.62	.21	•	9.40	109.07	.69	4.45	•	27.08	505.00	3.80	3.74	425.81

Tab. 19 : compositions en mg/l extrêmes des eaux minérales du Forez ; les températures sont en °C, les conductivités en µS/cm, les débits en l/s, les rapports isotopiques ^{18}O et ^{2}H en ‰ VSMOW, ^{13}C en ‰ VPDB.

St-Alban

	date	pH	eh	T	cond	18O	2H	3H	14C	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	Br	NO3	P04	SO4	HCO3	CO3	balance	TDS
Moy.		5.94	16.21	19.77	1906.14	-8.78	-63.05	2.00	6.93	.51	.94	1.92	•	.45	1.63	1.93	233.94	54.35	20.34	32.63	189.49	1.70	•	2.16	19.68	.19	.28	.28	8.15	1485.71	•	3.58	2062
Dév. Std		.20	12.07	3.57	165.06	.14	4.17	•	•	•	.10	1.48	•	.02	.23	.15	16.78	2.23	1.37	1.86	6.74	.05	•	.14	.13	.31	.18	.35	.54	130.88	•	2.59	145
Erreur Std		.06	3.48	1.08	62.39	.04	1.16	•	•	•	.04	.66	•	.02	.09	.06	6.34	.84	.52	.70	2.55	.02	•	.05	.05	.12	.07	.17	.21	49.47	•	.98	
Nombre	13	11	11	11	7	13	13	1	1	1	7	5	0	2	7	7	7	7	7	7	7	7	0	7	7	7	7	4	7	7	0	7	7
Minimum	29/03/2002	5.70	-12.50	14.20	1640.00	-8.96	-72.76	2.00	6.93	.51	.81	.31	•	.44	1.39	1.73	211.85	50.36	18.11	30.62	177.25	1.66	•	1.86	19.54	.05	.08	.03	7.63	1310.00	•	-1.11	1865
Maximum	06/11/2003	6.39	30.90	27.80	2180.00	-8.46	-56.70	2.00	6.93	.51	1.10	3.22	•	.47	2.00	2.08	254.55	56.96	21.77	35.79	197.85	1.76	•	2.28	19.90	.89	.56	.79	9.20	1660.00	•	5.69	2235

St-Galmier

	date	pH	eh	T	cond	18O	2H	3H	14C	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	Br	NO3	P04	SO4	HCO3	CO3	balance	TDS
Moy.		5.89	25.34	18.71	1812.75	-8.72	-63.80	6.00	•	.51	•	.39	•	•	.02	.90	153.07	86.18	13.37	10.10	165.80	.89	•	1.14	47.21	.09	5.95	•	34.19	1222.80	•	2.03	1751
Dév. Std		.16	9.61	2.43	69.51	.22	5.48	•	•	•	•	.30	•	•	•	.08	14.08	8.45	1.15	3.53	18.89	.40	•	.18	2.78	.02	.38	•	2.53	80.23	•	3.85	91
Erreur Std		.05	3.20	.70	24.58	.05	1.41	•	•	•	•	.17	•	•	•	.03	4.45	2.67	.36	1.12	5.97	.15	•	.06	.88	.01	.12	•	.80	25.37	•	1.22	
Nombre	16	11	9	12	8	16	11	1	0	1	0	3	0	0	1	10	10	10	10	10	10	7	0	10	10	10	10	0	10	10	0	10	10
Minimum	26/10/2001	5.70	12.20	15.80	1710.00	-9.10	-74.70	6.00	•	.51	•	.15	•	•	.02	.70	123.36	68.67	11.32	2.41	137.18	.10	•	.86	43.59	.06	5.24	•	31.38	1094.00	•	-5.16	1545
Maximum	06/11/2003	6.15	42.50	22.50	1890.00	-8.37	-58.25	6.00	•	.51	•	.72	•	•	.02	1.03	179.20	102.70	15.17	13.16	192.72	1.33	•	1.34	53.83	.13	6.54	•	40.35	1330.00	•	8.40	1874

Pressions moyennes de CO_2 à l'équilibre, à l'émergence (en atmosphère) :
Chorsin : 1,52
Moingt : 1,56
Montrond : 1,07
Sail-sous-Couzan : 1,61
Salt-en-Donzy : 0,01
Saint-Alban: 1,81
Saint-Galmier: 1,76

Tab. 19 suite : compositions en mg/l extrêmes des eaux minérales du Forez ; les températures sont en °C, les conductivités en µS/cm, les débits en l/s, les rapports isotopiques ^{18}O et ^{2}H en ‰ VSMOW, ^{13}C en ‰ VPDB. Les pressions de CO_2 sont calculées à l'aide du logiciel Diagrammes (R. Simler, LHA, Avignon)

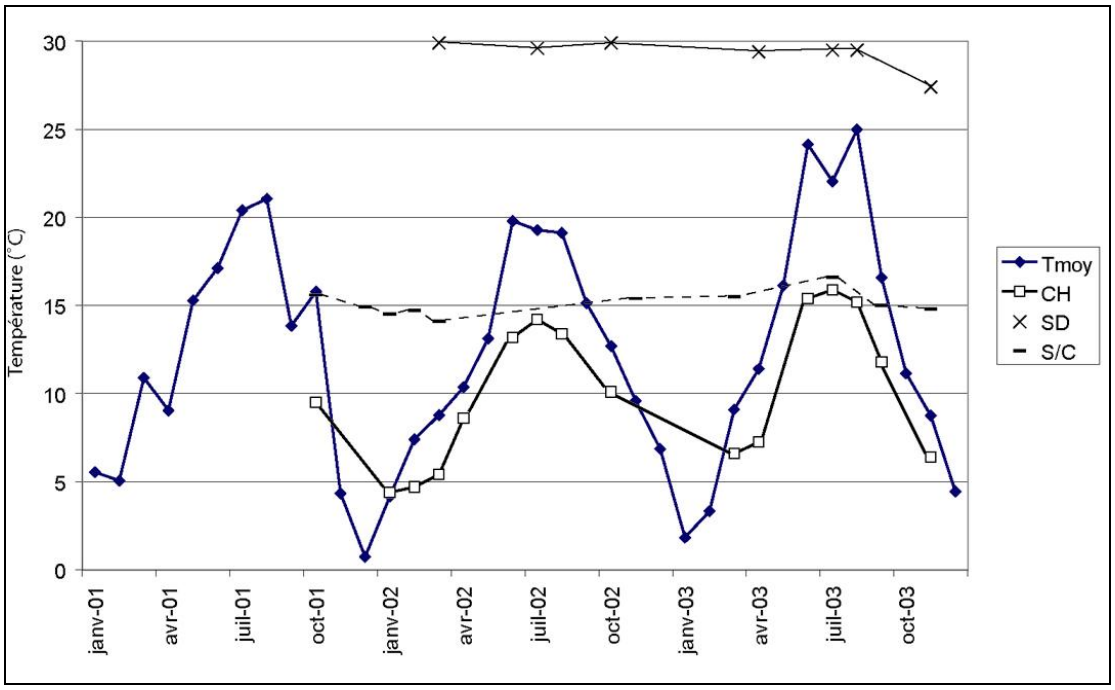


Fig. 59 : variations temporelles des températures de 3 sources minérales (Chorsin, Salt-en-Donzy, Sail-sous-Couzan) en fonction des températures atmosphériques moyennes mensuelles relevées à Andrézieux-Bouthéon.

IV.2.1.2 pH

Le pH des sources minérales se situe dans la même gamme que les eaux de surface. Trois groupes peuvent être distingués :

- sources à pH < 6 : Chorsin (CH) , St-Galmier (SG) et St-Alban (SA) (respectivement 5,4±0,36 ; 5,9±0,16 ; 5,9±0,2) ;
- sources à 6<pH<7 : Moingt (MGT ; 6,4±0,15), Montrond (MTD ; 6,6±0,28) et Sail/Couzan (S/C ; 6,2±0,15) ;
- enfin la source thermale de Salt-en-Donzy (SD) a un pH basique (7,7±0,3). Dans le Massif Central, de telles eaux sont rares, excepté dans le Cézallier (Serra et al., 2003).

On peut remarquer une corrélation entre pH à l'exutoire et contenu en espèces carbonées dissoutes. Les six premières sources citées sont de nature carbogazeuse franche, avec des pressions partielles de CO_2 (en équilibre avec les bicarbonates) entre 1 et 2,2 atmosphères. Ces teneurs en CO_2 sont maximales dans les eaux Ca-Mg froides, plus faibles dans celles du faciès Na-HCO_3. A l'inverse, SD n'exprime pas de CO_2 en surface (p_{CO2} # 0,01 atm). Ainsi la dissolution de CO_2 dans l'eau entraîne une baisse de pH conséquente. Le dépassement du point de bulle et l'expression physique d'un dégagement gazeux se manifestent trop tardivement pour modifier les pH issus des équilibres calco-carboniques en profondeur.

IV.2.1.3 Faciès des eaux échantillonnées

La représentation par diagramme de Piper est à nouveau employée, avec les réserves d'usage (cf II.2.1.4). Trois faciès existent au sein de la Limagne de Montbrison :

- Na-HCO_3 : ce faciès, fréquent dans le Massif Central [Fig. 60 : eaux du Cézallier (contexte géologique : socle et volcanisme), de Royat (socle et limagne de Clermont-Ferrand), de Vichy (contexte sédimentaire)], est représenté par Moingt (MGT), Sail-sous-Couzan (S/C) et Montrond (MTD), ainsi que dans les trois aquifères rencontrés lors d'un nouveau forage entrepris à Montrond en mars 2005 (société HydroInvest). Les deux premières sources jaillissent dans un réservoir fracturé, Montrond au cœur du graben du Forez (HCO_3/Na >3).

- Ca-Mg-HCO_3 ± Na : ce groupe comprend les sources à pH faible précédemment décrites. Elles se situent en réservoir fracturé, soit en altitude Chorsin (CH), soit le long de failles bordières du graben Saint-Alban (SA), Saint-Galmier (SG). L'occurrence d'un tel faciès est nettement moins fréquente dans le Massif Central, seules certaines sources du Mont-Dore (contexte volcanique) et de Châteauneuf-les-Bains s'y rapportant (HCO_3/Na >6).

- Na-HCO_3-Cl : la source thermale de Salt-en-Donzy (SD) appartient à ce groupe, et peu sont décrites dans les eaux du MCF (Serra et al., 2003). Cette source jaillissant par faille sur un escarpement bordier de la limite Est du graben forézien est donc en tout point différente des autres eaux échantillonnées (température, physico-chimie ; Tab. 19) (HCO_3/Na # 2). Certaines eaux du Mont-Dore, de type Na-Cl à Ca-HCO_3, et des eaux de Châtel-Guyon (Ca-Cl ; contexte de socle et limagne de Clermont-Ferrand) sont représentées figure 60 pour comparaison.

Les eaux du Forez apparaissent en proportion fort riches en bicarbonates, sauf Salt (SD), ce qui doit être relié au contenu en CO_2 dissous ou exsolvé en surface.

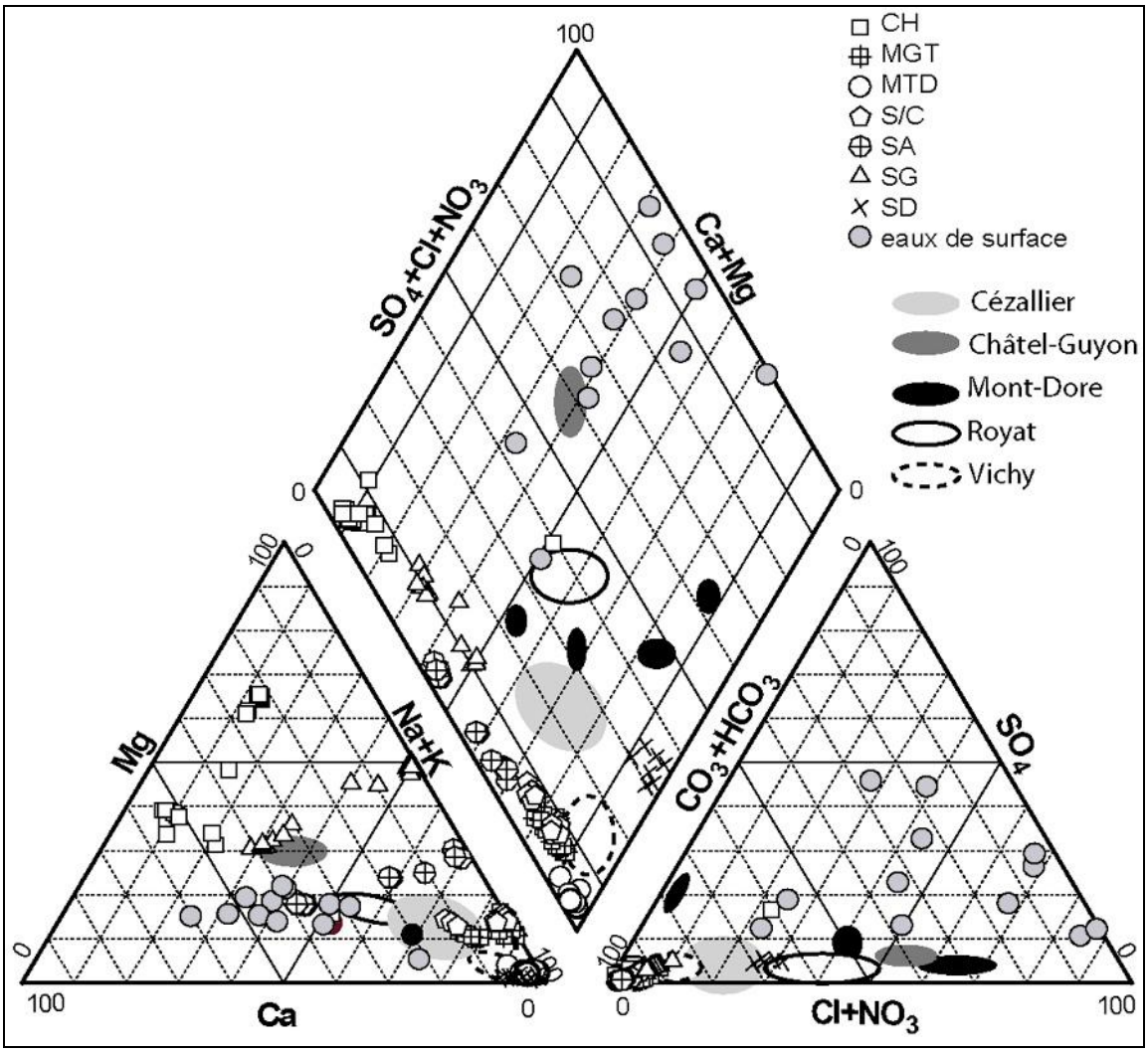


Fig. 60 : diagramme de Piper des eaux minérales du Forez ; pour comparaison sont indiquées les domaines de 5 districts d'eaux minérales du Massif Central (Serra et al., 2003) et différentes eaux de surface (Furan et Forez).

Trois pôles d'eaux minérales à signatures chimiques variées se distinguent donc dans le Forez, sans relation directe avec la position géographique ou la nature géologique de la zone d'émergence. Le faciès Ca-Mg représente un pôle à minéralisation moins forte que le groupe Na-HCO_3 (Tab. 19), peut-être relié à des interactions en profondeur différentes ou à des interactions plus importantes avec des pôles de surface (cf Fig. 60).

IV.2.1.4 Eléments dissous

Contrairement aux eaux de surface (III.2.1.3), les variations dans le temps des teneurs en éléments ne sont pas présentées. Soit parce qu'aucune variation significative corrélée avec des facteurs externes n'est détectée (SG), soit parce que seuls les éléments mineurs sont touchés

(NO_3, Br pour MTD, S/C, SA, MGT). La seule source à connaître des variations de minéralisation dans le temps est la moins protégée (CH), comme déjà signalé en IV.2.2.1.

La teneur en solides dissous (TDS) varie sensiblement selon les faciès considérés (Tab. 19). Le pôle le plus minéralisé (TDS > 3g/l) est représenté par les eaux de type Na-HCO_3 (MGT, MTD et S/C), ce dernier élément participant fortement à la minéralisation totale, bien que ces eaux aient des teneurs en hydrogénocarbonates et CO_2 (gaz) inférieures à celles du faciès Ca-Mg-HCO_3 (Tab. 19). Les eaux du forage Montrond 1 présentent aussi une augmentation graduelle du TDS avec la profondeur (20-30m : 360mg/l ; 45-60m : 650mg/l ; 180-200m : 1660mg/l). Le groupe Ca-Mg-HCO_3 présente des TDS compris entre 590 (CH) et 2000 mg/l (SA, SG). Peut-être faut-il voir l'effet de mélanges entre un pôle profond et des aquifères de surface. En effet, les eaux de SG sont issues de plusieurs captages de profondeurs différentes, celles de CH proviennent d'un griffon proche d'un ruisseau. Enfin, la source de Salt-en-Donzy admet une minéralisation légèrement supérieure à celle de Chorsin, proche de 860 mg/l en moyenne. Ici, la relative faiblesse du TDS est associée à la faible teneur de l'eau en bicarbonates.

Contrairement à la majorité des eaux du Massif Central (Serra et al., 2003), les teneurs en silice mesurées dans les eaux minérales échantillonnées sont inférieures à 25 mg/l, et pour certaines à peine supérieures aux eaux de surface (cf III.1.2.4). Ces concentrations placent les eaux du Forez dans la gamme des eaux de Vichy St-Yorre et de la Margeride. Néanmoins, la présence de lithium dans ces eaux, élément non décelé dans les eaux de surface et caractéristique des phases micacées, indique une interaction notable avec les réservoirs cristallins. Le cas de Chorsin est caractéristique d'un mélange avec des eaux de surface, le lithium n'étant pas détecté à chaque analyse. Les eaux du faciès Na-HCO_3 sont celles possédant les plus fortes teneurs en cet élément alcalin (> 3,5 mg/l). De plus, le chlore (élément mobile) voit ses teneurs augmenter avec l'accroissement de la concentration en Li. Les concentrations en Cl sont similaires à celles de pôles de surface pour la majorité des sources, sauf Moingt et Salt-en-Donzy qui atteignent des concentrations de 100 mg/l, similaires à celles relevées dans les régions de Chaudes-Aigues et Vals-les-Bains (Na-HCO_3).

IV.2.2 Corrélations entre éléments

La relation entre Na et Cl indique pour toutes les sources minérales un enrichissement en sodium par rapport aux eaux de surface (Fig. 61). Cet excès est surtout sensible pour les eaux du faciès Na-HCO_3. La tendance observée est similaire à celle des eaux du bassin de Vichy (Serra et al., 2003). Les eaux minérales du Forez sont donc peu enrichies en chlore par rapport aux eaux de surface de TDS supérieur à 100 (Tarentaise et St-Rambert ; Fig. 61), mais très enrichies en sodium. Les interactions eau – roche ont permis l'acquisition de cette concentration en Na dans des environnements peu riches en chlore, ce qui confirme bien l'absence d'évaporites.

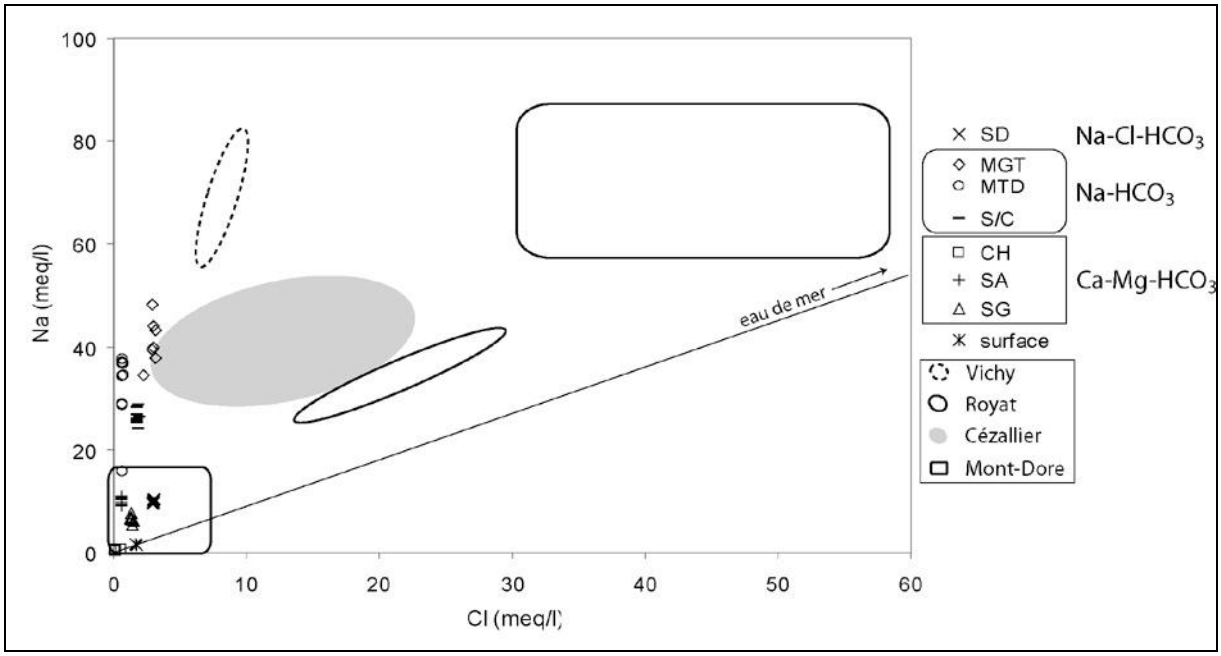


Fig. 61 : diagramme Na vs Cl (mg/l) pour les eaux du Forez ; compositions des eaux du MCF (Serra et al., 2003) ; le pôle surface est représenté par St-Rambert et Tarentaise.

Comme leur faciès le suggère, les eaux Ca-Mg sont fortement enrichies en Ca et Mg relativement à la teneur en Na. A la teneur près, cet enrichissement les rapproche (Fig. 62) des proportions mesurées dans les eaux de Châtel-Guyon (contact socle/sédiments oligocènes), pourtant de faciès différent (Ca-Cl). Les eaux de Salt-en-Donzy présentent un rapport très stable, proche de celui de l'eau de mer (Taylor et McLennan, 1985). Sail-sous-Couzan (S/C) et Moingt (MGT), les deux pôles les plus minéralisés du Forez, ont des valeurs comparables à celles d'autres districts minéraux du Massif Central (Vichy, Mont-Dore, Cézallier). Seule Montrond, bien qu'émergeant en bassin sédimentaire pro-parte carbonaté (pile de sédiments

traversée par le forage : 500m), est appauvrie en calcium, tout comme certaines eaux de Vichy et de Royat (contexte de socle et surtout de bassin). Les deux sources thermales (MTD, SD) apparaissent donc peu riches en Ca (et Mg) et plus riches en Na par rapport aux eaux froides et plus minéralisées du bassin.

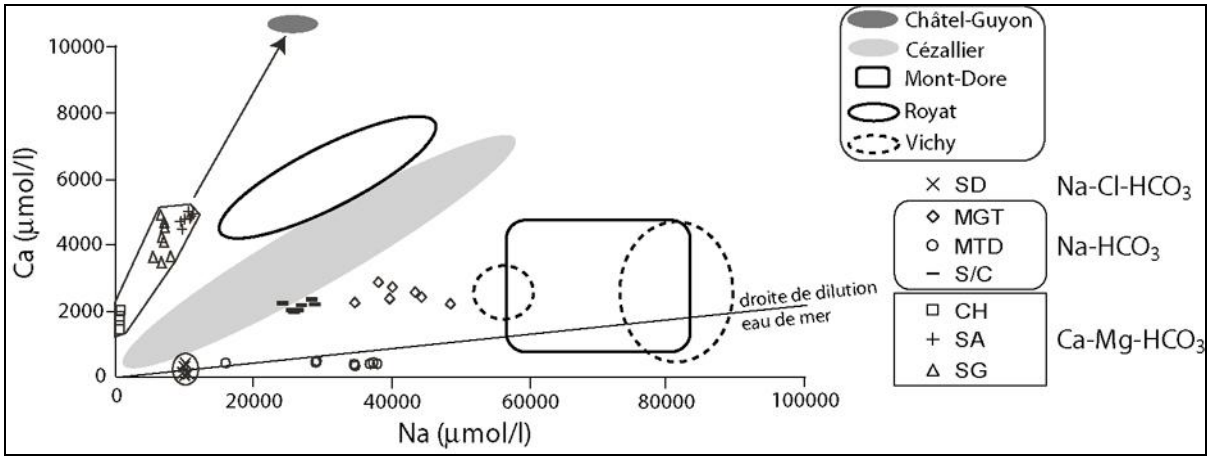


Fig. 62 : diagramme Ca vs Na (µmol/l) pour les eaux du Forez ; contour rond : eaux Na-Cl-HCO_3 ; autre contour : eaux Ca-Mg-HCO_3 ; compositions des eaux du MCF (Serra et al., 2003).

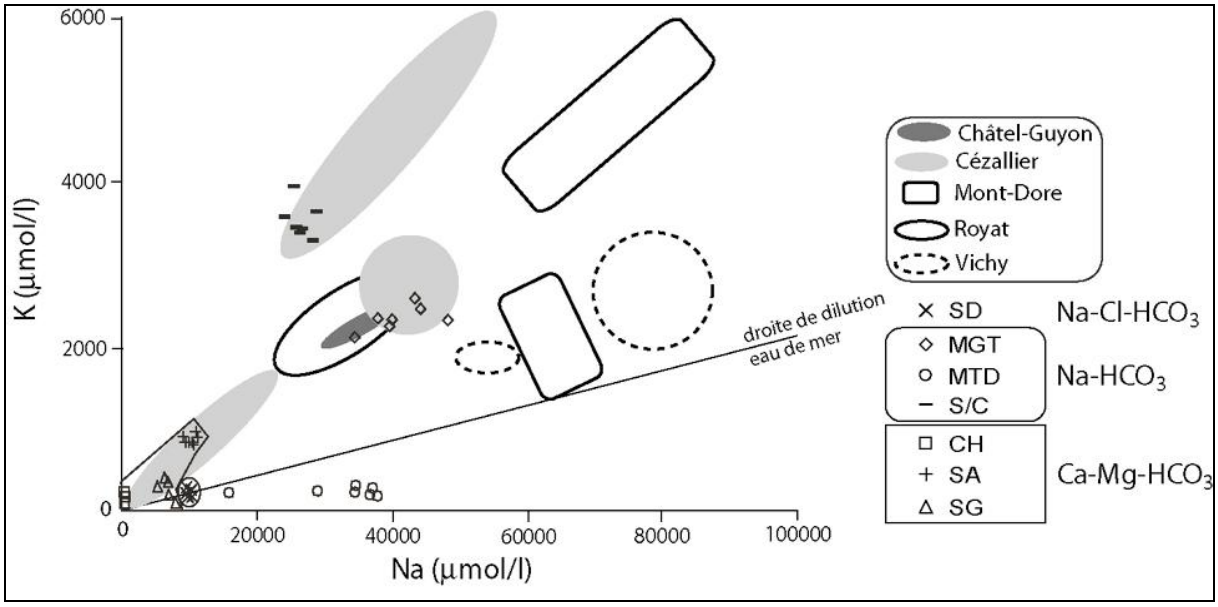


Fig. 63 : diagramme K vs Na (µmol/l) pour les eaux du Forez ; contour rond : eaux Na-Cl-HCO_3 ; autre contour : eaux Ca-Mg-HCO_3 ; compositions des eaux du MCF (Serra et al., 2003).

Ces diverses eaux ayant un trajet dans le socle granitique faillé, l'étude des variations des proportions en K et Na, issus de l'altération de phases silicatées (feldspaths, micas), est intéressante (Fig. 63). Les eaux Ca-Mg sont les moins riches en ces deux éléments, proche du

champ des termes les moins minéralisés du Cézallier. Tout comme pour la relation Na-Ca, la source thermale Na-Cl de Salt-en-Donzy admet des proportions très proches de celles de l'eau de mer. Par contre, de fortes disparités existent dans le comportement des 3 sources du faciès Na-HCO_3. La source thermale de Montrond est pauvre en K, ce qui implique soit une circulation dans une roche mère libérant peu de potassium (élément chimique non échangeable de certaines phases argileuses et peu lessivable des phases micacées), soit un contact bref avec le socle et/ou une plus faible température de réservoir (peu vraisemblable ; cf IV.3). Au contraire, les pôles Na-HCO_3 froids (MGT et S/C) circulant en contexte granitique, sont enrichis en K. Moingt admet des proportions similaires à celles relevées dans des sources reconnues comme d'origine profonde de l'Ouest de la Limagne de Clermont-Ferrand (Royat, Châtelguyon), tandis que Sail-sous-Couzan se rapproche des fortes teneurs des eaux du Cézallier – région Limagnes (Berthier et al., 1982).

Afin de déterminer les types de roches dans lesquels l'eau circule, on peut examiner les relations entre teneur en sulfates et teneur en calcium (Fig. 64). Salt-en-Donzy se distingue par un enrichissement en sulfates associé à une faible teneur en calcium. Comme les eaux minérales échantillonnées sont relativement protégées des contaminations extérieures (NO_3 < 5 mg/l sauf pour SG entre 6 et 7), les sulfates proviennent en majorité de l'oxydation des sulfures du socle. SD serait donc plus sensible à ce processus que les autres sources minérales. Cela est peut-être l'effet d'une percolation dans les formations des Monts du Lyonnais, à lithologies plus variées que les Monts du Forez. Au vu de leur émergence, MTD et SG pourraient aussi être affectées par ce phénomène. Cependant, ces eaux étant des mélanges d'au moins 4 niveaux aquifères, il n'est pas possible de détecter dans ces deux sources une influence de lithologies caractéristiques des Monts du Lyonnais.

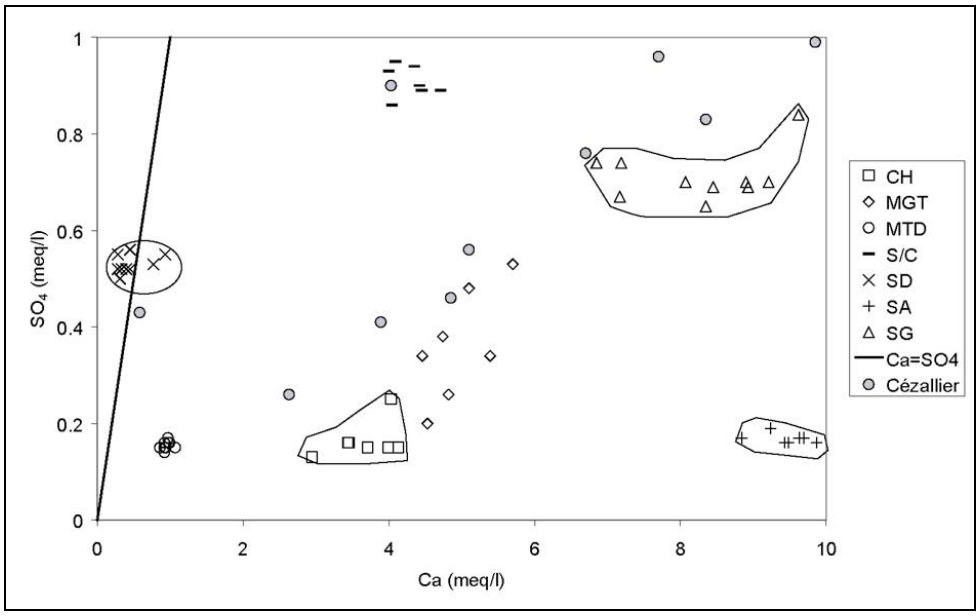


Fig. 64 : diagramme SO_4 vs Ca (mg/l) pour les eaux du Forez ; contour rond : eaux Na-Cl-HCO_3 ; autre contour : eaux Ca-Mg-HCO_3 ; compositions des eaux du Cézallier (Négrel, 1997).

Les rapports Na/Li des eaux minérales permettent de distinguer deux groupes (Fig. 65). Le premier comprend les faciès Na-Cl et Ca-Mg-HCO_3, à teneurs faibles en Na (< 10000µmol/l) et Li (<300 µmol/l). Le second correspond aux eaux Na-HCO_3, plus riches en ces éléments mais moins concentrées en Li que certaines eaux du Mont-Dore (hors échelle sur Fig. 65) dépassant 2000 µmol/l. Le lithium étant un élément mobile, les trois sources du faciès Na-HCO_3 sont plus représentatives des interactions en profondeur. MGT est plus concentrée, S/C et MTD moins, sans doute par effet d'une dilution avec des aquifères moins minéralisés.

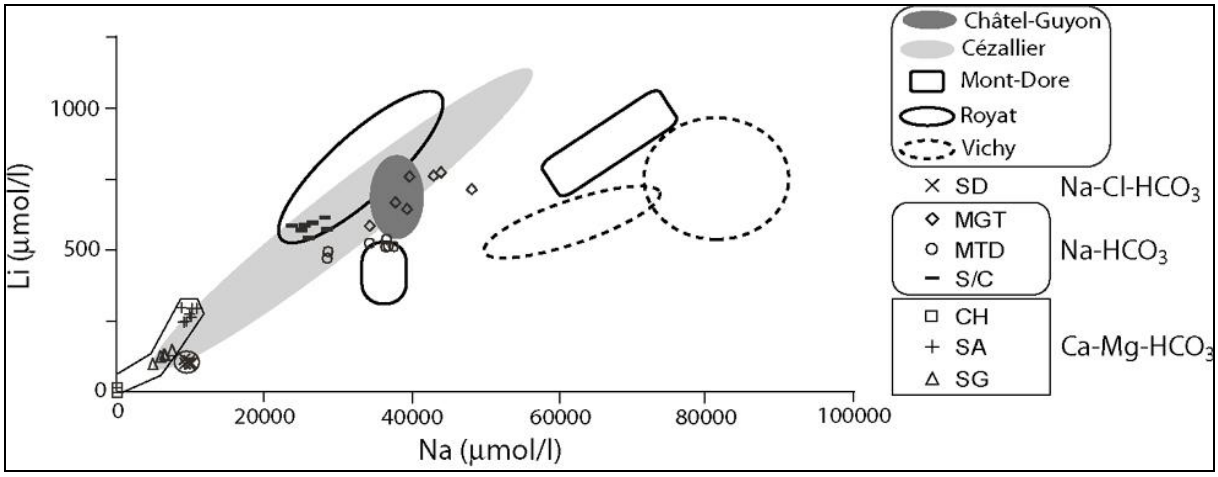


Fig. 65 : diagramme Li vs Na (µmol/l) pour les eaux du Forez ; contour rond : eaux Na-Cl-HCO_3 ; autre contour : eaux Ca-Mg-HCO_3 ; compositions des eaux du MCF (Serra et al., 2003).

La présence de sulfates dans les eaux pose la question de leur origine. Pour essayer de déterminer le mécanisme de mise en solution, le diagramme Br/Cl en fonction de SO_4/Cl est utilisé (Fig. 66). Faute de détection de brome, Chorsin et Montrond ne peuvent être représentées. Les sources présentent des rapports SO_4/Cl élevés, SD et S/C un enrichissement en Br, cependant très inférieur à celui des saumures du graben rhénan (226mg/l ; Aquilina et al., 1997). Les eaux du faciès Ca-Mg ne présentent pas de mécanisme d'interaction prépondérant (Fig. 66). Les rapports Br/Cl et SO_4/Cl de MGT pourraient être interprétés comme signant une interaction avec des formations plus riches en matière organique (Aquilina et al., 1997), mais ce mécanisme n'est pas reflété par sa signature en ^{13}C (IV.4). S/C et SD paraissent plus influencées par une interaction avec une matrice silicatée. Pour éviter les problèmes liés à la dilution des eaux, on peut utiliser le rapport Cl/Br, reconnu pour varier en 100 et 600 dans les eaux issues d'interactions avec des granites (Fuge, 1972). Dans le cas présent, MGT, S/C, SD et SA ont des rapports entre 240 et 280, SG ayant une valeur très supérieure proche de 590. Ceci implique que cette dernière source circule soit dans un socle de nature différente, soit qu'elle interagit moins avec des minéraux riches en brome ou la matière organique.

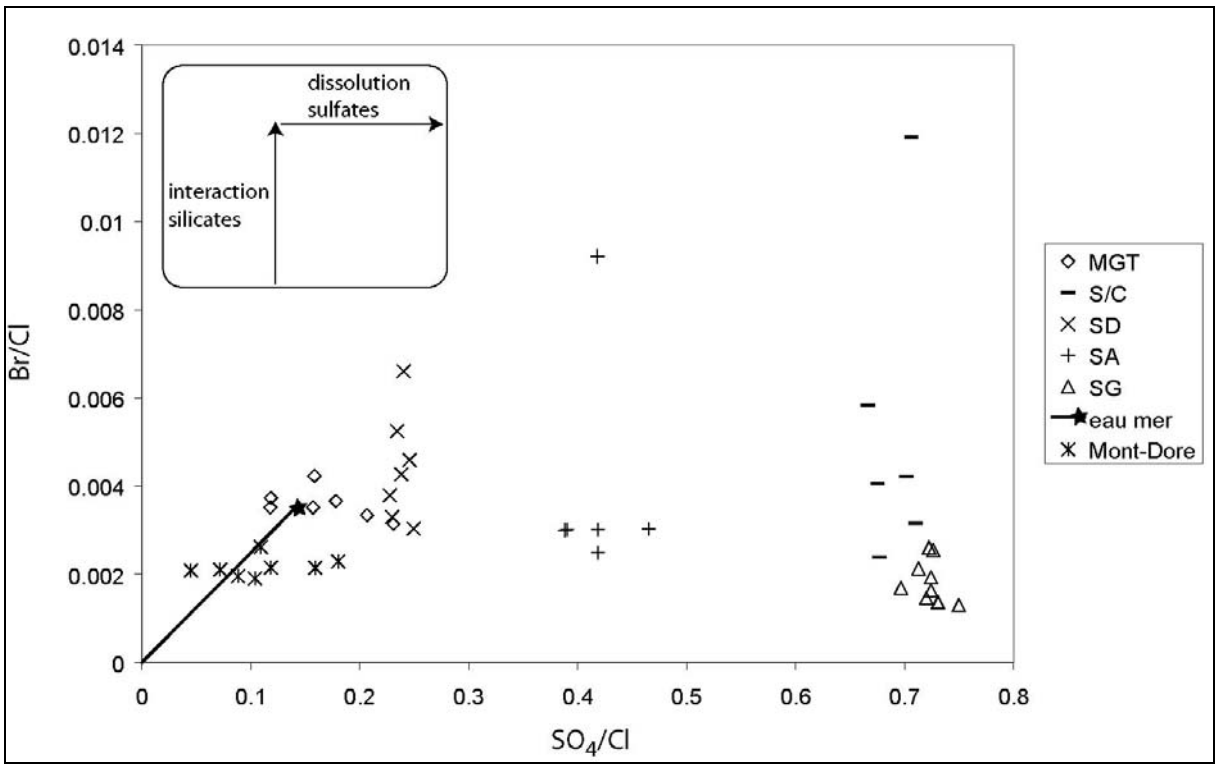


Fig. 66 : diagramme Br/Cl vs SO_4/Cl (mg/l) pour les eaux du Forez ; les analyses Mont-Dore se rapportent aux eaux de la haute vallée de la Dordogne (Baubron et al., 1979)

Les contenus en éléments dissous des eaux minérales du Forez indiquent des interactions en profondeur dans les formations encaissantes (enrichissement en sodium), soit lors de circulations dans le socle (S/C, MGT, SD), soit aussi lors de circulations en domaines sédimentaires détritiques (MTD). Les interactions avec la matière organique, même ancienne, sont limitées (MTD). Les sources les plus représentatives d'un pôle minéral profond sont celles du faciès Na-HCO_3 (MGT, MTD et S/C). Pour préciser les interactions en profondeur, on utilise, comme pour les eaux de surface, les calculs d'indices de saturation.

IV.2.3 Indices de saturation

Les diagrammes d'activité présentés en annexes (Fig. A5) sont calculés à 25°C et 150°C (température moyenne des calculs avec les géothermomètres ; cf partie IV.3). Suivant les éléments chimiques considérés, les interactions sont dans les champs de stabilité des minéraux suivants : gibbsite, kaolinite, silice amorphe, calcite, et chlorite. Cependant, ces champs ne diffèrent pas de ceux obtenus avec les eaux de surface (III.2.2) et ne permettent pas de préciser la nature des interactions eau-roche expérimentées par les eaux minérales.
Pour préciser ces interactions, on détermine une nouvelle fois les indices de saturation (SI). Les procédures sont identiques à celles employées en III.4. Ces indices sont utilisés pour essayer d'apporter un contrôle supplémentaire dans l'emploi des géothermomètres chimiques à cations (IV.2.4). Ces géothermomètres sont basés sur des rapports d'espèces cationiques dans les équilibres entre phases minérales lors de réactions phase primaire $\Rightarrow$ phase secondaire. Si, au cours de la remontée du fluide, une phase minérale peut précipiter, la concentration en cations sera sous-estimée, et les températures déduites erronées.

IV.2.3.1 Indices de saturation à la température d'émergence

Dans un premier temps, les SI sont calculés à la température d'émergence de l'eau minérale, afin de déceler d'éventuelles précipitations (voir annexes Tab. A.9). La sous-saturation en une phase minérale est en effet une condition nécessaire pour estimer des températures par géothermométrie.

Chorsin est l'eau dans laquelle la plupart des phases minérales sont sous-saturées, notamment les "sels" et carbonates (Fig. 67). Cette source est la seule à avoir des SI positifs avec les

oxydes de fer : goethite et hématite ont tendance à précipiter, ce qui est confirmé par l'existence de dépôts de goethite (>95%) à l'émergence.
Toutes les sources donnent des SI négatifs avec aragonite et calcite, SD et MGT se rapprochant de la saturation, voire de la sur-saturation (dolomite pour MGT).

La silice amorphe est toujours sous-saturée, à l'inverse du quartz. La source thermale (SD) est sous-saturée en calcédoine, alors que les eaux des faciès Na-HCO_3 et Ca-Mg-HCO_3 sont sur-saturées. La cristobalite est la plus proche de la saturation, soit en légère sur-saturation (CH, MGT, S/C, SA), soit en légère sous-saturation (MTD, SD, SG).

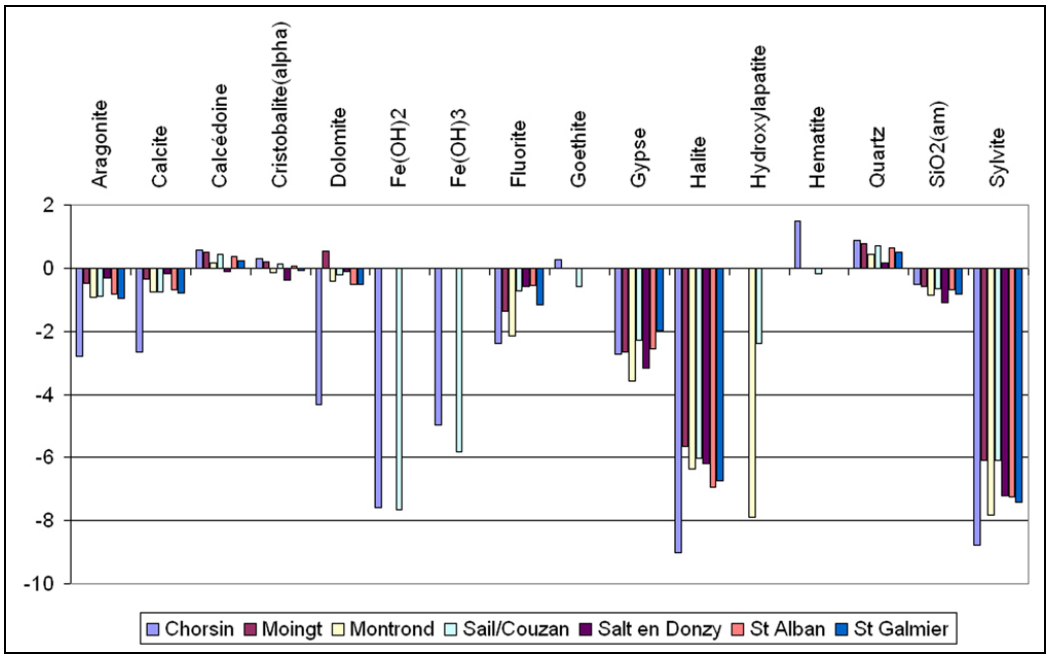


Fig. 67 : indices de saturation calculés à la température d'émergence des sources minérales.

IV.2.3.2 Indices de saturation et dissolution imposée de phases minérales en système ouvert

Les calculs avec trois minéraux à dissolution imposée (albite, anorthite, phlogopite ; cf. III.4.2 et annexes Tab. A.10) montrent que des variations peuvent exister. Il faut donc décrire plus précisément les modifications engendrées par des dissolutions d'espèces minérales et les effets d'une augmentation de température sur les contenus en éléments dissous.
Ainsi, pour déterminer quelles phases minérales supplémentaires employer dans les calculs, on procède de la manière suivante : quelles sont les phases dissoutes lorsque l'on augmente la température d'une eau de surface à TDS proche de 130mg/l (Tarentaise) ? Cette démarche est

appliquée par intervalles de 50°C entre 50 et 250°C, mais sans changement : les phases et les SI sont identiques à ceux calculés à la température d'émergence.

On a donc choisi des phases minérales présentes ou supposées présentes dans les environnements géologiques où les eaux circulent. Dix minéraux sont choisis : albite, anorthite, feldspath-K, quartz, muscovite, annite, phlogopite, pyrite, fluorite et fluoro-apatite. Les résultats de la dissolution imposée de ces phases (SI = –1 et n = 10 moles) sont semblables pour toutes les sources quand la température est supérieure à 100°C. En conséquence, soit toutes les eaux ont une origine identique, soit l'on contraint trop le système en forçant la dissolution d'un nombre trop élevé de minéraux.

Cette deuxième optique étant plus réaliste, notamment en raison de différences de géologie entre les flanc Est et Ouest du bassin du Forez, on ne retient plus que les phases suivantes : albite, anorthite, feldspath-K, quartz, annite, phlogopite, pyrite.

Les résultats des calculs sont présentés en annexe (Tab. A.11), dans la figure suivante (Fig. 68), ainsi que dans le tableau 20. Dans ces calculs, le système eau – roche est ouvert, car on ne contraint ni le volume d'eau réactante ni les proportions de minéraux à dissoudre. Cela représente une approximation d'un système réel (où les minéraux sont présents en certaines proportions) mais permet de prendre en compte le déplacement souterrain de l'eau (pas de limitation des quantités de matériel).

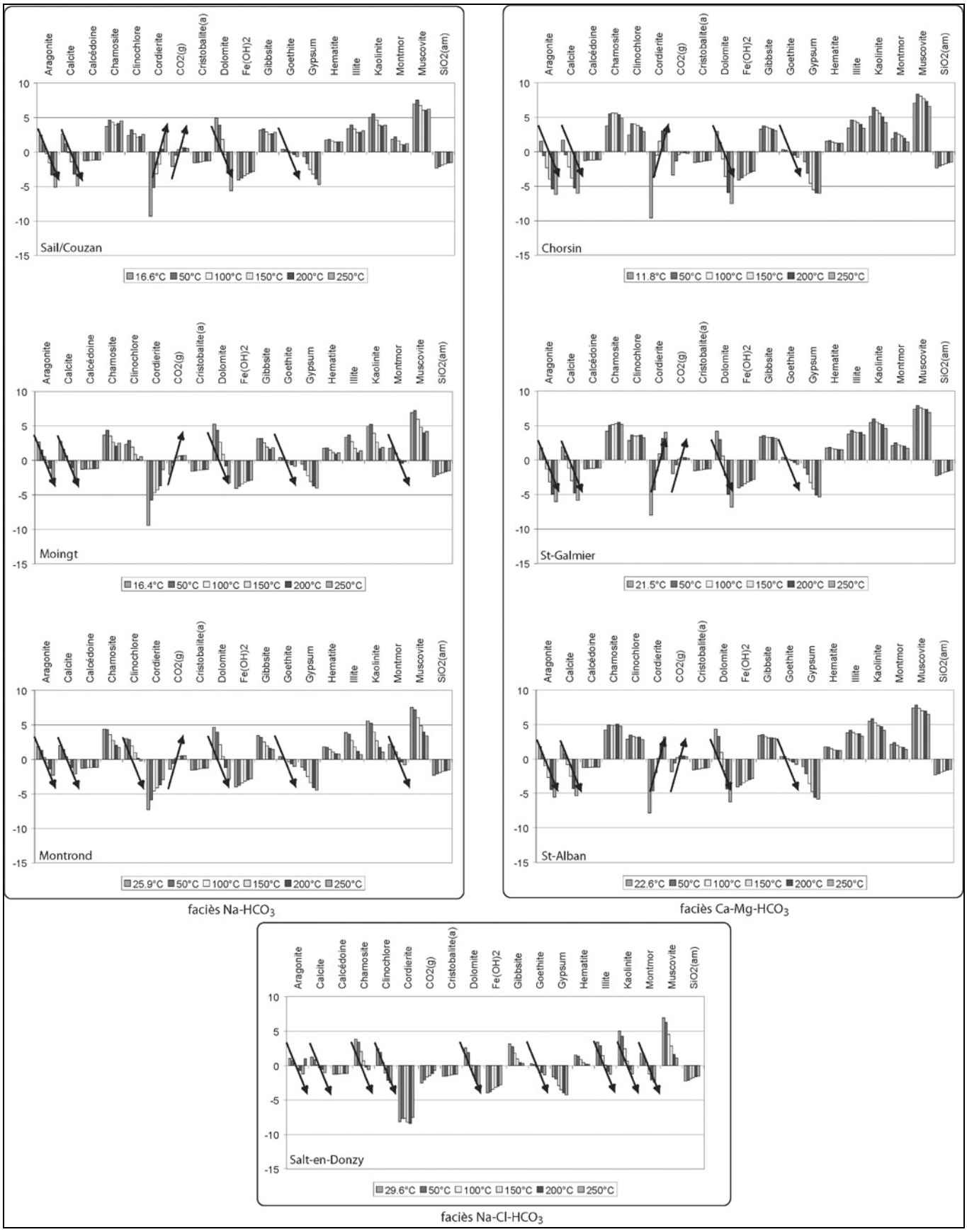


Fig. 68 : indices de saturation calculés à différentes températures pour les sources minérales – cas TDS maximal. La dissolution d'albite, anorthite, feldspath-K, quartz, annite, phlogopite, pyrite est imposée. Les flèches indiquent des changements d'état de saturation lorsque la température augmente.

CH	aragonite	calcite	calcédoine	chamosite	clinochlore	cordiérite	CO2(gaz)	cristobalite (a)	dolomite	Fe(OH)2	gibbsite	goethite	gypse	hématite	illite	kaolinite	montmorillonite	muscovite	SiO2 (am)
$T_{émergence}$	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
50	-	-	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
100	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
150	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-
200	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-
250	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-

MGT	aragonite	calcite	calcédoine	chamosite	clinochlore	cordiérite	CO2(gaz)	cristobalite (a)	dolomite	Fe(OH)2	gibbsite	goethite	gypse	hématite	illite	kaolinite	montmorillonite	muscovite	SiO2 (am)
$T_{émergence}$	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
50	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
100	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
150	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
200	-	-	-	+	+	-	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-
250	-	-	-	+	+	-	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-

MTD	aragonite	calcite	calcédoine	chamosite	clinochlore	cordiérite	CO2(gaz)	cristobalite (a)	dolomite	Fe(OH)2	gibbsite	goethite	gypse	hématite	illite	kaolinite	montmorillonite	muscovite	SiO2 (am)
$T_{émergence}$	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
50	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
100	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
150	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-
200	-	-	-	+	+	-	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-
250	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-

S/C	aragonite	calcite	calcédoine	chamosite	clinochlore	cordiérite	CO2(gaz)	cristobalite (a)	dolomite	Fe(OH)2	gibbsite	goethite	gypse	hématite	illite	kaolinite	montmorillonite	muscovite	SiO2 (am)
$T_{émergence}$	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
50	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
100	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
150	-	-	-	+	+	-	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-
200	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-
250	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-

SD	aragonite	calcite	calcédoine	chamosite	clinochlore	cordiérite	CO2(gaz)	cristobalite (a)	dolomite	Fe(OH)2	gibbsite	goethite	gypse	hématite	illite	kaolinite	montmorillonite	muscovite	SiO2 (am)
$T_{émergence}$	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
50	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
100	-	+	-	+	+	-	-	-	+	-	+	-	-	+	+	+	0	+	-
150	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-
200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-
250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-

SA	aragonite	calcite	calcédoine	chamosite	clinochlore	cordiérite	CO2(gaz)	cristobalite (a)	dolomite	Fe(OH)2	gibbsite	goethite	gypse	hématite	illite	kaolinite	montmorillonite	muscovite	SiO2 (am)
$T_{émergence}$	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
50	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
100	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
150	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-
200	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-
250	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-

SG	aragonite	calcite	calcédoine	chamosite	clinochlore	cordiérite	CO2(gaz)	cristobalite (a)	dolomite	Fe(OH)2	gibbsite	goethite	gypse	hématite	illite	kaolinite	montmorillonite	muscovite	SiO2 (am)
$T_{émergence}$	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
50	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
100	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
150	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-
200	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-
250	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-

Tab. 20 : changements d'indices de saturation calculés à différentes températures pour les sources minérales – cas TDS maximal ; + pour un SI positif (sur-saturation), – pour un SI négatif (sous-saturation).

La dissolution des phases minérales varie selon la température, la source considérée et sa concentration. Plusieurs tendances peuvent être observées (Fig. 68 et Tab. 20) :

- espèces carbonées : toutes les sources présentent un passage d'un état de sur-saturation à la température d'émergence à une sous-saturation à température plus forte. Les températures de changement de saturation sont plus faibles de #50°C avec le couple calcite/aragonite qu'avec la dolomite pour les eaux des faciès Ca-Mg-HCO_3 et Na-HCO_3, alors qu'elles sont voisines pour SD (Na-Cl-HCO_3). Au delà de 100°C, toutes

les eaux sont sous-saturées vis à vis des carbonates sédimentaires (présents dans la plaine du Forez) ou métamorphiques et peuvent donc les dissoudre.

- CO_2 gaz : les pressions partielles de gaz n'étant pas incluses dans les calculs, il s'agit uniquement d'une indication sur la présence ou non de gaz à une température donnée. Les eaux à minéralisation supérieure à 1g/l sont sous-saturées à des températures inférieures à 100°C, et peuvent donc exprimer du CO_2 libre. Deux sources font exception : CH (sensible à des mélanges) et SD (non gazeuse), sous-saturées.

- gypse : les SI sont plus négatifs quand la température augmente, aucune différence n'étant notée entre les faciès des eaux.

- oxydes : la transition sur- à sous-saturé existe vers 50 à 100°C pour la goethite (FeOOH). Les oxydes de fer plus hydratés ($Fe(OH)_2$) sont toujours sous-saturés, alors que la gibbsite ($Al(OH)_3$) est sur-saturée dans les mêmes conditions. Cette dernière admet un maximum de solubilité à des températures variables selon les sources (température de la source pour MTD, S/C et SD ; 50°C pour les autres), sans relation avec les TDS. Ceci explique les faibles quantités d'aluminium mesurées dans les eaux : la gibbsite précipite avant l'émergence, le fer reste en solution, sa précipitation à l'émergence étant liée au dégazage des eaux riches en CO_2.

- polymorphes de la silice (calcédoine, cristobalite α) : l'état de sous-saturation varie faiblement avec l'augmentation de la température. La silice amorphe connaît une légère tendance à une diminution de la sous-saturation quand la température augmente.

- chlorites (chamosite et clinochlore) : les sources Ca-Mg (CH, SA, SG) sont toujours sur-saturées vis à vis de ces espèces. Les sources Na-HCO_3 ont des comportements différents : le pôle le plus chargé (MGT) est toujours sur-saturé, alors que les eaux moins chargées (MTD, S/C) passent d'un état sur-saturé à un état sous-saturé vers 150°C avec le clinochlore (espèce riche en Mg, à enthalpie de réaction plus basse). Enfin, SD présente avec les chlorites un changement d'état de saturation vers 150 à 200°C.

- les argiles (principales phases d'altération des feldspaths) ont un comportement similaire à celui des chlorites. Les changements d'état de saturation les plus forts se font avec la montmorillonite, illite et kaolinite étant le plus souvent sur-saturées.

- le seul passage d'un état de sous-saturation à un état de sur-saturation avec l'augmentation de température est réalisé avec la cordiérite pour le faciès Ca-Mg, et pour certaines eaux Na-HCO_3 (MGT, S/C) pour des échantillons à forts TDS. Cette phase étant peu présente dans la zone d'étude (hormis certains granites du Velay), ces changements n'ont pas grande signification.

L'augmentation de la température se traduit donc souvent par un passage d'une sur-saturation à une sous-saturation, la transition entre ces états se produisant entre 100 à 200°C. Cela apporte deux contraintes sur l'utilisation des géothermomètres à cations. D'une part, une contrainte de température, car ceux-ci ne sont utilisables qu'en présence d'un état de dissolution (SI négatif). D'autre part, les espèces minérales qui connaissent des changements d'état de saturation renferment la majorité des cations utilisés en géothermométrie : Na, K, Mg, Ca ainsi que la silice. Les autres espèces impliquées (Fe, Al) n'étant pas toujours décelées à l'émergence, il faut sans doute voir le jeu d'une mise en solution en profondeur et d'une précipitation durant la remontée vers l'émergence (Chorsin notamment).

IV.2.3.3 Indices de saturation et dissolution imposée de phases minérales en système clos

La démarche précédente implique la considération d'un système ouvert dans lequel une eau percole et interagit avec 7 minéraux en proportions identiques, sans restriction de quantité à dissoudre. Dans le calcul maintenant envisagé, on passe en système fermé. La dissolution des phases est limitée à leurs proportions relatives dans la roche encaissante. La circulation souterraine des eaux comprenant une interaction avec le socle, on utilise les compositions modales de granites locaux (granite d'anatexie du Forez ; Barbarin, 1983). Cette roche associe 23,5% de quartz, 27,5% de feldspath potassique, 33% de plagioclase, 10,5% de biotite, 5% de cordiérite et enfin 0,5% de muscovite. La dissolution de ces 6 phases est imposée (SI = –1), les nombres de moles respectant les proportions des différents minéraux. Ces calculs sont conduits pour 3 sources correspondant aux 3 faciès précédemment définis (CH, MGT et SD), pour les TDS minimaux et maximaux mesurés. Les différences entre ces deux approches sont indiquées dans la figure 69 pour CH, MGT et SD à leur TDS maximal.

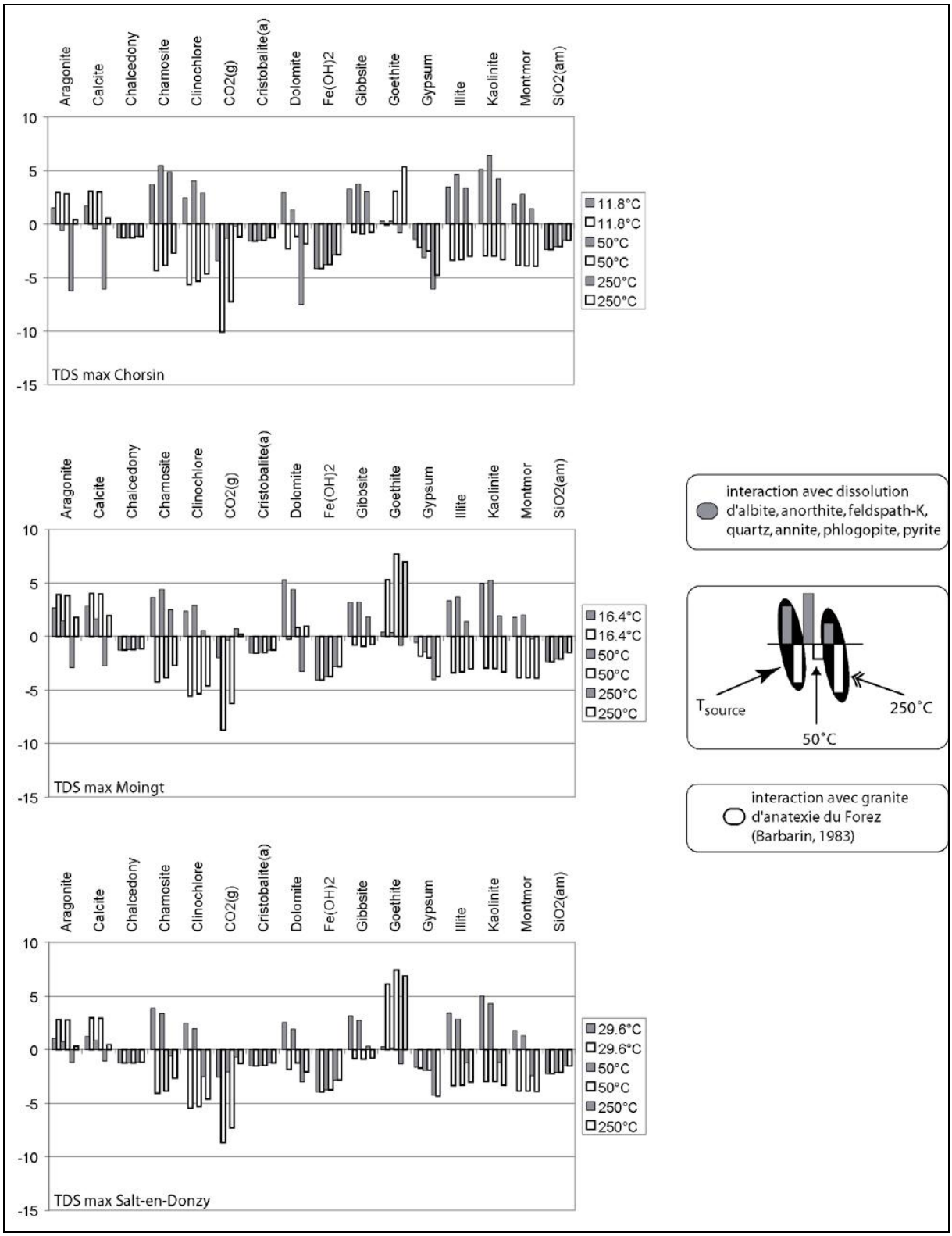


Fig. 69 : indices de saturation calculés à différentes températures (T_{source}, 50°C et 250°C) pour Chorsin, Moingt et Salt-en-Donzy – cas TDS maximal. La dissolution de 23,5% de quartz, 27,5% de feldspath potassique, 33% de plagioclase, 10,5% de biotite, 5% de cordiérite et 0,5% de muscovite est imposée (SI = –1) pour les histogrammes à barres blanches (interaction avec granite du Forez) ; pour ceux à barres grises (dissolution de 7 phases minérales), voir légende Fig. 68.

En système clos, aragonite et calcite peuvent précipiter, alors que la dolomite est dissoute. Les polymorphes de la silice ne connaissent pas de variations de SI, tout comme $Fe(OH)_2$ et gypse. Les chlorites et les argiles sont maintenant dissoutes, et non plus précipitées.
Le logiciel utilisé (PhreeQC) suppose un temps de contact suffisant entre eau et roche pour qu'un équilibre thermodynamique soit atteint. Dans les calculs précédents, la première approche est caractéristique d'un système ouvert : lors d'une circulation de fluide, une quantité non finie d'éléments peu donc être mobilisée. La seconde approche est celle d'un système fermé, où l'altération se trouve limitée à un volume fini de roche. Aussi l'approche en système ouvert, moins contrainte, est mieux adaptée. En effet, les eaux minérales étudiées ont des temps de parcours longs (IV.5.2), où une composante de déplacement de fluide intervient. Par contre, les phénomènes type adsorption, échange d'espèces chimiques ne sont pas pris en compte. On peut donc seulement évoquer une gamme de températures entre 100 et 200°C qui apparaît souvent comme synonyme de passage d'un état sur- à sous-saturé.

IV.2.3.4 Indices de saturation et comportement vis à vis du CO_2

L'introduction de CO_2 dans les eaux aux pressions calculées en surface a été testée. Ce calcul représente la quantité minimale de CO_2 pouvant être introduite en profondeur dans l'eau, puisque les mesures de p_{CO2} sont réalisées après le passage du point de bulle. Les seuls changements notables concernent la goethite et la dolomite, en sur-saturation plus franche. La dolomite est la seule représentante du système carbonaté à admettre des variations différentes (Fig. 70). Ainsi, pour CH et MGT, la prise en compte de la pression partielle de CO_2 a pour effet d'augmenter sensiblement l'état de saturation, alors que pour SD (p_{CO2} très faible).

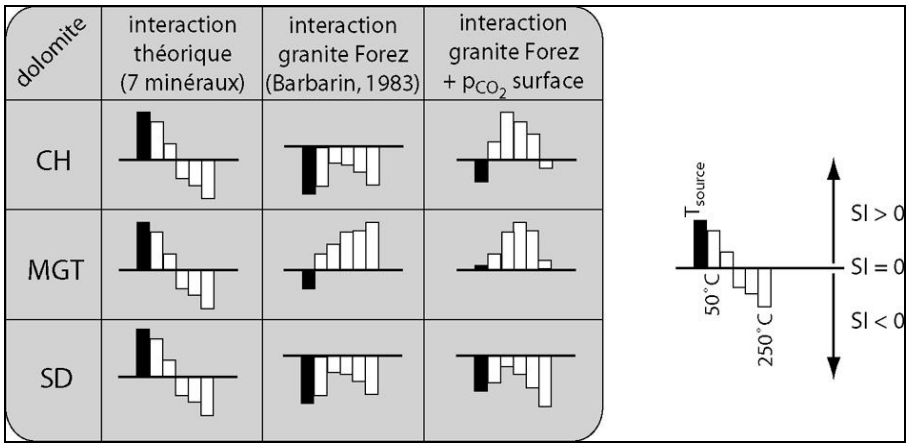


Fig. 70 : comparaison des évolutions des indices de saturation vis à vis de la dolomite pour 3 sources CH (faciès Ca-Mg-HCO_3), MGT (Na-HCO_3) et SD (Na-Cl-HCO_3), à température croissante (T_{source} puis de 50 à 250°C par pas de 50°C) – représentations hors échelle.

Les calculs d'indice de saturation confirment une interaction avec les minéraux constitutifs du socle ou leurs produits d'altération. L'approche retenue est celle d'un système ouvert (par rapport aux circulations d'eaux, en supposant une p_{CO2} constante pour le réservoir profond), qui a l'inconvénient de ne pas refléter les proportions des différentes phases minérales du socle, mais a l'avantage de ne pas contraindre les volumes de roches mis en jeu. Les changements d'état de saturation de minéraux à Na, K, Mg, Ca et SiO_2 (sur-saturation à faible température, sous-saturation après 100 à 200°C), la sur-saturation des argiles et chlorites dans ces gammes de température suggèrent en outre la grande attention à porter lors de l'utilisation des géothermomètres pour calculer les températures atteintes en profondeur par les eaux.

IV.3 GEOTHERMOMETRIE

L'estimation de ces températures est un paramètre important pour déterminer les profondeurs maximales atteintes par les circuits d'alimentation. L'utilisation des géothermomètres à cations suppose l'atteinte d'un équilibre chimique eau – roche en profondeur (dissolution). Cependant les calculs d'indice de saturation montrent qu'une majorité de cations sont impliqués dans la précipitation de phases minérales. Il faut ainsi déterminer si les cations type Ca, Mg et K participent aux réactions de précipitation / dissolution de carbonates ou des silicates en contexte granitique.

Certaines représentations graphiques (diagramme ternaire K-Na-Mg de Giggenbach, 1988) permettent de connaître l'état d'équilibre de l'eau avec l'encaissant en profondeur. Cependant, leur emploi est inapproprié en contexte de socle granitique, surtout pour des eaux riches en CO_2 (Michard, 1990). Ainsi seules les eaux à caractère thermal (MTD et SD) semblent partiellement équilibrées dans cette représentation. De plus, même si l'équilibre est atteint au cours du trajet souterrain, il peut être masqué par des interactions plus tardives (lors de la remontée) avec d'autres aquifères moins riches en éléments dissous (Michard, 1990 ; Serra et al., 2003).

Les géothermomètres employés utilisent des concentrations en silice (Fournier, 1977 ; Michard, 1979 ; Verma, 1997), ou des rapports de concentration : Na/K (Fournier, 1979 ; Michard, 1979, 1990 ; Truesdell, 1975 ; Verma, 1997), Na-K-Ca (Fournier et Truesdell, 1973), Na-K-Ca-Mg (Fournier and Potter, 1979), Mg/K^2 - K/Mg (Giggenbach et al, 1983), Sr/K^2 (Michard, 1990). Des thermomètres plus spécifiques sont aussi utilisés : Na/Li (Fouillac

et Michard, 1981 ; Kharaka, 1989 ; Michard, 1990 ; Verma, 1997), Mg/Li (Kharaka et Mariner, 1989).

Les géothermomètres utilisant les concentrations en silice sont connus pour donner des températures faibles pour les eaux de contexte granitique à teneur importante en CO_2, en raison de pertes de silice durant la remontée vers la surface (Serra et al., 2003). Dans le cas des eaux du Forez, ces thermomètres donnent en effet un domaine compris entre 1 et 62°C (calcédoine, cristobalite α et quartz). A ces températures, calcédoine et cristobalite sont sous-saturées (Tab. 20), mais les phases d'altération du socle contenant de la silice (argiles) peuvent précipiter. Quantité de silice et température calculée sont donc sous-estimées (Pauwels et al., 1997).

Les autres géothermomètres employés dans cette partie sont empiriques. Un récapitulatif des différentes températures calculées à l'aide des différents thermomètres à cations est donné dans le tableau suivant (Tab. 21 et annexes Tab. A.12 – version présentant tous les résultats).

thermomètre	CH		MGT		MTD		S/C		SD		SA		SG		référence	gamme de T (°C)
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max		
K/Mg	**56**	**69**											**61**	**83**	**Giggenbach 1983**	**50-300**
Mg/Li	**28**	**28**	**110**	**118**	**137**	**141**	**108**	**111**	**124**	**151**	**86**	**90**	**58**	**62**	**Kharaka 1989**	**0-350**
Na/Li (Cl<0.3mol/l)	298		192		188		218		152		241		204		Fouillac et Michard, 1981	
Na/Li (Cl<0.3mol/l)	*306*		*202*		*197*		*227*		*162*		*250*		*214*		*Fouillac et Michard, Verma*	
Na/Li Cl<10000ppm	**219**	**219**	**128**	**147**	**123**	**139**	**151**	**167**	**103**	**108**	**171**	**191**	**146**	**150**	**Fouillac 1981**	
Na/Li	304		200		195		225		160		249		212		Michard, 1990	
Na/K			**167**	**192**						**119**	**214**	**244**		**177**	**Truesdell 1976**	**100-275**
Na/K			166		50		236		97		194		136		Michard, 1990	
Na/K			**200**	**220**					**110**	**160**	**238**	**261**		**209**	**Fournier 1979**	**100-275**
Na/K			*217*		*87*				*139*		*249*		*184*		*Fournier, Verma*	
Na/K			**219**	**242**	**63**	**94**			**119**	**174**	**261**		**98**	**228**	**Fournier et Potter 1979**	
Na-K-Ca (β=1/3)	200		196		102		244		135		184		137		Fournier et Truesdell, 1973	4-340
Na/K/Ca	**170**	**228**	**190**	**199**		**110**	**233**	**258**	**120**	**153**	**179**	**190**	**25**	**155**	**Fournier 1979**	**100-350**
Na/K/Ca Mg correction									**122**	**137**					**Fournier 1979**	**100-350**
Mg/K²			98		62		111		94		75				Giggenbach et al, 1983	50-300
Sr/K²	86		198		95		256		114		143		100		Michard, 1990	

normal: calcul avec les formules initiales des géothermomètres, en utilisant la composition chimique moyenne des sources
gras: calcul par Aquachem sur toutes les sources à balance ionique correcte; expression en température minimale et maximale
italique: géothermomètres modifiés par Verma, 1997; calcul sur la composition chimique moyenne

Tab. 21 : températures calculées par géothermométrie cations ; détails dans le tableau. Les températures retenues sont majoritairement celles obtenues avec Na/Li (voir texte pour explications).

Un premier groupe de géothermomètres fait intervenir le magnésium. Il est représenté par les thermomètres K/Mg, Mg/K², définis à partir d'un équilibre muscovite – clinochlore – albite – feldspath K et le thermomètre Mg/Li, défini sur des eaux fortement minéralisées en contexte de bassins sédimentaires.

Les deux couples K-Mg donnent des valeurs très disparates, en raison notamment de la faible concentration en K des sources. Pour utiliser une température calculée, il faut être en sous-saturation à cette température par rapport aux phases secondaires contenant K et Mg (argiles). Seule Salt-en-Donzy présente cet état de sous-saturation à des températures supérieures à 150°C (Tab. 20), mais les températures calculées sont inférieures et donc non significatives.
Le même constat est établi avec le thermomètre Mg/Li. Dans le cas de Montrond (émergence dans le bassin du Forez), les températures obtenues sont trop faibles (précipitation de phases magnésiennes). Pour cette source, un nouveau forage a été entrepris en mars 2005 par la société HydroInvest. Il apporte de nouvelles contraintes dans la connaissance de l'aquifère multicouche de la plaine du Forez. Les températures données par les géothermomètres sont fournies en annexes (Tab. A.13). Elles confirment que les thermomètres à magnésium ne sont pas utilisables ici (températures de 60°C à 22m et de 40°C à 198m !).

Les thermomètres basés sur le comportement en solution du sodium sont souvent utilisés. Lors de la dissolution de phases primaires et lors de la création de phases secondaires, les éléments sont soustraits du fluide selon l'ordre Ca, Mg, K, Si et Na (Beaucaire et al., 1999). Le sodium reste plus longtemps en solution dans la phase fluide. Na peut certes être adsorbé par les argiles mais aussi être échangé dans ces phases au profit de K, Ca et Mg. Le thermomètre Na/K est basé sur l'équilibre entre feldspaths potassiques et plagioclases, les différentes équations (Tab. 21) étant fonction de la composition des plagioclases (Fournier, 1979 ; Michard, 1979, 1990 ; Truesdell, 1975 ; Verma, 1997). Ces thermomètres surestiment les températures, à fortiori pour les eaux riches en calcium (CH, SA, SG) (Serra et al., 2003).
Le géothermomètre Na-K-Ca représente une évolution du thermomètre Na-K (calcul en rapport de concentrations). Il est principalement dépendant des réactions faisant intervenir les silicates (Fournier et Truesdell, 1973). Les températures calculées sont plus faibles, entre 100°C (MTD) et 240°C (S/C) (Tab. 25). Les eaux thermales ont les températures les plus basses, ce qui laisse supposer que les calculs sur les eaux froides sont surestimés en raison de la précipitation d'illite (Tab. 20).
Fournier et Potter (1979) ont introduit une correction au thermomètre Na-K-Ca faisant intervenir la concentration en Mg. Les températures recalculées diminuent fortement (températures calculées de 20 à 56°C), sauf pour SD (122 à 137°C). Pour le forage de Montrond, seul le niveau –172m donne des températures semblables à celles obtenues à Salt-en-Donzy (de 146 à 159°C ; Tab. A.13), en raison de teneurs en Mg et K supérieures.

Les approches avec les géothermomètres précédents donnent un large spectre de températures, qui ne donnent qu'une vague estimation des températures profondes. L'emploi d'autres thermomètres est nécessaire, notamment ceux définis par Michard (1990) pour les eaux percolant dans les granites (Na/Li et Sr/K^2).
La précipitation ou la dissolution de phases contenant lithium et strontium est difficile à modéliser en raison de phénomènes de substitution et d'échange dans les phases minérales. Cependant, comme Li et Sr sont présents en faible quantité, ces phénomènes impliquent de préférence d'autres cations majeurs (K, Ca, Mg, Na). Li et Sr sont donc considérés comme moins sensibles à ces phénomènes et conduisent alors à des températures plus raisonnables.

Le premier thermomètre défini par Michard (1990) est Na/Li (Tab. 21), employé pour les eaux peu concentrées en chlore ([Cl]<0,3 mol/l). Le lithium est présent en faibles quantités dans les eaux minérales du Forez, et non détecté dans les eaux de surface. Ce thermomètre est donc moins sensible à des dilutions par des eaux de surface (Fouillac et Michard, 1981). La source de Chorsin n'est pas prise en compte, son contenu en lithium étant trop proche du seuil de détection instrumental (interaction avec eaux de surface ; cf teneur en ^3H par exemple). Les températures calculées avec Na/Li sont comprises entre 150 et 250°C (Tab. 21).

Le second thermomètre utilisé est Sr/K^2 (Michard, 1990), qui fait aussi référence à un élément mineur. Son inconvénient vient du couplage avec le potassium, souvent impliqué dans la précipitation de phases secondaires (illites – #11% de K) (Beaucaire et al., 1999). Les températures calculées avec Sr/K^2 correspondent à un large intervalle, entre 85 et 250°C (Tab. 21). L'importante dispersion des températures est à mettre en relation directe avec les variations de teneur en potassium des eaux. En effet, un échange de 10ppm de K avec Na sur MGT et MTD entraîne des changements inférieurs à 10°C pour le thermomètre Na/Li mais de 10 à 50°C en Sr/K^2.

Le géothermomètre Na/Li est donc moins sensible aux variations de concentration. Ce thermomètre servira donc de référence par la suite.

Pour les six sources étudiées (hors Chorsin), il est intéressant de coupler les géothermomètres Na/Li et Sr/K^2, pour estimer les processus responsables des écarts entre les températures calculées (Fig. 71). Deux cas de figures sont possibles :

- accord entre les températures des deux géothermomètres (MGT) : pour cette source, une température profonde proche de 195 – 205°C peut être estimée ;
- points au dessus (S/C : mécanisme A in Fig. 71) ou en dessous de la droite d'égales valeurs de la température (MTD, SD, SA, SG : mécanisme B in Fig. 71) : les thermomètres Sr/K² et Na/Li donnent dans ces cas des températures différentes. Deux phénomènes peuvent expliquer ces déviations :

  - *variation du rapport Sr/K²* :
    - *diminution* : une diminution de [Sr] ou une faible abondance peut marquer une interaction réduite avec les sédiments (jusqu'à 7000ppm de Sr dans les carbonates du bassin, 50ppm dans ceux du socle). S/C est la source la plus riche en K (en proportion), donc Sr/K² est faible. Une forte [K] peut aussi être provoquée par une faible interaction avec les argiles (pas d'échange Na – K).
    - *augmentation* : une altération forte des feldspaths peut être envisagée, notamment pour Montrond. La diminution de [K] peut provenir de la cristallisation d'illite ou de l'adsorption de K par les argiles (montmorillonite), ces deux argiles pouvant précipiter (SI>0 ; Tab. 20).

  - *variation du rapport Na/Li*:
    - *augmentation* : S/C est en proportion peu riche en Na, ce qui peut se corréler avec l'abondance de K en solution (peu de lessivage du Na des argiles ; Capacité d'Echange Cationique). Une faible variation des proportions de Na (10ppm soit 1,6%), K (10ppm soit 7% ; proche de la teneur moyenne de Montrond) ou Li (0,1ppm soit 2%) pour S/C induit un faible changement de température (7°C), ce qui confirme le caractère de référence du thermomètre Na/Li.
    - *diminution* : soit [Na] diminue, soit [Li] augmente. Une diminution de la teneur en Na peut provenir de son adsorption par des phases argileuses (SI positifs dans les gammes de températures considérées).

Dans tous les cas, l'utilisation du thermomètre Na/Li est préférable : une perte de 5mg en K, compensée par un gain de 5mg en Na (simulation sur MTD) engendre une variation de 2°C en Na/Li et de 50°C en Sr/K². Les températures Na/Li retenues sont les suivantes : MTD de 180

à 200°C, SG de 210 à 220°C, SD de 155 à 160°C, SA et S/C de 240 à 260°C. Les variations possibles indiquent une interaction marquée des eaux avec le socle et faible avec les formations sédimentaires détritiques (S/C notamment).

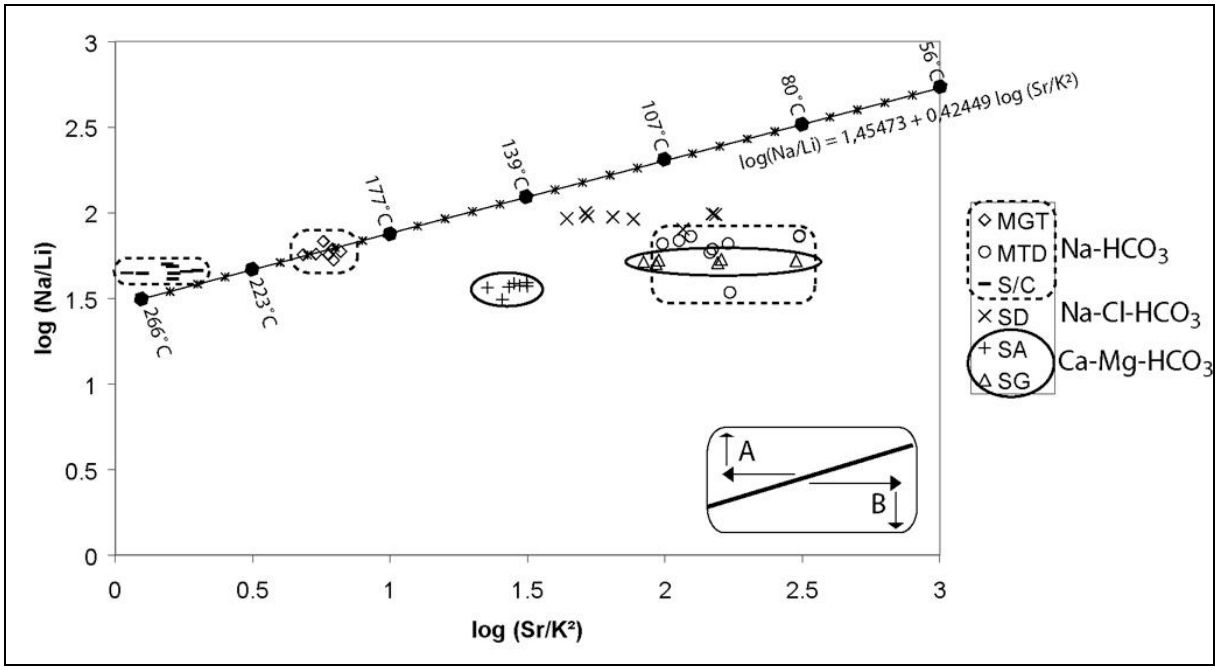


Fig. 71 : températures déterminées en couplant les géothermomètres Na/Li et Sr/K² (Michard, 1990) ; explications dans le texte.

Les disparités des températures calculées peuvent être causées soit par mélange, soit par précipitation/dissolution de minéraux. Ces modifications rendent les calculs thermométriques douteux. Elles permettent néanmoins de déterminer les températures maximales atteintes dans le réservoir par les eaux minérales étudiées :

- il n'est pas possible de définir une température pour la source de Chorsin. La raison peut être une forte interaction avec des eaux de surface, qui perturbe les proportions en éléments dissous ;

- mélanges attestés : SG (plusieurs puits) et MTD (plusieurs aquifères traversés). Na/Li permet donne une gamme de 180 à 220°C pour SG (Ca-Mg-HCO_3), légèrement supérieure à celle rapportée par Serra et al. (2003), 150 à 180°C. Pour MTD (Na-HCO_3), on obtient de 180 à 200°C, les températures des aquifères supérieurs étant plus faibles (Tab. A.13).

- la source thermale de Salt-en-Donzy, la plus chaude à l'émergence, donne les estimations les plus faibles. Les températures calculées par Na/Li, Sr/K², Na-K-Ca (avec ou sans correction de Mg), Na-K, Mg/Li sont convergentes et donnent une gamme de 110 à 160°C, 130°C étant la température la plus fréquente. Les profondeurs atteintes, en prenant un gradient géothermique moyen de 30°C/km et une température moyenne annuelle en surface de 11°C, sont proches de 3 à 4 km.

- SA (Ca-Mg-HCO_3), de minéralisation proche de SG, donne des températures plus fortes, de 210 à 250°C. Les sources Na-HCO_3 ont un comportement plus homogène. Ainsi, Na/Li, Sr/K², Na-K-Ca conduisent à des valeurs de 180 à 210°C pour MGT, et 220 à 250°C pour S/C. Ces sources minérales sont donc équilibrées en profondeur autour de 200°C, comme une grande majorité d'eaux carbogazeuses du Massif Central (Serra et al., 2003). La profondeur maximale possible est proche de 6 km, ce qui semble excessif par comparaison aux estimations faites en Limagne d'Allier, plus profonde et à gradient géothermique double (Martelet et al., 2003 ; Serra et al., 2003).

L'étude des géothermomètres permet de confirmer l'existence d'une étape d'interaction eau – roche en profondeur à des températures supérieures à 100°C. Elle ne permet pas de donner une gamme de température homogène. Dans notre cas, le thermomètre à privilégier est Na/Li. Le sodium reste longtemps en phase fluide, mais peut être adsorbé dans les argiles. Associé au lithium, Na définit un thermomètre peu sensible aux dilutions, utilisable avec les eaux percolant dans les granites.

Plus les sources sont chaudes, plus les températures calculées du réservoir sont basses. La source thermale de Salt-en-Donzy admet une température profonde proche de 130°C. Cette eau étant peu affectée par des mélanges (cf IV.4), cette estimation est raisonnable et indiquerait une profondeur maximale de 4 km. Les températures obtenues sur les eaux froides sont plus élevées : 180-210°C (SG, MTD, MGT) à 220-250°C (SA, S/C). Ces disparités peuvent être reliées à des interactions plus ou moins importantes avec des argiles adsorbant le sodium (baisse de concentration et donc de la température calculée). Des mélanges avec des eaux moins minéralisées plus récentes (contenant du tritium) pourraient expliquer les températures supérieures calculées pour les eaux froides (les géothermomètres employés sur les eaux du Furan donnent des résultats irréalistes).

Aucune relation entre température calculée, teneur en CO_2, minéralisation et faciès ne peut être mise en évidence. Le seul rapport qui existe est une zonation géographique : les eaux

jaillissant à l'Ouest du graben ont des températures calculées plus élevées que celles jaillissant à l'Est, alors que le graben est plus profond à l'Est (700m) qu'à l'Ouest. Ce contraste doit aussi être lié aux modifications des teneurs en éléments, qui expliquent également la disparité des températures calculées.

IV.4 ISOTOPES STABLES

En préambule à la discussion des rapports isotopiques $\delta^{18}O$, δD et $\delta^{13}C$, les activités des isotopes radiogéniques (tritium et carbone 14) obtenues sur les eaux minérales sont présentées (Tab. 22 ; Tab. A.5.3), associées à un schéma de la circulation des eaux dans le graben (Fig. 72). Ces données seront discutées par la suite (IV.5), mais elles permettent de cerner la sensibilité au mélange des eaux minérales avec des aquifères superficiels. Le tableau 22 donne des temps de transit à titre indicatif, la datation sensu stricto d'eaux à CO_2 magmatique (^{14}C mort) n'étant pas réaliste.

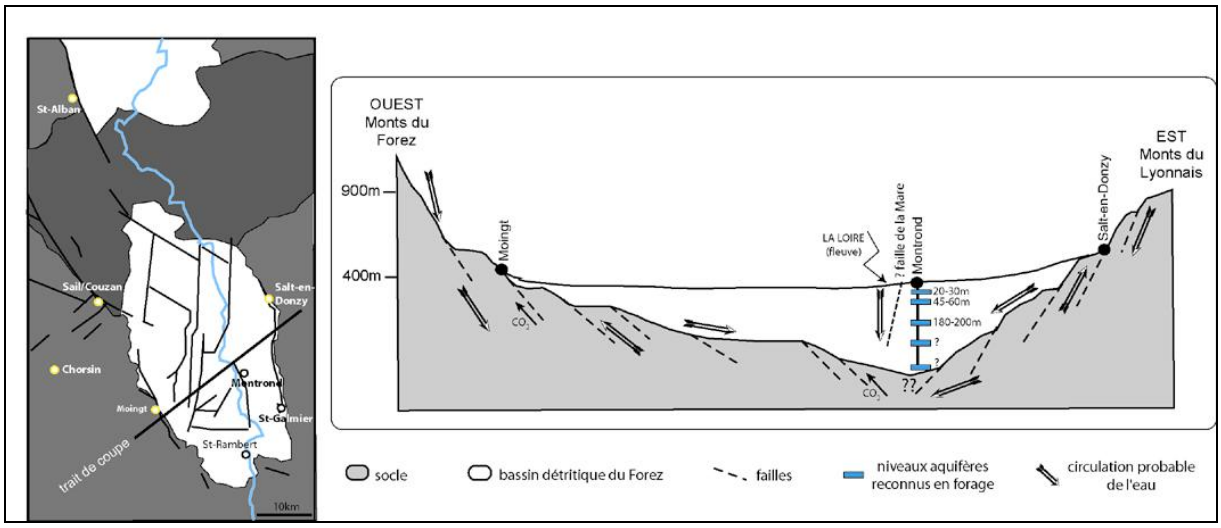


Fig. 72 : coupe schématique du graben du Forez et zones de circulation possibles de l'eau en profondeur.

		date	tritium (UT)	^{14}C (+CO_2) (pCM)	"âge" maximum	^{14}C (-CO_2) (pCM)	"âge" maximum
EAUX MINERALES	CH	24/04/02		4,78	25130	5,99	23270
		23/07/02	5 ± 1				
		17/10/02	5 ± 1				
	MGT	24/04/02		3,88	26860	7,26	21680
		23/07/02	< 2,4				
	MTD	17/10/02	< 1,1				
		19/11/02		8,33	20540		
	SD	24/04/02		38,2 ± 0,6	7950		
		17/10/02	< 1,3				
	S/C	16/11/02	3,1 ± 0,7				
		18/02/03		4,51	25610		
	SA	17/10/02	2 ± 1				
		08/02/03		6,93	22060		
	SG	17/10/02	6 ± 1	n.d.			
FORAGE	forage Mon1 21,5-22m	01/03/05	<1,5				
	forage Mon1 39,49m	14/04/05		5,5 ± 0,3	23970		
	forage Mon1 46m	03/03/05	1,3 ± 0,7				
	forage Mon1 60m	03/03/05	<1				
	forage Mon1 186m	17/03/05	<1,6	4,5 ± 0,3	25630		
	forage Mon1 192m	21/03/05	<1,2	5,4 ± 0,2	24120		
	forage Mon1 198m	24/03/05	<1,4	6 ± 0,3	23250		
	rivière Montrond	17/03/05	6 ± 1	n.d.			

"âge" maximum = "âge" obtenu en utilisant directement la formule de décroissance radioactive
=> pôle eaux de surface : St-Rambert = 89,7 pCM soit un âge max. de 900 ans

Tab. 22 : teneurs en tritium (Unité Tritium) et activités ^{14}C (% Carbone Moderne) des eaux minérales et des eaux du forage Montrond 1 ; deux eaux (CH et MGT) ont fait l'objet de mesures de l'activité ^{14}C avant et après dégazage de l'eau. Les durées maximales de circulation des eaux sont données à titre indicatif.

Chorsin et St-Galmier, à forte teneur en tritium (>5 UT), sont des mélanges eaux profondes – eaux de surface (cf Tab. 10 et 16). En moindre mesure, S/C et SA présentent des teneurs en tritium légèrement plus élevées que les autres sources, mais proches des seuils de détection instrumentaux. MGT, MTD, SD et les aquifères du forage Mon1 ont des teneurs en ^{3}H très faibles, souvent égales au seuil de détection. Les activités en carbone 14 sont inférieures à 8,5 pCM, sauf pour la source non carbogazeuse de Salt-en-Donzy (38,2 pCM). Pour les eaux carbogazeuses, ces activités résultent de mélanges avec des aquifères plus superficiels dans la zone d'émergence, qui rendent les estimations d'âge difficiles. La seule information apportée par les activités des eaux dégazées (CH et MGT) est un "vieillissement" de l'eau par adjonction de CO_2 profond à ^{14}C mort (e.g. Aires-Barros et al., 1998).

IV.4.1 Oxygène et hydrogène

IV.4.1.1 Relation à la Droite Locale des Eaux Météoriques

Comme pour les aquifères de surface, les valeurs $\delta^{18}O$ et δD sont comparées avec la Droite Locale des Eaux Météoriques définie au chapitre II. La figure 73.1 montre les rapports isotopiques mesurés, ainsi que les points moyens. Les valeurs sont proches de la droite locale. Quatre configurations, dont l'existence sera discutée en IV.4.2, apparaissent :

- la source thermale de Salt-en-Donzy (SD) présente, échantillon du 26/03/02 excepté, un alignement des rapports isotopiques sur une droite d'équation $\delta D = 5{,}6 \times \delta^{18}O - 15{,}4$ ($r^2 = 0{,}8$). L'hypothèse la plus probable pour expliquer cette déviation à la droite locale est une interaction eau – roche en profondeur. L'existence d'une droite d'évaporation (e.g. Cartwright et al., 2002) est exclue car il n'existe pas de variation en fonction de la température extérieure : le rapport isotopique le plus lourd est enregistré en mars 2003.

- la source de Chorsin (CH), située sur la droite des eaux, est de toute évidence un mélange avec des eaux de surface (Tab. 22).

- les sources froides à forte minéralisation Moingt (MGT) et Sail-sous-Couzan (S/C) sont à gauche de la droite locale. Leurs valeurs de δ peuvent être affectées soit par échange avec le gaz carbonique profond abondant, soit par une hydratation des minéraux primaires du socle (cf IV.2.3). L'exsolution de H_2S est moins probable, ce gaz n'étant pas fréquent aux émergences des sources du Massif Central (Gibert, 1996) et aucune odeur caractéristique n'étant relevée lors des prélèvements.

- les sources froides de faciès Ca-Mg-HCO_3 (Saint-Alban – SA ; Saint-Galmier – SG), tout comme la source thermale de Montrond (MTD), ont des δ moyens situés légèrement sous la droite locale des eaux météoriques (Fig. 73.1). La composition isotopique moyenne de SA, très proche de la droite locale, peut s'expliquer par une faible interaction avec l'encaissant. Sa minéralisation et les températures précédemment calculées par thermométrie (# 200°C) peuvent en être les témoins. Pour SG, cette disposition peut être liée au mélange entre les différents forages exploités. Pour MTD, des mélanges entre aquifères existent également, comme le montrent les eaux du forage Montrond 1 (Fig. 73.2 ; Tab. 22). Cependant, les interactions eau – roche à faible profondeur (20-30m) sont peu probables. Comme tous les aquifères du forage s'alignent sur une droite de pente inférieure à celle de la droite des eaux locales, peut-être existe-t-il une mise en contact avec des eaux sensibles à l'évaporation ; ou la recharge est ancienne et s'est effectuée avec une droite des eaux différente (origine méditerranéenne des pluies plus marquée ?).

Deux mécanismes principaux apparaissent pour les eaux minérales du Forez : interaction eau – roche en profondeur, ce qui est étayé par les calculs d'indices de saturation et de géothermométrie ; pour certaines sources (MGT, S/C), un probable effet d'interaction avec le CO_2 magmatique, voire l'existence de mélanges (CH). L'existence de ces effets sera testé plus amplement dans le paragraphe IV.4.2.

Néanmoins, il faut être prudent en faisant des comparaisons avec la droite des eaux locales actuelles. Un effet paléoclimatique peut se surimposer (activités ^{14}C faibles). Une quasi stabilité des températures atmosphériques depuis 10000 ans est estimée (Petit et al., 1999), alors qu'une température inférieure de 6 à 8°C régnait il y a 20000 ans. Cette variation de température amène à diminuer les rapports isotopiques de –1,6‰ en ^{18}O et –9‰ en ^{2}H (gradients Tab. 7). Cette hypothèse d'effet paléoclimatique sera testée par la suite lorsque seront abordés les contenus en carbone 14 des eaux minérales, en complément des informations apportées par le forage Montrond 1 (IV.6.2) et des effets d'échange isotopique entre eau et gaz carbonique.

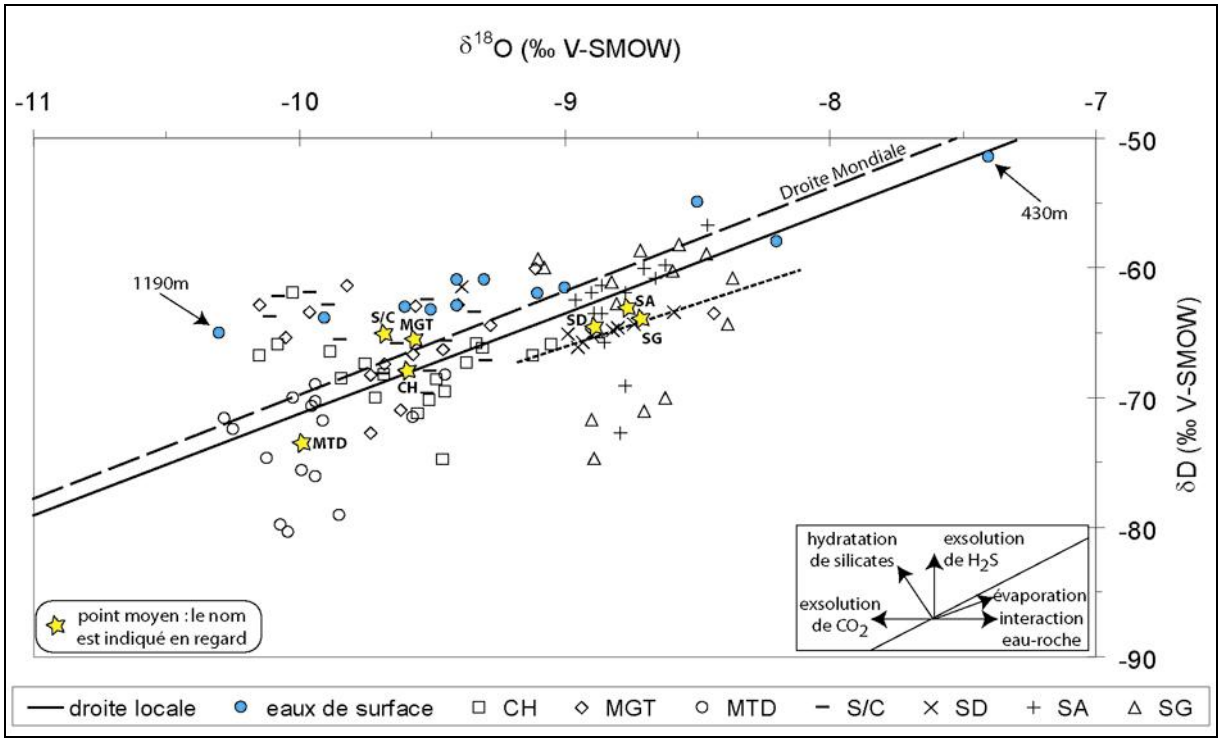


Fig. 73.1 : rapports isotopiques $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$ des eaux minérales du Forez ; les compositions moyennes des aquifères de surface sont indiquées ; types d'interactions figurés en cartouche d'après Cartwright et al., 2002.

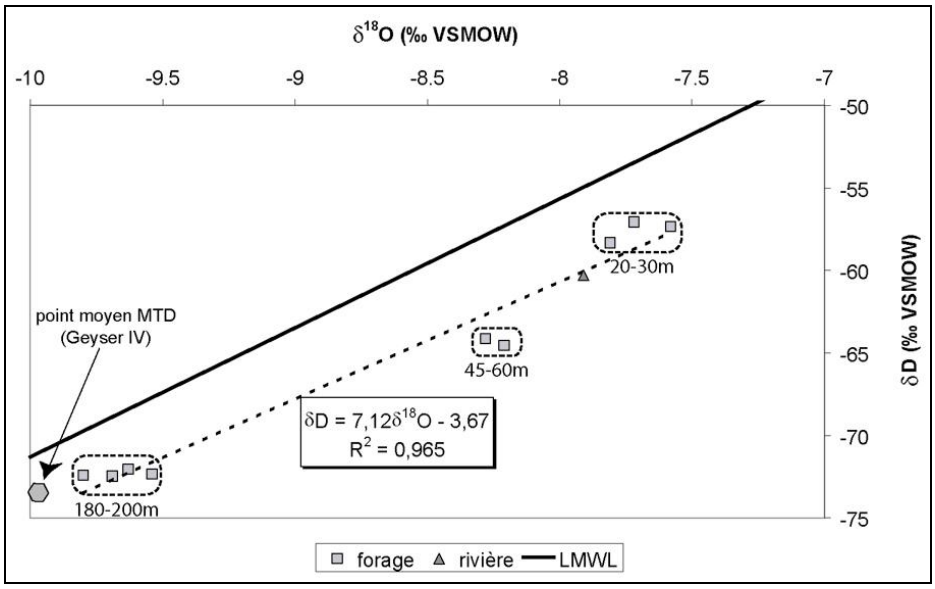


Fig. 73.2 : rapports isotopiques $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$ relevées dans le forage de Montrond et relation à la droite locale des eaux météoriques.

IV.4.1.2 Variations temporelles

Les variations temporelles en $\delta^{18}O$ et δD (Fig. 74) montrent une faible sensibilité aux variations atmosphériques. Aucune relation entre rapports isotopiques et température de l'eau n'existe (annexes Fig. A.7.1), pas plus qu'avec la température extérieure (annexes Fig. A.7.2). Certaines modifications sont causées par des contaminations par des eaux de ruissellement. Ainsi, le point MGT de juillet 2003 (Fig. 74) est un mélange avec des eaux de ruissellement d'un orage. Les compositions chimiques sont également modifiées (annexes Tab. A.5.3).

Entre 2001-2002 et en 2003 (année sèche), les rapports moyens des sources diminuent (Tab. 23), surtout en hydrogène, plus sensible au fractionnement. Les rapports isotopiques des eaux minérales sensibles aux mélanges (CH, SG, voire S/C ; Tab. 22) doivent donc être moins affectés. Les diminutions constatées en 2003 peuvent donc résulter de l'épisode de sécheresse ou de variations naturelles des sources. Pour Chorsin, la faible diminution des δ en 2003 est sans doute due à des interactions avec des pluies d'altitude, plus appauvries.

		$\delta^{18}O$	±	$\delta^{2}H$	±
CH	2001-2002	-9.5	0.4	-66.2	2.0
	2003	-9.7	0.2	-69.5	2.5
MGT	2001-2002	-9.6	0.4	-63.3	1.9
	2003	-9.5	0.5	-68.2	3.0
MTD	2001-2002	-9.9	0.3	-71.5	3.0
	2003	-10.1	0.1	-77.1	2.4
S/C	2001-2002	-9.9	0.3	-63.3	1.3
	2003	-9.5	0.1	-66.7	2.3
SD	2001-2002	-9.0	0.4	-63.5	1.7
	2003	-8.9	0.1	-65.1	0.9
SA	2001-2002	-8.6	0.1	-59.9	1.9
	2003	-8.9	0.1	-65.0	4.0
SG	2001-2002	-8.7	0.3	-60.1	1.9
	2003	-8.8	0.1	-68.1	5.1

Tab. 23 : comparaison des compositions isotopiques moyennes des sources minérales au cours des années 2001-2002 et 2003 ; la déviation standard est également indiquée.

Une cyclicité dans la variation des rapports isotopiques $\delta^{18}O$ et δD peut être mise en évidence pour les eaux du faciès Ca-Mg-HCO_3, notamment pour les mélanges CH et SG, en moindre amplitude pour SA et de manière plus grossière avec les eaux Na-HCO_3 (S/C, MTD en 2002, 2003) (Fig. 74). Les rapports les plus enrichis sont enregistrés durant les mêmes périodes pour CH et SG, en mars – avril et en septembre – octobre, soit un cycle proche de 6 mois. D'autre part, le cycle mis en évidence coïncide avec la fin (ou le début) de l'hiver et de l'été météorologique (II.8.1.3). Les rapports en oxygène sont en général légèrement plus appauvris en fin d'hiver, ce qui peut correspondre à des interactions avec des eaux de surface influencées par les conditions atmosphériques extérieures. Ces variations se retrouvent aussi dans les rapports en hydrogène (Fig. 74), aux mêmes périodes et surtout pour SA et SG.

Le faciès Ca-Mg-HCO_3 est donc plus sensible à des variations saisonnières que les eaux Na-HCO_3±Cl. Ces eaux sont probablement plus affectées par des phénomènes de mélange avec des aquifères plus superficiels, qui expérimentent des variations saisonnières plus marquées. La répartition géographique des émergences des sources n'apparaît pas comme un facteur déterminant. Toutefois, les eaux à rapports isotopiques les plus variables sont toutes proches de zones de failles bordières du bassin (SA, SG) ou de fissures dans le socle (CH).

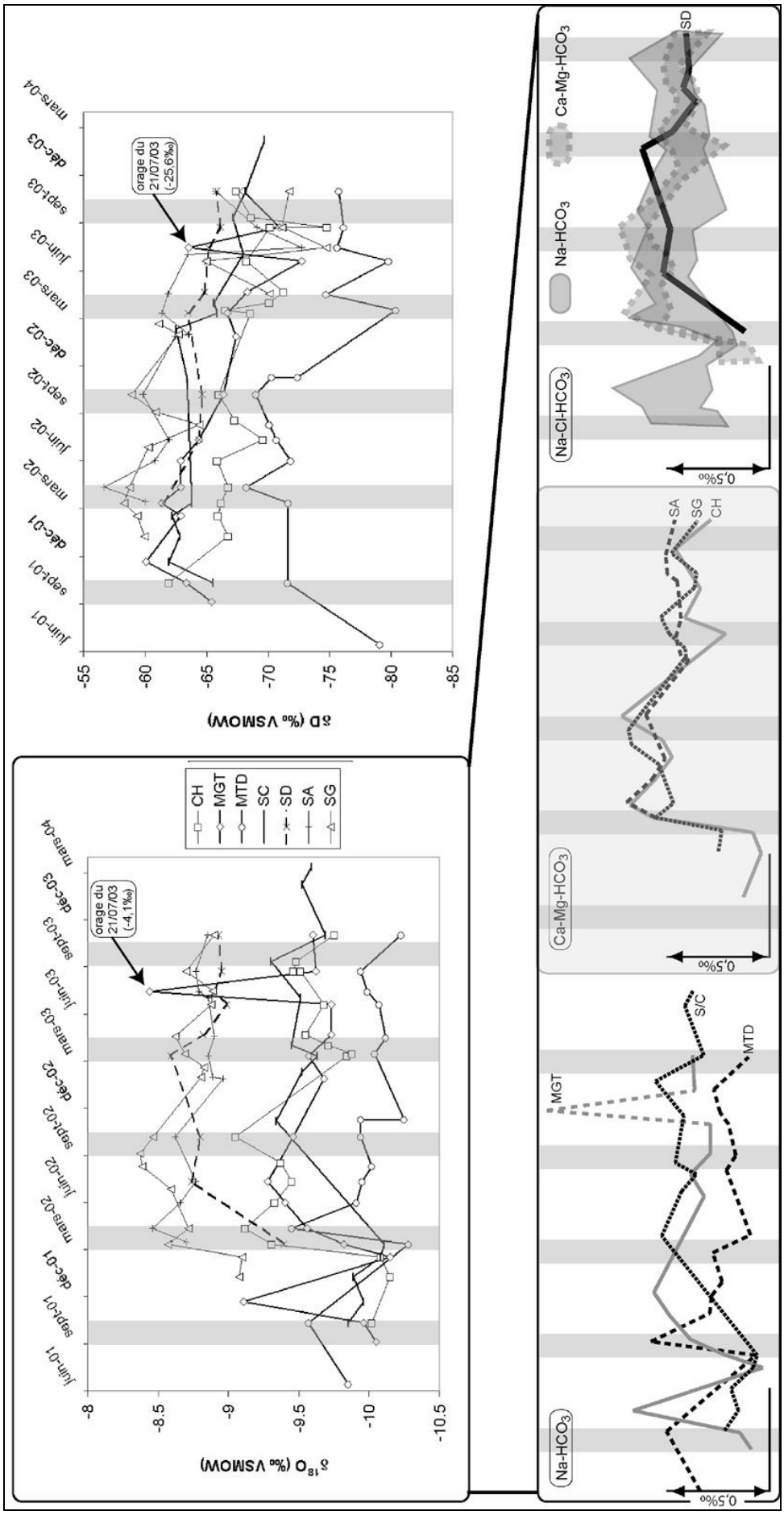


Fig. 74 : variations dans le temps des rapports isotopiques $\delta^{18}O$ (± 0,1‰ VSMOW) et $\delta^{2}H$ (±1‰ VSMOW) des eaux minérales du Forez ; le cartouche représente les variations en $\delta^{18}O$ dans le temps pour chaque faciès d'eau minérale ; les bandes verticales correspondent aux périodes (mars-avril ; septembre-octobre) durant lesquelles les rapports isotopiques les plus enrichis sont enregistrés (voir texte pour explications).

IV.4.1.3 Variations en profondeur dans l'aquifère multicouche de la plaine du Forez (forage Montrond 1)

Une indication supplémentaire sur les phénomènes de mélange est apportée par le forage réalisé courant mars 2005 à Montrond. Trois aquifères principaux ont été reconnus : entre 20 et 30m, puis entre 45 et 60m et enfin entre 180 et 200m. Cette reconnaissance des aquifères est cependant partielle : l'eau de Geyser IV est captée dans un forage de plus de 500m de profondeur. Les trois aquifères peuvent être considérés (Fig. 75.1 et 75.2) comme distincts (rapports moyens indiqués sur les figures). Les rapports isotopiques s'étalent de –7,7 à –9,7‰ VSMOW $\delta^{18}O$: le premier niveau est proche de la composition du lavoir de Chavagneux, le second proche de St-Rambert (bordure Ouest du bassin ; Tab. A.5.2), et le troisième (180m) proche de la signature moyenne de l'eau thermale (Tab. A.5.3).

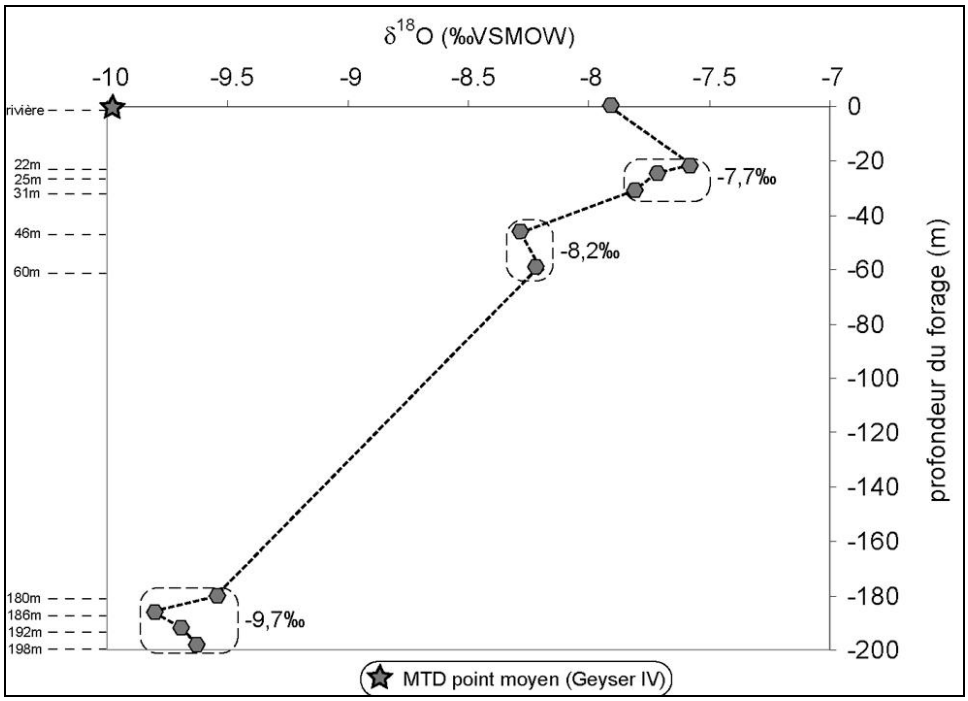


Fig. 75.1 : variations en fonction de la profondeur des rapports isotopiques $\delta^{18}O$ des différents aquifères du forage de Montrond ; le rapport de la rivière la plus proche (l'Anzieux) est indiqué en référence ; l'étoile représente le rapport isotopique du forage Geyser IV (mesure en surface).

La diminution des $\delta^{18}O$ et δD avec la profondeur (Fig. 75.1 et 75.2) peut rendre compte de deux phénomènes. Si les aquifères sont distincts, les valeurs $\delta^{18}O$ et δD témoigneraient d'altitudes de recharge différentes, de plus en plus élevées pour des profondeurs croissantes (+200m pour une différence de –20m). Or, les faibles activités ^{14}C mesurées ne semblent pas

indiquer l'existence d'aquifères d'âges différents. La présence d'eaux cônées n'est pas envisageable, le test de pompage ayant produit une eau dont les propriétés chimiques sont stables. Cette hypothèse impliquerait de plus l'existence de réseaux de failles (Fig. 72) propres à chaque zone d'alimentation, pour expliquer l'évolution constatée des rapports isotopiques. Ceci ne paraît pas raisonnable pour deux aquifères verticalement séparés de 20m. Ceci tend à favoriser l'existence d'une communication entre les différents niveaux (entre –20 et –180 m), à la faveur de failles (faille de la Mare ?) ou de chenaux sableux. La différence de composition isotopique pourrait s'expliquer par des mélanges, en proportions variables, entre des niveaux à alimentation superficielle (aquifère 20-30m, altitude de recharge 500 m ; cf Fig. 76.1) et des fluides plus profonds, saumure de bassin ou fluide hydrothermal. Compte tenu de l'altitude de recharge de l'aquifère superficiel, l'alimentation peut correspondre à une infiltration de la Loire, ou provenir des Monts du Lyonnais via les terrasses supérieures de la Loire (Vollon, St-Rambert ; annexes Tab. A.5.2).

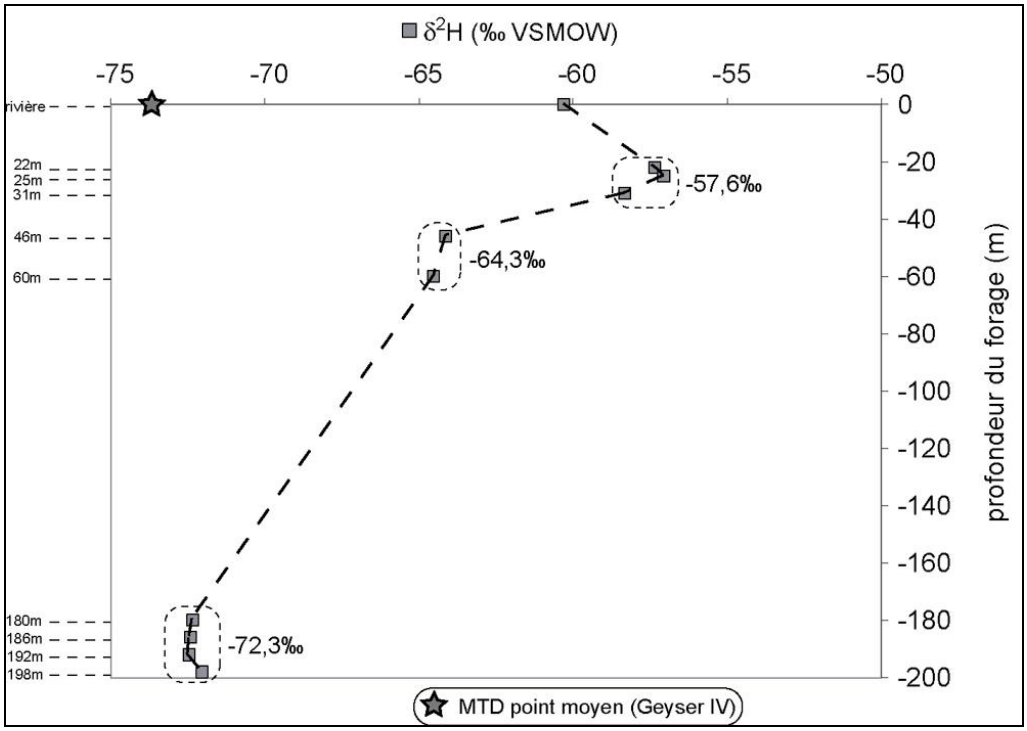


Fig. 75.2 : variations en fonction de la profondeur des rapports isotopiques δ^2H des différents aquifères du forage de Montrond ; le rapport de la rivière la plus proche est indiqué en référence ; l'étoile représente le rapport isotopique du forage Geyser IV (mesure en surface).

IV.4.1.4 Altitudes d'infiltration

Les rapports isotopiques des sources minérales indiquant une origine météorique, un essai de détermination des altitudes de recharge peut être entrepris. Les eaux étudiées n'étant pas hyper-thermales, il n'y a pas de perte de vapeur (donc pas de fractionnement $H_2O_{liquide}$ / H_2O_{vapeur}). Les deltas ($\delta^{18}O$ et δD) doivent donc être proportionnels à l'altitude de recharge, en l'absence de modifications des rapports isotopiques en profondeur (cf infra). De plus, on considère ici que la recharge s'effectue dans des conditions atmosphériques proches des conditions actuelles. Si un effet paléoclimatique existe, les gradients d'altitude des précipitations actuelles (Tab. 24) ne sont certainement pas utilisables. Les altitudes seraient dans ce cas surestimées d'environ 50m pour une diminution de 1°C de la température (gradient adiabatique saturé de l'atmosphère : -0,5°C par 100m ; www.meteo.fr). Enfin, ces déterminations d'altitudes de recharge sont faites sur les rapports isotopiques des eaux échantillonnées. Les deltas initiaux des eaux en profondeur ont pu être modifiés par exsolution de CO_2, de H_2S ou hydratation de silicates. La validité des altitudes d'impluvium calculées sera envisagée dans le paragraphe suivant (IV.4.2).

Les rapports isotopiques des eaux minérales correspondent à des valeurs d'aquifères d'altitude (Tab. 17), alors qu'elles émergent à l'altitude du bassin sédimentaire. On peut estimer l'altitude moyenne de l'impluvium en comparant les rapports isotopiques et les teneurs des pluies locales. Toutefois, les résultats sont erronés car les rapports isotopiques des eaux de pluies sont généralement plus enrichis que ceux des eaux de surface (Blavoux, 1978). Il est donc plus raisonnable d'utiliser directement les enregistrements (en oxygène et hydrogène) dont on dispose sur les eaux de surface.
Pour ces calculs, les teneurs des sources du bassin versant du Furan (aquifères sur socle à aires de recharge déterminées par isotopie) et des eaux de l'Ouest du bassin du Forez sont utilisées (Fig. 76.1, 76.2 et Tab. 24).

Les eaux résultant de mélanges (CH, MTD, SG) ne peuvent pas faire l'objet d'une détermination d'aire de recharge correcte, tout comme les eaux du forage de Montrond, dont la dispersion des valeurs isotopiques se traduit par des altitudes d'alimentation très différentes.

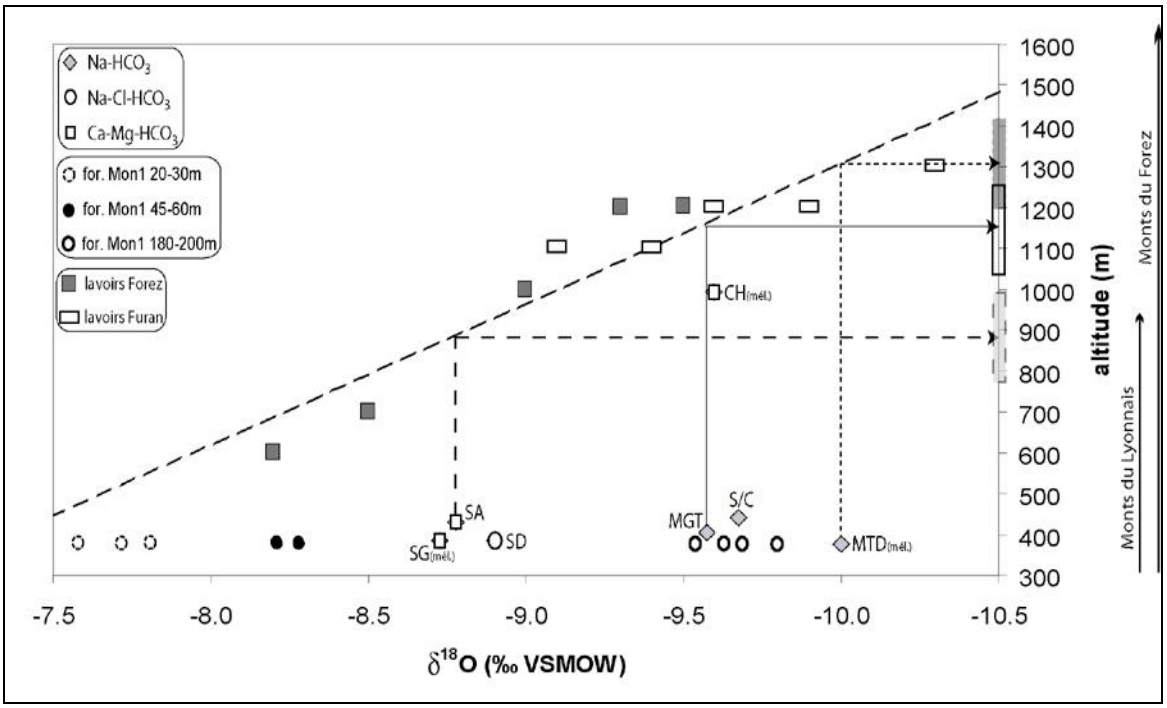


Fig. 76.1 : aires de recharge déduites des $\delta^{18}O$ des eaux minérales du Forez et des compositions isotopiques des lavoirs du bassin versant du Furan (Monts du Pilat) et des lavoirs des Monts du Forez ; les eaux minérales résultants de mélanges attestés (tritium ou forages) sont indiquées par (mél.).

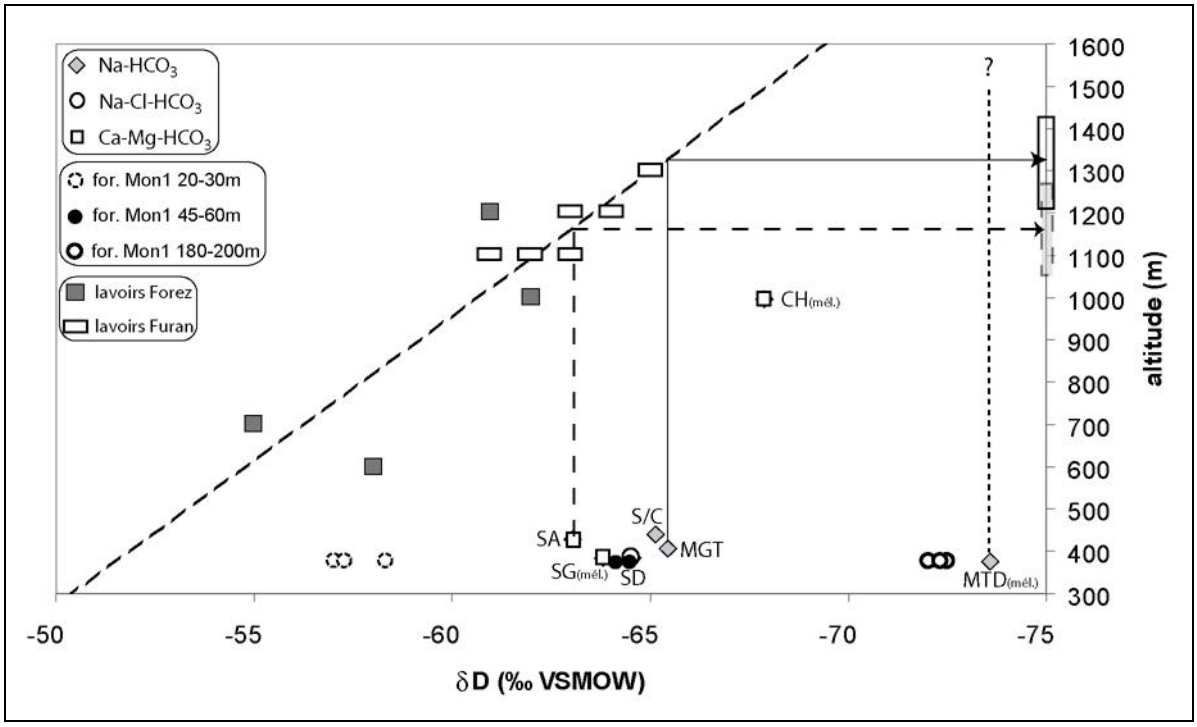


Fig. 76.2 : aires de recharge déduites des δD des eaux minérales du Forez et des compositions isotopiques des lavoirs du bassin versant du Furan (Monts du Pilat) et des lavoirs des Monts du Forez ; les eaux minérales résultants de mélanges attestés (tritium ou forages) sont indiquées par (mél.).

Pour les autres sources (pas ou peu de mélange), les altitudes calculées en utilisant les δD sont supérieures d'environ 200m à celles observées en $\delta^{18}O$ (Tab. 24). Ceci peut être lié au plus fort fractionnement affectant les isotopes de l'hydrogène, cet atome étant de plus moins sensible aux échanges eau – roche. Ces interactions produisent en effet une augmentation des $\delta^{18}O$, donc induisent une sous-estimation des altitudes de recharge.

Néanmoins, les altitudes déterminées selon plusieurs méthodes (Tab. 24) sont cohérentes avec la topographie actuelle. MGT et S/C ont une aire de recharge localisée dans les Monts du Forez (1100 à 1300m). SA et SD ont des zones d'alimentation moins élevées. SA est située à la limite du bassin de Roanne, où les Monts du Forez ont une altitude moins importante. Pour Salt-en-Donzy, les altitudes sont compatibles avec une infiltration dans les Monts du Lyonnais, mais les valeurs déduites des δD sont probablement surestimées.

	$\delta^{18}O$ (‰ VSMOW)	δD (‰ VSMOW)	altitude émergence	aire de recharge (m)	
Rochetaillée	-9.4	-61	760	1100	calculée (FlowPC)
Essertines dauphin	-9.1	-62	970	1100	
Essertines	-9.4	-63	970	1100	
Barbanche	-9.9	-64	1015	1200	
Bessat	-10.3	-65	1190	1300	
Tarentaise	-9.6	-63	1100	1200	
Montarcher	-9.3	-61	1110	1200	détermination cartographique
Montarcher village	-9.5	-63	1155	1200	
Sauvain	-9	-62	900	1000	
St Rambert	-8.2	-58	390	600	
Vassalieu	-8.5	-55	600	700	

	SOURCES MINERALES							
					aire de recharge (m)			
		$\delta^{18}O$ (‰ VSMOW)	δD (‰ VSMOW)	altitude émergence	pluies	BV Furan	Fig. 76.1	Fig. 76.2
	MGT	-9.6	-65.4	405	850-1090	1150	1150	1330
	S/C	-9.7	-65.1	440	1000-1150	1180	1200	1300
	SD	-8.9	-64.5	385	660-780	1050	930	1260
	SA	-8.8	-63	430	600-730	1010	890	1150
MELANGES	CH	-9.6	-67.9	995	1000-1100	1160	1180	1500
	MTD	-10	-73.6	375	1150-1300	1250	1310	imp. (1900)
	SG	-8.7	-63.8	385	570-700	980	880	1200
FORAGE	for Mon1 20-30m	-7.7	-57.6	375	impossible	800-850	500-600	750-850
	for Mon1 45-60m	-8.2	-64.3	375	400-450	900	700-750	1230-1270
	for Mon1 180-200m	-9.7	-72.3	375	1000-1100	1150-1200	1150-1250	imp. (1800)

Tab. 24 : aires de recharge des eaux de surface du bassin versant du Furan (champ gris) et d'aquifères des Monts du Forez prises en référence pour le calcul des altitudes moyennes des aires de recharge des eaux minérales du Forez ; la composition isotopique moyenne des sources est indiquée. Les altitudes de recharge pour les eaux minérales du Forez sont déduites des figures 76.1 ($\delta^{18}O$) et 76.2 (δD) ; pour comparaison sont données les altitudes déterminées en utilisant les précipitations locales et les seuls lavoirs du bassin versant du Furan.

IV.4.2 Oxygène et hydrogène : types d'interactions en profondeur

Dans les paragraphes précédents, nous avons cherché à établir les relations entre la droite des eaux météoriques locales et les compositions isotopiques des sources minérales. Ensuite, nous avons tenté de déterminer des aires de recharges, qui apparaissent parfois surestimées. Les mécanismes évoqués en IV.4.1.1 peuvent modifier les compositions isotopiques initiales en oxygène et hydrogène (eaux minérales issues de précipitations locales), sans qu'il soit besoin de recourir à un effet paléoclimatique. Les différents effets qui peuvent influencer les valeurs isotopiques et les déterminations d'aires de recharge sont :

IV.4.2.1 Dégazage (exsolution) de CO_2

Cette réaction peut exister pour les sources carbogazeuses, et plus particulièrement expliquer les compositions isotopiques plus basses en oxygène à Moingt et Sail-sous-Couzan. Dans cette hypothèse, le décalage horizontal par rapport à la droite locale est au maximum de –1,3‰ VSMOW (Fig. 73.1) et permet de déterminer les proportions possibles de CO_2 exsolvé. Les températures de 20 et 250°C ont été choisies pour les calculs, représentant les conditions à l'émergence et en profondeur :

- on considère les rapports fluide/gaz du système CO_2/H_2O, dont les coefficients de fractionnement sont donnés par Bottinga (1968), Friedman et O'Neil (1977) pour la gamme 0-100°C et Truesdell (1974) pour la gamme 130-250°C ;
- on ne connaît pas la signature profonde en $\delta^{18}O$ du CO_2. Pour l'estimer, l'hypothèse suivante est émise : on considère un équilibre entre le CO_2 et le couple eau – roche encaissante, dans le cadre thermique d'un métamorphisme. La composition isotopique du CO_2 est alors calculée à 250°C (température maximale des géothermomètres), à partir de l'équilibre illite – CO_2 et des fractionnements donnés par Sheppard et Gilg (1996).
- les équations décrivant les fractionnements entre phase gazeuse et phase fluide comme entre phase fluide et roche, que l'on soit en système ouvert ou fermé, sont issues de Criss et Taylor (1986).

Les résultats de ces calculs sont donnés dans la figure 77.

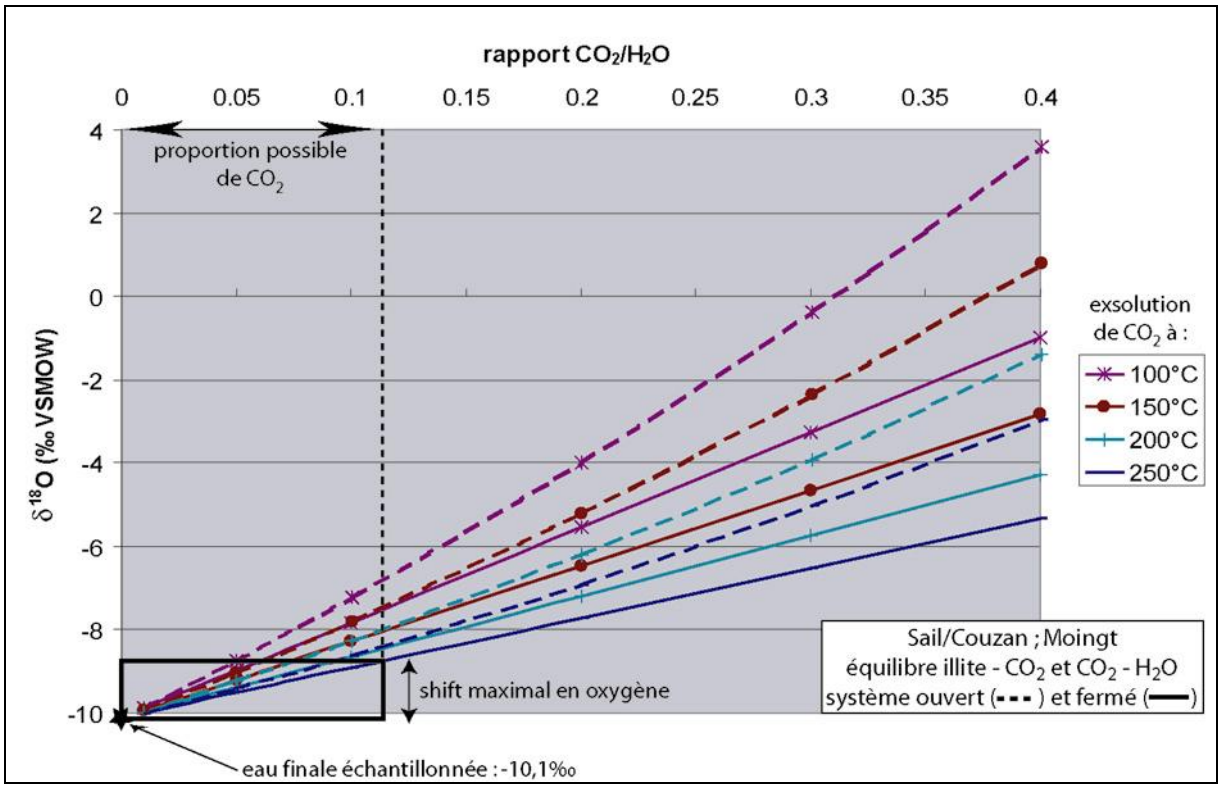


Fig. 77 : calcul de la composition isotopique en oxygène d'une **eau initiale** en profondeur, lors de l'exsolution de CO_2 ($\delta^{18}O$ = -9,85‰ VSMOW) ; la composition de l'eau minérale en surface est indiquée, tout comme les proportions maximales de gaz libérables ; voir texte pour explications.

Le décalage maximal de +1,3‰ entre eau "finale" (S/C et MGT) et eau "initiale" peut s'expliquer par l'exsolution d'au maximum 10% de CO_2 à 250°C en système clos, et environ 8% en système ouvert. Des décalages plus faibles peuvent donc être provoqués par la perte de quelques pourcents de gaz, ce qui est tout à fait envisageable dans le cas des eaux carbogazeuses étudiées. Dans le cas extrême, les altitudes de recharges de S/C et MGT seraient inférieures à celles données en IV.4.1.4, proches de 900 à 1000m. L'existence d'un effet paléoclimatique serait dans ce cas non nécessaire pour expliquer les $\delta^{18}O$ mesurés.

IV.4.2.2 Interaction eau – roche

Les interactions eau – roche peuvent exister pour les eaux minérales analysées (cf températures calculées par thermométrie), et plus particulièrement pour Salt-en-Donzy , dont elles pourraient en partie expliquer les signatures isotopiques en oxygène. Cette hypothèse n'est pas testée pour les eaux de Saint-Galmier, puisqu'elles résultent d'un mélange. La composition isotopique de la roche initiale (granite) est prise à +10‰, celle du produit d'altération final après percolation de l'eau (kaolinite) à +15‰ (C. Renac, comm. perso.). Les

coefficients de fractionnement kaolinite – eau sont ceux donnés par Sheppard et Gilg (1996). Les résultats sont présentés figure 78.

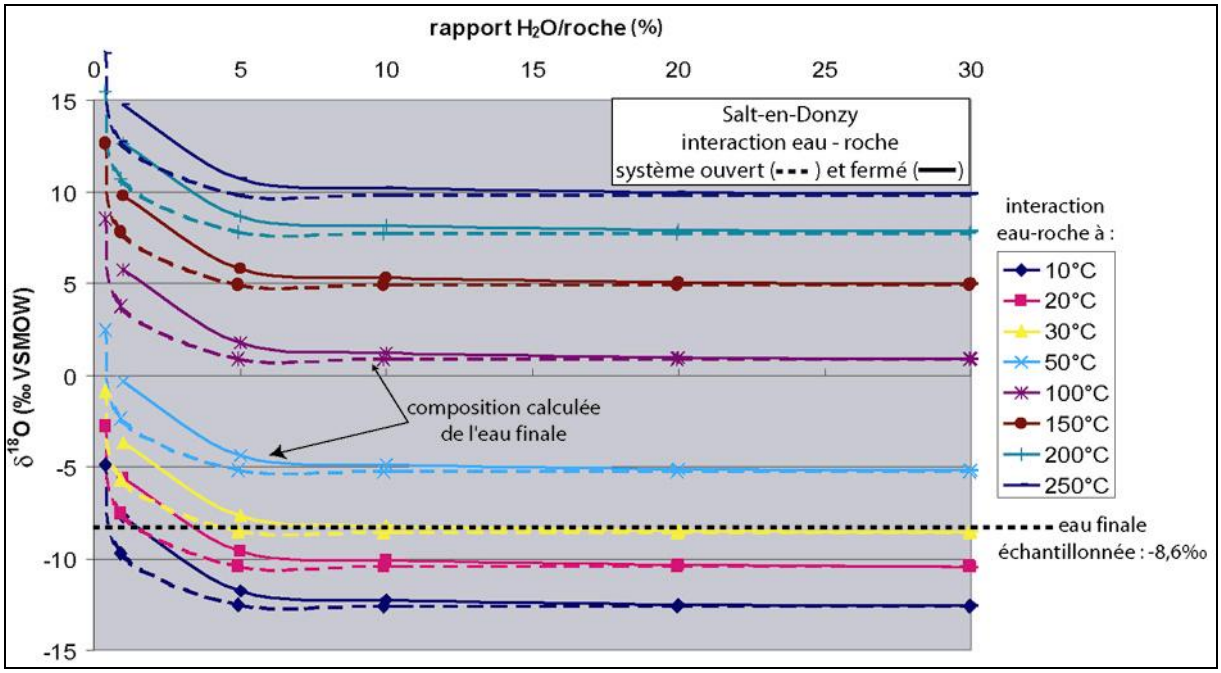


Fig. 78 : calcul de la composition isotopique en oxygène d'une **eau finale** en surface à partir de l'altération par phase fluide d'un granite en kaolinite ; voir texte pour explications.

Seule la courbe d'équilibre à 30°C reflète la composition isotopique de SD. Cependant, même si cette température correspond à la celle d'émergence, la température la plus vraisemblable en profondeur est celle calculée par géothermométrie (130°C). Les interactions eau – roches sont en effet des phénomènes de haute température. Il n'est pas possible de déterminer les proportions fluide/roche : le phénomène ayant lieu à haute température (130°C), la proportion d'eau affectée par l'interaction eau – roche doit être très faible pour donner des $\delta^{18}O$ proches de –8‰ (la valeur de l'eau finale à 130°C se situe entre +5 et+10‰). L'eau de Salt-en-Donzy est alors un mélange, mais cette hypothèse n'est toutefois pas vérifiable.

IV.4.2.3 Hydratation de silicates

L'hydratation de l'encaissant est un autre mécanisme pouvant modifier les rapports isotopiques des eaux minérales. Les calculs d'indices de saturation montrent que ces phénomènes existent (Tab. 20). Il paraît cependant plus approprié de proposer ce mécanisme d'hydratation pour les sources de Moingt et Sail-sous-Couzan, situées à gauche de la droite

des eaux météoriques (Fig. 73.1). Pour tester cette hypothèse, on examine les effets sur l'hydrogène, plus forts que ceux sur l'oxygène. Le calcul utilise les coefficients de fractionnement (sur l'hydrogène) illite/smectite – H_2O de Capuano (1992) et Girard et Fouillac (1995). La signature en deutérium du granite est fixée à -60‰ (champ des eaux magmatiques ; Sheppard, 1986). Les résultats sont fournis dans la figure 79.

Le shift maximal en hydrogène pour MGT et S/C est de +9‰, donc l'eau initiale doit être proche de –72‰ VSMOW (ainsi la composition isotopique de l'eau est sur la droite des eaux). Cette composition peut être atteinte à haute température (>200°C), en système ouvert plus rapidement qu'en système clos, pour des proportions eau/roche supérieures à 50% (Fig. 79). Ces proportions sont très importantes, aussi ce mécanisme n'apparaît pas comme le mécanisme majeur de modification des rapports isotopiques des eaux. De plus, les altitudes de recharges que l'on peut alors calculer sont trop importantes pour les topographies actuelles, ce qui impliquerait une infiltration sous conditions climatiques plus froides.

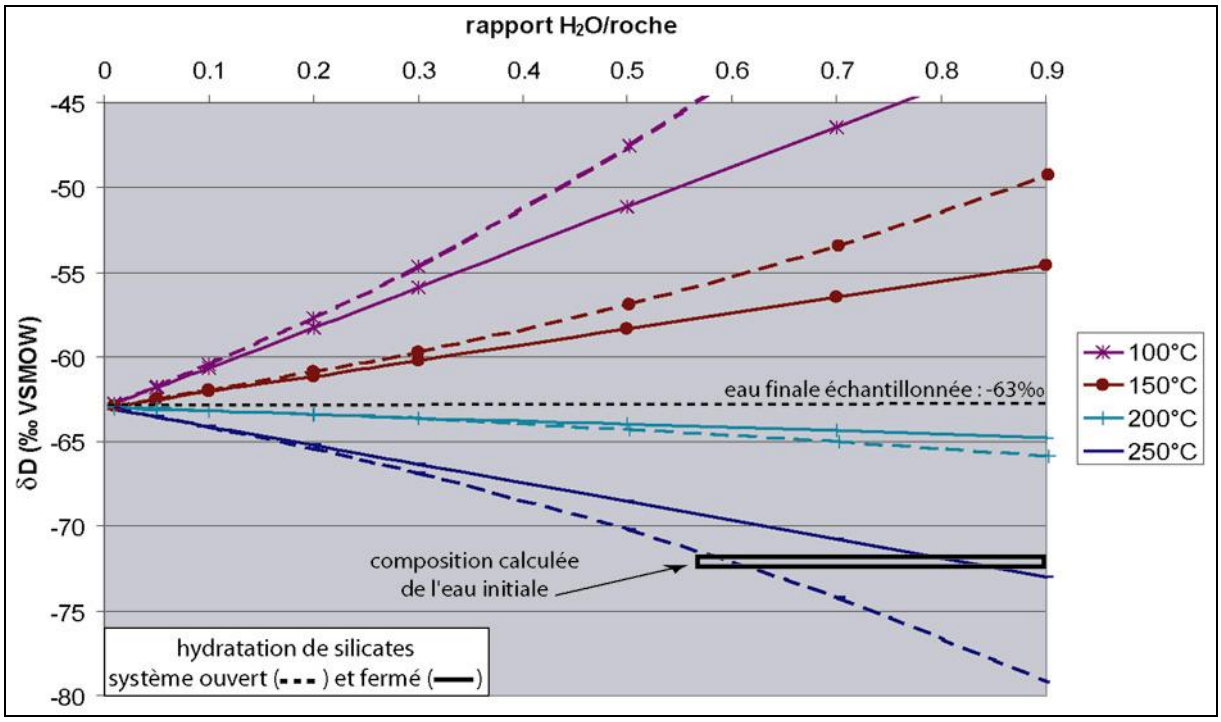


Fig. 79 : calcul de la composition isotopique en hydrogène d'une eau en profondeur dans le cas d'une hydratation de silicates ; voir texte pour explications.

IV.4.2.4 Exsolution de H_2S

La démixtion de ce gaz peut exister pour les sources présentant une odeur soufrée à l'émergence, c'est à dire Montrond (mélange Geyser IV) et le pôle profond de ce mélange qui sera calculé par la suite (cf IV.4.4). Quelques pourcents d'H_2S (3%) gaz libéré donneraient un shift proche de +10‰ δD VSMOW : une eau initiale à –72‰ aurait, après libération du gaz, une signature de –63‰. Dans le cas des signatures de Moingt et Sail-sous-Couzan, son existence est peu réaliste.

IV.4.3 Carbone 13

IV.4.2.1 CO_2 gaz

La seule source pour laquelle un échantillonnage direct des gaz à l'émergence (99% CO_2) a été effectué est la source Ca-Mg-HCO_3 de Chorsin. Les rapports isotopiques sont présentés dans le tableau 25 : le $\delta^{13}C$ moyen est de –3,5‰ VPDB, dans le champ des CO_2 de dégazage volcanique (cf III.6.5). Cependant, des réactions métamorphiques peuvent donner des valeurs isotopiques identiques. En effet, les indices de saturation calculés pour les espèces carbonatées sont négatifs au dessus de 100°C. Du CO_2 gaz peut donc être libéré. Les faibles proportions de roches métamorphiques carbonatées rencontrées localement (ex. veines dans vaugnérites et poches de skarn – Chazelles-sur-Lyon ; Moingt) ne peuvent ni produire les valeurs isotopiques mesurées sur les carbonates du forage Mon1 ($\delta^{13}C_{calcite\ à\ l'équilibre}$ proche de +6‰ alors que $\delta^{13}C_{calcite\ mesuré}$ varie de +2,2‰ à –8,1‰ VPDB) ni les grandes quantités de gaz libre rencontrées aux émergences. L'origine profonde des gaz (métamorphisme de plus haute température : volatilisation, dégazage) est donc attestée.

CO_2 Chorsin	$\delta^{18}O_{H2O}$ (‰ VSMOW)	$\delta^{13}C_{CO2}$ (‰ VPDB)
29/08/2002	-9.4	-3.9
20/03/2003	-9.8	-3
25/03/2003	-9.9	-3.3
16/09/2003	-9.5	-3.8
moyenne	-9.7	-3.5
±	0.2	0.4

Tab. 25 : rapports isotopiques $\delta^{18}O$ et $\delta^{13}C$ du CO_2 gaz échantillonné à Chorsin.

IV.4.2.2 Carbone Inorganique Dissous

IV.4.2.2.1 Signatures carbone 13

Deux groupes s'individualisent (Fig. 80 et Tab. A.5), selon la nature, gazeuse ou non, de l'eau à l'émergence. Les eaux gazeuses sont fortement marquées par la signature en carbone du CO_2 d'origine profonde (IV.4.2.1). Cette signature ne dépend ni de la teneur en bicarbonates ni de la localisation géographique de la source. Les eaux fortement minéralisées (MGT) ont des $\delta^{13}C_{CTD}$ très proches de ceux du CO_2 libre échantillonné à Chorsin.

L'eau non gazeuse de Salt (SD) a des rapports (–11,8‰ $\delta^{13}C_{CITD}$) intermédiaires entre ceux des eaux de surface (St-Rambert : –16,3‰) et ceux des eaux gazeuses. Ces $\delta^{13}C$ sont comparables à ceux de l'aquifère 20-30m du forage Mon1, ou ceux de la rivière Vollon (terrasse de la Loire). Les températures des géothermomètres sont proches de 150°C pour SD. Sous cette température, les indices de saturation vis à vis des carbonates sont positifs. Les $\delta^{13}C$ de SD ne peuvent pas provenir d'une interaction avec des roches carbonatées. Cette valeur de ^{13}C peut par contre provenir d'une interaction avec des aquifères plus superficiels, sièges d'hydrolyse de silicates par des eaux riches en CO_2 biogénique.

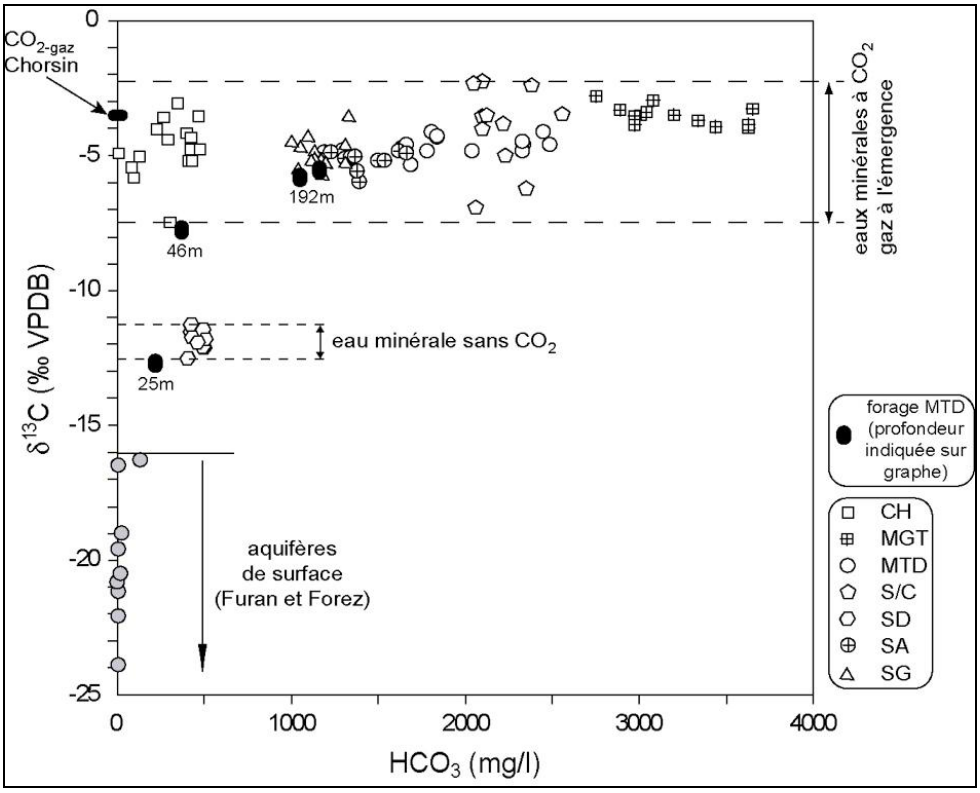


Fig. 80 : $\delta^{13}C$ du Carbone Total Dissous en fonction de la teneur en bicarbonates des eaux minérales du Forez et des aquifères du forage de Montrond ; le $\delta^{13}C_{CO2}$ indiqué pour Chorsin est mesuré sur le CO_2 gaz échantillonné à l'émergence.

IV.4.2.2.2 $\delta^{13}C$, alcalinité et p_{CO2}

Deux précipités distincts de $BaCO_3$ ont été faits lors des prélèvements (Tab. A.4.3). Le premier, fait à l'exutoire (minimisation du dégazage), contient les espèces HCO_3^- + H_2CO_3 + $CO_{2(gaz)}$, le second, après dégazage par agitation mécanique, uniquement HCO_3^- + H_2CO_3. Si le pH varie peu, la différence de poids entre les deux précipités permet d'estimer la quantité de CO_2 gaz présente dans l'eau au moment de l'échantillonnage. Cette quantité sera comparée à la pression partielle de CO_2 à l'équilibre (p_{CO2}), calculée à partir des mesures d'alcalinité.

La Figure 81 montre les rapports $\delta^{13}C$ mesurés sur les précipités produits à partir d'eaux dégazées, pour les eaux du faciès Na-HCO_3 (Fig. 81.1) et Ca-Mg-HCO_3 (Fig. 81.2). Aucune variation dans le temps ne peut être mise en évidence. Deux remarques sont à formuler : 1) les signatures isotopiques du couple carbonates + bicarbonates sont beaucoup plus variables que celles du trio carbonates + bicarbonates + gaz ; 2) les eaux moins riches en CO_2 gaz ont une variabilité assez forte des pourcentages de carbone, indiquant une fluctuation de l'influx gazeux.

Les eaux des différents faciès (Fig. 81.1 et 81.2) ont des $\delta^{13}C_{+CO2}$ qui tendent vers des valeurs mantelliques. Pour S/C (faciès Na-HCO_3), au delà de 0,1% de différence de pourcentage de carbone, les rapports $\delta^{13}C_{+CO2}$ tendent vers –5 à –6‰ VPDB. Un phénomène de fractionnement lié au gaz lift n'est pas envisageable, S/C étant pompée sous le point de bulle. Comme signalé précédemment, ces valeurs peuvent résulter de phénomènes profonds (décarbonatation métamorphique), ou bien d'une plus grande quantité de CO_2 profond injecté (on ne connaît que la valeur du CO_2 qui s'échappe à l'équilibre à pression atmosphérique, proche de –3,5‰).

La figure 82 montre la différence $\delta^{13}C_{+CO2} - \delta^{13}C_{-CO2}$. Les eaux Ca-Mg-$HCO_3$ admettent une plus grande variation des $\delta^{13}C$ par rapport aux eaux Na-HCO_3. Pour ces dernières, plus la proportion de CO_2 augmente, plus les $\delta^{13}C_{-CO2}$ sont négatifs. Deux prélèvements (S/C 18/02/03 et 15/03/04) marquent cette tendance et pourraient être une conséquence de la variabilité des apports de CO_2 profond précédemment évoquée, en relation avec une éventuelle présence de carbone métamorphique (asymptote vers –6‰ VPDB).

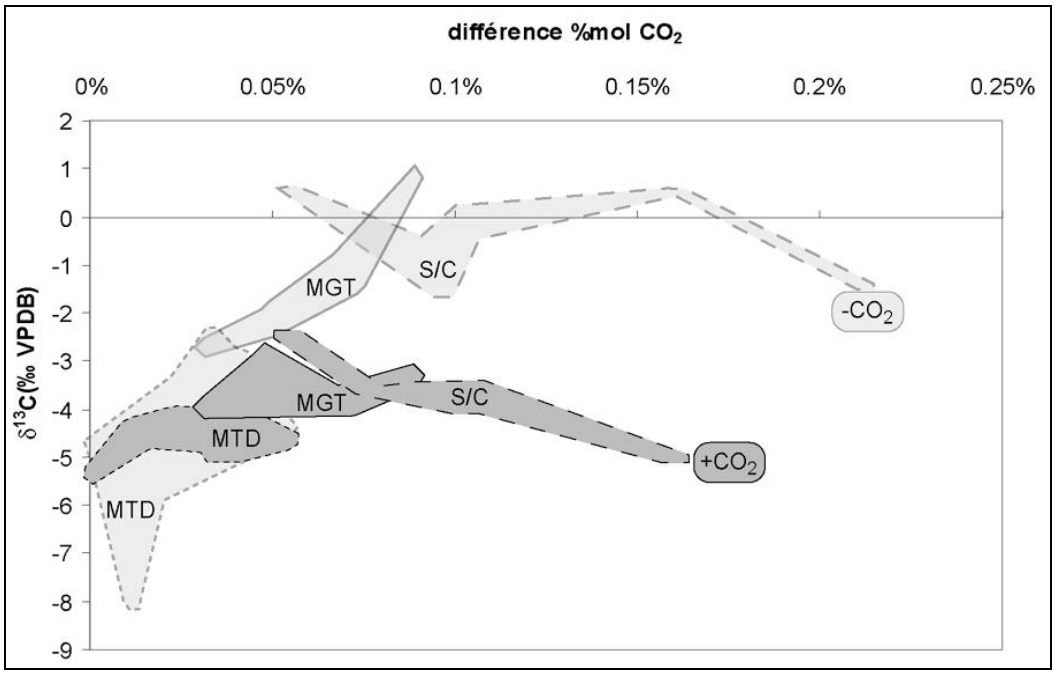


Fig. 81.1 : relation différence de pourcentage molaire entre précipité de $BaCO_3$ (HCO_3^- + CO_3^{2-} + CO_2) – précipité de $BaCO_3$ (HCO_3^- + CO_3^{2-}) et $\delta^{13}C$ – eaux du faciès Na-HCO_3.

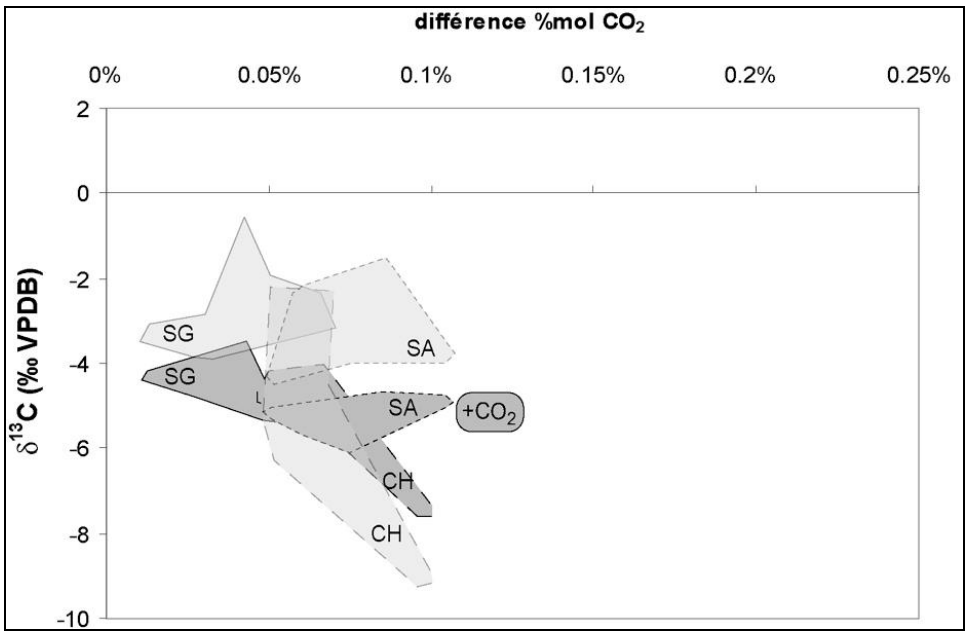


Fig. 81.2 : relation différence de pourcentage molaire entre précipité de $BaCO_3$ (HCO_3^- + CO_3^{2-} + CO_2) – précipité de $BaCO_3$ (HCO_3^- + CO_3^{2-}) et $\delta^{13}C$ – eaux du faciès Ca-Mg-HCO_3.

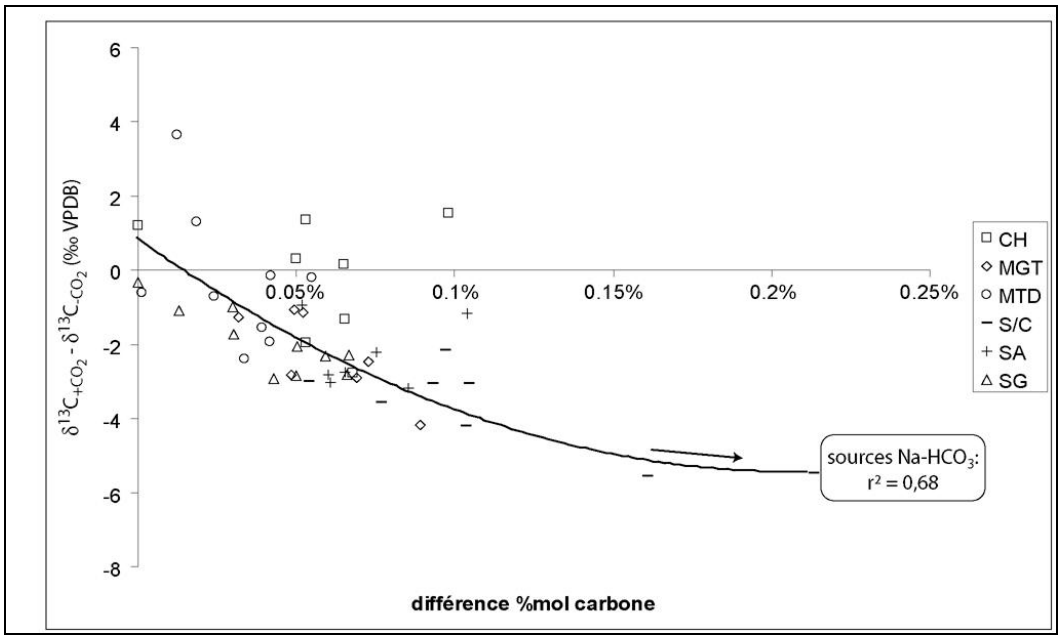


Fig. 82 : relation différence de pourcentage molaire entre précipité de $BaCO_3$ (HCO_3^- + CO_3^{2-} + CO_2) – précipité de $BaCO_3$ (HCO_3^- + CO_3^{2-}) et $\delta^{13}C_{+CO2} - \delta^{13}C_{-CO2}$; la courbe figure la relation pour les eaux du faciès Na-HCO_3.

Le report des variations de pourcentage de carbone en fonction de l'alcalinité et de p_{CO2} met en évidence le comportement similaire de S/C (Na-HCO_3) et des eaux Ca-Mg-HCO_3 (Fig. 83). L'augmentation de la quantité de CO_2 libre à l'émergence se traduit soit par une faible augmentation de l'alcalinité (SA, SG), soit par une légère diminution (CH, S/C). Ces quatre sources (S/C, SA, SG, CH) apparaissent ne plus pouvoir dissoudre de CO_2 et d'espèces CO_3^{2-} et HCO_3^- (alcalinité stable), au contraire de MGT et MTD (Fig. 83). Pour MGT et MTD, une partie de l'alcalinité peut donc être liée à la dissolution de CO_2 gaz, dont l'origine profonde (carbone mort) diminue l'activité ^{14}C, sans qu'il soit possible d'en estimer la proportion.

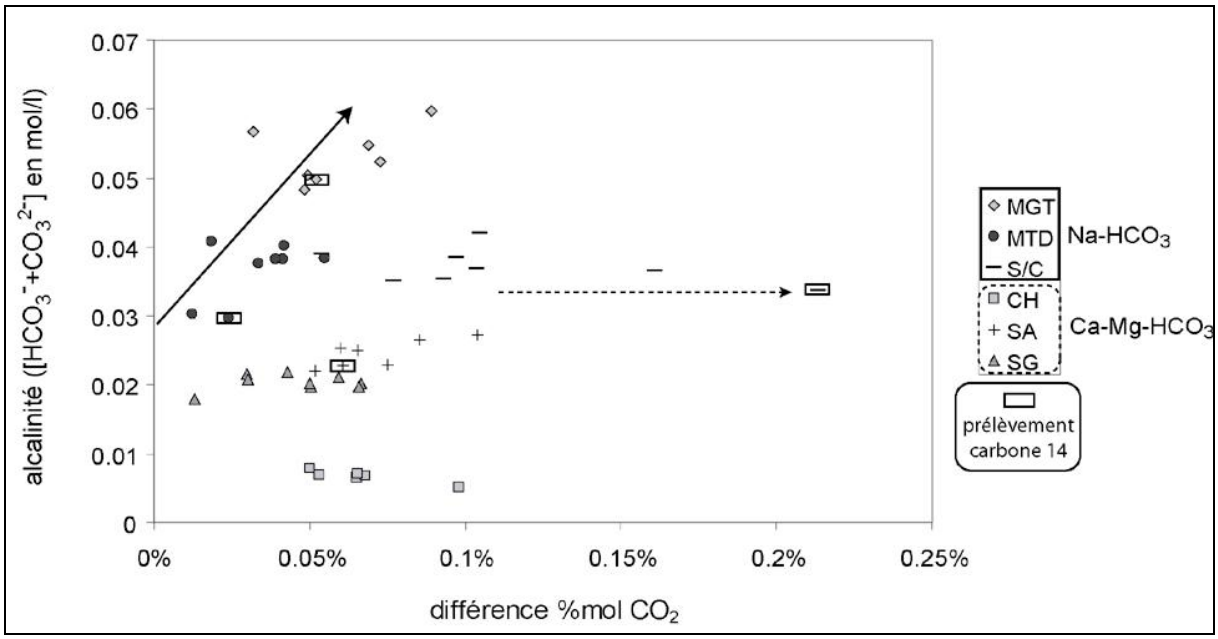


Fig. 83 : relation différence de pourcentage molaire entre précipité de $BaCO_3$ (HCO_3^- + CO_3^{2-} + CO_2) – précipité de $BaCO_3$ (HCO_3^- + CO_3^{2-}) et alcalinité des eaux du faciès Na-HCO_3.

IV.4.4 Mélanges entre aquifères (forage Montrond 1)

IV.4.4.1 Mélanges entre aquifères : relation oxygène – hydrogène

En examinant la relation entre les rapports isotopiques en carbone et ceux de l'oxygène (Fig. 84), il apparaît une relation entre un possible pôle profond à $\delta^{18}O$ plus appauvri que Geyser IV (indiqué par le point d'interrogation) et un pôle de surface (aquifère 20-30m par exemple). Cette relation graphique peut se traduire mathématiquement par un calcul de courbe de mélange, les différents niveaux aquifères n'étant pas graphiquement reliés par une droite. Cette hypothèse de départ des calculs qui vont suivre est simplificatrice, mais peut permettre une estimation des rapports isotopiques d'un aquifère profond (> à 200m) en l'absence de mesures in-situ sur toute la puissance de la pile sédimentaire du graben.

Les estimations de mélange réalisées utilisent les rapports isotopiques en ^{13}C, ^{2}H et ^{18}O et les pourcentages de carbone des aquifères du forage. Par ailleurs, le mélange Geyser IV et le pôle "eau de surface" de St-Rambert servent de référence pour contraindre le calcul de la composition isotopique ($\delta^{18}O$, δD et $\delta^{13}C$) du pôle minéral profond. La procédure de calcul se déroule comme suit : le $\delta^{18}O$ de l'eau est fixé, et l'on calcule le δD en faisant intervenir les proportions molaires d'oxygène et d'hydrogène dans l'eau. Une faible variation de cette proportion amène non plus à considérer une droite mais une courbe de mélange. Ensuite, $\delta^{18}O$

et δD étant déterminés, le calcul du $\delta^{13}C$ peut s'effectuer, en tenant compte des proportions molaires de carbone dans les deux pôles considérés pour le calcul du mélange.

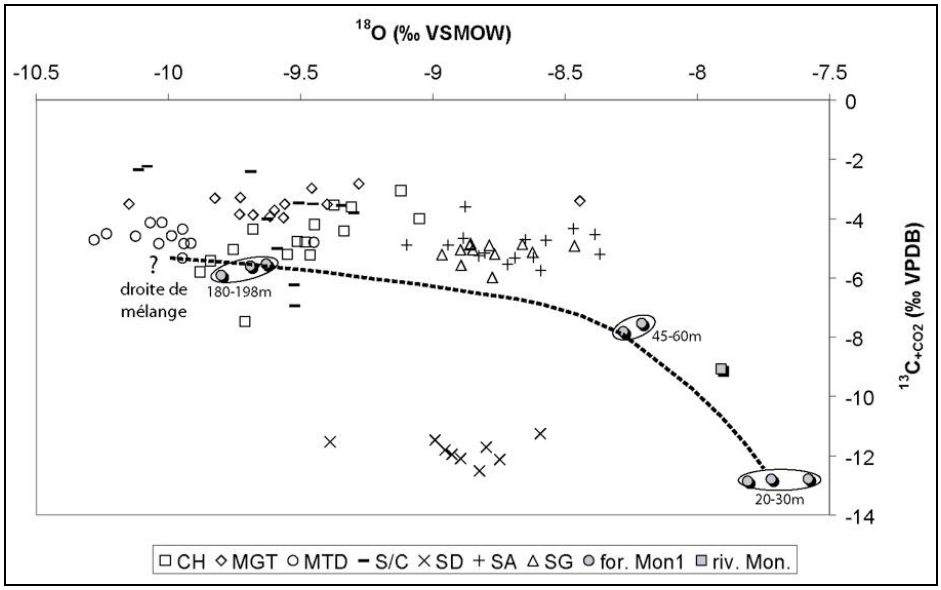


Fig. 84 : $\delta^{13}C$ du Carbone Total Dissous ($HCO_3^- + CO_3^{2-} + CO_{2(gaz)}$) en fonction des $\delta^{18}O$ des eaux minérales du Forez et des aquifères du forage de Montrond (profondeurs indiquées sur le graphe) ; MTD représente le mélange Geyser IV.

- **mélanges $\delta^{18}O/\delta D$: principe**

Dans un premier temps, on utilise les rapports $\delta^{18}O$ et δD, puisque les rapports de concentration molaire de ces deux éléments sont conservatifs dans l'eau. Les proportions de mélange et les $\delta^{18}O$, δD du pôle profond calculé seront utilisés avec le carbone 13, pour déterminer les rapports isotopiques et le pourcentage de carbone.

En l'absence de données sur tous les aquifères existants, ces calculs sommaires, uniquement basés sur un mélange binaire entre eau profonde et eau de surface, représentent une première approche dans la compréhension de systèmes aquifères multicouches.

Deux pôles de surface sont considérés : le niveau 20-30m du forage Montrond 1 et le lavoir de St-Rambert, pour leur proximité géographique et leur stabilité isotopique. Les différents modèles sont présentés respectivement Figures 85.1 (20-30m) et 85.2 (St-Rambert).

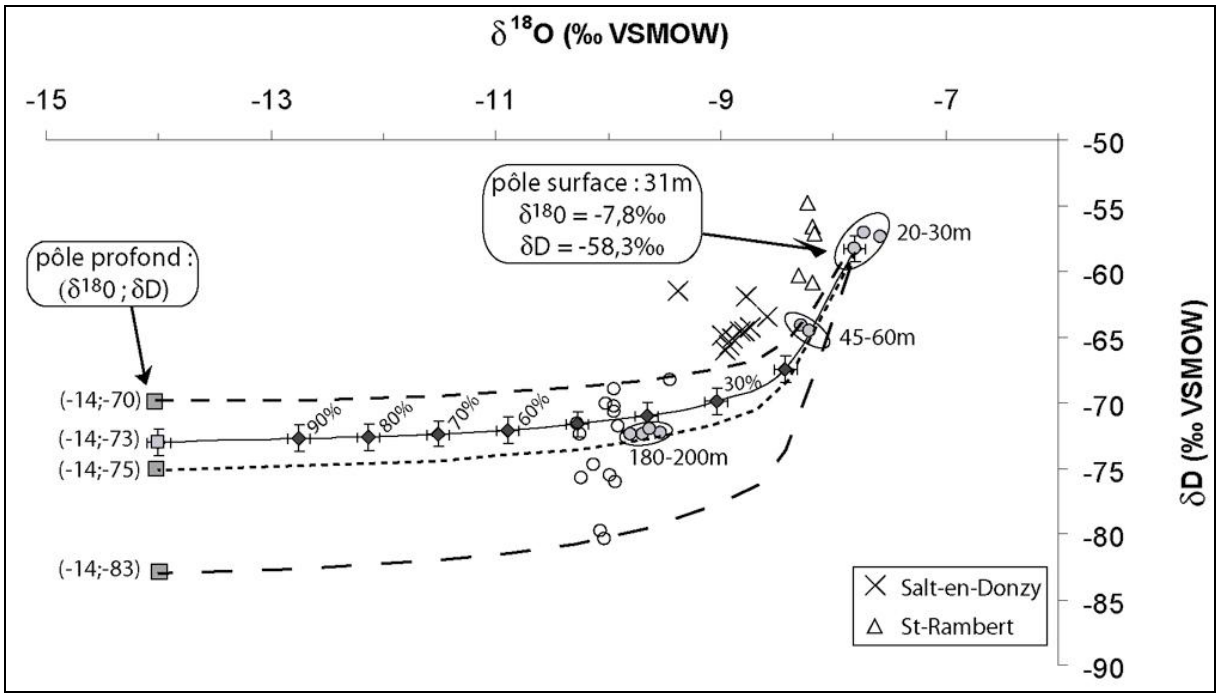


Fig. 85.1 : tests de mélange $\delta^{18}O$ en fonction de δD : les différents aquifères du forage de Montrond sont indiqués, ainsi que les rapports de Salt-en-Donzy et St-Rambert. Les différentes droites de mélange présentées ont en commun un même pôle de surface (aquifère 20-30m pris à 31m), qui donne pour le pôle profond plusieurs rapports isotopiques.

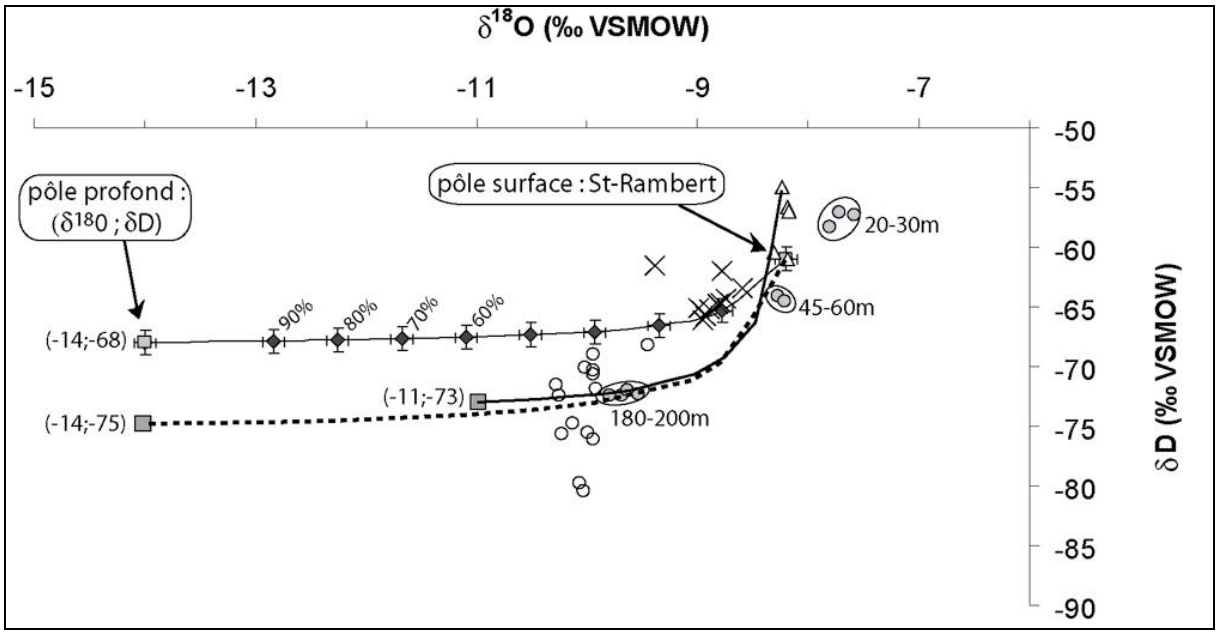


Fig. 85.2 : tests de mélange $\delta^{18}O$ en fonction de δD : les différents aquifères du forage de Montrond sont indiqués, ainsi que les rapports de Salt-en-Donzy et St-Rambert. Les différentes droites de mélange présentées ont en commun un même pôle de surface (St-Rambert) , qui donne pour le pôle profond plusieurs rapports isotopiques.

- **mélanges $\delta^{18}O/\delta D$: pôle de surface = aquifère 20-30m**

En utilisant l'aquifère 20-30m, une estimation de pôle profond est obtenue avec des valeurs très appauvries de $\delta^{18}O$, entre –14 et –15‰ VSMOW. Les valeurs en hydrogène sont dispersées d'une dizaine de pour mille, entre –70 et –83‰ VSMOW. La composition isotopique de Geyser IV peut être expliquée par un mélange avec une composante profonde ($\delta^{18}O$ = –14‰, δD = –75‰) représentant 40 à 50% de la signature (Fig. 85.1). Le niveau 180-200m, à rapports isotopiques moins appauvris, est proche de 40% d'eau profonde, l'aquifère 45-60m étant moins riche (>80% d'eau de surface).

Si les δD sont représentatifs de la signature isotopique du pôle profond, les $\delta^{18}O$ sont appauvris de –4‰ VSMOW. Une exsolution de CO_2, dans un rapport CO_2/H_2O compris entre 0,1 et 0,15 (Fig. 77), peut en être responsable.

Si au contraire les $\delta^{18}O$ sont représentatifs du pôle profond, alors les δD sont enrichis de 20 à 30‰ par rapport à une eau météorique de rapport $\delta^{18}O$ = –14 à –15‰. Deux processus peuvent être avancés :

- une hydratation de silicates, suggérée par les calculs d'indices de saturation (Tab. 20), qui appauvrit le rapport $\delta^{18}O$ tout en augmentant le δD ;
- une odeur d'œuf pourri a parfois été décelée lors d'échantillonnages ; une exsolution de H_2S affectant le pôle profond, qui modifie les proportions d'hydrogène dans l'eau, pourrait exister et enrichir préférentiellement les δD. Les fractionnements sur l'hydrogène (H_2O–H_2S) sont de 780,6‰ à 50°C et 490,52‰ à 200°C (Galley et al., 1972), et sur l'oxygène (SO_4–H_2O) respectivement de 23,48 et 8,76‰ (McKenzie et Truesdell, 1977). Une variation de 30‰ en hydrogène peut être provoquée par 4 à 6 % d'H_2S, sans que les calculs d'indice de saturation ne montrent de H_2S libre ou de précipitation de gypse.

- **mélanges $\delta^{18}O/\delta D$: pôle de surface = St-Rambert**

Le niveau 20-30m, peut-être sensible à des mélanges secondaires avec la nappe alluviale de la Loire (faille de la Mare ; Fig. 72), ne peut pas être modélisé par cette approche. L'utilisation de St-Rambert (Fig. 85.2) conduit à des estimations similaires, les quantités d'eaux de surface augmentant d'environ 5 à 10%. Salt-en-Donzy (Fig. 85.2 ; pôle profond $\delta^{18}O$ = –14‰ ; δD = –68‰ ; abondance 10-20%) est alors sur la courbe de mélange. Ces mélanges peuvent expliquer les $\delta^{13}C$ de SD, intermédiaires entre ceux des eaux de surface et ceux des eaux

carbogazeuses. C'est à dire une alimentation de cette source thermale par une infiltration au niveau d'une terrasse.

IV.4.4.2 Mélanges entre aquifères : relation oxygène / hydrogène – carbone

On peut essayer de transposer les résultats précédents aux couples oxygène – carbone et hydrogène – carbone. Pour se faire, on utilise toujours comme pôle de surface soit l'aquifère 20-30m (–12,9‰ δ^{13}C VPDB ; 0,008% carbone) soit St-Rambert (–16,3‰ ; 0,007% carbone). Les contraintes sur le pôle profond sont une signature δ^{18}O = –14‰ et δD = –70 à –80‰ VSMOW. La composante carbone de ce pôle est proche de –3,5‰ VPDB (valeur des gaz magmatiques (CH) et des bicarbonates de MGT). Deux graphes synthétisent les résultats de ces essais, l'un en oxygène – carbone (Fig. 86.1), l'autre en hydrogène – carbone (Fig. 86.2). Les différents modèles indiquent une proportion de carbone dans l'eau toujours inférieure à 0,5%. Cette proportion correspond à des eaux deux fois plus chargées que S/C.

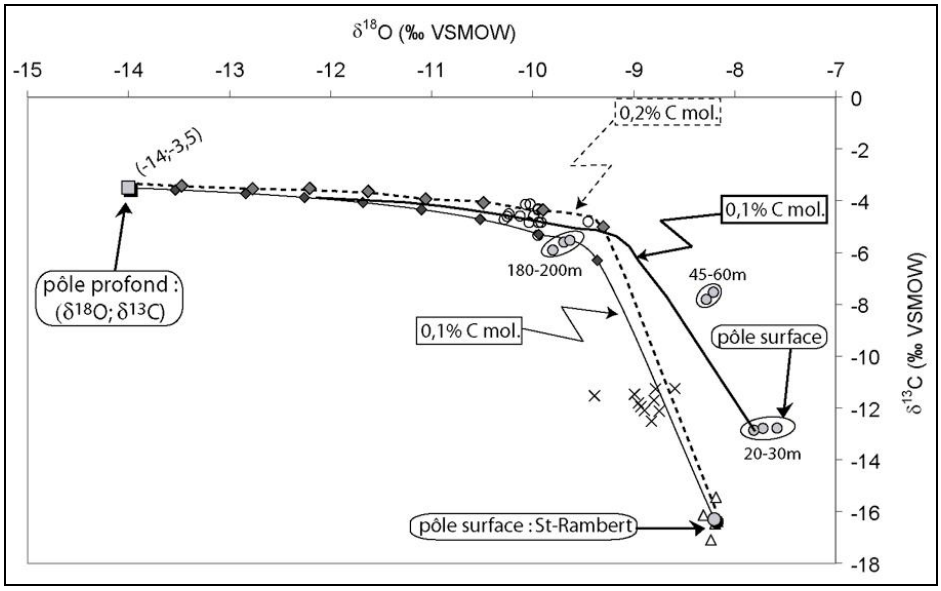


Fig. 86.1 : tests de mélange δ^{18}O en fonction de δ^{13}C : les différents aquifères du forage de Montrond sont indiqués, ainsi que les rapports de Salt-en-Donzy et St-Rambert. Les différentes droites de mélange présentées ont un pôle de surface St-Rambert ou aquifère 20-30m ; le pôle profond est indiqué sur le graphe.

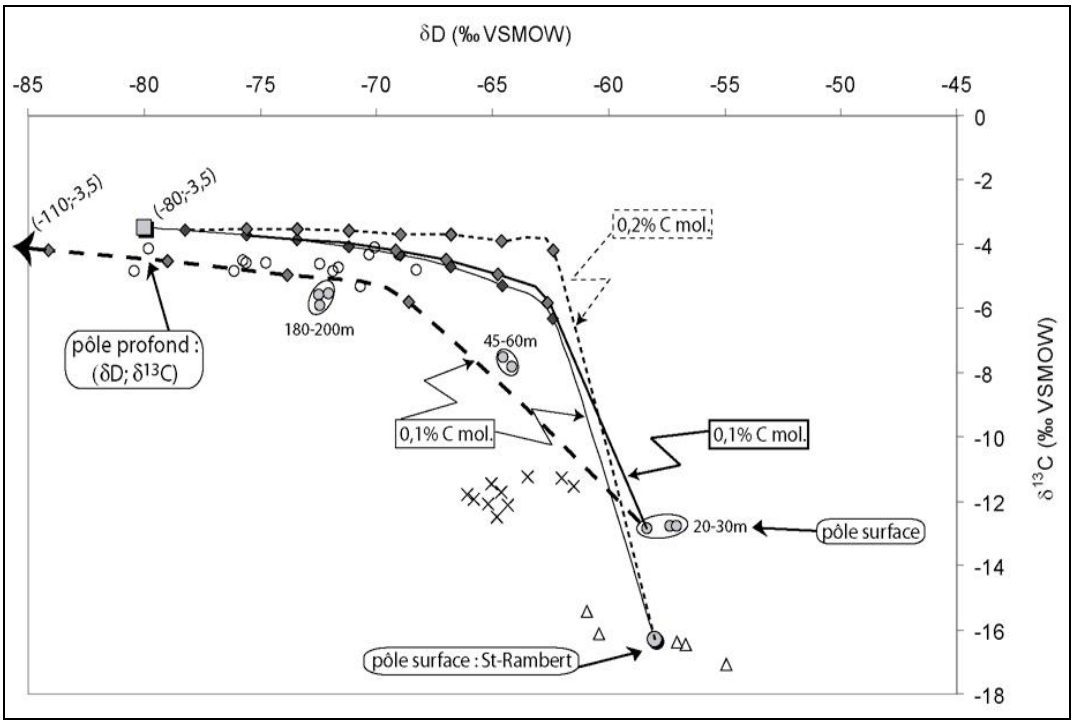


Fig. 86.2 : tests de mélange δD en fonction de $\delta^{13}C$: les aquifères du forage de Montrond et les rapports de Salt-en-Donzy et St-Rambert sont indiqués. Les courbes de mélange présentées ont un pôle de surface St-Rambert ou aquifère 20-30m ; le pôle profond est indiqué. La flèche indique un calcul avec un pôle profond δD = –110‰.

Un calcul avec l'aquifère 20-30m (Fig. 86.1) permet de définir les aquifères 45-60m, 180-200m ainsi que le forage Geyser IV comme mélanges avec une composante profonde avec des proportions respectivement proches de 40%, 30% et <20%. Les estimations faites à partir de St-Rambert aboutissent à des proportions inférieures d'environ 10%. Pour SD, les pôles de mélange sont similaires à ceux obtenus en oxygène / hydrogène (Fig. 85.2).

Comme déjà souligné en IV.4.2.2.2, les courbes de mélange calculées à partir des δD ne reflètent les rapports isotopiques des différentes eaux considérées qu'en prenant des valeurs appauvries (–110‰ : calcul à partir de la GMWL avec $\delta^{18}O$ = –15‰). L'exsolution de H_2S ou l'oxydation de pyrite pourraient une nouvelle fois en être responsables (cf IV.4.3.1).

IV.4.4.3 Mélanges entre aquifères : conclusions partielles

Les calculs permettent de supposer que les aquifères du forage Montrond 1 peuvent être considérés comme le résultat de mélanges entre une eau profonde et des eaux de surface (terrasse supérieure de la Loire, faille de la Mare ; Fig. 72). Ce possible pôle profond a une signature isotopique dont les δD sont le résultat soit d'une exsolution de H_2S (oxydation de pyrite), soit d'effets d'hydratation de silicates. A l'opposé, les signatures en oxygène peuvent

être le reflet d'une interaction avec le CO_2 gaz. L'eau profonde a des quantités de carbone différentes de celles d'une eau de surface. Enfin, la variabilité des rapports en hydrogène peut aussi indiquer un mélange impliquant plus de deux aquifères.

IV.5 ISOTOPES RADIOGENIQUES

IV.5.1 Tritium

Les teneurs en tritium relevées dans les eaux minérales ont été présentées en préambule de la partie précédente (Tab. 22). Deux sources (CH et SG) résultent de mélanges avec des eaux récentes et présentent des teneurs similaires à celles des sources pérennes superficielles (chap. III. Tab. 20).

Quel que soit le faciès, les eaux de forage ou de sources ont un contenu faible (SA, S/C) ou en dessous du seuil de détection instrumental (MGT, MTD, SD). Ces contenus en tritium faibles sont proches de ceux relevés dans la Limagne d'Allier (Bertin et al., 02/2003 et 12/2003 ; Charguéron et al., 2003). La proportion d'eau récente dans les sources du Forez est donc réduite.

IV.5.2 Carbone 14

IV.5.2.1 Méthodologie

Comme indiqué en préambule au paragraphe IV.4, le calcul de temps de résidence en utilisant la formule de désintégration radioactive du carbone 14 (demi-vie de Godwin, 1952) conduit à des "âges" maximaux (activités ^{14}C : Tab. 22). Ceci est d'autant plus vrai dans le cas d'eaux carbogazeuses à CO_2 magmatique majoritaire (e.g. Aires-Barros et al., 1998). Du fait de l'adjonction de CO_2 à activité nulle, le calcul d'âge n'est pas significatif. Seule la source de Montrond et l'aquifère de St-Rambert peuvent faire l'objet d'essais de corrections lors des calculs d'âge, celles-ci étant définies pour des ressources en domaine sédimentaire.

Pour déterminer des âges plus vraisemblables, il faut donc introduire différentes corrections lors des calculs, notamment afin de diminuer l'activité initiale en carbone 14, paramètre difficile à estimer. Le carbone 14, tout comme le tritium, est un élément produit dans la haute atmosphère (cf II.8.5.2). L'hypothèse initiale faite lors des calculs d'âge est de considérer une

activité initiale A_0 égale à 100% de l'activité d'un bois moderne, malgré les variations de A_0 au cours des derniers 24000 ans (Jones, 2000 ; Stuiver et al., 1998). Une variation de 95 à 105% de A_0 (modèle de Tamers par exemple) entraîne un faible changement d'âge (830 ans, test sur Mon1 198m). Cette erreur est inférieure aux différences d'âges procurées par d'autres modes de calcul.

Plusieurs voies de calcul peuvent être employées (cf annexes chapitre 4), prenant notamment en compte le contenu en éléments chimiques (Fontes et Garnier, 1979), certains paramètres physico-chimiques mesurés sur le terrain (température, pH, alcalinité, isotopes ; EIH, 2000 ; Tamers, 1960) voire les $\delta^{13}C$ des espèces carbonées présentes (Pearson, in Carrillo-Rivera, 1992). Ces modèles sont basés sur une origine mixte du Carbone Total Dissous (biologique → activité proche de celle de l'atmosphère ; dissolution minérale → activité nulle) et une évolution en aquifère sous-saturé, en aquifère saturé (mélange chimique de Tamers, isotopique de Pearson), ou en système mixte (Fontes et Garnier, 1979).
Les différents temps de transit calculés en utilisant ces méthodes sont rapportés en annexes dans le tableau A.13 et dans la figure 87. Les proportions de CO_2 du sol en équilibre avec l'eau sont variables, prenant notamment en compte les teneurs calculées dans le bassin versant du Furan (57ppm CO_2 à Rochetaillée ; 820ppm à Barbanche). Les rapports $\delta^{13}C$ du CO_2 du sol sont aussi inspirés des valeurs extrêmes du Furan (–25‰ et –17‰ VPDB). Pour le modèle de Fontes et Garnier (1979), les compositions chimiques des eaux dosées sont utilisées.

IV.5.2.2 Ages calculés

L'aquifère de St-Rambert est le seul à montrer une interaction avec le réservoir de carbone du sol (Tab. A.13 : $\delta^{13}C_{\text{système ouvert calculé}}$ = –17‰ [[1] ; EIH, 2000] et $\delta^{13}C_{\text{DIC mesuré}}$ = –16,3‰ VPDB). L'âge maximal est inférieur à 900 ans. Seuls deux modèles (Tamers et "système mixte", dont l'utilisation est discutée ci-dessous) peuvent être utilisés et donnent des âges plus récents. Une percolation dans un sol riche en CO_2 paraît exister, ce qui est compatible avec une interaction avec l'atmosphère ($p_{CO2\ sol}$ élevée ; cf III.5.5). St-Rambert est l'eau la plus riche en tritium de cette étude (IV.5.1). Si St-Rambert est un aquifère mixte, on peut envisager la configuration suivante :

[1] Composition isotopique calculée suivant la répartition de $CO_{2(aq)}$ et $HCO_{3(aq)}$ en fonction du pH, les coefficients de fractionnement $CO_{2(aq)}$-$CO_{2(g)}$ et $HCO_{3(aq)}$-$CO_{2(g)}$, la température de l'eau et $\delta^{13}C_{(g,\ sol)}$. Si $\delta^{13}C_{DIC}$ proche de $\delta^{13}C_{sol}$, alors le système est considéré comme ouvert.

- partie supérieure non saturée (Tab. A.13), en contact avec l'atmosphère, qui permet l'apport de ^{3}H, avec des temps de résidence de quelques années à dizaines d'années ;
- partie inférieure saturée à temps de résidence plus grand, qui permet de noter une décroissance du ^{14}C ;
- mélange des deux entités avant l'émergence, qui permet d'une part de diminuer l'activité carbone du mélange tout en lui conservant un stock de tritium important. Les âges calculés sont des âges moyens, intermédiaires entre les âges réels des deux aquifères saturé et insaturé.

Les eaux minérales évoluent toutes en système fermé (aquifère en zone saturée ; Tab. A.13). Bien qu'un calcul d'âge sur des eaux carbogazeuses soit non réaliste, on peut retenir l'âge maximal des circulations, depuis l'infiltration jusqu'à l'émergence, qui est compris entre 22000 (SA) et 27000 ans (MGT avec CO_2 ; Tab. A.13). Le dégazage de l'eau fournit des eaux à activité ^{14}C plus importante, donc plus jeunes. La présence de CO_2 mort (activité ^{14}C nulle ; e.g. Aires-Barros et al., 1998) vieillit donc artificiellement l'âge, d'autant plus que la quantité de CO_2 gaz est grande (cf p_{CO2} à Moingt et Chorsin ; Tab.A.4).

Pour les eaux minérales situées en réservoir sédimentaire (Montrond et les eaux du forage Mon1), des corrections d'âge peuvent être appliquées. Le modèle de mélange chimique de Tamers (1960) est utilisé pour un aquifère à faible porosité, avec des $p_{CO2\ sol}$ basses, proches de celles du bassin versant du Furan (Fig. 87 et Tab. A.13). Les temps de percolation sont au maximum de 18000 ans pour les aquifères du forage de Montrond. Les modèles de correction statistique et de correction d'alcalinité, moins restrictifs dans la nature du réservoir, aboutissent à des estimations voisines. Les corrections apportées par ces différents modèles étant limitées, les âges calculés ne sont pas retenus.

Il apparaît plus pertinent d'utiliser des modèles prenant en compte l'existence de carbonates au sein des aquifères, tant sur le plan isotopique (modèles de Pearson et en système mixte) que sur le plan chimique et isotopique.

Ce dernier cas est traité par le modèle de Fontes et Garnier : pour Montrond ($Na\text{-}HCO_3$), il donne un âge proche de 18000 ans. Dans le cas du forage, ce modèle ne permet pas de calculer d'âge réaliste : les indices de saturation (calcite – dolomite ; Tab. 20) sont négatifs

pour des températures supérieures à 100°C, peu vraisemblables pour un bassin de 700m de profondeur (arrivée d'eau à 46°C à 475m dans Geyser IV). L'impossibilité de calculer un âge dans le cas du forage, où l'on contraint chimie de l'eau et de l'encaissant, conduit à rejeter ce modèle.

Les autres calculs d'âge (Fig. 87 : système mixte et Pearson) donnent des temps de résidence plus courts, de l'ordre de 6600 à 10000 ans pour Montrond (Geyser IV) et de 11000 à 17000 ans pour le forage (niveaux entre 180 et 200m ; Tab. A.13). Les $\delta^{13}C$ de la matrice carbonatée sont contraints par les données du forage Montrond 1 (–0,7‰ entre 20-30m, –1,1‰ entre 45-60m et –1,9‰ entre 180-200m). Plus le rapport isotopique du carbonate s'appauvrit, plus l'âge diminue. Toutefois, la dissolution peu probable des carbonates dans les niveaux aquifères restreint aussi l'emploi de ces modèles. Cependant, ces modèles représentant la meilleure approche possible dans notre cas, la gamme d'âge 10000 – 17000 ans est retenue.

Dans les paragraphes précédents, l'eau de Salt-en-Donzy, non carbogazeuse à l'émergence, a été volontairement omise. L'âge maximal (désintégration radioactive uniquement) évalue le temps de résidence à 8000 ans environ. Comme les preuves physiques d'une présence de CO_2 gaz ne sont pas réunies à l'émergence, et comme la teneur en bicarbonates est nettement inférieure à celles des eaux carbogazeuses, une correction peut être tentée en utilisant le modèle de Tamers, qui ne considère que les bicarbonates du sol. Suivant les pressions partielles du gaz du sol utilisées, les âges corrigés se rangent entre 2500 et 7000 ans (Tab. A.13). Sous réserve d'une mise en contact en profondeur avec du CO_2, le temps moyen de transit peut donc être évalué autour de 2500 à 5000 ans.

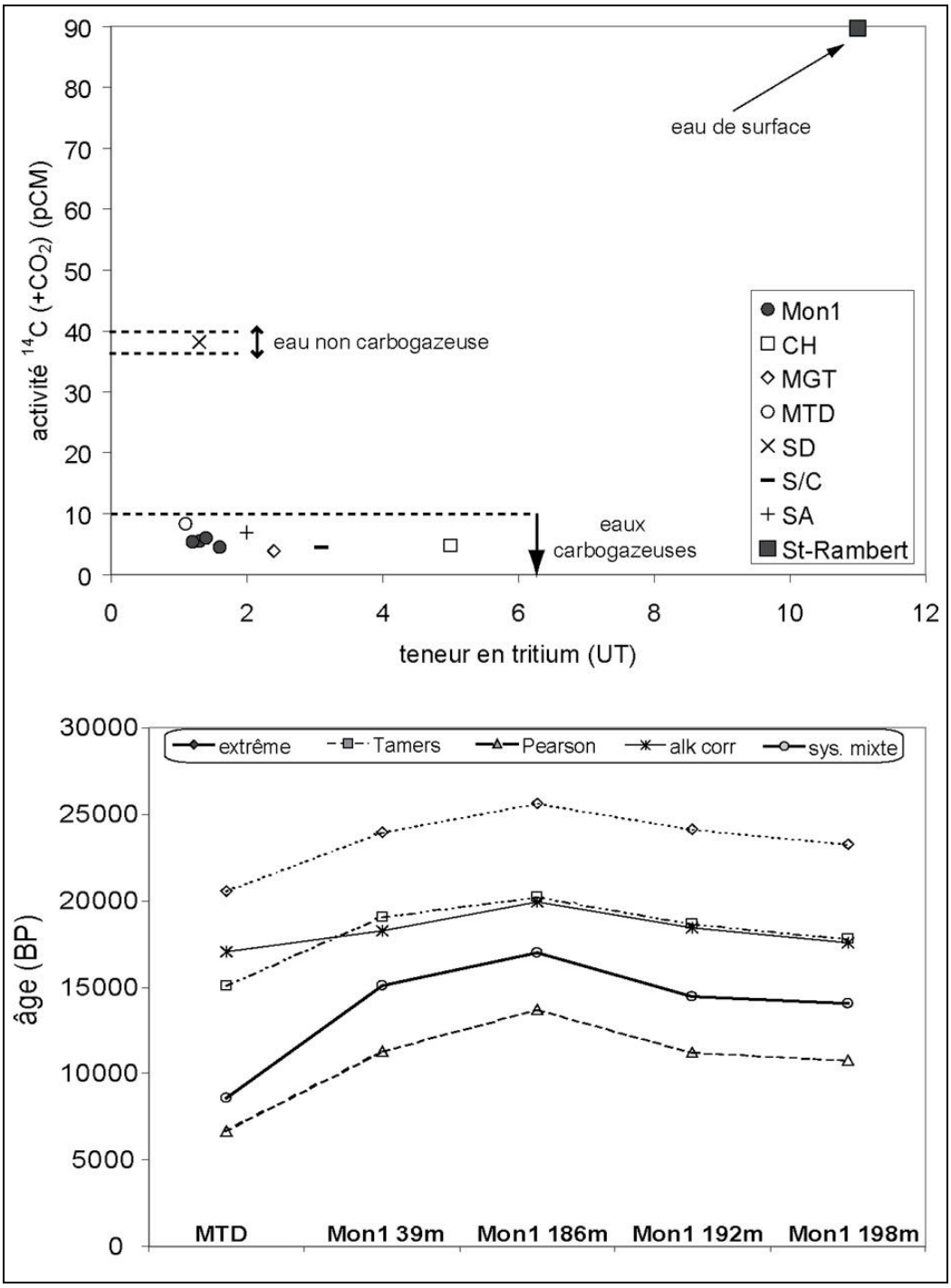


Fig. 87 : activité ^{14}C en fonction de la teneur en ^{3}H ; ces activités sont utilisées dans le calcul de temps de résidence ("âge") en utilisant différents modèles. Les modèles retenus dans l'évaluation des temps de transit souterrains des eaux sont ceux de Pearson et l'approche en système mixte (ouvert puis clos) ; (détails de calcul en annexes CHAP 4, paramètres utilisés voir Tab. 22).

IV.5.2.3 Relation activité ^{14}C - $\delta^{18}O$

Cette relation est présentée Fig. 88. Elle n'est pas traitée en hydrogène, des effets supplémentaires (exsolution d'H_2S) pouvant rajouter des modifications de rapports isotopiques. Il n'y a pas de relation activité ^{14}C – $\delta^{18}O$, quels que soient les faciès chimiques. Les eaux du faciès Ca-Mg-HCO_3 ont des $\delta^{18}O$ moins appauvris que les eaux Na-HCO_3. La proportion d'eau "contaminante" dans le mélange de Chorsin (cf IV.2.1, IV.3, IV.4) n'influe pas sur la quantité de ^{14}C. L'effet prépondérant est l'addition de carbone mort par interaction avec des gaz profonds.

Les deux pôles les plus minéralisés (MGT et S/C) ont des activités et des $\delta^{18}O$ très semblables, ce qui souligne une homogénéité des processus de percolation souterrains, l'émergence de ces deux eaux se faisant à des altitudes proches (respectivement 400 et 440m), le long de failles d'orientation N-S à NW-SE. De plus, ces deux eaux ont aussi des aires de recharge à altitude identique (1200-1300m ; Tab. 24).

Enfin, le forage Montrond 1 montre, pour l'intervalle 180-200m, une faible dispersion des $\delta^{18}O$ (–9,6 à –9,8‰) et des activités ^{14}C (4,5 à 6 pCM). Ces activités sont semblables à celles du niveau 39m (5,5 pCM). Une circulation entre ces deux niveaux (faille ?) pourrait expliquer cette homogénéité d'âges, le niveau supérieur pouvant aussi être sensible à des infiltrations de la Loire ($\delta^{18}O$ supérieurs de 1,4‰). Geyser IV, qui draine ces deux aquifères et des niveaux inférieurs, est plus appauvri en oxygène et à l'inverse possède une activité ^{14}C plus forte. Soit la composante profonde (qui représente au moins 50% du mélange ; cf IV.4.2.2.2) a un contenu en carbone 14 supérieur aux aquifères intermédiaires, soit le mélange du forage est rajeuni par l'adjonction d'eaux plus superficielles (niveau 20-30m notamment). Dans les deux cas, l'activité ^{14}C augmente et la valeur $\delta^{18}O$ du fluide profond est plus négative. Ce constat fait pencher pour la seconde hypothèse, une eau ancienne pouvant s'être infiltrée sous des climats plus froids. L'existence ou non d'un effet paléoclimatique pour les eaux de Montrond, visible en oxygène et pas en hydrogène (exsolution de H_2S qui pourrait être en relation avec l'odeur remarquée lors d'échantillonnages à Geyser IV ?) est abordée dans la partie suivante (IV.5.2.4).

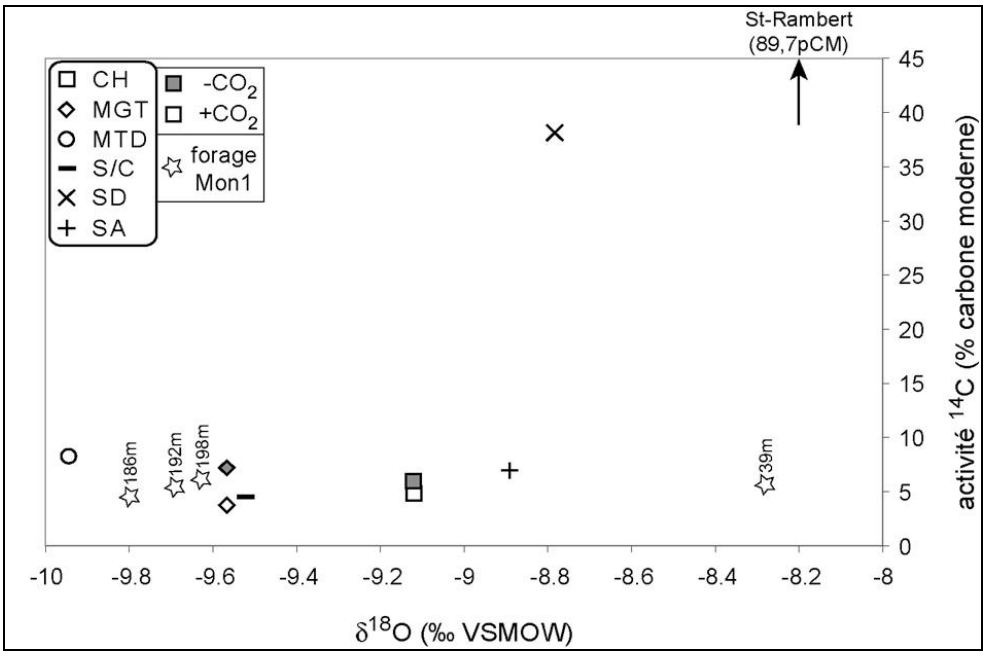


Fig. 88 : activité ^{14}C en fonction de $\delta^{18}O$.

IV.5.2.4 Conclusions sur la validité des âges calculés

Comme abordé en IV.5.2.2, les différentes corrections apportées lors du calcul d'un âge ^{14}C peuvent faire varier l'estimation des temps de transit (Tab. A.13). Les âges obtenus à partir des modèles de correction statistique, de correction d'alcalinité et de Tamers (cas forte p_{CO2}) convergent vers des estimations peu différentes du calcul par application directe de l'équation de désintégration radioactive. La gamme de temps de résidence maximaux des eaux de Montrond s'étend de 20000 à 25000 ans, et certainement beaucoup moins pour SD (8000 ans au maximum), non carbogazeuse. Les âges considérés comme plus pertinents dans notre cas (modèle de Pearson et en système mixte) sont plus récents, de 10000 à 17000 ans (Montrond).

Deux remarques s'imposent :

- rôle du CO_2 gaz dans les évaluations de temps de transit souterrain : SD, seule source sans dioxyde de carbone libre, est moins sujette à un "vieillissement" par ajout de carbone mort. Elle a ainsi une activité ^{14}C plus importante que les eaux carbogazeuses. Pour les eaux carbogazeuses, la saturation vis à vis du CO_2 gaz n'est pas toujours effective (IV.4.2.2.2). Une partie des bicarbonates provient donc de la mise en solution de CO_2. Le dégazage réalisé sur MGT et CH n'a permis d'ôter qu'une partie de ce carbone mort, ce qui peut rendre compte des variations d'activité constatées entre les

deux précipités (+CO_2 et –CO_2). Le CO_2 profond constitue une source supplémentaire d'erreur dans la détermination d'un "âge". Des tests visant à corriger l'activité ^{14}C mesurée de la présence de carbone mort ont été faits. Ils utilisent les pourcentages de carbone avant et après dégazage de l'eau, ainsi que la proportion relative sulfate/carbonate. Tout le CO_2 libre est considéré comme mort, ce qui est une hypothèse extrême. Pour MGT, l'activité corrigée est proche de 31 pCM, 48 pour S/C, 74 pour CH et 106 pour SA. Les âges maximaux alors calculés sont respectivement de 9700, 6100, 2500 ans pour MGT, S/C et CH. La source de SA ne donne pas d'âge réaliste, puisqu'elle présente des activités similaires à celles enregistrées pour un Carbone Total Dissous d'origine biologique dans un sol ou d'origine biologique et minérale dans une zone karstique (Fontes, 1978). Ceci montre la difficulté à interpréter en termes d'âges les teneurs mesurées en carbone 14. Comment en effet SA pourrait-être une eau sub-actuelle, alors que sa minéralisation impose un cycle souterrain plus important ?

- existence d'un effet paléoclimatique : elle peut être abordée de deux manières :
    - *contexte granitique faillé* : soit on juge que la détermination de zones d'infiltration n'est pas réaliste. Dans ce cas, l'infiltration peut se faire en altitude ou le long des failles bordières du bassin du Forez, où la majorité des émergences sont localisées. Dans cette hypothèse, la majorité des eaux minérales ont des deltas trop appauvris pour refléter les précipitations locales actuelles en plaine. L'appel à un effet paléoclimatique est donc nécessaire pour toutes les sources, sauf SD. Néanmoins, les échanges isotopiques eau – CO_2 peuvent être responsable d'une part importante des shifts des $\delta^{18}O$ (cf IV.4.2).
    - *contexte sédimentaire* : soit on considère que les déterminations d'aires de recharge ont un sens, auquel cas seules les eaux de Montrond apparaissent trop appauvries par rapport à la topographie locale (notamment en δD). Néanmoins, l'exsolution de H_2S (pôle profond) peut produire les mêmes effets sans nécessiter de changement climatique. Toutefois, l'aquifère 180-200m peut contenir une eau infiltrée il y a 17000 à 20000 ans, en conditions plus froides d'environ 6 à 8°C (température atmosphérique quasi stable depuis 11000 ans ; Jouzel et al., 1999). En utilisant les gradients d'appauvrissement des précipitations actuelles (tab. 7) et une baisse de 0,6°C par 100m d'élévation (cf II.9.2.2), les altitudes de recharge de ces aquifères pourraient être proches de

1500m, ce qui rend les déterminations d'altitude en hydrogène plus réalistes (circuit d'alimentation Monts du Forez) mais encore un peu élevées.

- en conséquence, l'existence d'un effet paléoclimatique ne peut pas être affirmée avec force sans mieux connaître les aquifères profonds du Forez. Des analyses des teneurs en gaz rares pourraient permettre de lever cette ambiguïté.

DISCUSSION – CONCLUSION

V.1 PRECIPITATIONS

Le suivi journalier des précipitations (St-Just-St-Rambert) durant quatre années a permis d'établir une corrélation $\delta^{18}O$ – δD proche de la corrélation des eaux météoriques à l'échelle européenne (Rozanski et al., 1982). La valeur isotopique moyenne des pluies est de –8,2‰ VSMOW $\delta^{18}O$ et de –57,6‰ VSMOW δD. L'ajout de deux pluviomètres en 2003 dans le massif du Pilat a conduit à l'expression de la droite des eaux météoriques locales suivante :

$$\delta D = 7{,}82\ (\pm 0{,}25)\ \delta^{18}O + 6{,}9\ (\pm 2{,}3) \qquad (440 \text{ prélèvements})$$

Ce suivi sur trois pluviomètres situés à des altitudes différentes a montré une augmentation de la pente et de l'excès en deutérium plus faible entre plaine et point bas du massif du Pilat (pente : +0,04‰ et excès : +2,8‰) qu'entre point bas et point haut du massif (pente : +0,29‰ et excès : +5,7‰).

Chaque année d'étude reflète des situations hydrologiques et climatiques contrastées. Les valeurs des isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène des précipitations en sont le reflet. En année hydrologique normale (2001), les quantités de précipitations sont proches de 850mm à St-Just-St-Rambert. D'importants cumuls pluviométriques sont enregistrés lors d'années pluvieuses (+15% en 2002), comme des déficits lors d'années sèches (–35% en 2003). Pour des précipitations abondantes et en période hivernale, les rapports isotopiques ($\delta^{18}O$, δD) des pluies sont proches de la droite mondiale des eaux météoriques (Craig, 1961) : $\delta D = 7{,}82\ \delta^{18}O + 6{,}1$ (St-Just-St-Rambert). En année sèche et en été, les effets de l'évaporation dans une atmosphère chaude sont sensibles et se traduisent par une diminution des pentes et des excès en deutérium [$\delta D = 6{,}1\ \delta^{18}O - 3{,}7$ (St-Just-St-Rambert)]. L'influence de l'évaporation diminue avec l'augmentation d'altitude : les variations des pentes des droites des eaux pour chaque pluviomètre sont plus faibles entre plaine (St-Just-St-Rambert : 7,8) et point bas du massif du Pilat (Rochetaillée : 7,84) qu'entre point bas (7,84) et point haut du massif (Tarentaise : 8,13). Durant l'année 2001, les rapports isotopiques s'écartent fortement des droites de corrélations mondiale et locale. Une cause possible à cette dispersion serait un effet important de l'évaporation sur les pluies printanières. Toutefois la dispersion des valeurs de $\delta^{18}O$ et δD de pluies d'autres périodes de l'année ne peut être expliquée par ce phénomène.

En accord avec les positions géographiques des pluviomètres, les excès de deutérium (moyenne annuelle) indiquent une influence des précipitations d'origine Atlantique (10‰ en

moyenne) plus forte à St-Just-St-Rambert (7,9‰) et Rochetaillée (9,9‰) qu'à Tarentaise (12,4‰), plus sensible aux apports méditerranéens (14‰ en moyenne).

L'existence de variations saisonnières des rapports isotopiques permet la détermination de gradients d'altitude. En moyenne annuelle, pour une élévation de 100m, les appauvrissements sont de –0,22‰ VSMOW en $\delta^{18}O$ et –1,9‰ VSMOW en δD. Dans le Massif du Pilat, les gradients d'altitude sont très réduits (–0,12‰ $\delta^{18}O$; –0,15‰ δD), sans doute par des effets de topographie, les pluies frontales se mêlant aux pluies orographiques.

Le seul traceur radiogénique utilisé lors de l'étude des pluies est le tritium. Les teneurs des précipitations se rapprochent de plus en plus du seuil de production naturelle dans l'atmosphère (Begeman, 1959). Les variations saisonnières dans l'approvisionnement en tritium permettent toutefois de mesurer des valeurs supérieures à 5 UT pendant les périodes estivales.

V.2 EAUX DE SURFACE

Les aquifères de surface sont représentés par des sources du massif du Pilat, dans le bassin amont du Furan (3400 ha), divisé en sous bassins de 60 à 330 ha. Quelques aquifères des Monts et plaine du Forez ont également été suivis. La majorité d'entre eux sont des aquifères pelliculaires d'arène granitique, de quelques mètres d'épaisseur au maximum. Les aquifères les plus importants sont situés en domaine sédimentaire détritique (St-Rambert : terrasse de la Loire), en limite de la plaine du Forez.

Les aquifères à concentration en solides dissous supérieure à 50 mg/l sont moins sensibles aux variations climatiques. Les éléments chimiques majoritaires sont Na, Ca, et Cl. Les bicarbonates sont plus concentrés dans les eaux du Forez. Certaines eaux peu minéralisées (Rochetaillée, Planfoy) paraissent également sensibles à des processus d'oxydo-réduction affectant le couple sulfate/sulfure. Les diagrammes d'activité et les calculs d'indices de saturation indiquent une circulation principalement dans le socle cristallin : pas de précipitation de carbonates ; silice proche de la saturation ; les argiles (altération des feldspaths) précipitent. Aucun calcul de géothermométrie n'est fait, les faibles teneurs en éléments dissous conduisant à des températures hors des domaines d'application des géothermomètres. De plus, une part non négligeable de la minéralité peut directement provenir des précipitations (> 20% pour K, Ca). Les échanges eau – roche sont donc peu

importants, même si une circulation dans la zone saturée des aquifères est attestée par les pressions partielles de CO_2 calculées à l'équilibre.

Les rapports isotopiques $\delta^{18}O$ et δD des eaux et rivières du département de la Loire sont plus négatifs que ceux des pluies alimentant les zones de recharges (Blavoux, 1978). Ces rapports diminuent avec l'altitude, selon des gradients très proches de ceux déterminés en utilisant les précipitations locales. Les rapports en carbone 13 (–24 à –15‰ VPDB) reflètent une forte interaction avec la matière organique (plantes en C3 : –25‰). Les rivières ont en moyenne des $\delta^{13}C$ enrichis de 1‰ par rapport aux sources, par effet de contact avec le réservoir de carbone atmosphérique. Les teneurs en tritium sont également fort semblables à celles des eaux de pluies.

Les aquifères sur arène granitique du massif du Pilat et des Monts du Forez ont donc une alimentation météorique locale. Un signal pluviométrique d'entrée des aquifères peut donc être défini par les rapports isotopiques $\delta^{18}O$ et δD des précipitations (moyenne mensuelle). En utilisant des modèles de percolation (transport par dispersion), les temps de transit moyens dans les aquifères du bassin versant du Furan peuvent être calculés. Les rapports isotopiques initiaux des précipitations sont modifiés durant la percolation des pluies dans le sol, par échange avec le CO_2 du sol. Les quantités d'eau disponibles à l'infiltration sont régulées par évapotranspiration. Plusieurs cas sont envisagés pour prendre en compte ces phénomènes. L'emploi de l'ETP permet de vérifier que seules 25 à 33% des précipitations sous les latitudes moyennes sont efficaces (Clark et Fritz, 1997), et de recalculer une composition isotopique de l'eau pouvant réellement s'infiltrer.

Les différents calculs de temps de transit (utilisation des pluies brutes, des pluies prenant en compte l'effet de l'ETP), en oxygène et hydrogène, ont permis d'estimer des temps de percolation de 10 à 15 mois en oxygène et 8 à 10 mois en hydrogène pour l'ensemble des nappes d'arène du bassin du Furan. L'augmentation du temps de percolation permet une hausse de la minéralisation (Tarentaise), par hausse du temps de contact avec la roche ou par mélange avec un autre réservoir. Les écarts constatés entre modèle en oxygène et modèle en hydrogène peuvent être imputés à des fractionnements isotopiques plus forts sur l'hydrogène.

Pour exemple, la figure 89 montre une représentation du système d'aquifère de nappe d'arène. Trois couches sont utilisées : aquifère non-saturé (arène), aquifère saturé (granite fracturé) puis granite sain, très peu perméable. Deux écoulements par gravité se distinguent :

- écoulements rapides lors d'épisodes de crues (ex. décembre 2003), disparaissant au bout de quelques jours ;

- composante à temps de transit proches de ceux calculés à l'aide des isotopes stables, liée à des relargages depuis la partie saturée de l'aquifère, le granite fracturé ayant des vitesses d'écoulement inférieures à celles de l'arène.

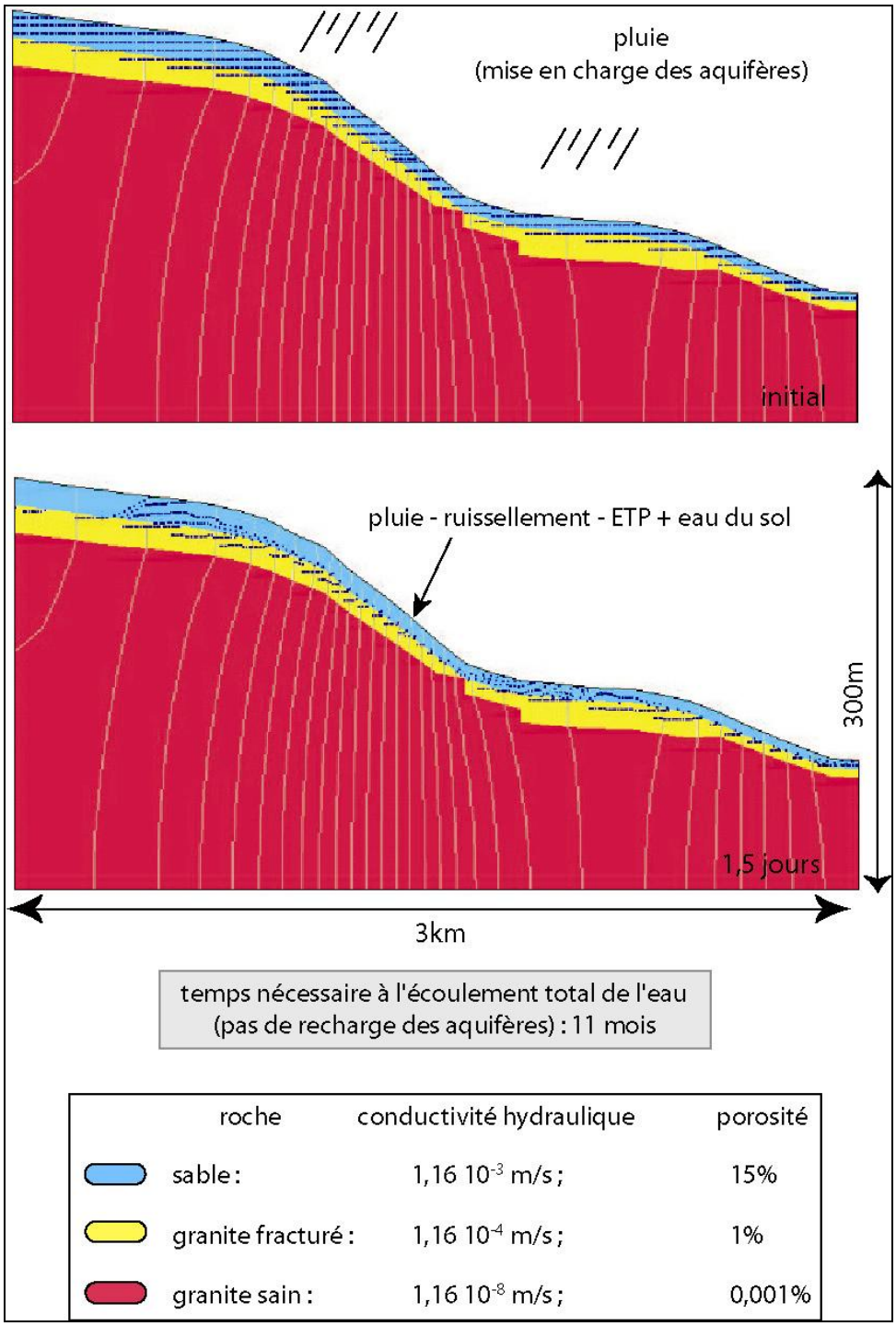


Fig. 89 : représentation schématique des écoulements sur une nappe d'arène : sable reposant sur du granite diaclasé, puis granite sain en profondeur (logiciel Topodrive ; http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/tdpf/tdpf.html).

Les différentes approches utilisées dans l'étude des eaux superficielles, bien que simplificatrices, peuvent trouver une application dans la gestion de la ressource hydrique. En contexte de socle et de moyenne montagne, pour des bassins versants peu cultivés, de taille réduite (quelques centaines d'hectares), les temps de percolations moyens sont proches d'un an. Les effets d'une forte sécheresse ou d'une pollution accidentelle peuvent donc être ressentis pendant de longs mois.

L'implantation d'un nombre supérieur de pluviomètres n'apparaît pas comme un facteur permettant d'améliorer significativement la connaissance de ces domaines de sub-surface. Un point de prélèvement suffit, couplé aux gradients d'altitude trouvés grâce aux analyses effectuées sur les lavoirs. Par contre, il apparaît utile d'approfondir la connaissance des phénomènes intervenant à l'infiltration. La mise en place de lysimètres (évolution des compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène dans le sol), la détermination des épaisseurs réelles des arènes granitiques et la localisation en profondeur des zones fracturées (prospection électrique, sismique réflexion) apporteraient des contraintes supplémentaires lors des calculs.

Enfin, des essais de détermination des temps de transit dans le bassin versant du Furan ont été tentés à l'aide du logiciel Topmodel (Beven et al., 1995). C'est un modèle non linéaire utilisé pour simuler les réponses lentes et rapides sur un bassin versant (Laurent, 1996). Il prend en compte l'écoulement en nappe souterraine qui alimente les cours d'eau et l'écoulement superficiel par saturation du sol. Par étude des débits et des précipitations locales, il est alors possible d'essayer d'estimer des temps de percolation moyens. Malheureusement, le pas d'échantillonnage choisi pour nos études isotopiques (15 jours à 1 mois) est beaucoup trop grand pour ce type de modèle (pas journalier requis), ce qui ne permet pas de l'utiliser.

V.3 EAUX MINERALES

Les contenus en éléments dissous des eaux minérales du Forez montrent un enrichissement important en sodium. Cet enrichissement est attribué à des interactions en profondeur, dans un environnement pauvre en Cl, ce qui exclut tout échange chimique dans une matrice rocheuse sédimentaire évaporitique. Les sources thermales (MTD, SD) ne sont pas les plus riches en éléments dissous, cette caractéristique étant réservée à deux sources froides de faciès Na-HCO_3 (S/C et surtout MGT). Les circulations profondes permettent une

interaction dans un encaissant granitique (oxydation de sulfures plus sensible pour SD) et des formations argileuses (MTD notamment). Ces interactions révélées par les contenus en cations et anions amènent à définir un assemblage minéralogique théorique au contact duquel circulent les eaux, et de contraindre les phases pouvant être dissoutes ou précipitées. Les résultats des calculs d'indices de saturation, en système ouvert (pas de limitation de la quantité de roche dans l'aquifère) et avec dissolution de sept phases, impliquent majoritairement les espèces silice, Na, K, Mg et Ca. Ces calculs indiquent de fréquents passages d'un état de sous-saturation à une sur-saturation vers 100 à 150°C. Ces températures peuvent être considérées comme marquant la limite du champ de dissolution des espèces minérales, donc proches de la minéralisation maximale qui peut être atteinte.

Les indices de saturation vis à vis des principaux cations en solution ont une grande importance dans la signification des températures des géothermomètres. La sous-saturation étant une condition impérative, il apparaît que le seul thermomètre vraiment utilisable dans le cas présent est Na/Li (Michard, 1990). Il est peu sensible aux dilutions (CH, SG, MTD sont des mélanges), implique le lithium (non détecté dans les eaux de surface), et surtout est défini pour des eaux circulant dans des granites. De plus, Na est un cation qui peut être adsorbé par les argiles mais aussi échangé au profit de K, Ca et Mg. La comparaison avec le thermomètre Sr/K^2 indique également des interactions développées dans le socle et moindres dans les faciès sédimentaires argileux (influence moindre sur Na). Les températures calculées varient entre 130 et 250°C, la valeur la plus faible revenant à l'eau la plus thermale (SD). Les eaux carbogazeuses ont des températures plus importantes (SA, S/C : 250°C), soit résultat d'un circuit profond différent, soit de mélanges entre aquifères profonds et superficiels.

Les rapports isotopiques $\delta^{18}O$ et δD ne montrent pas de relation aux variations climatiques externes ni de variation dans le temps, sauf pour les mélanges (CH, SG). Ces rapports sont proches de la droite locale des eaux météoriques, les déviations pouvant être attribuées plus vraisemblablement à des dégazages de CO_2 (<10% de gaz pour MGT, S/C) qu'à des hydratations de silicates. Les altitudes déterminées sur les sources minérales ne résultant pas de mélanges (MGT, SA, SD, S/C) sont compatibles avec celles des reliefs bordiers du graben du Forez en oxygène, et parfois supérieures en hydrogène (piégeage d'hydrogène par les argiles). Dans le cas de MGT et S/C, l'influence des échanges isotopiques CO_2 – eau lors du dégazage peut expliquer la sur-estimation des altitudes de recharge. Une diminution de 400 à 500 mètres de l'altitude moyenne de l'impluvium est possible (1200m → 800m) : la zone de recharge est alors plus étendue, mais elle reste située en domaine de socle cristallin.

Les rapports $\delta^{13}C$ des bicarbonates des eaux carbogazeuses sont caractéristiques d'un carbone d'origine profonde, tout comme le CO_2 gaz échantillonné à CH. Seule SD présente des valeurs intermédiaires entre signature profonde et signature d'eau de surface, signe d'une interaction avec un tel aquifère.

Certains mélanges (CH, MTD, SG ; Serra et al., 2003) peuvent être mis en évidence par les isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène. Des calculs de mélanges binaires entre un réservoir de surface et un pôle profond peuvent être faits. Dans le forage de Montrond, la proportion de pôle profond minéralisé est calculée à 30-40% pour le niveau 180-200m, et inférieure à 20% vers 45-60m (contamination plus marquée : pertes de la Loire par faille ; aquifère de St-Rambert). Le cas des isotopes O et H est synthétisé figure 90. Deux analyses sont possibles :

- le pôle profond calculé est bien $\delta^{18}O$ = –14‰ à –15‰, δD = –70‰ à –83‰ VSMOW. Dans ce cas, en utilisant l'aquifère 20-30m comme pôle surface, les aquifères 45-60m, 180-200m et le mélange Geyser IV peuvent être issus de mélanges en différentes proportions de ces deux pôles. Cependant, la valeur $\delta^{18}O$ est trop négative pour des eaux dont l'âge est inférieur à 20000 ans (effet paléoclimatique évalué à –1,6‰ ; cf IV.4.1.1), mais correspond toutefois à la tendance de l'ensemble des lavoirs de surface (Fig. 90). Une exsolution de CO_2 (15% à 150°C ; 30% à 250°C ; Fig. 77) lors de la remontée des eaux peut également expliquer ces $\delta^{18}O$ calculés trop négatifs ;
- le rapport δD du pôle profond calculé est moins appauvri que le rapport initial en profondeur, par effet d'exsolution de H_2S, et pourrait rendre compte de la dispersion des δD de Geyser IV. Cette hypothèse est toutefois peu compatible avec les eH mesurés lors des échantillonnages.

Les calculs de mélange permettent aussi de définir la proportion de carbone du pôle profond. En retenant une valeur $\delta^{13}C$ correspondant aux valeurs des bicarbonates de Moingt, l'eau la plus minéralisée du Forez, la concentration des bicarbonates calculée est supérieure à 4 g/l (Fig. 91).

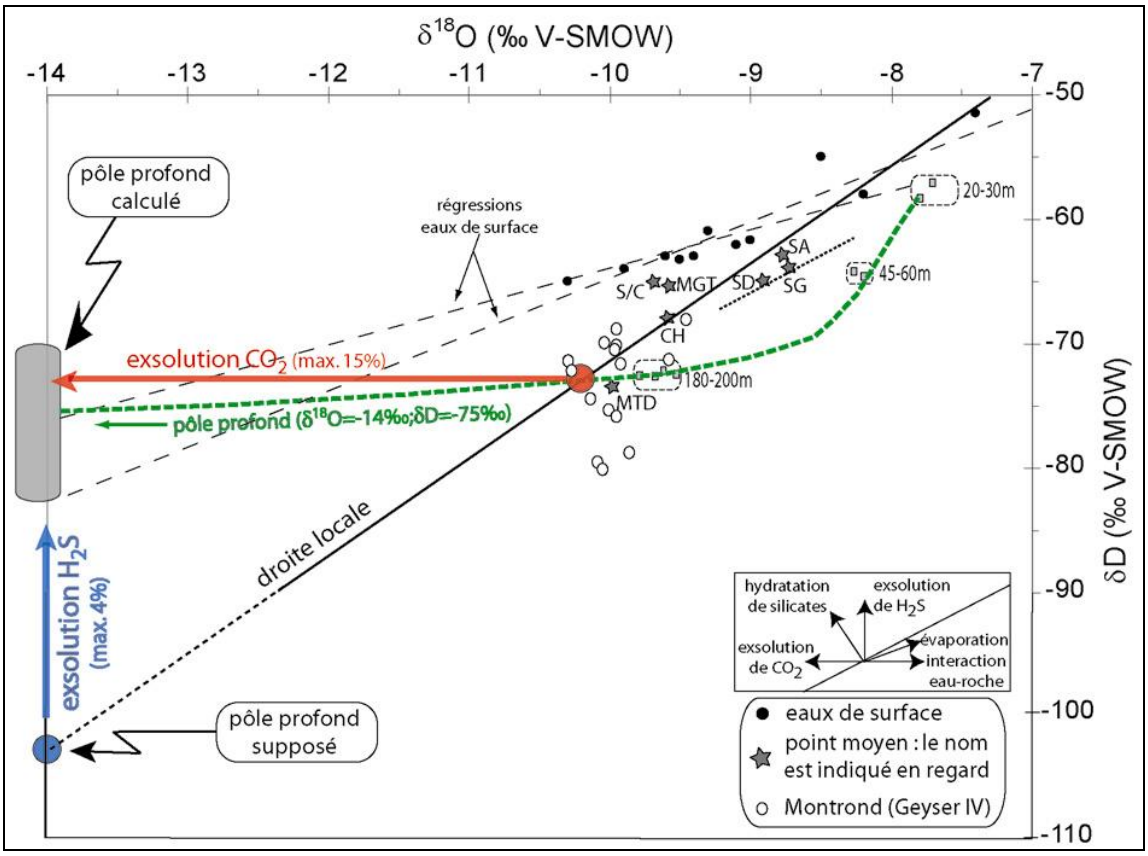


Fig. 90 : mélanges calculés pour les aquifères du forage Montrond 1 ; explications dans le texte.

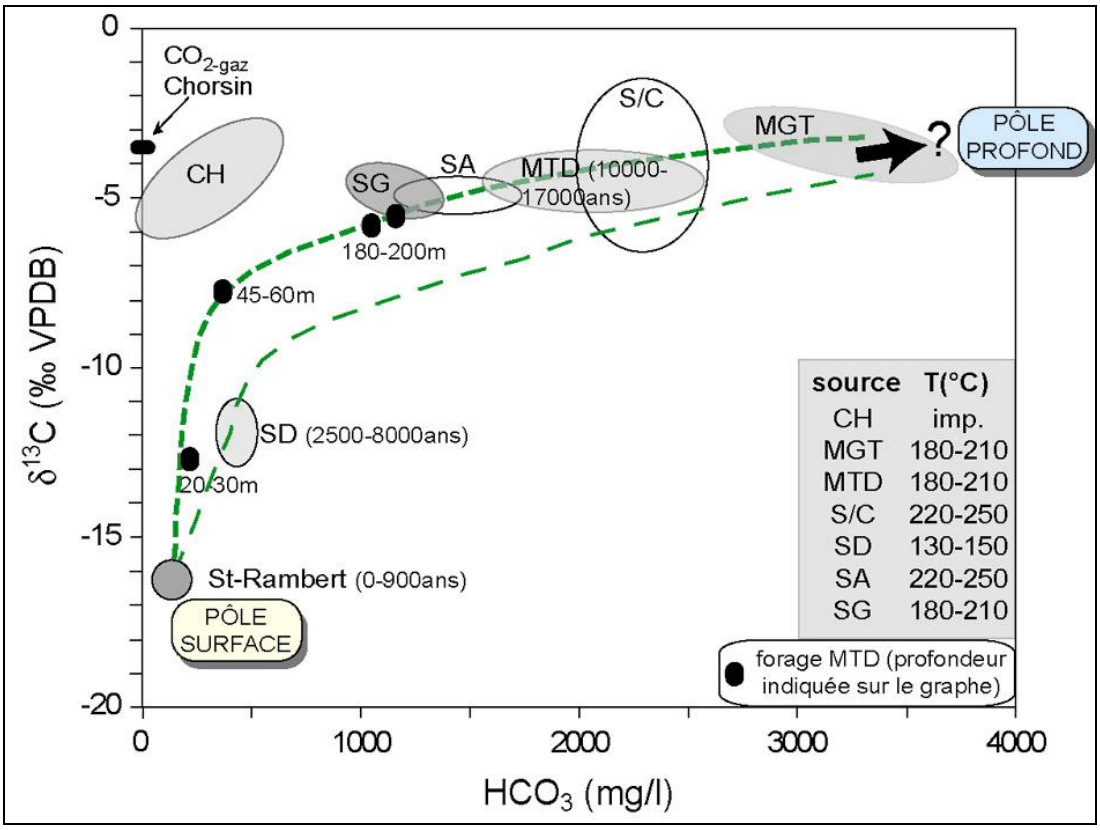


Fig. 91 : courbes de mélange possibles mises en relation avec la teneur en bicarbonates (minéralisation croissante) ; les températures profondes calculées par géothermométrie et les gammes d'âge ^{14}C sont indiquées.

Les activités ^{14}C mesurées sont semblables dans les niveaux aquifères du forage Montrond 1, alors que les niveaux supérieurs sont dilués par des eaux de surface et moins riches en bicarbonates. Il n'est pas remarqué de gaz libre à l'exutoire, mais la dissolution de CO_2 dans l'eau explique une bonne part de la minéralisation en bicarbonates des niveaux profonds. Les activités ^{14}C de ces derniers devraient diminuer. Cette baisse n'étant pas constatée lors de l'échantillonnage, il faut donc admettre une communication entre les différents aquifères. Les différences de minéralisation proviennent alors de degrés de mélange différents et de la non-homogénéité des aquifères de surface (cf aquifères du Furan).

L'existence d'un effet paléoclimatique ne semble valable que pour Montrond, les autres eaux minérales ayant des rapports isotopiques compatibles avec les aires de recharge actuelles ou modifiés par exsolution de gaz. De nombreuses études sur les sédiments (Magny, 1995), les stalagmites de la grotte de la Clamouse (McDermott et al., 1999), les avancées de glaciers dans les Alpes (Guiter et al., 2005) concordent pour situer les plus grands effets climatiques sur les isotopes vers 25000 à 21000 ans. La déglaciation prend effet vers 16000 à 13000 ans (Guiter et al., 2005), les températures variant peu depuis 10000 ans (Petit et al., 1999). L'âge maximal de Geyser IV le place dans une période froide, alors que les âges corrigés correspondent à des périodes de réchauffement. Montrond étant un mélange, statuer sur son âge carbone 14 est peu significatif. L'hypothèse la plus probable est la présence d'un pôle profond vieux, sans doute affecté par un effet paléoclimatique, rajeuni par injection d'eaux plus récentes. L'homogénéité des âges des aquifères reconnus en forage est aussi liée à des mélanges, ces aquifères étant des réservoirs à alimentation profonde par faille et alimentation de surface par faille et/ou recharge en bordure de bassin.

Deux schémas des circulations profondes dans le graben du Forez sont proposés dans les figures 92 et 93. Le premier met en relation les écoulements superficiels et les nappes d'arène (Monts du Forez, Lyonnais) avec les aquifères présents (forages Mon 1 et Geyser IV) dans le graben du Forez. Le second (Fig. 93) donne une description physique des circulations de fluides dans le bassin. La figure 92 met en évidence les aquifères profonds à temps de résidence important, qui peuvent être alimentés par des eaux ruisselées depuis les reliefs bordiers. L'existence d'aquifères discontinus autorise la remontée d'eaux profondes et d'eaux plus superficielles. Ceci peut représenter un des processus de mélange entre fluides dans le bassin, la présence de failles n'étant pas simulée.

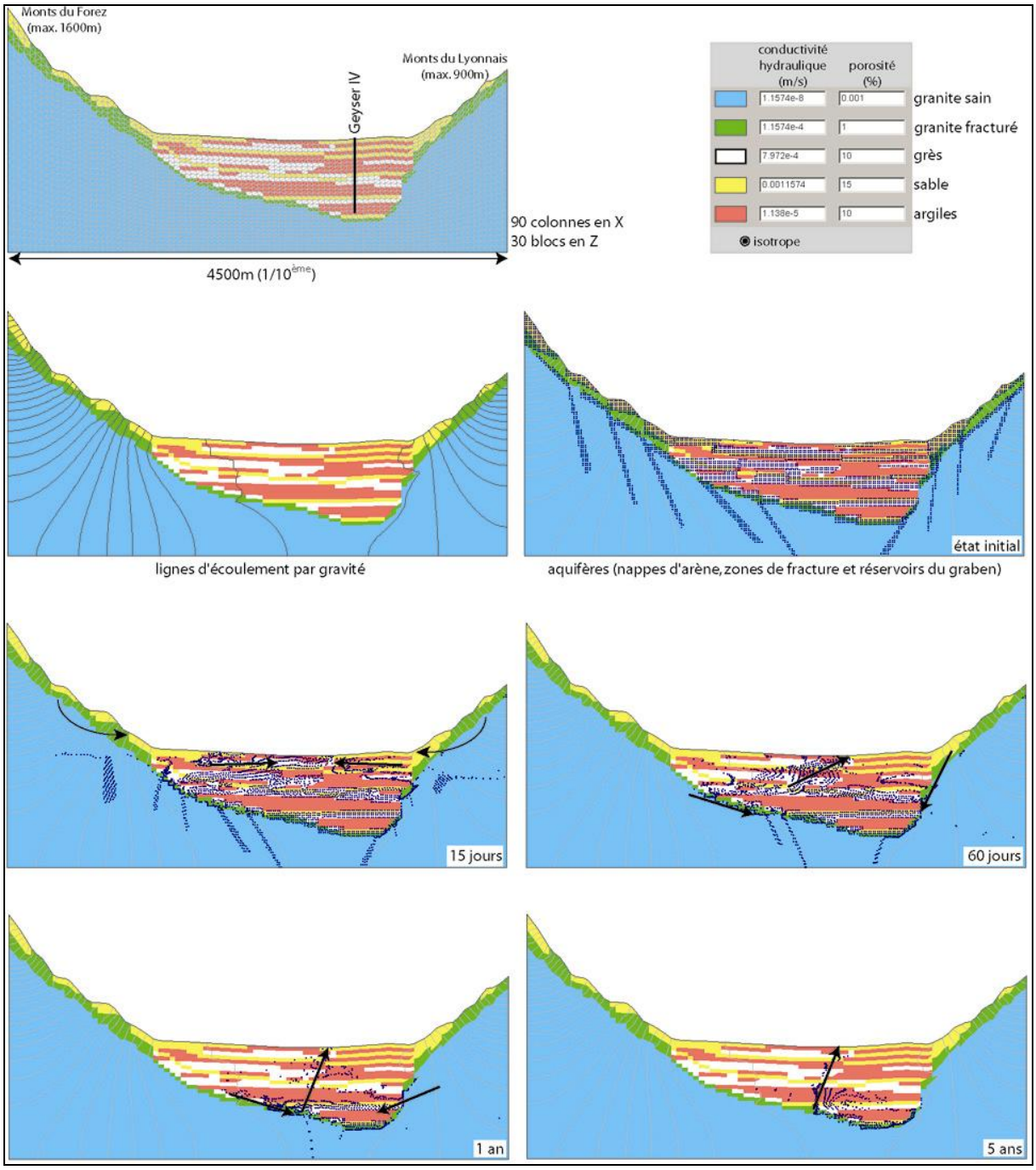


Fig. 92 : représentation schématique des écoulements dans le bassin du Forez. Les écoulements sont représentés par les particules bleues (espacement : 20m). Les Monts du Forez et du Lyonnais présentent des nappes d'arènes et des écoulements par faille ; le graben comprend quatre aquifères principaux sur sable, des passées gréseuses et d'épais horizons argileux (logiciel Topodrive). Les durées sont uniquement fournies à titre indicatif.

La figure 93 prend en compte l'existence de fracturations, ainsi que la compaction des sédiments par augmentation de pression. En tenant compte des températures de surface actuelles et du gradient géothermique local (30°C/km), les eaux profondes ont des températures proches de 40°C, compatibles avec celles des eaux prélevées (Geyser IV sort à 26°C en traversant des aquifères superficiels entre 15 et 22°C).

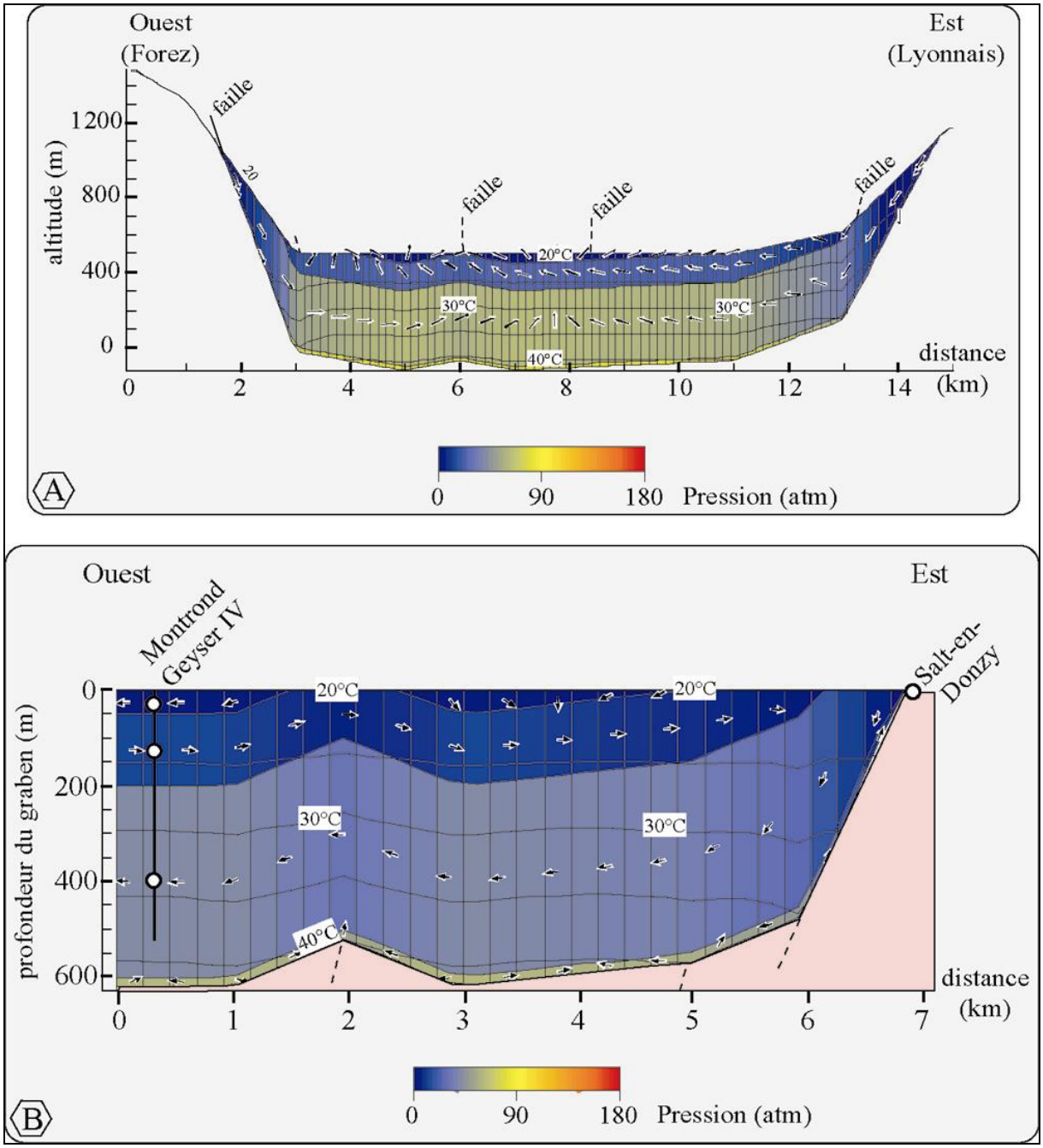


Fig. 93 : représentations schématiques du graben du Forez (A) et d'une section entre Montrond et Salt-en-Donzy (B). Le logiciel utilisé (Basin2 5.0 ; http://www.geology.uiuc.edu/~bethke/hydro_b2.htm) rend compte de la géométrie du bassin et de son remplissage (propriétés physiques et hydrologiques).Sont calculées l'évolution de la pression de fluide dans le bassin, la direction des écoulements des fluides et la température (contrôlée par le gradient géothermique).

BIBLIOGRAPHIE

Ahmad M., Akram W., Ahmad N., Azam Tasneem M., Rafiq M., Latif Z., **Assessment of reservoir temperatures of thermal springs of the northern areas of Pakistan by chemical and isotope geothermometry**, Geothermics 31, 613–631, 2002

Aires-Barros L., Marques J.M., Cores Graça R., Matias M.J., Van der Weijden C.H., Kreulen R., Eggenkamp H.G.M., **Hot and cold CO_2-rich mineral waters in Chaves geothermal area (northern Portugal)**, Geothermics 27, n°1, 89-107, 1998

Allison C.E., Francey R.J., Meijer H.A.J., **Recommendations for the reporting of stable isotope measurements of carbon and oxygen in CO_2 gas**, in Reference and Intercomparison Materials for Stable Isotopes of Light Elements, IAEA-TECDOC 825, 155-162, 1995

Amiotte-Suchet P., Probst J.L., **Flux de CO_2 consommé par altération chimique continentale : influences du drainage et de la lithologie**, C. R. A. S. 317, 615-622, 1993

Amiotte-Suchet P., Aubert D., Probst J.L., Gauthier-Lafaye F., Probst A., Andreux F., Viville D., **$\delta^{13}C$ pattern of dissolved inorganic carbon in a small granitic catchment: the Strengbach case study Vosges mountains, France**, Chemical Geology 159, 129–145, 1999

AmundsonR., Stern L., Baisden T., Wang Y., **The isotopic composition of soil and soil-respired CO_2**, Geoderma 82, 83-114, 1998

Andreo B., Lina C., Carrasco F., Jimenez de Cisneros C., Caballero F., Mudry J., **Influence of rainfall quantity on the isotopic composition (18O and 2H) of water in mountainous areas. Application for groundwater research in the Yunquera-Nieves karst aquifers (S Spain)**, Applied Geochemistry 19, 561–574, 2004

Antoine M., **Histoire du Forez** (1883), Ed. du Bastion, 245p, réédition 2004

Aquilina L., Sureau J.F., Steinberg M., “The Géologie Profonde de la France” geochemistry team, **Comparison of surface-, aquifer- and pore-waters from a Mesozoic basin and its underlying Palaeozoic basement, southeast France: chemical evolution of waters and relationships between aquifers**, Chemical Geology 138, 185-209, 1997

Aquilina L., Pauwels H., Genter A., Fouillac C., **Water-rock interaction processes in the Triassic sanstone and the granitic basement of the Rhine Graben: Geochemical investigation of a geothermal reservoir**, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 61, n°20, 4281-4295, 1997

Araguas Araguas L., Froehlich K., Rozanski K., **Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture,** Hydrol. Proc. 03, 230-244, 2000

Babic M., **Enrichissement électrolytique de l’eau pour dosage du Tritium par comptage en scintillation liquide à bas niveau**, Rapport technique interne CRG n°433, 02/2001

Bakalowicz M., **Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l’aquifère karstique et de la karstification**, Th. Doct. Etat Sc. Nat., Univ. Paris VI, 269 p., 1979

Banton et Bangoy, **Hydrogéologie: multiscience environnementale des eaux souterraines**, PUQ, 1999

Barbarin B., **Les granites carbonifères du Forez septentrional, Massif Central Français ; typologie et relations entre les différents massifs**, thèse 3ème cycle, Université Clermont-Ferrand, 177p, 1983

Batton-Hubert M., Tardy A., **Elaboration d'un guide méthodologique de gestion des ressources en eau du parc du Pilat**, Ecole Nationales Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 63p, février 1997

Baubron J.C., Bosch B., Degranges P., Leleu M., Marcé A., Rissler J.J., Sarcia C., **Recherches géochimiques sur les eaux thermales de la bordure ouest de la Limagne**, Bull. Minér., 102, 676-683, 1979

Beaucaire C., Gassama N., Tresonne N., Louvat D., **Saline groundwaters in the hercynian granites (Chardon Mine, France): geochemical evidence for the salinity origin**, Applied Geochemistry 14, 67-84, 1999

Beauchamp J., **L'eau et le sol**, http://www.u-picardie.fr/~beaucham/mst/eau-sol.htm, 2002

Bellon F., Hernandez J., **Chronologie du volcanisme dans le Forez (Massif Central français). Place dans l'activité magmatique tertiaire de France**, C.R. somm. Soc. Géol. France 4, 175-179, 1979

Bellon F., **La géologie de la Loire**, Le Hénaff ed., 160p, 1980

Begemann F., **Natural tritium**, In: Nuclear Geology, Varenna, 109-128, 1959

Berner-Kay E. and Berner R. A., **The global water cycle. Geochemistry and Environment**, Prentice-Hall, 394 p, 1987

Berthier F., Demange J., Fouillac C., Iundt F., Becassat P., Teyssier C., **Reconnaissance géothermique haute énergie dans la région de Saint-Flour (Massif Central)**, rapport BRGM 82SGN723GTH, 88p, 1982

Bertin C., Rouzaire D., Vigouroux P., Loizeau M., **Amélioration de la connaissance des ressources en eau souterraine des sites thermaux en Auvergne – Site Royat – Chamalières (63)**, rapport BRGM RP-52195-FR, 99 p., 16 fig., 10 tab., février 2003

Bertin C., Rouzaire D., Vigouroux P., **Amélioration de la connaissance des ressources en eau souterraine des sites thermaux en Auvergne – Site de Châteauneuf-les-Bains (63)**, rapport BRGM RP-52471-FR, 131 p., 17 fig., 38 tab., 13 photos, 20 annexes, décembre 2003

Beven K., Lamb R., Quinn P., Romanowicz R., Freer J., **TOPMODEL**, Computer Models of Watershed Hydrology, V.P. Singh (Ed.), Water Resource Publications, 627-668, 1995

Blavoux B., **Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène-18 et du tritium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée**, Thèse d'Etat Univ. Paris 6, 1978

Blavoux B., Letolle R., **Apports des techniques isotopiques à la connaissance des eaux souterraines**, Géochronique, n°54, 12-15, 1995

Bobier C., Glangeaud P., **Géodynamique et volcanisme du fossé de Montbrison et du horst du Forez**, BSGF 7ème série, tome 1, 867-890, 1959

Bortolami G.C., Ricci B., Susella G.F., Zuppi G.M., **Isotope hydrology of the Val Corsaglia, Maritime Alps, Piedmont, Italy**, in Isotope Hydrology, 1978, vol. 1, IAEA Symposium, 228, june 1978, Neuherberg, Germany, 327-350, 1978

Bottinga Y., **Calculation of fractionation factors for carbon and oxygen isotopic exchange in the system calcite-carbon dioxide-water**, J. Phys. Chem. 72, 800-808, 1968

Brenninkmeijer C.A.M., Kraft P., Mook W.G., **Oxygen isotope fractionation between CO_2 and H_2O**, Isotope Geoscience 1, 181-190, 1983

Brodersen C., Pohl S., Lindenlaub M., Leibundgut C., Wilpert K., **Influence of vegetation structure on isotope content of throughfall and soil water,** Hydrol. Process. 14, 1439-1448, 2000

Bruguier O., Becq-Giraudon J.F., Clauer N., Maluski H., **From late Visean to Stephanian: pinpointing a two-stage basinal evolution in the Variscan belt. A case study from the Bosmoreau basin (French Massif Central) and its geodynamic implications**, Int J Earth Sci (Geol Rundsch), 92, 338–347, 2003

Caen Vachette M., **Age cambrien des rhyolites transformées en leptynites dans la série métamorphique du Pilat**, C.R. Acad. Sci. Paris, 289, 997, 1979

Caen Vachette M., Gay M., Peterlongo J.M., Pitiot P., Vitel G., **Age radiométrique du granite syntectonique du gouffre d'Enfer et du métamorphisme hercynien dans la série de basse pression du Pilat (Massif Central Français)**, CRAS Paris, 299, 1201– 1204, 1984

Canard J., **Les eaux minérales en Forez et Roannais**, 122p, 1974

Capuano R.M., **The temperature dependance of hydrogen isotope fractionation between clay minerals and water: evidence from a geopressured system**, Geochimica et Cosmochimica Acta 56, 2547-2554, 1992

Carrillo-Rivera J.J, Clark I.D. et Fritz P., **Investigating recharge of shallow and paleo-groundwaters in the Villa de Reyes basin, SLP, Mexico, with environmental isotopes**, Applied hydrogeology 4, 35-48, 1992

Cartwright I., Weaver T., Tweed S., Ahearne D., Cooper M., Czapnik K., Tranter J., **Stable isotope geochemistry of cold CO_2-bearing mineral spring waters, Daylesford, Victoria, Australia: sources of gas and water and links with waning volcanism**, Chemical Geology 185, 71-91, 2002

Celle H., **Caractérisation des précipitations sur le pourtour de la Méditerranée Occidentale – approche isotopique et chimique**, thèse 3ème cycle, Université d'Avignon, 222p, 2000

Celle H., Daniel M., Mudry J., Blavoux B., **Signal pluie et traçage par les isotopes stables en Méditerranée occidentale. Exemple de la région avignonnaise (Sud-Est de la France)**, C. R. Acad. Sci. 331, 647-650, 2000

Celle-Jeanton H., Zouari K., Travi Y., Daoud A., **Caractérisation isotopique des pluies en Tunisie. Essai de typologie dans la région de Sfax**, C. R. Acad. Sci. 333, 625-631, 2001

Cerling T.E., **The stable isotopic composition of modern soil carbonate and its relationship to climate**, EPSL, 71, 229-240, 1984

Chapelle F. H., **Ground-water microbiology and geochemistry**, John Wiley & Sons, Inc. NY., 1993

Charguéron C., Bertin C., Rouzaire D., Vigouroux P., **Amélioration de la connaissance des ressources en eau souterraine des sites thermaux en Auvergne – Site de Saint-Nectaire (63)**, rapport BRGM RP-52469-FR, 158 p., 9 fig., 10 graph., 17 tab., 35 photos, 25 annexes, septembre 2003

Chenevoy M., **Nouvelles données cartographiques sur les terrains cristallophylliens du flanc Nord du Mont Pilat (Massif Central)**, Bull. Serv. Carte Géol., n°277, tome LX, 1964

Chenevoy M., **Les gneiss amygdalaires du Massif Central**, Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn., 10, 3, 117, 1968

Chenevoy M., Ravier J., **Caractère généraux des métamorphismes du Massif Central**, in Symposium J.Jung – Clermont-Ferrand, 109-132, 1971

Chery L., Garnier J., Petelet-Giraud E., Baraton A., Ruppert N., avec la collaboration de Dray M., Faillat J.P., Michelot J.L., Travi Y., Simler R., Stievenard M., Gibert M., **Projet de mise en place d'une banque de données isotopiques. Etat d'avancement année 2003**, Rapport final BRGM/RP-51092-FR, 67p, 03/2004

Chiodini G., Cioni R., Frullani A., Guidi M., Marini L., Prati F., Raco B., **Fluid geochemistry of Montserrat Island, West Indies**, Bull Volcano, 58, 380–392, 1996

Clark I.D., Fritz P., **Environmental isotopes in hydrogeology**, New York, Lewis Publishers, 328 p., 1997

Clavaud B., Ratsimba G., **Versant oriental des monts du Forez : granites et formations associées (Massif Central Français)**, thèse 3ème cycle, Université de Clermont Ferrand, 265p, 1972

Colin J. L., **Variabilité des concentrations des espèces minérales dans les précipitations humides en relation avec l'aérosols atmosphérique**, thèse Univ. Paris VII, 1988

Coplen T.B., Kendall C., Hopple J., **Comparison of stable isotope reference samples**, Nature, vol 302, n°5905, 236-238, 1983

Coplen T.B., **Normalization of oxygen and hydrogen isotope data**, Chemical Geology 72, 293-297, 1988

Coplen T.B., **Reporting of stable hydrogen, carbon and oxygen isotopic abundances**, Geothermics, vol 24, n°5/6, 707-712, 1995

Costa S., Lardeaux J.M., Maluski H., **^{39}Ar/^{40}Ar dating in the Monts du Lyonnais area (french Massif Central): An uplifted complex in a collisionnal context**, Terra Cognita, p.265, 1989

Couette F., **Etude cartographique et structurale des régions situées entre Loire et Furan (St Rambert – barrage de Grangent)**, mémoire de maîtrise Université Claude Bernard – Lyon I, 75p, 2000

Court A., **Reliability of hourly precipitation data**, JGR, 65, 12, 4017-4024, 1960

Craig H**., The geochemistry of the stable carbon isotopes**, Geochimica Cosmochimica Acta 3, 53-92,1953

Craig H., **Carbon-13 in plants and the relationships between carbon-13 and carbon-14 variations in nature**, J. Geol. 62, 115, 1954

Craig H., **Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide**, Geochim. Cosmochim. Acta 12, 133-149, 1957

Craig H., **Isotopic variations in meteoric waters**, Science 133, 1702-1703, 1961

Criss R.E., Taylor H.P.Jr., **Meteoric-hydrothermal systems**, in Stable isotopes in high temperature geological processes, Reviews in Mineralogy, vol. 16, 373-424, 1986

Dansgaard W., **Stable isotopes in precipitation**, Tellus 16, 436-468, 1964

Deines P., Langmuir D., Harmon R.S., **Stable carbon isotope ratios and the existence of a gas phase in the evolution of carbonate ground waters**, GCA 38, 1147-1164, 1974

Deines P., **The isotopic composition of reduced organic carbon**, In Fritz P., Fontes J.Ch. (Eds.) Handbook of Environmental Isotopes Geochemistry, 1, The Terrestrial Environment, Elsevier, Amsterdam, 329-406, 1980

Demay A., **Tectonique antéstéphanienne du Massif Central**, Mém. Serv. Carte Géol. Fr., 259p, 1948

De Maistre J., **Description géologique du bassin houiller de la Loire**, Revue de l'Industrie Minérale, Saint-Etienne, 1963

Dubois et Flück, 1984, in **Environmental Isotopes in Hydrogeology,** http://www.science.uottawa.ca/%7Eeih/toc.htm, 2001

Dufour E., **Pétrologie et géochimie des formations orthométamorphiques acides des Monts du Lyonnais (MCF)**, thèse 3ème cycle, Lyon, 241p, 1982

Duthou J.L., Piboule M., Gay M., Dufour E., **Premiers résultats radiométriques Rb-Sr sur les orthogranulites des Monts du Lyonnais**, C.R. Acad. Sci. Paris, 232, 2, 749-752, 1981

Duthou J.L., Floc'h J.P., d'après les documents préparés par Couturié J.P., Dubuisson G., Duthou J.L., Floc'h J.P., Gagny C., Girardeau J., Lameyre J., Lardeaux J.M., Ledru P., Maillet N., Marchand J., Mattauer M., Matte P., Mercier J.C., Peiffer M.T., Peterlongo J.M., Piboule M., Pin C., Sider H., Tempier P., Vitel G., **Evolution tectonométamorphique du Massif Central**, Réunion extraordinaire de la Société Géologique de France, Bull. Soc. Géol. France, 8, tome V, n°4, 667-693, 1989

Duthou J.L., Chenevoy M., Gay M., **Présence d'un magmatisme d'âge Viséen moyen dans le versant Sud du massif du Pilat, Massif central oriental ; conséquences**, C. R. Acad. Sci. Paris 327, 749-754, 1998

Eichler R., **Über den Isotopengehalt des Wasserstoffs in Niederschlag, Boden und Grundwasser**, thèse, Univ. d'Heidelberg, 1964

Encarta, http://www.encarta.msn.com

Environmental Isotopes in Hydrogeology, http://www.science.uottawa.ca/%7Eeih/toc.htm, 2001

Epstein, S., Mayeda, T., **Variation of 18O content of waters from natural sources**, Geochim. Cosmochim. Acta 4, 213–224, 1953

Etlicher B., **Massif Central, les chirats**, http://www.futura-sciences.com/comprendre/d/dossier550-1.php, 15/07/05

Faure M., Monié P., Pin C., Maluski H., Leloix C., **Late Visean thermal event in the northern part of the French Massif Central: new ^{40}Ar/^{39}Ar and Rb-Sr isotopic constraints on the Hercynian syn-orogenic extension**, Int J. Earth Sciences (Geol Rundsch) 91, 53-75, 2002

Fetter C.W., **Applied hydrogeology**, 4ème édition, Prentice Hall éd., 598 p, 2001

Fontes J.C., **Hydrogéologie, un champ privilégié de l'application des isotopes du milieu : l' "âge" des eaux souterraines**, in I.H.E.S. Symposium, Montpellier, 39p, septembre 1978

Fontes J. Ch., Garnier J. M., **Determination of the Initial ^{14}C Activity of the Total Dissolved Carbon: A Review of the Existing Models and a New Approach**, *Water Res.*, 15, No. 2, 399-413, 1979

Fouillac C., Michard G., **Sodium/Lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs,** Geothermics, Vol 10, n° 1, 55-70, 1981

Fouillac C., **Isotopic studies of deep and surface waters in the French Massif Central**, Proc. Intern. Symp. Isot. Techn. Water Resour. Developm. IAEA, Vienna, Austria, 646-648, 1991

Fournier R.O., Truesdell A.H., **An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters**, GCA 37, 1255-1275, 1973

Fournier R.O., **Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems**, Geothermics, 5, 41-50, 1977

Fournier R.O., Potter R.W., **Magnesium correction to the Na-K-Ca chemical geothermometer**, GCA 43, 1543-1550, 1979
Fournier R.O., **A revised equation for the Na/K geothermometer**, Geotherm. Res. Counc. Trans., 3, 221-224, 1979

Freslon M., **Transferts d'eau et de solutés dans un loess sous climat méditerranéen. Traçage naturel par les isotopes**, Thèse Université Paris VI, 222p., 1980

Friedman I., **Deuterium content of natural waters and other substances**, GCA, 4, 89-103, 1953

Friedman I., O'Neil J.R., **Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest**, U.S. Geological Survey Professional Paper, no. 440-KK, 1977

Froidevaux C., Brousse R., Bellon H., **Hot spot in France ?**, Nature, 248, 749-751, 1974

Fuge R., **Bromide**, In Handbook of Geochemistry, Wedepohl K.H. ed., 729-752, Springer-Verlag, 1972

Gagnard M., http://www.chez.com/gagnard/pageweb/indexclim.htm, 2004

Galley M.R., Miller A.I., Atherley J.F., Mohn M., **GS process-physical properties: Chalk River, Ontario, Canada**, Atomic Energy of Canada Limited, AECL-4225, 1972.

Galloway J. N., Likens G. E., Keene W. C. and Miller J. N., **The composition of precipitation in remote areas of the world**, J. Geophys. Res 87, 8771-8786, 1982

Gardien V., **Evolutions P-T et structures associées dans l'Est du M.C.F. : un exemple de l'évolution thermomécanique de la chaîne Paléozoïque**, Thèse 3ème cycle, Université Lyon Claude Bernard, 168p, 1990

Gardien V., Lardeaux J.M., Ledru P., Allemand P., Guillot S., **Metamorphism during late orogenic extension : insights from the French Variscan Belt**, Bull. Soc. Géol. France, tome 168, n°3, 271-286, 1997

Gat J.R., Karfunkel U. et Nir A., **Tritium content of rainwater from the Eastern Mediterranean area**, in Use of Tritium in the Physical and Biological Sciences, IAEA, Vienna, 41-54, 1962

Gat J.R., Carmi I., **Evolution of the isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea Area**, JGR 75, 3039-3048, 1970

Gat, J.R., **The isotopes of hydrogen and oxygen in precipitation**, in Handbook of Environmental Isotope Geochemistry (P. Fritz and J.Ch. Fontes, eds.), Vol. 1, 22-48, 1980

Gay M., Peterlongo J.M., Caen-Vachette M., **Age radiométrique des granites en massifs allongés et en feuillets minces syntectoniques dans les Monts du Lyonnais (MCF)**, C.R. Acad. Sci. Paris, 293, 993-996, 1981

Gay D., in **Une ville, une rivière : Saint-Etienne et le Furan,** Service éducatif des Archives Départementales de la Loire – Archives Municipales de Saint-Etienne, 249p, 1997, 1997

Genter A. avec la collaboration de Giot D., Lieutenant N., Nehlig P., Rocher Ph., Roig J.Y., Chevremont Ph., Guillou-Frottier L., Martelet G., Bitri A., Perrin J., Serrano O., Courtois N., Vigouroux Ph., Négrel Ph., Serra H., Petelet-Giraud E., **Méthodologie de l'inventaire géothermique des Limagnes : projet COPGEN. Compilation des données**, BRGMRP-52644-FR, 122 p., 49 fig., 8 tabl., 1 ann., 2003

Gerbe M.C., Gonord H., Arnaud N., **Age miocène des formations de bordure du fossé du Forez (Massif Central)**, Géologie de la France, n°2, 47-53, 1998

Gerbe M.C., Gonord H., Bilal E., **Découverte d'un paléosol néogène dans les Monts du Forez au sein du complexe volcanique de Montclaret-Fontvial: conséquences morpho-tectoniques régionales**, Géologie de la France, n°2, 59-69, 2000

Gerlach T. M., Taylor B. E., **Carbon isotope constraints on degassing of carbon dioxide from Kilauea Volcano**, GCA, 54, 2051-2058, 1990

Gibbs, R.J., **Circulation in the Amazon River estuary and adjacent Atlantic Ocean**, Journal of Marine Research, 28, 113-121, 1970

Gibert J.P., Laugier R., Massicot P., **Observations sur un groupe de sources minérales en Auvergne**, C. R. Acad. Sci., 323, série IIa, 999-1006, 1996

Giggenbach W.F., Gonfiantini R., Jangi B.L., Truesdell A.H., **Isotopic and chemical compositions of Parbati Valley geothermal discharges, Northwest Himalaya, India**, Geothermics, 12, 199-222, 1983

Giggenbach W.F., **Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators**, GCA, 52, 2749-2765, 1988

Girard J.-P., Fouillac A.-M., **Géochimie isotopique de l'oxygène et de l'hydrogène des argiles: Exemples d'application aux domaines diagénétique et géothermique**, Bull. Cent. Rech. Explor.-Prod. Elf Aquitaine 19, 167-195, 1995

Godwin H., **Half life of radiocarbon**, Nature 195, 984, 1962

Gonfiantini R., **Environmental isotopes in lake studies**, In Handbook of Environmental Isotope Geochemistry A., Vol. 1 (ed. P. Fritz and J. C. Fontes), 113-168, Elsevier, 1986

Gonfiantini R., **On the isotopic composition of precipitation**, in **Hydrologie et géochimie isotopique**, Orstom éditions, collection colloques et séminaire, 3-22, 1998

Gonfiantini R., Roche M.A., Olivry J.C., Fontes J.C., Zuppi G.M., **The altitude effect on the isotopic composition of tropical rains**, Chemical Geology 181, 147–167, 2001

Granet M., Wilson M., Achauer U., **Imaging a mantle plume beneath the French Massif Central,** Earth Planet. Sci. Lett., 136, 281-296, 1995

Grimbert H., Bargeot L., **Potentialités agro-climatiques des sols, Essai de modélisation spatiale du risque de déficit hydrique pour la Bresse**, Centre National d'Etudes et de Ressources en Technologies Avancées, 23p, 1999

Guilbert J., Poupinet G., Kelner S., Allemand P., **Massif Central : détermination et modélisation de l'atténuation des ondes P télésismiques**, C. R. Acad. Sci. Paris 328, 789-796, 1999

Guiter F., Triganon A., Andrieu-Ponel V., Ponel P., Hébrard J-P., Nicoud G., De Beaulieu J-L., Brewer S., Guibal F., **First evidence of "in situ" Eemian sediments on the high plateau of Evian (Northern Alps, France): implications for the chronology of the Last Glaciation**, Quaternary Science Reviews, Volume 24, Issues 1-2, 35-47, 2005

Helgeson H. C., Delany J. M., Nesbitt H. W., Bird D. K., Am. J. Sci., 278, 1–229, 1978

Hem J. D., **Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water**, U.S Government, 263 p, 1985

Hernandez J., **Le volcanisme tertiaire des Monts du Forez et de la plaine de Montbrison**, thèse 3ème cycle, Fac. Sc. Univ. Paris VI, 1971

Hörmann G., **SIMPEL, a family of simple soil water models**, http://www.hydrology.uni-kiel.de/simpel/, 2003

Hurtig E., Cermak V., Haenel R., Zui V., **Geothermal Atlas of Europe**, Hermann Haack Verlagsgesellshaft, p. 156, 1991

International Hydrological Programme, Technical Documents in Hydrology, **Environmental isotopes in the hydrological cycle, Principles and applications**, Mook W.G. ed., n°39, vol I-VI, 942p,2000

Jacob H., Sonntag C., **An 8-year record of the seasonal variation of ^{2}H and ^{18}O in atmospheric water vapour and precipitation at Heidelberg, Germany**, Tellus 43B, 291-300,1991

Jaffrezo J. L., **Etude du lessivage des aérosols atmosphériques par les précipitations en milieu urbain**, Thèse Univ. Paris VII, 1987

Javoy M., Pineau F., **The volatile record of a "popping" rock from the Mid-Atlantic Ridge at 14°N: chemical and isotopic composition of the gas trapped in the vesicles**, Earth Planet. Sci. Lett., 107, 598-611, 1991.

Jones N., **Groundwater Dating with Tritium and Carbon-14**, 17p, 2000

Junge C.E., **Air Chemistry and Radioactivity**, Academic Press, 1963

Kalin R.M., **Radiocarbon Dating of Groundwater Systems,** 30p, 2001

Karlén I., Olsson I.U., Kallberg P., Kilicci S., **Absolute determination of the activity of two ^{14}C dating standards**, Arkiv f. Geofysik 6, 465-471, 1966

Kharaka Y.K., Mariner R.H., **Chemical geothermometers and their applications to waters from sedimentary basins**, in Thermal history of sedimentary basins, Naeser N. D. and Mclollon T.H. (editors), Springer Verlag, New York, 99-117, 1989

Kocher T., Kocher J., **Entre sources et château, Montrond-les-Bains**, Ed. Mémoire Forézienne, non daté

Laboratoire de Biologie Animale et Appliquée - Université J. Monnet, **Etude de la qualité biologique des cours d'eau du Parc Naturel Régional du Pilat**, 48p, 1994

Lardeaux J.M., Ledru P., Daniel I., Duchene S., **The Variscan French Massif Central – a new addition to the ultra-high pressure metamorphic 'club': exhumation processes and geodynamic consequences**, Tectonophysics 332, 143-167, 2001

Larqué P., Weber F., **Etudes sédimentologiques sur la formation tertiaire de la plaine du Forez. Géochimie des argiles**, Bull. Serv. Carte géol. Alsace-Lorraine, Strasbourg, 22, 4, 249-278, 1969

Lastennet R., **Rôle de la zone non saturée dans le fonctionnement des aquifères karstiques, Approche par l'étude physico-chimique et isotopique du signal d'entrée et des exutoires du massif du Ventoux (Vaucluse**), Thèse Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 222 pp., 1994

Laurent F., **Outils de modélisation spatiale pour la gestion intégrée des ressources en eau – Application aux Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux**, Thèse Ecole Nationale Supérieure des Mines de St-Etienne et Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 357p, 1996

Ledru P., Courrioux G., Dallain C., Lardeaux J.M., Montel J.M., Vanderhaeghe ., Vitel G., **The Velay dome (French Massif Central): melt generation and granite emplacement during orogenic evolution**, Tectonophysics 342, 207–237, 2001

Lefort J.P., Agarwal B.N.P., **Topography of the Moho undulations in France from gravity data: their age and origin**, Tectonophysics 350, 193– 213, 2002

Lenoir X., Dautria J.M., Briqueu L., Cantagrel J.M., Michard A., **Nouvelles données géochronologiques, géochimiques et isotopiques sur le volcanisme du Forez : relation avec l'évolution cénozoïque du manteau du Massif central**, C. R. Acad. Sci. Paris 330, 201-207, 2000

Le Griel A., **Géologie et relief de la plaine du Forez**, in « Paysages et milieux naturels de la plaine du Forez », Centre d'Etudes Foréziennes, 1984

Libby W.F., **Radiocarbon Dating,** Univ. of Chicago Press, Phoenix Books, Chicago, London, 175 pp, 1951

Lopoukhine M., **Reflexion concernant les critères de definition des gisements d'eau minérale**, rapport BRGM RR-37964-FR, 1994

Lucazeau, F., Vasseur, G., Bayer R., **Interpretation of heat flow data in the french Massif Central**, Tectonophysics, 103, 99-119, 1984

McCrea J.M., **On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale**, The Journal of Chemical Physics, vol 18, n°6, 849-857, 1950

Mc Dermott F., Frisia S., Huang Y., Longinelli A., Spiro B., Heaton T.H.E., Hawkesworth C.J., Borsato A., Keppens E., Fairchild I.J., **Holocene climate variability in Europe: Evidence from δ^{18}O, textural and extension-rate variations in three speleothems,** Quaternary Science Reviews, Volume 18, Issues 8-9, 1021-1038, 1999

McKenzie W.F., Truesdell A.H., **Geothermal reservoir temperatures estimated from the oxygen isotope compositions of dissolved sulfate and water from hot springs and shallow drillholes**, Geothermics, 5, 51-61, 1977.

Magny M., **Successive Oceanic and Solar Forcing Indicated by Younger Dryas and Early Holocene Climatic Oscillations in the Jura**, Quaternary Research, Volume 43, Issue 3, 279-285, 1995

Maisonneuve J., Boineau R., **Les sources minérales de Massif Central français et leur cache géologique**, Symposium sur la géologie, la morphologie et la structure profonde du Massif Central français en l'honneur de J. Jung, 1971

Majoube M., **Fractionnement en oxygène-18 et en deutérium entre l'eau et sa vapeur**, Journal de Chimie Physique 10, 1423, 1971

Malavieille J., Guihot P., Costa S., Lardeaux J.M., Gardien, V., **Collapse of the thickened Variscan crust in the French Massif Central: Mont Pilat extensional shear zone and St. Etienne upper Carboniferous basin**, Tectonophysics 177, 139–149, 1990

Martelet M., avec la collaboration de Bitri A., Genter A., Guillou-Frottier L., Perrin J. et Serrano O., **Méthodologie de l'inventaire géothermique de la Limagne : projet COPGEN. Compilation des données géophysiques**, rapport BRGM RP-52667-FR, 112p., 59 fig., 7 tabl., 1 ann., 2003

Mattauer M., Matte P., **Le bassin Stéphanien de St-Etienne ne résulte pas d'une extension tardi-hercynienne généralisée : c'est un bassin pull-apart en relation avec un décrochement dextre**, Geodinamica Acta 14, 23-31, 1998

Matte P., **La chaîne varisque parmi les chaînes paléozoïques péri atlantiques, modèle d'évolution et position des grands blocs continentaux au Permo-Carbonifère**, Bull. Soc. Géol. France (8), t. II, n° 1, 9-24, 1986

Mazor E., **Applied Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology**, Halsted Press, New York, 1991

Merle O., Michon L., **The formation of the West European Rift : A new model as ewemplified by the Massif central area**, Bull. Soc. Géol. France, 172, 2, 81-89, 2001

Merley J., **Histoire des eaux minérales de Saint-Galmier**, Université de St-Etienne – Centre Interdisciplinaire d'Etudes et de Recherche sur les Structures Régionales, 382p, 1994

Merlivat L., Jouzel J., **Global climatic interpretation of the deuterium – oxygen-18 relationship for precipitation**, JGR 84, 5029-5033, 1979

Météo France, www.meteo.fr, 2004

Michard G., **Géothermomètres chimiques**, Bull. du BRGM (2ème série), section III, n°2, 183-189, 1979

Michard G., **Behaviour of major elements and some trace elements (Li, Rb, Cs, Sr, Fe, Mn, W, F) in deep hot waters from granitic areas**, Chem. Geol., 89, 117-134, 1990

Michon L., Merle O., **The evolution of the Massif central Rift : Spatio-temporal distribution of the Volcanism**, Bull. Soc. Géol. Fr., 172, 2, 69-80,2001

Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie , **Notes techniques DNEMT n°1 à 16**, téléchargeables à l'adresse http://www.industrie.gouv.fr/cgi-bin/industrie/frame0.pl?url=/energie/sommaire.htm, 11/95 à 07/00

Miyake Y., Matsubaya O., Nishihara C., **An isotopic study on meteoric precipitation**, Pap. Meteor. Geophys., 19, 243–266, 1968

Mook W.G., Groenweld D.J., Brouwn A.E., van Ganwijk A.J., **Analysis of a run-off hydrograph by means of natural ^{18}O, Proc. Conf. Isotope Techniques in Ground-Water Hydrology**, IAEA, Vienna, 145-155, 1974

Mook W.G., **Environmental Isotopes in the Hydrological cycle, Principles and applications**, International Hydrological Programme V, Technical Documents in Hydrology, n°39, vol 1, 2000

Moser H., Stichler W., Trimborn P., **Deuterium and oxygen-18 measurements on surface waters of the Bavarian Prealps**, 1970

Négrel P., Fouillac C., Brach M., **A strontium isotopic study of mineral and surface waters from the Cézallier (Massif Central, France) : implications for mixing processes in areas of disseminated emergences of mineral waters**, Chemical Geology 135, 89-101, 1997

Négrel P., Roy S., **Chemistry of rainwater in the Massif Central (France) : a strontium isotope and major element study**, Applied Geochemistry, vol 13, n°8, 941-952, 1998

Nehlig P., Boivin P., de Goër A., Mergoil J., Prouteau G., Sustrac G., Thiéblemont D., **Les volcans du Massif Central**, Revue Géologues Numéro spécial Massif central, 41p, 05/08/03

Nicolas A., Lucazeau F., Bayer R., **Peridotite xenoliths in the Massif central basalts, France : textural and geological evidence for asthenospheric diapirism**, In: Mantle Xenoliths, P. H. Nixon, ed., pp. 563-574, Wiley, Chichester, 1987

Nolting B., Gössele P., Wefer H., Bender M., **Use of water balances for landfill sites monitoring**, in Proceedings Sardinia, 5th International Landfill Symposium, Cagliary, 263-274 cité par http://www.univ-savoie.fr/mse/ressources/rapports/rapports98/vito/bilhydri.htm, 1995

Olive P., **Protocole de prélèvement d'eau pour le dosage du carbone-14 du carbone minéral total dissous**, Rapport interne CRG n°424, 6p, 07/1999

O'Neil J.R., **Theoretical and experimental aspects of isotopic fractionation**, in Stable isotopes in high temperature geological processes, Valley, Taylor et O'Neil éd., Reviews in mineralogy vol. 16, Mineralogical Society of America, 570p, 1986

Pauwels H., Fouillac C., Goff F., Vuataz F.D., **The isotopic and chemical composition of CO_2-rich thermal waters in the Mont-Dore region (Massif-Central, France)**, Applied Geochemistry 12, 411-427, 1997

Penman H. L., **Natural evaporation from open water, bare soil and grass**, Proc. R. Soc. London A193, 120-145, 1948

Peterlongo J.M., **Les terrains cristallins des Monts du Lyonnais**, thèse d'état, annales de l'Université de Clermont-Ferrand, n°4, fasc. 4, 187p, 1960

Pedelaborde P., **Introduction à l'étude scientifique du climat**, SEDES, 1982

Perrier G., Ruegg J.C., **Structure profonde du Massif Central Français**, Ann. Géophys. 29, 435, 1973

Petit J.-R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.M., Basile I., Benders M., Chappellaz J., Davis M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pépin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M., **Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica**, Nature, Vol. 399, p. 429-436, 1999

Petrescu Maftei C., **Etudes concernant les écoulements superficiels ; Modélisation spatialisée de l'écoulement sur le bassin versant de Voinesti – Roumanie**, thèse de doctorat, Université « Ovidius » de Constanta et Université Montpellier II, 2002

Pitiot P., **Relations des ensembles cristallins du Lyonnais et du Pilat du point de vue structural**, thèse 3ème cycle, Université Lyon I, 185p, 1984

Pomerol C., Ricour J., **Terroirs et thermalisme de France**, BRGM éd., 288p, 1992

Poreda R.J., Craig H., Arnorsson S., Welhan J.A., **Helium isotopes in Icelandic geothermal systems: I. ^{3}He, gas chemistry, and ^{13}C relations,** GCA, Volume 56, Issue 12, 4221-4228, 1992

Roig J.Y., Faure M., **La déformation du quartz dans un pluton syntectonique mis en place pendant l'extension carbonifère supérieur du Massif Central Français (le leucogranite de Chambles, massif du Velay)**, C. R. Acad. Sci. Paris, 321, 789-796, 1995

Roig J.Y., Faure M., **Folding and granite emplacement inferred from structural, strain, TEM and gravimetric analyses: the case study of the Tulle antiform, SW French Massif Central**, Journal of Structural Geology, vol 20, n° 9/10, 1169-1189, 1998

Rosman K.J.R., Taylor P.D.P., **Isotopic composition of the elements 1997**, International Union of Pure and Applied Chemistry, 20p, 1997

Rozanski K., Sonntag C., Münnich K.O., **Factors controlling stable isotope composition of European precipitations**, Tellus, 34, 142-150, 1982

Rozanski K., Araguas-Araguas L., Gonfiantini R., **Relation between long-term trends of oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate**, Science, vol. 258, 95-98, 1992

Rozanski K., Araguas-Araguas L., Gonfiantini R., **Isotopic patterns in modem global precipitation**, in P.K. Swart, K.C. Lohman, J. McKenzie and S. Savin (eds.) Climate Change in Continental Isotopic Records - Geophysical Monograph 78, American Geophysical Union, Washington, D.C., 1-36, 1993

Samani Z. A., Hargreaves G. H., **Estimating potential evapotranspiration**, Tech. Note J. Irrig. Drain. Eng 108(3)**,** 255-230, 1982

Sanjuan B., Crouzet C., Brach M., **Caractérisation d'une contamination des eaux par l'arsenic : exemples d'Auzon et d'Auzelles (Auvergne)**, rapport BRGMRP-50737-FR, 46p., 6 fig., 10 tabl., 2001

Sanusi A., Wortham H., Millet M., Mirabel P., **Chemical composition of rainwater in eastern France**, Atmospheric Environment, vol. 30, n°1, 59-71, 1996

Serra H., Petelet-Giraud E., Négrel Ph., **Inventaire du potentiel géothermique de la Limagne (COPGEN). Synthèse bibliographique de la géochimie des eaux thermales**, rapport BRGMRP-52587-FR, 84 p., 21 fig., 5 tabl., 2 ann., 2003

Service éducatif des Archives Départementales de la Loire, **Retour aux sources : les eaux minérales et thermales de la Loire**, 47p, janvier 1994

Service éducatif des Archives Départementales de la Loire – Archives Municipales de Saint-Etienne, **Une ville, une rivière : Saint-Etienne et le Furan**, 249p, 1997

Sheppard, S.M.F., **Characterization and isotopic variations in natural waters**, In: Valley, J.W., Taylor Jr., H.P., O'Neil, J.R. (Eds.), Stable Isotopes in High Temperature Geological Processes, Reviews in Mineralogy, vol. 16. Mineral. Soc. America, pp. 165– 184, 1986

Sheppard S.M.F., Gilg, H.A., **Stable isotope geochemistry of clay minerals**, Clay Minerals 31, 1-24, 1996

Sobolev S.V., Zeyen H., Granet M., Achauer U., Bauer C., Werling F., Altherr R., Fuchs K., **Upper mantle temperatures and lithosphere-asthenosphere system beneath the French Massif Central constrained by seismic, gravity, petrologic and thermal observations,** Tectonophysics 275, 143-164, 1997

Souriau A., **Structure profonde sous la France**, obtenue à partir des ondes de surface, Bull. Soc. Geol. Fr. 18, 1035-1093, 1976

Stantrock J., Studley S.A., Hayes J.M., **Isotopic analyses based on the mass spectra of carbon dioxide**, Anal Chem 57, n°7, 1444-1448, 1985

Staron G., **L'hiver dans le Massif Central Français**, thèse d'état, Université de St-Etienne, 402p, 1993

Staron G., in **Une ville, une rivière : Saint-Etienne et le Furan,** Service éducatif des Archives Départementales de la Loire – Archives Municipales de Saint-Etienne, 249p, 1997, 1997

Stuiver M., Reimer P.J., Bard E., Beck J.W., Burr G.S., Hughen K.A., Kromer B., McCormac G., van der Plicht J., Spurk M., **INTCAL98 Radiocarbon Age Calibration, 24000-0 cal BP** Radiocarbon 40, 3, 1041-1083, 1998

Sueker J.K., **Isotope Applications in Environmental Investigations Part II: Groundwater Age Dating and Recharge Processes, and Provenance of Sulfur and Methane**, Published online in Wiley Interscience, REMEDIATION Spring 2003, 71-90, 2003

Surmely F., **Les sources minérales oubliées du Massif Central**, Editions de la Montmarie, 342 p., 2005

Tamers M.A., **Carbon-14 Dating with the Liquid Scintillation Counter : Total Synthesis of the benzene Solvent**, Science, vol. 132, 668-669, 1960

Taylor S.R., McLennan S.M., **The Continental Crust; Its composition and evolution; an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks**, Blackwell, Oxford, 312., 1985

Termier P., **Etude sur le massif cristallin du Mont Pilat**, Bull. Serv. Carte Géol. Fr., n°1-10,1-56, 1889

Termier P., Friedel G., **Sur l'existence des phénomènes de charriage antérieurs au Stéphanien dans la région de St-Etienne**, C. R. Acad. Sci., 142, 1003, 1906

Thomas P., http://www.ens-lyon.fr/Planet-Terre/Infosciences/Geodynamique/Volcanisme/Articles/massif-central.htm, 2001

Thornthwaite C. W., Mather J. R., **The water balance**, Publ. Climatol. Lab. Drexel. Inst. Technol. 8, 1, 1-104, 1955

Truesdell A.H., **Oxygen isotope activities and concentrations in aqueous salt solutions at elevated temperature: consequences for isotope geochemistry**, Earth Planet. Sci. Lett. 23, 387-396, 1974

Truesdell A.H., **Geochemical techniques in exploration, summary of section III**, Proc. Second United Nations Symposium on the development and use of geothermal resources 1, Iiii-Ixiii, 1975

Turc L., **Le bilan d'eau des sols : relation entre les précipitations, l'évapotranspiration et l'écoulement**, Annales agronomiques, Série A, 491-595, 1954

USGS, Techniques for Water Ressources Investigations, Book 9 “Handbook for Water-Resources Investigations”, en ligne à http://water.usgs.gov/pubs/twri/, 1997-1999

Vachette M., Roques M., Couturié J.P., **Age hercynien précoce du massif de granite du Velay (Massif Central Français) et âge calédonien des migmatites du panneau de ce massif**, CRAS, t. 272, 3116-3119, 1971

Verkouteren R.M., Lee J.N., **Web-based interactive data processing: application to stable isotope metrology**, Fresenius J Anal Chem 370, 803–810, 2001

Verma S.P., Santoyo E., **New improved equations for Na/K, Na/Li and SiO_2 geothermometers by outlier detection and rejection**, JVGR 79, 9-23, 1997

Ville de Saint-Etienne, **Distribution de l’eau à Saint-Etienne – Réalisations et projets**, 96p, 1972

Vitel G., **Géologie de la Loire**, Publications de l’Université de Saint-Etienne, 156p, 2001

Werling F., Altherr R., **Thermal evolution of the lithosphere beneath the French Massif Central as deduced from geothermobarometry on mantle xenoliths**, Tectonophysics 275, 119-141, 1997

White W.M., http://www.imwa.info/Geochemie/Chapters.HTML, 1999

Wyns R., Guillocheau F., **Géomorphologie grande longueur d'onde, altération, érosion et bassins épicontinentaux**, Doc. BRGM 293, 103-107,1999

Yousif I.A., **Les amphibolites de la série métamorphique de basse pression du Vivarais occidental et du mont Pilat**, thèse de 3ème cycle, Université Lyon I, 132p, 1980

Yurtsever Y., **Worldwide survey of isotopes in precipitation**, IAEA report, Vienna, 1975

Yurtsever Y., Gat J.R., **Atmospheric Waters**, in Stable Isotope Hydrology, Tech. Report Series N° 210, IAEA, Vienna, 103-142, 1981

Zeyen H., Novak O., Landes M., Prodehl C., Driad L., Hirn A., **Refraction-seismic investigations of the northern Massif Central (France)**, Tectonophysics 275, 99-117, 1997

Zuber A., Malosweski P., **Manual on lumped parameter models used for the interpretation of environmental tracer data in groundwaters**, 48p, 2000

ANNEXES

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES PRESENTES EN ANNEXES

ANNEXES : METHODOLOGIE
I. MESURES EFFECTUEES SUR LE TERRAIN
II. ISOTOPES STABLES
II.1 Equilibration eau$_{(liquide)}$-$CO_{2(gaz)}$ pour détermination du $\delta^{18}O$ sur $CO_{2(gaz)}$.
II.2 Obtention de $CO_{2(gaz)}$ à partir de carbonates pour détermination du $\delta^{13}C$.
II.3 Obtention de $H_{2(gaz)}$ à partir d'eau pour détermination du $\delta^{2}H$.
III. SPECTROMETRIE DE MASSE – ISOTOPES STABLES
IV. ISOTOPES COSMOGENIQUES
IV.1 Détermination de la teneur en tritium
IV.2 Dosage du ^{14}C du Carbone Minéral Total Dissout
V. DETERMINATION DU CONTENU EN ELEMENTS MAJEURS
V.1 Cations
V.2 Anions

ANNEXES : CALCUL DE L'ETP
1. METHODE DE THORNTHWAITE
2. MÉTHODE DE TURC
3. METHODE DE HARGREAVES
4. METHODE DE PENMAN

ANNEXES CHAP 2
Fig. A.1.1 : pluviométrie 1973-2002 (cumuls annuels en mm) – 1.
Fig. A.1.2 : pluviométrie 1973-2002 (cumuls annuels en mm) – 2.
Fig. A.2 : évolution décadaire des évapotranspirations à Andrézieux-Bouthéon, St-Just-St-Rambert et Tarentaise.
Tab. A.1 : pluviométrie (RR en mm) et composition isotopique (‰VSMOW) journalière et mensuelle pondérée à St-Just-St-Rambert (400m); les mesures en grisé sont recalculées à partir de la GMWL; les lettres O, N, G se référent respectivement à des orages, de la neige et du grésil
Tab. A.2 : pluviométrie (RR en mm) et composition isotopique (‰VSMOW) journalière et mensuelle pondérée à Rochetaillée (770m); les mesures en grisé sont recalculées à partir de la GMWL
Tab. A.3 : pluviométrie (RR en mm) et composition isotopique (‰VSMOW) journalière et mensuelle pondérée à Tarentaise (1080m); les mesures en grisé sont recalculées à partir de la GMWL

ANNEXES CHAP 3
Tab A.4.1 (bassin du Furan) : paramètres mesurés sur le terrain, isotopie, chimie éléments majeurs
Tab A.4.2 (Forez non minéral) : paramètres mesurés sur le terrain, isotopie, chimie éléments majeurs
Tab A.4.3 (Forez minéral) : paramètres mesurés sur le terrain, isotopie, chimie éléments majeurs
Tab. A.5 : matrices de corrélations – domaine Furan et Forez non minéral ; le seuil de corrélation retenu est fixé à 0,85.
Fig. A.3 : diagrammes d'activités ; lavoirs et ruisseaux du domaine Furan.
Fig. A.4 : diagrammes d'activités ; lavoirs et ruisseaux du domaine Forez non minéral.

Tab. A.6 : indices de saturation Furan/Forez non minéral sans restriction
Tab. A.7 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

ANNEXES CHAP 4

Fig. A.5 : diagrammes d'activité eaux minérales
Tab. A.8 : indices de saturation eaux minérales sans restriction - température de la source
Tab. A.9 : indices de saturation eaux minérales - dissolution de 3 phases
Tab. A.10 : indices de saturation eaux minérales - 50 à 250°C
Tab. A.11 : températures calculées par géothermométrie
Tab. A.12 : températures calculées par géothermométrie - forage Montrond 1
ANNEXES CHAP 4 : calcul des âges carbone 14
Tab. A.13 : âges carbone 14

ANNEXES METHODOLOGIE

I. MESURES EFFECTUEES SUR LE TERRAIN

Quelques paramètres physico-chimiques sont mesurés directement sur lors du prélèvement, sur un litre, afin d'éviter des problèmes liés au transport ou au stockage : modification des équilibres ioniques par changement de température, de la solubilité des sels et gaz :

- la température (°C) à l'émergence, apportant une première contrainte sur l'exposition du réservoir aux phénomènes extérieurs (pluie, exposition de la source aux variations atmosphériques de température).
- le pH mesuré à la température de la source (pas de modification des équilibres ioniques dans l'échantillon) par différence de potentiel entre une électrode verre et une électrode de référence (calomel – KCl).
- la conductivité électrique ($\mu S.cm^{-1}$), qui permet d'estimer de manière relative la teneur en ions dissous de l'eau.
- mesure de la l'ANC (Capacité Neutralisante Acide en $meq.l^{-1}$) pour l'évaluation de la teneur en carbonates, bicarbonates et hydrogénocarbonates (mono- et di-).
- le potentiel rédox eH (mV).

II. ISOTOPES STABLES

Les rapports isotopiques de l'hydrogène $^{2}H/^{1}H$ (ou D/H), de l'oxygène $^{18}O/^{16}O$ ont été déterminés sur les échantillons suivants : pluies, eaux superficielles (quelques mois d'infiltration) et eaux minérales; le rapport du carbone $^{13}C/^{12}C$ a été mesuré sur les sources à caractère minéral (ANC supérieure à 5 $meq.l^{-1}$ de bicarbonates) et ponctuellement sur les sources superficielles.

La mesure de ces rapports est effectuée par spectrométrie de masse à source gazeuse (Isoprime) sur un gaz purifié, CO_2 ou H_2, et nécessite l'emploi de corrections et normalisations pour exprimer les résultats par rapport aux standards internationaux.

II.1 Equilibration eau$_{(liquide)}$-$CO_{2(gaz)}$ pour détermination du $\delta^{18}O$ sur $CO_{2(gaz)}$.

2 à 3 ml (0,12 à 0,19 mol) d'eau sont introduits dans des fioles, puis gelés à –120°C dans un mélange azote liquide – éthanol et mis en pompage afin d'éliminer les gaz non condensables. Quand le mélange atteint une température supérieure à -89°C, le CO_2 libre présent (eaux minérales) sublime, permettant son pompage. Puis 70 à 90 µmol de CO_2 pur sont injectés et mis en présence de l'eau solide (pour une extraction : 1 standard interne, 1 échantillon en double et 7 en simple). Ce CO_2 injecté a une signature isotopique volontairement très différente des eaux étudiées ($\delta^{13}C_{PDB}$ = 15,19‰ ; $\delta^{18}O_{PDB}$ = –47,56‰) pour équilibrer deux pôles de signatures éloignées. La pression de CO_2 sur la ligne atteint 10 à 20 Torr ($1,3.10^{-2}$ à $2,6.10^{-2}$ atm), permettant de limiter le risque de fuite durant l'équilibration. Eau et CO_2 sont

mis en contact durant 10 à 12 heures à 25°C pour atteindre un stade d'équilibre (Epstein et Mayeda, 1953) :

$$x\ H_2{}^{18}O + y\ C^{16}O_2 \Leftrightarrow x\ H_2{}^{16}O + y\ C^{16}O^{18}O$$

Après équilibration, une partie du CO_2 est piégé dans l'azote liquide pour s'assurer qu'aucune contamination atmosphérique (N_2, CO_2, H_2O) n'est intervenue pendant l'équilibration. Un mélange éthanol + azote liquide à –80°C permet la libération du CO_2 et le piégeage de l'eau résiduelle. Le CO_2 propre est scellé à l'abri de toute contamination atmosphérique dans des tubes en verre Pyrex. La mesure du $\delta^{18}O$ est reproductible (sur standards international VSMOW – assimilé par la suite à SMOW – et internes – 3 sont utilisés – ainsi que sur les échantillons) avec une erreur maximale de 0,1‰.

II.2 Obtention de $CO_{2(gaz)}$ à partir de carbonates pour détermination du $\delta^{13}C$.

L'eau récoltée subit deux traitements. Le premier traitement est effectué sur le terrain, pour piéger toutes les espèces carbonatées (espèces dissoutes et espèces en phase gazeuse). L'autre est réalisé en laboratoire, après élimination des gaz dissous par agitation et circulation d'un flux d'azote gaz. Cela permet d'estimer la pression de CO_2 gaz dans l'eau, les mesures directes n'étant pas aisées pour les eaux échantillonnées.

Dans ces deux cas, la méthode employée est la précipitation d'un carbonate de baryum ($BaCO_3$) en milieu fortement basique (pH>12) : l'addition de soude 20N (1ml pour des eaux peu carbonatées <1 meq.l^{-1}, 3ml pour les plus chargées >5 meq.l^{-1}) dans l'échantillon permet l'atteinte d'un pH très basique et la présence sous forme libre de CO_3^{2-}. Celui-ci est précipité par ajout d'une solution de chlorure de baryum sursaturé (>600g.l^{-1}) (Olive et al, 1999). Cette méthode est aussi employée pour l'obtention des carbonates nécessaires à la détermination par comptage des désintégrations du ^{14}C.

Une fois centrifugés, rincés à l'eau permutée >10MΩ (baisse du pH vers 7), séchés et broyés, 20 à 75 μmol de carbonates de baryum ($BaCO_3$) sont mis à réagir sous vide avec 60 mmol d'acide phosphorique H_3PO_4 (densité entre 1,9 et 1,92) et équilibrés une nuit à 25°C (McCrea, 1950), ce qui se traduit, pour les carbonates, par :

$$BaCO_{3(solide)} + H_3PO_{4(liquide)} \rightarrow CO_{2(gaz)} + BaHPO_4 + H_2O_{(liquide)}$$

Le CO_2 (10 à 70 μmol ; rendement minimal 95%) alors produit est extrait comme décrit en *1)*, l'erreur globale après calcul du $\delta^{13}C$ ressortant à 0,045‰ pour le standard (NBS 19) et 0,2‰ pour les échantillons.

II.3 Obtention de $H_{2(gaz)}$ à partir d'eau pour détermination du $\delta^{2}H$.

La méthode utilisée est la réduction d'eau sur de l'uranium à 750-800°C (ref), avec une reproductibilité sur les standards de ± 1‰, les tests effectués en utilisant la réaction eau – zinc ayant une trop forte dispersion (± 3‰). On injecte entre 2 microlitres (0,11 µmol) d'eau sous vide et 3 microlitres pour les standards (0,16 µmol) lors d'une première extraction pour annuler l'effet mémoire du four, évalué à 5% de la différence $\delta D_{\text{nouvel échantillon injecté}}$ -

$\delta D_{\text{échantillon précédent}}$. L'eau est piégée à l'azote liquide, les non condensables pompés et le CO_2 des eaux gazeuses éliminé à l'éthanol + azote liquide. La réaction (15 minutes) sur de l'uranium métal produit de l'hydrogène gaz qui est piégé par adsorbtion physique sur du charbon actif (surface totale proche de 10000m²) plongé dans l'azote liquide.

L'analyse spectrométrique est pratiquée juste après l'obtention du gaz, pour éviter toute fuite, en se calibrant par rapport à SMOW et deux standards internes appauvris (-62‰ et -300‰).

III. SPECTROMETRIE DE MASSE – ISOTOPES STABLES

Les rapports isotopiques des gaz analysés, CO_2 ou H_2, sont déterminés sur un spectromètre de masse à source gazeuse équipé d'une double entrée (Isoprime Micromass "dual inlet"). Les résultats sont exprimés par rapport aux abondances naturelles des références internationales : pour O et H, on se calibre par rapport à SMOW (Standard Mean Oceanic Water) où $(^{18}O/^{16}O)$ = 0,002052, $(^{17}O/^{16}O)$ = 0,000381 et $(^{2}H/^{1}H)$ = 0,00015576 (Mook, 2001). Pour les carbonates, on utilise l'échelle PDB (PeeDee Belemnite) où $(^{13}C/^{12}C)$ = 0,0112372 (Craig, 1957). Par la suite seront employés pour ces rapports atomiques les abréviations R13 = $^{13}C/^{12}C$; R17 = $^{17}O/^{16}O$ et R18 = $^{18}O/^{16}O$.

Les rapports isotopiques ainsi définis $[(^{18}O/^{16}O)_{\text{échantillon}}]$ permettent l'expression d'un <u>delta</u> isotopique (δ) en référence au standard. De manière générale, il s'exprime comme suit :

$$\delta = [(R_{\text{échantillon}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}}] * 10^3 \quad [1]$$

Soit pour l'oxygène : $\delta^{18}O$ (‰) = $[(^{18}O/^{16}O)_{\text{échantillon}} - (^{18}O/^{16}O)_{SMOW}] / (^{18}O/^{16}O)_{SMOW} * 10^3$

Le spectromètre utilisé possède trois détecteurs qui servent à déterminer les abondances relatives entre les masses 44 (majeure), 45 et 46 (mineures) pour le CO_2, par comparaisons successives entre un gaz de travail et un gaz inconnu (l'échantillon). Les masses supérieures (47, 48, 49) sont considérées négligeables (Rosman et Taylor, 1997) :

Composition du CO_2	**Masse CO_2**	**Abondance naturelle moyenne (%)**
$^{12}C\ ^{16}O\ ^{16}O$	**44**	**98,4383**
$^{12}C\ ^{16}O\ ^{17}O$	**45**	**0,0376**
$^{12}C\ ^{17}O\ ^{16}O$	**45**	**0,0376**
$^{13}C\ ^{16}O\ ^{16}O$	**45**	**1,0763**
$^{12}C\ ^{16}O\ ^{18}O$	**46**	**0,2028**
$^{12}C\ ^{18}O\ ^{16}O$	**46**	**0,2028**
$^{13}C\ ^{16}O\ ^{17}O$	***46***	***$4,111.10^{-4}$***
$^{13}C\ ^{17}O\ ^{16}O$	***46***	***$4,111.10^{-4}$***
$^{12}C\ ^{17}O\ ^{17}O$	***46***	***$1,436.10^{-5}$***
$^{12}C\ ^{17}O\ ^{18}O$	47	$7,745.10^{-5}$
$^{12}C\ ^{18}O\ ^{17}O$	47	$7,745.10^{-5}$
$^{13}C\ ^{16}O\ ^{18}O$	47	$2,217.10^{-3}$
$^{13}C\ ^{17}O\ ^{17}O$	47	$1,570.10^{-7}$
$^{13}C\ ^{18}O\ ^{16}O$	47	$2,217.10^{-3}$
$^{12}C\ ^{18}O\ ^{18}O$	48	$4,177.10^{-4}$
$^{13}C\ ^{17}O\ ^{18}O$	48	$8,468.10^{-7}$

$^{13}C\ ^{18}O\ ^{17}O$	48	$8{,}468.10^{-7}$
$^{13}C\ ^{18}O\ ^{18}O$	49	$4{,}567.10^{-6}$
Total masses 44, 45, 46		**99,9962**
Total masses 47, 48, 49		$4{,}596.10^{-3}$

Les trois masses prépondérantes permettent de définir les <u>rapports moléculaires</u> mesurés R45 = $^{45}CO_2/^{44}CO_2$, R46 = $^{46}CO_2/^{44}CO_2$. Les compositions isotopiques en oxygène et carbone sont mesurées sur du CO_2 ionisé et les différences relatives de rapports isotopiques entre un échantillon et le gaz de référence exprimées en voltage (tel que m45 = $^{45}CO_2^+$ / $^{44}CO_2^+$ et m46 = $^{46}CO_2^+$ / $^{44}CO_2^+$). Par report dans [1], les deltas s'expriment comme suit :

$$\delta 45_{\text{échantillon/référence}} = (R45_{\text{échantillon}} / R45_{\text{référence}}) - 1 \qquad [2]a$$

$$\text{et } \delta 46_{\text{échantillon/référence}} = (R46_{\text{échantillon}} / R46_{\text{référence}}) - 1 \qquad [2]b$$

De même : $$\delta^{13}C_{\text{échantillon/réf CO2 PDB}} = (R13_{\text{échantillon}} / R13_{\text{réf CO2 PDB}}) - 1 \qquad [3]$$

et $$\delta^{18}O_{\text{échantillon/réf CO2 PDB}} = (R18_{\text{échantillon}} / R18_{\text{réf CO2 PDB}}) - 1 \qquad [4]$$

Une fois ces rapports définis, il faut examiner plus en détail les relations existant entre <u>rapports atomiques et moléculaires</u> :

$$R45 = R13 + 2*R17 \qquad [5]$$

$$R46 = 2*R18 + 2*R13*R17 + (R17)^2 \qquad [6]$$

de plus, du fait de l'existence de l'isotope 17 de l'oxygène, s'ajoute la relation suivante :

$$(R17_{\text{échantillon}} / R17_{\text{référence}}) = (R18_{\text{échantillon}} / R18_{\text{référence}})^{\mathbf{a}} \qquad [7]$$

Le développement de la relation [7] conduit à :

$$R17_{\text{échantillon}} = [R17_{\text{référence}} / (R18_{\text{référence}})^{\mathbf{a}}] * (R18_{\text{échantillon}})^{\mathbf{a}} = K * (R18_{\text{échantillon}})^{\mathbf{a}} \qquad [8]$$

La valeur de la <u>constante K</u> est fonction d'une part de l'exposant **a** et d'autre part des rapports R de la référence PDB :

- l'approche historique de Craig (1957) donne **a** = 0,5 ; $R17_{\text{réf}}$ = 0,0003775 et $R18_{\text{réf}}$ = 0,0020514 soit K = 0,0083347.
- des approches plus récentes (Stantrock 1985) conduisent à **a** = 0,516 et K = 0,0099235. Elles ont l'avantage d'éviter, au moins sur le spectromètre ayant servi à les définir, d'éviter la covariance qui existe entre les valeurs résultantes $\delta^{13}C$ et $\delta^{18}O$.

- encore plus récemment , Allison et al. (1995) ont proposé R17 = 0,0003808033420 ; R18 = 0,002088349077 ; **a** = 0,5 pour faire coïncider les échelles PDB et SMOW (avec R13 = 0,0112372).

En effet, il est toujours préférable, quelque soit l'approche utilisée (Stantrock pour le spectromètre utilisé), d'exprimer les δ en échelle PDB avant d'aborder l'algorithme de calcul.

Lors des mesures sur un spectromètre de masse, les δ obtenus sont issus de la confrontation entre un gaz échantillon et un gaz référence. La relation qui existe entre ce gaz de travail et l'échantillon peut s'énoncer comme suit :

$$\delta_{éch/PDB} = \{[(\delta_{éch/gaz\ machine} + 1) * (\delta_{réf/PDB} + 1)] / (\delta_{réf/\ gaz\ machine} + 1)\} - 1 \qquad [9]$$

Il est par ailleurs à noter que la connaissance de la composition isotopique du gaz de travail n'est pas requise, puisqu'il sert uniquement à relier les mesures effectuées sur un gaz échantillon à celles faites sur un gaz de référence (SMOW, standard interne) lui aussi analysé en tant qu'échantillon. Ceci évite les biais physiques liés aux possibles différences de comportement de fractionnement des gaz dans le circuit d'injection sur l'appareil avant le lancement d'une analyse. De plus, les mesures régulières de ces gaz connus permettent de minimiser les incertitudes liées à la dérive instrumentale.

L'expression [9] est résolue en utilisant les valeurs de R17, R18 et **a**. Alors pour exprimer les mesures δ45 et δ46 de l'échantillon dans l'échelle PDB, les équations [2]a et [2]b sont requises. Viennent alors les conversions en $\delta^{13}C$ et $\delta^{18}O$, faites par approximations successives, en utilisant (Verkouteren et Lee, 2001):

$$R18_{éch\ (i+1)} = [\ -B_{(i)} + (B_{(i)}^2 - 4*A_{(i)}*C)^{-0,5}] / 2*A_{(i)} \qquad [10]$$

Où $B_{(i)} = -3*K^2*[R18_{éch\ (i)}]^{(2\mathbf{a}-1)}] + 2$

$A_{(i)} = 2*K*R45_{éch}*[R18_{éch\ (i)}]^{(\mathbf{a}-2)}$

$C = -R46_{éch}$

La valeur retenue pour R18 est telle que la différence entre 2 $R18_{éch}$ successifs calculés est strictement inférieure à 10^{-12} Ampères. Alors par report dans [8] R17 est calculé, puis utilisé pour déterminer R13 (report dans [5]). Puis les δ sont calculés en utilisant [3] et [4] et exprimés en échelle PDB.

Enfin, l'expression du résultat final doit prendre en compte la cinétique de l'équilibration eau – CO_2. L'extraction se fait lors de l'atteinte d'un stade d'équilibre isotopique, défini à partir d'un certain temps d'équilibration et pour une température constante (les rapports alors établis ne varient plus même si le temps augmente). Il faut en tenir compte pour l'expression du résultat final, et donc faire appel à la relation liant facteur de fractionnement α et rapport isotopique :

$$\alpha_{A/B} = R_A / R_B = (1000 + \delta_A) / (1000 + \delta_B) \qquad [11]$$

D'où la nécessité de la correction suivante qui permet de prendre ce phénomène en compte :

ANNEXES : METHODOLOGIE

$$\delta_{vrai} = [\delta_{mesuré} - 1000*(\alpha-1)] / \alpha + K * (T_{réaction} - T_{standard}) \quad \text{[K : pourcentage de réaction]}$$

qui se réduit dans le cas présent (standard toujours inclus donc $T_{réaction} = T_{standard}$) :

$$\delta_{vrai} = [\delta_{mesuré} - 1000*(\alpha-1)] / \alpha \qquad [12]$$

avec, à 25°C, pour une équilibration $CO_2 - H_2O$, $\alpha = 1{,}04115$ (Brenninkmeyer et al., 1983) ; pour une réaction carbonate – acide phosphorique, $\alpha = 1{,}01025$ (Craig, 1953).

Pour finir, les δ sont <u>exprimés en SMOW</u> en utilisant (Coplen et al., 1983):

$$\delta^{18}_{SMOW} = 1{,}03091 * \delta^{18}_{PDB} + 1000 * (1{,}03091 - 1) \qquad [13]$$

$$\text{et } \delta^{18}_{PDB} = (1-1{,}03091)\ \delta^{18}_{SMOW} - 29{,}98 \qquad [14]$$

Pour normaliser la valeur <u>δ^{13}C des carbonates précipités</u> ($BaCO_3$), une correction linéaire utilisant la différence de valeur entre valeur absolue et valeur mesurée de NBS 19 (+1,95 ‰ VPDB) est utilisée (Coplen, 1995).

Pour les valeurs de <u>δ^{18}O des eaux</u>, plusieurs étapes sont nécessaires pour ramener la valeur de $\delta^{18}O$ du CO_2 analysé à la valeur absolue (par rapport au standard international SMOW) du $\delta^{18}O$ de l'eau. Dans un premier temps, il faut exprimer les $\delta^{18}O$ mesurés par rapport à l'échelle PDB, soit pour une eau équilibrée avec du CO_2 gaz :

$$\delta^{18}O_{PDB} = ((1-1{,}03091)*(\delta^{18}O_{SMOW}-1000*(1{,}04115-1))/1{,}04115)-29{,}98 \qquad [13]$$

La normalisation des gaz (Coplen, 1988) par rapport au gaz de travail (référence de l'équation [2]) peut alors s'effectuer (travail en échelle PDB), suivie d'une dernière normalisation par rapport aux standards de laboratoire [3 sont utilisés : un bas (-37‰), un intermédiaire (-9,12‰) et un proche du SMOW (-2,15‰)]. Un $\delta^{18}O$ de l'échantillon d'eau par rapport gaz de travail analysé est alors obtenu et exprimé en échelle SMOW.

Pour connaître le <u>δD des eaux</u>, on utilise aussi une calibration d'échelle en 3 points, s'étalant de 0‰ (SMOW) à –300‰ en passant par un standard interne local à –62‰. La correction apportée (Coplen, 1988) prend en compte la distorsion d'échelle se produisant (tolérance maximale : 10/300). De plus, une correction de H_3^+ doit être effectuée chaque jour. Elle permet de prendre en compte la production de cet ion au niveau de la source, qui doit augmenter linéairement quand la pression d'hydrogène gazeux régnant dans la source est augmentée par l'utilisateur. Une procédure automatique permet ainsi de faire varier la pression dans une gamme de 4.10^{-9} à 9.10^{-9} A, de mesurer la production (en ppm) de l'élément et de vérifier la corrélation des points entre ces deux limites d'ampérage.

IV. ISOTOPES COSMOGENIQUES

Deux éléments (^{14}C, ^{3}H) ont été analysés dans le but d'évaluer les temps de résidence des eaux et de tracer d'éventuelles interactions avec des eaux récentes. Le tritium est employé pour les eaux superficielles et minérales, tandis que le carbone 14 ne l'est que pour les eaux minérales, seules susceptibles d'avoir une faible activité en ^{14}C (vu les teneurs ^{3}H).

IV.1 Détermination de la teneur en tritium

L'abondance de cet isotope de l'hydrogène produit par excitation neutronique d'atomes d'azote (selon $^{14}N + {}^{1}\eta \Rightarrow {}^{3}H + {}^{12}C$) est mesurée en Unité Tritium (UT), telle que 1 UT représente un atome de ^{3}H pour 10^{18} atomes de ^{1}H [1 UT = 1 (^{3}H) / 10^{18} (^{1}H)].

La mesure de la quantité de tritium s'effectue par comptage par scintillation liquide (compteur : Hewlett Packard 2260 CA/XL). Elle a été réalisée au CRG de Thonon, par Milanka Babic. Dans un premier temps, l'échantillon (250 ml) subit une distillation totale si sa conductivité dépasse 50 $\mu S.cm^{-1}$, pour s'affranchir de la formation d'un précipité lors de l'ajout de peroxyde de sodium (Na_2O_2) lors de l'étape suivante. Durant au moins 60 h est pratiqué un enrichissement électrolytique en ^{3}H, réduisant à 10 ml le volume de l'échantillon. L'électrolysat est neutralisé par du $PbCl_2$ et un scintillant (Pico Fluor LLT) permettant d'amplifier le signal photonique mesuré est ajouté . Lors du comptage, deux références sont ajoutées : un blanc non tritié (eau du forage NBI d'Evian) pour la mesure du bruit de fond et un échantillon dont l'activité est connue (Babic, 2001).

L'utilisation de la loi de décroissance radioactive permet de recalculer la teneur à la date de l'échantillonnage, en prenant en compte le rendement du système et le facteur d'enrichissement électrolytique. Soit At l'activité de l'échantillon lors de la mesure et A_0 son activité initiale ; ces deux paramètres sont reliés par :

$$A_t = A_0 * \exp(-\lambda t) \qquad [14]$$

où λ = constante de désintégration radioactive = $55{,}76.10^{-3}$ an^{-1}. Par soustraction du bruit de fond (utilisation du blanc), le taux de comptage net est déterminé, puis corrigé du rendement du système (utilisation de l'échantillon tritié connu). La teneur en UT de l'échantillon enrichi est alors calculée, puis corrigée de l'enrichissement électrolytique, donnant la teneur de l'échantillon lors de la mesure (A_t). L'utilisation de [14] permet alors de remonter à l'activité initiale A_0 lors du prélèvement.

IV.2 Dosage du ^{14}C du Carbone Minéral Total Dissout

Pour mesurer par scintillation l'activité de cet élément (représentant $1{,}2.10^{-12}$% des isotopes du carbone) produit dans la haute atmosphère par réaction nucléaire entre les neutrons des rayons cosmiques et l'azote atmosphérique (selon $^{14}N + {}^{1}\eta \Rightarrow {}^{1}H + {}^{14}C$), il faut 3g de carbone soit 12,5g (250 meq) de $CaCO_3$. Pour obtenir cette quantité de carbone de l'eau à analyser, l'alcalinité doit être mesurée et sa valeur permet de déterminer la quantité d'échantillon à traiter pour précipiter un carbonate de baryum (même procédure que pour la détermination du $\delta^{13}C$).

ANNEXES : METHODOLOGIE

Une fois les hydrogénocarbonates (HCO_3^-) et les carbonates (CO_3^{2-}) précipités sous forme de calcite ($CaCO_3$) et de withérite ($BaCO_3$), une <u>attaque acide</u> (H_3PO_4) libère le CO_2 ($^{12}CO_2$, $^{13}CO_2$ et $^{14}CO_2$) :

$$BaCO_{3(solide)} + H_3PO_{4(liquide)} \rightarrow CO_{2(gaz)} + BaHPO_4 + H_2O_{(liquide)}$$

Ensuite la <u>carburation</u> du CO_2 est réalisée en présence de lithium métal, fondu (T = 650°C) et en excès. Du carbure de lithium (Li_2C_2) est produit par réaction exothermique (passage à 800°C) selon :

$$2CO_2 + 10Li \rightarrow Li_2C_2 + 4\ Li_2O$$

Puis une <u>hydrolyse</u>, exothermique (gain de 80 à 100°C), permet la formation d'éthyne (ou acétylène C_2H_2) :

$$Li_2C_2 + 2H_2O \rightarrow C_2H_2 + 2LiOH$$

L'acétylène est sublimé puis subit une <u>trimérisation</u> sur un catalyseur à base d'alumine et recouvert de chrome – vanadium, porté à 185°C. Le benzène est alors synthétisé :

$$3C_2H_2 \rightarrow C_6H_6$$

Le <u>comptage du benzène liquide</u> est alors réalisé : 4 ml de solution placés dans un récipient en verre appauvri en ^{40}K sont introduits dans l'appareil (Hewlett Packard 2260 CA/XL), se répartissant entre solvant (0,1 à 3,52g de $C_6H_{6(liquide)}$) et soluté (liquide scintillant primaire buthyl PBD et secondaire bis MSB). Les désintégrations spontanées du ^{14}C, caractérisées par des émissions de rayonnement β sur un spectre énergétique s'étalant de 0 à 156 KeV, excitent les molécules de benzène. Ces dernières excitent à leur tour le scintillateur organique, qui revient dans son état fondamental en émettant un photon de longueur d'onde déterminée. Des photomultiplicateurs placés dans l'appareil reçoivent ces émissions et les convertissent en signaux électriques. Les émissions photoniques n'étant pas spatialement contraintes, le nombre de coups par minute (CPM) enregistré sur plusieurs jours (2 à 3) ne correspond pas à l'activité réelle de l'échantillon, qui lui est supérieure. Cette activité exprimée en désintégrations par minutes (DPM) tient compte du rendement du système de comptage (70%). Les DPM par gramme de carbone maximales enregistrées correspondent à celles des échantillons actuels (100% d'activité), soit 13,56 ± 0,07 (Karlen et al., 1966). Aussi les compteurs détectent-ils des taux de 10 à 50 DPM, nécessitant d'une part un long temps d'acquisition et d'autre part des protections contre des radiations naturelles plus énergétiques pour minimiser au maximum le bruit de fond. Le comptage étant intrinsèquement un phénomène statistique, les âges calculés sont donnés avec une déviation standard à 1σ (intervalle de confiance 68,5%) ou 2σ (95,8%).

Ceux-ci sont obtenu en faisant l'hypothèse d'une production constante de ^{14}C dans l'atmosphère au cours des 40 derniers millénaires, des variations cycliques (activité solaire, champ magnétique) perturbant la production. Ce qui nécessite par la suite des ajustements à l'aide d'échelles d'âges déterminées par d'autres moyens : courbes de correction dendrochronologiques jusqu'à 11000 ans BP ; âge calibré sur coraux en U/Th jusqu'à 22000 ans BP. En conservant l'hypothèse simplificatrice, activité mesurée (exprimée en pourcentage de carbone moderne) lors du comptage A_t et l'activité initiale A_0 sont reliées par [14], avec λ

= $1,2.10^{-4}$ an^{-1}. Ces mesures d'activité ^{14}C ont été faites pour partie par le CRG (Thonon) et pour partie par l'Université de Géorgie (USA).

La constante de désintégration donnée ci-dessus correspond à celle obtenue en utilisant la demi-vie théorique du ^{14}C, 5730 ± 40 ans (Godwin, 1962). Par convention internationale, il est aussi fréquent d'utiliser celle de Libby (1951), 5568 ± 30 ans, soit un facteur de 1,029 entre ces deux valeurs.

Enfin, lors de l'évaluation de l'ancienneté d'une eau, la détermination du $\delta^{13}C$ de l'échantillon est nécessaire. Craig (1954) a montré que le fractionnement isotopique du ^{14}C est pratiquement deux fois plus important que celui qui affecte le ^{13}C. Il s'ensuit la relation suivante :

$$\Delta^{14}C\ (‰) = \delta^{14}C - (2*\delta^{13}C + 50) * [1 + (\delta^{14}C/1000)] \qquad [15]$$

V. DETERMINATION DU CONTENU EN ELEMENTS MAJEURS

V.1 Cations

Les déterminations en cations dissous ont été effectuées par ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry –Perkin Elmer Optima à analyses simultanées – LGIT Grenoble ; analyste : Delphine Tisserand) sur 10 ml d'échantillon préalablement acidifié avec de l'acide nitrique 68% (atteinte pH<2), en veillant à rester dans le domaine des courbes de calibration. Les gammes d'étalonnage sont les suivantes pour les éléments recherchés :

Al, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, As, Ba : 6 points de 0,05 à 1 $mg.l^{-1}$, matrice HNO_3 5%

Li, Na, Mg, Si, K, Ca, Sr : 6 points de 0,5 à 5 $mg.l^{-1}$ matrice HNO_3 5%

L'erreur globale peut se décomposer en erreur sur la précision (déviation calculée sur les 3 réplicats de l'échantillon injecté) et erreur sur l'exactitude (standard passé en échantillon inconnu). En reprenant les deux gammes d'éléments précédemment mentionnées, les erreurs s'élèvent à :

Li, Na, Mg, Si, K, Ca, Sr : précision < 2%; exactitude < 5%

Al, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Ba : précision < 4%; exactitude < 6% sauf dans le cas d'eaux peu riches à contenu en Al, Ti, Fe, Ba très faible (<0,01 $mg.l^{-1}$) où l'exactitude est < 20% (seuil inférieur au standard de calibrage bas).

As : les concentrations étant trop faibles, les valeurs ne sont pas quantitatives mais permettent seulement d'établir la présence de traces de cet élément, très volatil et non facilement dosable en faibles quantités.

V.2 Anions

Les contenus en anions (F^-, $CH_3CO_2^-$, Cl^-, NO_2^-, Br^-, NO_3^-, PO_4^{3-}, SO_4^{2-} dans l'ordre d'élution) sont mesurés par chromatographie ionique à détection conductimétrique (Dionex ICS 90), où les espèces sont séparées par partage entre une phase mobile (éluant bicarbonate/carbonate $NaHCO_3$ 1mM – Na_2CO_3 8mM) et une phase stationnaire (colonne à haute capacité AS14A 4mm).

1,5 à 2 ml de soluté préalablement dilué sont filtrés (0,2 μm) et introduits dans l'appareil, dont 50 µl vont réellement être injectés sur une colonne macroporeuse (couche polymère échangeuse d'ions). Les espèces en solution migrent alors sous l'action conjuguée de deux effets antagonistes : effet d'entraînement par la phase mobile (éluant) et effet de rétention par la phase stationnaire (colonne). La séparation et le temps de migration des composés à éluer sont donc fonction des différences d'affinités de ces composés pour les deux phases. Après séparation, la solution est transformée en une espèce peu conductrice par suppression chimique (régénération par acide sulfurique 72mN ; élimination des ions porteurs Na^+ ; pH proche de 7). La conductivité passe de plusieurs milliers de $\mu S.cm^{-1}$ à quelques $\mu S.cm^{-1}$, permettant une détection par cellule de conductimétrie des anions en solution. Les calibrages sont effectués sur 5 points, de concentrations minimales 0,05 (F^-) à 0,4 (PO_4^{3-}) $mg.l^{-1}$ et maximales de 1 à 8 $mg.l^{-1}$. L'intégration des pics a été définie pour éliminer toute variation de conductivité inférieure à 0,01 $\mu S.cm^{-1}$, trop proche du bruit de fond.

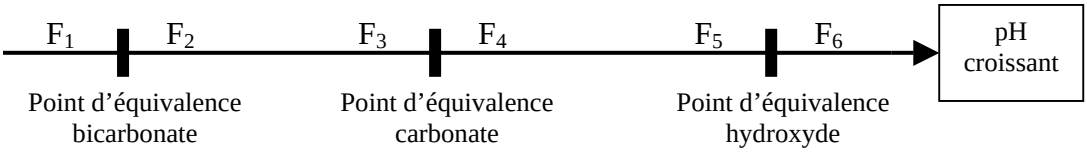
Les hydrogénocarbonates, carbonates et hydroxydes n'ont pas été déterminés par cette méthode, les colonnes à disposition ne le permettant pas. C'est la mesure de l'Acid Neutralizing Capacity sur les échantillons non filtrés, dégazés et homogénéisés par agitation, qui a servi au calcul de la teneur en bicarbonates. Le titrage est effectué à l'acide chlorhydrique 0,01N pour les eaux faiblement bicarbonatées (400 ml) et 0,05N pour les plus chargées (70 à 90 ml). Le dépouillement des résultats des titrages est fait à l'aide du logiciel « alkalinity calculator » de l'USGS (http://oregon.usgs.gov/alk/). Celui-ci autorise plusieurs méthodes de traitement des données, qui ont été utilisés en parallèle pour d'une part estimer les gammes de concentration en carbonates – bicarbonates et d'autre part quantifier les constantes de dissociation de l'eau (K_w), de l'acide carbonique H_2CO_3 (K_1, K_2), et la force ionique de l'échantillon. Les procédures de calcul utilisées sont les suivantes :

- méthode du point d'inflexion : les points d'équivalence carbonate et bicarbonate sont attribués au plus grand changement de pente de la courbe de titrage (pH en fonction du volume d'acide titrant ajouté). Le point d'équivalence carbonate n'est pas déterminé si le pH de l'échantillon est inférieur à 8,3 et sa recherche est limitée à une zone de pH telle que pH > pK_1. Le point d'équivalence bicarbonate est lui déterminé si pH < pK_1.
- méthode du point d'inflexion fixé : n'est utilisé que si les autres méthodes faillissent dans la recherche d'un point d'inflexion (eau très peu minérale par exemple) ; alors le point d'équivalence carbonate est fixé à pH = 8,3, le point bicarbonate à pH = 4,5.
- méthode de courbe de titrage théorique :
    - *méthode 1* : le point d'équivalence carbonate se situe entre pH 7,3 et 9,3 et le point bicarbonate entre pH 5,8 et 3,3. Cette méthode calcule la courbe

théorique de titrage de l'acide carbonique autour de ces points d'équivalence et les détermine en minimisant la somme des résidus entre volume mesuré et volume prédit d'acide titrant à chaque pH mesuré (méthode des moindres carrés).L'équation décrivant la courbe théorique tient compte de la température, de l'activité de H^+ et de la dilution de l'échantillon par l'acide, mais pas de la chimie de l'acide carbonique H_2CO_3.

- *méthode 2* : identique sur le principe à la première mais elle utilise toutes les données issues de la titrage. Les points d'équivalence déterminés prennent de plus en compte la chimie de l'acide carbonique. Cette méthode permet donc de déterminer si la chimie de H_2CO_3 explique à elle seule l'allure de la courbe de titrage (accord observations – modèle) ou si d'autres espèces à propriétés acide – base (borate, silicate, ammoniaque) interviennent dans l'alcalinité.

- <u>méthode du tracé des fonctions de Gran</u> : très utile pour les eaux à faible minéralité, elle utilise les points éloignés des points d'inflexion carbonate et bicarbonate. A l'aide d'hypothèses simplificatrices, cette méthode basée sur la chimie de l'acide carbonique permet de linéariser la courbe de titrage en plusieurs courbes distinctes (F_1 à F_6 au maximum) :



Deux méthodes peuvent alors être employées sur les fonctions calculées pour aboutir aux concentrations des différentes espèces :

- *spéciation utilisant une balance de masse simple* : si pH < 9,2, ce qui est le cas pour les eaux étudiées, alors la plupart de l'alcalinité est d'origine bicarbonate. La chimie de l'acide carbonique est ignorée ; il s'ensuit que tout l'acide ajouté au dessus du point d'équivalence carbonate neutralise uniquement les carbonates et que l'acide ajouté ensuite neutralise les bicarbonates.
- *spéciation avancée* : ici la chimie de H_2CO_3 est prise en compte mais les autres espèces à propriétés acide – base sont ignorées.

CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION (ETP)

1. METHODE DE THORNTHWAITE

Elle se définit comme suit :

$$\text{ETP (mm/jour)} = 1{,}6 \times \left(\frac{10}{I}\right)^{a} \times T^{a} \times L$$

avec I : indice thermique annuel défini selon :

$$I = \sum_{janvier}^{décembre} \left(\frac{T}{5}\right)^{1{,}514}$$

T est la température moyenne mensuelle, L le nombre d'heures d'ensoleillement journalier rapporté à la durée du jour, le coefficient a étant donné par :

$$a = (0{,}0675 \times I^3 - 7{,}71 \times I^2 + 1792 \times I + 49239) \times 10^{-5}$$

Une variante permettant d'approcher l'ensoleillement est donnée par (Hörmann, 2002) :

$$\text{ETP (mm/jour)} = 0{,}533 \times \left(\frac{10 \times T}{I}\right)^{a} \times \frac{S_0}{12}$$

Le facteur S_0 est fonction de la latitude p et du jour julien j selon :

$$S_0 = 12{,}3 + \sin(0{,}0172 \times j - 1{,}39) \times (4{,}3 + \frac{p-56}{6})$$

2. MÉTHODE DE TURC

Elle prend en compte de manière plus complète l'influence des radiations solaires globales (R_g en cal/cm²/jour) et de l'insolation journalière (R_f) :

$$\text{ETP (mm/jour)} = 0{,}031 \times C \times (R_g + 209) \times \left(\frac{T}{T+15}\right)$$

Le facteur C est dépendant de l'insolation journalière selon :

$$C = 1 + \frac{(50 - R_f)}{70} \text{ si } Rf < 50\%$$

$$C = 1 \text{ sinon}$$

Tandis que R_g est définie à partir du rayonnement extra-terrestre R_{ga} (radiations atteignant le sol en l'absence d'atmosphère) pondéré du rapport de durée d'insolation effective n sur la durée astronomique d'insolation possible N en heures (par décade ou par mois) :

$$R_g = R_{ga} \times (0{,}18 + 0{,}62 \times \frac{n}{N})$$

A échelle décadaire, la relation devient :

$$\text{ETP (mm/décade)} = 0{,}13 \times (R_g + 50) \times \left(\frac{T}{T+15}\right)$$

Enfin, à échelle mensuelle, la relation devient :

$$\text{ETP (mm/mois)} = k \times (R_g + 50) \times \left(\frac{T}{T+15}\right)$$

Le coefficient k prend les valeurs 0,37 en février et 0,4 pour les autres mois.
Cette méthode surestime d'environ 20% les valeurs réelles d'ETP en milieu humide (Petrescu Maftei, 2002).

3. METHODE DE HARGREAVES

Elle nécessite la connaissance de données thermiques mais fourni une bonne estimation (Grimbert, 2003), à telle enseigne qu'elle a été choisie comme référence par la CEE en 1992 (réf. EUR 14223).

$$\text{ETP (mm/décade)} = 0{,}0023N \times R_g/L \times (T + 17{,}8) \times (T_x - T_n)^{0,5}$$

avec N le nombre de jours dans la décade, L la chaleur latente de vaporisation (J/kg), T la température moyenne, T_x la température maximale et T_n la minimale.

Le terme R_g/L peut être calculé selon :

$$R_g/L = \frac{24\times\left(60/\pi\right)\times 0{,}082\times d_r\times\left(\Omega\times\sin p\times\sin\delta+\cos p\times\cos\delta\times\sin\Omega\right)}{2{,}45}$$

où:

$$d_r = 1 + 0{,}033 \times \cos\left(\frac{2\pi}{365\times jourjulien}\right)$$

$$\delta = 0{,}409 \times \sin\left(\frac{2\pi}{365\times jourjulien-1{,}39}\right)$$

$$p = p \times \left(\frac{\pi}{180}\right)$$

$$\Omega = \arccos(-\tan p \times \tan\delta)$$

4. METHODE DE PENMAN

Elle représente une combinaison des équations de transfert de masse entre une surface soumise à évaporation et l'atmosphère et des équations de conservation d'énergie thermique. Elle possède une base physique qui intègre l'ensemble des mécanismes intervenants au pas de temps le plus réduit possible. Ce calcul nécessite un nombre important de paramètres, dont les principaux sont :

- température
- radiation solaire globale
- insolation
- humidité relative de l'air
- vitesse du vent
- pression atmosphérique
- tension de vapeur saturante de l'air

ANNEXES CHAP 2 : figure A.1

Fig. A.1.1 : pluviométrie 1973-2002 (cumuls annuels en mm) – 1.

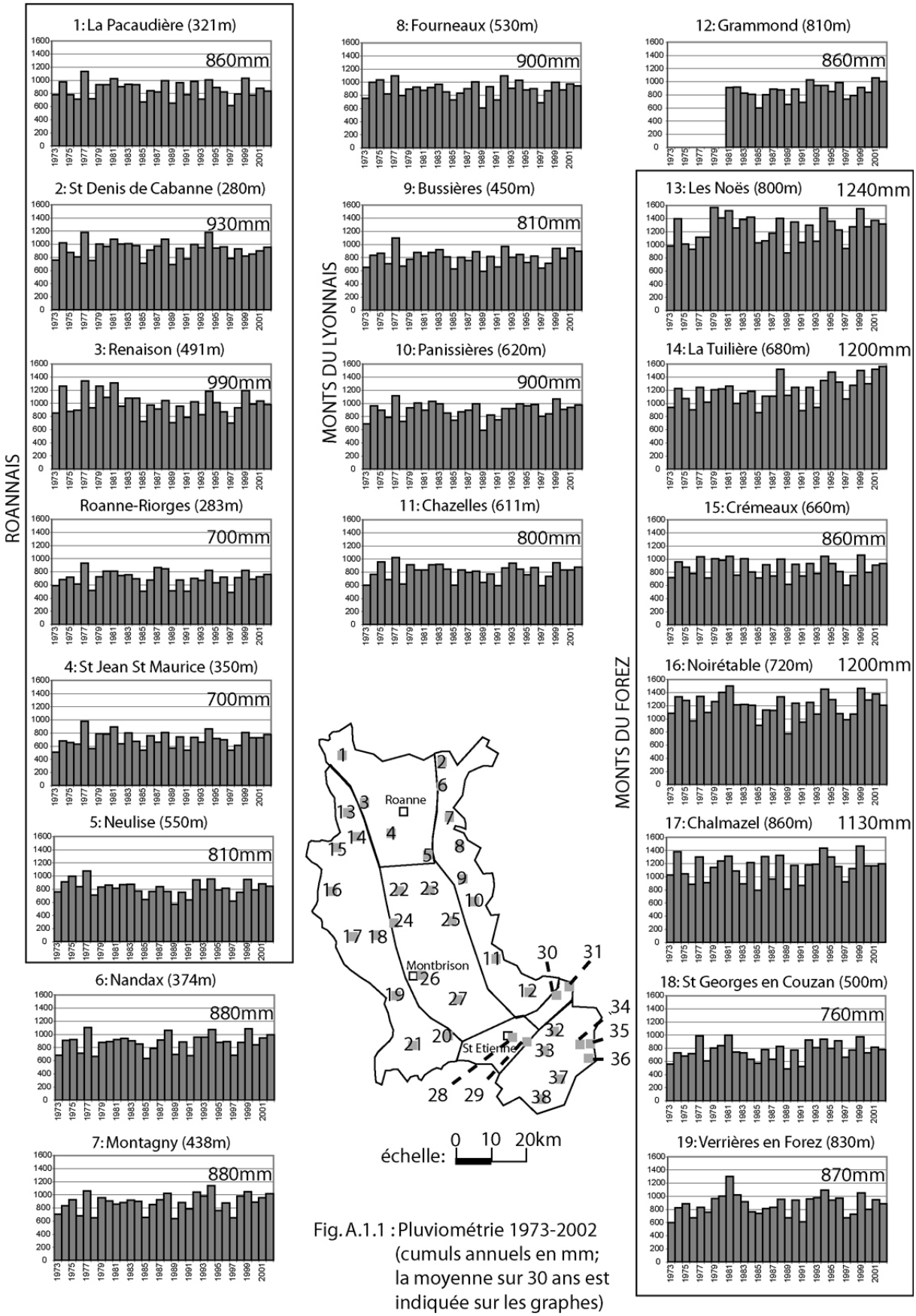


Fig. A.1.1 : Pluviométrie 1973-2002 (cumuls annuels en mm; la moyenne sur 30 ans est indiquée sur les graphes)

ANNEXES CHAP 2 : figure A.1

Fig. A.1.2 : pluviométrie 1973-2002 (cumuls annuels en mm) – 2.

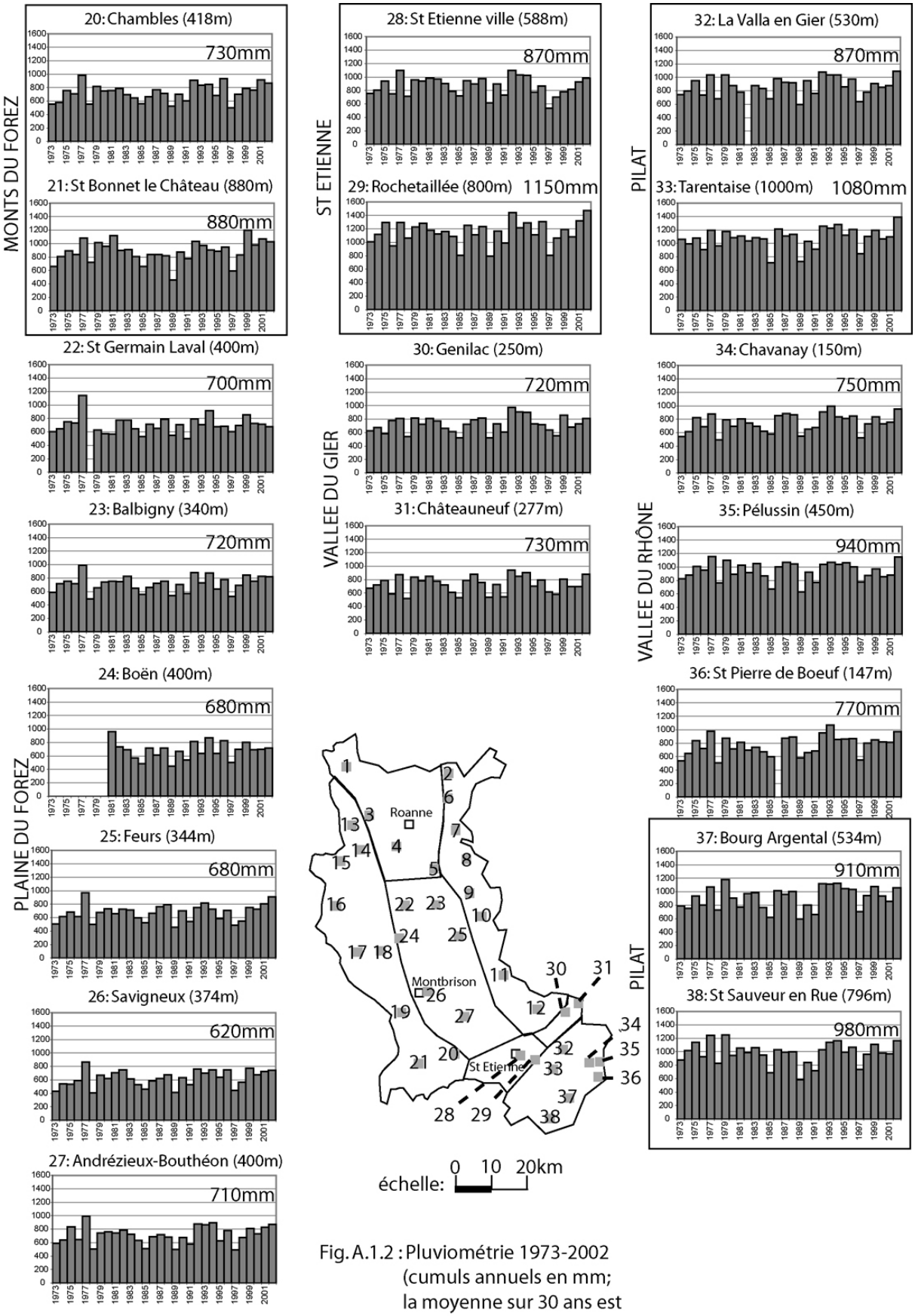


Fig. A.1.2 : Pluviométrie 1973-2002 (cumuls annuels en mm; la moyenne sur 30 ans est indiquée sur les graphes)

ANNEXES CHAP 2 : figure A.2

Fig. A.2 : évolution décadaire des évapotranspirations à Andrézieux-Bouthéon, St-Just-St-Rambert et Tarentaise.

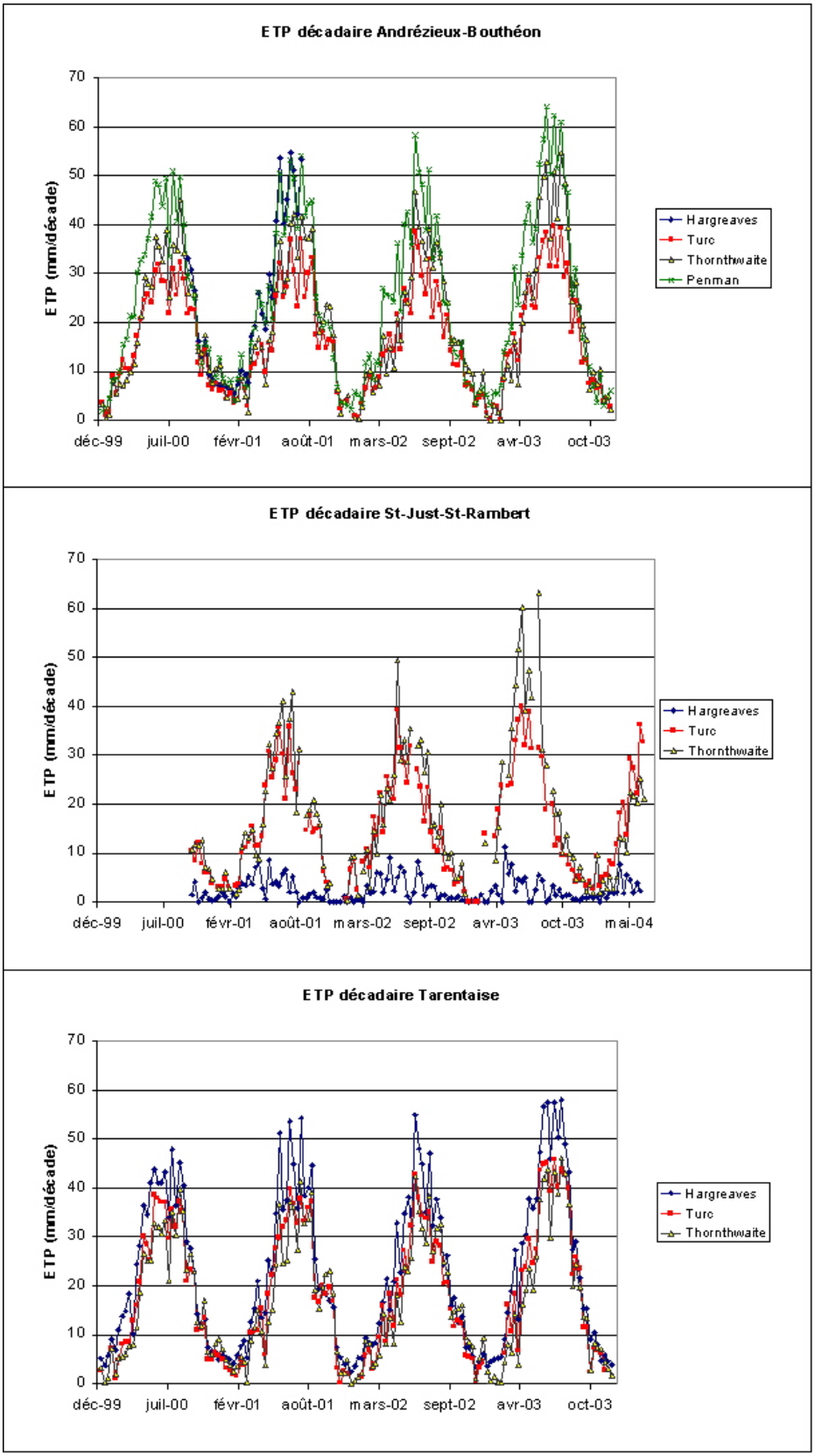


Fig. A.2 : évolution décadaire des évapotranspirations à Andrézieux-Bouthéon, St-Just-St-Rambert et Tarentaise

ANNEXES CHAP 2 : Tab. A.1 (pluies St-Just)

Date	T (°C)	± (°C)		RR (mm)	RR mois	$\delta^{18}O$	$\delta^{18}O$ pondéré mois	δD	δD pondéré mois	d-excess	d-excess mois
02/10/00	13.0	3.0		8.3		-9.3		-96.0		-21.8	
10/10/00	5.0	6.0		12.4		-10.9		-40.0		47.4	
11/10/00	11.0	1.0		2.1		-8.1		-61.0		4.1	
12/10/00	10.5			6.2		-6.7		-45.0		8.4	
13/10/00	9.0	3.0		33.1		-10.0		-78.0		2.1	
14/10/00	8.5			28.9		-4.1		-22.5		10.0	
14/10/00	10.0	3.0		16.5		-11.3		-73.0		17.6	
15/10/00	10.0	2.0		8.3		-10.6		-103.0		-17.9	
17/10/00	10.5			0.6		-12.4		-105.0		-5.6	
29/10/00	10.0			8.3	**124.6**	-4.4	**-8.3**	-31.0	**-58.6**	4.4	**8.0**
06/11/00	11.0			16.5		-11.3		-80.0		10.0	
12/11/00	4.3	5.4		26.9		-6.6		-44.0		8.7	
14/11/00	9.4			2.3		-9.3		-69.0		5.5	
15/11/00	9.4			2.1							
19/11/00	5.0	4.0		6.2		-7.7		-59.0		2.4	
20/11/00	8.0	4.0		5.2		-6.0		-47.0		0.8	
23/11/00	5.0	1.0		16.5		-15.3		-117.0		5.1	
24/11/00	5.0			7.2		-19.3		-151.0		3.6	
26/11/00	11.0			3.7	**86.6**	-8.1	**-10.2**	-61.0	**-75.3**	4.0	**6.4**
02/12/00						-16.1		-68.0		60.5	
08/12/00	9.5	2.5		9.9		-8.8		-60.0		10.0	
09/12/00	6.7			3.1		-9.7		-70.0		7.3	
25/12/00	6.0	1.4		7.2		-9.2		-121.0		-47.6	
30/12/00	0.8	0.3		7.2	**27.5**	-12.8	**-10.0**	-76.0	**-81.4**	26.2	**-1.2**
05/01/01	4.9	1.8		15.5		-9.9		-80.0		-0.8	
08/01/01	1.8	0.8	N	12.4		-10.6		-78.0		6.8	
10/01/01								-54.0		-54.0	
13/01/01			N			-8.0		-57.0		7.2	
14/01/01	5.2	5.2	N	11.4		-7.1		-53.0		3.6	
16/01/01	4.9	1.8	N	1.5		-8.3		-56.0		10.0	
17/01/01	12.8		N	2.1		-16.3		-120.0		10.2	
17/01/01	2.5	2.3	N	17.6		-16.6		-110.9		21.7	
19/01/01			N			-16.9		-127.0		7.8	
22/01/01	5.2	5.2		4.5		-7.6		-55.0		5.4	
28/01/01	1.5	1.0	N	11.4	**76.3**	-17.9	**-12.3**	-148.0	**-92.0**	-5.1	**6.5**
11/02/01	5.0	3.0		1.0		-10.7		-84.0		1.9	
14/02/01	1.4	0.9		1.0							
16/02/01	0.2	0.8		2.1		-11.4		-79.0		11.9	
24/02/01	5.4	2.0		3.1		-5.1		-31.0		10.0	
27/02/01	0.5	1.0	N		**7.2**	-13.7	**-7.0**	-88.0	**-47.9**	21.6	**8.0**
02/03/01	7.0	1.0	N	2.9		-8.7		-63.7		5.7	
08/03/01	8.9	1.0		19.0		-5.8		-77.9		-31.4	
10/03/01	11.3	0.8		6.2		-2.7		-26.0		-4.4	
11/03/01	11.3	2.0		19.4		-10.7		-32.2		53.4	
12/03/01	11.4	3.2		20.7		-10.5		-67.7		16.2	
16/03/01	9.0	1.5		14.5		-8.0		-51.8		12.2	
21/03/01	12.3	1.3		10.1		-7.7		-57.4		4.0	
29/03/01	10.6	0.1		4.1		-11.7		-83.8		10.0	
30/03/01	6.2	1.2	G	0.8	**97.7**	-9.6	**-8.5**	-84.0	**-57.3**	-7.0	**10.4**
04/04/01	12.5	3.0	G	0.4		-2.6		-44.0		-23.4	
07/04/01	11.5	3.1	G	1.9		-2.2		-24.0		-6.1	
08/04/01	7.3	2.3	G	0.8		-9.4		-61.2		13.9	
12/04/01	7.9	2.1	G	10.3		-5.6		-33.0		11.5	
15/04/01	7.0	2.0		6.4		-5.9		-48.0		-0.5	
19/04/01	6.7	1.9	N	5.2		-6.5		-54.0		-1.8	

ANNEXES CHAP 2 : Tab. A.1 (pluies St-Just)

Date	T (°C)	± (°C)		RR (mm)	RR mois	$\delta^{18}O$	$\delta^{18}O$ pondéré mois	δD	δD pondéré mois	d-excess	d-excess mois
21/04/01	2.3	0.5	N	5.6		-16.6		-135.0		-2.3	
23/04/01	8.1	4.0		1.0		-11.6		-86.0		6.7	
25/04/01	10.6	1.2		6.6		-5.6		-54.0		-9.4	
26/04/01				3.5		-2.0		-6.2		10.0	
29/04/01	12.0	1.0		2.7	**44.4**	-2.4	**-6.7**	-26.0	**-52.5**	-6.6	**1.1**
01/05/01	11.5	1.5		18.8		-8.2		-55.9		10.0	
02/05/01	8.8	1.9		14.5		-11.2		-79.8		10.0	
04/05/01	10.7	0.5		21.3		-9.7		-76.0		2.0	
05/05/01	9.1	1.3		25.8		-13.0		-10.0		94.1	
06/05/01	7.8	0.2		1.0		-7.7		-45.6		15.7	
09/05/01	14.2	0.5		19.4		-5.5		-25.3		18.5	
14/05/01	14.2	1.8	O	5.2		-5.3		-26.5		15.7	
15/05/01	12.5	1.5		17.6		-4.7		-21.3		16.0	
23/05/01	17.5	0.2	O	2.5	**126.0**	-5.1	**-8.7**	-36.2	**-41.4**	4.7	**28.2**
03/06/01	12.5	0.2		4.8		-5.2		-32.7		8.9	
08/06/01	21.0	1.0	O	3.1		-4.0		-20.3		11.5	
09/06/01	14.1	0.5		19.4		-5.2		-57.3		-15.3	
09/06/01	15.1	0.6		10.1		-8.6		**-58.6**		10.0	
10/06/01	13.5	0.4		24.0		-10.6		-67.7		16.8	
12/06/01	15.3	3.7		8.9							
13/06/01	21.2	2.0		1.4		-5.0		-33.5		6.7	
18/06/01				29.5		-5.8		-34.3		12.2	
28/06/01	19.1	0.1		1.4	**102.7**	-1.1	**-6.4**	1.0	**-44.8**	10.0	**6.5**
02/07/01	18.5	4.5		19.0		-8.4		-57.3		10.0	
03/07/01	23.5	0.5	O	2.7		-4.6		-39.0		-2.4	
08/07/01						-3.5		-39.0		-10.7	
14/07/01			O			-9.3		-87.0		-12.2	
14/07/01			O			-11.0		-71.0		16.6	
15/07/01						-12.2		-1.0		96.2	
18/07/01	13.0	1.0		9.1		-4.8		-32.6		5.7	
19/07/01	16.5	2.5		19.6		-9.0		-56.8		15.1	
23/07/01	20.0	2.0	O	11.0	**61.4**	-7.3	**-7.7**	-46.0	**-50.7**	12.1	**10.8**
05/08/01	22.7	11.0		12.4		-0.8		-1.1		5.0	
18/08/01	19.3	1.5		36.4		-1.9		-50.0		-35.0	
19/08/01			O	9.5		-3.3		-16.7		10.0	
19/08/01	16.5	1.0	O	0.8		-3.9		-11.3		20.0	
24/08/01				3.3		-3.5		-17.7		10.0	
31/08/01	18.5	6.0		36.8	**99.2**	-6.4	**-3.6**	-32.0	**-32.6**	18.9	**-3.7**
15/09/01	12.5	3.5		13.2		-8.2		-42.5		23.3	
29/09/01	13.5	1.0		22.5	**35.7**	-11.3	**-10.2**	-71.8	**-61.0**	19.0	**20.6**
07/10/01	15.0	1.0		39.5		-11.0		-90.5		-2.2	
14/10/01	14.5	3.6		15.1		-4.4		-55.7		-20.6	
18/10/01	14	2.5		17.6		-6.5		-42.6		9.5	
20/10/01	13	1		64.9		-5.4		-40.2		3.0	
23/10/01	11.9	0.3	O	11.4		-9.2		-59.8		14.1	
28/10/01	13.9	0.3		1.7	**150.0**	-2.1	**-7.2**	-6.4	**-56.4**	10.0	**0.9**
01/11/01	12.5	1.0		5.6		-4.6		-16.6		20.5	
08/11/01	9.0	1.0	N	1.2		-8.9		-53.4		17.7	
10/11/01	0.5	0.5		5.6		-11.6		-58.4		34.6	
13/11/01	4.0	1.5	N	2.9		-9.6		-69.7		7.5	
13/11/01	4.0	1.5	N	6.4		-11.4		-75.4		15.9	
23/11/01	2.5	0.1		1.7		-8.0		-52.6		11.2	
25/11/01	5.0	2.4		9.3		-4.4		-25.1		10.0	
26/11/01	4.4	2.2		4.1		-6.9		-40.7		14.8	
30/11/01	7.2	2.7		4.1		-4.7		-32.3		5.6	

ANNEXES CHAP 2 : Tab. A.1 (pluies St-Just)

Date	T (°C)	± (°C)		RR (mm)	RR mois	$\delta^{18}O$	$\delta^{18}O$ pondéré mois	δD	δD pondéré mois	d-excess	d-excess mois
30/11/01	3.4	1.1		20.2	**61.2**	-10.1	**-8.3**	-71.6	**-53.0**	9.1	**13.6**
14/01/02	1.3	5.0		4.1		-7.7		-46.4		15.3	
15/01/02			N	1.7		-7.7		-48.6		13.2	
16/01/02	-0.2	3.5	N	10.1		-10.4		-70.9		12.2	
24/01/02	8.5	1.5		3.1	**19.0**	-7.3	**-9.1**	-45.9	**-59.5**	12.2	**13.0**
01/02/02	11.2			0.2		-4.3		-33.5		1.2	
06/02/02	5.9	0.4	N	2.9		-11.1		-77.8		11.1	
14/02/02			N	5.4							
15/02/02				14.3		-11.9		-85.0		10.0	
20/02/02	2.0	2.0		5.4	**28.1**	-12.7	**-9.6**	-87.0	**-68.0**	14.3	**9.0**
01/03/02	5.8	0.7		8.1		-6.9		-45.7		9.7	
15/03/02	8.5	1.0		4.1		-9.4		-66.9		8.5	
24/03/02	3.0			1.2	**13.4**	-5.3	**-7.5**	-29.0	**-50.7**	13.2	**9.6**
09/04/02	13.0	7.0		4.5		-7.2		-43.9		13.7	
10/04/02	7.5	1.5		0.2		-7.6		-32.2		28.3	
13/04/02	7.4	0.2		5.8		-6.9		-35.6		19.7	
26/04/02	13.9	2.0	O	3.5		-0.3				2.4	
30/04/02	13.1	8.0		1.4	**15.5**	-2.4	**-5.1**	-2.8	**-26.9**	16.2	**13.8**
01/05/02	10.7	1.6		35.5		-7.5		-43.5		16.2	
02/05/02	7.0	1.0	N	11.8		-15.0		-112.1		7.5	
08/05/02	13.1	0.9		4.1		-7.3		-55.3		2.7	
10/05/02	10.2	1.5		4.3		-15.7		-108.3		17.3	
18/05/02	13.7	0.7		9.5		-5.0		-27.8		12.3	
23/05/02	11.5	1.7		43.2		-7.1		-41.8		15.0	
25/05/02	12.5	1.0		3.9		-4.3		-28.9		5.4	
27/05/02	13.0	0.5		2.7	**115.1**	-5.5	**-8.0**	-43.8	**-50.9**	0.3	**13.3**
03/06/02	18.2	0.8	O	18.6		-2.8		-11.6		10.7	
04/06/02	15.8	0.8		2.5		-1.6		-11.6		1.0	
05/06/02	14.5	1.0	O	6.8		-2.7		-23.9		-1.9	
05/06/02	14.7	0.2	O	2.9		-9.4		-80.1		-4.7	
06/06/02	12.5	1.0	O	5.6		-5.7		-42.3		3.4	
08/06/02	12.5	1.0		5.6		-9.2		-66.9		6.5	
15/06/02	24.1	0.9		14.5		-4.0		-43.1		-10.7	
24/06/02	19.7	1.3		20.0		-5.4		-30.1		13.1	
24/06/02	18.4	1.0		16.5		-5.3		-33.2		9.5	
25/06/02				3.1		-9.7		-58.9		18.5	
27/06/02	22.5	1.1	O	9.3		-4.5		-25.1		11.1	
28/06/02	19.2	0.5		110.0	**215.4**	-4.4	**-4.6**	-19.3	**-25.8**	15.9	**11.2**
05/07/02	15.5	0.5		4.3		-5.3		-53.2		-10.9	
09/07/02	21.5	2.1	O	7.9		-0.9		-12.9		-5.4	
10/07/02	16.4	1.2	O	4.2		-6.6		-42.0		10.9	
13/07/02	19.5	1.0		17.6		-4.9		-29.8		9.5	
14/07/02	14.0	0.5		7.2		-8.1		-57.7		6.8	
15/07/02	14.9	0.1		27.0		-4.0		-24.9		7.5	
16/07/02	16.0	1.0		15.3		-4.9		-30.4		8.9	
17/07/02	15.7	0.5		4.1		-2.6		-17.1		3.4	
21/07/02	19.2	0.4		2.5		1.0		3.8		-4.4	
06/08/02			O	24.5	**114.6**	-2.6	**-4.0**	-24.7	**-28.4**	-4.2	**3.6**
20/08/02	18.4	0.6		5.2		-4.9		-33.5		6.0	
23/08/02	23.1	1.2	O	4.1		-3.4		-28.2		-1.3	
23/08/02	18.9	1.2	O	13.2		-4.9		-31.7		7.3	
24/08/02	16.3	0.5	O	3.7		-4.6		-20.2		16.3	
24/08/02	19.8	0.8	O	3.3		-4.1		-22.6		10.0	
26/08/02	18.4	0.8	O	40.0		-7.0		-47.8		7.9	

ANNEXES CHAP 2 : Tab. A.1 (pluies St-Just)

Date	T (°C)	± (°C)		RR (mm)	RR mois	$\delta^{18}O$	$\delta^{18}O$ pondéré mois	δD	δD pondéré mois	d-excess	d-excess mois
29/08/02	18.9	0.9		5.8		-5.9		-41.9		5.5	
31/08/02	20.0	0.3		19.0	**94.3**	-4.7	**-5.7**	-36.4	**-39.3**	0.9	**6.2**
03/09/02	18.6	1.6	O	4.8		-2.8		-21.8		0.8	
04/09/02	16.3	1.3	O	7.9		-4.4		-29.1		5.9	
05/09/02	15.7	0.4		14.3		-8.0		-58.8		5.4	
09/09/02	16.0	2.0		3.9		-7.9		-60.7		2.3	
19/09/02	19.2	1.2	O	16.5		-5.6		-43.2		1.3	
22/09/02	16.8	1.2		16.5		-5.9		-41.6		5.2	
23/09/02	11.0	1.5	G	4.5		-9.9		-64.5		14.4	
24/09/02	9.0	0.5		3.7		-12.1		-86.9		10.0	
27/09/02	10.1	0.5		1.7	**73.7**	-4.7	**-6.5**	-31.4	**-47.1**	6.3	**4.8**
04/10/02	14.2	0.3		6.4		-7.9		-51.3		11.5	
06/10/02	12.1			1.0							
08/10/02	10.2	3.8				-4.2		-36.1		-2.4	
11/10/02	10.6	0.7		8.9		-10.2		-75.9		6.0	
11/10/02	9.0	2.7		1.2		-9.7		-79.0		-1.6	
12/10/02	12.5	0.5		1.2							
15/10/02	11.7	0.2		1.0		-1.1		-19.4		-10.4	
16/10/02	17.2	1.3	O	9.3		-3.7		-24.4		5.2	
17/10/02	12.7	0.9	O	3.7		-8.4		-55.8		11.4	
17/10/02	14.7	0.8	O	3.5		-4.0		-21.7		10.1	
18/10/02			G	1.2		-5.5		-39.5		4.5	
21/10/02	15.4	0.5	O	3.9	**41.5**	-6.0	**-6.4**	-45.2	**-44.7**	3.2	**6.2**
02/11/02	14.7	1.2		9.3		-5.6		-47.1		-2.3	
06/11/02	7.5	1.0	G	21.7		-12.4		-94.6		4.8	
07/11/02	5.5	1.0		2.7		-6.6		-34.9		18.1	
10/11/02	9.0	1.0		6.4		-8.7		-63.8		6.2	
14/11/02	8.3	0.7		10.5		-9.6		-67.0		9.4	
15/11/02	10.0	1.0		6.6		-10.3		-79.3		3.1	
16/11/02	7.8	1.3		24.5		-16.7		-130.2		3.2	
21/11/02	11.3	1.0		2.7		-9.6		-83.8		-7.3	
24/11/02	8.0	0.5		60.0		-9.8		-72.9		5.5	
28/11/02	9.2	0.3		17.4	**161.7**	-8.3	**-10.7**	-59.4	**-80.6**	6.9	**4.9**
01/12/02	8.0	0.1		4.8		-15.9		-123.4		3.7	
03/12/02	8.0	0.5		2.5		-9.3		-73.9		0.6	
05/12/02	3.2	0.3	N	12.4		-10.4		-71.8		11.7	
06/12/02	2.9	0.1	N	12.8		-13.3		-91.8		14.7	
11/12/02	6.3	1.2		7.2		-12.3		-93.6		4.8	
12/12/02	4.9	0.8		13.0		-10.6		-82.6		2.3	
22/12/02	7.2	1.7		12.2		-8.6		-63.1		5.6	
27/12/02	9.3	1.2	O	25.0		-13.5		-106.6		1.7	
28/12/02	8.3	0.3		2.1		-10.8		-84.9		1.6	
31/12/02	7.4	1.1		8.9	**100.8**	-8.0	**-11.5**	-59.9	**-86.6**	3.7	**5.6**
04/01/03	7.5	0.5	N	1.0		-13.3		-103.7		3.0	
08/01/03	-2.7	1.10	N			-15.6		-118.8		6.1	
12/01/03	-6.2	1.4	N			-9.0		-74.0		-2.3	
19/01/03				2.9		-12.3		-102.5		-4.5	
21/01/03				7.0		-9.7		-77.4		-0.1	
23/01/03			N	8.1		-9.2		-65.6		8.0	
26/01/03			N	3.9		-6.9		-43.6		11.6	
29/01/03				4.1		-11.3		-80.4		10.0	
30/01/03			N			-10.1		-68.1		12.9	
31/01/03			N		**27.0**	-18.2	**-9.8**	-134.2	**-73.1**	11.4	**5.2**
03/02/03			N	11.2		-15.5		-122.9		1.1	
05/02/03	-0.6	0.6	N	9.1		-9.7		-55.5		22.3	

ANNEXES CHAP 2 : Tab. A.1 (pluies St-Just)

Date	T (°C)	± (°C)		RR (mm)	RR mois	$\delta^{18}O$	$\delta^{18}O$ pondéré mois	δD	δD pondéré mois	d-excess	d-excess mois
16/02/03	-3.1	0.7	N	1.9	**22.1**	-13.0	**-12.9**	-87.9	**-92.2**	15.8	**11.0**
06/03/03	10	0.5		8.3		-10.5		-77.0		7.2	
09/03/03	9.3	1.5		1.7	**9.9**	-4.7	**-9.6**	-37.3	**-70.4**	0.7	**6.1**
02/04/03	7.7	0.3	N	3.5		-6.5		-41.2		10.9	
10/04/03	5.8	1	N	9.1		-9.3		-60.1		14.4	
14/04/03	6.2	1.6		8.9		-5.2		-39.8		1.5	
19/04/03	14.6	0.9		0.6		-3.5		-30.5		-2.2	
30/04/03	16.6	1.5		2.7	**24.8**	-4.0	**-6.7**	-22.0	**-45.3**	10.0	**8.4**
13/05/03	14.2	0.9		1.2		-1.9		-9.1		6.1	
17/05/03	13	6		1.1		-2.1		-15.2		1.3	
18/05/03	14	2		0.4		-2.0		-15.4		0.6	
19/05/03	18.5	3.5		1.4		-3.6		-21.9		7.2	
25/05/03	10.6	0.8		33.9		-8.3		-53.6		12.8	
31/05/03	27.4	0.6		0.2		-2.9		15.6		38.5	
31/05/03	18.3	1.3		1.4	**39.8**	-0.3	**-7.4**	**7.4**	**-47.0**	10.0	**12.0**
02/06/03	19.3	0.7	O	3.7		-3.3		-26.0		0.5	
03/06/03	18.3	1.3		1.4		-0.4		-15.4		-12.2	
05/06/03	29	1	O	0.8		-0.7		-4.9		1.1	
14/06/03	25	1.5		4.5		-3.5		-21.5		6.5	
25/06/03	28.8	0.7	O	1.2		-1.1		-18.5		-10.0	
26/06/03	27.5	0.7		0.4	**12.2**	-0.4	**-2.5**	-1.5	**-20.1**	2.0	**0.3**
01/07/03	20	1.5	O	11.4		-3.9		-22.7		8.9	
04/07/03	20.5	1.4		3.9		-3.3		-54.8		-28.4	
12/07/03	15.8	0.8		2.1		-5.6		-37.7		7.3	
16/07/03	25.3	0.8		5.0		-1.9		-10.6		4.9	
20/07/03	30.1	0.5		0.8		-0.5		-23.2		-19.1	
21/07/03			O	18.4		-4.8		-28.2		10.0	
21/07/03	21.8	0.3	O	6.8		-4.1		-25.6		7.0	
24/07/03				6.0		-3.3		-22.5		3.9	
28/07/03				3.3	**57.6**	-4.5	**-4.0**	-32.7	**-27.0**	3.5	**4.8**
19/08/03	31.3			4.1		-3.0		-24.3		-0.4	
28/08/03	20	2.5	O	2.3		-3.2		-27.9		-2.3	
30/08/03	18	1.5		3.9		-5.3		-33.9		8.9	
31/08/03	17.3	0.5		0.6	**11.0**	-4.6	**-4.0**	-28.0	**-28.7**	9.1	**3.1**
05/09/03	18.6	3.2		4.3		-3.4		-21.1		6.3	
07/09/03	18.3	2.5	O	22.3		-6.0		-35.0		13.4	
09/09/03	15.2	0.7		5.4		-7.8		-59.0		3.0	
23/09/03	16.5	1		1.0		-3.9		-24.9		6.2	
28/09/03	14.9	0.4		9.3	**42.4**	-11.2	**-7.1**	-83.9	**-47.1**	5.3	**9.4**
01/10/03	17			7.2		-5.0		-39.3		0.5	
03/10/03	18.8	0.3		1.2		-6.1		-38.5		10.5	
05/10/03	10.6	2.5	N	20.7		-9.6		-63.9		12.8	
08/10/03	7.3	1.0		3.5		-5.6		-32.7		12.1	
13/10/03	15.8	0.5		3.5		-2.7		-15.1		6.2	
19/10/03	12.3	0.5		2.5		-9.7		-71.6		6.2	
24/10/03	5.0	3.0	N	13.4		-13.2		-87.7		17.7	
29/10/03	10.8	2.1		1.9		-12.2		-95.1		2.6	
31/10/03	11.2	2.7	O	16.7	**70.7**	-14.1	**-10.3**	-106.5	**-72.7**	6.1	**10.0**
02/11/03	11.4	1.1		1.7		-12.2		-85.5		12.2	
09/11/03	12.0	1.0		8.1		-5.6		-40.6		4.0	
12/11/03	8.4	1.1		5.0		-6.6		-41.6		11.5	
14/11/03	9.8	0.8		0.6		-9.3		-67.9		6.7	
16/11/03	9.6	1.5		15.5		-10.3		-71.1		11.2	
24/11/03	9.8	1.3		0.8		-8.3		-69.4		-2.8	

ANNEXES CHAP 2 : Tab. A.1 (pluies St-Just)

Date	T (°C)	± (°C)		RR (mm)	RR mois	$\delta^{18}O$	$\delta^{18}O$ pondéré mois	δD	δD pondéré mois	d-excess	d-excess mois
27/11/03	8.0	1.5		16.5		-15.3		-113.8		8.6	
30/11/03	8.5	1.0		9.9	**58.1**	-10.3	**-10.8**	-84.3	**-79.1**	-2.3	**7.0**
02/12/03	9.0	3.0		159.0		-14.5		-102.2		14.0	
07/12/03	1.5	0.3		3.1		-10.4		-67.3		15.5	
12/12/03	7.4	1.1		1.7		-5.5		-42.8		0.9	
31/12/03	5.4	5.4	N	17.0	**180.8**	-9.0	**-13.8**	-59.1	**-97.0**	12.6	**13.7**
02/01/04	0.7	0.7	N	12.0		-17.2		-123.1		14.3	
10/01/04	4.9	0.5		7.0		-9.7		-79.7		-2.3	
13/01/04	5.8	2.8		8.0		-10.3		-83.9		-1.7	
19/01/04	1.0	0.3	N	8.0		-20.1		-150.1		10.7	
20/01/04	6.3	1.0		8.0		-9.0		-72.9		-0.9	
23/01/04	3.0	1.4		6.5		-17.8		-139.5		2.9	
26/01/04	2.1	1.4	N	5.5	**55.0**	-15.5	**-14.4**	-124.0	**-110.5**	0.1	**4.3**
07/02/04	9.3	1.2		2.5		-2.9		-24.6		-1.4	
19/02/04	2.7	2.5	N	2.5		-9.0		-66.9		5.5	
23/02/04	5.0	4.9	N	40.0	**45.0**	-16.6	**-15.4**	-117.1	**-109.2**	15.5	**14.0**
04/03/04	3.7	2.7		2.0		-10.1		-75.1		6.0	
07/03/04	3.3	2.5		15.0		-10.7		-81.7		3.9	
13/03/04	5.8	0.9		33.0		-9.1		-63.7		9.5	
23/03/04	4.6	1.2		7.0		-6.8		-41.7		12.8	
24/03/04	2.2	1.7		5.5	**62.5**	-10.1	**-9.4**	-66.2	**-66.1**	14.9	**8.9**
07/04/04	8.0	1.0		6.0		-6.5		-43.3		8.4	
09/04/04	3.3	1.2		14.5		-11.7		-87.7		6.3	
14/04/04	13.1	0.4		1.0		-4.7		-31.8		5.5	
17/04/04	10.8	1.3		11.5		-12.1		-77.5		19.6	
23/04/04	10.8	0.2		10.5		-7.6		-57.2		3.4	
27/04/04	15.0	3.5	O	9.5		-3.9		-32.3		-1.2	
29/04/04	10.2	1.7		20.5		-8.5		-60.8		7.2	
30/04/04	10.5	2.0		1.5	**75.0**	-8.2	**-8.8**	-57.6	**-62.6**	8.2	**7.4**
02/05/04	9.7	0.7		1.5		-5.1		-40.9		-0.3	
11/05/04	15.9	1.1	O	7.5		-9.1		-71.9		1.3	
20/05/04	20.3	1.4	O	4.5		-1.8		-20.1		-5.9	
22/05/04	16.5	3.0		9.0		-3.6		-17.2		11.5	
27/05/04	18.5	1.0		3.0	**25.5**	-0.5	**-4.6**	1.9	**-32.9**	5.6	**4.0**
01/06/04	16.6	1.8		6.2		-2.9		-22.8		0.8	
11/06/04	23.2	0.8		4.5		-4.3		-32.1		2.4	
20/06/04	16.2	0.7		8.0		-6.2		-39.2		10.8	
22/06/04	16.5	1.5		4.0		-4.1		-33.6		-1.1	
23/06/04	17.9		O	24.5	**47.2**	-7.1	**-5.9**	-50.3	**-41.6**	6.4	**5.4**
moyenne							**-8.2**		**-57.6**		**8.0**

Tab. A.1 : pluviométrie (RR en mm) et composition isotopique (‰VSMOW) journalière et mensuelle pondérée à St-Just-St-Rambert (400m);
les mesures en grisé sont recalculées à partir de la GMWL;
les lettres O, N, G se référent respectivement à des orages, de la neige et du grésil

ANNEXES CHAP 2 : Tab. A.2 (pluies Rochetaillée)

Date	T (°C)	RR (mm)	RR mois	$\delta^{18}O$	$\delta^{18}O$ pondéré mois	δD	δD pondéré mois	d-excess	d-excess mois
02/04/2003	0	6.3		-8.6		-60.9		8.2	
09/04/2003	4	0.3		-5.0		-16.3		23.5	
10/04/2003	6	8.3		-10.0		-67.7		12.7	
11/04/2003	3	1.0		-6.7		-31.3		22.6	
20/04/2003	15	10.6		-4.9		-30.6		8.3	
26/04/2003		0.0		-6.4		-37.4		14.0	
30/04/2003	12	2.6	**29.1**	-3.1	**-7.1**	-21.6	**-46.7**	3.1	**9.7**
02/05/2003	34	2.0		-2.1		-10.0		6.7	
13/05/2003	20	4.3		-5.4		-33.4		9.9	
21/05/2003		50.0	**56.3**	-8.0	**-7.6**	-47.5	**-45.1**	16.4	**15.6**
02/06/2003	20	4.3		-3.7		-23.8		5.7	
08/06/2003	34	24.8		-5.1		-35.9		4.8	
17/06/2003	16	0.7		-0.6		0.6		5.4	
27/06/2003	16	11.6	**41.3**	-3.5	**-4.4**	-26.9	**-31.5**	0.8	**3.8**
01/07/2003	14	17.2		-5.3		-25.9		16.3	
04/07/2003	29	15.9		-9.5		-65.7		10.2	
14/07/2003	22	0.7		-3.0		-19.4		4.8	
16/07/2003	32	6.6		-2.2		-14.2		3.4	
21/07/2003		39.6		-5.8		-38.5		8.3	
23/07/2003	16	0.3	**80.3**	-1.1	**-6.1**	5.2	**-38.8**	13.8	**10.0**
10/08/2003	26	26.4		-6.4		-48.9		2.5	
28/08/2003	16	0.7		-1.6		-3.2		10.0	
28/08/2003	14	8.6		-4.4		-28.7		6.7	
29/08/2003	16	0.3		-5.1		-31.2		10.0	
30/08/2003	10.5	2.3	**38.3**	-5.8	**-5.8**	-33.0	**-42.5**	13.8	**4.3**
06/09/2003	7	16.8		-6.9		-43.9		11.5	
08/09/2003	10	4.0		-7.6		-57.1		3.7	
09/09/2003	9	0.3		avec 12/09		avec 12/09			
12/09/2003	17	5.9		-7.0		-45.3		10.8	
22/09/2003	10	0.7		-6.6		-43.6		9.0	
28/09/2003	7	25.4		-13.1		-92.6		12.6	
30/09/2003	16	1.7	**54.8**	-5.7	**-9.8**	-41.0	**-67.6**	4.5	**11.1**
03/10/2003	9	2.0		-6.4		-41.1		9.9	
04/10/2003	2	29.7		-10.8		-70.8		15.6	
07/10/2003	11	12.2		-6.5		-37.8		14.6	
13/10/2003	11	8.6		-5.0		-31.2		9.1	
20/10/2003	10	4.0		-10.6		-81.3		3.9	
22/10/2003	2	14.2		-14.2		-103.0		10.3	
23/10/2003	-1	4.3		-15.6		-106.1		19.1	
24/10/2003	-1	6.0		-18.3		-126.0		20.5	
29/10/2003	5	6.9		-14.8		-108.7		10.0	
31/10/2003	7	28.1	**116.0**	-12.7	**-11.5**	-83.8	**-77.8**	17.7	**14.4**
01/11/2003		4.6		-15.4		-112.0		11.6	
02/11/2003	6	0.3		-13.6		-94.7		13.9	
09/11/2003	3	7.6		-4.2		-30.8		2.6	
12/11/2003	4	4.6		-7.1		-49.0		8.1	
14/11/2003	4	0.3		-11.2		-82.6		7.3	
16/11/2003	2	23.5		-12.6		-90.1		10.6	
23/11/2003	5	0.3		-8.0		-60.5		3.9	
27/11/2003	3	31.4		-15.9		-113.4		13.4	
28/11/2003	0	0.3		-10.1		-57.1		23.5	
30/11/2003	6	2.6	**75.6**	-10.7	**-12.8**	-81.4	**-92.0**	4.0	**10.6**
02/12/2003		228.9		-13.9		-98.1		12.9	
07/12/2003	2	2.0		-10.7		-70.5		15.1	
12/12/2003	7	1.0		-5.9		-44.8		2.6	

ANNEXES CHAP 2 : Tab. A.2 (pluies Rochetaillée)

Date	T (°C)	RR (mm)	RR mois	$\delta^{18}O$	$\delta^{18}O$ pondéré mois	δD	δD pondéré mois	d-excess	d-excess mois
15/12/2003	-4	0.3		-5.2		-25.6		15.7	
25/12/2003	-4	7.6	**239.8**	-11.2	**-13.7**	-82.1	**-97.1**	7.6	**12.7**
02/01/2004	-4	4.0		-14.1		-102.1		11.1	
10/01/2004	4	1.7		-9.6		-73.7		3.3	
14/01/2004	-2	2.3		-11.5		-93.2		-1.2	
15/01/2004	-2	0.5		-7.8		-52.1		10.5	
17/01/2004	3	3.6		-12.2		-92.5		5.2	
18/01/2004	-2	9.0		-16.2		-120.4		9.2	
21/01/2004	4	3.3		-10.5		-79.0		5.4	
22/01/2004	3	4.3		-20.7		-160.1		5.3	
26/01/2004	-1	5.0		-14.5		-110.4		5.8	
28/01/2004	-1	1.0		-10.3		-78.2		4.6	
29/01/2004	-9	3.0	**37.6**	-9.2	**-14.0**	-58.4	**-104.7**	14.9	**7.2**
moyenne					**-9.3**		**-64.4**		**9.9**

Tab. A.2 : pluviométrie (RR en mm) et composition isotopique (‰VSMOW) journalière et mensuelle pondérée à Rochetaillée (770m);
les mesures en grisé sont recalculées à partir de la GMWL

ANNEXES CHAP 2 : Tab A.3 (pluies Tarentaise)

Date	T (°C)	RR (mm)	RR mois	$\delta^{18}O$	$\delta^{18}O$ pondéré mois	δD	δD pondéré mois	d-excess	d-excess mois
17/02/2003	-9	5.0		-11.6		-76.8		16.2	
02/03/2003	12	1.0		-8.4		-64.4		3.2	
06/03/2003	0	1.0	**2.0**	-10.4	**-9.4**	-71.1	**-67.8**	12.0	**7.6**
02/04/2003	-2	3.3		-7.1		-46.6		10.0	
03/04/2003	-2	13.2		-8.2		-47.6		17.9	
10/04/2003	4	1.0		-10.2		-57.2		24.6	
11/04/2003	3	0.2		-11.1		-76.5		12.2	
20/04/2003	10	3.3		-10.3		-70.2		12.1	
26/04/2003		2.0		-6.8		-51.1		3.4	
30/04/2003	8	4.0	**26.9**	-2.9	**-7.5**	-15.0	**-46.2**	8.3	**13.9**
02/05/2003	23	4.0		-3.4		-22.2		5.0	
13/05/2003	8	5.0		-3.0		-16.9		7.4	
17/05/2003	10	8.3		-6.1		-41.0		7.8	
18/05/2003	30	3.3		-3.2		-19.2		6.3	
19/05/2003	21	0.3		-6.9		-3.1		51.9	
19/05/2003	10	13.2		-6.4		-34.0		17.2	
20/05/2003	4	0.7		-3.8		9.1		39.5	
21/05/2003	9	1.3		-4.3		-14.7		20.0	
22/05/2003	12	3.3		-5.3		-33.1		9.3	
25/05/2003	4	26.4		-9.5		-60.6		15.8	
26/05/2003	8	21.8		-11.1		-72.1		16.4	
27/05/2003	12	1.7	**89.2**	-7.4	**-7.9**	-44.0	**-49.2**	15.1	**14.2**
01/06/2003	26	13.2		-6.6		-41.4		11.3	
08/06/2003	30	19.2		-5.9		-33.6		13.9	
15/06/2003	28	0.7		0.0		3.1		2.8	
17/06/2003	13	2.0		-1.9		-3.7		11.8	
27/06/2003	16	39.6	**74.6**	-6.7	**-6.3**	-44.5	**-39.6**	9.5	**10.9**
01/07/2003	13	34.0		-5.2		-32.8		8.5	
16/07/2003	26	4.3		-2.8		-15.2		7.5	
21/07/2003		13.2	**51.5**	-4.3	**-4.8**	-26.9	**-29.8**	7.9	**8.2**
28/08/2003	15	0.7		-4.3		-24.1		10.0	
28/08/2003	12	15.9		-5.6		-36.4		8.4	
30/08/2003	10	1.3	**17.8**	-7.2	**-5.7**	-39.9	**-36.2**	17.3	**9.1**
06/09/2003	5	26.1		-7.8		-52.7		10.0	
08/09/2003	10	4.0		-8.6		-61.3		7.4	
12/09/2003	18	7.6		-6.9		-48.2		7.4	
28/09/2003	6	15.9		-15.3		-109.1		13.3	
30/09/2003	14	4.0	**57.5**	-6.0	**-9.7**	-38.9	**-67.3**	8.8	**10.3**
01/10/2003	6	4.3		-16.5		-122.1		10.0	
03/10/2003	7	1.3		-6.3		-37.9		12.5	
04/10/2003	0	41.3		-11.1		-72.1		17.0	
07/10/2003	9	18.8		-6.2		-34.5		15.3	
13/10/2003	10	17.5		-5.5		-31.6		12.5	
20/10/2003	7	16.8		-11.5		-85.2		6.8	
22/10/2003	0	19.5		-14.6		-98.6		17.9	
24/10/2003	-2	18.0		-17.9		-122.5		20.5	
29/10/2003	4	15.5		-16.1		-115.3		13.6	
31/10/2003	7	37.7	**190.7**	-12.1	**-11.8**	-83.2	**-79.9**	13.7	**14.8**
01/11/2003		4.3		-16.5					
09/11/2003	3	0.3		-5.4		-29.2		13.6	
12/11/2003	3	2.0		-8.6		-57.6		11.6	
14/11/2003	3	0.2		-14.4		-104.0		11.3	
16/11/2003	0	8.9		-12.3		-90.0		8.3	
16/11/2003		0.2		-11.9		-86.4		8.7	
24/11/2003	4	2.0		-11.0		-73.4		14.4	

ANNEXES CHAP 2 : Tab A.3 (pluies Tarentaise)

Date	T (°C)	RR (mm)	RR mois	$\delta^{18}O$	$\delta^{18}O$ pondéré mois	δD	δD pondéré mois	d-excess	d-excess mois
27/11/2003	0	18.5		-14.9		-102.4		17.1	
27/11/2003	0	2.6		-17.8		-132.8		9.2	
28/11/2003	-2	0.3		-8.1		-42.8		22.1	
30/11/2003	4	7.3	**46.6**	-11.8	**-13.3**	-88.6	**-86.0**	5.9	**20.0**
02/12/2003	3	259.0		-14.0		-96.7		15.3	
03/12/2003	0	1.7		-11.3		-74.3		16.0	
07/12/2003	2	0.7		-10.2		-62.5		19.0	
12/12/2003	6	4.3		-7.4		-48.7		10.1	
15/12/2003	-5	1.3	**266.9**	-5.7	**-13.8**	-29.6	**-95.3**	16.4	**15.2**
02/01/2004	-5	6.6		-14.5		-101.1		14.6	
15/01/2004	-4	3.0		-9.6		-63.3		13.8	
17/01/2004	2	3.0		-11.9		-92.7		2.8	
18/01/2004	-4	15.0		-21.0		-157.6		10.2	
20/01/2004	0	2.0		-15.4		-115.8		7.2	
22/01/2004	4	6.0		-23.7		-182.7		7.2	
25/01/2004	-3	8.0		-11.3		-79.4		11.4	
29/01/2004	-10	8.0	**51.6**	-10.4	**-15.9**	-65.2	**-115.9**	18.2	**11.5**
moyenne					**-9.7**		**-64.8**		**12.4**

Tab. A.3 : pluviométrie (RR en mm) et composition isotopique (‰VSMOW) journalière et mensuelle pondérée à Tarentaise (1080m);
les mesures en grisé sont recalculées à partir de la GMWL

ANNEXES CHAP 3 : Tab A.4.1 (bassin du Furan)

MASSIF DU PILAT

Rochetaillée	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	débit	δO (‰	δD (‰	δC (‰	tritium
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			(l/s)	VSMOW)	VSMOW)	VPDB)	(UT)
14/12/2000	8	9.4	-26		-1.05	7.5		-15.2	-68.0		
16/01/2001	6	7.4	-27		-1.12	7.4		-9.8	-77.6		
01/03/2001	5	6.3	-26		-1.08	7.4		-8.9	-66.0		
03/04/2001	5	9.8	-14		-0.57	7.38		-9.5			
15/05/2001	10	12	-38		-1.55	7.7		-9.8	-71.6		
05/06/2001	13	13.9	-33		-1.33	7.6		-10.3			
03/07/2001	13	16.8	-32		-1.28	7.5		-10.3			
27/08/2001	15	16.2	-8		-0.32	7.1		-9.7			
25/10/2001	8.8	13.9	-45		-1.82	7.48	0.12	-9.7	-62.1		
12/11/2001	-2	10.2	-105		-4.30	8.61	0.14	-9.8	-57.3		
01/12/2001	10.6	9.3	-14		-0.55	6.96	0.14	-9.5	-55.1		
05/12/2001	8	9.7	0	47.2	0.00	6.91	0.14	-9.4	-62.4		
19/12/2001	-5	5.5	-38	140	-1.60	7.41	0.14	-9.9	-59.6		
11/01/2002	9.3	5.4	16	43	0.66	6.42	0.11	-9.7	-57.0		
30/01/2002	20	8.4	15	44	0.60	6.43	0.141	-9.7	-56.6		
18/02/2002	5	7.1	-49	49	-2.03	7.51	0.143	-9.8	-58.2		
21/03/2002	28	9.9	8	44	0.31	6.49	0.145	-9.2	-59.7		
16/04/2002	7.6	10.3	-1	46	-0.06	6.61	0.085	-9.8	-59.6		
15/05/2002	13.7	12.6	11	66	0.45	6.36	0.079	-10.1	-60.8		
27/05/2002	11.4	13.7	10	46	0.41	6.38	0.075	-9.1	-58.9		
18/06/2002	21	17	20	49	0.80	6.2	0.076	-9.2	-59.9		
22/07/2002	17.4	17.5	18	47	0.72	6.19	0.075	-9.0	-58.8		
20/09/2002	16.6	16.1	-7	71	-0.29	6.54	0.091	-9.0	-60.3	-17.1	
15/10/2002	14	13	-11	44	-0.43	6.58	0.090	-9.2	-64.2		8,7 ± 0,6
31/01/2003	-2.5	6.1	26	47	1.10	5.82	0.087	-9.4	-57.8		
31/01/2003	-2.5	6.1	26	47	1.10	5.82	0.087	-9.4	-57.8		
07/03/2003	9.8	8.8	-41	71	-1.69	6.96	0.090	-9.4	-61.3		
14/04/2003	11	10	-2	46	-0.07	6.23	0.080	-9.3	-59.8		
16/06/2003	23	18.2	1	52	0.02	6.14	0.081	-9.3	-64.5		
25/06/2003	18.9	19.3	-27	47	-1.05	6.59	0.083	-9.2	-64.1	-15.9	
18/07/2003	15.1	17.8	2	73	0.08	6.06	0.091	-9.4	-65.0		
26/08/2003	18.4	18.8	-4	50	-0.14	6.11	0.130	-9.5	-69.0		
05/12/2003	10.6	10.3	34	61	1.40	5.55	0.085	-9.6	-68.8		

ANNEXES CHAP 3 : Tab A.4.1 (bassin du Furan)

Essertines dauphin	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (µS/cm)	pe	pH	débit (l/s)	δO (‰ VSMOW)	δD (‰ VSMOW)	δC (‰ VPDB)	tritium (UT)
14/12/2000		8.9	-25		-1.01	7.5		-10.1	-75.6		
16/01/2001	6	8	39		1.61	6.8		-9.9	-83.3		
01/03/2001	5	5.1	-15		-0.63	7.3		-9.3	-72.0		
03/04/2001	5	9.4	6		0.25	7.6		-9.5			
15/05/2001	10	10.4	-30		-1.23	7.5		-9.9	-71.6		
05/06/2001	13	17.1	37		1.46	6.4		-9.9			
03/07/2001	13	17	1		0.04	7.0		-9.9			
27/08/2001	15	21.8	37		1.46	6.1		-9.8			
25/10/2001	9.4	13.2	34		1.38	6.18	0.07	-10.1	-61.1		
12/11/2001	-2	8.1	-85		-3.50	8.30	0.02	-10.2	-62.5		
01/12/2001	9.5	8.9	42		1.71	6.02	0.09	-9.8	-59.8		
05/12/2001	5.7	8.7	40	69.4	1.65	6.07	0.08	-9.5	-60.2		
19/12/2001	-5	4.4	34	61	1.41	6.12	0.03	-10.0	-63.0		
11/01/2002	12.4	3.6	49	54	2.03	5.86	0.01	-9.8	-61.1		
30/01/2002	19	6.7	53	58	2.18	5.75	0.081	-9.8	-57.2		
18/02/2002	3	7.8	-31	58	-1.26	7.20	0.036	-9.9	-63.2		
21/03/2002	22.5	9	45	62	1.83	5.85	0.061	-9.5	-58.9		
16/04/2002	3.5	9.2	46	58	1.89	5.80	0.025	-9.4	-59.8		
15/05/2002	13.2	11.5	52	106	2.12	5.66	84.746	-10.3	-61.2		
27/05/2002	9.1	11.3	51	71	2.10	5.66	0.179	-8.6	-60.8		
18/06/2002	22.6	15.3	30	71	1.19	6.02	0.102	-9.1	-60.1		
22/07/2002	16.7	11.8	72	69	2.93	5.24	0.579	-8.9	-59.5		
20/09/2002	14	13.1	48	68	1.94	5.6	0.128	-8.9	-62.0		
15/10/2002	12.9	12.3	50	67	2.03	5.54	0.152	-8.8	-62.3		8 ± 1
13/01/2003	-2.4	7.7	34	74.9	1.41	5.72	0.304	-8.5	-58.6		
31/01/2003	-4.1	8.1	17	81	0.71	5.98	0.742	-8.9	-58.2		
07/03/2003	8.2	8.1	58	76	2.40	5.21	0.284	-8.9	-56.8		
14/04/2003	8.1	8.6	57	73	2.33	5.21	0.065	-8.8	-59.3		
16/06/2003	18.5	21.5	51	76	2.02	5.29	0.023	-8.7	-63.4		
25/06/2003	19.7	23.1	19	71	0.73	5.81	0.017	-8.7	-63.7	-20.8	
18/07/2003	13.1	23.1	51	72	2.00	5.27	0.011	-9.0	-65.3		
26/08/2003	17.9	23.3	30	64.5	1.18	5.57	0.004	-9.0	-65.8		
05/12/2003	11.2	10.5	79	98	3.24	4.76	0.883	-9.6	-70.9		

Essertines	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (µS/cm)	pe	pH	débit (l/s)	δO (‰ VSMOW)	δD (‰ VSMOW)	δC (‰ VPDB)	tritium (UT)
27/08/2001	15	17.6	26		1.04	6.3		-9.9	-63.0		
25/10/2001	9.4	12.9	26		1.06	6.35	0.02	-10.1	-59.6		
12/11/2001	-2	9.2	-81		-3.32	8.30	0.02	-10.2	-62.8		
01/12/2001	9.5	8.2	2		0.08	6.68	0.02	-9.9	-60.1		
05/12/2001	5.7	7.7	6	64.8	0.23	6.62	0.02	-9.6	-60.7		
19/12/2001	-5	5	8	77	0.33	6.82	0.02	-10.1	-63.1		
11/01/2002	12.4	4.6	31	58	1.30	6.15	0.01	-9.8	-62.5		
30/01/2002	19	10.1	34	63	1.39	6.09	0.020	-9.9	-58.9		
18/02/2002	3	5.6	-23	61	-0.94	7.06	0.021	-10.2	-59.1		
21/03/2002	22.5	9.9	50	57	2.04	5.75	0.032	-9.5	-63.9		
16/04/2002	3.5	8.3	32	63	1.33	6.03	0.022	-10.0	-65.4		
15/05/2002	13.2	10.7	39	66	1.60	5.91	0.018	-10.0	-62.1		
27/05/2002	9.1	12.3	38	65	1.55	5.91	0.018	-8.9	-60.6		
18/06/2002	22.6	17	52	66	2.10	5.64	0.016	-9.3	-60.6		
22/07/2002	16.7	15.7	40	62	1.59	5.82	0.039	-9.4	-61.2		
20/09/2002	14	15	5	68	0.22	6.33	0.035	-9.3	-63.6		
15/10/2002	12.9	12.3	8	64	0.33	6.26	0.031	-9.3	-65.2		7,8 ± 0,7
13/01/2003	-2.4	5.2	22	62.1	0.93	5.89	0.027	-8.9	-60.2		
31/01/2003	-4.1	4.6	17	60	0.70	5.99	0.027	-9.1			
07/03/2003	8.2	6.7	24	65	1.00	5.82	0.026	-9.1	-60.6		
14/04/2003	8.1	8.2	43	58	1.75	5.46	0.022	-9.1	-61.8		
16/06/2003	18.5	19.1	34	60	1.36	5.56	0.021	-9.0	-66.9		
25/06/2003	19.7	20.6	8	60	0.32	5.99	0.021	-9.1	-65.6	-19.6	
18/07/2003	13.1	21.3	5	63	0.18	5.33	0.005	-8.8	-65.5		

ANNEXES CHAP 3 : Tab A.4.1 (bassin du Furan)

Barbanche	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	débit	δO (‰	δD (‰	δC (‰	tritium
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			(l/s)	VSMOW)	VSMOW)	VPDB)	(UT)
25/08/2000	16.5	12.4	70		2.85	5.0		-10.1	-65.5		
10/10/2000	11	10.9	-10		-0.41	7.0		-11.8	-82.9		
29/10/2000	9	9.4	-16		-0.64	7.5		-10.3	-75.5		
14/12/2000	8	8.2	-70		-2.89	5.8		-9.8	-80.5		
16/01/2001	6	8.1	65		2.68	5.9		-9.1	-86.1		
01/03/2001	5	7.1	55		2.28	6.1		-9.1	-66.0		
03/04/2001	5	8.7	54		2.22	6.1		-9.5			
15/05/2001	10	10.1	36		1.48	6.6		-10.2	-76.6		
05/06/2001	13	11.2	61		2.49	6.0		-10.3			
03/07/2001	13	12	80		3.26	5.60		-10.3			
27/08/2001	15	13.5	72		2.92	5.64		-10.4	-62.2		
25/10/2001	9.6	11.7	69		2.79	5.61	0.36	-10.4	-62.6		
12/11/2001	-2	10	-66		-2.70	7.86	0.30	-10.2	-65.1		
01/12/2001	10	9.6	69		2.81	5.55	0.18	-10.4	-63.6		
05/12/2001	6.8	9.4	70	123.6	2.88	5.51	0.18	-9.8	-61.6		
19/12/2001	-2	8	70	128	2.89	5.48	0.18	-10.2	-65.4		
11/01/2002	7.8	7.4	89	137	3.68	5.14	0.14	-10.0	-63.9		
30/01/2002	22.8	7.9	82	130	3.39	5.24	0.169	-10.2	-61.1		
18/02/2002	4	7.8	15	137	0.60	6.41	0.182	-10.6	-61.0		
21/03/2002	16	8.6	76	134	3.11	5.34	0.155	-10.4	-73.5		
16/04/2002	4.8	8.5	78	132	3.21	5.21	0.155	-10.4	-65.7		
15/05/2002	14.4	10.3	77	133	3.15	5.23	0.186	-10.4	-63.2		
27/05/2002	10.5	10.8	82	133	3.37	5.14	0.144	-9.2	-63.4		
18/06/2002	23	12.3	70	133	2.85	5.32	0.196	-9.6	-67.8		
22/07/2002	18	12.8	78	140	3.18	5.14	0.194	-9.5	-65.7		
20/09/2002	15.7	13	61	140	2.45	5.38	0.192	-9.8	-63.1		
15/10/2002	12.6	11.5	62	133	2.52	5.37	0.180	-9.6	-68.3		8 ± 1
13/01/2003	-2.9	7.8	34	137	1.38	5.73	0.181	-9.4	-63.6		
31/01/2003	-6.2	6.4	78	132	3.25	4.91	0.177	-9.8	-60.3		
07/03/2003	7.1	8.2	63	132	2.62	5.13	0.184	-9.7	-61.3		
14/04/2003	10.5	8.7	78	130	3.21	4.84	0.211	-9.8	-61.5		
16/06/2003	18.2	12.8	75	132	3.06	4.85	0.218	-9.9	-65.1		
25/06/2003	18.7	13	58	132	2.33	5.14	0.237	-9.6	-66.0	-23.9	
18/07/2003	16.8	13.8	82	136	3.34	4.68	0.212	-9.6	-66.6		
26/08/2003	18.4	14.7	77	132.2	3.12	4.74	0.172	-9.9	-66.6		
05/12/2003	10.2	9.6	94	136	3.86	4.5	0.212	-9.8	-67.0		

ANNEXES CHAP 3 : Tab A.4.1 (bassin du Furan)

Bessat	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	débit	δO (‰	δD (‰	δC (‰	tritium
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			(l/s)	VSMOW)	VSMOW)	VPDB)	(UT)
25/08/2000	16.5	12.7	50		2.03	6.1		-10.2	-67.0		
10/10/2000	11	11.2	-21		-0.86	6.8		-11.0	-75.6		
29/10/2000	9	9	-28		-1.15	7.5		-10.5	-81.5		
14/12/2000	8	8.5	-47		-1.92	6.2		-9.9	-65.4		
16/01/2001	6	7.8	27		1.12	6.7		-10.6	-72.7		
01/03/2001	5	7.2	27		1.12	6.4		-9.5	-70.0		
03/04/2001	5	7.6	-12		-0.50	7.5		-10.3			
15/05/2001	10	8.8	-29		-1.19	7.6		-10.8	-75.5		
05/06/2001	13	11.1	24		0.98	6.7		-10.7			
03/07/2001	13	10.7	-29		-1.19	7.7		-10.7			
27/08/2001	15	15.5	18		0.72	6.6		-10.3			
25/10/2001	9.3	11.8	-9		-0.37	6.88	0.10	-10.8	-67.3		
12/11/2001	-2	9.7	-97		-3.98	8.51	0.36	-10.5	-66.8		
01/12/2001	7.9	9.7	27		1.09	6.50	0.38	-10.7	-63.5		
05/12/2001	6.2	9	17	43.6	0.68	6.48	0.41	-10.2	-63.7		
19/12/2001	1	8.9	15	41	0.60	6.46	0.36	-10.7	-63.5		
11/01/2002	10.5	6.6	49	39	2.02	5.84	0.22	-10.0	-62.1		
30/01/2002	17	8	38	39	1.56	6.02	0.435	-10.6	-60.8		
18/02/2002	2.8	8.1	-12	43	-0.47	6.86	0.533	-10.8	-65.7		
21/03/2002	14	8.2	30	39	1.22	6.13	0.415	-10.9	-65.8		
16/04/2002	3.2	8.5	32	42	1.33	6.04	0.254	-10.6	-66.6	-21.2	
15/05/2002	13.8	9.3	42	44	1.73	5.86	0.342	-10.9	-64.9		
27/05/2002	9.6	9.3	35	42	1.43	5.95	0.272	-10.0	-65.4		
18/06/2002	22.8	10.2	33	42	1.34	5.96	0.518	-10.0	-66.4		
22/07/2002	14	10.1	49	42	1.99	5.64	0.301	-10.2	-67.6		
20/09/2002	15.3	10.6	24	42	0.99	6.02	0.656	-9.9	-65.1		
15/10/2002	12.5	10.1	21	43	0.88	6.03	0.183	-10.1	-70.0		6,9 ± 0,7
13/01/2003	-2.5	9	22	47	0.90	5.93	0.294	-9.9	-66.3		
31/01/2003	-7	8.1		46	0.00		0.389	-10.2	-65.1		
07/03/2003	7.8	8.6	55	45		5.26	0.530	-9.7	-66.7		
14/04/2003	8.3	8.8	39	45	1.61	5.52	0.446	-10.2	-65.6		
16/06/2003	16.1	13.4	34	43	1.39	5.55	0.087	-9.8	-64.4		
25/06/2003							0.000				
18/07/2003							0.000				
26/08/2003							0.000				
05/12/2003	7.6	9.6	57	42	2.35	5.15	1.178	-10.1	-68.1		

Tarentaise	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	débit	δO (‰	δD (‰	δC (‰	tritium
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			(l/s)	VSMOW)	VSMOW)	VPDB)	(UT)
18/02/2002	5.3	6.9	37	250	1.53	6.06	0.121	-10.2	-64.1		
21/03/2002	15.9	7.8	71	365	2.93	5.38	0.117	-10.2	-62.1		
16/04/2002	7.1	8.2	72	280	2.97	5.32	0.170	-10.1	-64.1	-21.2	
15/05/2002	10.7	9.2	80	315	3.29	5.22	0.101	-10.2	-62.6	-20.9	
27/05/2002	11.8	9.9	80	315	3.28	5.18	0.214	-9.2	-60.4		
18/06/2002	21.6	12.2	78	364	3.17	5.18	0.202	-9.5	-62.3		
22/07/2002	18.2	12.7	73	280	2.97	5.24	0.194	-9.3	-61.9		
20/09/2002	19	13	57	280	2.30	5.45	0.196	-9.0	-52.1		
15/10/2002	12.5	11.3	52	230	2.13	5.5	0.193	-9.2	-63.8		7 ± 1
13/01/2003	1.4	7.2	12	135.2	0.48	6.13	0.190	-9.2	-61.4		
31/01/2003	-2	6.7		139	0.00		0.176	-9.7	-62.3		
07/03/2003	7	7.2	47	146	1.95	5.41	0.182	-9.7	-62.8		
14/04/2003	10.3	7.7	60	137	2.46	5.18	0.163	-9.5	-60.0		
16/06/2003	19.9	19.6	28	145	1.11	5.69	0.016	-9.3	-64.9		
25/06/2003	21.8	20.3	39	159	1.54	5.48	0.013	-9.6	-64.3	-20.5	
18/07/2003	16.1	20.1	66	205	2.61	4.98	0.004	-9.6	-66.6		
26/08/2003							0.000				
28/08/2003		20.6	17	182.5	0.68	5.76	0.012	-9.3	-64.3		
05/12/2003	11.4	9.4	82	390	3.37	4.7	0.177	-10.3	-70.5		

ANNEXES CHAP 3 : Tab A.4.1 (bassin du Furan)

Souvignet	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	débit	δO (‰	δD (‰	δC (‰	tritium
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			(l/s)	VSMOW)	VSMOW)	VPDB)	(UT)
29/10/2000	9	5.7	19		0.77	7.2		-10.0	-77.1		
14/12/2000		6.8	-14		-0.58	6.5		-8.9	-77.8		
16/01/2001	6	5.7	-7		-0.29	7.1		-10.0	-80.8		
01/03/2001	5	4.4	8		0.33	6.8		-9.1			
03/04/2001	5	7.6	-48		-1.99	7.9		-9.7			
15/05/2001	10	10.3	-40		-1.64	7.7		-9.7	-74.9		
05/06/2001	13	10.5	-13		-0.53	7.2		-10.2			
03/07/2001	13	15.9	-58		-2.33	7.9		-10.2			
27/08/2001	15	14.4	-32		-1.29	7.4		-9.7			
25/10/2001	7.3	8.4	-38		-1.57	7.38	53.7	-9.8	-61.0		
12/11/2001	-2	3.8	-91		-3.82	8.31	45.3	-9.9	-60.0		
01/12/2001	8.7	8.5	-26		-1.06	7.20	55.6	-9.9	-59.1		
05/12/2001	6.1	7.3	-30	93.6	-1.24	7.26	42.2	-9.9	-61.0		
19/12/2001	-5	2.2	-34	90	-1.41	7.33		-9.8	-61.9		
11/01/2002	1.5	2.8	10	85	0.41	6.49		-10.2	-62.9		
30/01/2002	13	6.4	-5	85	-0.20	6.75	39.3	-10.0	-60.5		
18/02/2002	3.3	4.8	-73	91	-3.03	7.94		-10.2	-60.6		
21/03/2002	14.3	10.6	2	95	0.07	6.60	95.4	-10.1	-61.5		
16/04/2002	5	5.1	-14	83	-0.57	6.83	36.5	-9.5	-60.4		
15/05/2002	12.4	9.1	-74	89	-3.03	7.82		-10.2	-61.0		
27/05/2002	10.8	8.8	-1	86	-0.04	6.6	95.4	-9.1	-60.6		
18/06/2002	26.4	12.8	-6	87	-0.24	6.62		-9.7	-61.8		
22/07/2002	15	11.8	-11	84	-0.45	6.69	231.0	-9.1	-62.2		
20/09/2002	13.2	11.7	-36	85	-1.46	7.04	339.3	-9.1	-57.9		
15/10/2002	14.8	10.7	-37	84	-1.51	7.04	124.0	-9.4	-64.9		7,7 ± 0,9
13/01/2003	-4.5	3.2	3	76	0.11	6.27	274.4	-9.3	-62.6		
31/01/2003					0.00			-9.7	-61.8		
07/03/2003	7.8	7.1	-42	86	-1.74	6.98	206.9	-9.7	-61.1		
14/04/2003	10	6.9	-22	80	-0.91	6.59	39.8	-9.5	-58.5		
16/06/2003	17.3	14.5	-18	86	-0.71	6.44	25.0	-9.4	-63.0		
25/06/2003	17.8	14.4	-28	75	-1.15	6.61	29.5	-9.3	-64.9	-20.2	
18/07/2003	12.7	12.3	-21	82	-0.85	6.46	27.7	-9.3	-61.9		
26/08/2003	13.9	13.6	-17	77.5	-0.69	6.35	33.9	-9.5	-63.2		
05/12/2003	11	8.6	26	81	1.09	5.68	495.0	-10.1	-68.8		

ANNEXES CHAP 3 : Tab A.4.1 (bassin du Furan)

Planfoy	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	débit	δO (‰	δD (‰	δC (‰	tritium
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			(l/s)	VSMOW)	VSMOW)	VPDB)	(UT)
25/08/2000	16.5	13.3	-28		-1.13	6.6		-9.3	-58.0		
10/10/2000	11	9	-18		-0.74	6.7		-9.6			
29/10/2000	9	6.2	11		0.46	7.3		-9.6	-62.9		
14/12/2000	8	7.6	28		1.16	6.5			-75.4		
16/01/2001	6	5.2	-7		-0.29	7.3		-9.5	-68.8		
01/03/2001	5	4.3	-23		-0.96	7.6		-9.1			
03/04/2001	5	7.5	-23		-0.95	7.7		-9.5			
15/05/2001	10	9.8	7		0.29	7.0		-9.4			
05/06/2001	13	9.8	-8		-0.33	7.2		-9.9			
03/07/2001	13	12.9	-29		-1.18	7.5		-9.9	-62.5		
27/08/2001	15	13.4	-13		-0.53	7.1		-9.6			
25/10/2001	9.2	9.5	-13		-0.53	7.18		-9.7	-60.7		
12/11/2001	-2	5	-110		-4.59	8.76		-9.6	-55.8		
01/12/2001	8.5	8.8	-5		-0.19	6.84		-9.7	-57.4		
05/12/2001	7.2	7.5	7	49.8	0.28	6.92		-9.6	-60.2		
19/12/2001	-5	2.9	6	50	0.26	6.60		-9.6	-57.9		
11/01/2002	3.6	3.6	39	48	1.62	5.99		-9.8	-60.8		
30/01/2002	13.8	7.3	34	48	1.40	6.07		-9.9	-58.8		
18/02/2002	3.4	5.3	-32	33.38	-1.35	7.21		-9.9	-59.7		
21/03/2002	16.9	8.7	15	53	0.62	6.38		-9.2	-57.3		
16/04/2002	5.1	5.8	35	48	1.44	5.98		-9.7	-59.7		
15/05/2002	15.7	8.9	6	50	0.24	6.46		-10.0	-60.8		
27/05/2002	11.6	9	33	48	1.34	5.99		-8.8	-61.7		
18/06/2002	20	12.7	-12	49	-0.47	6.72		-9.4	-62.6		
22/07/2002	19.5	12.1	30	49	1.22	5.99		-9.0	-59.0		
20/09/2002	15	12	4	49	0.16	6.36		-9.0	-57.3		
15/10/2002	14.5	10.8	-2	49	-0.09	6.44		-9.1	-63.2		8 ± 1
13/01/2003	-5.8	3.3	132	50.7	5.54	3.95		-9.0	-61.0		
31/01/2003	-2.4	4		48	0.00			-9.3	-59.0		
07/03/2003	7.3	6.8	-3	53	-0.12	6.28		-9.0	-72.7		
14/04/2003	10.5	7.1	7	50	0.28	6.08		-9.2	-62.2		
16/06/2003	17.5	14.3	16	52	0.64	5.87		-9.1	-61.7		
25/06/2003	18.5	15.6	-7	50	-0.27	6.24		-9.1	-70.0		
18/07/2003	17.4	13.7	12	52	0.47	5.94		-9.0	-64.8		
26/08/2003	18.9	14.9	3	53	0.12	6.01		-9.1	-57.7		
05/12/2003	10	8.9	50	51	2.04	5.28		-9.6	-63.8		

ANNEXES CHAP 3 : Tab A.4.1 (bassin du Furan)

Barbarie	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	débit	δO (‰	δD (‰	δC (‰	tritium
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			(l/s)	VSMOW)	VSMOW)	VPDB)	(UT)
25/08/2000	16.5	13.5	-18		-0.73	7.4		-9.5	-62.0		
10/10/2000	11	8.9	-5		-0.21	6.9		-10.4	-77.9		
29/10/2000	9	6.1	17		0.69	7.3		-10.0	-64.7		
14/12/2000	8	7.6	15		0.62	6.7		-8.8	-72.9		
16/01/2001	6	6.4	-20		-0.83	7.3		-10.1	-76.9		
01/03/2001	5	5.1	-33		-1.38	7.6		-9.2			
03/04/2001	5	7.9	-30		-1.24	7.6		-9.9			
15/05/2001	10	10.1	-19		-0.78	7.3		-10.0	-78.5		
05/06/2001	13	10.6	-26		-1.06	7.4		-10.3			
03/07/2001	13	13.5	-8		-0.32	7.0		-10.3	-61.8		
27/08/2001	15	14	-17		-0.69	7.1		-9.9			
25/10/2001	8.6	9.1	-30		-1.23	7.38	92.3	-10.2	-59.3		
12/11/2001	-2	4.2	-87		-3.62	8.36	64.1	-9.6	-63.3		
01/12/2001	10	9.3	-27		-1.11	7.21	115.1	-10.1	-60.7		
05/12/2001	8	8	-23	126.2	-0.94	7.29	105.6	-9.8	-62.1		
19/12/2001	-5	4.8	-26	113	-1.07	7.22		-10.2	-49.4		
11/01/2002	2.1	2.8	21	114	0.87	6.34	41.2	-10.2	-61.4		
30/01/2002	14.7	7.3	5	120	0.21	6.58	94.2	-10.1	-60.5		
18/02/2002	3.6	5.6	44	84.75	1.83	5.87	48.9	-10.1	-59.8		
21/03/2002	12.4	9.9	-1	117	-0.03	6.62	54.1	-10.1	-61.1		
16/04/2002	4.8	5.6	-3	101	-0.12	6.64	60.2	-9.2	-61.6		
15/05/2002	12.2	9.2	-18	106	-0.74	6.88	56.5	-10.1	-63.0		
27/05/2002	9.7	8.7	70	108	2.88	6.45	68.3	-9.1	-60.4		
18/06/2002	19	12.3	-7	115	-0.27	6.64	143.3	-9.5	-62.8		
22/07/2002	14.6	12.3	-4	116	-0.14	6.54	141.9	-9.2	-61.2		
20/09/2002	13.2	12.1	-31	121	-1.24	6.95	131.3	-9.2	-60.0		
15/10/2002	13.8	11.3	-34	115	-1.39	6.99	82.8	-9.4	-66.6		9 ± 1
13/01/2003	-3	3.4	109	101.8	4.57	4.32	133.2	-9.0	-62.8		
31/01/2003	-2.4	4.2		101	0.00		173.0	-9.3	-59.5		
07/03/2003	9.8	7.4	-14	107	-0.57	6.47	85.5	-9.4	-60.3		
14/04/2003	11	7.7	-11	99	-0.44	6.39	92.6	-9.4	-60.0		
16/06/2003	17	14.6	-27	100	-1.07	6.59	25.0	-9.1	-64.1		
25/06/2003	18.8	15.6	-29	97	-1.17	6.72	15.7	-9.2	-64.1		
18/07/2003	14.1	12.8	-12	101	-0.49	6.31	18.5	-9.2	-63.4		
26/08/2003	14.9	14.4	-16	109.5	-0.64	6.33	24.5	-9.2	-65.6		
05/12/2003	10	9.3	95	113	3.89	4.45	437.5	-9.9	-69.3		

ANNEXES CHAP 3 : Tab A.4.1 (bassin du Furan)

exutoire	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	débit	δO (‰	δD (‰	δC (‰	tritium
Pas de Riot	(°C)	(°C)		(µS/cm)			(l/s)	VSMOW)	VSMOW)	VPDB)	(UT)
25/08/2000	16.5	14.8	-14		-0.54	7.4		-9.5	-61.0		
10/10/2000	11	11	-25		-1.02	7.4		-9.9	-69.2		
29/10/2000	9	7.5	32		1.32	7.5		-9.7	-62.5		
14/12/2000	8	7.4	-1		-0.04	7.0		-9.7	-77.0		
16/01/2001	6	5.5	-38		-1.58	7.7		-9.9	-70.0		
01/03/2001	5	4.9	-34		-1.42	7.7		-9.0			
03/04/2001	5	8.3	-36		-1.49	7.70		-9.6			
15/05/2001	10	11.1	-41		-1.67	7.8		-10.1	-81.6		
05/06/2001	13	13	-41		-1.66	7.7		-9.9	-60.1		
03/07/2001	13	16	-23		-0.92	7.3		-9.9			
27/08/2001	15	16.8	-14		-0.56	7.1		-9.9	-60.1		
25/10/2001	11.2	12.1	-135		-5.49	9.08		-9.3	-57.5		
12/11/2001	0.3	7.7	-89		-3.68	8.36			-56.7		
01/12/2001	8.5	7.5	-37		-1.51	7.38		-9.7	-58.4		
05/12/2001	9.7	7.1	-38	85.5	-1.58	7.56		-9.6	-57.5		
19/12/2001	-5	3.9	-35	81	-1.47	7.37		-9.5	-60.7		
11/01/2002	1.9	4.6	-6	83	-0.23	6.79		-9.9	-59.5		
30/01/2002	15.8	5.5	-3	89	-0.10	6.73	286.0	-10.2	-57.7		
18/02/2002	3.2	5.4	-77	61.69	-3.21	7.99		-10.1	-59.5		
21/03/2002	15.8	8	-16	91	-0.65	6.89		-10.1	-61.3		
16/04/2002	7.4	7.8	-22	89	-0.91	6.98		-9.9	-56.3		
15/05/2002	19.4	12.4	-39	85	-1.57	7.23		-10.0	-61.0		
27/05/2002	10	12.5	-11		-0.45	6.72		-9.0	-63.8		
18/06/2002	24	14.6	-15	85	-0.62	6.77		-9.2	-60.2		
22/07/2002	18.2	16.9	-4	71	-0.14	6.54	716.6	-8.7	-58.1		
20/09/2002	18.9	14.7	-47	85	-1.90	7.22		-8.8	-56.6		
15/10/2002	14.1	11.5	-35	75	-1.42	7		-9.0	-62.2		8 ± 1
13/01/2003	-3.6	2.9	104	74.2	4.36	4.46	665.9	-9.1	-61.8		
31/01/2003	-2.4	4.5		73	0.00			-9.3	-54.7		
07/03/2003	8.2	6.6	-47	76	-1.94	7.06		-9.3	-65.7		
14/04/2003	12	7.8	-35	77	-1.43	6.81		-9.2	-57.7		
16/06/2003	17.5	12.8	-8	75	-0.32	6.3		-9.0	-58.4		
25/06/2003	19.2	13.2	-20	73	-0.80	6.46		-8.9	-59.8		
18/07/2003	15.6	13.1	3	77	0.12	6.05		-9.1	-59.5		
26/08/2003	16.3	15	0	79.7	0.00	6.06		-8.9	-62.9		
05/12/2003	10	8.2	30	76	1.22	5.6		-10.3	-69.4		

Rochetaillée	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
19/12/2001						traces		3.43	1.07	6.34	0.98	3.10	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
11/01/2002			traces			traces		3.22	0.99	6.21	0.45	2.97			0.05	2.29	2.74		7.85	n.d.		
30/01/2002	0.06							3.33	0.96	6.25	0.43	3.12	0.06		traces	2.66	2.90		7.66	n.d.	6.2	31.2725
18/02/2002	0.05		traces					3.49	0.99	6.09	0.69	3.00			traces	3.18	3.31	traces	8.04	n.d.	3.26	32.6915
21/03/2002						traces		3.45	1.08	6.07	0.83	3.10	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
16/04/2002	traces		traces	traces	0.07			3.46	1.00	6.23	0.47	3.25			0.05	2.74	2.71		7.87	n.d.	7.7	31.7275
15/05/2002	traces		traces		0.08	traces		4.25	0.95	5.99	1.43	2.96			traces	4.52	3.57		7.87	n.d.	3.94	33.56797
27/05/2002	traces							3.42	0.98	6.06	0.50	3.08			traces	2.93	2.85		7.85	n.d.	5.19	31.5575
18/06/2002	traces					traces		3.60	1.01	5.84	1.11	2.95	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
22/07/2002						traces		3.53	1.16	6.31	0.95	3.50	traces		traces	3.32	4.13		8.07	n.d.	6.65	34.8615
20/09/2002				traces		traces		3.14	1.04	6.20	0.59	3.11	traces		0.05	2.32	2.55	traces	8.22	3.81	7.96	31.3535
15/10/2002								3.35	1.10	6.63	0.62	3.17	traces		0.05	2.31	2.69		7.60	n.d.	10.68	31.3525
13/01/2003						traces		3.01	1.02	5.91	0.64	2.87	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
31/01/2003								3.25	1.10	6.24	0.58	3.12	traces		0.05	6.33	4.07	8.02	8.60	n.d.	-9.57	45.1975
07/03/2003						traces		3.34	1.11	6.25	0.59	3.13	traces		0.28	3.58	3.12	traces	7.99	n.d.	0.72	33.6495
14/04/2003						0.10		3.21	1.09	6.36	0.64	3.09	traces		0.05	4.56	3.09		8.25	n.d.	-1.66	34.2825
16/06/2003								3.34	1.11	6.56	0.64	3.18	traces		traces	3.18	2.89	traces	7.58	n.d.	6.92	32.3615
25/06/2003								3.59	1.14	6.67	0.64	3.31	traces		0.05	2.76	2.54		7.55	n.d.	11.79	32.0865
18/07/2003	traces	traces	0.11			traces		2.30	1.02	6.32	0.43	3.08	traces		0.06	2.57	2.48		7.30	n.d.	3.47	29.5695
26/08/2003	traces		0.14			traces		2.29	1.01	6.44	0.42	3.15	traces		traces	2.69	2.30		7.40	n.d.	3.58	29.7635
05/12/2003	0.11		0.11			traces		3.40	0.96	4.97	0.74	3.02	traces		traces	4.32	4.07	0.12	8.20	n.d.	-2.62	31.88134

Essertines dauphin	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
19/12/2001				traces		traces		3.09	1.22	5.13	1.59	4.80	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
11/01/2002			traces	0.07		traces		3.05	1.06	5.06	1.25	4.77			traces	2.36	12.28		7.49	n.d.	3.41	39.7337
30/01/2002			traces			traces		3.11	1.25	4.86	1.34	5.50	traces		traces	2.56	15.24		6.95	n.d.	4.38	43.1957
18/02/2002			traces					3.39	1.10	4.95	1.48	4.72			traces	3.19	12.34		7.84	n.d.	1.99	41.3407
21/03/2002						traces		2.82	1.24	4.87	1.37	5.04	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
16/04/2002			0.65		1.66			31.45	4.17	8.41	15.47	14.72			0.07	28.02	60.11		19.92	n.d.	12.28	187.95369
27/05/2002			traces		0.07	traces		3.20	1.42	4.64	1.43	6.82	0.05		traces	3.41	18.00		6.95	n.d.	5.34	48.3477
18/06/2002						traces		3.32	1.46	4.90	1.83	6.27	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
22/07/2002						traces		5.13	1.81	5.32	2.70	6.41	0.05		0.05	12.73	30.02		10.34	n.d.	-18.08	76.9327
20/09/2002						0.26		3.15	1.46	5.10	1.54	5.29	traces		traces	2.99	14.15		7.41	2.29	5.54	43.7187
15/10/2002						traces		2.97	1.40	5.14	1.44	5.13	traces		traces	3.34	13.14		7.83	n.d.	2.84	42.7847
13/01/2003						traces		3.18	1.61	4.95	1.62	5.88	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
31/01/2003						n.d.		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		traces	4.57	18.55	1.56	7.64	n.d.		
07/03/2003						traces		3.42	1.80	5.19	1.47	6.54	0.05		traces	3.44	18.45		8.55	n.d.	3.96	51.26571
14/04/2003						traces		3.37	1.71	5.30	1.36	6.18	0.05		traces	3.58	15.61	traces	8.62	n.d.	5.01	48.1307
16/06/2003				0.05		traces		3.31	1.55	5.34	1.29	5.72	traces		traces	3.42	14.03		8.18	n.d.		
25/06/2003				0.05		traces		3.32	1.54	5.46	1.28	5.64			traces	2.65	14.19		8.22	n.d.	6.66	44.6977
18/07/2003	0.11			0.10				2.07	1.33	5.31	1.05	5.12	traces		traces	2.42	12.26		7.93	n.d.	1.62	40.0677
26/08/2003			traces	0.22	traces	0.05		2.94	1.18	5.53	0.90	4.78	traces		0.06	2.87	7.24		8.12	n.d.	9.81	36.2607
05/12/2003	0.09		0.12			0.05		3.21	2.15	4.17	2.47	8.04	0.07		traces	5.71	30.71		4.86	n.d.	-0.62	64.00671

Essertines	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
19/12/2001				0.09		traces		4.18	1.10	5.71	1.05	6.12	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
11/01/2002			traces	0.15	0.10	traces		4.26	1.00	5.42	0.81	5.25			traces	2.53	11.01		7.93	n.d.	1.29	46.145
30/01/2002			traces	0.13		traces		4.22	0.96	5.48	0.73	5.09			traces	2.43	11.03		7.87	n.d.	17.87	35.629
18/02/2002	traces		traces	0.20				4.03	1.03	5.50	0.60	4.80			traces	2.27	10.90		8.12	n.d.	-1.37	45.17
21/03/2002				0.22		traces		4.03	1.22	5.69	0.83	3.77	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
16/04/2002			traces	0.06				4.08	1.08	5.79	0.55	5.29			n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
15/05/2002	0.06		traces	0.13		traces		9.26	1.36	7.69	4.06	7.18	0.05		traces	2.72	10.79	0.36	8.08	n.d.	28.54	59.439
27/05/2002						n.d.		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		0.06	9.01	36.22	0.10	12.25	n.d.		
18/06/2002				0.23		traces		4.14	1.11	5.73	1.05	5.38	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
22/07/2002				0.20		0.28		6.53	1.31	7.85	2.93	5.79	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
20/09/2002				0.12				3.86	1.05	5.69	0.72	6.42	traces		traces	3.09	9.59		8.61	7.63	4.31	46.863
15/10/2002				0.13				3.83	1.03	5.54	0.67	5.87	traces		traces	2.36	9.38	traces	8.19	n.d.	4.68	44.743
13/01/2003				0.10		traces		3.66	1.13	5.46	0.85	5.78	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
31/01/2003								n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		0.05	5.86	8.95		9.34	n.d.		
07/03/2003				0.10		traces		4.14	1.15	5.77	0.69	5.54	traces		0.35	3.74	9.27		9.12	n.d.	-1.3	47.562
14/04/2003				0.16		0.06		3.86	1.12	5.77	0.67	4.73	traces		traces	4.29	8.47	traces	8.91	n.d.	-4.61	45.767
16/06/2003				0.07		traces		4.06	1.20	5.88	0.75	5.99	traces		traces	3.02	8.25	0.05	8.40	n.d.	6.84	45.394
25/06/2003				0.30				3.92	1.05	5.81	0.64	4.76	traces		traces	2.01	8.36	0.05	8.46	n.d.	2.56	43.065
18/07/2003				0.28				3.96	1.06	5.88	0.65	5.12	traces		traces	1.83	8.39	0.05	8.32	n.d.	5.21	43.254

Barbanche	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
19/12/2001						traces		12.25	2.44	4.89	2.48	7.02	0.08		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
11/01/2002	0.06					0.06		12.61	2.37	4.64	2.75	7.17	0.07		traces	31.55	9.86		5.33	n.d.	-1.6	79.55961
30/01/2002			traces			0.05		11.28	2.31	4.69	1.91	6.96	0.07		traces	26.41	9.07		5.26	n.d.	1.27	71.1006
18/02/2002			traces			0.05		11.71	2.38	4.66	2.13	7.13	0.07		traces	30.99	9.89		5.45	n.d.	-3.47	77.56161
21/03/2002						0.05		11.75	2.45	4.69	2.35	7.03	0.07		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
16/04/2002	0.05		traces			0.05		11.12	2.30	4.51	2.01	7.04	0.07		traces	26.88	9.13		5.32	n.d.	0.48	71.57961
15/05/2002	0.05		traces			0.07		11.02	2.36	4.54	2.34	7.13	0.07		traces	26.24	8.23		5.39	n.d.	2.6	70.5316
27/05/2002						0.06		11.63	2.40	4.58	2.35	7.41	0.08		traces	30.82	8.83		5.63	n.d.	-1.96	76.8766
18/06/2002	traces					0.05		11.95	2.56	4.73	2.44	7.28	0.07		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
22/07/2002						0.07		15.23	2.87	5.52	3.82	8.24	0.08		0.05	41.19	26.33		8.56	n.d.	-12.61	115.0196
20/09/2002	traces					traces		11.02	2.34	4.61	2.03	6.78	0.07		traces	29.56	9.84		5.58	3.05	-4.32	74.9736
15/10/2002	traces					traces		11.75	2.43	4.58	2.07	6.94	0.07		traces	28.55	8.76		5.36	n.d.	0.12	73.6446
13/01/2003						0.05		11.86	2.54	4.82	1.98	7.25	0.07		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
31/01/2003						0.05		11.84	2.53	4.88	1.98	7.33	0.07		0.05	29.93	10.40	traces	6.86	n.d.	-2.78	78.98161
07/03/2003						traces		11.48	2.52	4.88	1.99	7.27	0.07		traces	25.75	10.74		6.72	n.d.	1.41	74.5576
14/04/2003						0.05		13.04	2.65	5.08	2.38	7.61	0.08		traces	27.44	9.90	0.09	6.05	n.d.	5.02	77.4376
16/06/2003						0.05		11.58	2.48	4.89	2.11	7.17	0.07		traces	26.41	9.46	0.10	5.88	n.d.	2.28	73.2806
25/06/2003						0.05		12.20	2.49	4.79	2.27	7.15			0.05	24.66	9.58		5.42	n.d.	6.26	71.7056
18/07/2003	0.29		traces		traces	0.05		9.57	2.31	4.66	1.79	7.94	0.07		traces	23.85	9.24		6.08	n.d.	2.5	68.9846
26/08/2003	0.10		traces			0.17		9.35	2.30	4.77	1.88	6.87	0.07		traces	26.33	8.67		5.19	n.d.	-2.47	68.8306
05/12/2003	traces		traces			0.08		10.33	2.35	4.45	2.17	6.92	0.08		0.07	24.87	14.07	traces	5.53	n.d.	-2.40	74.00

Bessat	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
19/12/2001								3.15	1.05	6.03	0.76	2.35	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
11/01/2002			traces					3.62	0.89	6.08	1.12	2.32			traces	3.14	3.50		4.38	n.d.	7.18	30.41
30/01/2002	traces							4.30	0.94	5.96	1.29	2.29			traces	4.26	5.72		4.27	n.d.	2.68	34.43
18/02/2002			traces			0.06		27.03	2.25	9.00	6.04	10.28	0.06		0.11	51.08	53.27		11.89	n.d.	-13.06	176.42
21/03/2002				traces		traces		3.37	1.03	5.95	0.99	2.42	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
16/04/2002			traces					3.63	0.90	5.88	1.09	2.19			traces	2.95	5.73		3.72	n.d.	3.89	31.46
15/05/2002			traces			traces		9.38	1.24	8.36	5.11	3.23			traces	11.08	33.26		6.01	n.d.	-13.99	83.08
27/05/2002								n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		traces	3.34	6.13		3.92			
18/06/2002						traces		3.27	1.04	6.02	0.95	2.33	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
20/09/2002	traces				traces			3.46	1.12	6.37	0.79	2.59	traces		traces	2.63	5.13	0.10	4.26	5.34	8.01	31.87
15/10/2002								3.21	1.09	5.97	0.73	2.50	traces		traces	2.77	4.89		4.28	n.d.	5.42	30.83
13/01/2003	traces		traces					3.19	1.13	5.78	0.83	2.50	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
31/01/2003						traces		3.36	1.21	6.17	0.74	2.75	traces		traces	4.73	5.58	traces	5.42	n.d.	-2.87	35.41
07/03/2003						0.09		3.51	1.18	6.00	0.75	2.67	traces		0.39	3.44	5.63		4.88	n.d.	0.85	33.91
14/04/2003								3.22	1.18	6.07	0.73	2.64	traces		traces	4.30	4.95		5.10	n.d.	-1.05	33.59
16/06/2003								3.13	1.09	6.03	0.66	2.48	traces		traces	2.80	3.72		4.74	n.d.	5.88	30.04
05/12/2003	0.07		0.08			0.07		3.46	1.00	5.31	0.94	2.42	traces		traces	2.54	5.52	traces	3.84	n.d.	7.42	30.65

Tarentaise	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
18/02/2002			0.06		0.26	0.09		42.43	1.59	4.77	4.15	11.76			0.19	81.76	13.46		14.42	n.d.	-3.14	175.70
21/03/2002	0.18	traces				0.10		46.34	2.39	4.36	3.80	14.47	0.07		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
16/04/2002		0.14	traces			0.10		68.93	2.90	5.23	6.66	18.46			0.25	133.32	18.42		22.21	n.d.	-2.36	277.41
15/05/2002	0.13	0.13	0.05			0.09		39.98	1.55	3.58	2.22	11.31			0.15	76.34	10.49		11.18	n.d.	-1.58	157.96
27/05/2002		traces	traces			0.10		39.03	1.66	3.83	2.24	12.29			0.11	81.57	10.25		9.71	n.d.	-3.45	161.59
18/06/2002	0.31	0.06				0.09		41.16	2.14	4.07	3.28	11.37	0.06		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
22/07/2002	traces	traces				0.08		41.44	1.61	4.83	4.63	10.33	0.05		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
20/09/2002	0.06	traces				0.15		36.49	1.38	3.97	1.93	7.35	traces		0.11	65.70	9.52		12.27	0.76	-3.61	139.78
15/10/2002	0.14	traces				traces		30.40	1.29	4.36	1.76	6.61	traces		0.09	50.91	9.33		11.94	n.d.	-1.25	117.70
13/01/2003	traces	traces				traces		16.67	0.53	3.82	1.60	3.54	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
31/01/2003						traces		21.32	0.75	4.00	1.63	5.18	traces		0.07	26.28	9.46		13.42	n.d.	4.07	82.93
07/03/2003		traces				traces		19.51	0.82	4.22	1.59	4.93	traces		0.06	29.61	9.82		9.82	n.d.	-0.4	81.20
14/04/2003						traces		21.90	0.73	4.22	1.81	4.90	traces		0.08	27.87	7.43		12.20	n.d.	5.15	81.95
16/06/2003						traces		20.96	0.62	4.81	1.26	4.76	traces		0.12	28.81	5.24		10.09	n.d.	4.55	77.47
25/06/2003	0.08					traces		24.83	0.64	4.98	1.43	3.79			0.06	33.18	3.89		8.21	n.d.	6.82	81.87
18/07/2003	0.27	traces	0.12			traces		25.54	0.78	5.40	1.39	4.86	traces		0.10	44.23	4.98		7.47	n.d.	-1.4	95.99
28/08/2003	0.12	0.05	traces					20.15	1.18	4.37	1.08	6.89	traces		0.09	33.33	9.12		15.06	n.d.	-2.49	92.27
05/12/2003	0.18	traces	traces			0.14		45.33	2.55	3.53	3.47	18.35	0.10		0.09	104.63	10.21	0.06	9.38	n.d.	-2.1	198.83

Souvignet	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
19/12/2001	traces		0.15			traces		8.33	1.87	5.50	1.89	5.76	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
11/01/2002								7.11	1.64	5.34	1.13	5.32	traces		traces	14.35	8.90	0.13	6.34	n.d.	-1.99	55.68
30/01/2002			traces		0.10			7.51	1.59	4.85	1.67	5.26			traces	14.58	9.43	0.10	6.59	n.d.	-1.74	56.97
18/02/2002			traces			traces		8.00	1.66	4.91	1.49	5.34	traces		traces	15.71	8.27	0.16	6.68	n.d.	-0.95	57.64
21/03/2002	traces		traces			traces		7.56	1.64	4.94	1.53	5.10	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
16/04/2002			traces			traces		7.01	1.61	4.77	1.44	5.23			traces	13.59	7.84		7.60	n.d.	-1.48	54.46
15/05/2002			traces			traces		6.66	1.58	4.85	1.17	5.11			traces	12.45	6.20		6.40	n.d.	2.22	49.80
27/05/2002						n.d.		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		0.06	28.20	73.84		8.95			
18/06/2002	0.07		traces			traces		7.34	1.63	4.95	1.90	5.07	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
22/07/2002						traces		8.61	1.65	8.14	2.69	5.47	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
20/09/2002	traces		traces			0.10		6.87	1.68	5.13	1.43	5.21	traces		0.07	21.62	36.36		8.14	5.34	-32.81	92.02
15/10/2002			traces			traces		6.50	1.66	5.29	1.41	5.12	traces		traces	12.18	7.36		5.98	n.d.	2.58	50.91
13/01/2003	traces		traces			traces		6.03	1.58	5.06	1.50	4.68	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
31/01/2003						traces		7.37	1.65	5.23	1.41	4.98	traces		0.34	13.04	7.24		6.54			
07/03/2003								7.20	1.66	5.05	1.42	5.18	traces		traces	13.16	8.99		6.98	n.d.	-0.36	55.05
14/04/2003						traces		6.59	1.72	4.93	1.37	5.26	traces		traces	12.92	11.33	0.05	7.11	n.d.	-3.83	56.64
16/06/2003			traces			traces		7.01	1.72	5.49	1.72	4.99	traces		traces	12.60	10.17	0.36	6.38	n.d.	-0.09	55.85
25/06/2003	traces		traces					5.78	1.66	5.72	1.24	4.70	traces		traces	8.53	7.24	0.23	6.00	n.d.	6.80	46.51
18/07/2003	0.12		0.19			traces		5.01	1.63	5.36	1.33	4.88	traces		traces	9.17	7.42	0.40	6.22	n.d.	3.08	47.14
26/08/2003	0.30		0.16			traces		4.79	1.53	5.58	1.56	4.85	traces		traces	9.11	7.75	0.47	5.76	n.d.	2.97	47.28
05/12/2003	0.18		0.20			traces		5.00	1.30	4.32	1.53	4.63	traces		traces	9.09	6.54		6.99	n.d.	0.39	45.20

Planfoy	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
19/12/2001						traces		3.74	0.92	6.67	0.97	3.54	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
11/01/2002	traces		traces			traces		3.73	0.84	6.74	0.58	3.64			0.08	2.39	3.81	0.09	14.23	n.d.	-2.99	36.12
30/01/2002			traces					3.54	0.86	6.42	0.62	3.47			0.09	2.07	3.51		13.86	n.d.	-6.89	35.23
18/02/2002	traces		traces		0.07	traces		3.51	0.82	6.40	0.68	3.58			0.09	2.13	3.22		13.61	n.d.	-1.05	34.09
21/03/2002	traces					traces		3.69	0.90	6.60	0.95	3.49	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
16/04/2002						traces		3.79	0.82	6.36	0.73	3.40			0.09	2.63	3.27		13.83	n.d.	-2.74	34.94
15/05/2002						traces		4.00	0.75	6.25	1.07	3.15			0.08	2.92	3.00		13.78	n.d.	-3.07	35.03
27/05/2002	traces		traces			traces		3.62	0.80	12.71	0.97	3.24			0.09	2.38	2.62		13.65	n.d.	-1.58	40.13
18/06/2002	traces					traces		3.77	0.90	6.55	0.92	3.39	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
22/07/2002						traces		3.67	0.96	6.45	0.81	3.56	traces		0.14	5.97	40.44		20.76	n.d.	-49.20	82.80
20/09/2002	traces					0.09		3.41	0.89	6.64	0.65	3.62	traces		0.09	2.12	2.88		12.86	1.53	2.04	33.32
15/10/2002	traces							3.25	0.84	6.33	0.63	3.27	traces		0.13	15.96	39.50		18.69	n.d.	-58.89	88.64
13/01/2003	traces					traces		3.44	0.97	6.19	0.85	3.68	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
31/01/2003						traces		3.49	1.05	6.55	0.79	3.94	traces		0.10	3.12	4.19		14.01	n.d.	-2.34	37.28
07/03/2003						traces		3.65	1.03	6.62	0.80	3.94	traces		0.10	2.73	5.48		13.86	n.d.	-2.45	38.23
14/04/2003						traces		3.64	0.99	6.73	0.73	3.94	traces		0.10	4.08	3.70	traces	14.19	n.d.	-4.70	38.14
16/06/2003						traces		3.66	0.91	7.01	0.63	3.60	traces		0.10	2.69	2.58		13.43	n.d.	0.37	34.65
25/06/2003	traces					traces		3.66	0.95	7.21	0.61	3.93			0.09	2.52	2.56		13.65	n.d.	2.30	35.32
18/07/2003	0.13		0.08		0.11			2.41	0.85	7.02	0.45	3.61	traces		0.10	2.27	2.44		13.29	n.d.	-5.19	32.66
26/08/2003	0.37		0.11			0.06		2.56	0.89	7.16	0.59	3.73	traces		0.08	2.17	2.63		13.22	n.d.	-2.15	33.60
05/12/2003	0.16		0.14			traces		3.17	0.91	5.43	0.73	3.56	traces		0.10	2.64	2.66		14.00	n.d.	-2.84	33.54

Barbarie	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
19/12/2001						traces		13.70	2.25	5.54	3.98	7.20	0.05		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
11/01/2002			traces					10.38	1.89	4.85	2.27	6.77			0.06	23.60	10.53		7.81	n.d.	-2.92	71.99
30/01/2002			traces			traces		10.56	1.77	4.43	2.60	6.13			0.07	21.96	10.39		8.07	n.d.	-2.13	69.84
18/02/2002			0.08			0.12		38.37	2.86	9.49	11.73	14.26			0.16	69.63	81.24		15.60	n.d.	-11.37	247.35
21/03/2002						traces		10.10	1.81	4.52	2.76	5.93	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
16/04/2002			traces		0.10	traces		8.71	1.66	4.43	1.96	5.86			0.07	17.80	8.39		8.32	n.d.	-1.02	61.05
15/05/2002			traces			traces		9.99	1.51	4.17	2.67	5.47			0.07	19.89	8.09		8.12	n.d.	-1.40	63.84
27/05/2002	0.05		traces		0.08	traces		9.50	1.72	4.41	1.99	5.74			0.07	20.56	8.43		8.17	n.d.	-3.24	64.49
18/06/2002	traces					0.23		11.35	1.84	4.41	2.72	6.07	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
22/07/2002						traces		12.48	1.99	4.71	2.97	6.36	0.05		0.07	25.63	12.43		8.31	n.d.	-2.70	78.83
20/09/2002						0.15		11.56	1.88	4.68	2.87	6.06	traces		0.09	31.70	25.50		9.40	3.81	-20.42	97.75
15/10/2002	0.10		traces		traces	traces		10.44	1.85	4.89	2.65	5.95	0.05		0.07	22.19	8.83		7.31	n.d.	-0.70	68.17
13/01/2003	traces					traces		9.07	1.67	4.54	2.49	5.40	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
31/01/2003						traces		9.86	1.79	4.81	2.57	5.74	traces		0.41	18.47	10.07		8.70	n.d.	-1.53	66.94
07/03/2003						traces		9.81	1.78	4.74	2.44	5.78	traces		0.07	18.37	11.05		8.52	n.d.	-0.89	66.55
14/04/2003			traces			traces		9.02	1.78	4.88	2.14	5.77	traces		0.08	18.78	9.10		8.22	n.d.	-1.67	63.68
16/06/2003						traces		8.44	1.75	5.26	2.01	5.60	traces		0.09	17.59	6.66		7.65	n.d.	0.91	58.83
25/06/2003						traces		8.46	1.78	5.43	2.11	5.65	traces		0.07	15.39	7.60		7.36	n.d.	4.64	57.73
18/07/2003	0.12		0.14			traces		6.87	1.73	5.22	2.03	5.54	traces		0.07	16.11	0.87		7.54	n.d.	5.76	50.13
26/08/2003	0.15		0.19			0.07		7.57	1.86	5.22	2.66	6.01	0.05		0.07	18.66	6.59		7.80	n.d.	-0.12	60.71
05/12/2003	0.14		0.07			traces		9.08	1.65	3.94	2.46	5.60	traces		0.07	19.17	10.87		8.28	n.d.	-4.25	65.21

exutoire Pas de Riot	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
19/12/2001						traces		6.96	1.62	5.47	1.59	5.51	traces									
11/01/2002			traces					7.14	1.59	5.84	1.51	5.63	traces		0.05	13.09	6.57		8.03	n.d.	-0.54	57.13
30/01/2002			traces			traces		7.84	1.52	5.13	1.87	5.06	traces		0.05	14.38	7.79		7.84	n.d.	-3.38	59.15
18/02/2002			traces			traces		6.96	1.45	5.07	1.42	4.89	traces		0.05	13.04	6.98		7.70	n.d.	-4.43	55.25
21/03/2002			traces			traces		7.40	1.66	4.98	1.69	5.64	traces									
16/04/2002															0.07	13.63	10.82	0.20	8.41			
15/05/2002			traces			traces		7.72	1.46	4.97	2.47	5.37			0.06	11.76	5.38		7.68	n.d.	5.40	54.52
27/05/2002			traces		0.11			6.49	1.55	4.99	1.29	5.71	0.05		0.06	11.76	5.38		7.68	n.d.	1.54	52.59
18/06/2002	traces		traces			traces		6.75	1.56	4.98	1.71	5.54	traces									
22/07/2002						0.22		7.71	1.51	6.60	3.01	5.02	traces									
20/09/2002			traces			0.26		6.42	1.56	5.23	1.48	5.67	traces		0.06	10.65	5.32		6.95	7.63	5.39	51.30
15/10/2002	traces		0.06			traces		6.05	1.42	5.48	1.32	4.50	traces		0.05	9.93	4.70		7.12	n.d.	0.76	48.31
13/01/2003	traces		traces			traces		6.13	1.51	5.13	1.38	5.70	traces									
31/01/2003				traces		traces		6.34	1.56	5.47	1.26	4.94	traces		0.37	12.64	9.16		8.19	n.d.	-9.00	57.62
07/03/2003						traces		6.47	1.55	5.35	1.31	4.84	traces		0.05	11.63	6.84		8.14	n.d.	-3.56	53.86
14/04/2003						0.08		6.19	1.63	5.32	1.22	5.33	traces		0.07	11.18	5.96		8.21	n.d.	-0.58	52.86
16/06/2003			0.16			traces		5.79	1.50	5.78	1.27	4.94	traces		0.09	8.86	4.96		7.56	n.d.	3.45	48.59
25/06/2003		0.05	0.28			traces		5.67	1.58	5.66	1.20	4.89	traces		0.05	8.44	4.59		7.42	n.d.	5.54	47.51
18/07/2003	traces	0.07	0.76		0.06	traces		4.37	1.47	5.22	0.98	4.68	traces		0.06	8.32	4.13		7.38	n.d.	1.45	45.15
26/08/2003	0.92	0.14	3.76		traces			4.52	1.57	5.36	1.09	5.22	traces		0.06	9.05	3.76		6.60	n.d.	3.20	45.96
05/12/2003	0.27		0.25			traces		5.32	1.29	4.03	1.71	4.37	traces		0.07	10.35	8.68		7.80	n.d.	-8.54	51.84

ANNEXES CHAP 3 : Tab A.4.2 (Forez non minéral)

PLAINE & MONTS DU FOREZ (NON MINERAL)

Chavagneux	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)
29/08/2002		16.9	24	141	0.94	6.07	-6.7	-45.5
25/03/2003	12.7	9.2	40	132	1.65	5.51	-8.1	-57.5
04/05/2003	19.8	14.6	47	129.4	1.90	5.33		-54.7

Chorsin grange	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰	δC (‰
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)	VPDB)
26/10/2001	11.2	11.6	65		2.65	5.65	-9.7	-61.8	-19.8
01/03/2002	7.6	3.9	25.8	25.6	1.08	6.19	-10.2	-67.5	-23.4
26/03/2002	6.6	6.5	37.3	80.1	1.55	5.96	-9.4	-63.2	-20.4
20/03/2003	10.9	6.5	46	36	1.91	5.47	-9.4	-62.0	
04/05/2003							-9.3	-60.3	

Haut Lignon	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)
04/02/2003	2.7	3.9	-38	65	-1.61	6.97		
20/03/2003	14.6	6.2	-8	98	-0.35	6.38	-9.2	-62.0
09/04/2003	5.6	4.6	12	32	0.50	5.75	-9.1	-62.7
29/04/2003	13.2	10.4	18	35	0.72	6.5	-9.1	-58.5
26/06/2003	23.1	18.2	-37	43	-1.46	6.75	-9.0	-60.2
21/07/2003	19.8	17.5	-21	50	-0.84	6.45	-8.5	-60.4
29/08/2003	21.2	15.8	-7	51.2	-0.28	6.16	-7.9	-53.6
06/11/2003	8.4	7.2	-122	35	-5.05	7.8	-9.4	-65.9

Montarcher	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰	δC (‰	tritium
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)	VPDB)	(UT)
16/09/2001							-9.7	-61.1		
26/10/2001	14.1	10.1	-6		-0.25	6.88	-9.5	-60.8		
05/12/2001	8.6	10.7	150		6.12	4.12	-9.6	-61.6		
22/01/2002	4.6	8	65		2.69	5.54	-9.8	-59.9		
01/03/2002		9.3	25	60.5			-9.6	-57.7		
26/03/2002	7	10.4	46	205	1.87	5.83	-9.9	-59.3	-19.0	
03/04/2002							-9.7	-59.7	-19.7	
24/04/2002	19	10.9	-32	111	-1.32	7.13	-8.9	-60.3		
13/06/2002	28.6	16	207	776	8.29	3.01	-8.9	-59.9	-20.6	
23/07/2002	15.5	16.2	190	700	7.62	3.29	-9.3	-61.4	-19.7	
17/10/2002	9	11.1	-47	51	-1.92	7.2	-7.9	-48.5		5,9 ± 0,8
04/02/2003	0.7	8.3	6	84	0.24	6.19	-9.8	-60.5		
20/03/2003	6.4	9.7	18	61	0.75	5.91	-9.4	-64.0	-20.0	
29/04/2003	9.2	10.7	24	59	0.99	5.87	-9.6	-61.9	-18.2	
26/06/2003	19.1	15.6	45	76	1.82	5.35	-9.4	-64.4	-17.1	
21/07/2003	17.5	16.5	-10	123	-0.39	6.25	-9.3	-66.9	-18.7	
29/08/2003	15	15.3	-5	105	-0.20	6.13	-9.4	-67.0		
06/11/2003	10.1	11.1	10	70	0.42	6.05	-9.5	-65.8	-18.1	

Montarcher village	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰	δC (‰	tritium
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)	VPDB)	(UT)
17/10/2002	9	12.6	-5	75	-0.18	6.47	-9.5	-62.9	-21.3	9 ± 1
29/04/2003	10.6	10.5	-17	81	-0.68	6.5	-9.4	-58.7	-20.5	
26/06/2003	19.4	18.2	-14	75	-0.55	6.35	-9.5	-63.3	-20.5	
29/08/2003	14.8	18.4	13	77	0.50	5.84	-9.4	-63.6	-20.1	
06/11/2003	10.1	10.7	23	74	0.96	5.73	-9.5	-67.5	-19.9	

ANNEXES CHAP 3 : Tab A.4.2 (Forez non minéral)

ruisseau Chorsin	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰	δC (‰	tritium
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)	VPDB)	(UT)
26/10/2001	11.2	8.1	-24		-0.99	7.17	-10.0	-63.7		
05/12/2001	9.9	6.9	-7		-0.29	6.86	-9.9	-64.2		
22/01/2002	3.2	4.3	-0.6		-0.03	6.68	-10.3	-64.1		
01/03/2002	6.5	4.7	-48.2	15.3	-2.01	7.5	-10.0	-64.5		
26/03/2002	6.5	3.3	-14.5	33	-0.61	6.87	-10.0	-62.8		
24/04/2002	14	9.2	-35	25	-1.42	7.18	-9.3	-68.8	-24.4	
13/06/2002	23.8	11.7	-23.8	27.8	-0.97	6.93	-9.3	-67.9		
23/07/2002	16.2	11.7	0	48	0.00	6.49				
29/08/2002	15.1	12.8	-33	52	-1.34	7.02	-9.2	-64.7		
17/10/2002	8.7	9.5	-33	26	-1.36	6.96	-8.7	-63.3		6 ± 1
16/11/2002	6	6.7	29.6	16	1.23	6.89	-9.0	-65.0		
04/02/2003	1	3.8	-26.5	31	-1.11	6.76	-10.1	-75.9		
20/03/2003	9.2	5.1	0	18	0.00	6.23	-9.7	-66.0		
25/03/2003	12.9	6.9	8	17.9	0.32	6.09	-9.7	-66.0		
09/04/2003	5.6	4	4	30.5	0.18	6.13	-9.8	-60.5		
29/04/2003	14.9	9.3	6	25	0.23	6.1	-9.5	-60.9		
26/06/2003	21.1	16.1	-30.3	18	-1.22	6.64				
21/07/2003	18.8	15.6	-45	26	-1.80	6.85	-8.8	-60.4		
29/08/2003	16	13.8	-9	33.5	-0.37	6.22	-8.7	-58.2		
16/09/2003	9.4	9.6	-15	35.9	-0.62	7.27	-9.3	-63.8		
06/11/2003	6.2	5.8	29	17	1.19	5.64	-9.6	-67.3		
18/05/2004	15	7.7	0.9	18		6.85	-10.1	-73.5		

ruisseau Moingt	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)
29/08/2002		15.1	-59	107	-2.38	7.46	-8.4	-60.1
25/03/2003	17.1	9.3	35	88	1.43	6.8	-9.0	-60.9
29/04/2003	17	12.6	-46	176	-1.86	6.97	-8.8	-61.5
26/06/2003	26.5	21.2	-60	101	-2.37	7.12	-8.4	-62.9
21/07/2003	21.4	18.5	-25	144	-1.01	6.52	-6.3	-46.1
29/08/2003	22	18.7	-34	101.3	-1.35	6.6	-7.6	-57.2
06/11/2003	6	5.7	-27	112	-1.12	6.61	-8.9	-62.9

ruisseau St Alban	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)
08/02/2003	7.1	7.4	-17	136	-0.70	6.58	-8.4	-56.3
20/03/2003	14.7	12	-20	179	-0.79	6.56	-8.1	-57.8

Sauvain	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)
04/02/2003	2.7	3.7	-37.8	42	-1.59	6.95	-9.6	-55.3
09/04/2003	6	6.5	10	33.8	0.42	5.88	-9.1	-62.3
29/04/2003	14.7	13.8	11	37	0.45	6.39	-9.1	-60.3
26/06/2003	24.6	21.2	-41	33	-1.63	6.8	-9.3	-63.3
21/07/2003	17.2	22.2	-20	52	-0.80	6.44	-8.4	-60.3
29/08/2003	18.5	20.6	7	32.8	0.28	5.94	-8.8	-62.5

St Rambert	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰	δC (‰	tritium
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)	VPDB)	(UT)
07/08/2002	16.6	15.8	-77.3	631	-3.11	7.78	-7.3	-56.2		
25/03/2003	13.3	14.3	-64	734	-2.60	7.32	-8.2	-55.0	-17.1	
04/05/2003		14.6	-55	705	-2.20	7.10	-8.2	-56.7	-16.5	
26/06/2003	28.6	18.8	-108	705	-4.30	7.94	-8.2	-57.0	-16.4	
29/08/2003	29.6	17.7	-86	697	-3.43	7.49	-8.3	-60.4	-16.1	
06/11/2003	11	14.4	-72	668	-2.90	7.37	-8.2	-61.0	-15.4	11 ± 1
09/09/2004		16.9	-36	741	-1.46	7.5			-16.4	

ANNEXES CHAP 3 : Tab A.4.2 (Forez non minéral)

Sury le Comtal	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰	δC (‰
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)	VPDB)
07/08/2002		15.6	-66.5	166.5	-2.67	7.21	-7.9	-53.6	
25/03/2003	19	9.8	-32	126	-1.30	6.88	-8.9	-56.9	
26/06/2003	28	24.7	-71	360	-2.75	7.28	-8.0	-55.2	-14.4
06/11/2003	11.1	10.3	-17	194	-0.69	6.42	-8.6	-59.0	-20.2

Vassalieu	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰	δC (‰
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)	VPDB)
07/08/2002		13.4	67.7	184.5	2.74	5.3			
25/03/2003	11	10.2	83	164	3.38	4.78	-8.5	-54.7	
04/05/2003		10.1	76	153	3.13	4.76	-8.3	-52.6	
26/06/2003	25.8	16.3	28	175	1.13	5.65	-8.6	-57.9	-22.1

Vidrieu	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)
07/08/2002		14.7	-62.5	157.6	-2.52	7.52	-7.0	-53.4
26/06/2003	26.5	20.9	-50	164	-1.99	6.95	-7.9	-53.8
21/07/2003	21.6	16.7	-33	182	-1.30	6.64	-6.1	-42.2
29/08/2003	22.4	17.8	-34	149.1	-1.34	6.6	-7.1	-49.2
06/11/2003	6.5	5.8	-51	155	-2.12	6.66	-8.5	-57.5

Vizézy	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰	δC (‰	tritium
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)	VPDB)	(UT)
20/09/2001						7.4	-9.61			
26/10/2001	20.5	9.7	-30		-1.23	7.34	-9.65	-57.61		
05/12/2001	13.5	8	-39		-1.61	7.42	-9.67	-59.53		
01/03/2002	8	6.1	-30	83.1	-1.25	7.2	-9.79	-58.85		
24/04/2002	16.3	12.2	-44	163	-1.78	7.33	-9.17	-61.16		
13/06/2002	28.8	17.3	-74.5	129	-2.98	7.76	-9.09	-60.57	-21.22	
23/07/2002	19.2	15.6	-15	53	-0.58	6.74	-8.99			
17/10/2002	13.2	13.4	-47	58	-1.90	7.19	-8.91	-61.44		6 ± 1
04/02/2003	6.8	5.8	-43	101	-1.77	7.04	-10.12	-67.67		
20/03/2003	17.6	6.1	-1	159	-0.05	6.23	-9.40	-62.36		
29/04/2003	14.9	11.7	-31	57	-1.25	6.73	-9.02	-60.25		
26/06/2003	25.8	19.5	-41	82	-1.64	6.81	-8.82	-61.82		
22/07/2003	24	17.6	-14	92	-0.54	6.32	-8.89	-60.73		
29/08/2003	25.6	17.4	-16	86	-0.62	6.31	-8.01	-59.59		mélange canal
06/11/2003	6.7	6.8	-7	79	-0.28	6.25	-9.30	-72.66		

Vollon	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰	δC (‰
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)	VPDB)
07/08/2002		18	-102	630	-4.08	8.19	-5.6	-44.2	
25/03/2003	7.5	7.9	-74	430	-3.06	7.51	-7.5	-53.7	-11.9
04/05/2003		16.9	-55	695	-2.22	7.08	-4.4	-38.6	-12.8
26/06/2003	24.4	22.5	-99	500	-3.90	7.76	-4.9	-43.0	-13.9
29/08/2003	28.2	21	-56	362	-2.20	6.96	-4.2	-33.3	-15.5
06/11/2003	10.3	10.3	-51	574	-2.10	7.03	-8.2	-60.3	-13.4

Chavagneux	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
29/08/2002						traces		7.51	2.46	5.76	0.49	15.96	0.08		0.29	8.71	0.15		21.14	n.d.	-0.12	79.30
25/03/2003								5.20	1.89	3.74	0.81	12.54	0.06		0.23	8.29	0.14		17.81	14.48	0.37	75.28
04/05/2003								6.17	2.25	4.49	0.73	14.64	0.07		0.29	8.45	0.07		19.35	n.d.	0.15	71.89

Chorsin grange	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
26/10/2001	0.10		1.06		traces	traces		3.24	0.70	5.73	0.61	1.80	0.34		traces	2.41	10.54		0.86	n.d.	-13.67	31.31
01/03/2002								n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		traces	2.69	2.15		1.40	7.63		
26/03/2002	0.09		0.28		traces	traces		2.91	0.51	5.52	0.34	1.39	traces		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	15.25		
20/03/2003								2.71	0.56	4.45	0.78	1.33	traces		traces	3.77	3.58		1.66	3.13	-4.53	23.39
04/05/2003	0.17		3.38					3.05	0.66	4.58	0.83	1.60	traces		traces	1.17	0.38		0.90	5.34	19.62	20.22

Haut Lignon	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
04/02/2003	traces					0.09		6.34	1.09	3.93	1.78	4.01	traces		traces	10.44	5.38	0.05	3.41	4.07	5.78	42.22
20/03/2003						0.11		3.40	0.59	3.81	1.08	2.20	traces		traces	4.35	2.43		2.18	3.81	6.44	25.50
09/04/2003						traces		2.83	0.57	3.78	0.77	2.13	traces		traces	3.76	2.61		2.30	3.12	5.99	22.83
29/04/2003						traces		2.99	0.57	3.42	0.84	2.12	traces		traces	4.49	3.55		2.29	3.05	-2.67	25.77
26/06/2003			traces					3.61	0.72	4.06	1.16	2.91	traces		traces	5.04	3.98		2.39	5.33	4.93	29.97
21/07/2003	0.27	traces	0.41			1.20		5.82	0.87	4.24	2.37	3.66	traces	traces	traces	5.60	4.13		2.41	4.58	24.44	36.48
29/08/2003	0.28	traces	0.30		traces	0.05		2.89	0.84	4.03	1.50	3.47	traces		traces	5.55	4.28	0.05	4.80	2.29	3.72	32.21
06/11/2003	0.09		0.05			traces		2.96	0.49	3.69	0.80	2.06	traces		traces	4.64	2.72		2.55	3.81	-1.39	24.64

Montarcher	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
16/09/2001						traces		5.51	1.10	5.68	2.36	3.27	traces		0.06	3.37		162.64	2.45	n.d.	5.51	192.56
26/10/2001								4.81	1.00	9.66	0.84	3.19	traces		traces	1.93	1.27	0.44	2.26	n.d.	-0.06	31.30
05/12/2001	traces	traces	traces		traces	traces		5.47	1.02	10.07	1.24	4.70	traces		0.05	2.67	1.39	44.16	3.22	n.d.	0.67	81.56
22/01/2002			traces	traces				5.63	1.08	10.04	1.00	4.72	traces		0.05	2.97	0.31	7.93	4.23	n.d.	1.67	45.11
01/03/2002			traces	traces				4.62	0.92	7.33	1.26	4.90	traces		0.05	3.45	1.77	7.43	2.45	19.83	-0.27	42.50
26/03/2002				traces	traces	8.20		5.85	1.15	10.30	1.12	4.53	0.05		0.06	2.94	0.91	26.98	4.31	28.47	9.98	73.33
03/04/2002								n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		0.06	2.07	0.03	62.59	4.34	n.d.		
24/04/2002						traces		5.18	0.94	9.88	0.95	3.39	traces		0.06	2.95	0.60	0.35	2.75	21.35	1.28	32.45
13/06/2002								n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		0.07	4.31	3.53	306.26	4.24	n.d.		
23/07/2002	0.20	traces	0.27	0.05		traces		5.62	1.42	9.87	1.49	7.65	0.05		0.05	2.80	1.59	180.40	10.27	n.d.	1.50	230.29
17/10/2002			traces			0.15		2.80	0.68	4.76	1.32	4.59	traces		traces	1.42	2.28	0.98	2.40	12.96	-0.22	28.50
04/02/2003						traces		7.10	1.96	9.17	1.48	7.99	0.06		traces	8.97	3.91	0.34	3.24	19.83	8.85	67.22
20/03/2003						0.14		5.49	1.11	9.63	1.28	4.18	traces		0.05	1.98	1.58	0.32	2.75	13.01	0.67	35.81
29/04/2003			traces					7.05	0.96	9.19	1.29	4.36	traces		0.06	2.75	0.88	0.35	2.88	19.83	1.39	36.93
26/06/2003	0.05		0.19			0.34		10.75	1.33	10.00	1.23	6.71	0.05		0.07	2.36		0.07	5.04	33.55	5.08	48.36
21/07/2003	0.15		0.38	0.07		0.18		21.99	1.05	9.47	1.33	5.38	traces		0.06	2.17	4.53	0.71	4.78	36.60	17.16	59.94
29/08/2003	0.42		1.15	0.06	traces	traces		19.00	1.00	9.16	1.14	4.78	traces		0.05	2.19	3.30		4.33	42.70		
06/11/2003			traces			traces		5.23	1.23	9.13	1.04	4.75	traces		0.05	4.16	4.83	0.30	3.22	19.83	-3.28	42.13

Montarcher village	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
17/10/2002				traces		0.19		4.80	1.68	9.97	1.44	6.97	0.06		0.11	2.45	3.96	0.06	4.81	19.06	9.34	59.22
29/04/2003								4.27	1.52	8.93	1.43	5.66	0.06		0.09	2.70	7.20		5.60	15.25	5.87	52.56
26/06/2003						0.19		4.32	1.56	9.19	1.51	6.16	0.06		0.09	2.09	4.49	0.04	5.33	16.78	9.84	53.33
29/08/2003	0.27		traces	0.10		traces		3.46	1.64	9.76	1.19	6.71	0.06		0.09	1.85	4.22	0.12	4.82	18.30	7.47	55.01
06/11/2003						0.07		4.56	1.53	9.32	1.47	6.54	0.06		0.09	1.90	4.10	0.08	4.80	26.69		

ruisseau Chorsin	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
26/10/2001								n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		traces	0.98	0.88		1.30	n.d.		
05/12/2001			traces		traces			1.48	0.31	4.91	0.37	0.87	traces		traces	1.27	0.49		1.18	n.d.	0.17	12.27
22/01/2002								n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		traces	1.30	1.23		1.58	n.d.		
01/03/2002								n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		traces	1.54	1.72		1.68	6.10		
26/03/2002								n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		traces	1.07	0.35		1.37	15.25		
24/04/2002					traces	0.16		1.55	0.35	3.69	0.31	1.02	traces		traces	1.45	1.16		1.54	7.63	-3.45	13.15
13/06/2002								n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		traces	0.73	0.38		1.19	3.05		
29/08/2002	0.05		0.06			traces		1.47	0.34	3.30	0.38	1.12	traces		traces	1.67	0.92	traces	1.31	3.81	-2.16	12.38
17/10/2002	0.13		0.16			traces		1.60	0.43	3.60	0.62	1.36	traces		traces	1.11	0.61		1.15	2.29	15.89	15.42
16/11/2002								n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		traces	1.54	1.08		1.70	2.20		
04/02/2003								n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		traces	2.27	2.26		2.95	2.03		
20/03/2003								1.36	0.29	3.05	0.60	0.80			traces	1.76	0.58		1.81	1.53	0.48	11.04
25/03/2003						traces		1.53	0.27	2.95	0.68	0.75			traces	1.31	0.67		1.32	1.53	7.73	10.56
09/04/2003						traces		1.25	0.25	2.80	0.60	0.70			traces	1.21	0.86		1.26	3.38	4.73	9.86
29/04/2003								1.45	0.29	3.13	0.49	0.86	traces		traces	0.92	0.97		1.11	2.28	6.67	10.56
21/07/2003	0.22	traces	0.12		traces	4.18		9.69	0.75	3.51	1.01	6.38	traces		0.06	13.66			12.42	n.d.	5.28	55.70
29/08/2003	0.19		0.19					0.63	0.50	3.46	0.61	1.62	traces		traces	1.61	0.97		2.36	3.05	-1.78	16.28
16/09/2003	0.06		0.10			traces		1.25	0.51	4.06	0.56	1.72	traces		traces	0.87	0.47		1.45	n.d.	2.40	14.05
06/11/2003	0.12		0.06			traces		1.42	0.25	3.02	0.59	0.84			traces	1.15	0.80		1.65	3.05	-2.78	10.80

ruisseau Moingt	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
29/08/2002			traces			traces		7.75	3.36	7.72	2.95	8.15	0.08		0.08	10.01	5.05	0.07	6.41	n.d.	-0.36	68.14
25/03/2003						0.08		5.69	2.40	5.82	1.93	5.76	0.06		0.06	9.04	6.13		6.28	10.68	3.89	57.74
29/04/2003						0.07		5.62	2.41	5.52	2.00	5.93	0.06		0.07	8.82	7.79		6.13	n.d.	-2.42	64.30
26/06/2003			0.15			0.06		6.72	2.90	7.52	2.66	7.45	0.07		0.09	9.26	5.43	0.14	5.87	16.78	9.92	68.21
21/07/2003	2.97	0.05	3.21		traces	0.06		8.27	4.61	10.87	6.22	10.53		0.22	0.14	12.09	14.42	0.53	15.40	15.25	12.6	107.23
29/08/2003	0.61	traces	1.04					5.33	2.88	6.98	3.38	7.21	0.06	0.07	0.08	8.03	8.24	0.43	6.28	16.01	9.17	68.85
06/11/2003	traces		0.13			traces		7.00	3.15	7.06	2.61	7.78	0.07		0.07	11.72	4.26	0.06	10.54	23.64	-1.19	80.54

ruisseau St Alban	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
08/02/2003															0.10	12.84	3.02		7.18	9.91		
20/03/2003						0.09		6.43	1.99	5.64	2.64	9.51	0.06		0.11	14.18	6.36	0.04	9.47	11.43	2.08	71.31

Sauvain	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
04/02/2003								n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		traces	5.66	4.60	0.08	1.73	n.d.		
09/04/2003						traces		2.16	0.47	4.47	0.95	2.06	traces		traces	1.58	5.47		1.32	3.81	3.3	23.57
29/04/2003						2.34		2.39	0.50	4.84	0.91	2.28	traces		traces	2.25	5.66	1.30	1.28	n.d.	4.17	30.41
26/06/2003								2.05	0.45	4.43	0.85	2.50	traces		traces	1.36	3.21		1.54	6.10	2.26	20.32
21/07/2003	traces		traces	traces	traces	0.15		2.33	0.46	4.42	1.04	2.97	traces		traces	1.46	3.67	0.05	1.75	6.15	-0.38	22.89
29/08/2003	0.14		traces	traces				1.46	0.42	4.82	0.72	2.17	traces		traces	1.48	4.04	traces	1.52	5.33	-2.44	22.89

St Rambert	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
29/08/2002						0.10	traces	36.47	19.51	18.61	48.96	55.66	0.53		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
25/03/2003						0.08	traces	41.51	19.53	17.54	36.72	56.64	0.52		0.40	68.01	73.30	0.82	79.15	106.75	4.03	509.94
04/05/2003						0.10	traces	41.15	18.97	17.35	37.87	54.78	0.51		0.35	62.22	66.37	1.47	67.10	159.27	0.67	537.61
26/06/2003						0.11	traces	35.10	16.64	15.45	37.83	49.92	0.48		0.43	61.60	69.42	1.49	72.88	n.d.	-0.93	491.42
29/08/2003	0.57		0.23			0.11		35.23	18.46	17.38	40.02	56.25	0.50		0.36	58.49	60.85	1.33	66.16	100.21	0.32	528.62
06/11/2003	0.50					0.12	0.05	33.47	15.74	15.41	39.90	47.51	0.47		0.37	55.18	59.94	1.33	62.52	148.14	-0.92	403.43

Sury le Comtal	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
07/08/2002			0.05			traces		11.12	3.13	8.11	3.47	17.50	0.09		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
25/03/2003						traces		9.49	2.39	6.27	1.96	11.72	0.07		0.11	10.93	2.38	0.59	10.22	19.83	0.33	73.21
26/06/2003			0.08			0.07		23.95	3.65	7.15	5.73	34.26	0.15		0.20	31.25	6.97	0.37	27.40	n.d.	0.49	184.39
06/11/2003	0.80		0.23			0.06		11.94	2.96	7.29	3.70	20.08	0.10		0.14	15.46	3.57	0.18	13.65	61.00	0.11	108.98

Vassalieu	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
25/03/2003						0.07		7.28	2.29	7.44	3.74	13.42	0.07		0.07	12.99	33.17	0.16	18.00	3.05	-2.65	102.50
04/05/2003						0.03		6.93	2.30	8.55	3.56	13.08	0.07		0.07	11.56	36.07	0.14	18.46	n.d.	-2.34	100.82
26/06/2003						0.03		8.01	2.97	10.89	4.49	15.77	0.08		0.08	10.47	33.69	0.59	18.93	n.d.	3.31	115.99

Vidrieu	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
07/08/2002						traces		12.71	5.04	8.86	5.79	12.36	0.10		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
26/06/2003			0.16					11.17	4.18	7.18	4.13	10.81	0.09		0.13	19.25	6.09	0.40	8.36	33.55	1.97	108.75
21/07/2003	4.02	0.06	3.85		traces	4.16		10.51	5.20	11.43	9.03	12.25	0.09	0.35	0.15	17.25	17.90	0.62	15.05	22.88	3.7	154.01
29/08/2003	1.56	0.09	2.48			traces		9.13	4.53	8.28	6.17	10.76	0.09	0.17	0.11	15.20	10.04	0.55	9.25	21.35	2.79	120.08
06/11/2003	0.15		0.08			traces		10.54	4.10	7.02	4.07	10.54	0.09		0.09	21.09	6.11	0.17	11.32	34.31	-3.19	111.48

Vizézy	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
26/10/2001								n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		0.05	5.31	3.27		3.32	n.d.		
05/12/2001						traces		4.03	1.20	5.92	1.48	3.36	0.03		traces	5.16	3.90		3.30	n.d.	-2.67	34.36
01/03/2002								n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		0.05	7.50	5.95		4.47	9.15		
24/04/2002						0.05		4.56	1.34	5.05	1.29	3.78	0.04		0.05	5.88	4.49		3.80	15.25	4.71	40.33
13/06/2002								n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		0.05	5.05	3.51		3.24	7.63		
23/07/2002	traces		0.05			traces		4.23	1.20	5.76	1.34	3.30	0.03		0.05	4.91	3.04	0.06	3.25	7.63	-1.32	33.23
17/10/2002	traces		0.12			0.17		3.85	1.49	5.50	2.17	4.03	0.04		0.05	4.89	0.99		3.08	11.44	9.13	41.10
04/02/2003						0.06		6.59	2.82	5.52	2.46	6.32	0.06		0.07	12.29	10.65		6.11	7.12	5.4	62.55
20/03/2003								3.89	1.11	4.67	1.31	3.09	0.03		traces	5.02	3.30		3.48	4.46	4.69	34.44
29/04/2003						0.07		3.97	1.22	4.76	1.35	3.38	0.04		0.05	5.68	6.64		3.54	15.25	-0.62	39.27
26/06/2003			0.06					4.73	1.41	6.02	1.65	4.02	0.04		0.07	5.18	6.05		3.31	16.78	10.78	41.13
22/07/2003	0.37		0.58		0.05	0.18		4.13	1.40	5.64	2.53	4.15	0.04	0.03	0.05	6.61	4.82	0.15	3.90	15.25	0.75	49.14
29/08/2003	0.08		0.33			traces		3.58	1.50	5.32	2.29	4.37	0.04		0.06	7.66	7.02	0.17	4.55	18.30	-3.12	47.89
06/11/2003	0.07		0.09			traces		3.67	1.24	5.03	1.71	3.59	0.03		traces	6.20	3.47		4.84	19.83	-2.7	35.40

Vollon	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
07/08/2002			traces			0.06	0.16	101.53	10.13	6.87	22.34	41.62	0.19		0.23	40.56	17.03	0.71	59.09	n.d.	2.88	350.95
25/03/2003						0.07		20.84	11.37	7.34	8.89	38.42	0.23		0.24	40.99	23.76	0.38	44.27	76.25	1.5	282.30
04/05/2003						0.09		71.58	11.26	8.04	6.71	47.93	0.26		0.15	135.20	20.28	3.55	42.22	135.55	-4.55	482.25
26/06/2003						0.09	0.02	28.59	11.70	11.48	7.93	46.91	0.28		0.28	34.85	8.34	1.80	50.34	n.d.	0.9	270.26
29/08/2003	1.46		0.42			3.56	0.02	17.40	7.39	5.42	6.28	31.73	0.14	traces	0.17	27.66	15.59	0.33	56.13	34.85	6.43	210.69
06/11/2003	0.08		traces			0.10		25.95	12.65	9.91	7.16	51.45	0.30		0.18	52.27	50.70	0.68	57.71	108.93	-4.09	381.86

ANNEXES CHAP 3 : Tab A.4.3 (Forez minéral)

Chorsin	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰	δC+CO_2	% mol C	δC-CO_2	% mol C	tritium	^{14}C	^{14}C
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)	(‰ VPDB)		(‰ VPDB)		(UT)	(pCM)	(pCM)
16/09/01							-10.0								
26/10/01	11.2	9.5	57.3		2.35	5.77	-10.0	-61.9							
05/12/01	9.9	7	59.5		2.47	5.69	-10.1	-63.6							
22/01/02	3.2	4.4	68	590	2.84	5.49	-10.1	-66.8							
01/03/02	6.5	4.7	42	31	1.76	5.9	-10.1	-65.9	-4.9	0.005%					
26/03/02	6.5	5.4	60.1	583	2.51	5.57	-9.3	-66.2	-3.6	0.102%	-3.9	0.055%			
24/04/02	14	8.6	56.3	640	2.32	5.59	-9.1	-66.7	-3.1	0.117%	-4.0	0.067%		4.78 (+CO_2)	5.99 (-CO_2)
13/06/02	23.8	13.2	57.2	643	2.32	5.55	-9.3	-65.9	-4.4	0.086%	-5.4	0.042%			
23/07/02	16.2	14.2	67.6	746	2.73	5.34	-9.4	-69.6	-4.2	0.111%	-4.4	0.046%	5 ± 1		
29/08/02	15.1	13.4	44	633	1.78	5.7	-9.4	-67.3	-3.5		-4.7				
17/10/02	8.7	10.1	41.3	343	1.69	5.68	-9.1	-66.0	-4.0	0.048%	-4.9	0.020%	5 ± 1		
20/03/03	9.2	5.7	71.1	113	2.96	4.97	-9.8	-68.5	-5.4	0.019%	-3.8	0.006%			
25/03/03	12.9	7.5	68	200	2.81	5.03	-9.9	-66.5	-5.8	0.035%	-4.9	0.012%			
09/04/03	5.6	5.1	60.2	489	2.51	5.16	-9.7	-70.1	-7.5	0.205%	-9.0	0.107%			
29/04/03	14.9	9.4	53	610	2.18	5.31	-9.5	-71.2	-5.2	0.096%	-2.4	0.028%			
26/06/03	21.1	15.4	31.4	653	1.26	5.59	-9.7	-68.3	-4.4	0.078%	-2.4	0.025%			
21/07/03	18.8	15.9	40.6	631	1.63	5.41	-9.5	-70.2	-4.8	0.087%	-6.1	0.034%			
29/08/03	16	15.2	46.1	650	1.86	5.25	-9.5	-74.8	-5.2	0.088%	-3.9	0.022%			
16/09/03	9.4	11.8	42.4	672	1.73	6.27	-9.5	-68.6	-4.8	0.078%	-5.1	0.028%			
06/11/03	6.2	6.4	76.6	117	3.18	4.78	-9.8	-67.4	-5.0	0.034%	-4.0	0.009%			
18/05/04	15	8.5	89.5	549		5.24	-9.5	-63.0							

ANNEXES CHAP 3 : Tab A.4.3 (Forez minéral)

Moingt	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰	δC+CO_2	% mol C	δC-CO_2	% mol C	tritium	^{14}C	^{14}C
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)	(‰ VPDB)		(‰ VPDB)		(UT)	(pCM)	(pCM)
20/09/01						6.6	-10.1	-65.4							
26/10/01		15.7	15.5		0.62	6.51	-10.0	-63.4							
05/12/01	14	14.5	11.4		0.46	6.54	-9.1	-60.1							
01/03/02	10.2	13.4	6.6	3660	0.27	6.53	-10.1	-62.9	-3.5	0.148%	-1.3	0.121%			
26/03/02	13.4	14.3	4.1	4340	0.17	6.54	-9.8	-61.3	-3.3	0.153%	-2.0	0.133%			
24/04/02	17.4	14.1	8.1	4580	0.33	6.44	-9.6	-62.9	-3.5	0.182%	-3.0	0.125%		3.88 (+CO_2)	7.26 (-CO_2)
13/06/02	29	17.5	2	4420	0.08	6.49	-9.4	-62.9	-3.5	0.152%	-2.4	0.125%			
23/07/02	22.7	16.7	26	4400	1.04	6.06	-9.3	-64.4	-2.8	0.158%		0.110%	< 2,4		
17/10/02	14.1	15.4	-8.7	4510	-0.35	6.54	-9.5	-66.4	-3.0	0.160%	-1.9	0.111%			
04/02/03	5.6	12.9	-5.3	4340	-0.22	6.38	-9.7	-67.4	-3.9	0.164%	-1.4	0.091%			
20/03/03	8.5	13.5	-3.4	4310	-0.14	6.28	-9.6	-66.7	-4.0	0.155%	-1.2	0.102%			
29/04/03	17	14.3	-6.1	4470	-0.25	6.29	-9.7	-68.3	-3.9	0.163%	-5.3	0.128%			
26/06/03	26	16.4	-20.2	4690	-0.81	6.46	-9.7	-72.7	-3.3	0.168%	0.9	0.079%			
21/07/03	21.6	17.4	-11.6	3760	-0.46	6.3	-8.4	-63.5	-3.4	0.139%	-2.3	0.087%			
29/08/03	25.6	16.7	-11.6	4510	-0.46	6.24	-9.6	-71.0	-3.9	0.160%	-2.7	0.128%			
06/11/03	6.6	14.6	-6.4	4500	-0.26	6.24	-9.6	-68.0	-3.7	0.167%	-0.8	0.098%			

ANNEXES CHAP 3 : Tab A.4.3 (Forez minéral)

Montrond	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰	δC+CO_2	% mol C	δC-CO_2	% mol C	tritium	^{14}C
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)	(‰ VPDB)		(‰ VPDB)		(UT)	(pCM)
01/07/01							-9.9	-79.1						
01/09/01						7.02	-10.2	-66.0						
26/10/01		17.7	24.8		0.99	6.74	-9.6	-71.6						
26/03/02	8	21.4	-21.6	2530	-0.85	6.97	-10.3	-71.6	-4.7	0.065%	-4.5	0.069%		
24/04/02	16	21.2	-21.8	2240	-0.86	6.94	-9.5	-68.2	-4.8		-5.3			
13/06/02	20	24	-17.7	2690	-0.69	6.84	-9.9	-71.9	-4.8	0.075%	-4.9	0.068%		
23/07/02	30	26.3	-11.4	2800	-0.44	6.68	-9.9	-70.7	-5.3	0.084%	-4.7	0.083%		
21/08/02	24.5	24.8		2890			-10.0	-70.1	-4.1	0.091%	-3.4	0.066%		
17/10/02	15.3	23.8	-28.2	2940	-1.10	6.87	-9.9	-69.0	-4.4	0.092%	-8.0	0.080%	< 1,1	
19/11/02	16	24.3	-14.1	2870	-0.55	6.64	-9.9	-70.3	-4.3	0.085%		0.062%		8.33 (+CO_2)
19/11/2002*							-10.3	-72.4	-4.6	0.107%		0.055%		
25/03/2003*	19,6	23.4	-7	3010	-0.27	6.33	-10.0	-80.4	-4.8	0.096%	-2.5	0.063%		
24/04/2003*	17,8	24.4	-8.1	3040	-0.32	6.33	-10.1	-74.7	-4.6	0.101%	-5.9	0.083%		
26/06/2003*	25	25.9	-19.3	3100	-0.75	6.44	-10.1	-79.8	-4.1	0.103%	-4.0	0.061%		
21/07/2003*	19,8	24.6	-12.3	2960	-0.48	6.3	-10.0	-75.6	-4.6	0.129%	-4.4	0.074%		
29/08/2003*	28	25.8	-10.5	3000	-0.41	6.21	-9.9	-76.1	-4.8	0.115%	-2.9	0.073%		
06/11/2003*	16,4	23.2	-5.7	3060	-0.22	6.23	-10.2	-75.7	-4.5	0.110%	-3.0	0.071%		

*** = prélèvement à la fontaine publique et non dans les thermes**

Salt en Donzy	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰	δC+CO_2	% mol C	δC-CO_2	% mol C	tritium	^{14}C
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)	(‰ VPDB)		(‰ VPDB)		(UT)	(pCM)
20/09/01						8.09	-9.1	-62.2						
26/03/02	4.2	29.9	-74.8	1144	-2.87	7.84	-9.4	-61.5	-11.5	0.015%	-11.3	0.013%		
24/04/02	13.8	29.2	-82.1	1155	-3.15	7.98	-8.8	-62.0	-11.3	0.016%	-12.2	0.013%		38,2±0,6
23/07/02	28.8	29.6	-110	1160	-4.22	8.29	-8.7	-64.4	-12.1	0.014%	-12.0	0.010%		
17/10/02	17.2	29.9	-98.7	1160	-3.78	8.01	-8.8	-64.6	-11.7	0.014%	-12.2	0.009%	< 1,3	
20/03/03	16.5	16.7	-78.5	1110	-3.14	7.56	-8.6	-63.5	-11.3	0.015%	-12.3	0.011%		
29/04/03	23	29.4	84.3	1160	3.23	7.56	-8.8	-64.8	-12.5	0.017%	-12.0	0.011%		
26/06/03	30.5	30.3	-104.7	1152	-4.01	7.82	-9.0	-65.1	-11.5	0.016%	-14.5	0.014%		
21/07/03	21.4	29.5	-89.6	1149	-3.44	7.56	-8.9	-65.2	-12.1	0.015%	-12.6	0.020%		
29/08/03	24	29.5	-88	1180	-3.38	7.47	-9.0	-66.1	-11.8	0.015%	-12.0	0.014%		
06/11/03	15.1	27.4	-74.3	1170	-2.87	7.35	-8.9	-65.8	-12.0	0.015%	-11.8	0.009%		

ANNEXES CHAP 3 : Tab A.4.3 (Forez minéral)

Sail/Couzan	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰	δC+CO_2	% mol C	δC-CO_2	% mol C	tritium	^{14}C
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)	(‰ VPDB)		(‰ VPDB)		(UT)	(pCM)
01/07/01							-9.9	-74.4						
01/09/01						6.37	-9.8	-59.4						
26/10/01	15.7	15.6	26		1.05	6.33	-9.9	-62.5						
05/12/01	14.6	14.9	23.8		0.96	6.33	-10.0	-61.9						
22/01/02	10.4	14.5	27.5	3096	1.11	6.22	-9.9	-62.9						
01/03/02	9	14.7	20	3090	0.81	6.3	-10.1	-62.2	-2.2	0.125%	0.6	0.087%		
26/03/02	5.6	14.1	17.4	3240	0.70	6.31	-10.1	-63.8	-2.3		-0.8			
24/04/02	19.5	16.5	14	3300	0.56	6.34	-9.2		-2.9	0.166%	-1.3	0.105%		
16/11/02	8	15.4	-1.3	3120	-0.05	6.4	-9.3	-63.4	-3.6	0.145%		0.068%	3,1 ± 0,7	
18/02/03					0.00		-9.5	-62.5	-6.9	0.310%	-1.5	0.097%		4.51 (+CO_2)
20/03/03	12.4	15.5	13.9	3220	0.56	5.99	-9.6	-65.9	-4.0	0.183%	0.2	0.080%		
09/04/03		15.5	11.6	3400	0.47	6.01	-9.5	-65.6	-3.5	0.168%	-0.4	0.075%		
09/07/03	30.3	16.6	1.3	3210	0.05	6.09	-9.5	-68.0	-3.5	0.174%	-0.4	0.069%		
16/09/03	11.3	15	0	3230	0.00	6.07	-9.3	-67.2	-3.8	0.180%	-1.6	0.083%		
06/11/03	4	14.8	9	3240	0.36	5.98	-9.7	-68.2	-2.4	0.127%	0.6	0.073%		
11/02/04	-4	12.6	4.4	3220	0.18	6	-9.5	-69.7	-6.2	0.231%	-1.3	0.092%		
15/03/04	11.5	14.7	49.1	3140	1.98	6.22	-9.6	-69.3	-5.0	0.228%	0.5	0.067%		
06/04/04	10.9	14.4	45.3	3160	1.83	6.29	-9.6	-63.1	-6.1	0.270%	-0.3	0.079%		

ANNEXES CHAP 3 : Tab A.4.3 (Forez minéral)

Saint Alban	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰	δC+CO_2	% mol C	δC-CO_2	% mol C	tritium	^{14}C
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)	(‰ VPDB)		(‰ VPDB)		(UT)	(pCM)
01/07/01							-9.3							
29/03/02							-8.7	-60.0						
24/04/02				2070			-8.5	-56.7	-4.9	0.119%	-3.8	0.079%		
30/05/02											-2.7			
13/06/02	18.5	19	30.9	1990	1.23	6.01	-8.7	-60.8	-4.9	0.125%	-2.9	0.064%		
23/07/02	25.3	20.2	22.5	1904	0.89	6.11	-8.8	-61.9	-6.0	0.143%	-3.8	0.068%		
17/10/02	15	18.5	0.3	1939	0.01	6.39	-8.6	-59.8	-5.1	0.125%	-4.2	0.073%	2 ± 1	
04/02/03	8.2	27.8	10.4	2180	0.40	6.11	-9.0	-62.5	-5.2	0.122%	-2.5	0.057%		
08/02/03	8.2	19.8	23.3	1940	0.92	5.9	-8.9	-63.5	-5.6	0.126%	-2.6	0.066%		6.93 (+CO_2)
20/03/03	16	17.6	24.3	1700	0.97	5.82	-8.9	-61.4	-4.9	0.120%	-2.1	0.056%		
26/04/03	16.4	16	22.6	1890	0.91	5.82	-8.9	-61.9	-5.1	0.092%	-2.7	0.064%		
09/07/03	29.6	21	15.6	1640	0.62	5.85	-8.9	-63.5	-4.8	0.126%	-1.7	0.041%		
21/07/03	22.8	22.6	16.4	1790	0.64	5.82	-8.8	-72.8	-4.9	0.165%	-3.7	0.061%		
29/08/03	26	20.8	15.6	1950	0.62	5.78	-8.8	-69.1	-5.2	0.124%	-2.4	0.064%		
06/11/03	12.1	14.2	25.1	1830	1.01	5.7	-8.8	-65.7	-5.0	0.129%	-1.4	0.049%		
09/09/04		18.9		1860		5.85	-8.9		-4.8	0.114%	-2.6	0.058%		

ANNEXES CHAP 3 : Tab A.4.3 (Forez minéral)

Saint Galmier	T ext	T eau	mV	cond	pe	pH	δO (‰	δD (‰	δC+CO_2	% mol C	δC-CO_2	% mol C	tritium
	(°C)	(°C)		(µS/cm)			VSMOW)	VSMOW)	(‰ VPDB)		(‰ VPDB)		(UT)
01/07/01							-9.1	-65.0					
01/09/01						6.09	-8.9	-52.9					
26/10/01	17	11.7	37.4		1.52	6.12		-63.4					
22/01/02	14.4	16.5	42.5	1781	1.70	5.95	-9.1	-60.0					
01/03/02	8.6	16.7	29	1672	1.16	6.15	-9.1	-59.4	-4.9	0.107%	0.3	0.033%	
26/03/02	2.8	15.8	35.9	1737	1.44	6.01	-8.6	-58.3	-4.7	0.114%	-4.1	0.078%	
24/04/02				1870			-8.7	-58.7	-5.5	0.107%	-3.1	0.063%	
09/07/02							-8.6	-60.3	-5.8		-5.4		
21/08/02	20.8	22.5		1640			-8.4	-64.4	-4.5	0.114%	-3.0	0.061%	
14/09/02							-8.4	-60.9	-5.2	0.118%	-3.1	0.067%	
17/10/02	12	18.3	14.5	1870	0.58	6.14	-8.5	-58.9	-4.3	0.066%	-3.3	0.053%	6 ± 1
08/02/03	5.2	16.1	23.5	1710	0.94	5.86	-8.8	-62.7	-5.2	0.115%	-2.9	0.049%	
27/02/03							-8.8	-61.1	-5.3	0.123%	-2.3	0.065%	
25/03/03	12.9	17.3	25.1	1880	1.00	5.8	-8.7		-5.3	0.110%	-2.5	0.044%	
26/04/03	17.8	18.6	25.2	1732	1.00	5.78	-8.6	-70.1	-5.3	0.114%	-3.0	0.055%	
26/06/03	25	21.5	12.2	1780	0.48	5.92	-8.9	-65.0	-3.6	0.083%	-0.7	0.040%	
22/07/03	24.8	21.3	20.2	1790	0.80	5.76	-8.9	-74.7	-4.7	0.081%	-3.7	0.051%	
29/08/03	29	21.8	20.7	1850	0.81	5.7	-8.7	-71.1	-4.7	0.088%	-3.0	0.057%	
06/11/03	16	18.1	23.5	1890	0.94	5.73	-8.9	-71.7	-4.9	0.097%	-2.0	0.047%	

Chorsin	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	Br	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	HCO_3 (calc)	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
26/10/2001							0.10	11.16	34.27	23.53	3.23	19.57	0.08		0.24	3.16		0.22		8.10	n.d.	246	1.92	212.49
05/12/2001			0.68					3.82	3.94	5.05	1.14	8.56			n.d.	n.d.		n.d.		n.d.	n.d.			
22/01/2002		0.36					0.10	11.06	35.57	24.17	3.12	19.69			0.40	4.44		0.69		8.75	n.d.	249	1.77	220.20
01/03/2002			0.47			traces		3.33	0.57	2.92	0.42	2.00			0.04	1.67		1.23		2.34	20	11	4.02	17.93
26/03/2002							0.10	10.88	33.34	24.09	2.99	23.00	1.04		0.28	3.99		0.39		9.82	320	267	-1.63	220.57
24/04/2002		0.57				0.41	0.12	18.53	37.19	24.34	6.15	45.81	0.42		0.22	9.91				9.22	n.d.	346	2.38	307.59
13/06/2002							0.10	11.45	35.58	24.51	3.47	25.59	0.11		0.24	2.59		0.26		7.95	270	288	-0.83	233.00
23/07/2002		**0.61**	**12.00**					**12.51**	**33.41**	**24.62**	**5.42**	**80.74**	**0.30**		**0.37**	**20.57**		**1.42**		**11.86**	**400**	**396**	**3.62**	**599.98**
29/08/2002		**0.63**	**1.29**			**0.09**		**13.06**	**33.61**	**23.55**	**6.03**	**82.70**	**0.30**		**0.29**	**1.62**		**0.74**		**7.13**	**n.d.**	**463**	**-0.77**	**373.27**
17/10/2002		0.30				0.11		7.45	16.24	13.51	3.90	43.98	0.16		0.14	1.42		0.44		4.20	150	228	1.10	195.09
20/03/2003								3.73	5.13	4.35	4.90	12.81			0.05	1.01		0.55		3.04	45	82	-3.51	65.50
25/03/2003								5.28	7.89	5.81	5.50	17.91			0.10	1.38		0.48		3.33	70	95	6.54	91.88
09/04/2003		**0.34**						**10.04**	**26.55**	**17.75**	**6.83**	**59.12**			**0.25**	**1.56**		**1.44**		**6.43**	**270**	**304**	**5.12**	**434.24**
29/04/2003		**0.41**						**10.85**	**31.25**	**20.70**	**7.14**	**69.13**	**0.29**		**0.30**	**2.46**		**0.40**		**7.54**	**380**	**410**	**-1.99**	**326.33**
26/06/2003		**0.39**	**3.30**					**10.74**	**31.26**	**20.76**	**7.11**	**68.95**	**0.29**		**0.31**	**5.39**		**0.72**		**7.57**	**420**	**425**	**-3.57**	**332.42**
21/07/2003	**0.09**	**0.63**	**22.90**					**11.16**	**33.28**	**23.47**	**3.05**	**74.35**	**0.29**		**0.29**	**3.46**		**1.46**		**7.09**	**420**	**425**	**4.04**	**370.48**
29/08/2003	**0.69**	**0.76**	**10.11**		**0.37**	**0.21**	**0.14**	**10.73**	**35.46**	**23.70**	**2.75**	**80.00**	**0.33**		**0.34**	**2.26**		**1.47**		**7.24**	**410**	**432**	**4.23**	**379.31**
16/09/2003		**0.68**	**26.26**		**1.24**			**11.69**	**35.92**	**25.28**	**3.03**	**79.94**	**0.32**		**0.33**	**1.69**				**7.20**	**420**	**476**	**2.94**	**397.40**
06/11/2003	0.13	0.17	7.67			traces	traces	3.98	8.81	8.81	1.65	19.78	0.09	traces	0.10	1.69		0.60		3.17	120	125	1.63	106.11

Moingt	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	Br	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	HCO_3 (calc)	CO_3 (calc)	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
20/09/2001					0.33	0.31	5.90	1089.44	77.13	24.33	111.73	4.40	1.28		1.23	106.50	0.39	2.17		12.28	n.d.	3010		8.70	1626.70
26/10/2001						0.23	5.19	924.51	71.03	23.47	101.68	3.76	1.13		1.35	124.63	0.46	16.59		35.27	n.d.	2850		-11.15	1168.20
05/12/2001						0.31	5.33	982.65	69.40	23.63	104.28	4.21	1.24		1.20	108.43	0.35	1.37		27.87	n.d.	3200		0.45	1490.45
01/03/2002						0.29	5.69	1028.50	72.46	23.99	107.64	4.07	1.21		1.21	111.35		2.67		22.58	3050	3010		5.62	1552.49
26/03/2002						0.31	5.85	1083.19	72.62	24.06	110.77	3.75	1.26		1.22	104.75	0.36	0.66		22.31	3050	2890	1.8	9.80	1602.02
24/04/2002						0.35	5.57	933.16	72.90	23.53	104.22	3.69	1.27		1.26	108.85	0.38	0.94		20.91	3350	3200	1.2	-0.94	1449.42
13/06/2002						0.31	5.35	927.03	70.68	23.63	102.01	4.60	1.22		1.26	109.42	0.19	0.37		24.32	2830	2970	1.7	1.83	1436.52
23/07/2002		**0.26**				**1.79**	**4.63**	**871.07**	**74.38**	**22.71**	**90.72**	**114.16**	**2.82**		**1.29**	**111.22**	**0.36**	**1.44**		**25.68**	**2660**	**2750**	**1.2**	**7.45**	**1660.92**
17/10/2002		**0.22**	**0.24**			**1.53**	**5.25**	**918.08**	**73.22**	**23.88**	**90.11**	**108.11**	**2.90**		**1.27**	**105.14**	**0.37**	**2.03**		**16.52**	**2940**	**3080**	**2.3**	**4.46**	**1681.10**
04/02/2003		**0.19**				**1.49**	**5.28**	**993.65**	**71.73**	**22.93**	**100.42**	**102.30**	**2.79**		**1.32**	**110.66**	**0.37**	**2.10**		**22.87**	**2745**	**2975**	**1.4**	**8.42**	**1753.98**
20/03/2003						0.76	5.13	1107.73	74.27	22.31	84.52	31.89	2.03		1.24	110.03	0.08	0.98		23.85	n.d.	3630	0.8	0.02	1680.95
29/04/2003						0.80	5.42	1008.16	77.40	22.59	88.14	32.27	2.13		1.41	107.59	0.33	1.61		16.23	3510	3630	1.9	-2.83	1593.28
26/06/2003						**1.69**	**5.34**	**1014.04**	**69.07**	**20.00**	**95.29**	**96.64**	**2.80**		**1.46**	**107.11**	**0.40**	**1.57**		**12.68**	**3610**	**3650**	**12.2**	**-0.91**	**1735.31**
21/07/2003	**0.88**		**4.38**		**0.41**	**1.84**	**4.05**	**793.54**	**61.13**	**19.87**	**81.71**	**90.81**	**2.53**	**traces**	**1.10**	**79.69**	**0.28**	**3.44**		**9.39**	**2960**	**3040**	**0.8**	**-1.90**	**1435.98**
29/08/2003			**0.70**		**0.35**	**1.60**	**4.93**	**1109.84**	**73.69**	**21.98**	**90.26**	**89.36**	**2.67**		**1.37**	**103.94**	**0.44**	**1.57**		**16.48**	**3355**	**3440**	**1.1**	**5.16**	**1831.46**
06/11/2003			**0.58**			**1.83**	**4.47**	**908.12**	**64.95**	**21.00**	**87.51**	**94.90**	**2.72**		**1.41**	**103.73**	**0.38**	**1.74**		**18.46**	**3225**	**3340**	**1.7**	**-1.59**	**1602.64**

Montrond	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	Br	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	HCO_3 (calc)	CO_3 (calc)	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
01/07/2001			0.20			0.50	2.96	678.70	7.12	13.73	5.41	3.09	0.35		1.18	22.62		0.27	0.53	7.59	n.d.	1798		4.78	761.69
26/10/2001					0.31	0.49	3.79	683.97	8.57	16.06	6.49	3.67	0.38		1.13	22.61		0.30	0.37	7.19	n.d.	1821		5.98	777.47
26/03/2002						0.46	3.42	644.80	7.96	15.08	5.53	5.15	0.38		1.24	22.08		0.47		7.26	1715	1640	2.1	7.85	736.63
24/04/2002						0.36	2.79	514.88	8.87	14.69	5.15	4.35	0.32		0.98	26.33		8.91		12.71	1340	1300	1.5	7.61	620.78
13/06/2002					0.34	0.55	3.62	695.40	8.62	15.52	6.19	4.44	0.39		1.20	24.21		1.13		7.81	1700	1780	1.6	7.40	792.45
23/07/2002						0.81	3.21	636.88	8.25	14.41	7.32	18.84	0.53		1.18	23.88		0.19		7.41	1700	1690	3.1	-15.80	493.84
21/08/2002					0.23	0.79	3.27	661.05	8.36	14.60	7.89	19.86	0.53		1.16	24.76		0.79	0.35	7.69	1745	1810	2.8	5.01	796.86
17/10/2002					0.17	0.82	3.43	665.46	8.99	16.02	7.96	21.36	0.53		1.09	23.30				7.14	1735	1840	1.1	5.11	805.96
19/11/2002						0.51	3.82	722.96	9.14	15.68	6.41	3.46	0.39		1.14	24.35		0.61	0.23	7.18	1720	1840	0.8	7.82	819.13
19/11/2002*					0.32	0.54	3.77	621.84	9.03	15.41	6.50	4.73	0.40		1.15	23.61		0.36	0.28	7.58	n.d.	1660		6.47	720.15
25/03/2003*						0.79	3.54	852.17	10.36	14.95	9.10	19.69	0.59		1.17	24.76		0.11	0.18	7.83	1920	2040	0.6	10.75	995.90
24/04/2003*						0.91	3.64	792.21	9.27	13.87	9.98	17.33	0.56		1.15	25.16		0.38	0.12	7.39	2365	2490	2.7	-2.24	926.16
26/06/2003*						1.02	3.73	847.60	10.39	14.53	9.48	19.43	0.59		1.11	25.08				7.99	2400	2450	0.6	1.89	990.68
21/07/2003*			0.50		0.49	1.20	3.51	843.78	9.26	14.88	5.63	18.41	0.56		1.13	24.72		0.45	0.16	7.67	2310	2340	0.8	3.41	977.97
29/08/2003*			0.15			0.99	3.56	865.22	9.40	15.09	5.53	18.39	0.55		1.13	24.50		0.34	0.49	6.96	2265	2330	0.7	4.80	998.65
06/11/2003*	0.25		0.26			1.05	3.64	790.64	9.20	14.95	7.45	18.36	0.55		1.11	24.81		0.19	0.31	7.15	2210	2330	1.0	0.99	925.61

*** : prélèvement à la fontaine extérieure**

Salt en Donzy	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	Br	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	HCO_3 (calc)	CO_3 (calc)	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
20/09/2001					0.14	0.14	0.86	210.83	1.23	11.74	6.83	8.51	0.21		n.d.	n.d.		n.d.		n.d.	n.d.				
26/03/2002						0.13	0.83	220.13	0.80	11.21	5.61	9.10	0.21		9.40	104.68		0.64		25.00	500	420	3.0	0.51	387.74
24/04/2002					0.29	0.24	0.81	215.76	0.79	10.91	5.64	7.65	0.21		n.d.	n.d.		n.d.		n.d.	500				
23/07/2002						0.20	0.73	230.43	0.70	11.33	8.16	18.62	0.20		9.00	105.24	0.32	1.45		26.25	370	500	3.7	-1.56	425.80
17/10/2002					0.14	0.18	0.75	227.22	0.81	11.50	6.74	15.49	0.21		8.94	107.67	0.46	1.04		25.65	400	430	2.0	2.20	416.62
20/03/2003							0.72	220.69	0.88	5.89	10.36	8.92			9.35	104.93		4.45		27.08	390	420	3.4	0.08	393.27
29/04/2003							0.72	238.12	0.45	8.56	8.03	5.62	0.19		9.18	109.07	0.36	1.20		25.07	475	405	0.7	3.74	406.57
26/06/2003							0.74	226.43	0.46	8.33	8.68	5.54	0.19		9.17	106.72	0.49	0.60		26.23	500	490	2.6	-4.48	393.58
21/07/2003			0.22		0.33	0.31	0.73	235.76	0.22	9.15	4.78	6.24	0.20		9.20	105.51	0.40	0.74		24.04	480	490	2.6	-2.73	397.79
29/08/2003						0.24	0.74	241.11	0.38	9.53	4.84	6.55	0.20		9.12	106.72	0.56	1.83		25.00	520	505	2.3	-2.83	406.81
06/11/2003						0.18	0.70	218.93	0.78	10.83	7.35	8.04	0.20		9.01	104.43	0.69	0.28		25.10	460	460	3.8	-3.28	386.52

Sail/Couzan	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	Br	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	HCO_3 (calc)	CO_3 (calc)	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
26/10/2001							4.25	592.13	65.14	19.49	154.63	1.64	0.09		2.80	68.87	0.19	1.13		47.28	n.d.	2000		4.68	1091.34
05/12/2001							4.26	611.72	65.28	19.55	153.53	1.30			1.99	48.39	0.10	7.83		35.77	n.d.	2000		6.78	1090.43
22/01/2002							4.31	569.72	64.75	19.53	156.90	1.84	0.12		2.75	76.65	0.18	2.24		47.82	n.d.	2000		3.22	1079.49
01/03/2002							4.34	617.65	65.98	19.79	156.82	0.94			2.97	75.50	0.21	1.23		51.26	2290	2100	0.7	3.66	1128.95
26/03/2002							4.65	644.51	63.85	20.04	168.95	2.67	0.20		2.83	65.45	0.21	0.24		46.38	2290	2050	0.4	7.36	1152.58
24/04/2002							n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		n.d.	2135				
16/11/2002	0.11		2.34		0.14	0.27	4.06	553.18	65.81	20.46	139.55	89.27	1.82		2.94	63.59		2.57	3.16	42.95	1830	2100	0.4	5.53	1261.43
18/02/2003							4.05	596.55	60.39	16.85	131.82	19.99	1.10		2.95	61.56	0.26	1.03		43.20	1960	2060	0.3	3.65	1091.74
20/03/2003							4.10	615.14	65.24	17.17	131.78	87.12	1.81		2.98	63.38	0.21	1.30		45.02	1960	2100	0.9	8.15	1298.55
09/04/2003							4.05	592.01	59.75	15.97	134.65	80.19	1.70		2.98	62.96	0.75	2.06		44.46	2000	2120	0.3	5.68	1241.27
09/07/2003			1.97				4.27	651.76	69.68	18.37	128.31	94.36	1.88		2.94	62.89	0.15	3.61		42.55	2505	2560	0.3	1.76	1369.39
16/09/2003			2.67			0.20	3.98	660.37	65.31	18.36	142.13	88.61	1.79		2.74	65.13	0.38	1.15	0.98	43.39	2190	2220	13.8	7.58	1363.93
06/11/2003	0.18		1.64			0.16	3.97	583.48	58.80	17.65	154.10	80.90	1.71		2.87	61.53	0.25	0.20		41.54	2310	2380	0.7	0.56	1249.25
11/02/2004			1.27			0.10	3.96	635.46	61.94	18.01	139.33	18.30	1.16		2.89	61.86	0.14	0.07		42.47	2265	2350	0.6	-0.10	1140.66
15/03/2004	0.33		1.96			0.13	3.78	606.56	61.16	17.66	133.77	81.92	1.66		2.89	67.69		0.71	0.42	45.59	2135	2230	0.5	3.90	1271.31

Saint Alban	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	Br	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	HCO_3 (calc)	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
29/03/2002						0.51	2.14	217.67	56.52	22.56	34.71	7.69	0.97		1.96	24.22	0.11	0.30		10.11	n.d.	1130	-5.30	524.15
24/04/2002					0.12	0.50	2.16	234.66	54.99	22.76	35.65	6.43	0.94		1.82	21.60	0.09	0.28		8.95	1525	1200	-6.23	530.69
13/06/2002						0.56	2.10	220.81	53.14	22.37	34.71	9.08	0.96		2.11	27.50	0.12	0.54		11.66	1265	1190	-8.40	523.12
23/07/2002		0.94			0.44	1.46	1.77	225.09	52.49	19.01	32.06	188.96	1.66		2.25	19.72	0.89	0.56		7.85	1265	1390	5.15	962.66
17/10/2002		0.86	0.33			1.39	1.73	214.97	50.37	18.11	31.24	177.25	1.66		1.86	19.90	0.06	0.09	0.09	8.34	1220	1310	5.63	912.63
04/02/2003		0.96	0.31			1.54	2.08	254.55	56.96	21.49	33.69	194.16	1.76		2.18	19.54	0.18	0.25	0.79	8.17	1310	1500	5.69	1024.75
08/02/2003		0.92				1.46	2.06	211.85	54.89	21.77	33.81	185.26	1.68		2.28	19.77	0.06	0.31		9.20	1310	1380	5.05	952.38
20/03/2003						0.96	1.84	233.58	53.33	19.85	28.17	65.27	1.38		1.88	20.03		0.30		9.23	1220	1230	-1.48	659.38
26/04/2003						1.18	1.92	227.94	53.75	19.89	31.85	66.52	1.43		2.29	20.30	0.01	0.32	0.06	8.29	1525	1340	-5.53	662.80
09/07/2003		0.81	2.68			1.64	2.06	249.06	55.28	19.99	35.79	193.06	1.67		2.25	19.64	0.05	0.18	0.21	8.22	1570	1620	1.40	1012.89
21/07/2003		1.04	3.22		0.47	1.89	1.88	243.30	54.56	20.71	30.62	189.88	1.69		2.19	19.65	0.06	0.05		7.63	1655	1660	-1.11	993.37
29/08/2003	0.52	1.10	3.07			2.00	1.93	238.74	55.90	21.29	31.21	197.85	1.76		2.14	19.55	0.06	0.13	0.03	7.64	1480	1540	3.22	1014.28
06/11/2003			2.44			1.06	1.81	217.90	48.37	19.95	29.61	33.57	1.19		2.29	19.64	0.05	0.19		7.90	1375	1370	-13.30	550.66

Saint Galmier	Al	Mn	Fe	Cu	As	Ba	Li	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	Ti	F	Cl	Br	NO_3	$P0_4$	SO_4	HCO_3	HCO_3 (calc)	bal. ion. (%)	TDS (mg/l)
26/10/2001							0.93	164.89	89.07	14.88	11.78	6.19	0.13		0.93	52.86	0.07	7.16		42.15	n.d.			
22/01/2002							0.93	164.06	89.33	15.11	9.51	3.12			0.76	47.25		6.83		35.24	n.d.	1200	-16.11	575.27
01/03/2002							0.96	169.20	88.79	15.22	8.68	3.36			0.72	51.90	0.13	6.86		38.09	1335	1134	-13.46	584.29
26/03/2002							0.97	169.73	87.49	14.59	11.58	6.59	0.22		0.84	47.03	0.03	5.98		34.90	1335	1053	-9.19	583.95
24/04/2002							0.94	164.90	87.80	15.07	7.72	3.68			0.77	49.70	0.03	6.30		37.36	1220	1039	-10.37	573.14
09/07/2002							0.90	152.01	83.17	13.42	11.98	167.40	1.28		0.86	43.59	0.06	5.54		31.38	1045	1180	3.79	947.79
21/08/2002							0.77	124.09	78.15	12.42	11.51	41.23	0.63		0.82	63.46	0.10	5.67		46.20	1000	1007	-12.90	610.79
14/09/2002							0.86	145.52	87.13	14.54	13.16	192.72	0.83		1.34	53.83	0.07	6.55		40.36	n.d.	1170	5.66	1035.21
17/10/2002			0.30				0.70	123.37	68.67	11.32	10.11	144.16	0.94		0.86	49.18	0.13	6.07		35.71	1105	1094	-2.56	814.47
08/02/2003							1.03	179.20	102.70	15.17	2.41	143.75	0.10		1.12	46.00	0.08	5.24		32.04	1090	1135	8.40	977.48
27/02/2003	1.15		3.88				0.99	165.31	90.34	19.15	15.77	31.84	0.90	0.50	1.26	46.21	0.05	5.45		32.74	1090	1113	-6.89	665.21
25/03/2003							0.90	157.43	87.86	12.64	12.64	161.69	0.88		1.26	46.38	0.08	5.87		33.58	960	1200	3.42	959.11
26/04/2003							0.89	148.51	83.31	12.05	13.08	137.18	0.91		1.31	48.52	0.07	6.15		35.45	1335	1309	-5.16	876.26
26/06/2003							0.93	158.48	90.30	13.00	11.88	184.53			1.16	45.75	0.06	5.89		33.42	1350	1330	1.69	1023.63
22/07/2003							0.92	159.06	89.09	13.81	5.49	178.95			1.06	46.00	0.09	6.43		33.31	1310	1309	1.32	1001.16
29/08/2003			0.72				0.94	158.86	87.39	13.75	10.34	178.41	1.33		1.31	46.89	0.10	5.92		33.42	1265	1268	2.74	1001.23
06/11/2003	0.51		0.15			0.02	0.90	148.33	82.23	14.01	9.87	169.26		0.01	1.15	46.03	0.12	5.87		33.25	1265	1233	1.00	947.25

Tab. A.4.3 : analyses eaux minérales à balance ionique <5% ; les PCO2 calculées sont également indiquées

Libellé	TDS	T°C	pH	µS/cm	Ca	Mg	Na	K	Fe(III)	Mn	Sr	HCO_3	CO_3	Cl	SO_4	PO_4	NO_3	F	Br	SiO_2	$\delta^{18}O$	$\delta^{13}C$	$\delta^{2}H$	p_{CO2} éq.[atm]
Mon1_3.5	448				>60	>10	<40	<5				>210		<40	<60		20							0.0208
Mon1_22	362	14.9	8.55	460	<9	<5	<100	<2				>210	>10	<10	20		<0.5				-7.6	-13	-57	0.00053
Mon1_25	363	14.9	8.55	460	>6	>4	<100	<2				<200	>10	<10	>20		<0.5				-7.7	-13	-57	0.00053
Mon1_31			8.69	456																	-13	-58		
Mon1_43	675				<3	1	200	>1				<400	>40	<20	>10		<0.5							0.03917
Mon1_46	630	14	8.6	800	<2	<1	<200	>1				<370	>40	<15	>10		<0.5				-8.3	-7.8	-64	0.00078
Mon1_60			8.6	809																	-7.5	-65		
Mon1_172	1537				3	<10	>400	<20				<1000	>70	>10	>5		<0.5							0.09423
Mon1_180				1710																		-72		
Mon1_186	1585	22.9	8.7	1731	>2	<2	<500	>4				<1050	<50	>15	<10		<0.5				-9.8	-5.9	-72	0.00191
Mon1_192	1773	22.7	8.72	1907	>3	>1	>500	>2				<1200	>50	>15	>5		<0.5				-9.7	-5.6	-72	0.00203
Mon1_198	1745	22.5	8.69	1800	<4	>1	500	>2				>1150	>50	20	>5		<0.5				-9.6	-5.5	-72	0.00215

Chorsin	TDS	T°C	pH	µS/cm	Ca	Mg	Na	K	Fe(III)	Mn	Sr	HCO_3	CO_3	Cl	SO_4	PO_4	NO_3	F	Br	SiO_2	$\delta^{18}O$	$\delta^{13}C$	$\delta^{2}H$	p_{CO2} éq.[atm]
23/07/2002	600	14.2	5.34	746	80.7	33.4	12.5	5.42	12	0.61	0.29	396		20.6	11.9		1.41	0.36		24.6	-9.5	-4.2	-70	1.51002
29/08/2002	634	13.4	5.7	633	82.7	33.6	13.1	6.03	1.29	0.63	0.3	463		1.62	7.13		0.74	0.28		23.6	-9.4	-4.7	-67	0.76422
09/04/2003	440	5.1	5.16	489	59.1	26.6	10	6.83		0.33		310		1.55	6.42		1.44	0.25		17.8	-9.7	-7.5	-70	1.6279
29/04/2003	560	9.4	5.31	610	69.1	31.3	10.9	7.14		0.4	0.28	410		2.45	7.54		0.39	0.29		20.7	-9.6	-5.2	-71	1.58895
26/06/2003	582	15.4	5.59	653	69	31.3	10.7	7.11	3.3	0.39	0.28	425		5.39	7.57		0.72	0.31		20.8	-9.7	-4.4	-68	0.93196
21/07/2003	606	15.9	5.41	631	74.3	33.3	11.2	3.05	22.9	0.63	0.29	425		3.45	7.09		1.45	0.29		23.5	-9.5	-4.8	-70	1.40918
29/08/2003	607	15.2	5.25	650	80	35.5	10.7	2.75	10.1	0.76	0.33	432		2.26	7.24		1.47	0.34		23.7	-9.5	-5.2	-75	2.0549
16/09/2003	668	11.8	6.27	672	79.9	35.9	11.7	3.02	26.3	0.68	0.32	476		1.69	7.2			0.33		25.3	-9.5	-4.8	-69	0.2055

Moingt	TDS	T°C	pH	µS/cm	Ca	Mg	Na	K	Fe(III)	Mn	Sr	HCO_3	CO_3	Cl	SO_4	PO_4	NO_3	F	Br	SiO_2	$\delta^{18}O$	$\delta^{13}C$	$\delta^{2}H$	p_{CO2} éq.[atm]
23/07/2002	4267	16.7	6.06	4400	114	74.4	871	90.7		0.25	2.82	2950	1.2	111	25.7		1.44	1.29	0.35	22.7	-9.3	-2.8	-64	2.02359
17/10/2002	4424	15.4	6.54	4510	108	73.2	918	90.1	0.24	0.21	2.9	3080	2.3	105	16.5		2.03	1.27	0.37	23.9	-9.5	-3	-66	0.68576
04/02/2003	4633	12.9	6.38	4340	102	71.7	994	100		0.19	2.79	3200	1.4	111	22.9		2.1	1.31	0.37	22.9	-9.7	-3.9	-67	0.99233
26/06/2003	5083	16.4	6.46	4690	96.6	69.1	1014	95.3			2.8	3650	12.2	107	12.7		1.57	1.46	0.4	20	-9.7	-3.3	-73	0.984
21/07/2003	4189	17.4	6.3	3760	90.8	61.1	794	81.7	4.38		2.53	3040	0.8	79.7	9.39		3.44	1.1	0.28	19.9	-8.4	-3.4	-64	1.21763
29/08/2003	4975	16.7	6.24	4510	89.4	75.7	1110	90.3	0.7		2.67	3460	1.1	104	16.5		1.57	1.37	0.44	22	-9.6	-3.9	-71	1.55402
06/11/2003	4647	14.6	6.24	4500	94.9	65	908	87.5	0.58		2.72	3340	1.7	104	18.5		1.74	1.41	0.38	21	-9.6	-3.7	-68	1.4665

Tab. A.4.3 : analyses eaux minérales à balance ionique <5% ; les PCO2 calculées sont également indiquées

Montrond	TDS	T°C	pH	µS/cm	Ca	Mg	Na	K	Fe(III)	Mn	Sr	HCO_3	CO_3	Cl	SO_4	PO_4	NO_3	F	Br	SiO_2	$\delta^{18}O$	$\delta^{13}C$	$\delta^{2}H$	p_{CO2} éq.[atm]
23/07/2002	1749	26.3	6.68	2800	18.8	8.25	364	7.32			0.53	1300	3.1	23.9	7.41		0.18	1.18		14.4	-10	-5.3	-71	0.26261
21/08/2002	2560	24.8		2890	19.9	8.36	661	7.88			0.53	1810	2.8	24.8	7.69	0.35	0.78	1.15		14.6	-10	-4.1	-70	0.16714
17/10/2002	2603	23.8	6.87	2940	21.4	8.99	665	7.96			0.53	1850	1.1	23.3	7.14			1.09		16	-9.9	-4.4	-69	0.22676
25/03/2003	3242	23.4	6.33	3010	19.7	10.4	852	9.1			0.59	2300	0.6	24.8	7.83	0.17	0.1	1.7		15	-10	-4.8	-80	0.95879
24/04/2003	3370	24.4	6.33	3040	17.3	9.27	792	9.98			0.56	2490	2.7	25.2	7.39	0.12	0.38	1.15		13.9	-10	-4.6	-75	1.05381
26/06/2003	3387	25.9	6.44	3100	19.4	10.4	848	9.48			0.58	2450	0.6	25.1	7.99			1.11		14.5	-10	-4.1	-80	0.82253
21/07/2003	3268	24.6	6.3	2960	18.4	9.26	844	5.63	0.5		0.56	2340	0.8	24.7	7.66	0.16	0.45	1.13		14.9	-10	-4.6	-76	1.06464
29/08/2003	3278	25.8	6.21	3000	18.4	9.4	865	5.52	0.15		0.54	2330	0.7	24.5	6.96	0.49	0.34	1.13		15.1	-9.9	-4.8	-76	1.32793
06/11/2003	3206	23.2	6.23	3060	18.4	9.2	791	7.45	0.26		0.54	2330	1	24.8	7.14	0.31	0.18	1.11		15	-10	-4.5	75.7	1.22152

Salt en Donzy	TDS	T°C	pH	µS/cm	Ca	Mg	Na	K	Fe(III)	Mn	Sr	HCO_3	CO_3	Cl	SO_4	PO_4	NO_3	F	Br	SiO_2	$\delta^{18}O$	$\delta^{13}C$	$\delta^{2}H$	p_{CO2} éq.[atm]
26/03/2002	810	29.9	7.84	1144	9.1	0.8	220	5.61			0.21	420	3	105	25		0.64	9.4		11.2	-9.4	-12	-62	0.00639
23/07/2002	915	29.6	8.29	1160	18.6	0.7	230	8.16			0.2	500	3.7	105	26.3		1.44	8.99	0.32	11.3	-8.7	-12	-64	0.00267
17/10/2002	838	29.9	8.01	1160	15.5	0.81	228	6.74			0.2	430	2	108	25.6		1.04	8.94	0.46	11.5	-8.8	-12	-65	0.00442
20/03/2003	816	16.7	7.56	1110	8.92	0.88	221	10.4				420	3.4	105	27.1		4.45	9.35		5.89	-8.6	-11	-63	0.01001
29/04/2003	812	29.4	7.56	1160	5.62	0.45	238	8.03			0.19	405	0.7	109	25.1		1.2	9.18	0.36	8.56	-8.8	-13	-65	0.01165
26/06/2003	885	30.3	7.82	1152	5.54	0.46	226	8.68			0.19	490	2.6	107	26.2		0.61	9.17	0.49	8.33	-9	-12	-65	0.00785
21/07/2003	889	29.5	7.56	1149	6.23	0.22	236	4.78	0.22		0.2	490	2.6	106	24		0.73	9.2	0.4	9.15	-8.9	-12	-65	0.01409
29/08/2003	913	29.5	7.47	1180	6.55	0.38	241	4.84			0.2	505	2.3	107	25		1.83	9.12	0.56	9.53	-9	-12	-66	0.01785
06/11/2003	849	27.4	7.35	1170	8.04	0.78	219	7.35			0.2	460	3.8	104	25.1		0.28	9.01	0.69	10.8	-8.9	-12	-66	0.02079

Sail/Couzan	TDS	T°C	pH	µS/cm	Ca	Mg	Na	K	Fe(III)	Mn	Sr	HCO_3	CO_3	Cl	SO_4	PO_4	NO_3	F	Br	SiO_2	$\delta^{18}O$	$\delta^{13}C$	$\delta^{2}H$	p_{CO2} éq.[atm]
16/11/2002	3128	15.4	6.4	3120	89.3	65.8	553	140	2.34		1.81	2140	0.4	63.6	42.9	3.16	2.57	2.94		20.5	-9.3	-3.6	-63	0.67217
18/02/2003	2996				20	60.4	597	132			1.1	2060	0.3	61.6	43.2		1.03	2.95	0.26	16.9	-9.5	-6.9	-63	0.18831
20/03/2003	3282	15.5	5.99	3220	87.1	65.2	615	132			1.81	2250	0.9	63.4	45		1.3	2.98	0.2	17.2	-9.6	-4	-66	1.81445
09/04/2003	3158	15.5	6.01	3400	80.2	59.8	592	135			1.7	2160	0.3	63	44.5		2.06	2.98	0.75	16	-9.5	-3.5	-66	1.66854
09/07/2003	3639	16.6	6.09	3210	94.4	69.7	652	128	1.97		1.88	2560	0.3	62.9	42.6		3.61	2.94	0.15	18.4	-9.5	-3.5	-68	1.65557
16/09/2003	3457	15	6.07	3230	88.6	65.3	660	142	2.67		1.79	2350	13.8	65.1	43.4	0.98	1.15	2.74	0.38	18.4	-9.3	-3.8	-67	1.55937
06/11/2003	3385	14.8	5.98	3240	80.9	58.8	583	154	1.64		1.71	2380	0.7	61.5	41.5		0.19	2.87	0.25	17.7	-9.7	-2.4	-68	1.9456
15/03/2004	3252	14.7	6.22	3140	81.9	61.2	607	134	1.96		1.66	2230	0.5	67.7	45.6	0.42	0.71	2.89		17.7	-9.6	-5		1.0484

Tab. A.4.3 : analyses eaux minérales à balance ionique <5% ; les PCO2 calculées sont également indiquées

St Alban	TDS	T°C	pH	µS/cm	Ca	Mg	Na	K	Fe(III)	Mn	Sr	HCO_3	CO_3	Cl	SO_4	PO_4	NO_3	F	Br	SiO_2	$\delta^{18}O$	$\delta^{13}C$	$\delta^{2}H$	p_{CO2} éq.[atm]
23/07/2002	1951	20.2	6.11	1904	189	52.5	225	32.1		0.94	1.66	1400		19.7	7.85		0.56	2.25	0.89	19	-8.8	-6	-62	0.93736
17/10/2002	1865	18.5	6.39	1939	177	50.4	215	31.2	0.32	0.85	1.66	1340		19.9	8.33	0.09	0.08	1.86	0.06	18.1	-8.6	-5.1	-60	0.46073
04/02/2003	2120	27.8	6.11	2180	194	57	255	33.7	0.31	0.96	1.76	1525		19.5	8.17	0.79	0.25	2.18	0.18	21.5	-9	-5.2	-62	1.14151
08/02/2003	1932	19.8	5.9	1940	185	54.9	212	33.8		0.92	1.68	1390		19.8	9.2		0.31	2.28	0.06	21.8	-8.9	-5.6	-64	1.50148
09/07/2003	2209	21	5.85	1640	193	55.3	249	35.8	2.68	0.81	1.66	1620		19.6	8.22	0.21	0.18	2.25	0.05	20	-8.9	-4.8	-64	1.98608
21/07/2003	2235	22.6	5.82	1790	190	54.6	243	30.6	3.22	1.03	1.69	1660		19.6	7.63		0.47	2.19	0.06	20.7	-8.8	-4.9	-73	2.23345
29/08/2003	2120	20.8	5.78	1950	198	55.9	239	31.2	3.07	1.1	1.76	1540		19.6	7.63	0.03	0.13	2.14	0.06	21.3	-8.8	-5.2	-69	2.21403

St Galmier	TDS	T°C	pH	µS/cm	Ca	Mg	Na	K	Fe(III)	Mn	Sr	HCO_3	CO_3	Cl	SO_4	PO_4	NO_3	F	Br	SiO_2	$\delta^{18}O$	$\delta^{13}C$	$\delta^{2}H$	p_{CO2} éq.[atm]
09/07/2002	1691				167	83.2	152	12			1.28	1180		43.6	31.4		5.53	0.86	0.06	13.4	-8.6	-5.8	-60	0.1097
14/09/2002	1756				193	87.1	146	13.2			0.83	1200		53.8	40.4		6.54	1.34	0.07	14.5	-8.4	-5.2	-61	0.11115
17/10/2002	1545	18.3	6.14	1870	144	68.7	123	10.1	0.29		0.94	1094		49.2	35.7		6.07	0.86	0.13	11.3	-8.5	-4.3	-59	0.67196
08/02/2003	1758	16.1	5.86	1710	144	103	179	2.41			0.1	1230		46	32		5.24	1.11	0.08	15.2	-8.8	-5.2	-63	1.38184
25/03/2003	1720	17.3	5.8	1880	162	87.9	157	12.6			0.87	1200		46.4	33.6		5.87	1.26	0.08	12.6	-8.7	-5.3		1.57669
26/04/2003	1777	18.6	5.78	1732	137	83.3	149	13.1			0.91	1290		48.5	35.5		6.15	1.31	0.07	12.1	-8.6	-5.3	-70	1.81143
26/06/2003	1874	21.5	5.92	1780	185	90.3	158	11.9				1330		45.8	33.4		5.88	1.16	0.06	13	-8.9	-3.6	-65	1.40236
22/07/2003	1842	21.3	5.76	1790	179	89.1	159	5.49				1309		46	33.3		6.43	1.06	0.09	13.8	-8.9	-4.7	-75	1.99138
29/08/2003	1806	21.8	5.7	1850	178	87.4	159	10.3	0.72		1.33	1268		46.9	33.4		5.92	1.31	0.1	13.8	-8.7	-4.7	-71	2.23272
06/11/2003	1743	18.1	5.73	1890	169	82.2	148	9.87	0.15			1233		46	33.3		5.87	1.15	0.12	14	-8.9	-4.9	-72	1.92536

moyenne	T°C	pH	µS/cm	Ca	Mg	Na	K	Fe(III)	Mn	Sr	HCO_3	CO_3	Cl	SO_4	PO_4	NO_3	F	Br	SiO_2	$\delta^{18}O$	$\delta^{13}C$	$\delta^{2}H$	p_{CO2} éq.[atm]
Rochetaillée	12.5	6.38	53.1	3.13	1.04	3.29	0.63				3.81		3.31	7.88		3.06	0.06		6.22	-9.4	-17	-61	0.00141
Essertines dauphin	12.9	5.59	68.9	6.36	1.66	5.14	2.43				2.29		5.51	8.61		19.2			5.32	-9.1	-21	-62	0.0052
Essertines	12.2	6	62.3	5.52	1.09	4.49	1				7.63		2.75	8.36		9.59	0.07		5.86	-9.4	-20	-63	0.0067
Barbanche	10.4	5.12	133.9	7.24	2.43	11.6	2.23				3.05		28.3	5.86		10.7			4.75	-9.9	-24	-64	0.01967
Bessat	9.1	5.83	42.7	3.2	1.17	5.94	1.66				5.34		7.98	5.23		11.4	0.07		6.43	-10	-21	-65	0.00669
Tarentaise	12.1	5.38	226.7	8.67	1.32	32.6	2.33				0.76		58.4	12		9.4	0.11		4.38	-9.6	-21	-63	0.00272
Chavagneux	13.05	5.8	137	14.3	2.17	6.35	0.65				14.5		8.5	19.5		0.15	0.26		4.75	-7.4		-52	0.02013
Montarcher	11.36	6.2	90	5.08	1.13	7.61	1.23				22.5		3.31	3.38	3.78	2.37	0.05		8.89	-9.3	-19	-61	0.01231
Montarcher village	14.08	6.2	76	6.41	1.59	4.28	1.41				19.2		2.2	5.07		4.79	0.09		9.43	-9.5	-21	-63	0.01089
Sauvain	16.86	6.3	38	2.4	0.46	2.08	0.89				5.35		1.62	1.48		4.41			4.6	-9		-62	0.00253
St-Rambert	15.96	7.4	702	53	17.9	37.3	38.5			0.5	129		61.1	69.6	1.29	66	0.38		16.6	-8.2	-16	-58	0.00442
Vassalieu	12.2	5.1	164	14.1	2.52	7.41	3.93				3.05		11.7	18.5	0.3	34.3	0.07		8.96	-8.5	-22	-55	0.02092

ANNEXES CHAP 3 : MATRICES DE CORRELATION (Furan/Forez)

DOMAINE FURAN :

Matrice de corrélation Rochetaillée

	Na	Mg	Si	K	Ca	F	Cl	NO3	SO4	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	débit (l/s)	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	eh	electroneutrality (%)	TDS (mg/l)
Na	1.000	-.018	-.201	.718	-.011	-.019	.285	.484	.375	-.135	-.320	.011	-.155	.010	.256	-.311	-.287	.439	.011	-.073	.365
Mg	-.018	1.000	.594	-.040	.698	.243	.080	.076	.099	.109	.299	-.218	-.175	-.214	.011	-.406	.670	.032	-.218	.084	.367
Si	-.201	.594	1.000	-.251	.469	.033	-.346	-.558	-.432	.320	.388	-.431	-.299	-.427	.331	.045	.342	.156	-.431	.209	-.093
K	.718	-.040	-.251	1.000	-.100	-.098	.378	.555	.240	.004	-.005	.157	.203	.153	-.022	-.333	-.337	.093	.157	.023	.354
Ca	-.011	.698	.469	-.100	1.000	-.032	-.262	.014	-.125	.326	.450	.026	-.386	.028	-.045	-.272	.538	.060	.026	-.088	.077
F	-.019	.243	.033	-.098	-.032	1.000	.058	-.007	.078	-.156	-.247	-.476	.453	-.477	.329	-.058	.049	.019	-.476	-.012	.054
Cl	.285	.080	-.346	.378	-.262	.058	1.000	.748	.713	-.641	-.532	.395	-.024	.395	-.401	-.267	-.245	.200	.395	-.151	.890
NO3	.484	.076	-.558	.555	.014	-.007	.748	1.000	.707	-.468	-.461	.453	-.050	.448	-.304	-.242	-.148	.257	.453	-.327	.756
SO4	.375	.099	-.432	.240	-.125	.078	.713	.707	1.000	-.681	-.628	.225	-.024	.223	-.089	-.225	.036	.473	.225	.157	.721
T ext (°C)	-.135	.109	.320	.004	.326	-.156	-.641	-.468	-.681	1.000	.758	.007	.064	.009	-.097	.033	.250	-.361	.007	.112	-.604
T eau (°C)	-.320	.299	.388	-.005	.450	-.247	-.532	-.461	-.628	.758	1.000	.010	.144	.013	-.224	-.259	.470	-.532	.010	.252	-.441
mV	.011	-.218	-.431	.157	.026	-.476	.395	.453	.225	.007	.010	1.000	-.105	1.000	-.879	-.332	.019	-.054	1.000	-.125	.330
cond (mS)	-.155	-.175	-.299	.203	-.386	.453	-.024	-.050	-.024	.064	.144	-.105	1.000	-.107	-.041	-.166	-.054	-.273	-.105	.447	-.158
pe	.010	-.214	-.427	.153	.028	-.477	.395	.448	.223	.009	.013	1.000	-.107	1.000	-.882	-.333	.022	-.058	1.000	-.121	.332
pH	.256	.011	.331	-.022	-.045	.329	-.401	-.304	-.089	-.097	-.224	-.879	-.041	-.882	1.000	.404	-.162	.414	-.879	.088	-.287
débit (l/s)	-.311	-.406	.045	-.333	-.272	-.058	-.267	-.242	-.225	.033	-.259	-.332	-.166	-.333	.404	1.000	-.405	.073	-.332	-.100	-.323
dO (‰ VSMOW)	-.287	.670	.342	-.337	.538	.049	-.245	-.148	.036	.250	.470	.019	-.054	.022	-.162	-.405	1.000	-.051	.019	.291	-.015
dD (‰ VSMOW)	.439	.032	.156	.093	.060	.019	.200	.257	.473	-.361	-.532	-.054	-.273	-.058	.414	.073	-.051	1.000	-.054	.049	.361
eh	.011	-.218	-.431	.157	.026	-.476	.395	.453	.225	.007	.010	1.000	-.105	1.000	-.879	-.332	.019	-.054	1.000	-.125	.330
electroneutrality (%)	-.073	.084	.209	.023	-.088	-.012	-.151	-.327	.157	.112	.252	-.125	.447	-.121	.088	-.100	.291	.049	-.125	1.000	-.037
TDS (mg/l)	.365	.367	-.093	.354	.077	.054	.890	.756	.721	-.604	-.441	.330	-.158	.332	-.287	-.323	-.015	.361	.330	-.037	1.000

16 observations ont été utilisées dans ce calcul.
Cas omis (manquants).

Matrice de corrélation Essertines dauphin

	Na	Mg	Si	K	Ca	F	Cl	NO3	SO4	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	débit (l/s)	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	eh	electroneutrality (%)	TDS (mg/l)
Na	1.000	.784	.951	.997	.693	-.070	-.024	.395	-.273	.026	-.123	.362	.348	.361	-.052	-.161	-.429	.138	.362	-.346	.735
Mg	.784	1.000	.892	.795	.675	.180	.333	-.131	.239	-.031	.085	.426	.256	.418	-.363	-.024	.068	-.160	.426	-.250	.824
Si	.951	.892	1.000	.959	.698	-.037	.044	.102	-.062	.076	.105	.355	.370	.351	-.246	-.141	-.159	-.062	.355	-.271	.783
K	.997	.795	.959	1.000	.723	-.097	-.006	.360	-.254	.040	-.094	.370	.363	.368	-.070	-.125	-.394	.092	.370	-.324	.756
Ca	.693	.675	.698	.723	1.000	.013	.090	.182	-.084	.182	.086	.257	.691	.252	-.028	.322	-.098	-.206	.257	.178	.674
F	-.070	.180	-.037	-.097	.013	1.000	.439	-.099	.642	-.302	-.290	.084	.272	.089	-.132	.181	.226	.266	.084	-.254	.115
Cl	-.024	.333	.044	-.006	.090	.439	1.000	-.203	.724	-.330	-.401	.532	-.040	.535	-.298	.402	.223	.237	.532	-.511	.230
NO3	.395	-.131	.102	.360	.182	-.099	-.203	1.000	-.641	-.234	-.697	-.030	.166	-.022	.655	-.037	-.949	.719	-.030	-.336	.052
SO4	-.273	.239	-.062	-.254	-.084	.642	.724	-.641	1.000	-.277	.057	.089	.098	.091	-.381	.367	.647	-.095	.089	-.241	.169
T ext (°C)	.026	-.031	.076	.040	.182	-.302	-.330	-.234	-.277	1.000	.657	.356	.037	.347	-.364	-.034	.273	-.518	.356	.613	-.310
T eau (°C)	-.123	.085	.105	-.094	.086	-.290	-.401	-.697	.057	.657	1.000	-.132	.122	-.145	-.460	-.114	.657	-.803	-.132	.706	-.123
mV	.362	.426	.355	.370	.257	.084	.532	-.030	.089	.356	-.132	1.000	-.182	1.000	-.635	-.120	.104	.005	1.000	-.231	.140
cond (mS)	.348	.256	.370	.363	.691	.272	-.040	.166	.098	.037	.122	-.182	1.000	-.182	.155	.468	-.038	.065	-.182	.173	.276
pe	.361	.418	.351	.368	.252	.089	.535	-.022	.091	.347	-.145	1.000	-.182	1.000	-.631	-.122	.098	.015	1.000	-.242	.141
pH	-.052	-.363	-.246	-.070	-.028	-.132	-.298	.655	-.381	-.364	-.460	-.635	.155	-.631	1.000	.381	-.725	.463	-.635	-.117	-.047
débit (l/s)	-.161	-.024	-.141	-.125	.322	.181	.402	-.037	.367	-.034	-.114	-.120	.468	-.122	.381	1.000	.035	.042	-.120	.035	.035
dO (‰ VSMOW)	-.429	.068	-.159	-.394	-.098	.226	.223	-.949	.647	.273	.657	.104	-.038	.098	-.725	.035	1.000	-.716	.104	.430	-.089
dD (‰ VSMOW)	.138	-.160	-.062	.092	-.206	.266	.237	.719	-.095	-.518	-.803	.005	.065	.015	.463	.042	-.716	1.000	.005	-.719	-.137
eh	.362	.426	.355	.370	.257	.084	.532	-.030	.089	.356	-.132	1.000	-.182	1.000	-.635	-.120	.104	.005	1.000	-.231	.140
electroneutrality (%)	-.346	-.250	-.271	-.324	.178	-.254	-.511	-.336	-.241	.613	.706	-.231	.173	-.242	-.117	.035	.430	-.719	-.231	1.000	-.310
TDS (mg/l)	.735	.824	.783	.756	.674	.115	.230	.052	.169	-.310	-.123	.140	.276	.141	-.047	.035	-.089	-.137	.140	-.310	1.000

11 observations ont été utilisées dans ce calcul.

Matrice de corrélation Essertines

	Na	Mg	Si	K	Ca	F	Cl	NO3	SO4	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	débit (l/s)	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	eh	electroneutrality (%)	TDS (mg/l)
Na	1.000	.784	.951	.997	.693	-.070	-.024	.395	-.273	.026	-.123	.362	.348	.361	-.052	-.161	-.429	.138	.362	-.346	.735
Mg	.784	1.000	.892	.795	.675	.180	.333	-.131	.239	-.031	.085	.426	.256	.418	-.363	-.024	.068	-.160	.426	-.250	.824
Si	.951	.892	1.000	.959	.698	-.037	.044	.102	-.062	.076	.105	.355	.370	.351	-.246	-.141	-.159	-.062	.355	-.271	.783
K	.997	.795	.959	1.000	.723	-.097	-.006	.360	-.254	.040	-.094	.370	.363	.368	-.070	-.125	-.394	.092	.370	-.324	.756
Ca	.693	.675	.698	.723	1.000	.013	.090	.182	-.084	.182	.086	.257	.691	.252	-.028	.322	-.098	-.206	.257	.178	.674
F	-.070	.180	-.037	-.097	.013	1.000	.439	-.099	.642	-.302	-.290	.084	.272	.089	-.132	.181	.226	.266	.084	-.254	.115
Cl	-.024	.333	.044	-.006	.090	.439	1.000	-.203	.724	-.330	-.401	.532	-.040	.535	-.298	.402	.223	.237	.532	-.511	.230
NO3	.395	-.131	.102	.360	.182	-.099	-.203	1.000	-.641	-.234	-.697	-.030	.166	-.022	.655	-.037	-.949	.719	-.030	-.336	.052
SO4	-.273	.239	-.062	-.254	-.084	.642	.724	-.641	1.000	-.277	.057	.089	.098	.091	-.381	.367	.647	-.095	.089	-.241	.169
T ext (°C)	.026	-.031	.076	.040	.182	-.302	-.330	-.234	-.277	1.000	.657	.356	.037	.347	-.364	-.034	.273	-.518	.356	.613	-.310
T eau (°C)	-.123	.085	.105	-.094	.086	-.290	-.401	-.697	.057	.657	1.000	-.132	.122	-.145	-.460	-.114	.657	-.803	-.132	.706	-.123
mV	.362	.426	.355	.370	.257	.084	.532	-.030	.089	.356	-.132	1.000	-.182	1.000	-.635	-.120	.104	.005	1.000	-.231	.140
cond (mS)	.348	.256	.370	.363	.691	.272	-.040	.166	.098	.037	.122	-.182	1.000	-.182	.155	.468	-.038	.065	-.182	.173	.276
pe	.361	.418	.351	.368	.252	.089	.535	-.022	.091	.347	-.145	1.000	-.182	1.000	-.631	-.122	.098	.015	1.000	-.242	.141
pH	-.052	-.363	-.246	-.070	-.028	-.132	-.298	.655	-.381	-.364	-.460	-.635	.155	-.631	1.000	.381	-.725	.463	-.635	-.117	-.047
débit (l/s)	-.161	-.024	-.141	-.125	.322	.181	.402	-.037	.367	-.034	-.114	-.120	.468	-.122	.381	1.000	.035	.042	-.120	.035	.035
dO (‰ VSMOW)	-.429	.068	-.159	-.394	-.098	.226	.223	-.949	.647	.273	.657	.104	-.038	.098	-.725	.035	1.000	-.716	.104	.430	-.089
dD (‰ VSMOW)	.138	-.160	-.062	.092	-.206	.266	.237	.719	-.095	-.518	-.803	.005	.065	.015	.463	.042	-.716	1.000	.005	-.719	-.137
eh	.362	.426	.355	.370	.257	.084	.532	-.030	.089	.356	-.132	1.000	-.182	1.000	-.635	-.120	.104	.005	1.000	-.231	.140
electroneutrality (%)	-.346	-.250	-.271	-.324	.178	-.254	-.511	-.336	-.241	.613	.706	-.231	.173	-.242	-.117	.035	.430	-.719	-.231	1.000	-.310
TDS (mg/l)	.735	.824	.783	.756	.674	.115	.230	.052	.169	-.310	-.123	.140	.276	.141	-.047	.035	-.089	-.137	.140	-.310	1.000

11 observations ont été utilisées dans ce calcul.

Matrice de corrélation Barbanche

	Na	Mg	Si	K	Ca	F	Cl	NO3	SO4	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	débit (l/s)	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	eh	electroneutrality (%)	TDS (mg/l)
Na	1.000	.860	.710	.864	.506	.343	.765	.752	.639	-.089	-.233	1.188E-4	.271	.010	.159	.069	.207	.130	1.188E-4	-.319	.854
Mg	.860	1.000	.920	.749	.675	.380	.635	.802	.852	-.055	-.012	.041	.157	.042	-.119	.344	.396	.082	.041	-.266	.827
Si	.710	.920	1.000	.684	.687	.402	.584	.837	.859	.115	.122	.112	.174	.106	-.246	.379	.335	.060	.112	-.331	.796
K	.864	.749	.684	1.000	.605	.503	.854	.862	.648	.114	.059	.154	.501	.151	.051	-.035	.230	-.113	.154	-.508	.913
Ca	.506	.675	.687	.605	1.000	.455	.463	.691	.781	.019	.119	.253	.284	.245	-.285	.262	.418	-.065	.253	-.204	.658
F	.343	.380	.402	.503	.455	1.000	.468	.575	.570	-.017	.214	.234	.371	.227	-.230	-.004	.487	-.202	.234	-.425	.540
Cl	.765	.635	.584	.854	.463	.468	1.000	.833	.651	-.129	-.067	-.025	.635	-.024	.269	-.273	.176	.038	-.025	-.837	.937
NO3	.752	.802	.837	.862	.691	.575	.833	1.000	.870	.131	.161	.069	.531	.062	.002	.121	.250	-.110	.069	-.644	.956
SO4	.639	.852	.859	.648	.781	.570	.651	.870	1.000	-.124	.024	.136	.346	.134	-.191	.218	.385	.096	.136	-.495	.835
T ext (°C)	-.089	-.055	.115	.114	.019	-.017	-.129	.131	-.124	1.000	.703	.190	.046	.164	-.235	.381	.180	-.456	.190	.147	-.040
T eau (°C)	-.233	-.012	.122	.059	.119	.214	-.067	.161	.024	.703	1.000	.076	.269	.038	-.341	.479	.428	-.730	.076	-.053	-.005
mV	1.188E-4	.041	.112	.154	.253	.234	-.025	.069	.136	.190	.076	1.000	-.236	.999	-.835	-.240	.384	-.189	1.000	.089	.042
cond (mS)	.271	.157	.174	.501	.284	.371	.635	.531	.346	.046	.269	-.236	1.000	-.248	.345	-.054	.058	-.152	-.236	-.706	.551
pe	.010	.042	.106	.151	.245	.227	-.024	.062	.134	.164	.038	.999	-.248	1.000	-.824	-.258	.369	-.162	.999	.093	.042
pH	.159	-.119	-.246	.051	-.285	-.230	.269	.002	-.191	-.235	-.341	-.835	.345	-.824	1.000	-.189	-.527	.290	-.835	-.281	.100
débit (l/s)	.069	.344	.379	-.035	.262	-.004	-.273	.121	.218	.381	.479	-.240	-.054	-.258	-.189	1.000	.160	-.165	-.240	.419	-.022
dO (‰ VSMOW)	.207	.396	.335	.230	.418	.487	.176	.250	.385	.180	.428	.384	.058	.369	-.527	.160	1.000	-.288	.384	-.061	.262
dD (‰ VSMOW)	.130	.082	.060	-.113	-.065	-.202	.038	-.110	.096	-.456	-.730	-.189	-.152	-.162	.290	-.165	-.288	1.000	-.189	-.012	.013
eh	1.188E-4	.041	.112	.154	.253	.234	-.025	.069	.136	.190	.076	1.000	-.236	.999	-.835	-.240	.384	-.189	1.000	.089	.042
electroneutrality (%)	-.319	-.266	-.331	-.508	-.204	-.425	-.837	-.644	-.495	.147	-.053	.089	-.706	.093	-.281	.419	-.061	-.012	.089	1.000	-.693
TDS (mg/l)	.854	.827	.796	.913	.658	.540	.937	.956	.835	-.040	-.005	.042	.551	.042	.100	-.022	.262	.013	.042	-.693	1.000

16 observations ont été utilisées dans ce calcul.
Cas omis (manquants).

ANNEXES CHAP 3 : MATRICES DE CORRELATION (Furan/Forez)

Matrice de corrélation Bessat

	Na	Mg	Si	K	Ca	F	Cl	NO3	SO4	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	débit (l/s)	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	eh	electroneutrality (%)	TDS (mg/l)
Na	1.000	.959	.872	.886	.985	.991	.995	.952	.983	-.480	-.253	-.772	.193	-.770	.761	.091	-.589	-.011	-.772	-.794	.996
Mg	.959	1.000	.831	.799	.979	.979	.969	.896	.982	-.437	-.081	-.827	.382	-.827	.696	.106	-.426	-.134	-.827	-.759	.959
Si	.872	.831	1.000	.965	.803	.833	.835	.959	.867	-.219	-.168	-.639	.330	-.638	.694	-.103	-.668	.079	-.639	-.901	.905
K	.886	.799	.965	1.000	.799	.838	.841	.981	.850	-.311	-.261	-.533	.258	-.531	.624	.031	-.769	.054	-.533	-.914	.916
Ca	.985	.979	.803	.799	1.000	.995	.996	.895	.984	-.509	-.205	-.818	.215	-.817	.749	.111	-.468	-.065	-.818	-.719	.973
F	.991	.979	.833	.838	.995	1.000	.997	.924	.987	-.515	-.243	-.794	.246	-.792	.741	.132	-.540	-.062	-.794	-.777	.985
Cl	.995	.969	.835	.841	.996	.997	1.000	.923	.988	-.505	-.248	-.797	.198	-.795	.760	.088	-.540	-.023	-.797	-.765	.987
NO3	.952	.898	.959	.981	.895	.924	.923	1.000	.927	-.389	-.216	-.656	.308	-.655	.679	.070	-.705	-.029	-.656	-.900	.973
SO4	.983	.982	.867	.850	.984	.987	.988	.927	1.000	-.437	-.190	-.786	.280	-.784	.724	.030	-.501	.002	-.786	-.804	.982
T ext (°C)	-.480	-.437	-.219	-.311	-.509	-.515	-.505	-.389	-.437	1.000	.443	.308	-.224	.304	-.282	-.229	.374	.402	.308	.324	-.460
T eau (°C)	-.253	-.081	-.168	-.261	-.205	-.243	-.248	-.216	-.190	.443	1.000	-.019	.443	-.031	-.331	-.099	.511	-.301	-.019	.252	-.236
mV	-.772	-.827	-.639	-.533	-.818	-.794	-.797	-.656	-.786	.308	-.019	1.000	-.241	1.000	-.884	.194	.291	.174	1.000	.501	-.755
cond (mS)	.193	.382	.330	.258	.215	.246	.198	.308	.280	-.224	.443	-.241	1.000	-.247	-.082	-.001	-.083	-.590	-.241	-.461	.247
pe	-.770	-.827	-.638	-.531	-.817	-.792	-.795	-.655	-.784	.304	-.031	1.000	-.247	1.000	-.880	.193	.287	.178	1.000	.499	-.753
pH	.761	.696	.694	.624	.749	.741	.760	.679	.724	-.282	-.331	-.884	-.082	-.880	1.000	-.285	-.527	.099	-.884	-.538	.743
débit (l/s)	.091	.106	-.103	.031	.111	.132	.088	.070	.030	-.229	-.099	.194	-.001	.193	-.285	1.000	-.003	-.235	.194	.079	.080
dO (‰ VSMOW)	-.589	-.426	-.668	-.769	-.468	-.540	-.540	-.705	-.501	.374	.511	.291	-.083	.287	-.527	-.003	1.000	-.121	.291	.799	-.615
dD (‰ VSMOW)	-.011	-.134	.079	.054	-.065	-.062	-.023	-.029	.002	.402	-.301	.174	-.590	.178	.099	-.235	-.121	1.000	.174	-.044	-.021
eh	-.772	-.827	-.639	-.533	-.818	-.794	-.797	-.656	-.786	.308	-.019	1.000	-.241	1.000	-.884	.194	.291	.174	1.000	.501	-.755
electroneutrality (%)	-.794	-.759	-.901	-.914	-.719	-.777	-.765	-.900	-.804	.324	.252	.501	-.461	.499	-.538	.079	.799	-.044	.501	1.000	-.835
TDS (mg/l)	.996	.959	.905	.916	.973	.985	.987	.973	.982	-.460	-.236	-.755	.247	-.753	.743	.080	-.615	-.021	-.755	-.835	1.000

10 observations ont été utilisées dans ce calcul.
2 cas omis (manquants).

Matrice de corrélation Tarentaise

	Na	Mg	Si	K	Ca	F	Cl	NO3	SO4	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	débit (l/s)	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	eh	electroneutrality (%)	TDS (mg/l)
Na	1.000	.946	-.008	.926	.909	.833	.978	.866	.773	-.442	-.436	.523	.716	.536	-.106	.375	-.539	-.089	.523	-.516	.992
Mg	.946	1.000	-.213	.866	.977	.670	.978	.834	.642	-.495	-.525	.620	.818	.635	-.281	.510	-.574	-.207	.620	-.562	.972
Si	-.008	-.213	1.000	.178	-.266	.277	-.132	-.080	.241	.170	.504	-.478	-.532	-.497	.343	-.599	.040	-.229	-.478	.279	-.074
K	.926	.866	.178	1.000	.837	.854	.880	.898	.867	-.592	-.506	.310	.476	.329	.040	.322	-.634	-.193	.310	-.372	.924
Ca	.909	.977	-.266	.837	1.000	.664	.965	.789	.556	-.522	-.532	.634	.839	.650	-.296	.446	-.653	-.290	.634	-.527	.948
F	.833	.670	.277	.854	.664	1.000	.761	.797	.829	-.453	-.322	.181	.389	.194	.272	.080	-.495	-.040	.181	-.407	.809
Cl	.978	.978	-.132	.880	.965	.761	1.000	.834	.652	-.462	-.461	.608	.825	.620	-.210	.417	-.571	-.161	.608	-.597	.993
NO3	.866	.834	-.080	.898	.789	.797	.834	1.000	.862	-.757	-.749	.366	.517	.395	.111	.603	-.513	.045	.366	-.599	.881
SO4	.773	.642	.241	.867	.556	.829	.652	.862	1.000	-.516	-.502	.102	.184	.126	.272	.372	-.332	.146	.102	-.246	.737
T ext (°C)	-.442	-.495	.170	-.592	-.522	-.453	-.462	-.757	-.516	1.000	.890	-.306	-.252	-.340	-.039	-.549	.609	.169	-.306	.470	-.502
T eau (°C)	-.436	-.525	.504	-.506	-.532	-.322	-.461	-.749	-.502	.890	1.000	-.375	-.366	-.415	2.547E-4	-.803	.438	-.137	-.375	.459	-.493
mV	.523	.620	-.478	.310	.634	.181	.608	.366	.102	-.306	-.375	1.000	.747	.999	-.796	.432	-.322	-.072	1.000	-.488	.552
cond (mS)	.716	.818	-.532	.476	.839	.389	.825	.517	.184	-.252	-.366	.747	1.000	.751	-.419	.444	-.412	-.111	.747	-.680	.759
pe	.536	.635	-.497	.329	.650	.194	.620	.395	.126	-.340	-.415	.999	.751	1.000	-.782	.462	-.337	-.066	.999	-.493	.567
pH	-.106	-.281	.343	.040	-.296	.272	-.210	.111	.272	-.039	2.547E-4	-.796	-.419	-.782	1.000	-.144	.158	.278	-.796	.097	-.139
débit (l/s)	.375	.510	-.599	.322	.446	.080	.417	.603	.372	-.549	-.803	.432	.444	.462	-.144	1.000	.040	.380	.432	-.547	.424
dO (‰ VSMOW)	-.539	-.574	.040	-.634	-.653	-.495	-.571	-.513	-.332	.609	.438	-.322	-.412	-.337	.158	.040	1.000	.597	-.322	.157	-.575
dD (‰ VSMOW)	-.089	-.207	-.229	-.193	-.290	-.040	-.161	.045	.146	.169	-.137	-.072	-.111	-.066	.278	.380	.597	1.000	-.072	-.151	-.135
eh	.523	.620	-.478	.310	.634	.181	.608	.366	.102	-.306	-.375	1.000	.747	.999	-.796	.432	-.322	-.072	1.000	-.488	.552
electroneutrality (%)	-.516	-.562	.279	-.372	-.527	-.407	-.597	-.599	-.246	.470	.459	-.488	-.680	-.493	.097	-.547	.157	-.151	-.488	1.000	-.567
TDS (mg/l)	.992	.972	-.074	.924	.948	.809	.993	.881	.737	-.502	-.493	.552	.759	.567	-.139	.424	-.575	-.135	.552	-.567	1.000

12 observations ont été utilisées dans ce calcul.
2 cas omis (manquants).

Matrice de corrélation Souvignet

	Na	Mg	Si	K	Ca	F	Cl	NO3	SO4	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	débit (l/s)	dD (‰ VSMOW)	dO (‰ VSMOW)	eh	electroneutrality (%)	TDS (mg/l)
Na	1.000	.561	-.166	.274	.823	.110	.686	.292	.462	-.229	-.472	-.365	.683	-.371	.685	-.152	.573	-.034	-.365	-.341	.489
Mg	.561	1.000	.577	-.188	.590	-.115	.390	.276	.028	.180	.163	-.823	.236	-.823	.752	-.625	.674	.677	-.823	-.188	.365
Si	-.166	.577	1.000	-.195	-.185	-.195	-.198	-.004	-.599	.677	.800	-.620	-.323	-.611	.287	-.604	.053	.693	-.620	.189	-.066
K	.274	-.188	-.195	1.000	.132	.088	.164	-.025	-.036	.117	-.041	.427	.482	.427	-.241	.021	-.048	-.466	.427	-.042	.058
Ca	.823	.590	-.185	.132	1.000	.107	.722	.357	.493	-.448	-.584	-.458	.613	-.467	.762	-.249	.823	.132	-.458	-.432	.536
F	.110	-.115	-.195	.088	.107	1.000	.736	.912	.626	.085	.090	-.001	.195	.003	.115	.625	.267	.160	-.001	-.913	.851
Cl	.686	.390	-.198	.164	.722	.736	1.000	.869	.763	-.187	-.256	-.352	.619	-.355	.617	.245	.709	.261	-.352	-.909	.956
NO3	.292	.276	-.004	-.025	.357	.912	.869	1.000	.673	.056	.111	-.326	.308	-.324	.395	.378	.565	.453	-.326	-.980	.974
SO4	.462	.028	-.599	-.036	.493	.626	.763	.673	1.000	-.598	-.534	.016	.425	.010	.237	.485	.535	.022	.016	-.779	.732
T ext (°C)	-.229	.180	.677	.117	-.448	.085	-.187	.056	-.598	1.000	.852	-.111	-.260	-.098	-.119	-.181	-.332	.272	-.111	.104	-.043
T eau (°C)	-.472	.163	.800	-.041	-.584	.090	-.256	.111	-.534	.852	1.000	-.213	-.345	-.201	-.170	-.149	-.306	.536	-.213	.061	-.035
mV	-.365	-.823	-.620	.427	-.458	-.001	-.352	-.326	.016	-.111	-.213	1.000	-.157	1.000	-.848	.359	-.514	-.730	1.000	.222	-.367
cond (mS)	.683	.236	-.323	.482	.613	.195	.619	.308	.425	-.260	-.345	-.157	1.000	-.163	.404	.194	.340	-.107	-.157	-.396	.455
pe	-.371	-.823	-.611	.427	-.467	.003	-.355	-.324	.010	-.098	-.201	1.000	-.163	1.000	-.851	.358	-.519	-.724	1.000	.221	-.367
pH	.685	.752	.287	-.241	.762	.115	.617	.395	.237	-.119	-.170	-.848	.404	-.851	1.000	-.316	.655	.510	-.848	-.362	.516
débit (l/s)	-.152	-.625	-.604	.021	-.249	.625	.245	.378	.485	-.181	-.149	.359	.194	.358	-.316	1.000	-.331	-.346	.359	-.449	.305
dD (‰ VSMOW)	.573	.674	.053	-.048	.823	.267	.709	.565	.535	-.332	-.306	-.514	.340	-.519	.655	-.331	1.000	.412	-.514	-.582	.664
dO (‰ VSMOW)	-.034	.677	.693	-.466	.132	.160	.261	.453	.022	.272	.536	-.730	-.107	-.724	.510	-.346	.412	1.000	-.730	-.331	.400
eh	-.365	-.823	-.620	.427	-.458	-.001	-.352	-.326	.016	-.111	-.213	1.000	-.157	1.000	-.848	.359	-.514	-.730	1.000	.222	-.367
electroneutrality (%)	-.341	-.188	.189	-.042	-.432	-.913	-.909	-.980	-.779	.104	.061	.222	-.396	.221	-.362	-.449	-.582	-.331	.222	1.000	-.976
TDS (mg/l)	.489	.365	-.066	.058	.536	.851	.956	.974	.732	-.043	-.035	-.367	.455	-.367	.516	.305	.664	.400	-.367	-.976	1.000

11 observations ont été utilisées dans ce calcul.
3 cas omis (manquants).

Matrice de corrélation Barbarie

	Na	Mg	Si	K	Ca	F	Cl	NO3	SO4	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	débit (l/s)	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	eh	electroneutrality (%)	TDS (mg/l)
Na	1.000	.938	.902	.990	.986	.912	.982	.983	.973	-.460	-.347	.291	-.496	.293	-.192	-.058	-.415	.330	.291	-.489	.992
Mg	.938	1.000	.933	.936	.957	.860	.940	.927	.897	-.372	-.218	.184	-.441	.188	-.147	-.146	-.250	.317	.184	-.440	.943
Si	.902	.933	1.000	.924	.936	.896	.871	.884	.869	-.284	-.110	.084	-.692	.088	-.102	-.315	-.199	.251	.084	-.245	.899
K	.990	.936	.924	1.000	.986	.916	.971	.975	.970	-.415	-.282	.271	-.528	.274	-.227	-.065	-.404	.255	.271	-.448	.986
Ca	.986	.957	.936	.986	1.000	.900	.968	.968	.959	-.499	-.362	.294	-.535	.297	-.216	-.118	-.413	.311	.294	-.427	.981
F	.912	.860	.896	.916	.900	1.000	.913	.941	.935	-.318	-.155	.214	-.596	.217	-.203	-.065	-.225	.271	.214	-.532	.933
Cl	.982	.940	.871	.971	.968	.913	1.000	.988	.970	-.461	-.329	.270	-.387	.273	-.162	-.039	-.391	.354	.270	-.618	.994
NO3	.983	.927	.884	.975	.968	.941	.988	1.000	.987	-.455	-.320	.277	-.461	.280	-.202	-.014	-.374	.339	.277	-.606	.997
SO4	.973	.897	.869	.970	.959	.935	.970	.987	1.000	-.497	-.361	.323	-.511	.325	-.244	-.008	-.362	.377	.323	-.575	.984
T ext (°C)	-.460	-.372	-.284	-.415	-.499	-.318	-.461	-.455	-.497	1.000	.897	-.509	.200	-.509	.296	-.084	.474	-.328	-.509	.327	-.458
T eau (°C)	-.347	-.218	-.110	-.282	-.362	-.155	-.329	-.320	-.361	.897	1.000	-.449	.036	-.447	.195	-.098	.634	-.443	-.449	.248	-.324
mV	.291	.184	.084	.271	.294	.214	.270	.277	.323	-.509	-.449	1.000	-.043	1.000	-.801	.605	-.388	-.121	1.000	-.182	.277
cond (mS)	-.496	-.441	-.692	-.528	-.535	-.596	-.387	-.461	-.511	.200	.036	-.043	1.000	-.045	.114	.369	-.050	-.130	-.043	-.236	-.465
pe	.293	.188	.088	.274	.297	.217	.273	.280	.325	-.509	-.447	1.000	-.045	1.000	-.801	.603	-.389	-.122	1.000	-.183	.280
pH	-.192	-.147	-.102	-.227	-.216	-.203	-.162	-.202	-.244	.296	.195	-.801	.114	-.801	1.000	-.761	.349	.450	-.801	.044	-.193
débit (l/s)	-.058	-.146	-.315	-.065	-.118	-.065	-.039	-.014	-.008	-.084	-.098	.605	.369	.603	-.761	1.000	-.238	-.457	.605	-.280	-.044
dO (‰ VSMOW)	-.415	-.250	-.199	-.404	-.413	-.225	-.391	-.374	-.362	.474	.634	-.388	-.050	-.389	.349	-.238	1.000	-.022	-.388	.187	-.386
dD (‰ VSMOW)	.330	.317	.251	.255	.311	.271	.354	.339	.377	-.328	-.443	-.121	-.130	-.122	.450	-.457	-.022	1.000	-.121	-.359	.337
eh	.291	.184	.084	.271	.294	.214	.270	.277	.323	-.509	-.449	1.000	-.043	1.000	-.801	.605	-.388	-.121	1.000	-.182	.277
electroneutrality (%)	-.489	-.440	-.245	-.448	-.427	-.532	-.618	-.606	-.575	.327	.248	-.182	-.236	-.183	.044	-.280	.187	-.359	-.182	1.000	-.568
TDS (mg/l)	.992	.943	.899	.986	.981	.933	.994	.997	.984	-.458	-.324	.277	-.465	.280	-.193	-.044	-.386	.337	.277	-.568	1.000

16 observations ont été utilisées dans ce calcul.
Cas omis (manquants).

ANNEXES CHAP 3 : MATRICES DE CORRELATION (Furan/Forez)

Matrice de corrélation Planfoy

	Na	Mg	Si	K	Ca	F	Cl	NO3	SO4	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	eh	electroneutrality (%)	TDS (mg/l)
Na	1.000	-.035	.041	.612	-.155	-.019	-.041	.032	.120	-.339	-.474	.089	-.234	.092	.221	-.353	-.046	.089	.035	.055
Mg	-.035	1.000	-.212	-.219	.844	.347	-.039	.116	.155	.155	.218	-.077	.383	-.079	-.254	.488	-.502	-.077	-.039	.089
Si	.041	-.212	1.000	.328	-.237	-.243	-.141	-.154	-.156	.054	.080	.120	.004	.119	-.048	.472	-.009	.120	.160	-.070
K	.612	-.219	.328	1.000	-.454	-.016	-.043	.046	.115	-.094	-.283	.118	-.036	.116	.086	-.136	.019	.118	-.011	.081
Ca	-.155	.844	-.237	-.454	1.000	-.052	-.306	-.245	-.212	-.020	.146	-.276	.185	-.274	-.067	.292	-.460	-.276	.310	-.276
F	-.019	.347	-.243	-.016	-.052	1.000	.724	.921	.922	.278	.174	.050	.083	.045	-.076	.361	-.028	.050	-.898	.901
Cl	-.041	-.039	-.141	-.043	-.306	.724	1.000	.829	.729	.160	.091	-.145	.038	-.145	.152	.206	-.050	-.145	-.880	.869
NO3	.032	.116	-.154	.046	-.245	.921	.829	1.000	.975	.280	.143	-.001	.004	-.004	.086	.270	.073	-.001	-.985	.992
SO4	.120	.155	-.156	.115	-.212	.922	.729	.975	1.000	.238	.070	.110	-.008	.107	.006	.204	.083	.110	-.950	.961
T ext (°C)	-.339	.155	.054	-.094	-.020	.278	.160	.280	.238	1.000	.907	-.055	.525	-.061	-.215	.526	.050	-.055	-.265	.264
T eau (°C)	-.474	.218	.080	-.283	.146	.174	.091	.143	.070	.907	1.000	-.191	.470	-.195	-.197	.646	-.088	-.191	-.112	.129
mV	.089	-.077	.120	.118	-.276	.050	-.145	-.001	.110	-.055	-.191	1.000	.391	1.000	-.834	-.096	.219	1.000	-.023	-.003
cond (mS)	-.234	.383	.004	-.036	.185	.083	.038	.004	-.008	.525	.470	.391	1.000	.391	-.701	.466	-.306	.391	-.015	.010
pe	.092	-.079	.119	.116	-.274	.045	-.145	-.004	.107	-.061	-.195	1.000	.391	1.000	-.832	-.101	.217	1.000	-.021	-.006
pH	.221	-.254	-.048	.086	-.067	-.076	.152	.086	.006	-.215	-.197	-.834	-.701	-.832	1.000	-.224	.058	-.834	-.065	.089
dO (‰ VSMOW)	-.353	.488	.472	-.136	.292	.361	.206	.270	.204	.526	.646	-.096	.466	-.101	-.224	1.000	-.301	-.096	-.221	.300
dD (‰ VSMOW)	-.046	-.502	-.009	.019	-.460	-.028	-.050	.073	.083	.050	-.088	.219	-.306	.217	.058	-.301	1.000	.219	-.091	.046
eh	.089	-.077	.120	.118	-.276	.050	-.145	-.001	.110	-.055	-.191	1.000	.391	1.000	-.834	-.096	.219	1.000	-.023	-.003
electroneutrality (%)	.035	-.039	.160	-.011	.310	-.898	-.880	-.985	-.950	-.265	-.112	-.023	-.015	-.021	-.065	-.221	-.091	-.023	1.000	-.985
TDS (mg/l)	.055	.089	-.070	.081	-.276	.901	.869	.992	.961	.264	.129	-.003	.010	-.006	.089	.300	.046	-.003	-.985	1.000

16 observations ont été utilisées dans ce calcul.
Cas omis (manquants).

Matrice de corrélation exutoire Pas de Riot

	Na	Mg	Si	K	Ca	F	Cl	NO3	SO4	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	eh	electroneutrality (%)	TDS (mg/l)
Na	1.000	.101	.050	.733	.423	-.322	.860	.497	.503	-.216	-.563	-.452	.304	-.451	.691	-.593	.302	-.452	-.104	.893
Mg	.101	1.000	.731	-.326	.715	-.150	.045	-.389	.030	.091	.060	-.248	.255	-.246	.199	.463	.603	-.248	.497	.043
Si	.050	.731	1.000	-.421	.399	-.050	-.136	-.579	-.098	.050	.133	-.240	.016	-.238	.218	.551	.581	-.240	.580	-.152
K	.733	-.326	-.421	1.000	.224	-.071	.564	.449	.272	.097	-.212	-.060	.459	-.056	.272	-.701	-.081	-.060	-.060	.634
Ca	.423	.715	.399	.224	1.000	-.037	.341	-.157	-.006	.040	.034	-.265	.514	-.260	.362	.054	.601	-.265	.485	.354
F	-.322	-.150	-.050	-.071	-.037	1.000	-.441	-.122	-.038	.217	.332	.268	-.136	.270	-.383	.191	-.035	.268	.138	-.324
Cl	.860	.045	-.136	.564	.341	-.441	1.000	.704	.555	-.529	-.808	-.306	.244	-.311	.573	-.750	.143	-.306	-.474	.970
NO3	.497	-.389	-.579	.449	-.157	-.122	.704	1.000	.673	-.554	-.806	.079	.019	.073	.097	-.813	-.350	.079	-.842	.769
SO4	.503	.030	-.098	.272	-.006	-.038	.555	.673	1.000	-.536	-.804	-.076	-.053	-.083	.177	-.550	-.072	-.076	-.541	.671
T ext (°C)	-.216	.091	.050	.097	.040	.217	-.529	-.554	-.536	1.000	.816	.169	.400	.180	-.282	.482	.253	.169	.694	-.491
T eau (°C)	-.563	.060	.133	-.212	.034	.332	-.808	-.806	-.804	.816	1.000	.120	.120	.130	-.315	.712	.118	.120	.774	-.812
mV	-.452	-.248	-.240	-.060	-.265	.268	-.306	.079	-.076	.169	.120	1.000	.371	1.000	-.937	-.110	-.341	1.000	-.165	-.244
cond (mS)	.304	.255	.016	.459	.514	-.136	.244	.019	-.053	.400	.120	.371	1.000	.380	-.202	-.095	.199	.371	.269	.278
pe	-.451	-.246	-.238	-.056	-.260	.270	-.311	.073	-.083	.180	.130	1.000	.380	1.000	-.937	-.104	-.337	1.000	-.154	-.248
pH	.691	.199	.218	.272	.362	-.383	.573	.097	.177	-.282	-.315	-.937	-.202	-.937	1.000	-.151	.403	-.937	.070	.506
dO (‰ VSMOW)	-.593	.463	.551	-.701	.054	.191	-.750	-.813	-.550	.482	.712	-.110	-.095	-.104	-.151	1.000	.256	-.110	.643	-.775
dD (‰ VSMOW)	.302	.603	.581	-.081	.601	-.035	.143	-.350	-.072	.253	.118	-.341	.199	-.337	.403	.256	1.000	-.341	.541	.113
eh	-.452	-.248	-.240	-.060	-.265	.268	-.306	.079	-.076	.169	.120	1.000	.371	1.000	-.937	-.110	-.341	1.000	-.165	-.244
electroneutrality (%)	-.104	.497	.580	-.060	.485	.138	-.474	-.842	-.541	.694	.774	-.165	.269	-.154	.070	.643	.541	-.165	1.000	-.458
TDS (mg/l)	.893	.043	-.152	.634	.354	-.324	.970	.769	.671	-.491	-.812	-.244	.278	-.248	.506	-.775	.113	-.244	-.458	1.000

13 observations ont été utilisées dans ce calcul.
2 cas omis (manquants).

DOMAINE FOREZ :

Matrice de corrélation Haut Lignon

	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	Na	Mg	Si	K	Ca	Cl	NO3	SO4	HCO3	balance ionique (%)	TDS (mg/l)
T ext (°C)	1.000	.917	.131	.251	.139	-.073	.640	.654	.453	.816	.667	.642	.801	.833	.825	.400	.359	.368	.819
T eau (°C)	.917	1.000	.032	-.117	.041	.007	.652	.585	.553	.845	.688	.707	.865	.888	.947	.371	.396	.436	.889
mV	.131	.032	1.000	.164	1.000	-.918	.297	.579	.004	.269	-.046	.099	.123	-.158	.174	.051	-.345	.159	.061
cond (mS)	.251	-.117	.164	1.000	.163	-.157	.043	.053	.149	.104	.191	.182	.040	.035	-.256	-.038	.077	.218	.074
pe	.139	.041	1.000	.163	1.000	-.919	.300	.580	.010	.276	-.037	.105	.130	-.152	.181	.051	-.336	.165	.068
pH	-.073	.007	-.918	-.157	-.919	1.000	-.407	-.513	-.018	-.358	-.177	-.163	-.223	.157	-.118	-.171	.362	-.295	-.087
dO (‰ VSMOW)	.640	.652	.297	.043	.300	-.407	1.000	.831	.291	.889	.633	.689	.878	.766	.770	.830	-.317	.413	.772
dD (‰ VSMOW)	.654	.585	.579	.053	.580	-.513	.831	1.000	-.012	.683	.257	.366	.620	.557	.747	.745	-.424	.043	.533
Na	.453	.553	.004	.149	.010	-.018	.291	-.012	1.000	.628	.680	.889	.649	.570	.428	-.232	.574	.923	.772
Mg	.816	.845	.269	.104	.276	-.358	.889	.683	.628	1.000	.849	.882	.987	.848	.844	.528	.128	.690	.943
Si	.667	.688	-.046	.191	-.037	-.177	.633	.257	.680	.849	1.000	.812	.864	.694	.552	.298	.434	.789	.810
K	.642	.707	.099	.182	.105	-.163	.689	.366	.889	.882	.812	1.000	.898	.806	.662	.232	.277	.885	.946
Ca	.801	.865	.123	.040	.130	-.223	.878	.620	.649	.987	.864	.898	1.000	.902	.856	.543	.160	.684	.966
Cl	.833	.888	-.158	.035	-.152	.157	.766	.557	.570	.848	.694	.806	.902	1.000	.863	.554	.193	.465	.934
NO3	.825	.947	.174	-.256	.181	-.118	.770	.747	.428	.844	.552	.662	.856	.863	1.000	.529	.108	.338	.852
SO4	.400	.371	.051	-.038	.051	-.171	.830	.745	-.232	.528	.298	.232	.543	.554	.529	1.000	-.580	-.108	.387
HCO3	.359	.396	-.345	.077	-.336	.362	-.317	-.424	.574	.128	.434	.277	.160	.193	.108	-.580	1.000	.414	.284
balance ionique (%)	.368	.436	.159	.218	.165	-.295	.413	.043	.923	.690	.789	.885	.684	.465	.338	-.108	.414	1.000	.721
TDS (mg/l)	.819	.889	.061	.074	.068	-.087	.772	.533	.772	.943	.810	.946	.966	.934	.852	.387	.284	.721	1.000

7 observations ont été utilisées dans ce calcul.

Matrice de corrélation Montarcher

	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	Na	Mg	Si	K	Ca	F	Cl	NO3	P04	SO4	HCO3	balance ionique (%)	TDS (mg/l)
T ext (°C)	1.000	.630	-.555	.120	-.554	.512	.196	-.243	.533	-.142	.179	-.301	-.106	.520	.079	.190	-.365	.235	.510	.349	-.047
T eau (°C)	.630	1.000	-.263	.170	-.262	.069	.029	-.345	.941	-.006	.029	.339	.679	.404	-.159	.630	-.201	.684	.774	.759	.367
mV	-.555	-.263	1.000	.420	1.000	-.944	-.919	-.495	.005	.750	.664	-.023	.150	.307	.418	-.146	.582	.402	.219	.167	.604
cond (mS)	.120	.170	.420	1.000	.421	-.228	-.507	-.127	.250	.386	.529	-.324	.082	.545	.205	-.178	.865	.743	.701	.664	.879
pe	-.554	-.262	1.000	.421	1.000	-.944	-.919	-.495	.007	.750	.664	-.021	.152	.307	.417	-.145	.582	.404	.220	.168	.605
pH	.512	.069	-.944	-.228	-.944	1.000	.890	.640	-.199	-.770	-.609	-.170	-.356	-.255	-.360	-.099	-.350	-.439	-.247	-.207	-.539
dO (‰ VSMOW)	.196	.029	-.919	-.507	-.919	.890	1.000	.750	-.247	-.872	-.884	.188	-.125	-.559	-.556	.030	-.467	-.562	-.458	-.317	-.658
dD (‰ VSMOW)	-.243	-.345	-.495	-.127	-.495	.640	.750	1.000	-.552	-.818	-.802	.151	-.218	-.514	-.528	-.394	.139	-.490	-.478	-.283	-.339
Na	.533	.941	.005	.250	.007	-.199	-.247	-.552	1.000	.192	.290	.381	.642	.460	-.132	.513	-.119	.772	.825	.840	.483
Mg	-.142	-.006	.750	.386	.750	-.770	-.872	-.818	.192	1.000	.801	-.374	.181	.416	.711	.301	.312	.501	.359	.146	.554
Si	.179	.029	.664	.529	.664	-.609	-.884	-.802	.290	.801	1.000	-.422	-.169	.627	.546	-.132	.308	.488	.490	.322	.514
K	-.301	.339	-.023	-.324	-.021	-.170	.188	.151	.381	-.374	-.422	1.000	.570	-.405	-.745	.137	-.197	.085	-.012	.321	-.020
Ca	-.106	.679	.150	.082	.152	-.356	-.125	-.218	.642	.181	-.169	.570	1.000	.101	-.089	.759	.066	.638	.505	.539	.497
F	.520	.404	.307	.545	.307	-.255	-.559	-.514	.460	.416	.627	-.405	.101	1.000	.613	.081	.252	.606	.771	.453	.533
Cl	.079	-.159	.418	.205	.417	-.360	-.556	-.528	-.132	.711	.546	-.745	-.089	.613	1.000	.234	.142	.157	.185	-.246	.214
NO3	.190	.630	-.146	-.178	-.145	-.099	.030	-.394	.513	.301	-.132	.137	.759	.081	.234	1.000	-.324	.383	.321	.176	.150
P04	-.365	-.201	.582	.865	.582	-.350	-.467	.139	-.119	.312	.308	-.197	.066	.252	.142	-.324	1.000	.501	.355	.387	.786
SO4	.235	.684	.402	.743	.404	-.439	-.562	-.490	.772	.501	.488	.085	.638	.606	.157	.383	.501	1.000	.942	.895	.923
HCO3	.510	.774	.219	.701	.220	-.247	-.458	-.478	.825	.359	.490	-.012	.505	.771	.185	.321	.355	.942	1.000	.892	.801
balance ionique (%)	.349	.759	.167	.664	.168	-.207	-.317	-.283	.840	.146	.322	.321	.539	.453	-.246	.176	.387	.895	.892	1.000	.773
TDS (mg/l)	-.047	.367	.604	.879	.605	-.539	-.658	-.339	.483	.554	.514	-.020	.497	.533	.214	.150	.786	.923	.801	.773	1.000

7 observations ont été utilisées dans ce calcul.
3 cas omis (manquants).

ANNEXES CHAP 3 : MATRICES DE CORRELATION (Furan/Forez)

Matrice de corrélation Montarcher village

	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	dC (‰ VPDB)	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	F	Cl	NO3	P04	SO4	HCO3	balance ionique (%)	TDS (mg/l)
T ext (°C)	1.000	.845	.008	-.364	.017	-.385	-.595	-.479	.581	-.407	-.331	-.291	.051	-.175	-.223	-.516	-.691	-.270	.204	.163	-.160	.406	-.523
T eau (°C)	.845	1.000	.520	-.579	.529	-.739	-.697	-.814	.546	-.582	.181	.225	-.361	.320	.246	-.422	-.967	-.648	.694	-.369	.332	.482	-.125
mV	.008	.520	1.000	-.265	1.000	-.888	-.148	-.614	.335	-.658	.713	.732	-.909	.708	.622	-.225	-.719	-.594	.963	-.825	.704	.001	.388
cond (mS)	-.364	-.579	-.265	1.000	-.277	.138	.961	.898	.367	-.249	-.617	-.635	-.149	-.733	-.751	-.494	.540	.932	-.493	.640	-.744	-.964	-.589
pe	.017	.529	1.000	-.277	1.000	-.889	-.161	-.625	.333	-.655	.716	.736	-.904	.713	.628	-.222	-.726	-.604	.966	-.829	.709	.013	.390
pH	-.385	-.739	-.888	.138	-.889	1.000	.148	.559	-.710	.903	-.345	-.378	.894	-.382	-.271	.611	.868	.429	-.881	.528	-.382	.085	.052
dO (‰ VSMOW)	-.595	-.697	-.148	.961	-.161	.148	1.000	.871	.196	-.168	-.392	-.416	-.227	-.537	-.548	-.316	.603	.846	-.406	.448	-.552	-.964	-.343
dD (‰ VSMOW)	-.479	-.814	-.614	.898	-.625	.559	.871	1.000	-.009	.192	-.667	-.696	.270	-.780	-.747	-.141	.838	.970	-.802	.767	-.790	-.770	-.467
dC (‰ VPDB)	.581	.546	.335	.367	.333	-.710	.196	-.009	1.000	-.926	-.414	-.382	-.578	-.376	-.481	-.988	-.553	.213	.297	.223	-.374	-.445	-.738
Na	-.407	-.582	-.658	-.249	-.655	.903	-.168	.192	-.926	1.000	.058	.028	.838	.042	.159	.882	.677	.013	-.594	.131	.043	.418	.438
Mg	-.331	.181	.713	-.617	.716	-.345	-.392	-.667	-.414	.058	1.000	.999	-.413	.986	.981	.522	-.351	-.801	.734	-.977	.982	.426	.919
Si	-.291	.225	.732	-.635	.736	-.378	-.416	-.696	-.382	.028	.999	1.000	-.430	.991	.982	.495	-.393	-.822	.761	-.985	.988	.440	.904
K	.051	-.361	-.909	-.149	-.904	.894	-.227	.270	-.578	.838	-.413	-.430	1.000	-.372	-.270	.517	.567	.211	-.787	.537	-.365	.400	-.071
Ca	-.175	.320	.708	-.733	.713	-.382	-.537	-.780	-.376	.042	.986	.991	-.372	1.000	.993	.499	-.462	-.891	.773	-.983	1.000	.551	.886
Sr	-.223	.246	.622	-.751	.628	-.271	-.548	-.747	-.481	.159	.981	.982	-.270	.993	1.000	.597	-.375	-.877	.694	-.956	.993	.592	.928
F	-.516	-.422	-.225	-.494	-.222	.611	-.316	-.141	-.988	.882	.522	.495	.517	.499	.597	1.000	.421	-.359	-.164	-.348	.498	.547	.810
Cl	-.691	-.967	-.719	.540	-.726	.868	.603	.838	-.553	.677	-.351	-.393	.567	-.462	-.375	.421	1.000	.695	-.848	.538	-.471	-.382	-.003
NO3	-.270	-.648	-.594	.932	-.604	.429	.846	.970	.213	.013	-.801	-.822	.211	-.891	-.877	-.359	.695	1.000	-.765	.854	-.899	-.802	-.665
P04	.204	.694	.963	-.493	.966	-.881	-.406	-.802	.297	-.594	.734	.761	-.787	.773	.694	-.164	-.848	-.765	1.000	-.861	.774	.251	.411
SO4	.163	-.369	-.825	.640	-.829	.528	.448	.767	.223	.131	-.977	-.985	.537	-.983	-.956	-.348	.538	.854	-.861	1.000	-.981	-.425	-.817
HCO3	-.160	.332	.704	-.744	.709	-.382	-.552	-.790	-.374	.043	.982	.988	-.365	1.000	.993	.498	-.471	-.899	.774	-.981	1.000	.564	.883
balance ionique (%)	.406	.482	.001	-.964	.013	.085	-.964	-.770	-.445	.418	.426	.440	.400	.551	.592	.547	-.382	-.802	.251	-.425	.564	1.000	.478
TDS (mg/l)	-.523	-.125	.388	-.589	.390	.052	-.343	-.467	-.738	.438	.919	.904	-.071	.886	.928	.810	-.003	-.665	.411	-.817	.883	.478	1.000

4 observations ont été utilisées dans ce calcul.
Cas omis (manquants).

Matrice de corrélation ruisseau Chorsin

	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	Na	Mg	Si	K	Ca	Cl	NO3	SO4	HCO3	balance ionique (%)	TDS (mg/l)
T ext (°C)	1.000	.810	-.431	.430	-.431	.377	.426	.165	-.234	.501	.479	-.463	.456	.296	.519	.205	.223	-.227	.386
T eau (°C)	.810	1.000	-.591	.663	-.588	.490	.825	.322	-.366	.801	.690	-.392	.834	.277	.448	.284	.227	-.157	.744
mV	-.431	-.591	1.000	-.578	1.000	-.982	-.630	.061	-.158	-.594	-.799	.580	-.557	-.342	-.269	.114	-.503	-.090	-.620
cond (mS)	.430	.663	-.578	1.000	-.574	.520	.434	.338	-.210	.358	.260	-.487	.430	.352	.398	-.047	.253	-.219	.301
pe	-.431	-.588	1.000	-.574	1.000	-.982	-.629	.060	-.159	-.594	-.799	.578	-.555	-.340	-.269	.115	-.502	-.093	-.620
pH	.377	.490	-.982	.520	-.982	1.000	.509	-.220	.312	.453	.768	-.659	.418	.299	.288	-.215	.579	.060	.500
dO (‰ VSMOW)	.426	.825	-.630	.434	-.629	.509	1.000	.359	-.369	.956	.818	-.122	.983	.142	.192	.319	.172	.120	.970
dD (‰ VSMOW)	.165	.322	.061	.338	.060	-.220	.359	1.000	-.684	.420	-.103	.331	.415	-.157	.091	.162	-.353	.267	.279
Na	-.234	-.366	-.158	-.210	-.159	.312	-.369	-.684	1.000	-.528	-.008	-.259	-.519	-.360	-.228	-.809	.091	.359	-.418
Mg	.501	.801	-.594	.358	-.594	.453	.956	.420	-.528	1.000	.781	-.058	.980	.293	.189	.496	.141	.053	.978
Si	.479	.690	-.799	.260	-.799	.768	.818	-.103	-.008	.781	1.000	-.505	.761	.180	.378	.189	.555	-.029	.837
K	-.463	-.392	.580	-.487	.578	-.659	-.122	.331	-.259	-.058	-.505	1.000	-.068	-.201	-.748	.144	-.806	.495	-.064
Ca	.456	.834	-.557	.430	-.555	.418	.983	.415	-.519	.980	.761	-.068	1.000	.252	.195	.473	.132	.016	.973
Cl	.296	.277	-.342	.352	-.340	.299	.142	-.157	-.360	.293	.180	-.201	.252	1.000	-.010	.620	.142	-.574	.263
NO3	.519	.448	-.269	.398	-.269	.288	.192	.091	-.228	.189	.378	-.748	.195	-.010	1.000	.122	.799	-.546	.140
SO4	.205	.284	.114	-.047	.115	-.215	.319	.162	-.809	.496	.189	.144	.473	.620	.122	1.000	.057	-.593	.459
HCO3	.223	.227	-.503	.253	-.502	.579	.172	-.353	.091	.141	.555	-.806	.132	.142	.799	.057	1.000	-.509	.200
balance ionique (%)	-.227	-.157	-.090	-.219	-.093	.060	.120	.267	.359	.053	-.029	.495	.016	-.574	-.546	-.593	-.509	1.000	.068
TDS (mg/l)	.386	.744	-.620	.301	-.620	.500	.970	.279	-.418	.978	.837	-.064	.973	.263	.140	.459	.200	.068	1.000

9 observations ont été utilisées dans ce calcul.
Cas omis (manquants).

Matrice de corrélation ruisseau Moingt

	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	F	Cl	NO3	P04	SO4	HCO3	balance ionique (%)	TDS (mg/l)
T ext (°C)	1.000	.935	-.344	.004	-.324	.460	.450	.288	-.067	.090	.268	.271	.115	-.275	.413	-.484	.385	.446	-.244	-.580	.897	-.048
T eau (°C)	.935	1.000	-.605	.238	-.590	.294	.623	.399	.105	.305	.464	.460	.362	-.333	.573	-.311	.481	.646	-.054	-.299	.936	.190
mV	-.344	-.605	1.000	-.314	1.000	-.238	-.302	-.001	-.297	-.296	-.372	-.259	-.433	-.096	-.329	-.075	-.026	-.369	-.056	-.565	-.381	-.296
cond (mS)	.004	.238	-.314	1.000	-.322	-.553	.820	.828	.888	.995	.962	.936	.989	-.819	.906	.792	.796	.712	.950	.257	.422	.999
pe	-.324	-.590	1.000	-.322	1.000	-.223	-.300	-.001	-.303	-.302	-.374	-.261	-.439	-.097	-.327	-.089	-.024	-.369	-.067	-.582	-.366	-.304
pH	.460	.294	-.238	-.553	-.223	1.000	-.494	-.608	-.224	-.521	-.379	-.546	-.461	.488	-.341	-.433	-.531	-.535	-.652	-.185	.084	-.573
dO (‰ VSMOW)	.450	.623	-.302	.820	-.300	-.494	1.000	.945	.540	.859	.891	.965	.846	-.865	.939	.310	.955	.965	.670	-.147	.796	.795
dD (‰ VSMOW)	.288	.399	-.001	.828	-.001	-.608	.945	1.000	.577	.868	.866	.956	.810	-.966	.910	.424	.994	.863	.772	-.266	.664	.812
Na	-.067	.105	-.297	.888	-.303	-.224	.540	.577	1.000	.878	.862	.726	.880	-.673	.772	.903	.551	.355	.881	.310	.253	.892
Mg	.090	.305	-.296	.995	-.302	-.521	.859	.868	.878	1.000	.982	.961	.989	-.865	.942	.749	.844	.743	.934	.166	.500	.989
Si	.268	.464	-.372	.962	-.374	-.379	.891	.866	.862	.982	1.000	.965	.980	-.871	.983	.656	.862	.770	.857	.077	.637	.948
K	.271	.460	-.259	.936	-.261	-.546	.965	.956	.726	.961	.965	1.000	.940	-.917	.973	.547	.948	.882	.838	-.027	.666	.921
Ca	.115	.362	-.433	.989	-.439	-.461	.846	.810	.880	.989	.980	.940	1.000	-.793	.932	.732	.790	.747	.896	.263	.510	.982
Sr	-.275	-.333	-.096	-.819	-.097	.488	-.865	-.966	-.673	-.865	-.871	-.917	-.793	1.000	-.908	-.511	-.965	-.721	-.800	.337	-.626	-.804
F	.413	.573	-.329	.906	-.327	-.341	.939	.910	.772	.942	.983	.973	.932	-.908	1.000	.520	.921	.826	.779	-.088	.756	.884
Cl	-.484	-.311	-.075	.792	-.089	-.433	.310	.424	.903	.749	.656	.547	.732	-.511	.520	1.000	.358	.148	.898	.484	-.147	.818
NO3	.385	.481	-.026	.796	-.024	-.531	.955	.994	.551	.844	.862	.948	.790	-.965	.921	.358	1.000	.871	.718	-.329	.735	.775
P04	.446	.646	-.369	.712	-.369	-.535	.965	.863	.355	.743	.770	.882	.747	-.721	.826	.148	.871	1.000	.534	-.084	.765	.686
SO4	-.244	-.054	-.056	.950	-.067	-.652	.670	.772	.881	.934	.857	.838	.896	-.800	.779	.898	.718	.534	1.000	.251	.183	.962
HCO3	-.580	-.299	-.565	.257	-.582	-.185	-.147	-.266	.310	.166	.077	-.027	.263	.337	-.088	.484	-.329	-.084	.251	1.000	-.464	.286
balance ionique (%)	.897	.936	-.381	.422	-.366	.084	.796	.664	.253	.500	.637	.666	.510	-.626	.756	-.147	.735	.765	.183	-.464	1.000	.375
TDS (mg/l)	-.048	.190	-.296	.999	-.304	-.573	.795	.812	.892	.989	.948	.921	.982	-.804	.884	.818	.775	.686	.962	.286	.375	1.000

5 observations ont été utilisées dans ce calcul.
Cas omis (manquants).

Matrice de corrélation Sauvain

	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	Na	Mg	Si	K	Ca	Cl	NO3	SO4	HCO3	balance ionique (%)	TDS (mg/l)
T ext (°C)	1.000	.895	-.773	.014	-.778	.774	-.035	-.241	-.244	-.511	.078	-.365	.459	-.971	-.970	.600	.897	-.359	-.834
T eau (°C)	.895	1.000	-.610	.368	-.616	.619	.411	.177	-.203	-.536	.162	-.200	.667	-.799	-.943	.859	.960	-.649	-.524
mV	-.773	-.610	1.000	-.234	1.000	-1.000	.123	.092	-.394	-.149	.571	-.206	-.663	.889	.825	-.542	-.790	-.207	.879
cond (mS)	.014	.368	-.234	1.000	-.235	.250	.871	.946	.611	.362	-.424	.756	.874	3.071E-4	-.253	.792	.455	-.239	.241
pe	-.778	-.616	1.000	-.235	1.000	-1.000	.119	.092	-.388	-.141	.565	-.201	-.664	.892	.830	-.546	-.795	-.199	.880
pH	.774	.619	-1.000	.250	-1.000	1.000	-.105	-.076	.398	.148	-.571	.214	.676	-.888	-.830	.557	.799	.196	-.872
dO (‰ VSMOW)	-.035	.411	.123	.871	.119	-.105	1.000	.934	.178	-.040	.067	.415	.646	.163	-.156	.742	.356	-.633	.489
dD (‰ VSMOW)	-.241	.177	.092	.946	.092	-.076	.934	1.000	.493	.318	-.243	.704	.675	.294	.013	.633	.205	-.316	.538
Na	-.244	-.203	-.394	.611	-.388	.398	.178	.493	1.000	.934	-.957	.959	.566	.067	.062	.214	.051	.622	-.009
Mg	-.511	-.536	-.149	.362	-.141	.148	-.040	.318	.934	1.000	-.896	.883	.235	.316	.379	-.143	-.297	.799	.139
Si	.078	.162	.571	-.424	.565	-.571	.067	-.243	-.957	-.896	1.000	-.835	-.507	.134	.061	-.141	-.117	-.743	.270
K	-.365	-.200	-.206	.756	-.201	.214	.415	.704	.959	.883	-.835	1.000	.596	.237	.152	.291	.009	.437	.235
Ca	.459	.667	-.663	.874	-.664	.676	.646	.675	.566	.235	-.507	.596	1.000	-.480	-.660	.924	.795	-.194	-.258
Cl	-.971	-.799	.889	3.071E-4	.892	-.888	.163	.294	.067	.316	.134	.237	-.480	1.000	.948	-.533	-.864	.130	.930
NO3	-.970	-.943	.825	-.253	.830	-.830	-.156	.013	.062	.379	.061	.152	-.660	.948	1.000	-.763	-.976	.371	.767
SO4	.600	.859	-.542	.792	-.546	.557	.742	.633	.214	-.143	-.141	.291	.924	-.533	-.763	1.000	.885	-.545	-.223
HCO3	.897	.960	-.790	.455	-.795	.799	.356	.205	.051	-.297	-.117	.009	.795	-.864	-.976	.885	1.000	-.428	-.635
balance ionique (%)	-.359	-.649	-.207	-.239	-.199	.196	-.633	-.316	.622	.799	-.743	.437	-.194	.130	.371	-.545	-.428	1.000	-.202
TDS (mg/l)	-.834	-.524	.879	.241	.880	-.872	.489	.538	-.009	.139	.270	.235	-.258	.930	.767	-.223	-.635	-.202	1.000

4 observations ont été utilisées dans ce calcul.
Cas omis (manquants).

ANNEXES CHAP 3 : MATRICES DE CORRELATION (Furan/Forez)

Matrice de corrélation Saint-Rambert

	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	dC (‰ VPDB)	Ba	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	F	Cl	NO3	P04	SO4	HCO3	balance ionique (%)	TDS (mg/l)
T ext (°C)	1.000	.990	-.896	.044	-.888	.920	-.956	-.326	-.017	.249	-.199	.351	.539	.427	.564	.279	-.619	-.158	-.342	.396	-.199	-.691	-.166	.700
T eau (°C)	.990	1.000	-.949	-.096	-.943	.965	-.906	-.454	.122	.381	-.333	.218	.416	.549	.444	.143	-.722	-.294	-.469	.520	-.333	-.584	-.302	.594
mV	-.896	-.949	1.000	.405	1.000	-.998	.726	.712	-.429	-.654	.614	.102	-.108	-.785	-.138	.177	.904	.581	.724	-.763	.614	.298	.587	-.310
cond (mS)	.044	-.096	.405	1.000	.421	-.352	-.334	.930	-1.000	-.957	.970	.951	.865	-.884	.850	.972	.757	.980	.924	-.900	.970	-.752	.978	.744
pe	-.888	-.943	1.000	.421	1.000	-.997	.714	.724	-.445	-.667	.628	.119	-.090	-.796	-.121	.195	.911	.595	.736	-.775	.628	.281	.601	-.293
pH	.920	.965	-.998	-.352	-.997	1.000	-.764	-.671	.377	.610	-.568	-.045	.164	.748	.194	-.121	-.878	-.533	-.684	.725	-.568	-.352	-.540	.364
dO (‰ VSMOW)	-.956	-.906	.726	-.334	.714	-.764	1.000	.035	.309	.045	-.096	-.610	-.762	-.144	-.781	-.548	.362	-.138	.052	-.111	-.097	.872	-.130	-.879
dD (‰ VSMOW)	-.326	-.454	.712	.930	.724	-.671	.035	1.000	-.940	-.997	.991	.771	.621	-.994	.597	.817	.944	.985	1.000	-.997	.991	-.458	.986	.447
dC (‰ VPDB)	-.017	.122	-.429	-1.000	-.445	.377	.309	-.940	1.000	.964	-.976	-.942	-.852	.897	-.835	-.965	-.775	-.985	-.934	.911	-.976	.734	-.983	-.726
Ba	.249	.381	-.654	-.957	-.667	.610	.045	-.997	.964	1.000	-.999	-.819	-.682	.982	-.659	-.861	-.915	-.996	-.995	.988	-.999	.528	-.996	-.517
Na	-.199	-.333	.614	.970	.628	-.568	-.096	.991	-.976	-.999	1.000	.847	.718	-.971	.697	.886	.893	.999	.989	-.979	1.000	-.570	.999	.560
Mg	.351	.218	.102	.951	.119	-.045	-.610	.771	-.942	-.819	.847	1.000	.978	-.696	.971	.997	.518	.869	.760	-.720	.848	-.919	.865	.914
Si	.539	.416	-.108	.865	-.090	.164	-.762	.621	-.852	-.682	.718	.978	1.000	-.531	1.000	.959	.328	.747	.608	-.560	.719	-.981	.741	.979
K	.427	.549	-.785	-.884	-.796	.748	-.144	-.994	.897	.982	-.971	-.696	-.531	1.000	-.505	-.749	-.975	-.960	-.996	.999	-.971	.358	-.962	-.346
Ca	.564	.444	-.138	.850	-.121	.194	-.781	.597	-.835	-.659	.697	.971	1.000	-.505	1.000	.950	.299	.726	.583	-.534	.697	-.987	.720	.984
Sr	.279	.143	.177	.972	.195	-.121	-.548	.817	-.965	-.861	.886	.997	.959	-.749	.950	1.000	.582	.904	.807	-.771	.886	-.887	.901	.881
F	-.619	-.722	.904	.757	.911	-.878	.362	.944	-.775	-.915	.893	.518	.328	-.975	.299	.582	1.000	.873	.950	-.966	.893	-.139	.877	.127
Cl	-.158	-.294	.581	.980	.595	-.533	-.138	.985	-.985	-.996	.999	.869	.747	-.960	.726	.904	.873	1.000	.982	-.969	.999	-.604	1.000	.594
NO3	-.342	-.469	.724	.924	.736	-.684	.052	1.000	-.934	-.995	.989	.760	.606	-.996	.583	.807	.950	.982	1.000	-.998	.989	-.443	.983	.431
P04	.396	.520	-.763	-.900	-.775	.725	-.111	-.997	.911	.988	-.979	-.720	-.560	.999	-.534	-.771	-.966	-.969	-.998	1.000	-.979	.389	-.971	-.378
SO4	-.199	-.333	.614	.970	.628	-.568	-.097	.991	-.976	-.999	1.000	.848	.719	-.971	.697	.886	.893	.999	.989	-.979	1.000	-.571	.999	.560
HCO3	-.691	-.584	.298	-.752	.281	-.352	.872	-.458	.734	.528	-.570	-.919	-.981	.358	-.987	-.887	-.139	-.604	-.443	.389	-.571	1.000	-.598	-1.000
balance ionique (%)	-.166	-.302	.587	.978	.601	-.540	-.130	.986	-.983	-.996	.999	.865	.741	-.962	.720	.901	.877	1.000	.983	-.971	.999	-.598	1.000	.587
TDS (mg/l)	.700	.594	-.310	.744	-.293	.364	-.879	.447	-.726	-.517	.560	.914	.979	-.346	.984	.881	.127	.594	.431	-.378	.560	-1.000	.587	1.000

3 observations ont été utilisées dans ce calcul.
2 cas omis (manquants).

Matrice de corrélation Vidrieu

	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	F	Cl	NO3	P04	SO4	HCO3	balance ionique (%)	TDS (mg/l)
T ext (°C)	1.000	.999	.382	.292	.476	.443	.506	.516	.002	.345	.288	.305	.322	.047	.750	-.612	.273	.756	-.246	-.406	.892	.196
T eau (°C)	.999	1.000	.361	.259	.455	.457	.477	.487	-.002	.312	.253	.272	.286	.027	.726	-.606	.239	.737	-.282	-.389	.878	.160
mV	.382	.361	1.000	.294	.995	-.643	.912	.898	-.658	.862	.807	.888	.653	-.290	.457	-.887	.844	.879	.476	-.990	.742	.775
cond (mS)	.292	.259	.294	1.000	.312	.122	.650	.674	.516	.730	.785	.682	.912	.829	.850	.014	.738	.480	.749	-.169	.463	.789
pe	.476	.455	.995	.312	1.000	-.562	.925	.912	-.626	.859	.800	.880	.657	-.271	.518	-.913	.833	.921	.425	-.988	.806	.759
pH	.443	.457	-.643	.122	-.562	1.000	-.393	-.366	.752	-.452	-.430	-.517	-.227	.482	.283	.413	-.487	-.201	-.518	.639	.036	-.469
dO (‰ VSMOW)	.506	.477	.912	.650	.925	-.393	1.000	.999	-.292	.978	.952	.975	.890	.115	.760	-.727	.960	.933	.634	-.857	.835	.921
dD (‰ VSMOW)	.516	.487	.898	.674	.912	-.366	.999	1.000	-.259	.979	.956	.973	.901	.147	.780	-.710	.961	.931	.639	-.840	.839	.924
Na	.002	-.002	-.658	.516	-.626	.752	-.292	-.259	1.000	-.208	-.123	-.273	.120	.898	.316	.751	-.195	-.353	.084	.739	-.220	-.103
Mg	.345	.312	.862	.730	.859	-.452	.978	.979	-.208	1.000	.994	.997	.946	.229	.726	-.590	.997	.838	.781	-.785	.714	.982
Si	.288	.253	.807	.785	.800	-.430	.952	.956	-.123	.994	1.000	.988	.970	.318	.730	-.500	.997	.784	.836	-.717	.658	.995
K	.305	.272	.888	.682	.880	-.517	.975	.973	-.273	.997	.988	1.000	.922	.167	.674	-.615	.996	.830	.782	-.816	.692	.977
Ca	.322	.286	.653	.912	.657	-.227	.890	.901	.120	.946	.970	.922	1.000	.533	.826	-.335	.949	.717	.838	-.546	.630	.966
Sr	.047	.027	-.290	.829	-.271	.482	.115	.147	.898	.229	.318	.167	.533	1.000	.572	.541	.249	-.043	.486	.411	.015	.342
F	.750	.726	.457	.850	.518	.283	.760	.780	.316	.726	.730	.674	.826	.572	1.000	-.364	.692	.775	.404	-.384	.828	.682
Cl	-.612	-.606	-.887	.014	-.913	.413	-.727	-.710	.751	-.590	-.500	-.615	-.335	.541	-.364	1.000	-.543	-.863	-.020	.936	-.809	-.435
NO3	.273	.239	.844	.738	.833	-.487	.960	.961	-.195	.997	.997	.996	.949	.249	.692	-.543	1.000	.794	.826	-.761	.658	.992
P04	.756	.737	.879	.480	.921	-.201	.933	.931	-.353	.838	.784	.830	.717	-.043	.775	-.863	.794	1.000	.315	-.865	.970	.721
SO4	-.246	-.282	.476	.749	.425	-.518	.634	.639	.084	.781	.836	.782	.838	.486	.404	-.020	.826	.315	1.000	-.355	.141	.885
HCO3	-.406	-.389	-.990	-.169	-.988	.639	-.857	-.840	.739	-.785	-.717	-.816	-.546	.411	-.384	.936	-.761	-.865	-.355	1.000	-.737	-.679
balance ionique (%)	.892	.878	.742	.463	.806	.036	.835	.839	-.220	.714	.658	.692	.630	.015	.828	-.809	.658	.970	.141	-.737	1.000	.581
TDS (mg/l)	.196	.160	.775	.789	.759	-.469	.921	.924	-.103	.982	.995	.977	.966	.342	.682	-.435	.992	.721	.885	-.679	.581	1.000

4 observations ont été utilisées dans ce calcul.

Matrice de corrélation Vizézy

	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	F	Cl	NO3	SO4	HCO3	balance ionique (%)	TDS (mg/l)
T ext (°C)	1.000	.851	.123	.047	.146	-.259	.755	.756	-.338	-.392	.374	.065	-.259	-.187	.085	-.364	-.030	-.497	.268	.065	-.078
T eau (°C)	.851	1.000	-.218	-.325	-.194	.024	.788	.654	-.275	-.268	.636	.251	-.102	.005	.207	-.322	-.054	-.464	.546	.130	.034
mV	.123	-.218	1.000	.184	1.000	-.949	.152	-.205	-.529	-.443	-.459	-.063	-.430	-.511	-.610	-.170	-.192	.064	.042	-.649	-.341
cond (mS)	.047	-.325	.184	1.000	.179	.046	-.296	.060	.157	-.069	-.358	-.407	-.125	-.159	-.097	-.003	-.042	.023	-.432	.128	-.122
pe	.146	-.194	1.000	.179	1.000	-.952	.174	-.191	-.544	-.462	-.447	-.068	-.445	-.524	-.613	-.191	-.204	.042	.056	-.642	-.355
pH	-.259	.024	-.949	.046	-.952	1.000	-.273	.162	.494	.378	.238	-.080	.333	.396	.437	.121	.063	-.077	-.158	.624	.233
dO (‰ VSMOW)	.755	.788	.152	-.296	.174	-.273	1.000	.595	-.699	-.540	.173	.085	-.389	-.306	-.200	-.468	-.256	-.467	.611	-.269	-.266
dD (‰ VSMOW)	.756	.654	-.205	.060	-.191	.162	.595	1.000	-.262	-.301	.084	-.054	-.247	-.169	.017	-.358	-.079	-.627	-.045	.182	-.043
Na	-.338	-.275	-.529	.157	-.544	.494	-.699	-.262	1.000	.892	.366	.281	.836	.827	.823	.784	.717	.612	-.434	.416	.759
Mg	-.392	-.268	-.443	-.069	-.462	.378	-.540	-.301	.892	1.000	.386	.594	.978	.953	.780	.930	.721	.773	-.373	.207	.910
Si	.374	.636	-.459	-.358	-.447	.238	.173	.084	.366	.386	1.000	.609	.511	.557	.649	.207	.202	.050	.220	.487	.491
K	.065	.251	-.063	-.407	-.068	-.080	.085	-.054	.281	.594	.609	1.000	.706	.678	.372	.585	.296	.469	.013	-.083	.770
Ca	-.259	-.102	-.430	-.125	-.445	.333	-.389	-.247	.836	.978	.511	.706	1.000	.988	.807	.925	.723	.770	-.231	.156	.953
Sr	-.187	.005	-.511	-.159	-.524	.396	-.306	-.169	.827	.953	.557	.678	.988	1.000	.859	.895	.753	.725	-.134	.165	.950
F	.085	.207	-.610	-.097	-.613	.437	-.200	.017	.823	.780	.649	.372	.807	.859	1.000	.669	.786	.459	-.094	.409	.756
Cl	-.364	-.322	-.170	-.003	-.191	.121	-.468	-.358	.784	.930	.207	.585	.925	.895	.669	1.000	.823	.922	-.248	-.139	.903
NO3	-.030	-.054	-.192	-.042	-.204	.063	-.256	-.079	.717	.721	.202	.296	.723	.753	.786	.823	1.000	.703	-.071	-.148	.760
SO4	-.497	-.464	.064	.023	.042	-.077	-.467	-.627	.612	.773	.050	.469	.770	.725	.459	.922	.703	1.000	-.068	-.357	.702
HCO3	.268	.546	.042	-.432	.056	-.158	.611	-.045	-.434	-.373	.220	.013	-.231	-.134	-.094	-.248	-.071	-.068	1.000	-.448	-.213
balance ionique (%)	.065	.130	-.649	.128	-.642	.624	-.269	.182	.416	.207	.487	-.083	.156	.165	.409	-.139	-.148	-.357	-.448	1.000	.040
TDS (mg/l)	-.078	.034	-.341	-.122	-.355	.233	-.266	-.043	.759	.910	.491	.770	.953	.950	.756	.903	.760	.702	-.213	.040	1.000

9 observations ont été utilisées dans ce calcul.

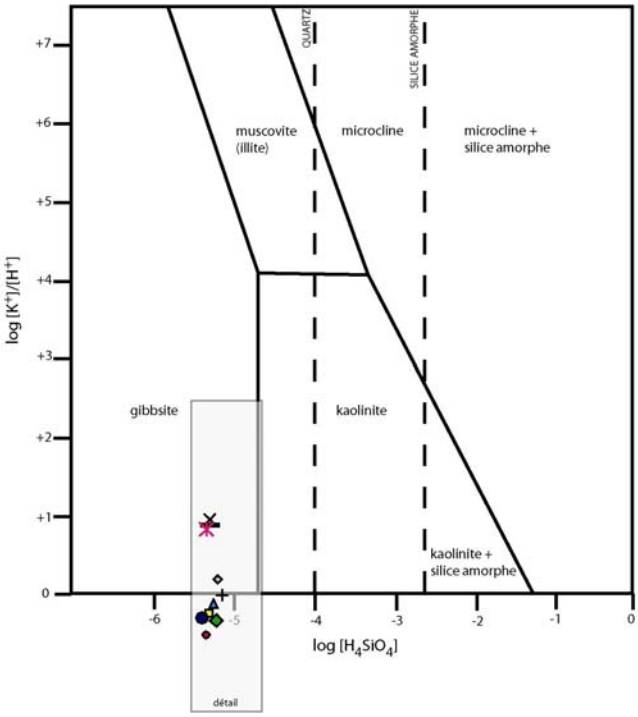
Matrice de corrélation Vollon

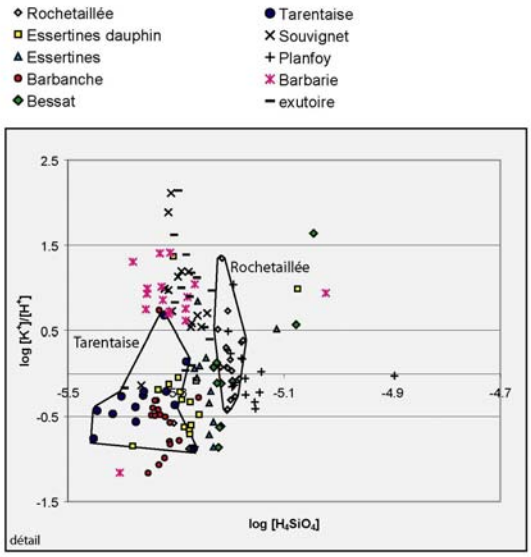
	T ext (°C)	T eau (°C)	mV	cond (mS)	pe	pH	dO (‰ VSMOW)	dD (‰ VSMOW)	dC (‰ VPDB)	Ba	Na	Mg	Si	K	Ca	Sr	F	Cl	NO3	P04	SO4	HCO3	balance ionique (%)	TDS (mg/l)
T ext (°C)	1.000	.999	.448	-.658	.528	-.693	.958	.935	-.956	.993	-.724	-.936	-.743	-.834	-.673	-.858	-.751	-.825	-.583	-.489	.515	-.836	.775	-.737
T eau (°C)	.999	1.000	.491	-.621	.568	-.727	.943	.917	-.969	.986	-.690	-.918	-.710	-.860	-.637	-.832	-.782	-.797	-.544	-.446	.555	-.809	.743	-.703
mV	.448	.491	1.000	.378	.996	-.955	.173	.102	-.690	.340	.292	-.104	.265	-.867	.359	.075	-.927	.135	.465	.561	.997	.116	-.218	.274
cond (mS)	-.658	-.621	.378	1.000	.292	-.087	-.846	-.882	.409	-.742	.996	.882	.993	.134	1.000	.951	-.003	.968	.995	.979	.307	.963	-.986	.994
pe	.528	.568	.996	.292	1.000	-.978	.262	.192	-.753	.425	.203	-.194	.176	-.909	.273	-.016	-.957	.044	.382	.483	1.000	.025	-.128	.185
pH	-.693	-.727	-.955	-.087	-.978	1.000	-.457	-.392	.873	-.604	.005	.394	.033	.976	-.066	.224	.996	.165	-.181	-.290	-.975	.184	-.081	.023
dO (‰ VSMOW)	.958	.943	.173	-.846	.262	-.457	1.000	.997	-.832	.985	-.892	-.998	-.904	-.641	-.857	-.969	-.530	-.953	-.792	-.719	.247	-.958	.924	-.900
dD (‰ VSMOW)	.935	.917	.102	-.882	.192	-.392	.997	1.000	-.790	.970	-.922	-1.000	-.932	-.585	-.892	-.984	-.468	-.972	-.834	-.766	.177	-.976	.949	-.929
dC (‰ VPDB)	-.956	-.969	-.690	.409	-.753	.873	-.832	-.790	1.000	-.916	.491	.791	.515	.959	.428	.670	.911	.624	.321	.212	-.743	.639	-.556	.507
Ba	.993	.986	.340	-.742	.425	-.604	.985	.970	-.916	1.000	-.800	-.970	-.817	-.764	-.755	-.912	-.669	-.886	-.675	-.588	.411	-.895	.843	-.811
Na	-.724	-.690	.292	.996	.203	.005	-.892	-.922	.491	-.800	1.000	.921	1.000	.224	.997	.976	.089	.987	.983	.956	.218	.984	-.997	1.000
Mg	-.936	-.918	-.104	.882	-.194	.394	-.998	-1.000	.791	-.970	.921	1.000	.932	.586	.891	.984	.470	.971	.833	.765	-.179	.976	-.948	.928
Si	-.743	-.710	.265	.993	.176	.033	-.904	-.932	.515	-.817	1.000	.932	1.000	.252	.995	.981	.117	.991	.977	.947	.191	.988	-.999	1.000
K	-.834	-.860	-.867	.134	-.909	.976	-.641	-.585	.959	-.764	.224	.586	.252	1.000	.154	.433	.991	.377	.039	-.073	-.902	.395	-.298	.242
Ca	-.673	-.637	.359	1.000	.273	-.066	-.857	-.892	.428	-.755	.997	.891	.995	.154	1.000	.957	.018	.973	.993	.974	.287	.969	-.989	.996
Sr	-.858	-.832	.075	.951	-.016	.224	-.969	-.984	.670	-.912	.976	.984	.981	.433	.957	1.000	.306	.998	.918	.868	-.001	.999	-.989	.979
F	-.751	-.782	-.927	-.003	-.957	.996	-.530	-.468	.911	-.669	.089	.470	.117	.991	.018	.306	1.000	.247	-.098	-.209	-.952	.266	-.165	.107
Cl	-.825	-.797	.135	.968	.044	.165	-.953	-.972	.624	-.886	.987	.971	.991	.377	.973	.998	.247	1.000	.940	.896	.060	1.000	-.996	.990
NO3	-.583	-.544	.465	.995	.382	-.181	-.792	-.834	.321	-.675	.983	.833	.977	.039	.993	.918	-.098	.940	1.000	.994	.396	.933	-.966	.979
P04	-.489	-.446	.561	.979	.483	-.290	-.719	-.766	.212	-.588	.956	.765	.947	-.073	.974	.868	-.209	.896	.994	1.000	.497	.887	-.930	.950
SO4	.515	.555	.997	.307	1.000	-.975	.247	.177	-.743	.411	.218	-.179	.191	-.902	.287	-.001	-.952	.060	.396	.497	1.000	.040	-.144	.201
HCO3	-.836	-.809	.116	.963	.025	.184	-.958	-.976	.639	-.895	.984	.976	.988	.395	.969	.999	.266	1.000	.933	.887	.040	1.000	-.995	.987
balance ionique (%)	.775	.743	-.218	-.986	-.128	-.081	.924	.949	-.556	.843	-.997	-.948	-.999	-.298	-.989	-.989	-.165	-.996	-.966	-.930	-.144	-.995	1.000	-.998
TDS (mg/l)	-.737	-.703	.274	.994	.185	.023	-.900	-.929	.507	-.811	1.000	.928	1.000	.242	.996	.979	.107	.990	.979	.950	.201	.987	-.998	1.000

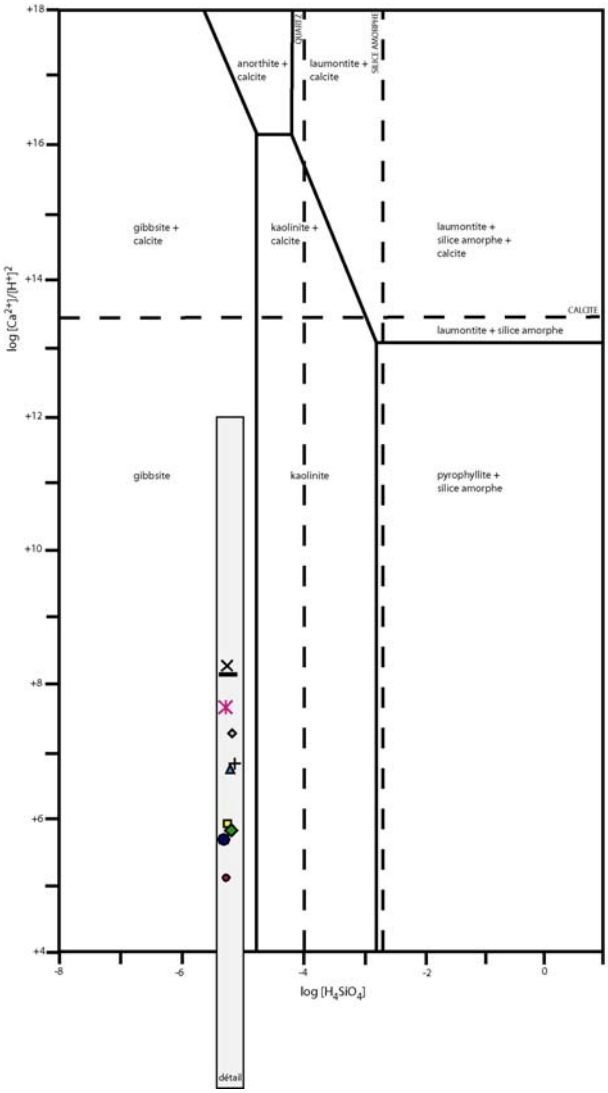
3 observations ont été utilisées dans ce calcul.
Cas omis (manquants).

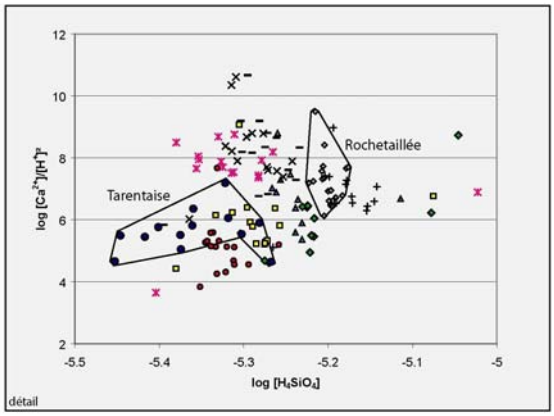
Tab. A.5 : matrices de corrélations – domaine Furan et Forez non minéral ; le seuil de corrélation retenu est fixé à 0,85.

ANNEXES CHAP 3 : Fig. A.3 (diagrammes d'activité - FURAN)

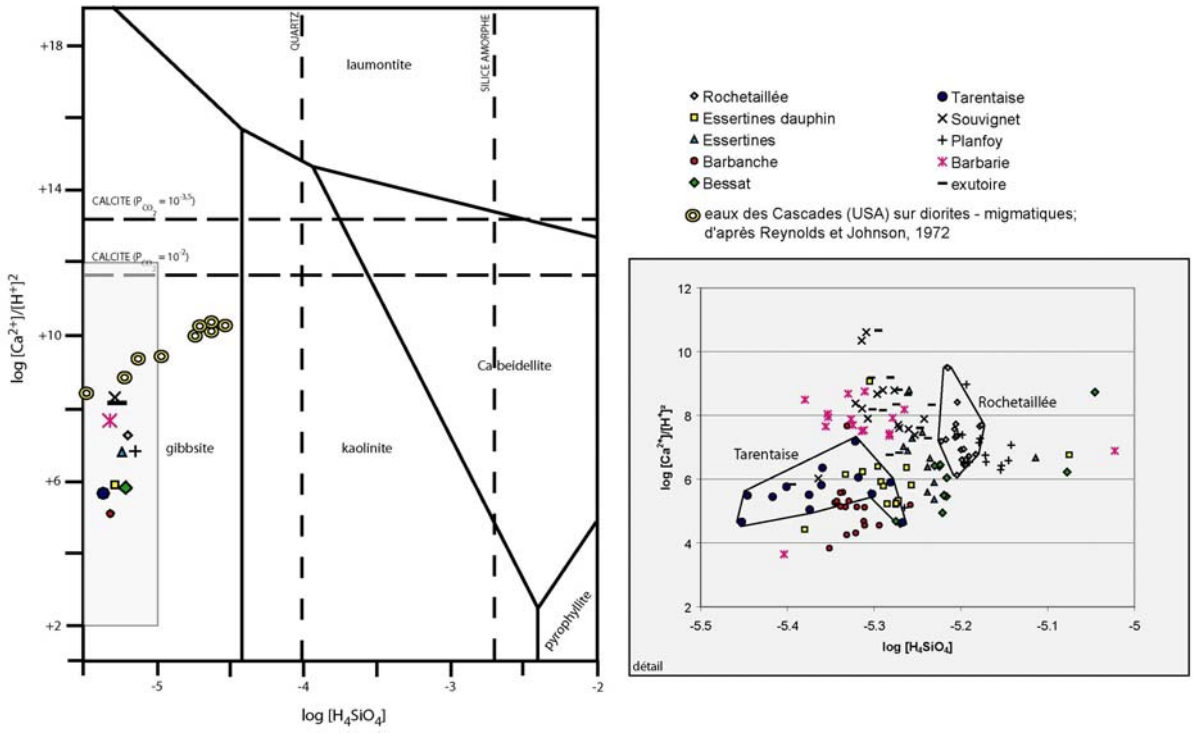


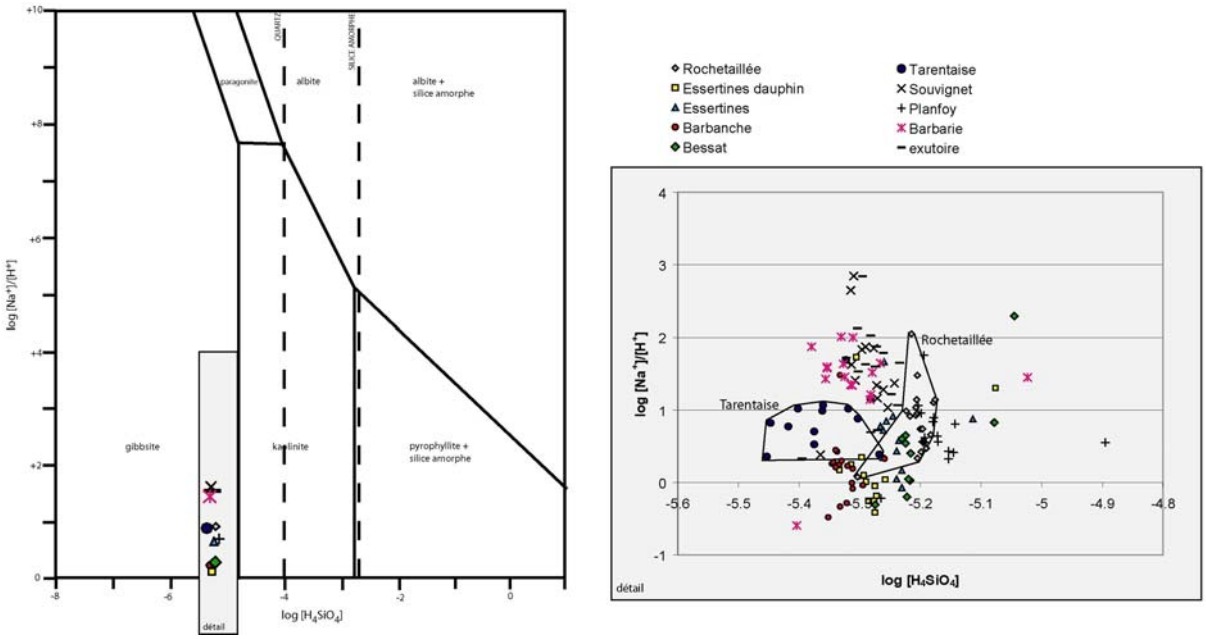




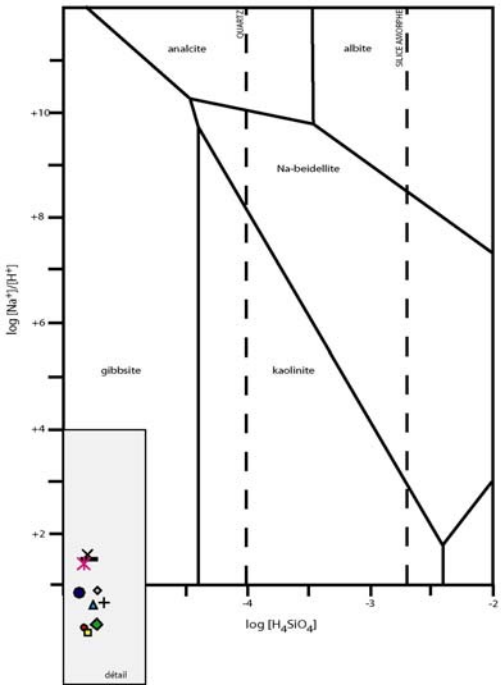


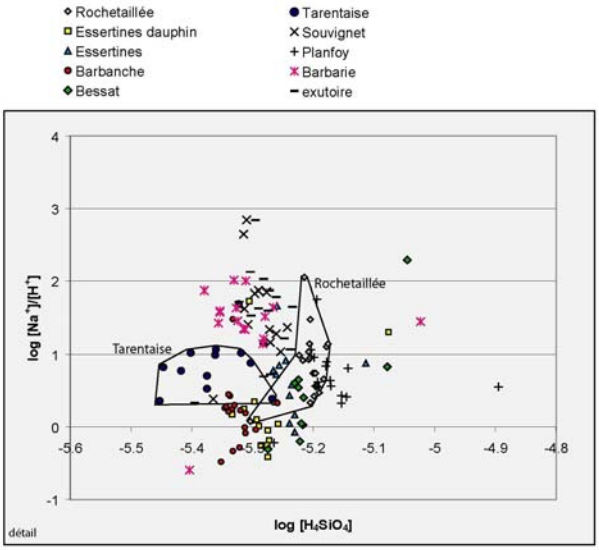
ANNEXES CHAP 3 : Fig. A.3 (diagrammes d'activité - FURAN)

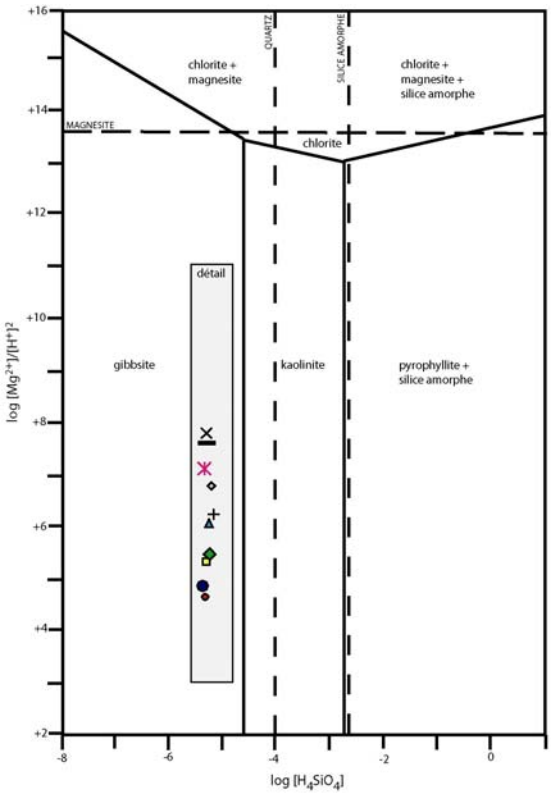


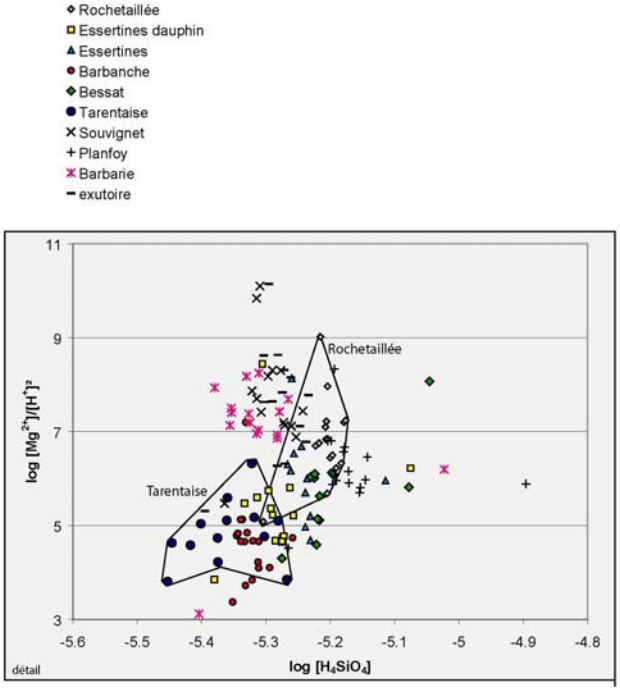


ANNEXES CHAP 3 : Fig. A.3 (diagrammes d'activité - FURAN)









ANNEXES CHAP 3 : Fig. A.3 (diagrammes d'activité - FURAN)

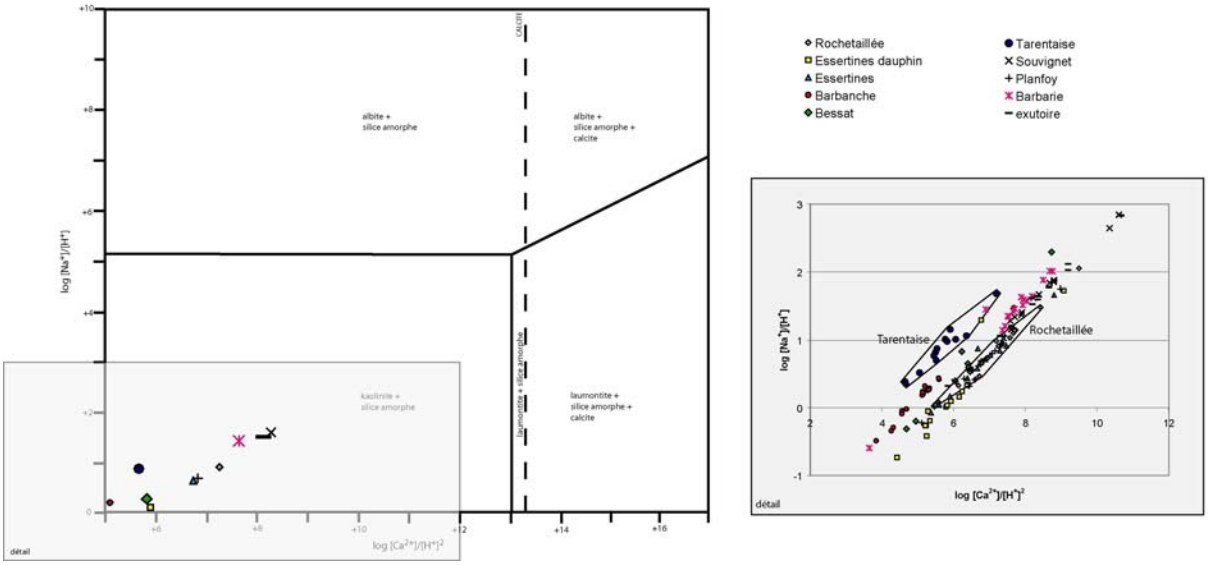
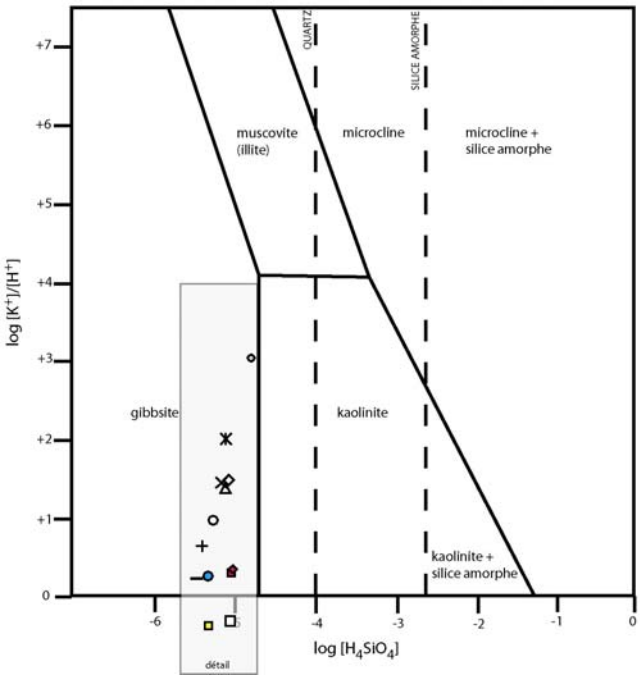
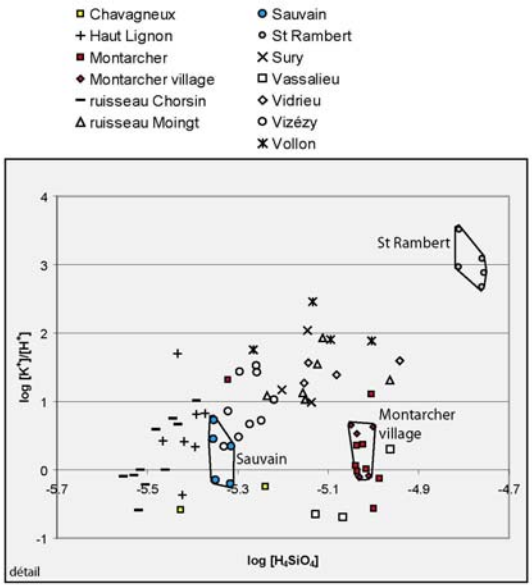
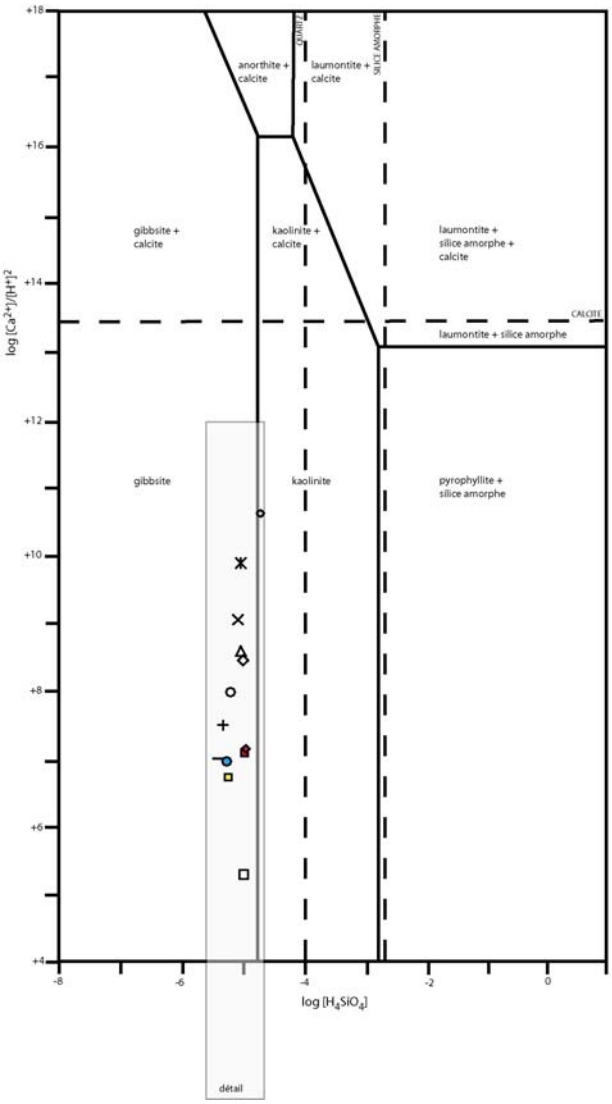


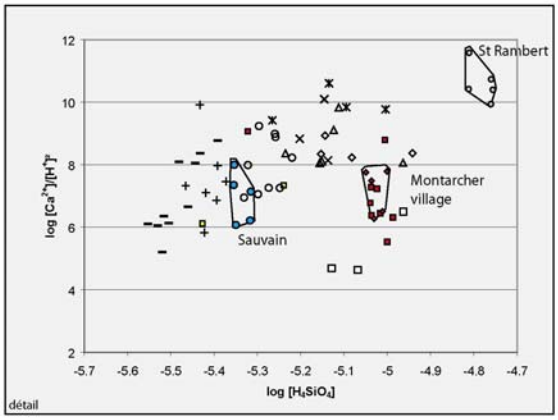
Fig. A.3 : diagrammes d'activités ; lavoirs et ruisseaux du domaine Furan.

ANNEXES CHAP 3 : Fig. A.4 (diagrammes d'activité - FOREZ non minéral)

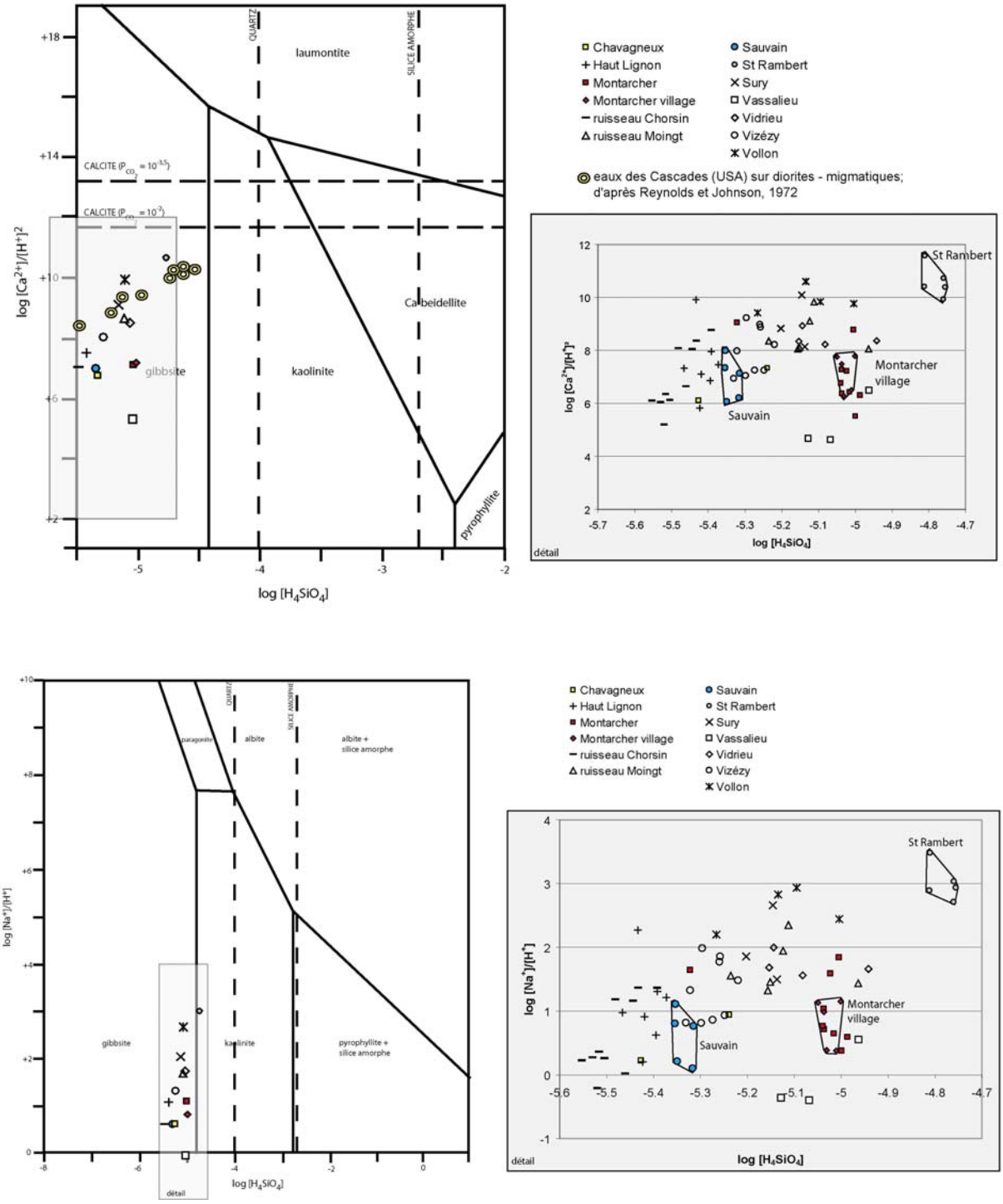




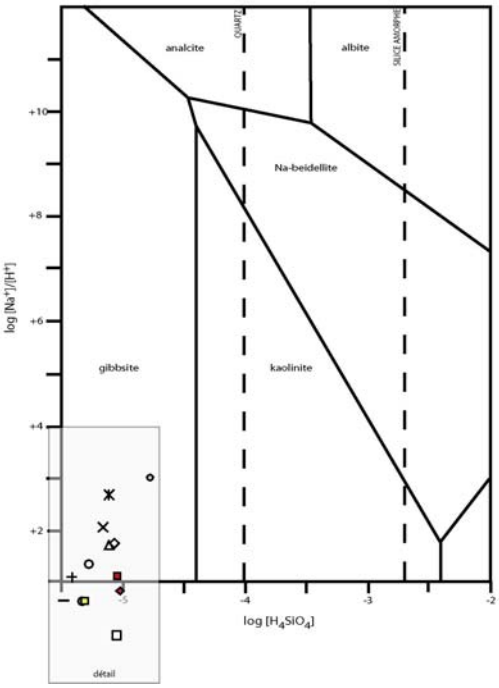


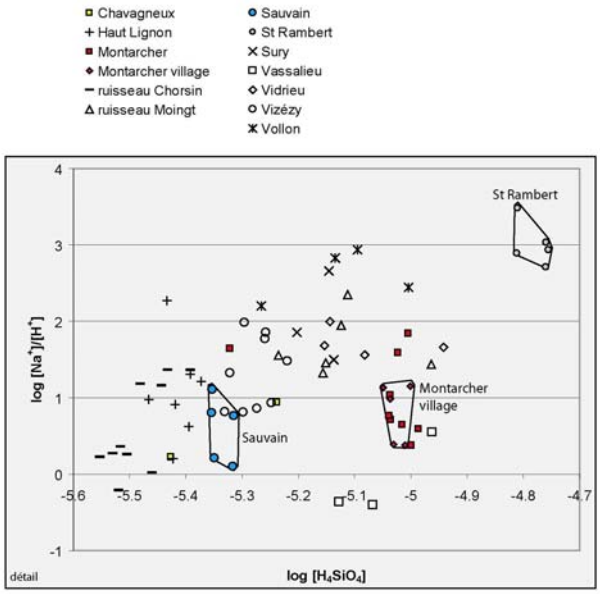


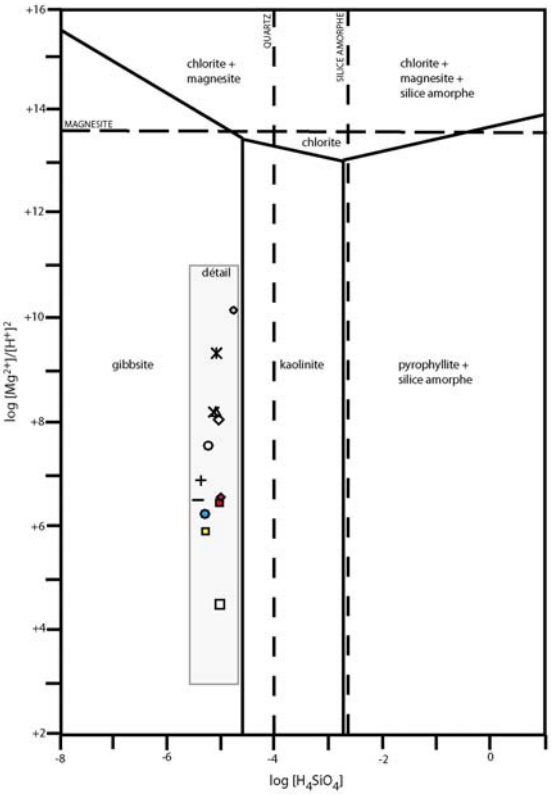
ANNEXES CHAP 3 : Fig. A.4 (diagrammes d'activité - FOREZ non minéral)

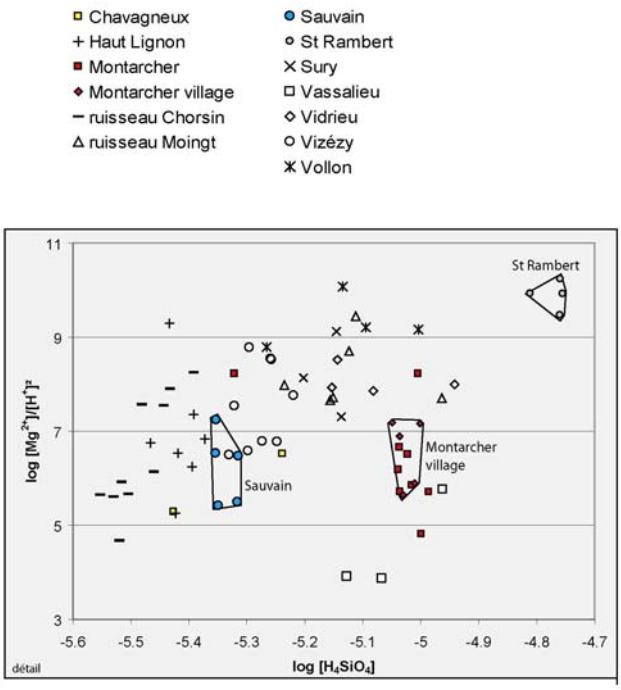


ANNEXES CHAP 3 : Fig. A.4 (diagrammes d'activité - FOREZ non minéral)









ANNEXES CHAP 3 : Fig. A.4 (diagrammes d'activité - FOREZ non minéral)

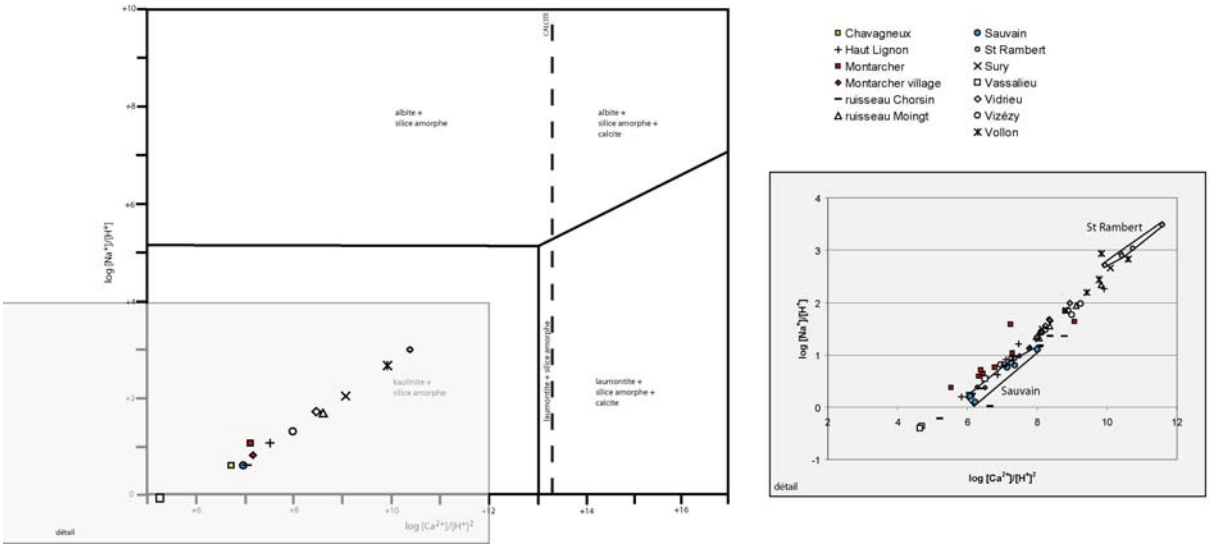


Fig. A.4 : diagrammes d'activités ; lavoirs et ruisseaux du domaine Forez non minéral.

ANNEXES CHAP 3 : Tab. A.6 (indices de saturation Furan/Forez non minéral sans restriction)

Barbanche	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
11/01/2002						-6.62				-61.18					-6.47	0.02
30/01/2002						-6.42				-59.65					-6.27	0.01
18/02/2002						-4.32				-43.25					-4.18	0.01
16/04/2002						-6.46				-60.04					-6.31	-0.02
15/05/2002						-6.37				-59.12					-6.22	-0.06
27/05/2002						-6.52				-60.16					-6.37	-0.07
22/07/2002						-5.47				-51.37					-5.32	-0.03
20/09/2002						-6.04				-56.20					-5.89	-0.11
15/10/2002						-6.08				-56.69					-5.93	-0.08
31/01/2003						-7.09				-64.34					-6.94	0.07
07/03/2003						-6.61				-60.72					-6.46	0.02
14/04/2003						-7.15				-64.34					-7.00	0.03
16/06/2003						-7.05				-63.30					-6.90	-0.08
25/06/2003						-6.48				-59.24					-6.33	-0.10
18/07/2003						-7.32				-65.76					-7.17	-0.13
26/08/2003						-7.24				-64.58					-7.09	-0.14
05/12/2003						-7.84				-69.65					-7.70	-0.05

Barbarie	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
11/01/2002						-4.47				-46.30					-4.32	0.15
30/01/2002						-4.05				-42.08					-3.90	0.00
18/02/2002						-4.95				-48.85					-4.81	0.38
16/04/2002						-4.01				-41.92					-3.86	0.04
15/05/2002						-3.65				-37.98					-3.50	-0.07
27/05/2002						-4.23				-43.56					-4.09	-0.03
22/07/2002						-3.99				-40.61					-3.84	-0.09
20/09/2002						-3.48				-35.20					-3.34	-0.09
15/10/2002						-3.44				-34.66					-3.29	-0.05
31/01/2003						-3.58				-36.81					-3.43	0.11
07/03/2003						-4.23				-43.33					-4.08	0.03
14/04/2003						-4.34				-44.25					-4.20	0.03
16/06/2003						-3.92				-39.17					-3.77	-0.09
25/06/2003						-3.72				-36.90					-3.57	-0.10
18/07/2003						-4.36				-43.63					-4.22	-0.05
26/08/2003						-4.27				-42.72					-4.13	-0.09
05/12/2003						-7.94				-71.91					-7.79	-0.10

Bessat	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
11/01/2002						-5.52				-53.44					-5.37	0.16
30/01/2002						-5.18				-50.43					-5.03	0.11
18/02/2002						-3.33				-35.01					-3.19	0.29
16/04/2002						-5.15				-50.16					-5.00	0.10
15/05/2002						-5.32				-50.49					-5.17	0.23
20/09/2002						-5.06				-48.88					-4.91	0.08
15/10/2002						-5.07				-49.19					-4.92	0.07
31/01/2003						-6.63				-61.00					-6.48	0.13
07/03/2003						-6.51				-60.18					-6.36	0.10
14/04/2003						-6.01				-56.43					-5.86	0.10
16/06/2003						-5.87				-54.89					-5.72	0.00
05/12/2003						-6.74				-62.32					-6.59	0.03

Chavagneux	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
29/08/2002						-3.65				-44.56					-3.51	-0.10
25/03/2003						-4.93				-56.89					-4.79	-0.12
04/05/2003						-5.09				-56.69					-4.94	-0.16

ANNEXES CHAP 3 : Tab. A.6 (indices de saturation Furan/Forez non minéral sans restriction)

Chorsin grange	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
26/10/2001						-5.75				-55.56					-5.60	0.01
20/03/2003						-6.68				-61.09					-6.53	0.02
04/05/2003						-3.91				-39.21					-3.76	0.05

Essertines	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
11/01/2002						-4.53				-49.87					-4.39	0.16
30/01/2002						-4.52				-49.14					-4.37	0.03
18/02/2002						-3.24				-36.69					-3.09	0.14
15/05/2002						-4.68				-49.29					-4.53	0.16
20/09/2002						-3.93				-43.94					-3.78	-0.07
15/10/2002						-4.13				-45.85					-3.98	-0.02
07/03/2003						-5.04				-53.22					-4.89	0.13
14/04/2003						-5.74				-57.87					-5.60	0.10
16/06/2003						-5.20				-53.00					-5.05	-0.14
25/06/2003						-4.49				-46.99					-4.35	-0.17
18/07/2003						-5.65				-55.96					-5.51	-0.18

Essertines dauphin	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
11/01/2002						-5.63				-54.29					-5.48	0.15
30/01/2002						-5.70				-54.55					-5.55	0.06
18/02/2002						-3.56				-34.24					-3.41	0.04
16/04/2002						-5.19				-47.95					-5.04	0.24
27/05/2002						-5.66				-54.24					-5.52	-0.07
22/07/2002						-6.50				-58.87					-6.35	-0.02
20/09/2002						-5.84				-54.11					-5.69	-0.07
15/10/2002						-5.98				-55.28					-5.84	-0.05
07/03/2003						-6.62				-60.40					-6.48	0.05
14/04/2003						-6.63				-60.32					-6.48	0.05
16/06/2003						-6.21				-55.69					-6.06	-0.23
25/06/2003						-5.21				-47.90					-5.07	-0.25
18/07/2003						-6.26				-55.97					-6.11	-0.26
26/08/2003						-5.71				-51.90					-5.56	-0.25
05/12/2003						-7.37				-66.26					-7.22	-0.10

exutoire	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
11/01/2002						-3.54				-39.27					-3.39	0.19
30/01/2002						-3.65				-40.43					-3.50	0.11
18/02/2002						-2.22				-23.01					-2.07	0.11
15/05/2002						-2.87				-31.59					-2.72	-0.07
27/05/2002						-3.46				-38.49					-3.32	-0.07
20/09/2002						-2.81				-30.66					-2.67	-0.10
15/10/2002						-3.22				-34.78					-3.08	0.00
31/01/2003						-3.33				-36.65					-3.18	0.16
07/03/2003						-3.22				-35.26					-3.07	0.10
14/04/2003						-3.47				-38.26					-3.32	0.07
16/06/2003						-4.13				-43.85					-3.98	-0.01
25/06/2003						-3.88				-41.40					-3.73	-0.03
18/07/2003						-4.55				-47.65					-4.41	-0.06
26/08/2003						-4.45				-46.67					-4.30	-0.09
05/12/2003						-5.51				-56.74					-5.37	-0.06

ANNEXES CHAP 3 : Tab. A.6 (indices de saturation Furan/Forez non minéral sans restriction)

Haut Lignon	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
04/02/2003						-3.72				-39.41					-3.58	0.03
20/03/2003						-4.78				-48.84					-4.63	-0.04
09/04/2003						-6.00				-58.27					-5.85	0.00
29/04/2003						-4.62				-46.38					-4.47	-0.18
26/06/2003						-3.75				-39.32					-3.60	-0.28
21/07/2003						-4.14				-43.02					-4.00	-0.25
29/08/2003						-4.95				-47.86					-4.81	-0.23
06/11/2003						-3.03				-29.35					-2.88	-0.08

Montarcher	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
16/09/2001						-3.32				-39.20					-3.18	0.11
26/10/2001						-3.12				-35.89					-2.97	0.27
05/12/2001						-7.91				-74.28					-7.76	0.28
22/01/2002						-5.17				-54.94					-5.02	0.34
01/03/2002						-2.83				-35.89					-2.68	0.17
26/03/2002						-4.45				-50.02					-4.31	0.30
24/04/2002						-2.74				-32.27					-2.60	0.27
23/07/2002						-9.27				-83.65					-9.12	0.15
17/10/2002						-2.74				-34.77					-2.60	-0.06
04/02/2003						-3.78				-44.32					-3.64	0.29
20/03/2003						-4.68				-49.27					-4.53	0.28
29/04/2003						-4.53				-50.14					-4.38	0.24
26/06/2003						-4.97				-54.75					-4.83	0.17
21/07/2003						-3.42				-42.88					-3.28	0.12
29/08/2003						-3.62				-45.14					-3.47	0.14
06/11/2003						-4.17				-46.81					-4.02	0.23

Montarcher village	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
17/10/2002						-3.32				-39.27					-3.18	0.23
29/04/2003						-3.51				-40.17					-3.36	0.23
26/06/2003						-3.50				-39.82					-3.35	0.08
29/08/2003						-4.27				-46.53					-4.12	0.10
06/11/2003						-4.48				-50.69					-4.34	0.25

Planfoy	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
11/01/2002						-5.69				-52.16					-5.54	0.28
30/01/2002						-5.48				-50.01					-5.33	0.16
18/02/2002						-3.88				-34.81					-3.73	0.21
16/04/2002						-5.68				-51.90					-5.53	0.20
15/05/2002						-4.85				-44.58					-4.70	0.11
27/05/2002						-5.60				-48.46					-5.46	0.42
22/07/2002						-5.54				-49.61					-5.39	0.05
20/09/2002						-4.88				-44.32					-4.73	0.07
15/10/2002						-4.87				-44.16					-4.73	0.07
31/01/2003						-4.12				-37.33					-3.97	0.25
07/03/2003						-5.09				-46.59					-4.94	0.19
14/04/2003						-5.41				-49.36					-5.26	0.19
16/06/2003						-5.65				-50.25					-5.50	0.04
25/06/2003						-4.96				-44.47					-4.81	0.02
18/07/2003						-5.54				-49.64					-5.39	0.05
26/08/2003						-5.37				-48.11					-5.23	0.04
05/12/2003						-6.89				-61.00					-6.74	0.05

ANNEXES CHAP 3 : Tab. A.6 (indices de saturation Furan/Forez non minéral sans restriction)

Rochetaillée	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
11/01/2002						-4.61				-45.31					-4.46	0.20
30/01/2002						-4.51				-44.34					-4.36	0.13
18/02/2002						-3.19				-29.63					-3.04	0.14
16/04/2002						-4.19				-41.15					-4.04	0.08
15/05/2002						-4.55				-44.27					-4.41	0.01
27/05/2002						-4.48				-43.52					-4.33	-0.01
22/07/2002						-4.65				-44.44					-4.50	-0.07
20/09/2002						-4.19				-40.32					-4.05	-0.05
15/10/2002						-4.19				-40.26					-4.04	0.05
31/01/2003						-5.60				-53.24					-5.45	0.18
07/03/2003						-3.77				-36.38					-3.63	0.12
14/04/2003						-4.79				-46.23					-4.65	0.10
16/06/2003						-4.75				-44.92					-4.61	-0.07
25/06/2003						-4.03				-38.16					-3.89	-0.09
18/07/2003						-4.91				-46.52					-4.76	-0.08
26/08/2003						-4.79				-45.50					-4.65	-0.09
05/12/2003						-6.01				-56.91					-5.86	-0.02

ruisseau Chorsin	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
05/12/2001						-4.56				-42.88					-4.42	0.06
24/04/2002						-3.66				-38.37					-3.51	-0.12
29/08/2002						-4.04				-40.00					-3.90	-0.25
17/10/2002						-4.31				-40.80					-4.17	-0.14
20/03/2003						-5.86				-54.11					-5.71	-0.11
25/03/2003						-6.08				-55.84					-5.93	-0.16
09/04/2003						-5.77				-56.58					-5.62	-0.12
29/04/2003						-5.78				-54.56					-5.63	-0.20
21/07/2003						-3.60				-39.22					-3.45	-0.29
29/08/2003						-5.08				-49.58					-4.94	-0.25
16/09/2003						-3.80				-36.65					-3.65	0.00
06/11/2003						-6.57				-62.63					-6.43	-0.13

ruisseau Moingt	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
20/03/2003						**-3.31**				**-39.76**					**-3.16**	**0.00**
29/04/2003						-2.84				-33.29					-2.69	-0.03
26/06/2003						-2.37				-27.08					-2.22	-0.07
21/07/2003	-0.39	-1.76	-0.39	0.72	-4.52	-3.10	0.23	-0.85	-2.22	-33.75	6.51	6.18	6.51	5.94	-2.96	0.14
29/08/2003						-3.10				-35.37					-2.95	-0.05
06/11/2003						-3.14				-38.77					-2.99	0.24

ruisseau St Alban	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
20/03/2003						-3.31				-39.76					-3.16	0.00

Sauvain	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
09/04/2003						-5.64				-55.88					-5.50	0.03
29/04/2003						-4.47				-46.14					-4.32	-0.11
26/06/2003						-3.63				-38.83					-3.48	-0.30
21/07/2003						-4.02				-43.54					-3.88	-0.32
29/08/2003						-5.05				-50.95					-4.90	-0.25

ANNEXES CHAP 3 : Tab. A.6 (indices de saturation Furan/Forez non minéral sans restriction)

Souvignet	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
11/01/2002						-4.18				-44.23					-4.04	0.20
30/01/2002						-3.74				-39.94					-3.59	0.06
18/02/2002						-2.40				-23.61					-2.25	0.11
16/04/2002						-3.66				-39.22					-3.51	0.09
15/05/2002						-2.46				-24.15					-2.32	0.00
20/09/2002						-3.30				-34.08					-3.16	-0.04
15/10/2002						-3.29				-34.13					-3.15	0.00
07/03/2003						-3.43				-36.23					-3.29	0.06
14/04/2003						-3.95				-41.74					-3.81	0.06
25/06/2003						-3.81				-38.77					-3.67	-0.05
16/06/2003						-4.04				-41.19					-3.89	-0.07
18/07/2003						-4.06				-41.77					-3.91	-0.03
26/08/2003						-4.20				-42.97					-4.05	-0.04
05/12/2003						-5.48				-55.21					-5.33	-0.04

St Rambert	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
25/03/2003						-0.74				-18.44					-0.59	0.44
04/05/2003						-0.82				-21.53					-0.67	0.43
26/06/2003						0.08				-9.44					0.22	0.28
29/08/2003						-0.52				-15.23					-0.37	0.36
06/11/2003						-0.60				-18.75					-0.46	0.38

Sury	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
25/03/2003						-2.59				-35.03					-2.45	0.09
26/06/2003						-0.98				-23.74					-0.84	-0.16
06/11/2003						-2.52				-40.26					-2.37	0.15

Tarentaise	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
18/02/2002						-5.34				-49.84					-5.19	0.04
16/04/2002						-6.50				-57.79					-6.35	0.05
15/05/2002						-6.85				-61.90					-6.70	-0.14
27/05/2002						-6.87				-61.81					-6.73	-0.12
20/09/2002						-6.49				-57.51					-6.35	-0.18
15/10/2002						-6.48				-57.14					-6.33	-0.10
31/01/2003						-6.69				-60.39					-6.54	-0.03
07/03/2003						-6.87				-61.03					-6.72	-0.02
14/04/2003						-7.30				-64.46					-7.15	-0.03
16/06/2003						-6.06				-53.84					-5.92	-0.23
25/06/2003						-6.54				-56.36					-6.39	-0.23
18/07/2003						-7.40				-62.56					-7.26	-0.19
26/08/2003						-5.77				-51.03					-5.62	-0.30
05/12/2003						-7.67				-67.72					-7.52	-0.15

Vassalieu	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
25/03/2003						-7.01				-64.00					-6.86	0.16
04/05/2003						-6.69				-60.39					-6.54	-0.03
26/06/2003						-5.12				-47.95					-4.97	0.19

Vidrieu	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
26/06/2003						-2.13				-28.71					-1.98	-0.09
21/07/2003	-0.09	-1.47	-0.09	0.61	-4.38	-2.74	-0.07	-0.61	-1.20	-32.11	6.62	6.35	6.62	6.08	-2.60	0.20
29/08/2003	-0.62	-1.98	-0.62	0.55	-4.66	-2.84	-0.46	-0.98	-2.45	-33.77	6.10	5.77	6.10	5.55	-2.69	0.04
06/11/2003						-2.79				-37.34					-2.64	0.24

ANNEXES CHAP 3 : Tab. A.6 (indices de saturation Furan/Forez non minéral sans restriction)

Vizézy	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
05/12/2001						-2.80				-30.13					-2.66	0.11
24/04/2002						-2.60				-30.38					-2.45	-0.06
23/07/2002						-3.60				-37.47					-3.45	-0.07
17/10/2002						-2.83				-31.33					-2.68	-0.05
04/02/2003	-0.62	-1.98	-0.62	0.55	-4.66	-2.84	-0.46	-0.98	-2.45	-33.77	6.10	5.77	6.10	5.55	-2.69	0.04
20/03/2003						-4.81				-48.39					-4.66	0.05
29/04/2003						-3.38				-39.41					-3.24	-0.07
26/06/2003						-3.02				-34.77					-2.87	-0.14
22/07/2003						-3.77				-42.42					-3.62	-0.12
29/08/2003						-3.69				-42.64					-3.54	-0.15
06/11/2003						-4.05				-47.34					-3.91	0.07

Vollon	Albite	Albite_high	Albite_low	Andalusite	Anorthite	Aragonite	Alunite	Analcime	Annite	Anthophyllite	Beidellite-Ca	Beidellite-K	Beidellite-Mg	Beidellite-Na	Calcite	Chalcedony
07/08/2002						-0.12				-10.33					0.02	-0.05
25/03/2003						-0.89				-22.01					-0.75	0.21
04/05/2003						-0.91				-25.31					-0.76	0.04
26/06/2003						-0.41				-12.71					-0.27	0.08
29/08/2003						-1.70				-28.22					-1.55	-0.21
06/11/2003						-1.14				-26.79					-0.99	0.28

ANNEXES CHAP 3 : Tab. A.6 (indices de saturation Furan/Forez non minéral sans restriction)

Barbanche	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
11/01/2002		-0.28	-12.12						-3.67	-7.88							
30/01/2002		-0.29	-11.72						-3.68	-8.00							
18/02/2002		-0.29	-7.53						-3.66	-7.92							
16/04/2002		-0.32	-11.80						-3.67	-8.00							
15/05/2002		-0.36	-11.61						-3.65	-8.02							
27/05/2002		-0.36	-11.91						-3.62	-7.93							
22/07/2002		-0.33	-9.77						-3.44	-7.70							
20/09/2002		-0.41	-10.91						-3.66	-7.97							
15/10/2002		-0.38	-11.00						-3.67	-7.96							
31/01/2003		-0.24	-13.05						-3.55	-7.92							
07/03/2003		-0.28	-12.08						-3.56	-8.01							
14/04/2003		-0.27	-13.16						-3.59	-7.92							
16/06/2003		-0.38	-12.94						-3.62	-8.00							
25/06/2003		-0.39	-11.79						-3.65	-8.01							
18/07/2003		-0.42	-13.54						-3.56	-8.13							
26/08/2003		-0.43	-13.32						-3.68	-8.10							
05/12/2003		-0.35	-14.55						-3.66	-8.07							

Barbarie	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
11/01/2002		-0.16	-7.93						-3.52	-8.07							
30/01/2002		-0.30	-7.04						-3.54	-8.11							
18/02/2002		0.07	-9.01						-3.04	-7.07							
16/04/2002		-0.26	-6.99						-3.54	-8.28							
15/05/2002		-0.37	-6.25						-3.58	-8.18							
27/05/2002		-0.34	-7.39						-3.56	-8.18							
22/07/2002		-0.38	-6.87						-3.52	-7.98							
20/09/2002		-0.38	-5.86						-3.51	-7.93							
15/10/2002		-0.35	-5.77						-3.59	-8.12							
31/01/2003		-0.19	-6.08						-3.54	-8.20							
07/03/2003		-0.27	-7.38						-3.54	-8.22							
14/04/2003		-0.27	-7.61						-3.55	-8.24							
16/06/2003		-0.38	-6.71						-3.59	-8.32							
25/06/2003		-0.39	-6.30						-3.60	-8.37							
18/07/2003		-0.35	-7.61						-3.59	-8.43							
26/08/2003		-0.38	-7.43						-3.55	-8.34							
05/12/2003		-0.40	-14.81						-3.57	-8.24							

Bessat	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
11/01/2002		-0.15	-9.87						-4.17	-9.40							
30/01/2002		-0.19	-9.14						-4.19	-9.20							
18/02/2002		-0.01	-5.72						-3.25	-7.36							
16/04/2002		-0.21	-9.08						-4.27	-9.43							
15/05/2002		-0.07	-9.45						-3.97	-8.47							
20/09/2002		-0.22	-8.88						-4.13	-9.51							
15/10/2002		-0.23	-8.89						-4.15	-9.52							
31/01/2003		-0.18	-12.02						-4.01	-9.26							
07/03/2003		-0.20	-11.78						-4.07	-9.38							
14/04/2003		-0.20	-10.77						-4.05	-9.32							
16/06/2003		-0.30	-10.46						-4.10	-9.53							
05/12/2003		-0.27	-12.26						-4.21	-9.52							

Chavagneux	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
29/08/2002		-0.39	-6.48			-3.04			-2.73	-8.68							
25/03/2003		-0.42	-9.09			-3.27			-2.89	-8.84							
04/05/2003		-0.45	-9.36			-3.06			-2.79	-8.77							

ANNEXES CHAP 3 : Tab. A.6 (indices de saturation Furan/Forez non minéral sans restriction)

Chorsin grange	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
26/10/2001		-0.28	-10.29	-8.16	-4.73			0.57	-4.99	-9.58	2.08						
20/03/2003		-0.28	-12.15						-4.81	-9.44							
04/05/2003		-0.26	-6.62	-5.50	0.59			5.97	-5.00	-9.90	12.86						

Essertines	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
11/01/2002		-0.15	-8.21						-3.59	-9.43							
30/01/2002		-0.27	-8.16						-3.61	-9.46							
18/02/2002		-0.17	-5.56						-3.62	-9.50							
15/05/2002		-0.14	-8.47						-3.46	-9.08							
20/09/2002		-0.36	-7.01						-3.47	-9.41							
15/10/2002		-0.31	-7.40						-3.52	-9.52							
07/03/2003		-0.17	-9.18			-3.23			-3.51	-9.27							
14/04/2003		-0.21	-10.51						-3.58	-9.25							
16/06/2003		-0.42	-9.44						-3.50	-9.40							
25/06/2003		-0.46	-7.98						-3.59	-9.60							
18/07/2003		-0.47	-10.32						-3.56	-9.64							

Essertines dauphin	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
11/01/2002		-0.16	-10.35						-3.66	-9.60							
30/01/2002		-0.25	-10.45						-3.64	-9.57							
18/02/2002		-0.27	-6.16						-3.64	-9.43							
16/04/2002		-0.07	-9.31	-8.30	-5.50			-0.16	-2.89	-7.56	0.60						
27/05/2002		-0.37	-10.40						-3.55	-9.44							
22/07/2002		-0.32	-11.92						-3.44	-8.67							
20/09/2002		-0.37	-10.61						-3.62	-9.51							
15/10/2002		-0.35	-10.91						-3.61	-9.48							
07/03/2003		-0.25	-12.21						-3.49	-9.40							
14/04/2003		-0.25	-12.22						-3.50	-9.39							
16/06/2003		-0.51	-11.32						-3.54	-9.45							
25/06/2003		-0.53	-9.31						-3.54	-9.56							
18/07/2003		-0.54	-11.42						-3.59	-9.80							
26/08/2003		-0.53	-10.35			-4.93			-3.60	-9.57							
05/12/2003		-0.40	-13.70						-3.66	-9.22							

exutoire	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
11/01/2002		-0.12	-6.05						-3.57	-8.49							
30/01/2002		-0.20	-6.23						-3.62	-8.41							
18/02/2002		-0.20	-3.38						-3.64	-8.50							
15/05/2002		-0.36	-4.68						-3.60	-8.52							
27/05/2002		-0.36	-5.88						-3.57	-8.60							
20/09/2002		-0.39	-4.56						-3.61	-8.65							
15/10/2002		-0.30	-5.34						-3.70	-8.70							
31/01/2003		-0.15	-5.58						-3.62	-8.56							
07/03/2003		-0.20	-5.34						-3.62	-8.59							
14/04/2003		-0.23	-5.85						-3.57	-8.63							
16/06/2003		-0.31	-7.15						-3.63	-8.77							
25/06/2003		-0.32	-6.63						-3.64	-8.80							
18/07/2003		-0.36	-7.99						-3.66	-8.92							
26/08/2003		-0.38	-7.78						-3.66	-8.87							
05/12/2003		-0.36	-9.96						-3.68	-8.73							

ANNEXES CHAP 3 : Tab. A.6 (indices de saturation Furan/Forez non minéral sans restriction)

Haut Lignon	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
04/02/2003		-0.27	-6.44						-4.06	-8.63							
20/03/2003		-0.34	-8.54						-4.48	-9.28							
09/04/2003		-0.31	-11.00						-4.47	-9.42							
29/04/2003		-0.48	-8.20						-4.48	-9.34							
26/06/2003		-0.57	-6.45						-4.32	-9.22							
21/07/2003		-0.54	-7.27						-4.23	-8.97							
29/08/2003		-0.52	-8.89						-3.95	-9.27							
06/11/2003		-0.38	-5.09						-4.44	-9.32							

Montarcher	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
16/09/2001		-0.19	-5.60						-4.66	-9.24							
26/10/2001		-0.03	-5.13						-4.32	-9.50							
05/12/2001		-0.02	-14.88						-4.04	-9.31							
22/01/2002		0.04	-9.38						-3.89	-9.24							
01/03/2002		-0.13	-4.79						-4.14	-9.27							
26/03/2002		0.00	-7.90						-3.93	-9.24							
24/04/2002		-0.03	-4.43						-4.21	-9.28							
23/07/2002		-0.14	-17.63						-3.43	-9.32							
17/10/2002		-0.36	-4.71						-4.14	-9.87							
04/02/2003		-0.01	-6.58						-3.80	-8.67							
20/03/2003		-0.02	-8.33						-4.12	-9.43							
29/04/2003		-0.06	-8.10						-4.08	-9.18							
26/06/2003		-0.13	-9.02						-3.67	-9.08							
21/07/2003		-0.17	-5.91						-3.81	-8.81							
29/08/2003		-0.16	-6.28						-3.89	-8.87							
06/11/2003		-0.07	-7.32						-4.01	-9.13							

Montarcher village	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
17/10/2002		-0.07	-5.65						-3.68	-9.41							
29/04/2003		-0.07	-5.98						-3.70	-9.41							
26/06/2003		-0.21	-5.95						-3.68	-9.53							
29/08/2003		-0.19	-7.49						-3.68	-9.68							
06/11/2003		-0.05	-7.99						-3.70	-9.53							

Planfoy	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
11/01/2002		-0.03	-10.44						-3.48	-9.50							
30/01/2002		-0.14	-9.97						-3.51	-9.60							
18/02/2002		-0.10	-6.83						-3.51	-9.58							
16/04/2002		-0.11	-10.39						-3.52	-9.46							
15/05/2002		-0.19	-8.73						-3.55	-9.40							
27/05/2002		0.12	-10.22						-3.54	-9.53							
22/07/2002		-0.24	-10.02						-3.40	-9.15							
20/09/2002		-0.23	-8.75						-3.52	-9.61							
15/10/2002		-0.22	-8.72						-3.48	-8.77							
31/01/2003		-0.06	-7.25						-3.46	-9.42							
07/03/2003		-0.12	-9.17						-3.46	-9.46							
14/04/2003		-0.12	-9.83						-3.45	-9.29							
16/06/2003		-0.25	-10.27						-3.50	-9.49							
25/06/2003		-0.27	-8.90						-3.46	-9.52							
18/07/2003		-0.24	-10.08						-3.50	-9.74							
26/08/2003		-0.26	-9.74						-3.49	-9.73							
05/12/2003		-0.25	-12.77						-3.49	-9.54							

ANNEXES CHAP 3 : Tab. A.6 (indices de saturation Furan/Forez non minéral sans restriction)

Rochetaillée	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
11/01/2002		-0.11	-8.12						-3.81	-9.59							
30/01/2002		-0.18	-7.93						-3.80	-9.51							
18/02/2002		-0.16	-5.27						-3.80	-9.41							
16/04/2002		-0.22	-7.28						-3.77	-9.49							
15/05/2002		-0.29	-7.98						-3.82	-9.19							
27/05/2002		-0.30	-7.83						-3.79	-9.47							
22/07/2002		-0.36	-8.13						-3.73	-9.42							
20/09/2002		-0.34	-7.22						-3.77	-9.62							
15/10/2002		-0.25	-7.21						-3.80	-9.58							
31/01/2003		-0.13	-10.07						-3.77	-9.15							
07/03/2003		-0.19	-6.40						-3.79	-9.39							
14/04/2003		-0.20	-8.44						-3.78	-9.30							
16/06/2003		-0.36	-8.32						-3.79	-9.46							
25/06/2003		-0.37	-6.88						-3.78	-9.49							
18/07/2003		-0.37	-8.65						-3.82	-9.71							
26/08/2003		-0.38	-8.43						-3.80	-9.70							
05/12/2003		-0.32	-10.90						-3.79	-9.30							

ruisseau Chorsin	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
05/12/2001		-0.25	-7.99						-5.12	-10.17							
24/04/2002		-0.42	-6.19						-4.94	-10.10							
29/08/2002		-0.55	-6.98						-4.97	-10.07							
17/10/2002		-0.44	-7.52						-4.94	-10.21							
20/03/2003		-0.41	-10.59						-4.97	-10.06							
25/03/2003		-0.47	-11.02						-5.13	-10.14							
09/04/2003		-0.42	-10.41						-5.18	-10.26							
29/04/2003		-0.50	-10.42						-5.15	-10.33							
21/07/2003		-0.58	-6.49						-3.31	-8.37							
29/08/2003		-0.55	-9.05						-4.55	-10.46							
16/09/2003		-0.31	-6.54						-4.74	-10.41							
06/11/2003		-0.43	-12.09						-4.99	-10.23							

ruisseau Moingt	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
20/03/2003		**-0.30**	**-5.68**						**-3.28**	**-8.52**							
29/04/2003		-0.32	-4.44						-3.66	-8.79							
26/06/2003		-0.36	-3.47						-3.58	-8.71							
21/07/2003	-12.26	-0.15	-4.91	-5.60	-4.90		2.49	0.30	-3.08	-8.51	1.56	5.73	2.40	6.47	1.43	4.65	4.39
29/08/2003		-0.34	-4.94	-5.89	-5.45			-0.26	-3.57	-8.87	0.45						
06/11/2003		-0.06	-5.09						-3.32	-8.55							

ruisseau St Alban	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
20/03/2003		-0.30	-5.68						-3.28	-8.52							

Sauvain	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
09/04/2003		-0.28	-10.34						-4.73	-9.92							
29/04/2003		-0.40	-7.97						-4.70	-9.74							
26/06/2003		-0.59	-6.33						-4.56	-10.04							
21/07/2003		-0.61	-7.19						-4.43	-9.96							
29/08/2003		-0.54	-9.15						-4.63	-10.15							

ANNEXES CHAP 3 : Tab. A.6 (indices de saturation Furan/Forez non minéral sans restriction)

Souvignet	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
11/01/2002		-0.11	-7.31						-3.69	-8.45							
30/01/2002		-0.24	-6.41						-3.68	-8.43							
18/02/2002		-0.20	-3.73						-3.67	-8.36							
16/04/2002		-0.22	-6.25						-3.62	-8.48							
15/05/2002		-0.30	-3.83						-3.70	-8.55							
20/09/2002		-0.34	-5.48						-3.64	-8.32							
15/10/2002		-0.30	-5.47						-3.73	-8.58							
07/03/2003		-0.24	-5.77						-3.66	-8.49							
14/04/2003		-0.25	-6.80						-3.65	-8.54							
25/06/2003		-0.34	-6.45						-3.76	-8.79							
16/06/2003		-0.36	-6.91						-3.71	-8.54							
18/07/2003		-0.33	-6.97						-3.73	-8.82							
26/08/2003		-0.34	-7.27						-3.76	-8.84							
05/12/2003		-0.34	-9.92						-3.69	-8.81							

St Rambert	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
25/03/2003		0.14	-0.30			-2.37			-1.87	-7.10							
04/05/2003		0.13	-0.46			-2.50			-1.96	-7.14							
26/06/2003		0.00	1.34			-2.40			-1.96	-7.22							
29/08/2003		0.07	0.13			-2.48			-1.94	-7.24							
06/11/2003		0.09	-0.05			-2.50			-2.02	-7.28							

Sury	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
25/03/2003		-0.21	-4.27						-3.17	-8.46							
26/06/2003		-0.44	-1.26						-2.38	-7.66							
06/11/2003		-0.15	-4.27						-2.85	-8.22							

Tarentaise	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
18/02/2002		-0.27	-9.95						-3.09	-6.95							
16/04/2002		-0.25	-12.20						-2.76	-6.54							
15/05/2002		-0.44	-12.96						-3.20	-7.01							
27/05/2002		-0.42	-13.01						-3.23	-6.99							
20/09/2002		-0.47	-12.09						-3.33	-7.12							
15/10/2002		-0.40	-12.05						-3.37	-7.30							
31/01/2003		-0.33	-12.63						-3.41	-7.72							
07/03/2003		-0.32	-12.92						-3.56	-7.71							
14/04/2003		-0.33	-13.84						-3.47	-7.69							
16/06/2003		-0.52	-11.35						-3.55	-7.72							
25/06/2003		-0.52	-12.19						-3.73	-7.59							
18/07/2003		-0.48	-13.94						-3.68	-7.45							
26/08/2003		-0.58	-10.64			-4.45			-3.23	-7.68							
05/12/2003		-0.45	-14.59						-3.10	-6.82							

Vassalieu	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
25/03/2003		-0.14	-13.17						-2.91	-8.52							
04/05/2003		-0.33	-12.63						-3.41	-7.72							
26/06/2003		-0.10	-9.32						-2.83	-8.58							

Vidrieu	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
26/06/2003		-0.37	-3.00						-3.30	-8.18							
21/07/2003	-12.00	-0.09	-4.21	-5.41	-4.89		2.44	0.33	-3.04	-8.25	1.62	6.02	2.79	6.48	1.75	4.88	4.69
29/08/2003	-12.69	-0.25	-4.41	-5.59	-5.15		2.47	0.06	-3.27	-8.36	1.08	5.40	2.14	6.22	1.11	4.26	4.01
06/11/2003		-0.07	-4.40						-3.19	-8.13							

ANNEXES CHAP 3 : Tab. A.6 (indices de saturation Furan/Forez non minéral sans restriction)

Vizézy	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
05/12/2001		-0.19	-4.46						-4.14	-9.14							
24/04/2002		-0.35	-4.03						-4.04	-9.05							
23/07/2002		-0.37	-6.00						-4.15	-9.16							
17/10/2002		-0.34	-4.46						-4.09	-9.20							
04/02/2003	-12.69	-0.25	-4.41	-5.59	-5.15		2.47	0.06	-3.27	-8.36	1.08	5.40	2.14	6.22	1.11	4.26	4.01
20/03/2003		-0.25	-8.48						-4.15	-9.16							
29/04/2003		-0.37	-5.59						-4.11	-9.12							
26/06/2003		-0.42	-4.84						-4.07	-9.10							
22/07/2003		-0.41	-6.36						-3.98	-9.05							
29/08/2003		-0.44	-6.20						-3.90	-9.05							
06/11/2003		-0.24	-6.98						-3.95	-9.10							

Vollon	Cordierite_anhyd	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Fe(OH)3	Fluorite	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Illite	K-Feldspar	Kaolinite	Laumontite	Montmor-Ca	Montmor-K
07/08/2002		-0.34	0.79			-2.97			-2.07	-6.93							
25/03/2003		-0.10	-0.72			-2.85			-2.18	-7.58							
04/05/2003		-0.25	-0.80			-3.29			-2.17	-6.56							
26/06/2003		-0.20	0.24			-2.75			-2.05	-7.54							
29/08/2003		-0.50	-2.36			-3.32			-2.13	-7.85							
06/11/2003		-0.02	-1.28			-3.04			-1.99	-7.39							

ANNEXES CHAP 3 : Tab. A.6 (indices de saturation Furan/Forez non minéral sans restriction)

Barbanche	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
11/01/2002					0.31			-1.13				-7.88
30/01/2002					0.30			-1.13				-8.12
18/02/2002					0.30			-1.13				-8.00
16/04/2002					0.27			-1.16				-8.09
15/05/2002					0.23			-1.18				-8.06
27/05/2002					0.22			-1.18				-7.99
22/07/2002					0.25			-1.13				-7.69
20/09/2002					0.17			-1.21				-8.10
15/10/2002					0.20			-1.19				-8.09
31/01/2003					0.36			-1.09				-8.03
07/03/2003					0.31			-1.12				-8.11
14/04/2003					0.32			-1.11				-8.02
16/06/2003					0.20			-1.18				-8.13
25/06/2003					0.19			-1.20				-8.13
18/07/2003					0.16			-1.22				-8.26
26/08/2003					0.15			-1.22				-8.20
05/12/2003					0.24			-1.18				-8.11

Barbarie	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
11/01/2002					0.45			-1.03				-8.03
30/01/2002					0.29			-1.14				-8.05
18/02/2002					0.67			-0.79				-6.91
16/04/2002					0.33			-1.12				-8.24
15/05/2002					0.22			-1.20				-8.11
27/05/2002					0.25			-1.17				-8.21
22/07/2002					0.20			-1.19				-7.99
20/09/2002					0.20			-1.19				-7.92
15/10/2002					0.24			-1.16				-8.09
31/01/2003					0.41			-1.06				-8.10
07/03/2003					0.32			-1.12				-8.16
14/04/2003					0.32			-1.11				-8.21
16/06/2003					0.19			-1.18				-8.34
25/06/2003					0.18			-1.18				-8.39
18/07/2003					0.23			-1.16				-8.35
26/08/2003					0.19			-1.18				-8.20
05/12/2003					0.19			-1.23				-8.16

Bessat	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
11/01/2002					0.45			-1.00				-9.24
30/01/2002					0.40			-1.03				-9.07
18/02/2002					0.58			-0.85				-7.35
16/04/2002					0.38			-1.04				-9.30
15/05/2002					0.52			-0.90				-8.09
20/09/2002					0.37			-1.04				-9.52
15/10/2002					0.35			-1.06				-9.52
31/01/2003					0.41			-1.01				-9.26
07/03/2003					0.39			-1.03				-9.40
14/04/2003					0.39			-1.03				-9.32
16/06/2003					0.28			-1.10				-9.60
05/12/2003					0.31			-1.10				-9.45

Chavagneux	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
29/08/2002					0.18			-1.17				-9.29
25/03/2003					0.17			-1.25				-9.00
04/05/2003					0.12			-1.25				-9.11

ANNEXES CHAP 3 : Tab. A.6 (indices de saturation Furan/Forez non minéral sans restriction)

Chorsin grange	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
26/10/2001					0.30	-3.99		-1.10			-4.35	-9.68
20/03/2003					0.31			-1.13				-9.31
04/05/2003					0.34	-1.82		-1.11				-9.79

Essertines	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
11/01/2002					0.45			-1.01				-9.46
30/01/2002					0.31			-1.10				-9.59
18/02/2002					0.43			-1.02				-9.65
15/05/2002					0.45			-0.96				-8.81
20/09/2002					0.22			-1.15				-9.55
15/10/2002					0.27			-1.12				-9.66
07/03/2003					0.42			-1.02				-9.39
14/04/2003					0.38			-1.04				-9.36
16/06/2003					0.14			-1.19				-9.58
25/06/2003					0.10			-1.22				-9.84
18/07/2003					0.09			-1.22				-9.89

Essertines dauphin	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
11/01/2002					0.44			-1.03				-9.29
30/01/2002					0.35			-1.09				-9.26
18/02/2002					0.33			-1.10				-9.14
16/04/2002					0.52	-4.56		-0.90				-7.22
27/05/2002					0.21			-1.19				-9.17
22/07/2002					0.26			-1.13				-8.33
20/09/2002					0.21			-1.17				-9.21
15/10/2002					0.23			-1.16				-9.18
07/03/2003					0.34			-1.09				-9.12
14/04/2003					0.34			-1.09				-9.14
16/06/2003					0.05			-1.26				-9.32
25/06/2003					0.02			-1.28				-9.45
18/07/2003					0.01			-1.29				-9.58
26/08/2003					0.03			-1.27				-9.57
05/12/2003					0.19			-1.22				-8.70

exutoire	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
11/01/2002					0.48			-0.98				-8.48
30/01/2002					0.40			-1.05				-8.35
18/02/2002					0.40			-1.06				-8.51
15/05/2002					0.22			-1.17				-8.40
27/05/2002					0.22			-1.17				-8.69
20/09/2002					0.19			-1.18				-8.69
15/10/2002					0.28			-1.12				-8.74
31/01/2003					0.45			-1.01				-8.57
07/03/2003					0.39			-1.05				-8.61
14/04/2003					0.36			-1.07				-8.68
16/06/2003					0.27			-1.11				-8.82
25/06/2003					0.25			-1.13				-8.87
18/07/2003					0.22			-1.16				-8.96
26/08/2003					0.19			-1.18				-8.90
05/12/2003					0.23			-1.20				-8.57

ANNEXES CHAP 3 : Tab. A.6 (indices de saturation Furan/Forez non minéral sans restriction)

Haut Lignon	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
04/02/2003					0.33			-1.14				-8.49
20/03/2003					0.25			-1.19				-9.11
09/04/2003					0.29			-1.17				-9.30
29/04/2003					0.10			-1.30				-9.25
26/06/2003					0.00			-1.34				-9.16
21/07/2003					0.03			-1.31				-8.79
29/08/2003					0.05			-1.31				-8.98
06/11/2003					0.21			-1.22				-9.22

Montarcher	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
16/09/2001					0.40			-1.04				-8.95
26/10/2001					0.56			-0.85				-9.62
05/12/2001					0.56			-0.84				-9.33
22/01/2002					0.63			-0.80				-9.34
01/03/2002					0.46			-0.96				-9.19
26/03/2002					0.58			-0.83				-9.33
24/04/2002					0.55			-0.85				-9.39
23/07/2002					0.43			-0.93				-9.32
17/10/2002					0.23			-1.17				-9.57
04/02/2003					0.58			-0.84				-8.69
20/03/2003					0.57			-0.84				-9.42
29/04/2003					0.52			-0.88				-9.29
26/06/2003					0.45			-0.91				-9.44
21/07/2003					0.40			-0.95				-9.45
29/08/2003					0.42			-0.95				-9.50
06/11/2003					0.51			-0.89				-9.21

Montarcher village	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
17/10/2002					0.51			-0.87				-9.32
29/04/2003					0.52			-0.89				-9.25
26/06/2003					0.35			-0.99				-9.43
29/08/2003					0.37			-0.96				-9.59
06/11/2003					0.53			-0.87				-9.40

Planfoy	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
11/01/2002					0.57			-0.90				-9.61
30/01/2002					0.45			-0.98				-9.69
18/02/2002					0.50			-0.95				-9.61
16/04/2002					0.49			-0.96				-9.50
15/05/2002					0.40			-1.02				-9.32
27/05/2002					0.71			-0.71				-9.46
22/07/2002					0.34			-1.05				-9.19
20/09/2002					0.35			-1.04				-9.72
15/10/2002					0.36			-1.04				-8.86
31/01/2003					0.55			-0.92				-9.37
07/03/2003					0.48			-0.96				-9.46
14/04/2003					0.48			-0.96				-9.32
16/06/2003					0.32			-1.05				-9.65
25/06/2003					0.30			-1.06				-9.71
18/07/2003					0.34			-1.04				-9.86
26/08/2003					0.32			-1.05				-9.78
05/12/2003					0.34			-1.08				-9.53

ANNEXES CHAP 3 : Tab. A.6 (indices de saturation Furan/Forez non minéral sans restriction)

Rochetaillée	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
11/01/2002					0.49			-0.97				-9.76
30/01/2002					0.41			-1.01				-9.75
18/02/2002					0.43			-1.00				-9.45
16/04/2002					0.36			-1.04				-9.72
15/05/2002					0.29			-1.09				-9.05
27/05/2002					0.27			-1.10				-9.71
22/07/2002					0.20			-1.14				-9.42
20/09/2002					0.23			-1.13				-9.76
15/10/2002					0.33			-1.06				-9.71
31/01/2003					0.47			-0.98				-9.22
07/03/2003					0.40			-1.02				-9.49
14/04/2003					0.38			-1.03				-9.37
16/06/2003					0.21			-1.13				-9.61
25/06/2003					0.19			-1.14				-9.69
18/07/2003					0.20			-1.14				-9.87
26/08/2003					0.19			-1.15				-9.88
05/12/2003					0.27			-1.14				-9.33

ruisseau Chorsin	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
05/12/2001					0.35			-1.09				-10.11
24/04/2002					0.16			-1.25				-10.16
29/08/2002					0.03			-1.36				-10.05
17/10/2002					0.15			-1.27				-9.98
20/03/2003					0.19			-1.27				-9.74
25/03/2003					0.12			-1.31				-9.83
09/04/2003					0.18			-1.29				-10.18
29/04/2003					0.09			-1.33				-10.16
21/07/2003					-0.01			-1.37				-8.76
29/08/2003					0.03			-1.35				-9.87
16/09/2003					0.29			-1.16				-10.08
06/11/2003					0.16			-1.29				-9.94

ruisseau Moingt	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
20/03/2003					**0.28**			**-1.11**				**-8.29**
29/04/2003					0.26			-1.13				-8.62
26/06/2003					0.20			-1.11				-8.57
21/07/2003	4.72	4.15	8.97	5.26	0.42	-1.63	0.34	-0.92	-1.62	-0.03		-8.07
29/08/2003					0.22	-1.95		-1.11				-8.51
06/11/2003					0.53			-0.92				-8.30

ruisseau St Alban	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
20/03/2003					0.28			-1.11				-8.29

Sauvain	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
09/04/2003					0.32			-1.13				-9.61
29/04/2003					0.17			-1.20				-9.56
26/06/2003					-0.03			-1.34				-9.89
21/07/2003					-0.05			-1.36				-9.78
29/08/2003					0.02			-1.30				-9.92

ANNEXES CHAP 3 : Tab. A.6 (indices de saturation Furan/Forez non minéral sans restriction)

Souvignet	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
11/01/2002					0.49			-0.99				-8.54
30/01/2002					0.35			-1.09				-8.41
18/02/2002					0.40			-1.06				-8.41
16/04/2002					0.38			-1.08				-8.49
15/05/2002					0.28			-1.14				-8.66
20/09/2002					0.25			-1.15				-8.38
15/10/2002					0.28			-1.12				-8.61
07/03/2003					0.35			-1.08				-8.53
14/04/2003					0.35			-1.09				-8.55
25/06/2003					0.23			-1.14				-8.86
16/06/2003					0.21			-1.16				-8.56
18/07/2003					0.25			-1.14				-8.78
26/08/2003					0.24			-1.14				-8.73
05/12/2003					0.25			-1.18				-8.68

St Rambert	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
25/03/2003					0.72			-0.65			-0.69	-6.55
04/05/2003					0.71			-0.66			-0.76	-6.58
26/06/2003					0.56			-0.77			0.10	-6.63
29/08/2003					0.64			-0.70			-0.52	-6.62
06/11/2003					0.66			-0.71			-0.52	-6.60

Sury	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
25/03/2003					0.38			-1.03				-8.51
26/06/2003					0.11			-1.18				-7.78
06/11/2003					0.43			-0.97				-8.10

Tarentaise	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
18/02/2002					0.33			-1.11				-7.29
16/04/2002					0.34			-1.09				-6.91
15/05/2002					0.15			-1.27				-7.62
27/05/2002					0.16			-1.25				-7.60
20/09/2002					0.11			-1.28				-7.79
15/10/2002					0.19			-1.21				-7.92
31/01/2003					0.26			-1.18				-8.17
07/03/2003					0.27			-1.16				-8.14
14/04/2003					0.26			-1.17				-8.11
16/06/2003					0.04			-1.29				-8.39
25/06/2003					0.04			-1.28				-8.28
18/07/2003					0.08			-1.24				-8.17
26/08/2003					-0.02			-1.34				-8.41
05/12/2003					0.14			-1.28				-7.30

Vassalieu	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
25/03/2003					0.44			-0.96				-8.17
04/05/2003					0.26			-1.18				-8.17
26/06/2003					0.47			-0.89				-8.26

Vidrieu	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
26/06/2003					0.19			-1.13				-8.07
21/07/2003	4.96	4.42	9.25	5.45	0.48	-1.27	0.23	-0.87	-1.10	0.44		-7.74
29/08/2003	4.33	3.78	8.67	5.00	0.32	-1.50	0.17	-1.03	-1.89	-0.33		-7.97
06/11/2003					0.53			-0.92				-7.86

ANNEXES CHAP 3 : Tab. A.6 (indices de saturation Furan/Forez non minéral sans restriction)

Vizézy	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
05/12/2001					0.40			-1.03				-8.92
24/04/2002					0.23			-1.16				-8.98
23/07/2002					0.21			-1.15				-9.08
17/10/2002					0.24			-1.14				-8.84
04/02/2003	4.33	3.78	8.67	5.00	0.32	-1.50	0.17	-1.03	-1.89	-0.33		-7.97
20/03/2003					0.34			-1.10				-8.96
29/04/2003					0.21			-1.18				-8.97
26/06/2003					0.14			-1.19				-9.01
22/07/2003					0.15			-1.19				-8.70
29/08/2003					0.13			-1.21				-8.68
06/11/2003					0.36			-1.08				-8.77

Vollon	Montmor-Mg	Montmor-Na	Muscovite	Paragonite	Quartz	Siderite	Sillimanite	SiO2(am)	Smectite-high-Fe-Mg	Smectite-low-Fe-Mg	Strontianite	Sylvite
07/08/2002					0.22			-1.12			-0.42	-7.02
25/03/2003					0.49			-0.94			-0.95	-7.29
04/05/2003					0.32			-1.03			-1.11	-7.02
26/06/2003					0.36			-0.95			-0.64	-7.58
29/08/2003					0.06			-1.25			-2.04	-7.75
06/11/2003					0.57			-0.84			-1.24	-7.32

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Barbanche	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
11/01/2002	react	9.20	11.27	-1	-2.44	-1.0003	0.51	-1	-0.80	-6.58	-0.41	
30/01/2002	react	9.14	11.30	-1	-2.44	-1.0003	0.58	-1	-0.86	-6.74	-0.44	
18/02/2002	react	9.16	11.28	-1	-2.44	-1.0003	0.56	-1	-0.85	-6.68	-0.42	
16/04/2002	react	9.09	11.31	-1	-2.43	-1.0003	0.63	-1	-0.91	-6.51	-0.45	
15/05/2002	react	8.93	11.34	-1	-2.42	-1.0003	0.81	-1	-1.03	-5.87	-0.46	
27/05/2002	react	8.90	11.35	-1	-2.41	-1.0004	0.84	-1	-1.04	-5.73	-0.45	
22/07/2002	react	8.78	11.41	-1	-2.40	-1.0004	0.98	-1	-1.11	-4.66	-0.41	
20/09/2002	react	8.72	11.39	-1	-2.40	-1.0004	1.06	-1	-1.21	-5.25	-0.48	
15/10/2002	react	8.85	11.35	-1	-2.41	-1.0004	0.91	-1	-1.09	-5.70	-0.45	
31/01/2003	react	9.26	11.28	-1	-2.45	-1.0002	0.42	-1	-0.75	-6.96	-0.42	
07/03/2003	react	9.11	11.32	-1	-2.43	-1.0003	0.60	-1	-0.88	-6.47	-0.44	
14/04/2003	react	9.08	11.31	-1	-2.43	-1.0003	0.63	-1	-0.88	-6.28	-0.42	
16/06/2003	react	8.74	11.39	-1	-2.40	-1.0004	1.03	-1	-1.18	-5.24	-0.47	
25/06/2003	react	8.73	11.38	-1	-2.40	-1.0004	1.05	-1	-1.18	-5.22	-0.46	
18/07/2003	react	8.62	11.45	-1	-2.39	-1.0004	1.14	-1	-1.28	-4.98	-0.52	
26/08/2003	react	8.56	11.45	-1	-2.39	-1.0005	1.24	-1	-1.36	-4.83	-0.53	
05/12/2003	react	8.98	11.38	-1	-2.42	-1.0003	0.75	-1	-1.00	-6.09	-0.48	

Barbarie	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
11/01/2002	react	9.57	11.20	-1	-2.47	-1.0001	0.08	-1	-0.46	-7.56	-0.42	
30/01/2002	react	9.20	11.27	-1	-2.44	-1.0003	0.52	-1	-0.75	-6.21	-0.44	
18/02/2002	react	9.50	11.20	-1	-2.45	-1.0002	0.15	-1	-0.33	-5.79	-0.18	
16/04/2002	react	9.32	11.26	-1	-2.45	-1.0002	0.39	-1	-0.69	-6.77	-0.47	
15/05/2002	react	9.05	11.29	-1	-2.43	-1.0003	0.71	-1	-0.90	-5.65	-0.46	
27/05/2002	react	9.07	11.31	-1	-2.43	-1.0003	0.68	-1	-0.88	-5.97	-0.47	
22/07/2002	react	8.82	11.35	-1	-2.40	-1.0004	0.97	-1	-1.04	-4.84	-0.44	
20/09/2002	react	8.84	11.39	-1	-2.41	-1.0004	0.95	-1	-1.05	-4.86	-0.45	
15/10/2002	react	8.88	11.34	-1	-2.41	-1.0004	0.90	-1	-1.02	-5.23	-0.47	
31/01/2003	react	9.46	11.22	-1	-2.46	-1.0001	0.23	-1	-0.57	-6.98	-0.43	
07/03/2003	react	9.18	11.29	-1	-2.44	-1.0003	0.55	-1	-0.78	-6.15	-0.46	
14/04/2003	react	9.14	11.31	-1	-2.44	-1.0003	0.59	-1	-0.83	-6.16	-0.48	
16/06/2003	react	8.58	11.42	-1	-2.39	-1.0005	1.24	-1	-1.30	-4.41	-0.54	
25/06/2003	react	8.51	11.44	-1	-2.38	-1.0005	1.33	-1	-1.36	-4.16	-0.55	
18/07/2003	react	8.68	11.31	-1	-2.40	-1.0004	1.11	-1	-1.24	-4.78	-0.59	
26/08/2003	react	8.57	11.45	-1	-2.39	-1.0005	1.24	-1	-1.31	-4.23	-0.57	
05/12/2003	react	9.00	11.36	-1	-2.43	-1.0003	0.75	-1	-0.93	-5.58	-0.50	

Bessat	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
11/01/2002	react	9.03	11.47	-1	-2.45	-1.0002	0.71	-1	-1.03	-6.85	-0.83	
30/01/2002	react	8.98	11.44	-1	-2.43	-1.0003	0.79	-1	-1.02	-6.54	-0.74	
18/02/2002	react	9.26	11.25	-1	-2.43	-1.0003	0.45	-1	-0.43	-5.56	-0.26	
16/04/2002	react	8.89	11.50	-1	-2.43	-1.0003	0.88	-1	-1.14	-6.54	-0.82	
15/05/2002	react	9.03	11.40	-1	-2.43	-1.0003	0.75	-1	-0.83	-5.53	-0.51	
20/09/2002	react	8.70	11.56	-1	-2.42	-1.0004	1.09	-1	-1.29	-6.12	-0.86	
15/10/2002	react	8.72	11.57	-1	-2.42	-1.0003	1.06	-1	-1.29	-6.29	-0.88	
31/01/2003	react	8.85	11.58	-1	-2.43	-1.0003	0.87	-1	-1.17	-6.70	-0.90	
07/03/2003	react	8.83	11.56	-1	-2.43	-1.0003	0.91	-1	-1.17	-6.64	-0.87	
14/04/2003	react	8.79	11.59	-1	-2.43	-1.0003	0.95	-1	-1.23	-6.53	-0.91	
16/06/2003	react	8.46	11.61	-1	-2.40	-1.0004	1.36	-1	-1.52	-5.24	-0.90	
05/12/2003	react	8.77	11.56	-1	-2.42	-1.0003	1.00	-1	-1.23	-6.29	-0.85	

Chavagneux	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
29/08/2002	react	8.28	10.27	-1	-2.37	-1.0005	1.41	-1	-0.80	-3.40	-0.64	
25/03/2003	react	8.78	-3.52	-1	-2.43	-1.0003	0.80	-1	-0.46	-5.77	-0.74	
04/05/2003	react	8.39	10.28	-1	-2.39	-1.0005	1.25	-1	-0.73	-3.93	-0.70	

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Chorsin grange	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
26/10/2001	react	8.57	11.31	-1	-2.41	-1.0004	1.23	-1	-1.33	-7.08	-0.94	-27.81
20/03/2003	react	9.02	11.48	-1	-2.45	-1.0002	0.76	-1	-1.38	-7.83	-0.90	
04/05/2003	react	8.28	10.27	-1	-2.37	-1.0005	1.41	-1	-0.80	-3.40	-0.64	

Essertines	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
11/01/2002	react	9.22	11.47	-1	-2.46	-1.0002	0.44	-1	-0.60	-7.31	-0.74	
30/01/2002	react	8.78	11.55	-1	-2.42	-1.0003	0.95	-1	-0.95	-5.82	-0.76	
18/02/2002	react	9.17	11.45	-1	-2.45	-1.0002	0.52	-1	-0.66	-7.54	-0.73	
15/05/2002	react	8.86	11.41	-1	-2.42	-1.0004	0.87	-1	-0.71	-4.88	-0.53	
20/09/2002	react	8.40	11.62	-1	-2.39	-1.0005	1.38	-1	-1.25	-4.33	-0.78	
15/10/2002	react	8.59	11.60	-1	-2.40	-1.0004	1.16	-1	-1.10	-5.18	-0.79	
07/03/2003	react	9.01	11.53	-1	-2.44	-1.0002	0.65	-1	-0.75	-6.84	-0.78	
14/04/2003	react	8.87	11.58	-1	-2.43	-1.0003	0.82	-1	-0.90	-6.34	-0.83	
16/06/2003	react	8.10	11.66	-1	-2.36	-1.0005	1.74	-1	-1.51	-3.16	-0.79	
25/06/2003	react	8.04	11.62	-1	-2.35	-1.0006	1.84	-1	-1.62	-2.93	-0.79	
18/07/2003	react	7.98	11.65	-1	-2.34	-1.0006	1.91	-1	-1.67	-2.69	-0.80	

Essertines dauphin	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
11/01/2002	react	9.25	11.52	-1	-2.47	-1.0001	0.39	-1	-1.18	-7.22	-0.84	
30/01/2002	react	9.00	11.58	-1	-2.44	-1.0002	0.67	-1	-1.34	-6.46	-0.83	
18/02/2002	react	8.97	11.51	-1	-2.44	-1.0003	0.75	-1	-1.37	-6.06	-0.77	
16/04/2002	react	9.14	10.86	-1	-2.43	-1.0003	0.53	-1	-0.81	-4.34	-0.25	-29.70
27/05/2002	react	8.64	11.65	-1	-2.41	-1.0004	1.07	-1	-1.58	-5.23	-0.82	
22/07/2002	react	8.70	11.58	-1	-2.41	-1.0004	1.04	-1	-1.48	-4.60	-0.68	
20/09/2002	react	8.50	11.66	-1	-2.40	-1.0004	1.26	-1	-1.74	-4.63	-0.84	
15/10/2002	react	8.55	11.67	-1	-2.40	-1.0004	1.20	-1	-1.72	-4.80	-0.87	
07/03/2003	react	8.87	11.63	-1	-2.43	-1.0003	0.78	-1	-1.38	-5.98	-0.82	
14/04/2003	react	8.83	11.63	-1	-2.43	-1.0003	0.84	-1	-1.43	-5.87	-0.83	
16/06/2003	react	7.98	11.67	-1	-2.34	-1.0006	1.88	-1	-2.19	-2.73	-0.82	
25/06/2003	react	7.95	11.60	-1	-2.33	-1.0006	1.85	-1	-2.20	-2.83	-0.82	
18/07/2003	react	7.90	11.63	-1	-2.33	-1.0006	1.85	-1	-2.32	-3.01	-0.95	
26/08/2003	react	7.98	11.51	-1	-2.33	-1.0006	1.78	-1	-2.21	-3.22	-0.85	
05/12/2003	react	8.65	11.73	-1	-2.42	-1.0004	1.00	-1	-1.53	-5.46	-0.85	

exutoire	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
11/01/2002	react	9.35	11.29	-1	-2.46	-1.0002	0.33	-1	-0.40	-7.17	-0.54	
30/01/2002	react	9.30	11.45	-1	-2.45	-1.0002	0.41	-1	-0.43	-6.80	-0.51	
18/02/2002	react	9.31	11.28	-1	-2.45	-1.0002	0.40	-1	-0.46	-7.06	-0.53	
15/05/2002	react	8.75	11.37	-1	-2.40	-1.0004	1.05	-1	-0.88	-4.81	-0.54	
27/05/2002	react	8.70	11.43	-1	-2.40	-1.0004	1.09	-1	-0.93	-5.14	-0.60	
20/09/2002	react	8.54	11.45	-1	-2.39	-1.0005	1.28	-1	-1.07	-4.56	-0.61	
15/10/2002	react	8.78	11.40	-1	-2.41	-1.0004	1.02	-1	-0.91	-5.43	-0.61	
31/01/2003	react	9.35	11.32	-1	-2.46	-1.0002	0.34	-1	-0.43	-7.35	-0.57	
07/03/2003	react	9.18	11.33	-1	-2.45	-1.0002	0.54	-1	-0.56	-6.73	-0.57	
14/04/2003	react	9.06	11.37	-1	-2.44	-1.0003	0.66	-1	-0.65	-6.46	-0.60	
16/06/2003	react	8.64	11.47	-1	-2.40	-1.0004	1.15	-1	-1.01	-4.98	-0.65	
25/06/2003	react	8.61	11.47	-1	-2.40	-1.0004	1.19	-1	-1.04	-4.95	-0.66	
18/07/2003	react	8.55	11.54	-1	-2.40	-1.0004	1.23	-1	-1.13	-4.96	-0.75	
26/08/2003	react	8.41	11.55	-1	-2.39	-1.0005	1.39	-1	-1.23	-4.47	-0.75	
05/12/2003	react	8.98	11.45	-1	-2.43	-1.0003	0.74	-1	-0.75	-5.91	-0.66	

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Haut Lignon	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
04/02/2003	react	9.43	11.23	-1	-2.47	-1.0001	0.28	-1	-0.67	-7.89	-0.54	
20/03/2003	react	9.13	11.35	-1	-2.45	-1.0002	0.64	-1	-1.11	-7.63	-0.76	
09/04/2003	react	9.20	11.40	-1	-2.46	-1.0002	0.54	-1	-1.19	-8.12	-0.85	
29/04/2003	react	8.79	11.44	-1	-2.42	-1.0004	1.04	-1	-1.51	-6.62	-0.80	
26/06/2003	react	8.26	11.50	-1	-2.36	-1.0005	1.65	-1	-1.65	-4.57	-0.76	
21/07/2003	react	8.35	11.45	-1	-2.37	-1.0005	1.55	-1	-1.53	-4.44	-0.63	
29/08/2003	react	8.36	11.56	-1	-2.38	-1.0005	1.51	-1	-1.95	-4.30	-0.82	
06/11/2003	react	9.06	11.31	-1	-2.44	-1.0002	0.73	-1	-1.21	-7.44	-0.78	

Montarcher	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
16/09/2001	react	7.80	11.55	-1	-2.44	-1.0002	1.21	-1	-1.55	-5.22	-2.31	
26/10/2001	react	8.75	11.45	-1	-2.42	-1.0003	1.00	-1	-0.59	-6.72	-0.79	
05/12/2001	react	7.68	12.63	-1	-2.42	-1.0004	1.44	-1	-1.50	-4.19	-2.03	
22/01/2002	react	8.45	11.87	-1	-2.43	-1.0003	0.98	-1	-0.81	-5.84	-1.33	
01/03/2002	react	8.72	11.56	-1	-2.43	-1.0003	0.96	-1	-0.62	-6.43	-0.90	
26/03/2002	react	7.88	12.41	-1	-2.42	-1.0004	1.35	-1	-1.17	-4.39	-1.82	
24/04/2002	react	8.74	11.36	-1	-2.41	-1.0004	1.04	-1	-0.56	-6.32	-0.74	
23/07/2002	react	7.03	12.98	-1	-2.38	-1.0005	1.97	-1	-2.07	-1.08	-2.33	
17/10/2002	react	8.65	11.53	-1	-2.41	-1.0004	1.11	-1	-0.93	-6.02	-0.87	
04/02/2003	react	8.90	11.48	-1	-2.43	-1.0003	0.72	-1	-0.25	-6.83	-0.68	
20/03/2003	react	8.76	11.48	-1	-2.42	-1.0003	0.94	-1	-0.69	-6.35	-0.78	
29/04/2003	react	8.73	11.41	-1	-2.42	-1.0004	0.98	-1	-0.47	-6.07	-0.70	
26/06/2003	react	8.36	-3.04	-1	-2.38	-1.0005	1.35	-1	-0.40	-4.32	-0.63	
21/07/2003	react	8.50	11.35	-1	-2.38	-1.0005	1.33	-1	-0.23	-4.45	-0.39	
29/08/2003	react	8.55	11.36	-1	-2.38	-1.0005	1.24	-1	-0.12	-4.85	-0.43	
06/11/2003	react	8.60	11.64	-1	-2.41	-1.0004	1.08	-1	-0.63	-5.91	-0.85	

Montarcher village	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
17/10/2002	react	8.47	11.66	-1	-2.40	-1.0004	1.20	-1	-0.72	-5.04	-0.86	
29/04/2003	react	8.64	11.66	-1	-2.42	-1.0004	1.03	-1	-0.74	-5.49	-0.87	
26/06/2003	react	8.08	11.71	-1	-2.36	-1.0005	1.70	-1	-1.16	-3.41	-0.86	
29/08/2003	react	7.90	11.89	-1	-2.36	-1.0005	1.80	-1	-1.31	-3.19	-1.07	
06/11/2003	react	8.34	11.95	-1	-2.42	-1.0004	1.16	-1	-0.71	-5.04	-1.19	

Planfoy	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
11/01/2002	react	9.32	11.37	-1	-2.47	-1.0001	0.37	-1	-1.31	-7.39	-0.77	
30/01/2002	react	9.01	11.43	-1	-2.44	-1.0003	0.73	-1	-1.56	-6.26	-0.79	
18/02/2002	react	9.18	11.38	-1	-2.45	-1.0002	0.53	-1	-1.43	-6.76	-0.78	
16/04/2002	react	9.15	11.38	-1	-2.45	-1.0002	0.57	-1	-1.44	-6.53	-0.76	
15/05/2002	react	8.93	11.39	-1	-2.43	-1.0003	0.85	-1	-1.61	-5.44	-0.73	
27/05/2002	react	8.75	11.58	-1	-2.43	-1.0003	0.96	-1	-1.82	-5.22	-0.97	
22/07/2002	react	8.67	11.61	-1	-2.41	-1.0004	1.14	-1	-1.86	-4.59	-0.79	
20/09/2002	react	8.64	11.49	-1	-2.41	-1.0004	1.16	-1	-1.87	-4.94	-0.81	
15/10/2002	react	8.75	11.61	-1	-2.41	-1.0004	1.04	-1	-1.83	-5.16	-0.83	
31/01/2003	react	9.27	11.40	-1	-2.46	-1.0001	0.41	-1	-1.35	-7.07	-0.79	
07/03/2003	react	9.05	11.45	-1	-2.44	-1.0002	0.67	-1	-1.51	-6.27	-0.78	
14/04/2003	react	9.02	11.44	-1	-2.44	-1.0002	0.70	-1	-1.53	-6.22	-0.79	
16/06/2003	react	8.48	11.49	-1	-2.39	-1.0004	1.35	-1	-1.99	-4.28	-0.80	
25/06/2003	react	8.39	11.50	-1	-2.38	-1.0005	1.45	-1	-2.05	-3.96	-0.80	
18/07/2003	react	8.42	11.60	-1	-2.39	-1.0004	1.38	-1	-2.13	-4.43	-0.97	
26/08/2003	react	8.35	11.60	-1	-2.39	-1.0005	1.46	-1	-2.17	-4.01	-0.94	
05/12/2003	react	8.86	11.47	-1	-2.43	-1.0003	0.90	-1	-1.70	-5.62	-0.83	

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Rochetaillée	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
11/01/2002	react	9.12	11.44	-1	-2.45	-1.0002	0.60	-1	-1.12	-8.09	-0.85	
30/01/2002	react	8.90	11.47	-1	-2.43	-1.0003	0.86	-1	-1.28	-6.93	-0.83	
18/02/2002	react	9.04	11.41	-1	-2.44	-1.0002	0.72	-1	-1.16	-6.80	-0.78	
16/04/2002	react	8.77	11.47	-1	-2.42	-1.0003	1.02	-1	-1.37	-6.20	-0.81	
15/05/2002	react	8.64	11.46	-1	-2.40	-1.0004	1.19	-1	-1.44	-4.78	-0.74	
27/05/2002	react	8.51	11.51	-1	-2.39	-1.0004	1.33	-1	-1.59	-5.02	-0.81	
22/07/2002	react	8.24	11.58	-1	-2.37	-1.0005	1.64	-1	-1.80	-3.64	-0.81	
20/09/2002	react	8.33	11.54	-1	-2.38	-1.0005	1.54	-1	-1.76	-4.20	-0.84	
15/10/2002	react	8.55	11.52	-1	-2.40	-1.0004	1.27	-1	-1.56	-5.15	-0.83	
31/01/2003	react	8.65	11.94	-1	-2.45	-1.0002	0.87	-1	-1.55	-6.34	-1.36	
07/03/2003	react	8.88	11.00	-1	-2.43	-1.0003	0.88	-1	-1.28	-6.59	-0.81	
14/04/2003	react	8.74	11.52	-1	-2.42	-1.0003	1.03	-1	-1.41	-5.92	-0.86	
16/06/2003	react	8.19	11.56	-1	-2.36	-1.0005	1.71	-1	-1.87	-3.66	-0.84	
25/06/2003	react	8.16	11.51	-1	-2.36	-1.0005	1.73	-1	-1.88	-3.57	-0.80	
18/07/2003	react	8.14	11.63	-1	-2.37	-1.0005	1.74	-1	-2.00	-3.79	-0.97	
26/08/2003	react	8.09	11.61	-1	-2.36	-1.0005	1.79	-1	-2.04	-3.61	-0.96	
05/12/2003	react	8.75	11.51	-1	-2.42	-1.0003	1.03	-1	-1.38	-5.67	-0.82	

ruisseau Chorsin	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
05/12/2001	react	8.88	11.48	-1	-2.44	-1.0002	0.94	-1	-1.74	-8.18	-1.15	
24/04/2002	react	8.76	11.51	-1	-2.43	-1.0003	1.10	-1	-1.39	-7.51	-1.07	
29/08/2002	react	8.53	11.49	-1	-2.40	-1.0004	1.38	-1	-1.87	-6.67	-1.03	
17/10/2002	react	8.75	11.46	-1	-2.42	-1.0003	1.10	-1	-1.87	-7.39	-1.03	
20/03/2003	react	9.05	11.44	-1	-2.46	-1.0002	0.76	-1	-1.89	-8.06	-1.11	
25/03/2003	react	8.76	11.51	-1	-2.43	-1.0003	1.10	-1	-1.39	-7.51	-1.07	
09/04/2003	react	9.09	11.82	-1	-2.46	-1.0001	0.70	-1	-1.56	-8.93	-1.18	
29/04/2003	react	8.74	11.50	-1	-2.43	-1.0003	1.13	-1	-1.94	-7.47	-1.07	
21/07/2003	react	8.58	-3.50	-1	-2.38	-1.0005	1.26	-1	-1.40	-4.12	-0.49	
29/08/2003	react	8.29	11.69	-1	-2.39	-1.0004	1.60	-1	-2.25	-5.40	-1.24	
16/09/2003	react	8.93	11.51	-1	-2.45	-1.0002	0.83	-1	-1.65	-8.12	-1.16	
06/11/2003	react	8.96	11.51	-1	-2.45	-1.0002	0.84	-1	-1.65	-7.85	-1.13	

ruisseau Moingt	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
29/08/2003	react	8.46	11.51	-1	-2.38	-1.0005	1.30	-1	-0.73	-4.22	-0.61	
25/03/2003	react	8.88	11.46	-1	-2.43	-1.0003	0.83	-1	-0.63	-5.94	-0.66	
29/04/2003	react	8.62	11.53	-1	-2.40	-1.0004	1.13	-1	-0.69	-5.04	-0.67	
26/06/2003	react	8.01	11.59	-1	-2.34	-1.0006	1.84	-1	-1.13	-2.72	-0.66	
21/07/2003	react	8.09	11.38	-1	-2.36	-1.0005	1.61	-1	-0.96	-2.00	-0.71	-24.36
29/08/2003	react	8.08	11.38	-1	-2.36	-1.0005	1.69	-1	-1.09	-2.96	-0.77	-25.80
06/11/2003	react	9.13	11.43	-1	-2.45	-1.0002	0.46	-1	0.01	-6.28	-0.65	

ruisseau St Alban	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
20/03/2003	react	8.08	11.38	-1	-2.36	-1.0005	1.69	-1	-1.09	-2.96	-0.77	-25.80

Sauvain	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
09/04/2003	react	8.95	11.59	-1	-2.45	-1.0002	0.80	-1	-1.39	-7.78	-1.01	
29/04/2003	react	8.41	11.66	-1	-2.39	-1.0004	1.44	-1	-1.68	-5.93	-0.97	
26/06/2003	react	8.13	11.42	-1	-2.34	-1.0006	1.64	-1	-1.80	-5.26	-0.93	
21/07/2003	react	8.05	11.45	-1	-2.34	-1.0006	1.75	-1	-1.83	-4.70	-0.90	
29/08/2003	react	7.98	11.65	-1	-2.35	-1.0006	1.91	-1	-2.12	-4.56	-1.07	

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Souvignet	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
11/01/2002	react	9.50	11.27	-1	-2.47	-1.0001	0.16	-1	-0.44	-8.27	-0.53	
30/01/2002	react	9.22	11.31	-1	-2.45	-1.0002	0.49	-1	-0.65	-6.81	-0.52	
18/02/2002	react	9.38	11.25	-1	-2.46	-1.0002	0.32	-1	-0.52	-7.40	-0.49	
16/04/2002	react	9.32	11.29	-1	-2.46	-1.0002	0.38	-1	-0.59	-7.16	-0.53	
15/05/2002	react	8.99	11.35	-1	-2.43	-1.0003	0.76	-1	-0.86	-6.42	-0.56	
20/09/2002	react	8.80	11.49	-1	-2.41	-1.0004	0.99	-1	-1.03	-5.45	-0.58	
15/10/2002	react	8.85	11.40	-1	-2.42	-1.0004	0.92	-1	-0.97	-5.84	-0.59	
07/03/2003	react	9.16	11.33	-1	-2.44	-1.0002	0.57	-1	-0.71	-6.73	-0.54	
14/04/2003	react	9.15	11.37	-1	-2.44	-1.0002	0.56	-1	-0.72	-6.79	-0.57	
16/06/2003	react	8.56	11.48	-1	-2.39	-1.0005	1.26	-1	-1.21	-4.62	-0.60	
25/06/2003	react	8.53	11.49	-1	-2.39	-1.0005	1.29	-1	-1.26	-4.85	-0.65	
18/07/2003	react	8.66	11.50	-1	-2.40	-1.0004	1.12	-1	-1.17	-5.28	-0.68	
26/08/2003	react	8.55	11.54	-1	-2.40	-1.0004	1.25	-1	-1.27	-4.83	-0.71	
05/12/2003	react	7.98	11.65	-1	-2.35	-1.0006	1.91	-1	-2.12	-4.56	-1.07	

St-Rambert	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
25/03/2003	react	8.54	11.63	-1	-2.39	-1.0004	0.89	-1	0.73	-1.47	-0.36	
04/05/2003	react	8.50	11.65	-1	-2.39	-1.0005	0.92	-1	0.87	-1.49	-0.38	
26/06/2003	react	8.20	11.70	-1	-2.36	-1.0005	1.32	-1	0.54	-0.36	-0.41	
29/08/2003	react	8.24	11.71	-1	-2.37	-1.0005	1.21	-1	0.45	-0.64	-0.42	
06/11/2003	react	8.52	11.63	-1	-2.39	-1.0005	0.94	-1	0.80	-1.51	-0.40	

Sury	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
25/03/2003	react	8.90	11.35	-1	-2.42	-1.0003	0.76	-1	-0.18	-5.49	-0.52	
26/06/2003	react	7.86	11.54	-1	-2.32	-1.0006	1.81	-1	-0.30	-0.65	-0.45	
06/11/2003	react	8.74	11.52	-1	-2.42	-1.0003	0.78	-1	0.34	-4.55	-0.59	

Tarentaise	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
18/02/2002	react	9.42	11.07	-1	-2.44	-1.0002	0.27	-1	-1.10	-5.98	-0.15	
16/04/2002	react	9.34	11.09	-1	-2.43	-1.0003	0.33	-1	-1.07	-5.18	-0.09	
15/05/2002	react	9.22	11.11	-1	-2.43	-1.0003	0.51	-1	-1.26	-5.92	-0.18	
27/05/2002	react	9.16	11.13	-1	-2.42	-1.0003	0.57	-1	-1.30	-5.85	-0.19	
20/09/2002	react	8.93	11.16	-1	-2.40	-1.0004	0.89	-1	-1.55	-4.89	-0.22	
15/10/2002	react	9.04	11.15	-1	-2.41	-1.0004	0.75	-1	-1.48	-5.35	-0.24	
31/01/2003	react	9.40	11.09	-1	-2.44	-1.0002	0.35	-1	-1.26	-6.37	-0.27	
07/03/2003	react	9.34	11.12	-1	-2.44	-1.0002	0.42	-1	-1.32	-6.50	-0.29	
14/04/2003	react	9.32	11.10	-1	-2.44	-1.0003	0.45	-1	-1.32	-6.12	-0.27	
16/06/2003	react	8.44	11.20	-1	-2.35	-1.0005	1.42	-1	-2.05	-3.71	-0.36	
25/06/2003	react	8.42	11.17	-1	-2.35	-1.0006	1.47	-1	-2.07	-3.71	-0.33	
18/07/2003	react	8.39	11.22	-1	-2.35	-1.0006	1.50	-1	-2.07	-3.66	-0.33	
26/08/2003	react	8.32	11.31	-1	-2.35	-1.0006	1.55	-1	-2.13	-3.05	-0.38	
05/12/2003	react	9.18	11.15	-1	-2.42	-1.0003	0.50	-1	-1.21	-5.81	-0.18	

Vassalieu	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
25/03/2003	react	8.82	11.57	-1	-2.42	-1.0003	0.81	-1	-1.08	-4.42	-0.61	
04/05/2003	react	8.81	11.59	-1	-2.42	-1.0003	0.81	-1	-1.10	-4.43	-0.63	
26/06/2003	react	8.32	11.69	-1	-2.38	-1.0005	1.34	-1	-1.44	-2.72	-0.64	

Vidrieu	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
26/06/2003	react	8.05	11.57	-1	-2.35	-1.0006	1.75	-1	-0.65	-2.37	-0.56	
21/07/2003	react	8.25	11.32	-1	-2.37	-1.0005	1.41	-1	-0.58	-2.37	-0.64	-24.59
29/08/2003	react	8.18	11.30	-1	-2.37	-1.0005	1.52	-1	-0.71	-2.69	-0.65	-24.95
06/11/2003	react	9.18	11.38	-1	-2.45	-1.0002	0.39	-1	0.32	-6.03	-0.53	

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Vizézy	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
05/12/2001	react	8.98	11.42	-1	-2.43	-1.0003	0.78	-1	-0.73	-6.75	-0.74	
24/04/2002	react	8.68	11.46	-1	-2.40	-1.0004	1.13	-1	-0.75	-5.68	-0.70	
23/07/2002	react	8.40	11.50	-1	-2.38	-1.0005	1.46	-1	-1.32	-4.80	-0.75	
17/10/2002	react	8.53	11.45	-1	-2.40	-1.0004	1.28	-1	-1.01	-5.13	-0.77	
04/02/2003	react	9.20	11.39	-1	-2.45	-1.0002	0.46	-1	-0.51	-6.85	-0.58	
20/03/2003	react	9.12	11.39	-1	-2.45	-1.0002	0.61	-1	-0.97	-7.24	-0.74	
29/04/2003	react	8.65	11.55	-1	-2.41	-1.0004	1.14	-1	-0.80	-5.70	-0.78	
26/06/2003	react	8.12	11.59	-1	-2.35	-1.0005	1.77	-1	-1.18	-3.71	-0.74	
22/07/2003	react	8.17	11.65	-1	-2.37	-1.0005	1.66	-1	-1.17	-3.68	-0.82	
29/08/2003	react	8.13	11.74	-1	-2.37	-1.0005	1.67	-1	-1.14	-3.56	-0.90	
06/11/2003	react	8.86	11.64	-1	-2.44	-1.0002	0.76	-1	-0.52	-6.29	-0.97	

Vollon	state	pH	pe	si_Albite	si_Albite_high	si_Albite_low	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Alunite	si_Analcime	si_Annite
07/08/2002	react	8.47	11.36	-1	-2.36	-1.0005	1.18	-1	0.35	-1.21	-0.15	
25/03/2003	react	9.02	11.49	-1	-2.44	-1.0003	0.41	-1	0.82	-4.35	-0.41	
04/05/2003	react	8.47	11.45	-1	-2.37	-1.0005	1.10	-1	0.73	-2.72	-0.23	
26/06/2003	react	7.91	11.64	-1	-2.33	-1.0006	1.67	-1	-0.13	-0.48	-0.45	
29/08/2003	react	8.01	11.67	-1	-2.34	-1.0006	1.62	-1	-0.42	-0.69	-0.51	
06/11/2003	react	8.80	11.60	-1	-2.42	-1.0003	0.59	-1	0.89	-4.16	-0.42	

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Barbanche	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
11/01/2002	-23.60	4.38	3.88	4.02	3.80	-0.66	-1.08	-10.92
30/01/2002	-22.69	4.51	3.91	4.18	3.90	-0.72	-1.04	-10.50
18/02/2002	-22.98	4.46	3.89	4.12	3.86	-0.70	-1.06	-10.63
16/04/2002	-22.73	4.57	3.98	4.25	3.96	-0.76	-1.03	-10.37
15/05/2002	-22.75	4.73	4.18	4.44	4.11	-0.88	-1.01	-9.97
27/05/2002	-22.70	4.73	4.17	4.45	4.12	-0.90	-1.02	-9.88
22/07/2002	-23.28	4.69	4.22	4.43	4.12	-0.96	-1.07	-9.74
20/09/2002	-22.14	4.94	4.35	4.71	4.32	-1.06	-0.99	-9.21
15/10/2002	-22.35	4.77	4.18	4.51	4.17	-0.94	-1.02	-9.62
31/01/2003	-22.86	4.36	3.75	4.00	3.76	-0.60	-1.06	-10.90
07/03/2003	-22.60	4.53	3.92	4.21	3.92	-0.73	-1.04	-10.41
14/04/2003	-22.97	4.48	3.92	4.16	3.90	-0.73	-1.07	-10.46
16/06/2003	-22.18	4.90	4.31	4.67	4.29	-1.03	-1.00	-9.28
25/06/2003	-22.34	4.87	4.29	4.64	4.27	-1.03	-1.02	-9.31
18/07/2003	-21.68	5.13	4.51	4.93	4.48	-1.14	-0.94	-8.85
26/08/2003	-21.70	5.22	4.61	5.03	4.56	-1.21	-0.93	-8.64
05/12/2003	-22.62	4.74	4.17	4.45	4.11	-0.85	-0.99	-10.05

Barbarie	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
11/01/2002	-24.08	4.13	3.65	3.68	3.52	-0.32	-1.07	-12.03
30/01/2002	-23.67	4.48	4.01	4.12	3.87	-0.61	-1.04	-10.90
18/02/2002	-26.48	3.43	3.19	2.95	3.02	-0.19	-1.35	-12.72
16/04/2002	-23.37	4.50	3.98	4.12	3.85	-0.55	-1.00	-11.10
15/05/2002	-23.50	4.66	4.20	4.34	4.04	-0.75	-1.02	-10.40
27/05/2002	-22.95	4.68	4.15	4.37	4.05	-0.73	-1.00	-10.32
22/07/2002	-23.15	4.76	4.28	4.50	4.17	-0.89	-1.04	-9.72
20/09/2002	-23.13	4.79	4.30	4.52	4.19	-0.91	-1.03	-9.75
15/10/2002	-23.05	4.81	4.32	4.54	4.20	-0.87	-1.01	-9.83
31/01/2003	-24.11	4.28	3.82	3.85	3.66	-0.43	-1.05	-11.69
07/03/2003	-23.49	4.56	4.07	4.20	3.93	-0.64	-1.02	-10.78
14/04/2003	-23.14	4.66	4.14	4.32	4.01	-0.68	-0.99	-10.56
16/06/2003	-22.06	5.25	4.70	5.06	4.59	-1.15	-0.92	-8.73
25/06/2003	-22.01	5.33	4.78	5.15	4.66	-1.22	-0.91	-8.51
18/07/2003	-22.10	5.31	4.77	5.09	4.61	-1.09	-0.86	-9.00
26/08/2003	-22.32	5.35	4.85	5.14	4.66	-1.16	-0.88	-8.79
05/12/2003	-23.13	4.82	4.33	4.51	4.16	-0.79	-0.97	-10.19

Bessat	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
11/01/2002	-21.62	5.78	5.23	5.49	4.86	-0.88	-0.57	-9.62
30/01/2002	-21.94	5.57	5.04	5.29	4.73	-0.88	-0.68	-9.59
18/02/2002	-25.16	3.87	3.52	3.47	3.41	-0.28	-1.26	-11.61
16/04/2002	-21.40	5.86	5.29	5.60	4.95	-0.99	-0.59	-9.18
15/05/2002	-24.20	4.83	4.50	4.50	4.18	-0.68	-0.96	-10.48
20/09/2002	-20.30	6.10	5.43	5.91	5.17	-1.14	-0.54	-8.37
15/10/2002	-20.12	6.16	5.47	5.96	5.21	-1.15	-0.51	-8.37
31/01/2003	-19.94	6.09	5.36	5.86	5.12	-1.02	-0.49	-8.72
07/03/2003	-20.13	6.01	5.30	5.79	5.07	-1.02	-0.53	-8.72
14/04/2003	-19.92	6.17	5.45	5.95	5.19	-1.08	-0.48	-8.54
16/06/2003	-19.88	6.42	5.75	6.28	5.47	-1.37	-0.49	-7.59
05/12/2003	-20.83	6.03	5.42	5.81	5.11	-1.08	-0.55	-8.72

Chavagneux	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
29/08/2002	-19.76	5.62	4.83	5.51	4.89	-0.66	-0.80	-7.60
25/03/2003	-19.35	5.53	4.64	5.31	4.69	-0.31	-0.68	-8.80
04/05/2003	-19.78	5.72	4.93	5.57	4.93	-0.58	-0.72	-7.91

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Chorsin grange	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
26/10/2001	-20.12	6.44	5.80	6.27	5.45	-1.18	-0.45	-7.94
20/03/2003	-21.23	6.03	5.46	5.75	5.05	-1.23	-0.49	-9.36
04/05/2003	-19.76	5.62	4.83	5.51	4.89	-0.66	-0.80	-7.60

Essertines	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
11/01/2002	-21.32	5.32	4.65	4.99	4.46	-0.45	-0.68	-10.21
30/01/2002	-20.66	5.70	5.02	5.48	4.85	-0.80	-0.66	-8.84
18/02/2002	-20.27	5.33	4.52	5.04	4.49	-0.52	-0.70	-9.73
15/05/2002	-23.54	4.97	4.57	4.67	4.30	-0.57	-0.93	-10.00
20/09/2002	-20.35	6.06	5.41	5.92	5.20	-1.11	-0.63	-7.74
15/10/2002	-20.28	5.93	5.24	5.75	5.06	-0.96	-0.62	-8.23
07/03/2003	-20.23	5.58	4.81	5.31	4.70	-0.60	-0.63	-9.39
14/04/2003	-20.05	5.84	5.09	5.61	4.93	-0.75	-0.57	-8.91
16/06/2003	-20.33	6.32	5.71	6.24	5.47	-1.37	-0.62	-6.91
25/06/2003	-20.27	6.36	5.77	6.31	5.53	-1.48	-0.62	-6.66
18/07/2003	-20.28	6.44	5.86	6.39	5.59	-1.52	-0.61	-6.50

Essertines dauphin	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
11/01/2002	-21.97	5.59	5.05	5.23	4.65	-1.03	-0.56	-10.43
30/01/2002	-21.55	5.74	5.18	5.45	4.82	-1.19	-0.57	-9.68
18/02/2002	-21.93	5.62	5.10	5.33	4.75	-1.23	-0.64	-9.65
16/04/2002	-25.95	3.91	3.67	3.50	3.45	-0.66	-1.26	-11.64
27/05/2002	-21.05	5.96	5.38	5.75	5.07	-1.43	-0.59	-8.63
22/07/2002	-22.27	5.53	5.06	5.29	4.75	-1.33	-0.75	-9.13
20/09/2002	-20.95	6.16	5.60	5.98	5.25	-1.59	-0.56	-8.16
15/10/2002	-20.87	6.19	5.63	6.01	5.26	-1.57	-0.53	-8.25
07/03/2003	-21.12	5.79	5.18	5.52	4.88	-1.24	-0.58	-9.30
14/04/2003	-20.96	5.85	5.23	5.59	4.93	-1.28	-0.57	-9.12
16/06/2003	-20.38	6.45	5.89	6.39	5.59	-2.04	-0.59	-6.58
25/06/2003	-20.17	6.38	5.81	6.33	5.53	-2.06	-0.59	-6.52
18/07/2003	-19.61	6.75	6.18	6.71	5.79	-2.17	-0.43	-6.25
26/08/2003	-19.78	6.40	5.81	6.35	5.52	-2.07	-0.55	-6.52
05/12/2003	-21.51	6.01	5.50	5.77	5.08	-1.38	-0.55	-8.90

exutoire	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
11/01/2002	-22.80	4.66	4.08	4.28	3.96	-0.25	-0.92	-11.02
30/01/2002	-23.25	4.62	4.11	4.25	3.95	-0.28	-0.95	-11.00
18/02/2002	-22.75	4.68	4.10	4.31	3.99	-0.31	-0.93	-10.84
15/05/2002	-22.69	5.14	4.66	4.90	4.47	-0.73	-0.91	-9.34
27/05/2002	-21.44	5.33	4.70	5.12	4.61	-0.78	-0.85	-8.86
20/09/2002	-21.48	5.48	4.88	5.30	4.76	-0.93	-0.84	-8.43
15/10/2002	-21.64	5.32	4.72	5.09	4.59	-0.76	-0.83	-9.08
31/01/2003	-22.32	4.75	4.13	4.39	4.03	-0.29	-0.89	-10.84
07/03/2003	-22.17	4.89	4.27	4.56	4.17	-0.41	-0.88	-10.34
14/04/2003	-21.66	5.04	4.38	4.75	4.31	-0.50	-0.85	-9.90
16/06/2003	-21.26	5.54	4.91	5.34	4.78	-0.86	-0.78	-8.63
25/06/2003	-21.08	5.57	4.93	5.38	4.81	-0.89	-0.78	-8.49
18/07/2003	-20.53	5.88	5.22	5.71	5.05	-0.99	-0.66	-8.17
26/08/2003	-20.61	5.96	5.33	5.82	5.14	-1.08	-0.67	-7.83
05/12/2003	-22.33	5.29	4.77	5.00	4.51	-0.60	-0.77	-9.86

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Haut Lignon	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
04/02/2003	-23.57	4.62	4.15	4.21	3.92	-0.52	-0.92	-11.36
20/03/2003	-22.14	5.53	5.01	5.22	4.66	-0.96	-0.66	-9.98
09/04/2003	-21.59	5.72	5.15	5.40	4.78	-1.04	-0.55	-9.99
29/04/2003	-21.22	5.90	5.32	5.68	5.02	-1.36	-0.61	-8.77
26/06/2003	-20.94	6.16	5.61	6.05	5.34	-1.51	-0.66	-7.31
21/07/2003	-22.01	5.73	5.26	5.59	5.00	-1.38	-0.81	-7.95
29/08/2003	-21.09	6.27	5.76	6.14	5.39	-1.80	-0.58	-7.65
06/11/2003	-21.64	5.66	5.09	5.37	4.78	-1.06	-0.63	-9.60

Montarcher	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
16/09/2001	-17.08	10.38	10.03	10.24	8.30	-1.40	1.19	-6.05
26/10/2001	-20.76	5.85	5.20	5.63	4.97	-0.44	-0.62	-8.75
05/12/2001	-17.31	9.74	9.30	9.64	7.88	-1.35	0.86	-5.80
22/01/2002	-19.25	7.41	6.82	7.20	6.10	-0.66	0.03	-7.94
01/03/2002	-21.14	6.14	5.59	5.90	5.17	-0.47	-0.49	-8.85
26/03/2002	-17.82	9.06	8.57	8.94	7.37	-1.02	0.60	-6.31
24/04/2002	-21.14	5.71	5.09	5.49	4.88	-0.41	-0.69	-8.80
23/07/2002	-16.76	10.93	10.66	10.93	8.87	-1.92	1.22	-4.18
17/10/2002	-21.27	6.16	5.64	5.95	5.22	-0.78	-0.52	-8.56
04/02/2003	-21.39	5.31	4.66	5.03	4.51	-0.10	-0.76	-9.63
20/03/2003	-21.37	5.77	5.19	5.52	4.90	-0.55	-0.63	-9.06
29/04/2003	-21.62	5.55	4.97	5.31	4.75	-0.32	-0.73	-9.09
26/06/2003	-21.20	5.59	4.98	5.43	4.85	-0.25	-0.81	-8.16
21/07/2003	-22.15	4.85	4.25	4.67	4.31	-0.08	-1.10	-8.67
29/08/2003	-21.96	4.91	4.29	4.72	4.34	0.03	-1.06	-8.78
06/11/2003	-20.60	6.06	5.43	5.86	5.14	-0.49	-0.55	-8.46

Montarcher village	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
17/10/2002	-20.66	6.15	5.55	5.97	5.23	-0.58	-0.54	-8.19
29/04/2003	-20.87	6.10	5.51	5.88	5.16	-0.60	-0.52	-8.62
26/06/2003	-20.53	6.50	5.95	6.41	5.59	-1.01	-0.53	-7.01
29/08/2003	-19.71	7.19	6.65	7.13	6.12	-1.16	-0.28	-6.38
06/11/2003	-19.74	7.10	6.54	6.92	5.91	-0.57	-0.15	-7.78

Planfoy	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
11/01/2002	-20.80	5.37	4.63	5.04	4.48	-1.16	-0.65	-10.20
30/01/2002	-20.58	5.67	4.96	5.41	4.78	-1.42	-0.62	-9.30
18/02/2002	-21.10	5.50	4.83	5.19	4.61	-1.28	-0.64	-9.91
16/04/2002	-21.26	5.47	4.82	5.16	4.60	-1.29	-0.66	-9.87
15/05/2002	-21.72	5.58	5.02	5.31	4.74	-1.46	-0.69	-9.40
27/05/2002	-20.70	6.34	5.77	6.11	5.32	-1.68	-0.41	-8.68
22/07/2002	-20.63	5.93	5.29	5.74	5.06	-1.72	-0.62	-8.38
20/09/2002	-20.33	6.01	5.33	5.82	5.12	-1.72	-0.60	-8.23
15/10/2002	-20.31	5.98	5.30	5.78	5.08	-1.69	-0.57	-8.48
31/01/2003	-21.13	5.46	4.78	5.13	4.56	-1.20	-0.62	-10.18
07/03/2003	-20.93	5.61	4.93	5.33	4.72	-1.36	-0.63	-9.53
14/04/2003	-20.73	5.64	4.95	5.37	4.76	-1.39	-0.62	-9.40
16/06/2003	-20.27	6.08	5.42	5.94	5.22	-1.84	-0.61	-7.79
25/06/2003	-20.18	6.14	5.48	6.01	5.28	-1.91	-0.61	-7.54
18/07/2003	-19.46	6.61	5.92	6.48	5.61	-1.98	-0.41	-7.37
26/08/2003	-19.78	6.58	5.93	6.46	5.60	-2.02	-0.44	-7.28
05/12/2003	-20.61	5.89	5.22	5.65	4.98	-1.55	-0.58	-8.90

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Rochetaillée	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
11/01/2002	-18.45	5.76	4.76	5.52	4.82	-0.97	-0.55	-8.96
30/01/2002	-19.10	5.87	4.99	5.67	4.96	-1.13	-0.57	-8.55
18/02/2002	-20.62	5.64	4.93	5.38	4.76	-1.01	-0.63	-9.35
16/04/2002	-19.51	5.91	5.09	5.72	5.02	-1.22	-0.60	-8.33
15/05/2002	-21.58	5.81	5.27	5.61	4.98	-1.29	-0.69	-8.57
27/05/2002	-19.87	6.13	5.41	5.99	5.25	-1.44	-0.59	-7.72
22/07/2002	-20.43	6.33	5.73	6.23	5.46	-1.66	-0.59	-7.16
20/09/2002	-19.97	6.35	5.69	6.25	5.45	-1.62	-0.56	-7.24
15/10/2002	-19.94	6.15	5.45	6.00	5.25	-1.41	-0.57	-7.84
31/01/2003	-18.40	7.42	6.70	7.22	6.09	-1.41	0.05	-7.95
07/03/2003	-19.71	5.83	5.02	5.61	4.93	-1.14	-0.60	-8.69
14/04/2003	-19.89	6.08	5.35	5.88	5.15	-1.26	-0.53	-8.38
16/06/2003	-20.06	6.43	5.80	6.35	5.55	-1.73	-0.57	-6.89
25/06/2003	-20.08	6.33	5.70	6.26	5.48	-1.74	-0.61	-6.84
18/07/2003	-19.45	6.84	6.20	6.78	5.85	-1.85	-0.41	-6.55
26/08/2003	-19.45	6.85	6.22	6.80	5.87	-1.89	-0.41	-6.43
05/12/2003	-20.52	5.95	5.28	5.74	5.05	-1.23	-0.59	-8.58

ruisseau Chorsin	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
05/12/2001	-19.75	6.89	6.26	6.67	5.72	-1.60	-0.19	-8.35
24/04/2002	-19.55	6.74	6.07	6.56	5.65	-1.24	-0.29	-7.98
29/08/2002	-19.72	6.81	6.18	6.67	5.76	-1.72	-0.34	-7.41
17/10/2002	-20.36	6.63	6.04	6.43	5.56	-1.72	-0.34	-8.24
20/03/2003	-20.76	6.66	6.12	6.38	5.51	-1.75	-0.24	-9.08
25/03/2003	-19.55	6.74	6.07	6.56	5.65	-1.24	-0.29	-7.98
09/04/2003	-19.78	6.83	6.19	6.57	5.63	-1.41	-0.16	-8.88
29/04/2003	-20.15	6.79	6.20	6.60	5.69	-1.79	-0.28	-8.09
21/07/2003	-21.74	5.11	4.50	4.92	4.48	-1.26	-0.97	-8.62
29/08/2003	-19.30	7.59	7.03	7.50	6.37	-2.10	-0.08	-6.64
16/09/2003	-20.02	6.85	6.25	6.61	5.67	-1.50	-0.18	-8.67
06/11/2003	-20.57	6.79	6.25	6.53	5.62	-1.50	-0.21	-8.82

ruisseau Moingt	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
29/08/2003	-21.78	5.48	4.93	5.30	4.76	-0.59	-0.84	-8.47
25/03/2003	-21.76	5.33	4.74	5.06	4.56	-0.48	-0.78	-9.50
29/04/2003	-21.47	5.57	4.98	5.36	4.80	-0.55	-0.76	-8.72
26/06/2003	-21.25	5.99	5.47	5.91	5.25	-0.98	-0.77	-7.04
21/07/2003	-21.91	5.99	5.56	5.86	5.20	-0.82	-0.71	-7.70
29/08/2003	-21.29	6.22	5.74	6.12	5.39	-0.94	-0.64	-7.31
06/11/2003	-22.42	5.06	4.51	4.72	4.28	0.15	-0.79	-10.52

ruisseau St Alban	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
20/03/2003	-21.29	6.22	5.74	6.12	5.39	-0.94	-0.64	-7.31

Sauvain	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
09/04/2003	-21.17	6.37	5.85	6.10	5.31	-1.24	-0.36	-9.17
29/04/2003	-20.47	6.68	6.14	6.54	5.67	-1.53	-0.40	-7.53
26/06/2003	-19.83	6.55	5.98	6.47	5.60	-1.66	-0.45	-6.79
21/07/2003	-20.03	6.54	5.99	6.47	5.61	-1.68	-0.49	-6.65
29/08/2003	-19.58	7.21	6.68	7.18	6.16	-1.97	-0.29	-6.08

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Souvignet	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
11/01/2002	-22.18	4.51	3.82	4.11	3.81	-0.29	-0.93	-11.25
30/01/2002	-22.84	4.71	4.16	4.36	4.03	-0.50	-0.94	-10.67
18/02/2002	-22.89	4.50	3.91	4.12	3.84	-0.38	-0.98	-11.10
16/04/2002	-22.65	4.67	4.08	4.30	3.98	-0.44	-0.93	-10.87
15/05/2002	-21.62	5.00	4.33	4.73	4.30	-0.71	-0.89	-9.68
20/09/2002	-21.69	5.19	4.57	4.96	4.49	-0.88	-0.87	-9.17
15/10/2002	-21.73	5.18	4.56	4.94	4.47	-0.83	-0.86	-9.33
07/03/2003	-22.30	4.80	4.19	4.48	4.12	-0.56	-0.92	-10.34
14/04/2003	-22.06	4.90	4.26	4.58	4.18	-0.58	-0.89	-10.26
16/06/2003	-21.69	5.43	4.86	5.25	4.72	-1.06	-0.85	-8.53
25/06/2003	-21.05	5.60	4.96	5.43	4.85	-1.12	-0.79	-8.26
18/07/2003	-21.19	5.60	4.98	5.40	4.82	-1.02	-0.75	-8.66
26/08/2003	-21.34	5.75	5.18	5.57	4.96	-1.13	-0.72	-8.39
05/12/2003	-19.58	7.21	6.68	7.18	6.16	-1.97	-0.29	-6.08

St-Rambert	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
25/03/2003	-25.01	4.41	4.17	4.09	3.88	0.87	-1.13	-10.44
04/05/2003	-24.95	4.48	4.25	4.17	3.95	1.02	-1.11	-10.33
26/06/2003	-24.42	4.83	4.59	4.60	4.29	0.68	-1.08	-9.26
29/08/2003	-24.48	4.79	4.55	4.54	4.23	0.60	-1.06	-9.50
06/11/2003	-25.11	4.56	4.35	4.24	4.00	0.94	-1.09	-10.33

Sury	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
25/03/2003	-22.10	4.87	4.26	4.59	4.21	-0.03	-0.94	-9.83
26/06/2003	-22.16	5.26	4.79	5.17	4.71	-0.16	-1.03	-7.46
06/11/2003	-22.58	5.06	4.56	4.77	4.34	0.49	-0.86	-9.87

Tarentaise	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
18/02/2002	-25.32	3.44	3.04	3.01	3.06	-0.95	-1.38	-12.13
16/04/2002	-25.69	3.29	2.91	2.86	2.95	-0.92	-1.46	-12.13
15/05/2002	-24.06	3.68	3.14	3.32	3.28	-1.11	-1.35	-11.21
27/05/2002	-23.88	3.76	3.21	3.41	3.35	-1.16	-1.33	-11.00
20/09/2002	-23.37	4.05	3.48	3.77	3.63	-1.40	-1.30	-10.13
15/10/2002	-23.42	4.02	3.45	3.72	3.59	-1.33	-1.28	-10.43
31/01/2003	-24.10	3.85	3.33	3.45	3.37	-1.11	-1.25	-11.52
07/03/2003	-23.90	3.96	3.43	3.58	3.47	-1.17	-1.22	-11.30
14/04/2003	-24.10	3.92	3.42	3.54	3.44	-1.18	-1.24	-11.30
16/06/2003	-22.10	4.78	4.19	4.62	4.27	-1.91	-1.13	-8.41
25/06/2003	-22.25	4.72	4.15	4.57	4.24	-1.92	-1.17	-8.37
18/07/2003	-22.23	4.76	4.18	4.62	4.28	-1.93	-1.17	-8.30
26/08/2003	-21.66	4.93	4.31	4.81	4.42	-1.99	-1.11	-7.99
05/12/2003	-24.34	3.65	3.16	3.29	3.26	-1.07	-1.35	-11.31

Vassalieu	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
25/03/2003	-22.91	5.14	4.69	4.84	4.41	-0.93	-0.84	-9.89
04/05/2003	-22.76	5.22	4.76	4.93	4.47	-0.95	-0.81	-9.82
26/06/2003	-22.15	5.58	5.12	5.40	4.85	-1.30	-0.80	-8.42

Vidrieu	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
26/06/2003	-21.81	5.64	5.14	5.54	4.97	-0.50	-0.89	-7.47
21/07/2003	-22.72	5.65	5.27	5.46	4.91	-0.44	-0.79	-8.44
29/08/2003	-22.19	5.74	5.31	5.59	5.00	-0.57	-0.79	-8.03
06/11/2003	-23.45	4.65	4.18	4.27	3.96	0.46	-0.93	-11.06

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Vizézy	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
05/12/2001	-21.99	5.55	5.02	5.26	4.71	-0.59	-0.68	-9.63
24/04/2002	-21.33	5.66	5.07	5.46	4.87	-0.61	-0.73	-8.66
23/07/2002	-21.08	6.01	5.45	5.87	5.19	-1.17	-0.67	-7.81
17/10/2002	-21.65	5.97	5.48	5.78	5.12	-0.87	-0.64	-8.37
04/02/2003	-22.79	4.86	4.33	4.51	4.14	-0.37	-0.87	-10.69
20/03/2003	-22.07	5.46	4.91	5.14	4.60	-0.83	-0.68	-10.03
29/04/2003	-21.26	5.90	5.34	5.70	5.04	-0.66	-0.63	-8.58
26/06/2003	-21.02	6.18	5.65	6.10	5.38	-1.03	-0.68	-7.08
22/07/2003	-21.28	6.35	5.88	6.24	5.48	-1.02	-0.59	-7.36
29/08/2003	-20.90	6.59	6.11	6.49	5.66	-1.00	-0.50	-7.16
06/11/2003	-21.40	6.22	5.72	5.94	5.19	-0.37	-0.41	-9.33

Vollon	si_Anthophyllite	si_Beidellite-Ca	si_Beidellite-K	si_Beidellite-Mg	si_Beidellite-Na	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Cordierite_anhyd
07/08/2002	-25.07	4.00	3.69	3.73	3.65	0.50	-1.38	-9.97
25/03/2003	-23.63	4.28	3.79	3.90	3.69	0.97	-1.07	-11.12
04/05/2003	-22.41	4.18	3.53	3.96	3.76	0.88	-1.29	-9.33
26/06/2003	-21.96	5.18	4.65	5.07	4.62	0.01	-1.03	-7.73
29/08/2003	-21.98	5.35	4.84	5.22	4.73	-0.27	-0.96	-7.82
06/11/2003	-21.75	4.41	3.69	4.11	3.82	1.03	-1.06	-10.16

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Barbanche	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
11/01/2002	-1.38	-2.43				3.21		-3.24	-8.10	
30/01/2002	-1.34	-2.37				3.22		-3.26	-8.25	
18/02/2002	-1.36	-2.39				3.22		-3.24	-8.15	
16/04/2002	-1.33	-2.40				3.23		-3.25	-8.25	
15/05/2002	-1.31	-2.47				3.27		-3.25	-8.26	
27/05/2002	-1.32	-2.45				3.28		-3.23	-8.16	
22/07/2002	-1.37	-2.52				3.34		-3.04	-7.88	
20/09/2002	-1.29	-2.49				3.33		-3.26	-8.20	
15/10/2002	-1.32	-2.43				3.30		-3.26	-8.18	
31/01/2003	-1.37	-2.32				3.19		-3.13	-8.17	
07/03/2003	-1.34	-2.35				3.22		-3.14	-8.25	
14/04/2003	-1.37	-2.37				3.24		-3.17	-8.15	
16/06/2003	-1.30	-2.46				3.33		-3.22	-8.23	
25/06/2003	-1.31	-2.47				3.34		-3.25	-8.22	
18/07/2003	-1.23	-2.50				3.33		-3.21	-8.38	
26/08/2003	-1.22	-2.56				3.35		-3.30	-8.36	
05/12/2003	-1.29	-2.46				3.25		-3.25	-8.34	

Barbarie	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
11/01/2002	-1.38	-2.26				3.10		-3.09	-8.36	
30/01/2002	-1.35	-2.34				3.21		-3.11	-8.36	
18/02/2002	-1.66	-2.23				3.21		-2.68	-7.18	
16/04/2002	-1.31	-2.32				3.15		-3.11	-8.58	
15/05/2002	-1.32	-2.41				3.25		-3.13	-8.43	
27/05/2002	-1.30	-2.33				3.23		-3.12	-8.45	
22/07/2002	-1.34	-2.38				3.33		-3.10	-8.19	
20/09/2002	-1.32	-2.42				3.31		-3.08	-8.14	
15/10/2002	-1.30	-2.40				3.30		-3.17	-8.35	
31/01/2003	-1.36	-2.34				3.13		-3.08	-8.49	
07/03/2003	-1.32	-2.35				3.20		-3.10	-8.49	
14/04/2003	-1.29	-2.35				3.20		-3.12	-8.54	
16/06/2003	-1.21	-2.49				3.35		-3.19	-8.58	
25/06/2003	-1.20	-2.52				3.37		-3.21	-8.64	
18/07/2003	-1.16	-2.51				3.30		-3.19	-8.77	
26/08/2003	-1.17	-2.56				3.34		-3.17	-8.64	
05/12/2003	-1.27	-2.40				3.24		-3.11	-8.54	

Bessat	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
11/01/2002	-0.88	-2.47				3.08		-3.59	-10.27	
30/01/2002	-0.98	-2.41				3.14		-3.58	-9.89	
18/02/2002	-1.56	-1.95				3.26		-2.85	-7.49	
16/04/2002	-0.89	-2.49				3.13		-3.67	-10.24	
15/05/2002	-1.26	-2.34				3.24		-3.33	-8.82	
20/09/2002	-0.84	-2.44				3.17		-3.61	-10.33	
15/10/2002	-0.81	-2.45				3.15		-3.62	-10.39	
31/01/2003	-0.79	-2.36				3.09		-3.49	-10.23	
07/03/2003	-0.83	-2.35				3.11		-3.53	-10.27	
14/04/2003	-0.78	-2.40				3.10		-3.53	-10.28	
16/06/2003	-0.78	-2.55				3.22		-3.60	-10.37	
05/12/2003	-0.85	-2.47				3.15		-3.65	-10.36	

Chavagneux	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
29/08/2002	-1.09	-1.01			-2.88	3.34		-2.58	-8.98	
25/03/2003	-0.98	-0.90			-3.04	3.13		-2.67	-9.41	
04/05/2003	-1.02	-1.04			-2.86	3.26		-2.62	-9.20	

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Chorsin grange	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
26/10/2001	-0.74	-2.36	-14.12	0.90		3.17	6.19	-4.36	-10.57	13.33
20/03/2003	-0.80	-3.08				3.07		-4.12	-10.42	
04/05/2003	-1.09	-1.01			-2.88	3.34		-2.58	-8.98	

Essertines	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
11/01/2002	-0.99	-1.83				3.04		-3.22	-10.13	
30/01/2002	-0.96	-1.92				3.17		-3.25	-10.08	
18/02/2002	-1.01	-1.72				3.07		-3.25	-10.14	
15/05/2002	-1.23	-1.90				3.26		-3.09	-9.40	
20/09/2002	-0.92	-2.05				3.27		-3.21	-9.95	
15/10/2002	-0.92	-1.97				3.21		-3.23	-10.13	
07/03/2003	-0.94	-1.77			-2.86	3.08		-3.15	-10.01	
14/04/2003	-0.88	-1.88				3.10		-3.20	-10.06	
16/06/2003	-0.91	-2.21				3.36		-3.24	-9.91	
25/06/2003	-0.91	-2.31				3.39		-3.31	-10.08	
18/07/2003	-0.89	-2.34				3.40		-3.30	-10.13	

Essertines dauphin	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
11/01/2002	-0.87	-3.14				2.98		-3.31	-10.46	
30/01/2002	-0.88	-3.12				3.06		-3.32	-10.33	
18/02/2002	-0.95	-3.16				3.11		-3.29	-10.08	
16/04/2002	-1.56	-2.73	-14.66	0.46		3.28	5.79	-2.56	-7.68	12.51
27/05/2002	-0.88	-3.13				3.17		-3.29	-10.06	
22/07/2002	-1.05	-3.10				3.23		-3.09	-9.13	
20/09/2002	-0.86	-3.25				3.21		-3.31	-10.16	
15/10/2002	-0.83	-3.26				3.19		-3.30	-10.19	
07/03/2003	-0.88	-3.04				3.09		-3.18	-10.12	
14/04/2003	-0.88	-3.05				3.10		-3.19	-10.12	
16/06/2003	-0.87	-3.43				3.37		-3.32	-9.89	
25/06/2003	-0.87	-3.45				3.33		-3.32	-9.98	
18/07/2003	-0.71	-3.63				3.25		-3.41	-10.37	
26/08/2003	-0.83	-3.49			-4.68	3.27		-3.36	-10.05	
05/12/2003	-0.85	-3.17				3.13		-3.40	-9.91	

exutoire	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
11/01/2002	-1.23	-1.71				3.11		-3.14	-8.90	
30/01/2002	-1.26	-1.77				3.14		-3.16	-8.78	
18/02/2002	-1.24	-1.75				3.13		-3.19	-8.88	
15/05/2002	-1.21	-1.93				3.30		-3.19	-8.82	
27/05/2002	-1.14	-1.83				3.28		-3.19	-8.95	
20/09/2002	-1.13	-1.93				3.33		-3.26	-8.97	
15/10/2002	-1.13	-1.89				3.26		-3.26	-9.09	
31/01/2003	-1.19	-1.71				3.10		-3.16	-9.01	
07/03/2003	-1.19	-1.74				3.15		-3.17	-9.00	
14/04/2003	-1.16	-1.72				3.17		-3.16	-9.05	
16/06/2003	-1.08	-1.91				3.28		-3.22	-9.21	
25/06/2003	-1.07	-1.90				3.29		-3.24	-9.23	
18/07/2003	-0.96	-1.98				3.25		-3.27	-9.48	
26/08/2003	-0.97	-2.03				3.30		-3.31	-9.39	
05/12/2003	-1.08	-1.95				3.16		-3.21	-9.25	

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Haut Lignon	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
04/02/2003	-1.23	-2.41				3.10		-3.57	-9.04	
20/03/2003	-0.96	-2.76				3.10		-3.92	-9.99	
09/04/2003	-0.86	-2.96				3.03		-3.93	-10.31	
29/04/2003	-0.91	-3.03				3.19		-3.94	-9.99	
26/06/2003	-0.95	-2.66				3.36		-3.90	-9.68	
21/07/2003	-1.10	-2.64				3.40		-3.80	-9.30	
29/08/2003	-0.87	-3.43				3.29		-3.59	-9.85	
06/11/2003	-0.93	-2.80				3.11		-3.90	-10.02	

Montarcher	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
16/09/2001	0.88	-2.62				2.44		-3.82	-13.71	
26/10/2001	-0.92	-1.18				3.17		-3.81	-10.29	
05/12/2001	0.56	-2.26				2.64		-3.55	-13.01	
22/01/2002	-0.28	-1.51				2.89		-3.44	-11.37	
01/03/2002	-0.79	-1.34				3.11		-3.77	-10.29	
26/03/2002	0.30	-1.73				2.73		-3.43	-12.48	
24/04/2002	-0.99	-1.12				3.21		-3.72	-9.95	
23/07/2002	0.93	-2.84				2.62		-3.04	-13.58	
17/10/2002	-0.82	-1.82				3.16		-3.84	-10.62	
04/02/2003	-1.06	-0.85				3.14		-3.45	-9.27	
20/03/2003	-0.94	-1.53				3.16		-3.65	-10.21	
29/04/2003	-1.03	-1.06				3.21		-3.58	-9.82	
26/06/2003	-1.10	-0.47				3.33		-3.22	-9.57	
21/07/2003	-1.39	-0.24				3.45		-3.26	-9.02	
29/08/2003	-1.35	-0.09				3.41		-3.30	-9.12	
06/11/2003	-0.85	-1.17				3.16		-3.57	-10.02	

Montarcher village	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
17/10/2002	-0.84	-1.23				3.19		-3.37	-10.22	
29/04/2003	-0.82	-1.47				3.14		-3.35	-10.29	
26/06/2003	-0.82	-1.58				3.32		-3.40	-10.23	
29/08/2003	-0.57	-1.70				3.24		-3.45	-10.79	
06/11/2003	-0.44	-1.18				3.00		-3.35	-11.15	

Planfoy	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
11/01/2002	-0.96	-3.26				3.01		-3.05	-10.29	
30/01/2002	-0.92	-3.37				3.10		-3.08	-10.34	
18/02/2002	-0.94	-3.37				3.05		-3.09	-10.34	
16/04/2002	-0.97	-3.37				3.07		-3.07	-10.18	
15/05/2002	-0.99	-3.50				3.16		-3.08	-10.02	
27/05/2002	-0.71	-3.70				3.07		-3.12	-10.69	
22/07/2002	-0.92	-3.56				3.20		-2.97	-9.81	
20/09/2002	-0.89	-3.50				3.20		-3.13	-10.29	
15/10/2002	-0.87	-3.57				3.16		-3.05	-9.52	
31/01/2003	-0.93	-3.34				3.01		-3.05	-10.22	
07/03/2003	-0.94	-3.37				3.09		-3.06	-10.20	
14/04/2003	-0.93	-3.35				3.09		-3.05	-10.03	
16/06/2003	-0.91	-3.54				3.26		-3.11	-10.11	
25/06/2003	-0.91	-3.57				3.28		-3.11	-10.11	
18/07/2003	-0.70	-3.72				3.19		-3.19	-10.64	
26/08/2003	-0.74	-3.75				3.22		-3.18	-10.56	
05/12/2003	-0.88	-3.47				3.13		-3.09	-10.29	

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Rochetaillée	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
11/01/2002	-0.86	-2.32				3.04		-3.35	-10.49	
30/01/2002	-0.88	-2.46				3.12		-3.35	-10.31	
18/02/2002	-0.93	-2.58				3.10		-3.33	-10.15	
16/04/2002	-0.90	-2.54				3.17		-3.34	-10.20	
15/05/2002	-0.98	-2.78				3.25		-3.32	-9.76	
27/05/2002	-0.89	-2.72				3.25		-3.36	-10.13	
22/07/2002	-0.88	-2.90				3.33		-3.35	-10.00	
20/09/2002	-0.85	-2.87				3.29		-3.37	-10.27	
15/10/2002	-0.87	-2.73				3.23		-3.37	-10.29	
31/01/2003	-0.25	-3.00				2.86		-3.32	-11.24	
07/03/2003	-0.90	-2.53				3.13		-3.34	-10.12	
14/04/2003	-0.83	-2.67				3.15		-3.33	-10.13	
16/06/2003	-0.86	-2.93				3.34		-3.41	-10.07	
25/06/2003	-0.89	-2.92				3.35		-3.40	-10.03	
18/07/2003	-0.70	-3.09				3.28		-3.49	-10.52	
26/08/2003	-0.70	-3.12				3.29		-3.49	-10.48	
05/12/2003	-0.89	-2.69				3.17		-3.32	-10.03	

ruisseau Chorsin	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
05/12/2001	-0.50	-3.46				3.00		-4.47	-11.59	
24/04/2002	-0.60	-2.54				3.08		-4.32	-11.26	
29/08/2002	-0.63	-3.23				3.17		-4.40	-11.04	
17/10/2002	-0.64	-3.61				3.10		-4.40	-11.26	
20/03/2003	-0.55	-4.08				2.97		-4.28	-11.38	
25/03/2003	-0.60	-2.54				3.08		-4.32	-11.26	
09/04/2003	-0.47	-3.34				2.93		-4.46	-11.75	
29/04/2003	-0.59	-3.70				3.09		-4.48	-11.48	
21/07/2003	-1.27	-2.62				3.37		-2.98	-8.56	
29/08/2003	-0.38	-3.75				3.13		-4.21	-11.58	
16/09/2003	-0.48	-3.42				2.96		-4.32	-11.77	
06/11/2003	-0.52	-3.49				2.98		-4.30	-11.60	

ruisseau Moingt	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
29/08/2003	-1.13	-1.27				3.33		-3.18	-8.93	
25/03/2003	-1.08	-1.54				3.19		-3.25	-9.25	
29/04/2003	-1.06	-1.33				3.26		-3.28	-9.23	
26/06/2003	-1.06	-1.44				3.45		-3.30	-9.02	
21/07/2003	-1.00	-1.45	-12.89	1.77		3.36	6.97	-2.74	-9.00	14.89
29/08/2003	-0.93	-1.54	-13.36	1.29		3.36	6.48	-3.25	-9.38	13.93
06/11/2003	-1.09	-0.74				3.08		-2.93	-9.14	

ruisseau St Alban	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
20/03/2003	-0.93	-1.54	-13.36	1.29		3.36	6.48	-3.25	-9.38	13.93

Sauvain	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
09/04/2003	-0.67	-3.07				3.02		-4.24	-11.06	
29/04/2003	-0.70	-2.89				3.21		-4.25	-10.68	
26/06/2003	-0.74	-2.83				3.20		-4.21	-10.67	
21/07/2003	-0.77	-2.80				3.24		-4.12	-10.53	
29/08/2003	-0.57	-3.18				3.26		-4.31	-11.02	

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Souvignet	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
11/01/2002	-1.25	-1.88				3.07		-3.24	-8.87	
30/01/2002	-1.25	-2.06				3.16		-3.24	-8.78	
18/02/2002	-1.29	-1.98				3.13		-3.22	-8.70	
16/04/2002	-1.24	-2.02				3.12		-3.18	-8.87	
15/05/2002	-1.20	-2.03				3.21		-3.28	-8.90	
20/09/2002	-1.17	-2.16				3.26		-3.22	-8.66	
15/10/2002	-1.16	-2.12				3.25		-3.31	-8.94	
07/03/2003	-1.23	-2.03				3.17		-3.22	-8.85	
14/04/2003	-1.19	-2.03				3.16		-3.22	-8.94	
16/06/2003	-1.15	-2.24				3.33		-3.29	-8.87	
25/06/2003	-1.09	-2.24				3.32		-3.35	-9.18	
18/07/2003	-1.04	-2.25				3.25		-3.33	-9.28	
26/08/2003	-1.01	-2.36				3.28		-3.37	-9.32	
05/12/2003	-0.57	-3.18				3.26		-4.31	-11.02	

St-Rambert	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
25/03/2003	-1.43	0.82			-2.15	3.29		-1.66	-7.27	
04/05/2003	-1.41	1.15			-2.27	3.29		-1.73	-7.34	
26/06/2003	-1.36	0.95			-2.20	3.39		-1.76	-7.37	
29/08/2003	-1.35	0.67			-2.28	3.35		-1.74	-7.41	
06/11/2003	-1.38	0.99			-2.28	3.29		-1.81	-7.47	

Sury	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
25/03/2003	-1.24	-0.74				3.22		-2.90	-8.76	
26/06/2003	-1.31	0.08				3.50		-2.31	-7.73	
06/11/2003	-1.16	0.24				3.18		-2.62	-8.67	

Tarentaise	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
18/02/2002	-1.69	-3.47				3.26		-2.72	-7.03	
16/04/2002	-1.76	-3.39				3.30		-2.46	-6.60	
15/05/2002	-1.65	-3.37				3.31		-2.84	-7.09	
27/05/2002	-1.63	-3.37				3.32		-2.89	-7.07	
20/09/2002	-1.60	-3.48				3.40		-2.87	-7.21	
15/10/2002	-1.58	-3.48				3.36		-2.89	-7.41	
31/01/2003	-1.55	-3.56				3.24		-2.87	-7.87	
07/03/2003	-1.52	-3.57				3.24		-3.01	-7.87	
14/04/2003	-1.55	-3.58				3.26		-2.91	-7.83	
16/06/2003	-1.42	-3.79				3.45		-3.06	-7.84	
25/06/2003	-1.45	-3.79				3.48		-3.16	-7.69	
18/07/2003	-1.46	-3.76				3.50		-3.18	-7.56	
26/08/2003	-1.39	-3.75			-4.08	3.49		-2.87	-7.79	
05/12/2003	-1.65	-3.33				3.30		-2.84	-6.90	

Vassalieu	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
25/03/2003	-1.14	-2.62				3.19		-2.69	-8.89	
04/05/2003	-1.11	-2.64				3.17		-2.68	-9.01	
26/06/2003	-1.09	-2.70				3.31		-2.64	-8.92	

Vidrieu	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
26/06/2003	-1.17	-0.64				3.47		-3.03	-8.41	
21/07/2003	-1.08	-1.00	-13.00	1.75		3.33	6.97	-2.69	-8.68	14.90
29/08/2003	-1.08	-1.07	-13.05	1.62		3.37	6.83	-2.94	-8.75	14.61
06/11/2003	-1.24	-0.32				3.12		-2.82	-8.55	

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Vizézy	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
05/12/2001	-0.99	-1.85				3.14		-3.67	-9.79	
24/04/2002	-1.03	-1.43				3.25		-3.59	-9.54	
23/07/2002	-0.97	-2.20				3.32		-3.70	-9.68	
17/10/2002	-0.94	-1.86				3.26		-3.68	-9.77	
04/02/2003	-1.18	-1.82				3.12		-3.23	-8.99	
20/03/2003	-0.98	-2.52				3.09		-3.64	-9.85	
29/04/2003	-0.93	-1.53				3.22		-3.64	-9.77	
26/06/2003	-0.97	-1.59				3.41		-3.68	-9.55	
22/07/2003	-0.88	-1.74				3.34		-3.58	-9.66	
29/08/2003	-0.79	-1.64				3.30		-3.52	-9.79	
06/11/2003	-0.71	-1.40				3.02		-3.46	-10.27	

Vollon	si_Cristobalite(alpha)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hematite
07/08/2002	-1.67	0.39			-2.77	3.49		-1.87	-6.97	
25/03/2003	-1.37	0.71			-2.65	3.15		-1.99	-7.80	
04/05/2003	-1.58	1.44			-3.09	3.42		-1.99	-6.64	
26/06/2003	-1.31	0.32			-2.63	3.47		-1.93	-7.65	
29/08/2003	-1.24	-0.32			-3.18	3.44		-1.99	-7.99	
06/11/2003	-1.36	1.29			-2.85	3.18		-1.82	-7.63	

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Barbanche	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
11/01/2002	4.94	1.42	5.41	2.90	2.71	2.29	2.43	2.20	9.34	5.97
30/01/2002	4.88	1.16	5.49	2.95	2.87	2.35	2.62	2.34	9.09	5.99
18/02/2002	4.88	1.22	5.46	2.92	2.80	2.31	2.55	2.28	9.16	5.99
16/04/2002	4.95	1.22	5.54	2.95	2.91	2.40	2.67	2.38	9.18	6.02
15/05/2002	5.12	1.32	5.67	2.92	3.02	2.55	2.81	2.48	9.38	6.13
27/05/2002	5.11	1.28	5.68	2.89	3.00	2.53	2.80	2.47	9.37	6.16
22/07/2002	5.20	1.39	5.70	2.72	2.88	2.49	2.70	2.39	9.62	6.29
20/09/2002	5.21	1.18	5.85	2.87	3.19	2.67	3.03	2.64	9.39	6.28
15/10/2002	5.08	1.14	5.72	2.86	3.05	2.53	2.87	2.52	9.28	6.21
31/01/2003	4.76	1.13	5.37	2.97	2.75	2.22	2.47	2.23	8.98	5.90
07/03/2003	4.88	1.13	5.51	2.95	2.89	2.36	2.65	2.36	9.08	6.01
14/04/2003	4.91	1.21	5.49	2.87	2.80	2.32	2.56	2.29	9.20	6.05
16/06/2003	5.18	1.16	5.82	2.86	3.15	2.63	3.00	2.61	9.36	6.27
25/06/2003	5.18	1.18	5.81	2.82	3.10	2.60	2.95	2.58	9.40	6.29
18/07/2003	5.31	1.18	5.96	2.95	3.38	2.84	3.26	2.81	9.40	6.29
26/08/2003	5.41	1.25	6.04	2.94	3.45	2.92	3.34	2.86	9.52	6.35
05/12/2003	5.11	1.32	5.65	2.99	3.06	2.57	2.85	2.51	9.33	6.07

Barbarie	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
11/01/2002	4.79	1.58	5.15	3.09	2.57	2.17	2.21	2.04	9.20	5.67
30/01/2002	5.06	1.57	5.46	2.97	2.81	2.41	2.53	2.27	9.47	5.95
18/02/2002	4.58	1.68	4.83	2.42	1.66	1.50	1.26	1.33	9.57	5.94
16/04/2002	5.02	1.55	5.42	3.12	2.89	2.46	2.60	2.33	9.32	5.83
15/05/2002	5.21	1.61	5.60	2.95	2.94	2.56	2.70	2.40	9.61	6.07
27/05/2002	5.12	1.43	5.60	3.01	3.01	2.55	2.77	2.45	9.40	6.03
22/07/2002	5.24	1.43	5.74	2.80	2.97	2.57	2.79	2.46	9.63	6.27
20/09/2002	5.26	1.47	5.74	2.83	3.01	2.60	2.82	2.48	9.64	6.24
15/10/2002	5.28	1.50	5.74	2.90	3.06	2.65	2.86	2.52	9.62	6.19
31/01/2003	4.95	1.68	5.27	3.07	2.67	2.30	2.33	2.13	9.39	5.76
07/03/2003	5.10	1.58	5.50	3.02	2.89	2.49	2.62	2.34	9.47	5.95
14/04/2003	5.14	1.54	5.56	3.07	3.01	2.57	2.75	2.44	9.43	5.95
16/06/2003	5.52	1.44	6.06	2.97	3.47	2.99	3.35	2.88	9.71	6.34
25/06/2003	5.59	1.46	6.12	2.95	3.51	3.05	3.41	2.92	9.78	6.40
18/07/2003	5.60	1.62	6.04	3.14	3.58	3.12	3.43	2.95	9.75	6.21
26/08/2003	5.68	1.68	6.10	3.05	3.56	3.14	3.43	2.94	9.91	6.31
05/12/2003	5.30	1.63	5.69	3.05	3.12	2.71	2.89	2.54	9.62	6.05

Bessat	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
11/01/2002	6.00	2.28	6.14	3.93	4.28	3.81	4.06	3.43	9.92	5.69
30/01/2002	5.84	2.08	6.07	3.67	4.00	3.54	3.79	3.23	9.87	5.84
18/02/2002	4.75	1.49	5.14	2.52	2.10	1.83	1.78	1.71	9.50	6.07
16/04/2002	6.03	2.17	6.23	3.84	4.30	3.82	4.13	3.47	9.94	5.83
15/05/2002	5.55	2.11	5.70	3.07	3.08	2.83	2.83	2.50	10.10	6.05
20/09/2002	6.05	1.89	6.41	3.86	4.55	3.95	4.43	3.70	9.75	5.93
15/10/2002	6.07	1.92	6.43	3.94	4.63	4.02	4.52	3.76	9.73	5.88
31/01/2003	5.96	1.87	6.33	4.05	4.64	3.99	4.49	3.74	9.55	5.73
07/03/2003	5.92	1.83	6.31	3.95	4.53	3.89	4.38	3.66	9.56	5.79
14/04/2003	6.04	1.92	6.39	4.04	4.69	4.05	4.56	3.79	9.63	5.77
16/06/2003	6.29	1.95	6.65	3.87	4.81	4.22	4.75	3.93	9.95	6.07
05/12/2003	6.09	2.09	6.35	3.88	4.48	3.95	4.34	3.63	9.89	5.87

Chavagneux	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
29/08/2002	5.42	0.89	6.27	3.12	3.92	3.20	3.88	3.26	9.14	6.34
25/03/2003	5.25	0.98	6.03	3.62	4.07	3.26	3.94	3.31	8.74	5.82
04/05/2003	5.53	1.12	6.26	3.35	4.09	3.38	4.02	3.37	9.21	6.17

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Chorsin grange	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
26/10/2001	6.36	2.17	6.61	4.01	4.87	4.31	4.78	3.96	10.04	5.94
20/03/2003	6.18	2.39	6.27	4.10	4.55	4.06	4.35	3.65	10.00	5.66
04/05/2003	5.42	0.89	6.27	3.12	3.92	3.20	3.88	3.26	9.14	6.34

Essertines	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
11/01/2002	5.45	1.74	5.82	3.79	3.89	3.30	3.64	3.11	9.28	5.58
30/01/2002	5.71	1.63	6.17	3.63	4.14	3.54	4.00	3.37	9.49	5.93
18/02/2002	5.23	1.25	5.86	3.72	3.91	3.18	3.70	3.15	8.86	5.66
15/05/2002	5.55	1.94	5.80	3.07	3.22	2.90	3.00	2.63	9.98	6.10
20/09/2002	6.01	1.70	6.47	3.53	4.38	3.81	4.32	3.61	9.81	6.19
15/10/2002	5.86	1.64	6.34	3.63	4.33	3.72	4.23	3.54	9.60	6.03
07/03/2003	5.49	1.49	6.01	3.81	4.14	3.45	3.96	3.34	9.12	5.69
14/04/2003	5.72	1.64	6.19	3.88	4.37	3.70	4.22	3.54	9.34	5.76
16/06/2003	6.28	1.80	6.71	3.41	4.53	4.01	4.54	3.76	10.13	6.42
25/06/2003	6.32	1.78	6.76	3.35	4.55	4.03	4.57	3.78	10.19	6.49
18/07/2003	6.40	1.84	6.82	3.35	4.61	4.10	4.64	3.83	10.28	6.53

Essertines dauphin	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
11/01/2002	5.89	2.41	5.93	4.06	4.17	3.72	3.89	3.31	9.82	5.45
30/01/2002	5.96	2.26	6.09	3.93	4.25	3.78	4.04	3.41	9.85	5.65
18/02/2002	5.90	2.20	6.06	3.75	4.07	3.62	3.86	3.27	9.91	5.77
16/04/2002	4.96	1.82	5.18	2.46	2.06	1.91	1.74	1.68	9.89	6.13
27/05/2002	6.07	2.08	6.32	3.74	4.37	3.87	4.23	3.55	9.95	5.93
22/07/2002	5.88	2.05	6.12	3.40	3.84	3.45	3.68	3.14	10.04	6.06
20/09/2002	6.25	2.16	6.48	3.73	4.51	4.03	4.41	3.68	10.13	6.05
15/10/2002	6.28	2.21	6.48	3.82	4.58	4.09	4.47	3.73	10.13	5.98
07/03/2003	5.91	2.07	6.15	3.87	4.28	3.76	4.10	3.45	9.74	5.73
14/04/2003	5.93	2.03	6.20	3.86	4.33	3.79	4.16	3.50	9.74	5.76
16/06/2003	6.44	1.96	6.80	3.39	4.63	4.15	4.65	3.84	10.33	6.47
25/06/2003	6.35	1.90	6.73	3.34	4.58	4.09	4.60	3.80	10.20	6.41
18/07/2003	6.65	2.20	6.89	3.65	5.02	4.53	5.06	4.14	10.35	6.25
26/08/2003	6.32	1.88	6.69	3.42	4.66	4.13	4.68	3.85	10.07	6.28
05/12/2003	6.23	2.40	6.32	3.85	4.42	4.00	4.26	3.58	10.18	5.84

exutoire	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
11/01/2002	5.06	1.56	5.48	3.31	3.12	2.63	2.82	2.50	9.23	5.72
30/01/2002	5.12	1.65	5.49	3.21	3.03	2.60	2.74	2.43	9.40	5.80
18/02/2002	5.07	1.51	5.51	3.26	3.12	2.62	2.84	2.51	9.24	5.78
15/05/2002	5.55	1.68	5.94	3.05	3.38	2.98	3.22	2.78	9.82	6.21
27/05/2002	5.47	1.38	6.04	3.18	3.64	3.09	3.51	3.00	9.48	6.18
20/09/2002	5.63	1.46	6.17	3.12	3.72	3.21	3.62	3.08	9.69	6.30
15/10/2002	5.51	1.49	6.02	3.24	3.65	3.12	3.50	2.99	9.55	6.12
31/01/2003	5.06	1.47	5.53	3.39	3.24	2.70	2.96	2.60	9.12	5.70
07/03/2003	5.17	1.45	5.66	3.31	3.32	2.78	3.08	2.68	9.23	5.84
14/04/2003	5.22	1.36	5.77	3.33	3.47	2.89	3.26	2.82	9.19	5.89
16/06/2003	5.65	1.53	6.16	3.30	3.85	3.31	3.73	3.17	9.62	6.17
25/06/2003	5.64	1.46	6.19	3.29	3.88	3.32	3.77	3.19	9.58	6.19
18/07/2003	5.86	1.62	6.35	3.53	4.24	3.65	4.15	3.48	9.67	6.12
26/08/2003	5.96	1.66	6.44	3.44	4.26	3.70	4.20	3.51	9.82	6.24
05/12/2003	5.64	1.93	5.91	3.48	3.69	3.24	3.47	2.98	9.75	5.88

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Haut Lignon	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
04/02/2003	5.19	1.86	5.45	3.33	3.06	2.67	2.74	2.44	9.51	5.69
20/03/2003	5.85	2.21	6.00	3.78	4.00	3.56	3.76	3.21	9.87	5.72
09/04/2003	5.93	2.29	6.05	4.04	4.28	3.79	4.03	3.41	9.80	5.56
29/04/2003	6.03	2.04	6.30	3.72	4.29	3.80	4.15	3.49	9.93	5.96
26/06/2003	6.24	1.90	6.61	3.36	4.36	3.89	4.33	3.61	10.22	6.40
21/07/2003	6.02	1.84	6.38	3.09	3.87	3.48	3.81	3.22	10.22	6.47
29/08/2003	6.40	2.20	6.62	3.60	4.54	4.10	4.48	3.73	10.36	6.24
06/11/2003	5.87	2.11	6.08	3.80	4.13	3.64	3.92	3.32	9.81	5.76

Montarcher	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
16/09/2001	10.03	6.38	8.38	7.43	9.43	9.15	9.36	7.42	12.74	4.42
26/10/2001	5.88	1.82	6.26	3.72	4.28	3.71	4.14	3.48	9.69	5.93
05/12/2001	9.36	5.42	8.16	6.66	8.60	8.25	8.58	6.83	12.23	4.88
22/01/2002	7.25	3.34	6.96	5.08	6.09	5.59	5.97	4.86	10.61	5.32
01/03/2002	6.28	2.40	6.38	4.00	4.60	4.13	4.44	3.71	10.13	5.79
26/03/2002	8.73	4.76	7.83	6.15	7.86	7.45	7.82	6.25	11.74	5.05
24/04/2002	5.81	1.77	6.20	3.56	4.09	3.55	3.95	3.33	9.71	6.01
23/07/2002	10.54	6.51	8.87	7.18	9.76	9.56	9.84	7.76	13.33	4.90
17/10/2002	6.33	2.39	6.44	3.88	4.56	4.12	4.43	3.70	10.24	5.92
04/02/2003	5.45	1.58	5.90	3.51	3.76	3.19	3.56	3.04	9.36	5.84
20/03/2003	5.93	2.02	6.20	3.70	4.18	3.69	4.02	3.39	9.85	5.90
29/04/2003	5.75	1.81	6.11	3.47	3.91	3.42	3.75	3.19	9.75	6.01
26/06/2003	5.69	1.46	6.24	3.15	3.83	3.30	3.75	3.18	9.70	6.32
21/07/2003	5.10	0.88	5.90	2.54	2.98	2.46	2.88	2.52	9.36	6.56
29/08/2003	5.13	0.93	5.90	2.67	3.09	2.54	2.97	2.59	9.32	6.46
06/11/2003	6.07	1.99	6.38	3.82	4.49	3.94	4.37	3.65	9.85	5.92

Montarcher village	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
17/10/2002	6.19	2.08	6.46	3.78	4.54	4.02	4.44	3.70	9.99	5.99
29/04/2003	6.18	2.20	6.38	3.90	4.54	4.03	4.40	3.68	9.99	5.86
26/06/2003	6.52	2.15	6.78	3.61	4.74	4.27	4.73	3.91	10.39	6.33
29/08/2003	7.09	2.67	7.13	4.11	5.51	5.04	5.52	4.51	10.76	6.17
06/11/2003	7.02	3.02	6.87	4.65	5.66	5.18	5.56	4.55	10.55	5.60

Planfoy	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
11/01/2002	5.39	1.62	5.82	3.90	3.99	3.33	3.74	3.18	9.09	5.51
30/01/2002	5.65	1.68	6.08	3.82	4.19	3.56	4.01	3.38	9.37	5.74
18/02/2002	5.59	1.81	5.94	3.85	4.06	3.47	3.83	3.25	9.38	5.62
16/04/2002	5.59	1.81	5.94	3.79	4.00	3.43	3.77	3.21	9.43	5.67
15/05/2002	5.81	1.97	6.08	3.62	3.99	3.51	3.81	3.23	9.80	5.88
27/05/2002	6.40	2.49	6.47	4.18	4.84	4.35	4.69	3.90	10.14	5.71
22/07/2002	5.94	1.80	6.33	3.65	4.32	3.76	4.21	3.53	9.74	6.01
20/09/2002	5.95	1.75	6.38	3.70	4.41	3.81	4.31	3.60	9.69	6.01
15/10/2002	5.93	1.81	6.33	3.79	4.44	3.83	4.31	3.61	9.64	5.90
31/01/2003	5.56	1.85	5.88	3.93	4.06	3.46	3.81	3.24	9.33	5.52
07/03/2003	5.67	1.79	6.03	3.81	4.13	3.54	3.93	3.32	9.45	5.71
14/04/2003	5.66	1.73	6.06	3.82	4.16	3.55	3.97	3.36	9.40	5.72
16/06/2003	6.02	1.71	6.48	3.59	4.43	3.84	4.36	3.64	9.79	6.16
25/06/2003	6.06	1.69	6.53	3.54	4.46	3.87	4.41	3.67	9.83	6.22
18/07/2003	6.41	2.05	6.73	4.01	5.04	4.43	4.99	4.11	9.97	6.00
26/08/2003	6.45	2.10	6.75	3.91	4.96	4.39	4.92	4.06	10.10	6.09
05/12/2003	5.89	1.88	6.24	3.85	4.37	3.78	4.21	3.54	9.64	5.82

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Rochetaillée	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
11/01/2002	5.29	0.98	6.09	4.02	4.45	3.53	4.29	3.59	8.52	5.59
30/01/2002	5.54	1.23	6.23	3.87	4.44	3.63	4.31	3.60	8.97	5.80
18/02/2002	5.63	1.67	6.07	3.81	4.17	3.54	3.98	3.36	9.36	5.74
16/04/2002	5.67	1.35	6.29	3.75	4.40	3.66	4.29	3.58	9.21	5.93
15/05/2002	6.01	1.98	6.31	3.50	4.12	3.66	4.00	3.37	10.04	6.12
27/05/2002	5.98	1.60	6.50	3.65	4.50	3.86	4.44	3.70	9.65	6.13
22/07/2002	6.31	1.90	6.69	3.52	4.58	4.06	4.56	3.78	10.16	6.34
20/09/2002	6.23	1.80	6.67	3.64	4.66	4.08	4.64	3.84	9.96	6.24
15/10/2002	6.02	1.69	6.49	3.72	4.55	3.92	4.48	3.72	9.69	6.08
31/01/2003	7.07	3.03	6.94	5.20	6.19	5.56	6.07	4.93	10.22	5.24
07/03/2003	5.63	1.42	6.21	3.81	4.35	3.62	4.21	3.53	9.19	5.83
14/04/2003	5.94	1.74	6.38	3.89	4.57	3.91	4.45	3.71	9.55	5.87
16/06/2003	6.34	1.84	6.76	3.55	4.68	4.13	4.68	3.87	10.12	6.36
25/06/2003	6.24	1.74	6.71	3.43	4.56	4.01	4.57	3.78	10.05	6.40
18/07/2003	6.65	2.12	6.96	3.88	5.16	4.59	5.17	4.24	10.28	6.25
26/08/2003	6.66	2.12	6.97	3.83	5.15	4.59	5.18	4.24	10.30	6.27
05/12/2003	5.93	1.82	6.32	3.77	4.39	3.80	4.26	3.57	9.69	5.93

ruisseau Chorsin	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
05/12/2001	6.77	2.79	6.73	4.68	5.50	4.95	5.37	4.41	10.26	5.53
24/04/2002	6.57	2.40	6.72	4.40	5.29	4.69	5.19	4.27	10.07	5.73
29/08/2002	6.67	2.39	6.84	4.19	5.25	4.69	5.19	4.27	10.27	5.96
17/10/2002	6.62	2.60	6.66	4.30	5.12	4.62	5.00	4.13	10.30	5.77
20/03/2003	6.75	3.02	6.57	4.65	5.27	4.81	5.07	4.20	10.42	5.45
25/03/2003	6.57	2.40	6.72	4.40	5.29	4.69	5.19	4.27	10.07	5.73
09/04/2003	6.72	2.87	6.63	4.86	5.53	4.97	5.35	4.40	10.17	5.35
29/04/2003	6.75	2.69	6.75	4.42	5.30	4.79	5.19	4.27	10.38	5.75
21/07/2003	5.30	1.12	5.98	2.82	3.31	2.78	3.21	2.76	9.43	6.39
29/08/2003	7.42	3.09	7.28	4.66	6.05	5.57	6.03	4.90	10.92	5.90
16/09/2003	6.80	2.94	6.68	4.76	5.49	4.98	5.33	4.39	10.32	5.44
06/11/2003	6.84	3.05	6.66	4.69	5.39	4.93	5.21	4.30	10.49	5.49

ruisseau Moingt	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
29/08/2003	5.70	1.59	6.17	3.10	3.70	3.23	3.60	3.07	9.82	6.31
25/03/2003	5.55	1.68	5.96	3.43	3.72	3.21	3.54	3.03	9.56	5.94
29/04/2003	5.74	1.68	6.17	3.35	3.89	3.38	3.76	3.19	9.74	6.13
26/06/2003	6.12	1.69	6.59	3.03	4.09	3.64	4.09	3.42	10.22	6.63
21/07/2003	6.28	2.14	6.51	3.24	4.14	3.79	4.09	3.43	10.47	6.41
29/08/2003	6.39	2.12	6.65	3.38	4.40	4.00	4.37	3.64	10.44	6.41
06/11/2003	5.42	1.87	5.70	3.54	3.54	3.07	3.27	2.83	9.51	5.69

ruisseau St Alban	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
20/03/2003	6.39	2.12	6.65	3.38	4.40	4.00	4.37	3.64	10.44	6.41

Sauvain	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
09/04/2003	6.54	2.81	6.44	4.36	4.91	4.48	4.72	3.93	10.33	5.58
29/04/2003	6.70	2.50	6.80	4.02	5.04	4.58	4.98	4.11	10.48	6.05
26/06/2003	6.49	2.19	6.72	3.68	4.87	4.38	4.87	3.99	10.20	6.11
21/07/2003	6.52	2.18	6.75	3.57	4.81	4.34	4.82	3.96	10.30	6.22
29/08/2003	7.10	2.63	7.16	4.02	5.50	5.04	5.54	4.52	10.77	6.23

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Souvignet	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
11/01/2002	4.77	1.21	5.35	3.35	3.05	2.44	2.74	2.43	8.78	5.61
30/01/2002	5.13	1.54	5.56	3.21	3.12	2.64	2.85	2.51	9.34	5.85
18/02/2002	4.91	1.39	5.40	3.18	2.94	2.44	2.65	2.36	9.11	5.77
16/04/2002	5.04	1.48	5.50	3.28	3.12	2.61	2.84	2.51	9.19	5.76
15/05/2002	5.17	1.23	5.78	3.20	3.39	2.80	3.20	2.77	9.16	6.00
20/09/2002	5.38	1.37	5.94	3.15	3.51	2.97	3.36	2.88	9.43	6.13
15/10/2002	5.38	1.41	5.92	3.21	3.53	2.99	3.36	2.89	9.43	6.08
07/03/2003	5.11	1.38	5.63	3.22	3.22	2.68	2.97	2.60	9.21	5.89
14/04/2003	5.15	1.40	5.67	3.30	3.33	2.78	3.09	2.69	9.20	5.85
16/06/2003	5.63	1.49	6.15	3.10	3.67	3.17	3.56	3.04	9.73	6.31
25/06/2003	5.67	1.43	6.23	3.23	3.88	3.32	3.79	3.21	9.63	6.27
18/07/2003	5.71	1.61	6.18	3.39	3.94	3.40	3.82	3.23	9.65	6.12
26/08/2003	5.90	1.79	6.29	3.40	4.05	3.56	3.95	3.33	9.90	6.18
05/12/2003	7.10	2.63	7.16	4.02	5.50	5.04	5.54	4.52	10.77	6.23

St-Rambert	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
25/03/2003	5.31	1.96	5.50	2.55	2.53	2.37	2.29	2.08	10.10	6.22
04/05/2003	5.38	2.01	5.54	2.58	2.61	2.45	2.37	2.14	10.15	6.22
26/06/2003	5.63	1.98	5.84	2.51	2.86	2.70	2.71	2.39	10.36	6.47
29/08/2003	5.61	2.03	5.78	2.57	2.86	2.70	2.69	2.38	10.33	6.38
06/11/2003	5.49	2.15	5.59	2.63	2.67	2.55	2.44	2.20	10.29	6.22

Sury	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
25/03/2003	5.14	1.29	5.71	3.09	3.23	2.69	3.03	2.64	9.25	6.02
26/06/2003	5.59	1.28	6.20	2.41	3.26	2.87	3.25	2.78	9.93	6.76
06/11/2003	5.46	1.78	5.79	3.23	3.41	2.99	3.20	2.77	9.66	5.94

Tarentaise	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
18/02/2002	4.32	1.10	4.88	2.31	1.68	1.35	1.33	1.37	9.10	6.06
16/04/2002	4.24	1.03	4.82	2.11	1.46	1.17	1.12	1.21	9.12	6.15
15/05/2002	4.29	0.72	5.07	2.29	1.91	1.45	1.63	1.59	8.84	6.19
27/05/2002	4.34	0.70	5.13	2.30	1.98	1.51	1.72	1.65	8.86	6.22
20/09/2002	4.53	0.65	5.37	2.25	2.20	1.71	2.00	1.86	9.00	6.42
15/10/2002	4.51	0.72	5.32	2.36	2.22	1.73	2.00	1.86	8.96	6.31
31/01/2003	4.48	1.04	5.10	2.58	2.15	1.72	1.84	1.75	8.99	6.01
07/03/2003	4.55	1.05	5.18	2.62	2.26	1.81	1.96	1.84	9.03	6.03
14/04/2003	4.56	1.07	5.17	2.55	2.19	1.77	1.90	1.80	9.08	6.07
16/06/2003	5.04	0.80	5.86	2.37	2.87	2.36	2.79	2.44	9.32	6.61
25/06/2003	5.01	0.76	5.85	2.28	2.79	2.29	2.71	2.38	9.34	6.67
18/07/2003	5.04	0.74	5.89	2.28	2.81	2.31	2.74	2.41	9.36	6.71
26/08/2003	5.10	0.72	5.98	2.38	3.02	2.46	2.97	2.57	9.30	6.68
05/12/2003	4.33	0.82	5.05	2.28	1.87	1.46	1.58	1.55	8.94	6.18

Vassalieu	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
25/03/2003	5.61	1.99	5.85	3.27	3.47	3.10	3.25	2.81	9.88	5.96
04/05/2003	5.67	2.02	5.88	3.34	3.56	3.19	3.35	2.89	9.89	5.93
26/06/2003	5.92	1.91	6.22	3.15	3.79	3.41	3.69	3.13	10.12	6.28

Vidrieu	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
26/06/2003	5.87	1.53	6.39	2.81	3.71	3.28	3.68	3.12	10.10	6.66
21/07/2003	6.10	2.18	6.28	3.14	3.81	3.51	3.70	3.14	10.43	6.33
29/08/2003	6.08	1.99	6.37	3.12	3.89	3.54	3.82	3.23	10.32	6.41
06/11/2003	5.21	1.82	5.48	3.25	3.06	2.67	2.76	2.45	9.52	5.76

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Vizézy	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
05/12/2001	5.83	2.09	6.05	3.67	3.97	3.52	3.77	3.21	9.86	5.83
24/04/2002	5.80	1.73	6.22	3.43	3.99	3.48	3.87	3.27	9.77	6.11
23/07/2002	6.11	1.87	6.49	3.42	4.27	3.78	4.20	3.52	10.08	6.29
17/10/2002	6.20	2.18	6.41	3.56	4.26	3.85	4.15	3.49	10.25	6.14
04/02/2003	5.28	1.75	5.62	3.37	3.30	2.85	3.03	2.65	9.46	5.76
20/03/2003	5.75	2.11	5.95	3.75	3.93	3.47	3.70	3.16	9.77	5.71
29/04/2003	6.04	2.01	6.33	3.63	4.26	3.78	4.14	3.48	9.98	6.04
26/06/2003	6.28	1.87	6.66	3.27	4.34	3.88	4.33	3.61	10.30	6.51
22/07/2003	6.52	2.28	6.71	3.52	4.56	4.16	4.52	3.76	10.55	6.36
29/08/2003	6.70	2.44	6.82	3.72	4.83	4.43	4.81	3.98	10.63	6.28
06/11/2003	6.44	2.76	6.35	4.26	4.76	4.34	4.56	3.80	10.28	5.57

Vollon	si_Illite	si_K-Feldspar	si_Kaolinite	si_Laumontite	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite
07/08/2002	4.86	1.19	5.42	1.92	1.96	1.73	1.77	1.69	9.76	6.66
25/03/2003	4.87	1.47	5.29	2.90	2.64	2.23	2.34	2.13	9.26	5.85
04/05/2003	4.47	0.36	5.47	2.15	2.32	1.74	2.17	1.98	8.79	6.51
26/06/2003	5.45	1.14	6.12	2.47	3.23	2.78	3.19	2.74	9.72	6.68
29/08/2003	5.63	1.38	6.19	2.67	3.43	3.00	3.38	2.89	9.88	6.60
06/11/2003	4.60	0.75	5.40	2.84	2.80	2.17	2.58	2.29	8.63	5.95

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Barbanche	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
11/01/2002	-0.79		0.11	-2.22				-8.14
30/01/2002	-0.75		0.18	-2.18				-8.54
18/02/2002	-0.77		0.16	-2.20				-8.38
16/04/2002	-0.75		0.24	-2.17				-8.48
15/05/2002	-0.73		0.41	-2.14				-8.37
27/05/2002	-0.74		0.45	-2.14				-8.30
22/07/2002	-0.79		0.60	-2.17				-7.90
20/09/2002	-0.71		0.67	-2.09				-8.43
15/10/2002	-0.74		0.52	-2.14				-8.46
31/01/2003	-0.77		0.02	-2.22				-8.51
07/03/2003	-0.75		0.20	-2.18				-8.57
14/04/2003	-0.78		0.23	-2.20				-8.39
16/06/2003	-0.72		0.64	-2.10				-8.47
25/06/2003	-0.74		0.66	-2.12				-8.44
18/07/2003	-0.66		0.76	-2.03				-8.60
26/08/2003	-0.65		0.85	-2.02				-8.50
05/12/2003	-0.71		0.35	-2.12				-8.45

Barbarie	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
11/01/2002	-0.77		-0.33	-2.25				-8.29
30/01/2002	-0.75		0.12	-2.19				-8.25
18/02/2002	-1.06		-0.26	-2.51				-6.98
16/04/2002	-0.71		-0.02	-2.16				-8.50
15/05/2002	-0.73		0.32	-2.15				-8.26
27/05/2002	-0.71		0.28	-2.13				-8.47
22/07/2002	-0.76		0.58	-2.15				-8.17
20/09/2002	-0.74		0.56	-2.14				-8.09
15/10/2002	-0.72		0.51	-2.12				-8.27
31/01/2003	-0.76		-0.17	-2.22				-8.30
07/03/2003	-0.73		0.15	-2.16				-8.37
14/04/2003	-0.70		0.19	-2.13				-8.46
16/06/2003	-0.64		0.85	-2.01				-8.54
25/06/2003	-0.63		0.94	-1.99				-8.56
18/07/2003	-0.58		0.72	-1.96				-8.56
26/08/2003	-0.60		0.85	-1.97				-8.35
05/12/2003	-0.68		0.35	-2.10				-8.34

Bessat	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
11/01/2002	-0.28		0.31	-1.73				-9.46
30/01/2002	-0.39		0.39	-1.82				-9.26
18/02/2002	-0.97		0.05	-2.40				-7.45
16/04/2002	-0.30		0.48	-1.73				-9.51
15/05/2002	-0.67		0.36	-2.09				-8.15
20/09/2002	-0.26		0.69	-1.66				-9.87
15/10/2002	-0.23		0.66	-1.64				-9.91
31/01/2003	-0.20		0.47	-1.63				-9.80
07/03/2003	-0.24		0.51	-1.67				-9.89
14/04/2003	-0.19		0.55	-1.61				-9.81
16/06/2003	-0.21		0.98	-1.59				-9.82
05/12/2003	-0.26		0.60	-1.67				-9.71

Chavagneux	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
29/08/2002	-0.52		1.03	-1.87				-9.46
25/03/2003	-0.40		0.40	-1.81				-9.87
04/05/2003	-0.44		0.87	-1.81				-9.47

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Chorsin grange	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
26/10/2001	-0.16	-12.03	0.83	-1.56	-2.55	-0.20	-0.60	-9.82
20/03/2003	-0.20		0.36	-1.64				-9.49
04/05/2003	-0.52		1.03	-1.87				-9.46

Essertines	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
11/01/2002	-0.39		0.03	-1.85				-9.87
30/01/2002	-0.38		0.56	-1.79				-9.89
18/02/2002	-0.41		0.12	-1.86				-10.37
15/05/2002	-0.65		0.48	-2.05				-8.89
20/09/2002	-0.35		1.00	-1.71				-9.64
15/10/2002	-0.34		0.77	-1.73				-9.90
07/03/2003	-0.34		0.25	-1.78				-9.99
14/04/2003	-0.29		0.42	-1.71				-9.87
16/06/2003	-0.34		1.36	-1.67				-9.46
25/06/2003	-0.35		1.47	-1.67				-9.63
18/07/2003	-0.34		1.54	-1.65				-9.62

Essertines dauphin	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
11/01/2002	-0.27		-0.02	-1.74				-9.54
30/01/2002	-0.28		0.27	-1.72				-9.53
18/02/2002	-0.36		0.35	-1.79				-9.33
16/04/2002	-0.98	-13.57	0.13	-2.39	-4.83	-2.46		-7.30
27/05/2002	-0.30		0.68	-1.70				-9.40
22/07/2002	-0.47		0.65	-1.86				-8.50
20/09/2002	-0.28		0.87	-1.66				-9.40
15/10/2002	-0.25		0.81	-1.64				-9.39
07/03/2003	-0.29		0.38	-1.72				-9.51
14/04/2003	-0.29		0.44	-1.71				-9.53
16/06/2003	-0.32		1.50	-1.63				-9.27
25/06/2003	-0.32		1.49	-1.62				-9.40
18/07/2003	-0.16		1.49	-1.46				-9.49
26/08/2003	-0.27		1.41	-1.57				-9.48
05/12/2003	-0.26		0.60	-1.67				-8.93

exutoire	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
11/01/2002	-0.63		-0.08	-2.09				-8.83
30/01/2002	-0.66		0.00	-2.12				-8.60
18/02/2002	-0.64		0.00	-2.10				-8.85
15/05/2002	-0.63		0.66	-2.02				-8.54
27/05/2002	-0.56		0.70	-1.95				-8.98
20/09/2002	-0.56		0.90	-1.93				-8.90
15/10/2002	-0.55		0.62	-1.94				-9.02
31/01/2003	-0.59		-0.07	-2.06				-9.02
07/03/2003	-0.60		0.14	-2.04				-9.02
14/04/2003	-0.57		0.26	-2.00				-9.14
16/06/2003	-0.50		0.76	-1.88				-9.09
25/06/2003	-0.50		0.80	-1.88				-9.17
18/07/2003	-0.38		0.84	-1.76				-9.26
26/08/2003	-0.39		1.00	-1.76				-9.11
05/12/2003	-0.49		0.35	-1.91				-8.77

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Haut Lignon	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
04/02/2003	-0.63		-0.13	-2.10				-8.66
20/03/2003	-0.37		0.24	-1.81				-9.25
09/04/2003	-0.26		0.13	-1.72				-9.50
29/04/2003	-0.33		0.65	-1.74				-9.38
26/06/2003	-0.38		1.27	-1.72				-9.14
21/07/2003	-0.53		1.17	-1.87				-8.82
29/08/2003	-0.30		1.12	-1.66				-9.03
06/11/2003	-0.34		0.33	-1.78				-9.37

Montarcher	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
16/09/2001	1.48		0.81	0.04				-8.79
26/10/2001	-0.33		0.60	-1.74				-9.89
05/12/2001	1.14		1.05	-0.26				-9.02
22/01/2002	0.31		0.58	-1.12				-9.48
01/03/2002	-0.21		0.56	-1.62				-9.33
26/03/2002	0.89		0.96	-0.52				-9.15
24/04/2002	-0.40		0.64	-1.80				-9.60
23/07/2002	1.50		1.59	0.14				-8.44
17/10/2002	-0.24		0.72	-1.64				-9.66
04/02/2003	-0.47		0.32	-1.90				-9.13
20/03/2003	-0.35		0.54	-1.76				-9.63
29/04/2003	-0.45		0.59	-1.85				-9.44
26/06/2003	-0.53		0.97	-1.89				-9.50
21/07/2003	-0.82		0.94	-2.17				-9.51
29/08/2003	-0.78		0.86	-2.14				-9.58
06/11/2003	-0.27		0.69	-1.67				-9.44

Montarcher village	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
17/10/2002	-0.26		0.81	-1.65				-9.55
29/04/2003	-0.24		0.64	-1.64				-9.51
26/06/2003	-0.26		1.32	-1.60				-9.43
29/08/2003	-0.01		1.43	-1.34				-9.47
06/11/2003	0.14		0.76	-1.26				-9.56

Planfoy	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
11/01/2002	-0.35		-0.04	-1.83				-10.17
30/01/2002	-0.33		0.33	-1.77				-10.11
18/02/2002	-0.35		0.13	-1.80				-10.00
16/04/2002	-0.37		0.17	-1.82				-9.84
15/05/2002	-0.40		0.45	-1.82				-9.49
27/05/2002	-0.12		0.56	-1.54				-9.64
22/07/2002	-0.33		0.75	-1.73				-9.42
20/09/2002	-0.31		0.77	-1.70				-9.96
15/10/2002	-0.29		0.65	-1.69				-9.14
31/01/2003	-0.33		0.01	-1.80				-9.85
07/03/2003	-0.34		0.27	-1.78				-9.87
14/04/2003	-0.34		0.30	-1.77				-9.76
16/06/2003	-0.33		0.96	-1.70				-9.79
25/06/2003	-0.33		1.06	-1.69				-9.80
18/07/2003	-0.13		0.99	-1.51				-9.99
26/08/2003	-0.16		1.08	-1.53				-9.85
05/12/2003	-0.29		0.50	-1.71				-9.86

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Rochetaillée	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
11/01/2002	-0.26		0.19	-1.71				-10.98
30/01/2002	-0.29		0.46	-1.71				-10.53
18/02/2002	-0.34		0.32	-1.78				-9.94
16/04/2002	-0.32		0.63	-1.72				-10.28
15/05/2002	-0.40		0.80	-1.79				-9.18
27/05/2002	-0.31		0.94	-1.69				-9.94
22/07/2002	-0.31		1.26	-1.66				-9.46
20/09/2002	-0.28		1.16	-1.63				-9.85
15/10/2002	-0.29		0.89	-1.67				-10.01
31/01/2003	0.34		0.47	-1.11				-9.67
07/03/2003	-0.31		0.49	-1.73				-10.15
14/04/2003	-0.25		0.63	-1.66				-9.82
16/06/2003	-0.29		1.33	-1.63				-9.59
25/06/2003	-0.33		1.36	-1.66				-9.64
18/07/2003	-0.13		1.36	-1.47				-9.77
26/08/2003	-0.14		1.41	-1.47				-9.71
05/12/2003	-0.30		0.64	-1.71				-9.63

ruisseau Chorsin	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
05/12/2001	0.10		0.54	-1.34				-10.26
24/04/2002	-0.01		0.71	-1.43				-10.30
29/08/2002	-0.05		0.99	-1.44				-10.06
17/10/2002	-0.05		0.70	-1.47				-10.10
20/03/2003	0.05		0.35	-1.41				-9.84
25/03/2003	-0.01		0.71	-1.43				-10.30
09/04/2003	0.13		0.30	-1.33				-10.37
29/04/2003	0.00		0.73	-1.42				-10.23
21/07/2003	-0.69		0.88	-2.06				-8.83
29/08/2003	0.20		1.22	-1.18				-9.88
16/09/2003	0.11		0.42	-1.34				-10.31
06/11/2003	0.08		0.44	-1.37				-10.02

ruisseau Moingt	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
29/08/2003	-0.56		0.91	-1.92				-8.73
25/03/2003	-0.49		0.43	-1.91				-9.00
29/04/2003	-0.48		0.74	-1.87				-8.96
26/06/2003	-0.50		1.47	-1.81				-8.66
21/07/2003	-0.44	-10.26	1.24	-1.77	-2.28	-0.26		-8.21
29/08/2003	-0.37	-10.71	1.31	-1.70	-2.43	-0.29		-8.62
06/11/2003	-0.50		0.06	-1.95				-8.74

ruisseau St Alban	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
20/03/2003	-0.37	-10.71	1.31	-1.70	-2.43	-0.29		-8.62

Sauvain	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
09/04/2003	-0.07		0.40	-1.52				-9.72
29/04/2003	-0.12		1.05	-1.50				-9.57
26/06/2003	-0.18		1.27	-1.49				-9.81
21/07/2003	-0.21		1.38	-1.52				-9.68
29/08/2003	-0.01		1.54	-1.33				-9.73

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Souvignet	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
11/01/2002	-0.64		-0.25	-2.12				-9.16
30/01/2002	-0.65		0.09	-2.10				-8.71
18/02/2002	-0.69		-0.08	-2.15				-8.79
16/04/2002	-0.64		-0.03	-2.09				-8.87
15/05/2002	-0.61		0.37	-2.03				-9.12
20/09/2002	-0.59		0.60	-1.99				-8.71
15/10/2002	-0.58		0.53	-1.98				-8.96
07/03/2003	-0.63		0.17	-2.07				-8.93
14/04/2003	-0.60		0.16	-2.04				-9.00
16/06/2003	-0.57		0.88	-1.94				-8.77
25/06/2003	-0.51		0.90	-1.88				-9.14
18/07/2003	-0.46		0.73	-1.85				-9.09
26/08/2003	-0.44		0.86	-1.82				-8.93
05/12/2003	-0.01		1.54	-1.33				-9.73

St-Rambert	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
25/03/2003	-0.85		0.50	-2.22			0.53	-6.70
04/05/2003	-0.83		0.54	-2.20			0.66	-6.72
26/06/2003	-0.80		0.94	-2.13			0.34	-6.75
29/08/2003	-0.78		0.83	-2.13			0.23	-6.74
06/11/2003	-0.81		0.55	-2.18			0.63	-6.71

Sury	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
25/03/2003	-0.65		0.37	-2.07				-8.90
26/06/2003	-0.75		1.44	-2.04				-7.76
06/11/2003	-0.57		0.38	-1.98				-8.32

Tarentaise	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
18/02/2002	-1.09		-0.13	-2.53				-7.40
16/04/2002	-1.17		-0.07	-2.60				-7.02
15/05/2002	-1.06		0.11	-2.48				-7.82
27/05/2002	-1.05		0.18	-2.46				-7.80
20/09/2002	-1.02		0.50	-2.40				-7.96
15/10/2002	-0.99		0.36	-2.39				-8.11
31/01/2003	-0.96		-0.05	-2.40				-8.30
07/03/2003	-0.93		0.02	-2.37				-8.28
14/04/2003	-0.96		0.05	-2.39				-8.22
16/06/2003	-0.86		1.05	-2.18				-8.38
25/06/2003	-0.89		1.09	-2.21				-8.27
18/07/2003	-0.89		1.13	-2.22				-8.16
26/08/2003	-0.83		1.17	-2.15				-8.41
05/12/2003	-1.07		0.10	-2.48				-7.51

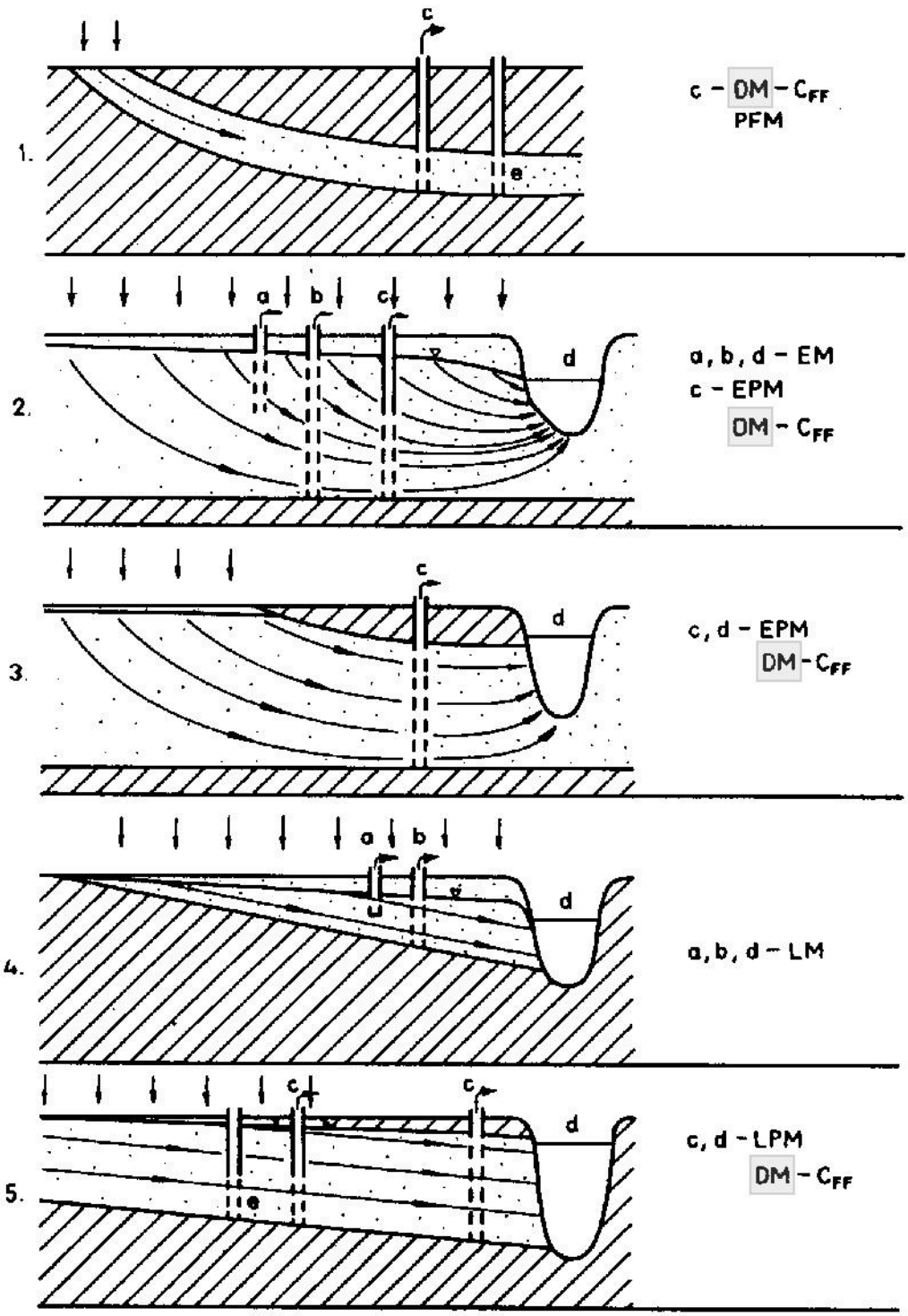
Vassalieu	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
25/03/2003	-0.56		0.41	-1.96				-8.33
04/05/2003	-0.52		0.42	-1.93				-8.41
26/06/2003	-0.52		0.96	-1.87				-8.39

Vidrieu	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
26/06/2003	-0.61		1.38	-1.93				-8.21
21/07/2003	-0.51	-10.29	1.03	-1.87	-2.58	-0.54		-7.88
29/08/2003	-0.51	-10.34	1.15	-1.85	-2.55	-0.51		-8.12
06/11/2003	-0.64		-0.01	-2.09				-8.20

ANNEXES CHAP 3 : indices de saturation Furan/Forez non minéral - dissolution de 3 minéraux

Vizézy	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
05/12/2001	-0.39		0.38	-1.82				-9.15
24/04/2002	-0.44		0.74	-1.84				-9.22
23/07/2002	-0.39		1.08	-1.75				-9.20
17/10/2002	-0.36		0.89	-1.74				-8.99
04/02/2003	-0.58		0.06	-2.03				-8.71
20/03/2003	-0.39		0.21	-1.83				-9.21
29/04/2003	-0.35		0.74	-1.74				-9.17
26/06/2003	-0.41		1.40	-1.74				-9.03
22/07/2003	-0.31		1.28	-1.65				-8.74
29/08/2003	-0.22		1.30	-1.56				-8.72
06/11/2003	-0.12		0.36	-1.56				-8.96

Vollon	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
07/08/2002	-1.11		0.80	-2.45			-0.16	-7.14
25/03/2003	-0.78		0.01	-2.21			0.54	-7.79
04/05/2003	-1.01		0.72	-2.36			0.31	-7.65
26/06/2003	-0.76		1.30	-2.06			-0.49	-7.83
29/08/2003	-0.68		1.25	-2.00			-0.92	-7.95
06/11/2003	-0.77		0.19	-2.18			0.57	-8.32



Situations schématiques correspondant aux applications possibles des modèles.
Les cas *a, b, c* et *d* correspondent à un échantillonnage dans une eau s'écoulant;
l'échantillon est moyenné par les taux d'écoulement volumiques (notés CFF).

Fig. A.4.2 : types d'écoulements modélisés par FlowPC ; EPM = modèle piston-cylindre exponentiel ; DM = modèle de dispersion (modèle utilisé, valable pour la plupart des circulations souterraines) ; PFM = modèle piston-cylindre ; LM = modèle linéaire ; LPM = modèle piston-cylindre linéaire.

ANNEXES CHAP 4 : Fig. A.5 (diagrammes d'activité eaux minérales)

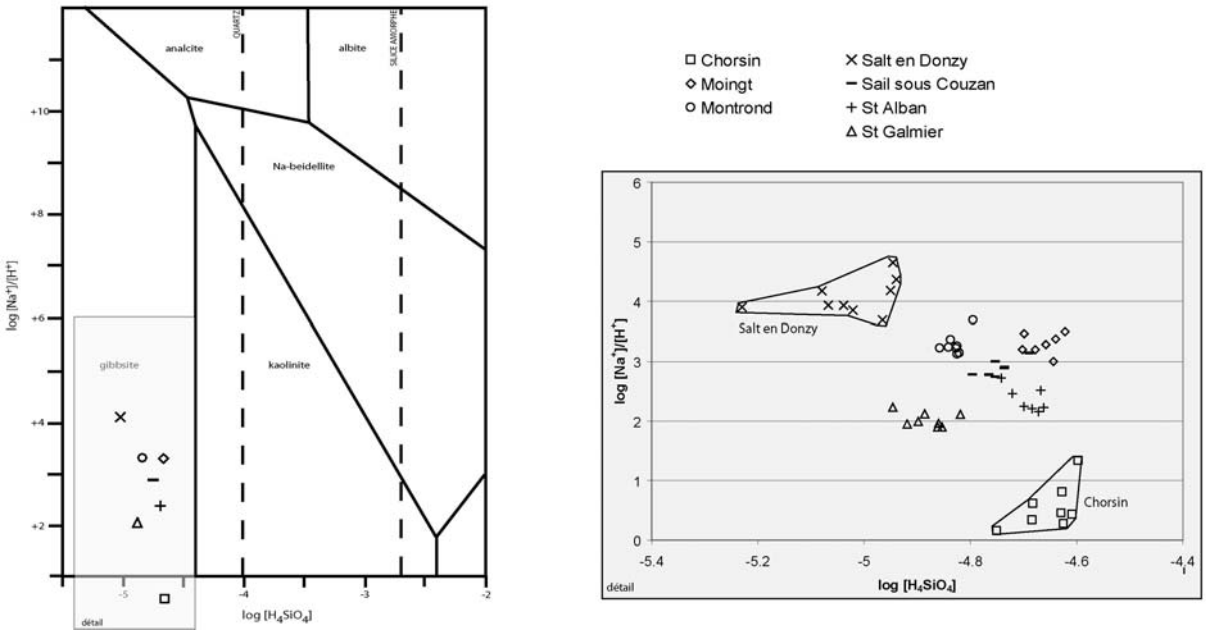


diagramme d'activité Na-H_4SiO_4 calculé à 25°C

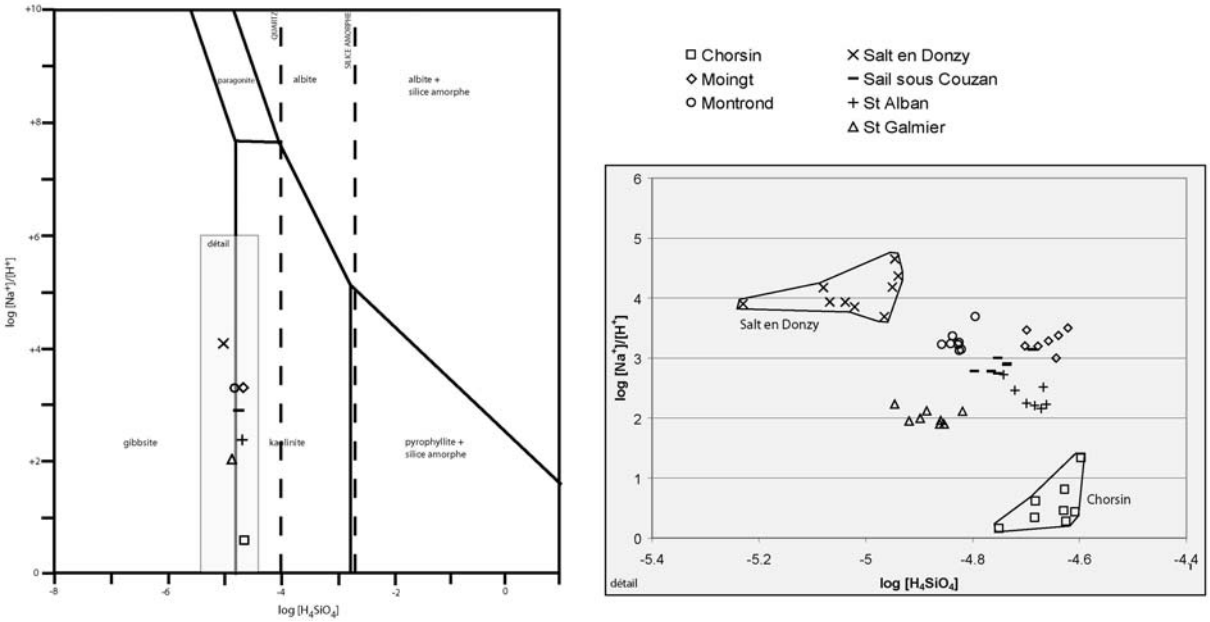


diagramme d'activité Na-H_4SiO_4 calculé à 25°C

ANNEXES CHAP 4 : Fig. A.5 (diagrammes d'activité eaux minérales)

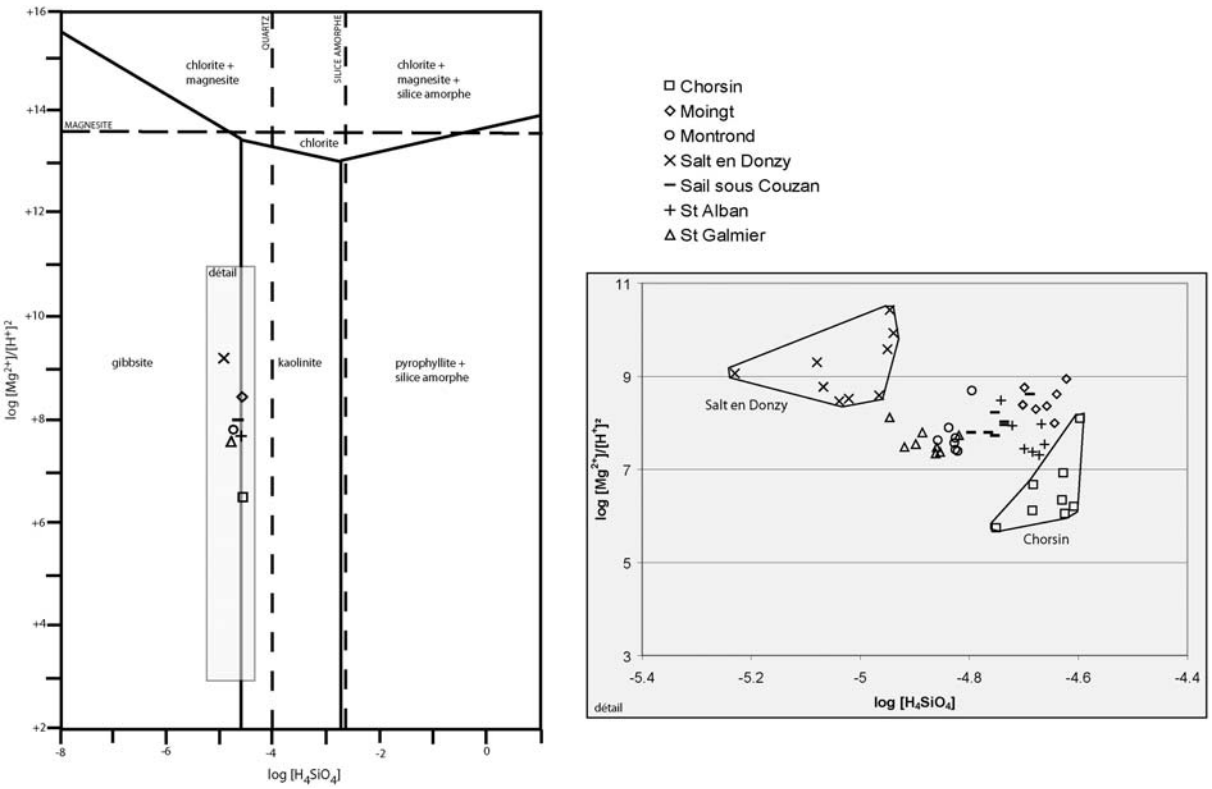


diagramme d'activité Mg-H_4SiO_4 calculé à 25°C

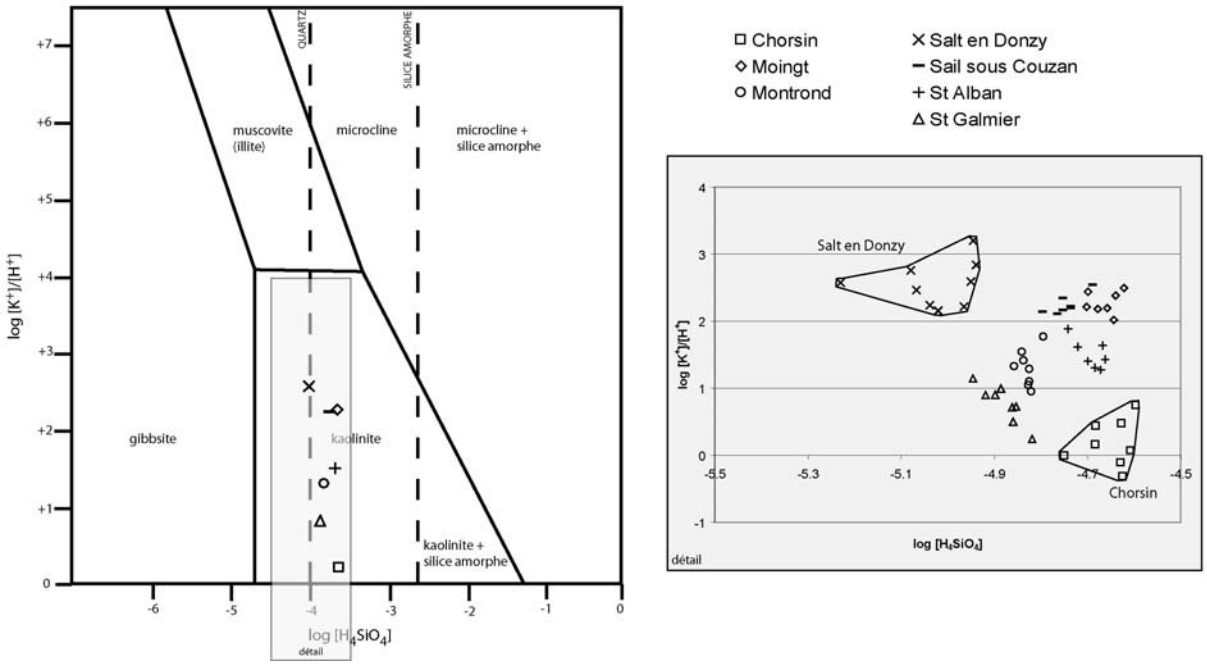


diagramme d'activité K-H_4SiO_4 calculé à 25°C

ANNEXES CHAP 4 : Fig. A.5 (diagrammes d'activité eaux minérales)

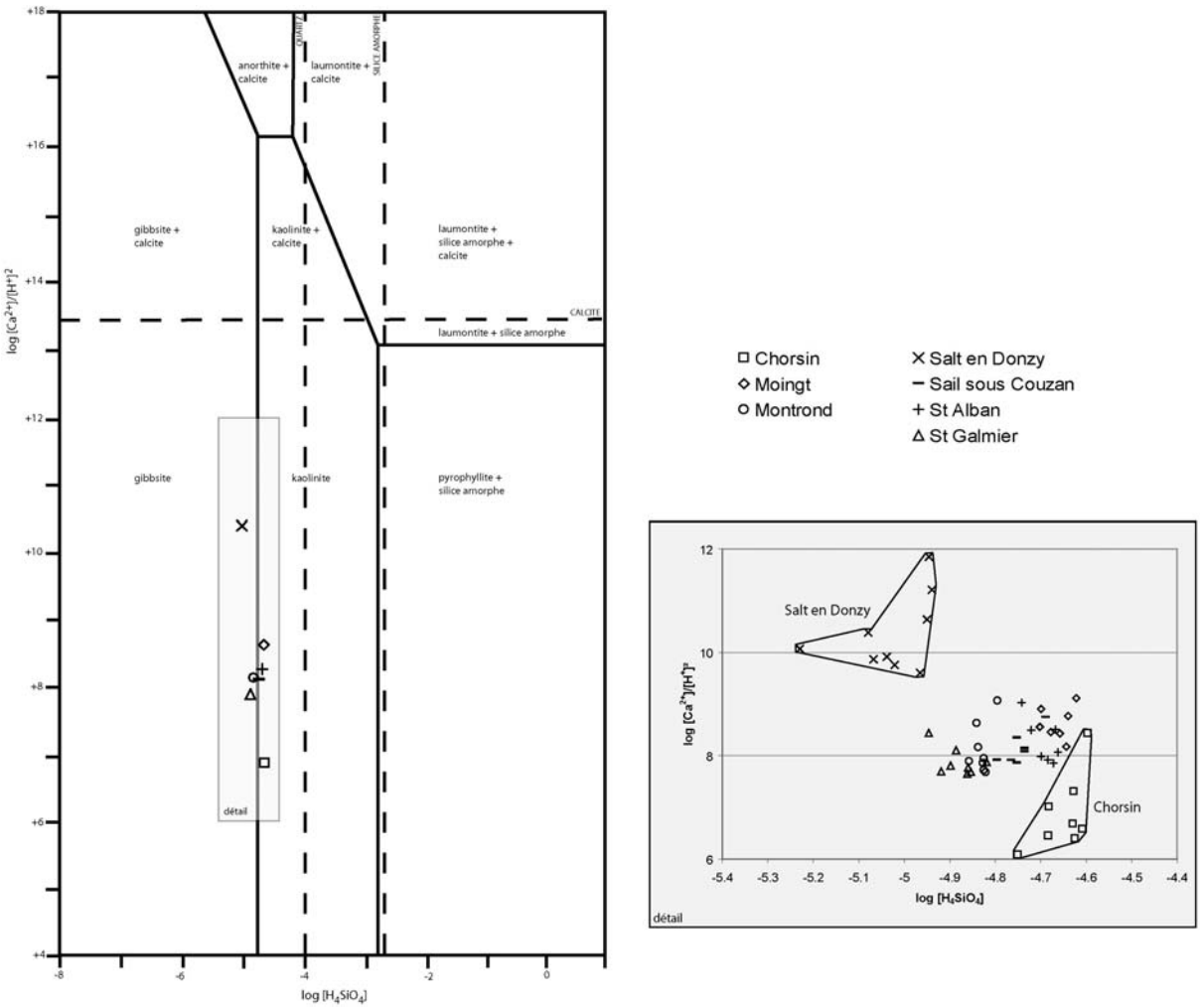


diagramme d'activité Ca-H_4SiO_4 calculé à 25°C

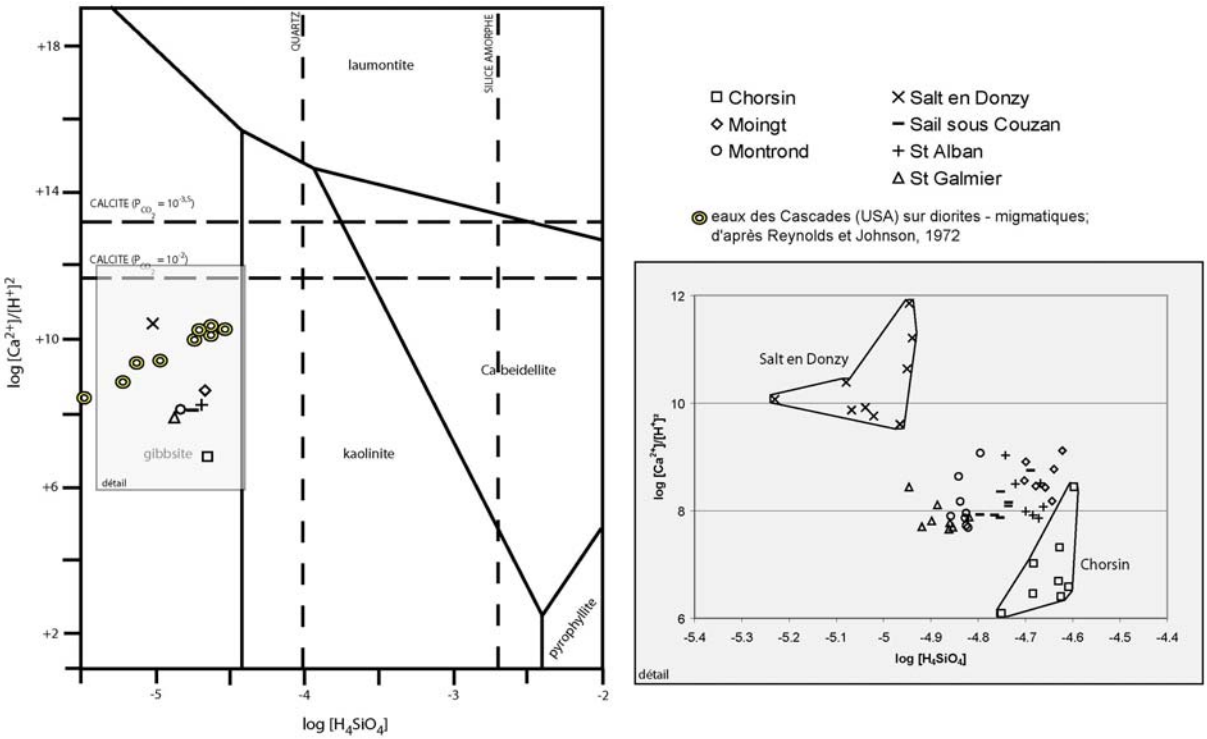


diagramme d'activité Ca-H_4SiO_4 calculé à 25°C

ANNEXES CHAP 4 : Fig. A.5 (diagrammes d'activité eaux minérales)

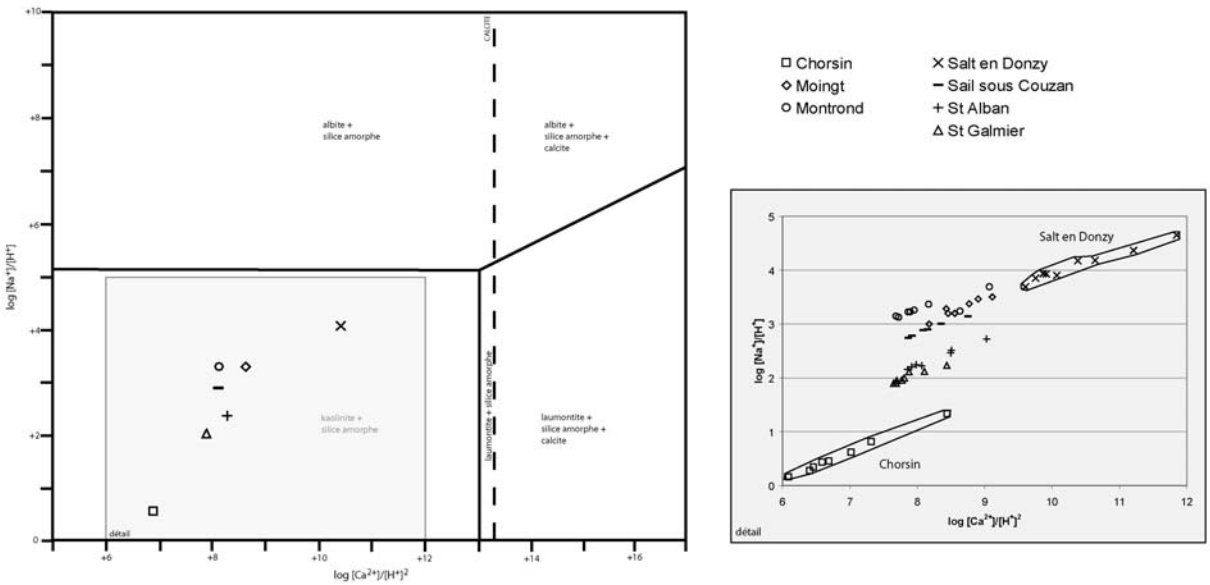


diagramme d'activité Ca-Na calculé à 25°C

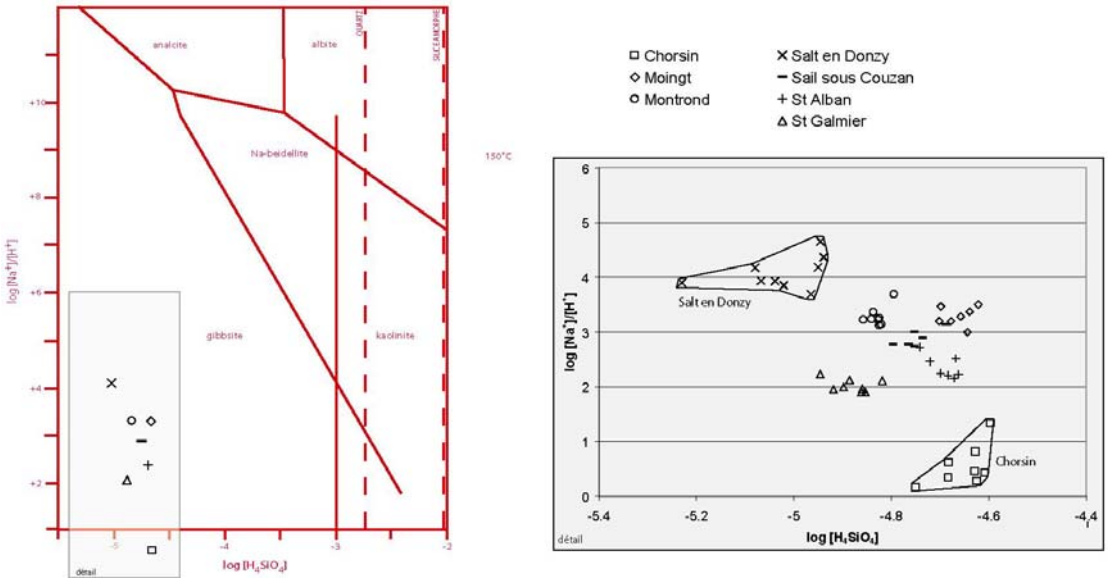


diagramme d'activité Na-H_4SiO_4 calculé à 150°C

ANNEXES CHAP 4 : Fig. A.5 (diagrammes d'activité eaux minérales)

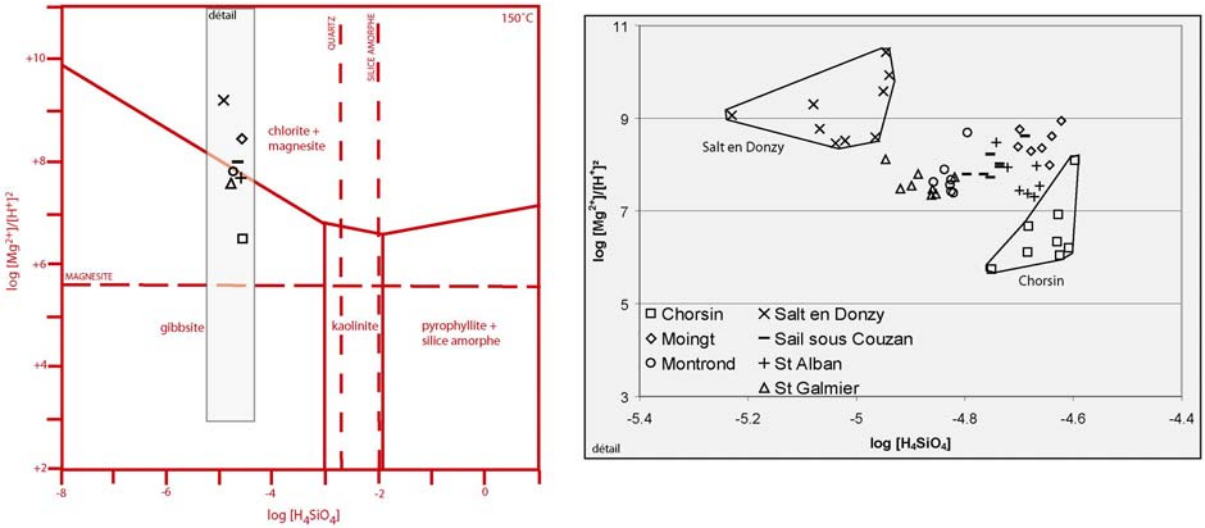


diagramme d'activité Mg-H_4SiO_4 calculé à 150°C

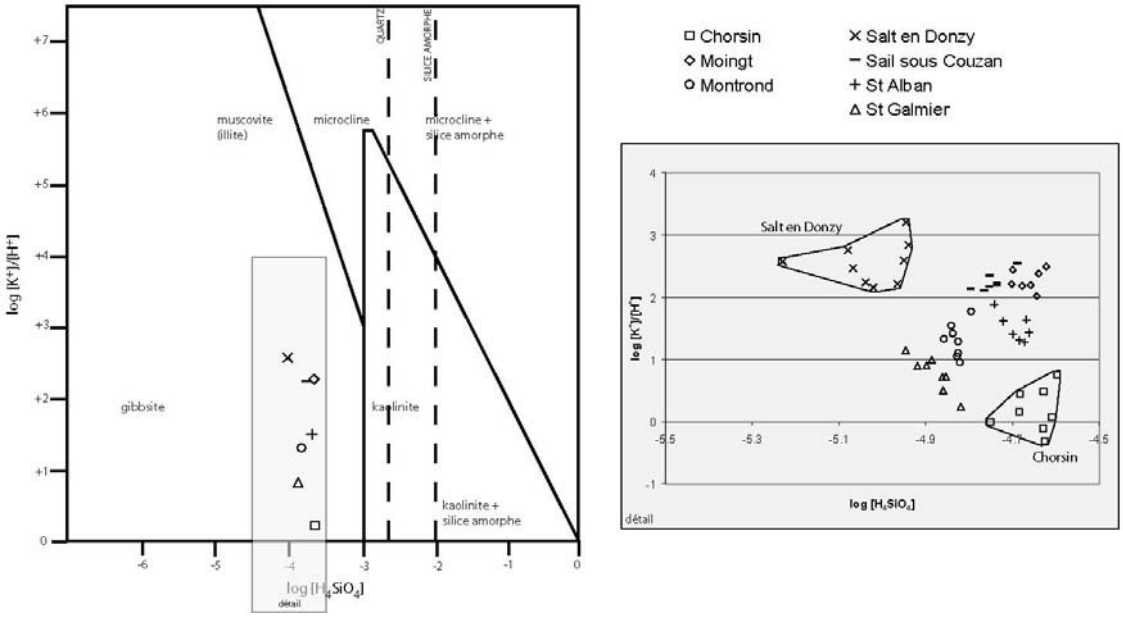


diagramme d'activité K-H_4SiO_4 calculé à 150°C

ANNEXES CHAP 4 : Fig. A.5 (diagrammes d'activité eaux minérales)

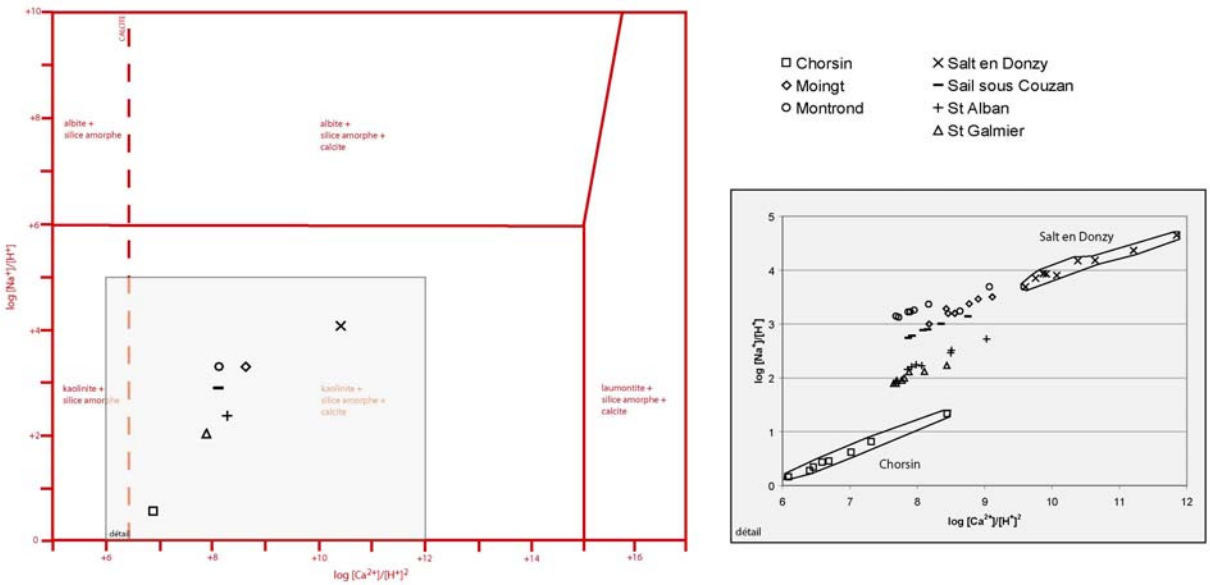


diagramme d'activité Na-Ca calculé à 150°C

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.8 (indices de saturation eaux minérales sans restriction - température de la source)

Chorsin	state	pH	pe	si_Albite	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Annite	si_Anthophyllite	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Chlorite(14A)	si_Cordierite_anhyd
23/07/2002	i_soln	5.34	2.73				-2.98		-43.03	-2.83	0.59		
29/08/2002	i_soln	5.7	1.78				-2.24		-38.36	-2.10	0.59		
09/04/2003	i_soln	5.16	2.51				-3.83		-49.94	-3.68	0.66		
29/04/2003	i_soln	5.31	2.18				-3.22		-45.58	-3.07	0.62		
26/06/2003	i_soln	5.59	1.26				-2.51		-39.92	-2.37	0.49		
21/07/2003	i_soln	5.25	1.86				-3.11		-43.92	-2.97	0.55		
29/08/2003	i_soln	5.25	1.86				-3.11		-43.92	-2.97	0.55		
16/09/2003	i_soln	6.27	1.73				-1.39		-30.50	-1.24	0.65		

Moingt	state	pH	pe	si_Albite	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Annite	si_Anthophyllite	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Chlorite(14A)	si_Cordierite_anhyd
23/07/2002	i_soln	6.06	1.04				-0.82		-31.14	-0.68	0.50		
17/10/2002	i_soln	6.54	-0.35				-0.15		-24.96	-0.01	0.55		
04/02/2003	i_soln	6.38	-0.22				-0.47		-28.02	-0.32	0.59		
26/06/2003	i_soln	6.46	-0.81				-0.22		-26.67	-0.08	0.45		
21/07/2003	i_soln	6.3	-0.46				-0.50		-28.74	-0.35	0.43		
29/08/2003	i_soln	6.24	-0.46				-0.58		-28.99	-0.44	0.49		
06/11/2003	i_soln	6.24	-0.26				-0.60		-30.06	-0.45	0.51		

Montrond	state	pH	pe	si_Albite	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Annite	si_Anthophyllite	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Chlorite(14A)	si_Cordierite_anhyd
23/07/2002	i_soln	6.68	-0.44				-0.68		-27.85	-0.54	0.11		
21/08/2002	i_soln	7	4				-0.30		-23.83	-0.16	0.15		
17/10/2002	i_soln	6.87	-1.1				-0.44		-25.33	-0.29	0.21		
25/03/2003	i_soln	6.33	-0.27				-1.14		-32.72	-1.00	0.18		
24/04/2003	i_soln	6.33	-0.32				-1.10		-33.11	-0.96	0.13		
26/06/2003	i_soln	6.44	-0.75				-0.88		-30.75	-0.73	0.12		
21/07/2003	i_soln	6.3	-0.48				-1.13		-33.23	-0.98	0.16		
29/08/2003	i_soln	6.21	-0.41				-1.24		-34.01	-1.10	0.14		
06/11/2003	i_soln	6.23	-0.22				-1.26		-34.52	-1.12	0.19		

Sail/Couzan	state	pH	pe	si_Albite	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Annite	si_Anthophyllite	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Chlorite(14A)	si_Cordierite_anhyd
16/11/2002	i_soln	6.4	-0.05				-0.57		-27.42	-0.43	0.48		
18/02/2003	i_soln	7	4				-0.44		-20.16	-0.29	0.40		
20/03/2003	i_soln	5.99	0.56				-1.18		-33.63	-1.03	0.41		
09/04/2003	i_soln	6.01	0.47				-1.17		-33.86	-1.02	0.37		
09/07/2003	i_soln	6.09	0.05				-0.87		-31.61	-0.72	0.41		
16/09/2003	i_soln	6.07	0				-1.01		-32.49	-0.87	0.45		
06/11/2003	i_soln	5.98	0.36				-1.17		-34.20	-1.02	0.43		
15/03/2004	i_soln	6.22	1.96				-0.83		-30.85	-0.68	0.43		

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.8 (indices de saturation eaux minérales sans restriction - température de la source)

Salt en Donzy	state	pH	pe	si_Albite	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Annite	si_Anthophyllite	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Chlorite(14A)	si_Cordierite_anhyd
26/03/2002	i_soln	7.84	-2.87				-0.08		-18.17	0.06	-0.07		
23/07/2002	i_soln	8.29	-4.22				0.53		-12.40	0.68	-0.07		
17/10/2002	i_soln	8.01	-3.78				0.22		-15.65	0.37	-0.06		
20/03/2003	i_soln	7.56	-3.14				-0.67		-27.59	-0.53	-0.09		
29/04/2003	i_soln	7.56	3.23				-0.60		-24.85	-0.46	-0.17		
26/06/2003	i_soln	7.82	-4.01				-0.31		-21.05	-0.17	-0.20		
21/07/2003	i_soln	7.56	-3.44				-0.55		-26.76	-0.41	-0.15		
29/08/2003	i_soln	7.47	-3.38				-0.59		-26.24	-0.45	-0.13		
06/11/2003	i_soln	7.35	-2.87				-0.71		-25.79	-0.56	-0.03		

St Alban	state	pH	pe	si_Albite	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Annite	si_Anthophyllite	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Chlorite(14A)	si_Cordierite_anhyd
23/07/2002	i_soln	6.11	0.89				-0.70		-30.66	-0.55	0.35		
17/10/2002	i_soln	6.39	0.01				-0.35		-27.58	-0.21	0.36		
04/02/2003	i_soln	6.11	0.4				-0.54		-27.91	-0.40	0.26		
08/02/2003	i_soln	5.9	0.92				-1.04		-33.05	-0.90	0.42		
09/07/2003	i_soln	5.85	0.62				-1.01		-33.73	-0.87	0.36		
21/07/2003	i_soln	5.82	0.64				-1.02		-33.60	-0.87	0.34		
29/08/2003	i_soln	5.78	0.62				-1.15		-34.48	-1.01	0.39		

St Galmier	state	pH	pe	si_Albite	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Annite	si_Anthophyllite	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Chlorite(14A)	si_Cordierite_anhyd
09/07/2002	i_soln	7	4				0.28		-19.48	0.42	0.29		
14/09/2002	i_soln	7	4				0.48		-17.25	0.63	0.19		
17/10/2002	i_soln	6.14	0.58				-0.85		-31.73	-0.71	0.16		
08/02/2003	i_soln	5.86	0.94				-1.38		-34.04	-1.23	0.34		
25/03/2003	i_soln	5.8	1				-1.46		-35.61	-1.31	0.23		
26/04/2003	i_soln	5.76	1				-1.43		-36.12	-1.28	0.19		
26/06/2003	i_soln	5.92	0.48				-0.98		-32.66	-0.83	0.16		
22/07/2003	i_soln	5.76	0.8				-1.28		-34.73	-1.13	0.19		
29/08/2003	i_soln	5.7	0.81				-1.39		-35.48	-1.24	0.18		
06/11/2003	i_soln	5.73	0.94				-1.43		-36.21	-1.28	0.26		

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.8 (indices de saturation eaux minérales sans restriction - température de la source)

Chorsin	si_Cordierite_hydr	si_Cristobalite(alpha)	si_Cristobalite(beta)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Fluoroapatite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum
		0.29	-0.18	-4.70	-7.75	-4.52	-2.24			0.74	-2.52
		0.29	-0.18	-3.24	-8.13	-5.50	-2.43			-0.23	-2.72
		0.35	-0.15	-6.42			-2.60				-2.84
		0.32	-0.17	-5.18			-2.43				-2.74
		0.20	-0.27	-3.73	-7.78	-5.76	-2.46			-0.52	-2.75
		0.26	-0.21	-4.94	-7.93	-5.65	-2.33			-0.41	-2.73
		0.26	-0.21	-4.94	-7.93	-5.65	-2.33			-0.41	-2.73
		0.36	-0.12	-1.50	-5.93	-2.79	-2.34			2.50	-2.75

Moingt	si_Cordierite_hydr	si_Cristobalite(alpha)	si_Cristobalite(beta)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Fluoroapatite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum
		0.21	-0.26	-0.17			-1.28				-2.39
		0.26	-0.21	1.18			-1.36				-2.65
		0.29	-0.19	0.56			-1.31				-2.52
		0.16	-0.31	1.08			-1.31				-2.83
		0.14	-0.33	0.50			-1.53				-2.91
		0.20	-0.27	0.42			-1.38				-2.74
		0.22	-0.25	0.29			-1.29				-2.62

Montrond	si_Cordierite_hydr	si_Cristobalite(alpha)	si_Cristobalite(beta)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Fluoroapatite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum
		-0.17	-0.61	-0.01			-2.13				-3.54
		-0.13	-0.58	0.72			-2.13				-3.53
		-0.08	-0.52	0.45			-2.14				-3.52
		-0.10	-0.55	-0.87			-2.10				-3.52
		-0.15	-0.59	-0.77			-2.19				-3.61
		-0.15	-0.60	-0.32			-2.21				-3.55
		-0.12	-0.57	-0.85			-2.18				-3.57
		-0.14	-0.58	-1.07			-2.18				-3.61
		-0.09	-0.54	-1.13			-2.17				-3.58

Sail/Couzan	si_Cordierite_hydr	si_Cristobalite(alpha)	si_Cristobalite(beta)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Fluoroapatite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum
		0.19	-0.28	0.37			-0.63				-2.21
		0.11	-0.36	1.26			-1.30				-2.87
		0.11	-0.36	-0.83			-0.61				-2.18
		0.08	-0.39	-0.81			-0.64				-2.21
		0.12	-0.35	-0.21	-7.63	-6.32	-0.62			-1.09	-2.21
		0.15	-0.32	-0.51	-7.57	-6.34	-0.68			-1.09	-2.21
		0.14	-0.33	-0.83	-7.95	-6.44	-0.66			-1.19	-2.24
		0.14	-0.33	-0.13	-7.49	-4.15	-0.67			1.10	-2.21

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.8 (indices de saturation eaux minérales sans restriction - température de la source)

Salt en Donzy	si_Cordierite_hydr	si_Cristobalite(alpha)	si_Cristobalite(beta)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Fluoroapatite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum
		-0.34	-0.77	0.49			-0.55				-3.14
		-0.34	-0.77	1.37			-0.28				-2.82
		-0.33	-0.76	0.89			-0.36				-2.90
		-0.38	-0.85	-0.71			-0.44				-3.10
		-0.45	-0.88	-0.59			-0.76				-3.34
		-0.48	-0.91	0.01			-0.79				-3.33
		-0.42	-0.85	-0.84			-0.72				-3.31
		-0.40	-0.83	-0.71			-0.71				-3.28
		-0.31	-0.75	-0.72			-0.60				-3.17

St Alban	si_Cordierite_hydr	si_Cristobalite(alpha)	si_Cristobalite(beta)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Fluoroapatite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum
		0.06	-0.39	-0.28			-0.50				-2.55
		0.08	-0.39	0.41			-0.69				-2.55
		-0.02	-0.45	0.10			-0.59				-2.55
		0.13	-0.33	-0.94			-0.49				-2.48
		0.07	-0.38	-0.89			-0.50				-2.53
		0.06	-0.39	-0.89			-0.54				-2.57
		0.10	-0.35	-1.17			-0.53				-2.55

St Galmier	si_Cordierite_hydr	si_Cristobalite(alpha)	si_Cristobalite(beta)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Fluoroapatite	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum
		0.00	-0.47	1.91			-1.40				-2.04
		-0.09	-0.54	2.31			-1.03				-1.91
		-0.12	-0.59	-0.37			-1.43				-1.99
		0.05	-0.42	-1.25			-1.21				-2.07
		-0.06	-0.52	-1.52			-1.05				-1.99
		-0.10	-0.56	-1.41			-1.09				-2.02
		-0.12	-0.58	-0.58			-1.12				-1.97
		-0.09	-0.55	-1.17			-1.20				-1.97
		-0.11	-0.56	-1.40			-1.02				-1.97
		-0.03	-0.49	-1.51			-1.12				-1.97

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.8 (indices de saturation eaux minérales sans restriction - température de la source)

Chorsin	si_Halite	si_Hydroxylapatite	si_Hematite	si_Illite	si_Kaolinite	si_K-Feldspar	si_K-mica	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite
	-8.12		2.42									
	-9.21		0.48									
	-9.30											
	-9.09											
	-8.77		-0.10									
	-9.15		0.13									
	-9.15		0.13									
	-9.24		5.95									

Moingt	si_Halite	si_Hydroxylapatite	si_Hematite	si_Illite	si_Kaolinite	si_K-Feldspar	si_K-mica	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite
	-5.64											
	-5.65											
	-5.59											
	-5.61											
	-5.83											
	-5.58											
	-5.65											

Montrond	si_Halite	si_Hydroxylapatite	si_Hematite	si_Illite	si_Kaolinite	si_K-Feldspar	si_K-mica	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite
	-6.44											
	-6.41	-3.71										
	-6.43											
	-6.30	-8.63										
	-6.33	-9.36										
	-6.31											
	-6.31	-9.02										
	-6.30	-7.97										
	-6.33	-8.71										

Sail/Couzan	si_Halite	si_Hydroxylapatite	si_Hematite	si_Illite	si_Kaolinite	si_K-Feldspar	si_K-mica	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite
	-6.06	-2.37										
	-6.05											
	-6.01											
	-6.03											
	-6.00		-1.23									
	-5.98		-1.24									
	-6.05		-1.44									
	-5.99		3.16									

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.8 (indices de saturation eaux minérales sans restriction - température de la source)

Salt en Donzy	si_Halite	si_Hydroxylapatite	si_Hematite	si_Illite	si_Kaolinite	si_K-Feldspar	si_K-mica	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite
	-6.22											
	-6.20											
	-6.20											
	-6.19											
	-6.17											
	-6.20											
	-6.19											
	-6.18											
	-6.22											

St Alban	si_Halite	si_Hydroxylapatite	si_Hematite	si_Illite	si_Kaolinite	si_K-Feldspar	si_K-mica	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite
	-6.95											
	-6.96											
	-6.92											
	-6.97											
	-6.91											
	-6.92											
	-6.93											

St Galmier	si_Halite	si_Hydroxylapatite	si_Hematite	si_Illite	si_Kaolinite	si_K-Feldspar	si_K-mica	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite
	-6.78											
	-6.72											
	-6.80											
	-6.67											
	-6.72											
	-6.73											
	-6.74											
	-6.73											
	-6.73											
	-6.75											

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.8 (indices de saturation eaux minérales sans restriction - température de la source)

Chorsin	si_Paragonite	si_Phlogopite	si_Pyrite	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
				0.87	-1.88		-0.50			-3.31	-7.89
				0.87	-2.21		-0.51			-2.58	-8.94
				0.95			-0.51				-8.79
				0.91			-0.51			-3.45	-8.63
				0.77	-1.95		-0.59			-2.81	-8.36
				0.83	-2.07		-0.53			-3.42	-9.15
				0.83	-2.07		-0.53			-3.42	-9.15
				0.94	-0.17		-0.46			-1.66	-9.20

Moingt	si_Paragonite	si_Phlogopite	si_Pyrite	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
				0.78			-0.57			-0.35	-6.04
				0.83			-0.53			0.40	-6.07
				0.87			-0.51			0.11	-5.97
				0.73			-0.62			0.37	-6.05
				0.71			-0.64			0.04	-6.24
				0.77			-0.59			0.00	-6.09
				0.79			-0.58			-0.01	-6.07

Montrond	si_Paragonite	si_Phlogopite	si_Pyrite	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
				0.38			-0.89			-0.23	-7.88
				0.42			-0.87			0.15	-7.82
				0.48			-0.82			-0.01	-7.83
				0.46			-0.84			-0.65	-7.75
				0.40			-0.89			-0.57	-7.71
				0.39			-0.88			-0.39	-7.75
				0.43			-0.86			-0.63	-7.97
				0.41			-0.87			-0.77	-8.01
				0.46			-0.84			-0.76	-7.83

Sail/Couzan	si_Paragonite	si_Phlogopite	si_Pyrite	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
				0.76			-0.60			-0.16	-6.07
				0.68			-0.68			0.43	-6.11
				0.69			-0.68			-0.77	-6.10
				0.65			-0.71			-0.75	-6.09
				0.69	-1.20		-0.66			-0.48	-6.13
				0.73	-1.14		-0.64			-0.60	-6.05
				0.71	-1.45		-0.65			-0.74	-6.03
				0.72	-1.11		-0.65			-0.41	-6.05

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.8 (indices de saturation eaux minérales sans restriction - température de la source)

Salt en Donzy	si_Paragonite	si_Phlogopite	si_Pyrite	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
				0.20			-1.05			0.23	-7.35
				0.20			-1.05			0.52	-7.18
				0.21			-1.04			0.30	-7.26
				0.19			-1.16				-6.94
				0.09			-1.16			-0.13	-7.17
				0.06			-1.18			0.16	-7.15
				0.12			-1.13			-0.10	-7.41
				0.14			-1.11			-0.16	-7.40
				0.24			-1.03			-0.35	-7.20

St Alban	si_Paragonite	si_Phlogopite	si_Pyrite	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
				0.63			-0.70			-0.72	-7.25
				0.64			-0.69			-0.32	-7.24
				0.53			-0.74			-0.63	-7.32
				0.69			-0.63			-1.05	-7.22
				0.63			-0.68			-1.05	-7.21
				0.61			-0.69			-1.06	-7.30
				0.66			-0.65			-1.18	-7.27

St Galmier	si_Paragonite	si_Phlogopite	si_Pyrite	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
				0.57			-0.79			0.26	-7.29
				0.46			-0.84			0.15	-7.24
				0.44			-0.90			-0.98	-7.33
				0.62			-0.74			-2.46	-7.96
				0.51			-0.83			-1.66	-7.25
				0.46			-0.87			-1.56	-7.23
				0.43			-0.88				-7.33
				0.47			-0.85				-7.66
				0.45			-0.86			-1.51	-7.38
				0.54			-0.80				-7.37

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.9 (indices de saturation eaux minérales - dissolution de 3 phases)

Chorsin	state	pH	pe	si_Albite	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Annite	si_Anthophyllite	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Chlorite(14A)
23/07/2002	i_soln	5.34	2.73				-2.98		-43.03	-2.83	0.59	
	react	6.88	12.82	-1.00	1.57	-1.00	-0.30	-19.90	-15.42	-0.15	1.34	
29/08/2002	i_soln	5.70	1.78				-2.24		-38.36	-2.10	0.59	
	react	6.93	12.89	-1.00	1.50	-1.00	-0.18	-23.26	-15.31	-0.03	1.35	
09/04/2003	i_soln	5.16	2.51				-3.83		-49.94	-3.68	0.66	
	react	7.46	13.31	-1.00	0.83	-1.00	0.01		-13.06	0.16	1.54	
29/04/2003	i_soln	5.31	2.18				-3.22		-45.58	-3.07	0.62	
	react	7.12	13.29	-1.00	1.20	-1.00	-0.11		-14.42	0.04	1.52	
26/06/2003	i_soln	5.59	1.26				-2.51		-39.92	-2.37	0.49	
	react	6.86	12.78	-1.00	1.68	-1.00	-0.34	-21.36	-15.83	-0.20	1.27	
21/07/2003	i_soln	5.25	1.86				-3.11		-43.92	-2.97	0.55	
	react	6.83	12.83	-1.00	1.66	-1.00	-0.36	-20.01	-15.36	-0.22	1.32	
29/08/2003	i_soln	5.25	1.86				-3.11		-43.92	-2.97	0.55	
	react	6.83	12.83	-1.00	1.66	-1.00	-0.36	-20.01	-15.36	-0.22	1.32	
16/09/2003	i_soln	6.27	1.73				-1.39		-30.50	-1.24	0.65	
	react	7.18	-0.50	-1.00	1.32	-1.00	-0.02	4.66	-14.21	0.13	1.18	

Moingt	state	pH	pe	si_Albite	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Annite	si_Anthophyllite	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Chlorite(14A)
23/07/2002	i_soln	6.06	1.04				-0.82		-31.14	-0.68	0.50	
	react	8.51	11.23	-1.00	0.62	-1.00	2.63		-25.95	2.78	-1.57	
17/10/2002	i_soln	6.54	-0.35				-0.15		-24.96	-0.01	0.55	
	react	8.70	11.13	-1.00	0.53	-1.00	2.71		-26.57	2.86	-1.66	
04/02/2003	i_soln	6.38	-0.22				-0.47		-28.02	-0.32	0.59	
	react	8.90	11.09	-1.00	0.29	-1.00	2.84		-27.17	2.99	-1.69	
26/06/2003	i_soln	6.46	-0.81				-0.22		-26.67	-0.08	0.45	
	react	8.62	11.14	-1.00	0.59	-1.00	2.77		-26.48	2.91	-1.65	
21/07/2003	i_soln	6.30	-0.46				-0.50		-28.74	-0.35	0.43	
	react	8.48	11.28	-1.00	0.71	-1.00	2.60		-25.88	2.74	-1.57	
29/08/2003	i_soln	6.24	-0.46				-0.58		-28.99	-0.44	0.49	
	react	8.58	11.17	-1.00	0.59	-1.00	2.75		-26.21	2.90	-1.64	
06/11/2003	i_soln	6.24	-0.26				-0.60		-30.06	-0.45	0.51	
	react	8.71	11.18	-1.00	0.43	-1.00	2.82		-26.42	2.97	-1.61	

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.9 (indices de saturation eaux minérales - dissolution de 3 phases)

Montrond	state	pH	pe	si_Albite	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Annite	si_Anthophyllite	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Chlorite(14A)
23/07/2002	i_soln	6.68	-0.44				-0.68		-27.85	-0.54	0.11	
	react	7.98	11.06	-1.00	1.65	-1.00	1.63		-23.56	1.77	-1.60	
21/08/2002	i_soln	7.00	4.00				-0.30		-23.83	-0.16	0.15	
	react	8.17	11.03	-1.00	1.55	-1.00	1.68		-23.88	1.83	-1.67	
17/10/2002	i_soln	6.87	-1.10				-0.44		-25.33	-0.29	0.21	
	react	8.21	9.65	-1.00	1.45	-1.00	1.77		-23.82	1.92	-1.66	
25/03/2003	i_soln	6.33	-0.27				-1.14		-32.72	-1.00	0.18	
	react	8.14	11.04	-1.00	1.31	-1.00	1.98		-23.69	2.13	-1.63	
24/04/2003	i_soln	6.33	-0.32				-1.10		-33.11	-0.96	0.13	
	react	8.03	11.18	-1.00	1.39	-1.00	2.01		-23.66	2.16	-1.58	
26/06/2003	i_soln	6.44	-0.75				-0.88		-30.75	-0.73	0.12	
	react	7.96	-2.66	-1.00	1.52	-1.00	1.92		-23.61	2.07	-1.60	
21/07/2003	i_soln	6.30	-0.48				-1.13		-33.23	-0.98	0.16	
	react	8.02	11.18	-1.00	1.40	-1.00	2.00		-23.27	2.15	-1.59	
29/08/2003	i_soln	6.21	-0.41				-1.24		-34.01	-1.10	0.14	
	react	7.92	11.20	-1.00	1.49	-1.00	1.94		-23.23	2.08	-1.58	
06/11/2003	i_soln	6.23	-0.22				-1.26		-34.52	-1.12	0.19	
	react	8.10	11.13	-1.00	1.28	-1.00	2.07		-23.43	2.21	-1.58	

Sail/Couzan	state	pH	pe	si_Albite	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Annite	si_Anthophyllite	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Chlorite(14A)
16/11/2002	i_soln	6.40	-0.05				-0.57		-27.42	-0.43	0.48	
	react	8.62	11.24	-1.00	0.61	-1.00	2.43		-26.98	2.58	-1.55	
18/02/2003	i_soln	7.00	4.00				-0.44		-20.16	-0.29	0.40	
	react	8.78	11.00	-1.00	0.68	-1.00	2.37		-27.68	2.51	-1.67	
20/03/2003	i_soln	5.99	0.56				-1.18		-33.63	-1.03	0.41	
	react	8.57	11.25	-1.00	0.57	-1.00	2.50		-26.65	2.64	-1.52	
09/04/2003	i_soln	6.01	0.47				-1.17		-33.86	-1.02	0.37	
	react	8.57	11.28	-1.00	0.58	-1.00	2.50		-26.69	2.64	-1.51	
09/07/2003	i_soln	6.09	0.05				-0.87		-31.61	-0.72	0.41	
	react	8.47	10.93	-1.00	0.65	-1.00	2.55	-25.88	-26.33	2.70	-1.50	
16/09/2003	i_soln	6.07	0.00				-1.01		-32.49	-0.87	0.45	
	react	8.62	10.74	-1.00	0.52	-1.00	2.58	-25.51	-26.88	2.73	-1.54	
06/11/2003	i_soln	5.98	0.36				-1.17		-34.20	-1.02	0.43	
	react	8.59	10.63	-1.00	0.51	-1.00	2.60	-25.54	-26.81	2.74	-1.48	
15/03/2004	i_soln	6.22	1.96				-0.83		-30.85	-0.68	0.43	
	react	8.66	10.69	-1.00	0.51	-1.00	2.56	-25.90	-26.93	2.71	-1.54	

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.9 (indices de saturation eaux minérales - dissolution de 3 phases)

Salt en Donzy	state	pH	pe	si_Albite	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Annite	si_Anthophyllite	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Chlorite(14A)
26/03/2002	i_soln	7.84	-2.87				-0.08		-18.17	0.06	-0.07	
	react	8.06	10.82	-1.00	1.82	-1.00	0.66		-23.44	0.81	-1.52	
23/07/2002	i_soln	8.29	-4.22				0.53		-12.40	0.68	-0.07	
	react	8.27	10.65	-1.00	1.32	-1.00	0.83		-23.59	0.97	-1.51	
17/10/2002	i_soln	8.01	-3.78				0.22		-15.65	0.37	-0.06	
	react	8.13	10.76	-1.00	1.60	-1.00	0.71		-23.44	0.85	-1.51	
20/03/2003	i_soln	7.56	-3.14				-0.67		-27.59	-0.53	-0.09	
	react	8.82	10.97	-1.00	1.04	-1.00	1.24		-25.76	1.38	-1.62	
29/04/2003	i_soln	7.56	3.23				-0.60		-24.85	-0.46	-0.17	
	react	7.98	10.98	-1.00	2.05	-1.00	0.54		-23.99	0.68	-1.54	
26/06/2003	i_soln	7.82	-4.01				-0.31		-21.05	-0.17	-0.20	
	react	8.04	10.80	-1.00	1.87	-1.00	0.62		-23.86	0.76	-1.53	
21/07/2003	i_soln	7.56	-3.44				-0.55		-26.76	-0.41	-0.15	
	react	7.99	10.94	-1.00	2.02	-1.00	0.55		-23.59	0.70	-1.54	
29/08/2003	i_soln	7.47	-3.38				-0.59		-26.24	-0.45	-0.13	
	react	7.95	11.03	-1.00	2.08	-1.00	0.57		-23.61	0.71	-1.54	
06/11/2003	i_soln	7.35	-2.87				-0.71		-25.79	-0.56	-0.03	
	react	8.03	10.96	-1.00	1.96	-1.00	0.63		-23.99	0.77	-1.53	

St-Alban	state	pH	pe	si_Albite	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Annite	si_Anthophyllite	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Chlorite(14A)
23/07/2002	i_soln	6.11	0.89				-0.70		-30.66	-0.55	0.35	
	react	8.00	11.52	-1.00	1.11	-1.00	1.85		-22.58	2.00	-1.20	
17/10/2002	i_soln	6.39	0.01				-0.35		-27.58	-0.21	0.36	
	react	8.18	11.33	-1.00	0.98	-1.00	1.93		-22.87	2.08	-1.26	
04/02/2003	i_soln	6.11	0.40				-0.54		-27.91	-0.40	0.26	
	react	7.48	11.55	-1.00	1.74	-1.00	1.42		-22.55	1.57	-1.20	
08/02/2003	i_soln	5.90	0.92				-1.04		-33.05	-0.90	0.42	
	react	7.96	11.55	-1.00	1.09	-1.00	1.85		-22.39	2.00	-1.11	
09/07/2003	i_soln	5.85	0.62				-1.01		-33.73	-0.87	0.36	
	react	7.88	11.53	-1.00	1.16	-1.00	1.89		-22.50	2.04	-1.12	
21/07/2003	i_soln	5.82	0.64				-1.02		-33.60	-0.87	0.34	
	react	7.74	11.50	-1.00	1.31	-1.00	1.79		-22.07	1.94	-1.07	
29/08/2003	i_soln	5.78	0.62				-1.15		-34.48	-1.01	0.39	
	react	7.88	11.52	-1.00	1.15	-1.00	1.87		-22.08	2.01	-1.10	

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.9 (indices de saturation eaux minérales - dissolution de 3 phases)

St-Galmier		state	pH	pe	si_Albite	si_Andalusite	si_Anorthite	si_Aragonite	si_Annite	si_Anthophyllite	si_Calcite	si_Chalcedony	si_Chlorite(14A)
	09/07/2002	i_soln	7.00	4.00				0.28		-19.48	0.42	0.29	
		react	8.46	11.45	-1.00	0.80	-1.00	1.94		-13.14	2.09	-1.31	
	14/09/2002	i_soln	7.00	4.00				0.48		-17.25	0.63	0.19	
		react	7.92	11.61	-1.00	1.37	-1.00	1.59		-16.97	1.74	-1.23	
	17/10/2002	i_soln	6.14	0.58				-0.85		-31.73	-0.71	0.16	
		react	8.02	11.78	-1.00	1.07	-1.00	1.69		-16.21	1.84	-0.97	
	08/02/2003	i_soln	5.86	0.94				-1.38		-34.04	-1.23	0.34	
		react	8.30	11.61	-1.00	0.80	-1.00	1.93		-12.77	2.08	-1.15	
	25/03/2003	i_soln	5.80	1.00				-1.46		-35.61	-1.31	0.23	
		react	8.15	11.70	-1.00	0.92	-1.00	1.79		-14.94	1.93	-1.08	
	26/04/2003	i_soln	5.76	1.00				-1.43		-36.12	-1.28	0.19	
		react	7.81	12.00	-1.00	1.12	-1.00	1.65		-16.56	1.79	-0.72	
	26/06/2003	i_soln	5.92	0.48				-0.98		-32.66	-0.83	0.16	
		react	7.74	11.88	-1.00	1.29	-1.00	1.63		-17.53	1.77	-0.93	
	22/07/2003	i_soln	5.76	0.80				-1.28		-34.73	-1.13	0.19	
		react	7.74	11.90	-1.00	1.28	-1.00	1.61		-16.99	1.75	-0.90	
	29/08/2003	i_soln	5.70	0.81				-1.39		-35.48	-1.24	0.18	
		react	7.69	11.92	-1.00	1.33	-1.00	1.56		-17.76	1.71	-0.88	
	06/11/2003	i_soln	5.73	0.94				-1.43		-36.21	-1.28	0.26	
		react	7.89	11.93	-1.00	1.05	-1.00	1.71		-16.00	1.86	-0.79	

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.9 (indices de saturation eaux minérales - dissolution de 3 phases)

Chorsin	si_Cordierite_anhyd	si_Cordierite_hydr	si_Cristobalite(alpha)	si_Cristobalite(beta)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Fluoroapatite
23/07/2002			0.29	-0.18	-4.70	-7.75	-4.52	-2.24	
	-4.57	-1.97	1.04	0.57	0.47	-12.84	2.01	-2.11	
29/08/2002			0.29	-0.18	-3.24	-8.13	-5.50	-2.43	
	-4.69	-2.09	1.05	0.58	0.65	-13.96	1.01	-2.29	
09/04/2003			0.35	-0.15	-6.42			-2.60	
	-5.46	-2.76	1.23	0.73	0.65			-2.35	
29/04/2003			0.32	-0.17	-5.18			-2.43	
	-5.01	-2.36	1.22	0.73	0.60			-2.22	
26/06/2003			0.20	-0.27	-3.73	-7.78	-5.76	-2.46	
	-4.49	-1.91	0.97	0.50	0.44	-13.30	1.51	-2.33	
21/07/2003			0.26	-0.21	-4.94	-7.93	-5.65	-2.33	
	-4.36	-1.77	1.03	0.56	0.44	-12.85	1.98	-2.22	
29/08/2003			0.26	-0.21	-4.94	-7.93	-5.65	-2.33	
	-4.36	-1.77	1.03	0.56	0.44	-12.85	1.98	-2.22	
16/09/2003			0.36	-0.12	-1.50	-5.93	-2.79	-2.34	
	-4.89	-2.27	0.88	0.40	0.97	-4.31	-2.50	-2.20	

Moingt	si_Cordierite_anhyd	si_Cordierite_hydr	si_Cristobalite(alpha)	si_Cristobalite(beta)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Fluoroapatite
23/07/2002			0.21	-0.26	-0.17			-1.28	
	-11.51	-8.94	-1.87	-2.33	4.29			-0.69	
17/10/2002			0.26	-0.21	1.18			-1.36	
	-11.94	-9.36	-1.95	-2.42	4.29			-0.80	
04/02/2003			0.29	-0.19	0.56			-1.31	
	-12.68	-10.07	-1.99	-2.46	4.22			-0.73	
26/06/2003			0.16	-0.31	1.08			-1.31	
	-11.76	-9.19	-1.94	-2.41	4.48			-0.67	
21/07/2003			0.14	-0.33	0.50			-1.53	
	-11.28	-8.72	-1.86	-2.32	4.32			-0.89	
29/08/2003			0.20	-0.27	0.42			-1.38	
	-11.68	-9.11	-1.94	-2.40	4.48			-0.67	
06/11/2003			0.22	-0.25	0.29			-1.29	
	-12.09	-9.49	-1.90	-2.38	4.42			-0.63	

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.9 (indices de saturation eaux minérales - dissolution de 3 phases)

Montrond	si_Cordierite_anhyd	si_Cordierite_hydr	si_Cristobalite(alpha)	si_Cristobalite(beta)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Fluoroapatite
23/07/2002			-0.17	-0.61	-0.01			-2.13	
	-8.55	-6.08	-1.88	-2.32	3.67			-1.26	
21/08/2002			-0.13	-0.58	0.72			-2.13	
	-8.92	-6.43	-1.95	-2.39	3.64			-1.39	
17/10/2002			-0.08	-0.52	0.45			-2.14	
	-9.12	-6.63	-1.94	-2.39	3.72			-1.37	
25/03/2003			-0.10	-0.55	-0.87			-2.10	
	-9.35	-6.85	-1.91	-2.36	4.03			-1.07	
24/04/2003			-0.15	-0.59	-0.77			-2.19	
	-9.13	-6.64	-1.86	-2.30	4.16			-1.06	
26/06/2003			-0.15	-0.60	-0.32			-2.21	
	-8.83	-6.35	-1.88	-2.32	4.12			-1.16	
21/07/2003			-0.12	-0.57	-0.85			-2.18	
	-9.01	-6.52	-1.87	-2.32	4.21			-1.07	
29/08/2003			-0.14	-0.58	-1.07			-2.18	
	-8.77	-6.30	-1.85	-2.30	4.17			-1.06	
06/11/2003			-0.09	-0.54	-1.13			-2.17	
	-9.31	-6.81	-1.86	-2.31	4.19			-1.05	

Sail/Couzan	si_Cordierite_anhyd	si_Cordierite_hydr	si_Cristobalite(alpha)	si_Cristobalite(beta)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Fluoroapatite
16/11/2002			0.19	-0.28	0.37			-0.63	
	-11.83	-9.25	-1.84	-2.31	3.73			-0.07	
18/02/2003			0.11	-0.36	1.26			-1.30	
	-11.97	-9.39	-1.96	-2.43	3.59			-0.32	
20/03/2003			0.11	-0.36	-0.83			-0.61	
	-11.78	-9.20	-1.81	-2.28	3.87			0.02	
09/04/2003			0.08	-0.39	-0.81			-0.64	
	-11.77	-9.19	-1.80	-2.27	3.86			0.01	
09/07/2003			0.12	-0.35	-0.21	-7.63	-6.32	-0.62	
	-11.49	-8.92	-1.79	-2.26	4.10	-13.14	1.44	0.01	
16/09/2003			0.15	-0.32	-0.51	-7.57	-6.34	-0.68	
	-11.99	-9.40	-1.83	-2.30	3.95	-13.06	1.47	-0.05	
06/11/2003			0.14	-0.33	-0.83	-7.95	-6.44	-0.66	
	-11.95	-9.36	-1.77	-2.24	3.97	-13.13	1.25	0.01	
15/03/2004			0.14	-0.33	-0.13	-7.49	-4.15	-0.67	
	-12.02	-9.43	-1.83	-2.31	3.90	-13.19	1.32	-0.04	

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.9 (indices de saturation eaux minérales - dissolution de 3 phases)

Salt en Donzy	si_Cordierite_anhyd	si_Cordierite_hydr	si_Cristobalite(alpha)	si_Cristobalite(beta)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Fluoroapatite
26/03/2002			-0.34	-0.77	0.49			-0.55	
	-8.02	-5.59	-1.79	-2.22	1.93			-0.03	
23/07/2002			-0.34	-0.77	1.37			-0.28	
	-9.09	-6.65	-1.79	-2.22	1.73			0.03	
17/10/2002			-0.33	-0.76	0.89			-0.36	
	-8.48	-6.04	-1.79	-2.22	1.79			0.00	
20/03/2003			-0.38	-0.85	-0.71			-0.44	
	-10.64	-8.07	-1.91	-2.38	1.96			0.21	
29/04/2003			-0.45	-0.88	-0.59			-0.76	
	-7.76	-5.32	-1.82	-2.25	1.83			-0.06	
26/06/2003			-0.48	-0.91	0.01			-0.79	
	-8.05	-5.61	-1.80	-2.23	1.83			-0.09	
21/07/2003			-0.42	-0.85	-0.84			-0.72	
	-7.70	-5.26	-1.82	-2.25	1.89			-0.06	
29/08/2003			-0.40	-0.83	-0.71			-0.71	
	-7.60	-5.16	-1.82	-2.25	1.97			-0.06	
06/11/2003			-0.31	-0.75	-0.72			-0.60	
	-7.98	-5.52	-1.80	-2.24	1.91			0.02	

St-Alban	si_Cordierite_anhyd	si_Cordierite_hydr	si_Cristobalite(alpha)	si_Cristobalite(beta)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Fluoroapatite
23/07/2002			0.06	-0.39	-0.28			-0.50	
	-9.20	-6.66	-1.48	-1.94	3.66			-0.24	
17/10/2002			0.08	-0.39	0.41			-0.69	
	-9.62	-7.07	-1.54	-2.01	3.65			-0.44	
04/02/2003			-0.02	-0.45	0.10			-0.59	
	-7.75	-5.29	-1.47	-1.91	3.45			-0.37	
08/02/2003			0.13	-0.33	-0.94			-0.49	
	-9.14	-6.60	-1.40	-1.85	3.65			-0.20	
09/07/2003			0.07	-0.38	-0.89			-0.50	
	-9.00	-6.47	-1.40	-1.86	3.78			-0.20	
21/07/2003			0.06	-0.39	-0.89			-0.54	
	-8.52	-6.01	-1.36	-1.81	3.79			-0.24	
29/08/2003			0.10	-0.35	-1.17			-0.53	
	-8.89	-6.37	-1.39	-1.84	3.78			-0.24	

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.9 (indices de saturation eaux minérales - dissolution de 3 phases)

St-Galmier	si_Cordierite_anhyd	si_Cordierite_hydr	si_Cristobalite(alpha)	si_Cristobalite(beta)	si_Dolomite	si_Fe(OH)2	si_Fe(OH)3	si_Fluorite	si_Fluoroapatite
09/07/2002			0.00	-0.47	1.91			-1.40	
	-7.31	-4.73	-1.60	-2.07	4.88			-1.25	
14/09/2002			-0.09	-0.54	2.31			-1.03	
	-7.05	-4.54	-1.51	-1.96	4.21			-0.89	
17/10/2002			-0.12	-0.59	-0.37			-1.43	
	-7.35	-4.80	-1.26	-1.72	4.17			-1.15	
08/02/2003			0.05	-0.42	-1.25			-1.21	
	-7.09	-4.51	-1.45	-1.91	4.90			-0.92	
25/03/2003			-0.06	-0.52	-1.52			-1.05	
	-7.38	-4.82	-1.37	-1.84	4.41			-0.78	
26/04/2003			-0.10	-0.56	-1.41			-1.09	
	-7.16	-4.61	-1.01	-1.47	4.04			-0.73	
26/06/2003			-0.12	-0.58	-0.58			-1.12	
	-7.17	-4.65	-1.21	-1.66	4.08			-0.85	
22/07/2003			-0.09	-0.55	-1.17			-1.20	
	-7.02	-4.50	-1.19	-1.64	4.10			-0.94	
29/08/2003			-0.11	-0.56	-1.40			-1.02	
	-7.13	-4.61	-1.17	-1.62	3.94			-0.74	
06/11/2003			-0.03	-0.49	-1.51			-1.12	
	-7.21	-4.65	-1.08	-1.54	4.19			-0.83	

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.9 (indices de saturation eaux minérales - dissolution de 3 phases)

Chorsin	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hydroxylapatite	si_Hematite	si_Illite	si_Kaolinite	si_K-Feldspar	si_K-mica	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K
23/07/2002		0.74	-2.52	-8.12		2.42						
	2.40	7.27	-2.40	-12.66		15.49	10.25	8.66	6.32		9.93	9.58
29/08/2002		-0.23	-2.72	-9.21		0.48						
	2.37	6.28	-2.61	-13.79		13.51	10.21	8.62	6.29		9.94	9.56
09/04/2003			-2.84	-9.30								
	2.12		-2.64	-14.37			9.77	8.42	5.82		10.35	9.65
29/04/2003			-2.74	-9.09								
	2.22		-2.57	-14.04			10.27	8.63	6.43		10.35	9.89
26/06/2003		-0.52	-2.75	-8.77		-0.10						
	2.47	6.75	-2.64	-13.09		14.46	10.22	8.65	6.26		9.75	9.44
21/07/2003		-0.41	-2.73	-9.15		0.13						
	2.43	7.22	-2.64	-13.57		15.40	10.26	8.70	6.25		9.92	9.56
29/08/2003		-0.41	-2.73	-9.15		0.13						
	2.43	7.22	-2.64	-13.57		15.40	10.26	8.70	6.25		9.92	9.56
16/09/2003		2.50	-2.75	-9.24		5.95						
	2.40	2.79	-2.63	-13.49		6.53	9.39	8.33	5.21		9.47	8.85

Moingt	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hydroxylapatite	si_Hematite	si_Illite	si_Kaolinite	si_K-Feldspar	si_K-mica	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K
23/07/2002			-2.39	-5.64								
	3.33		-1.87	-5.88			4.10	4.71	0.89		1.08	0.87
17/10/2002			-2.65	-5.65								
	3.35		-2.15	-5.82			3.96	4.58	0.84		0.81	0.63
04/02/2003			-2.52	-5.59								
	3.30		-2.00	-5.78			3.84	4.39	0.94		0.61	0.47
26/06/2003			-2.83	-5.61								
	3.36		-2.26	-5.81			4.01	4.62	0.86		0.85	0.68
21/07/2003			-2.91	-5.83								
	3.36		-2.35	-6.06			4.17	4.78	0.90		1.14	0.94
29/08/2003			-2.74	-5.58								
	3.35		-2.10	-5.79			3.95	4.61	0.76		0.86	0.66
06/11/2003			-2.62	-5.65								
	3.29		-2.05	-5.91			3.99	4.55	0.93		0.90	0.72

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.9 (indices de saturation eaux minérales - dissolution de 3 phases)

Montrond	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hydroxylapatite	si_Hematite	si_Illite	si_Kaolinite	si_K-Feldspar	si_K-mica	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K
23/07/2002			-3.54	-6.44								
	3.68		-2.73	-6.52			4.23	5.41	-0.07		1.53	1.08
21/08/2002			-3.53	-6.41	-3.71							
	3.69		-2.83	-6.47	5.06		4.06	5.29	-0.18		1.32	0.86
17/10/2002			-3.52	-6.43								
	3.65		-2.80	-6.50			4.01	5.23	-0.19		1.31	0.84
25/03/2003			-3.52	-6.30	-8.63							
	3.57		-2.57	-6.42	5.12		3.95	5.14	-0.15		1.32	0.84
24/04/2003			-3.61	-6.33	-9.36							
	3.57		-2.57	-6.48	4.42		4.12	5.23	0.03		1.47	1.03
26/06/2003			-3.55	-6.31								
	3.62		-2.58	-6.43			4.14	5.30	-0.04		1.46	1.02
21/07/2003			-3.57	-6.31	-9.02							
	3.58		-2.55	-6.46	4.79		4.00	5.22	-0.18		1.46	0.95
29/08/2003			-3.61	-6.30	-7.97							
	3.59		-2.58	-6.46	6.08		4.09	5.29	-0.13		1.52	1.03
06/11/2003			-3.58	-6.33	-8.71							
	3.54		-2.56	-6.49	5.91		3.99	5.16	-0.09		1.44	0.95

Sail/Couzan	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hydroxylapatite	si_Hematite	si_Illite	si_Kaolinite	si_K-Feldspar	si_K-mica	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K
16/11/2002			-2.21	-6.06	-2.37							
	3.34		-1.71	-6.26	10.03		4.40	4.76	1.39		1.13	1.06
18/02/2003			-2.87	-6.05								
	3.43		-1.92	-6.16			4.30	4.72	1.28		0.82	0.80
20/03/2003			-2.18	-6.01								
	3.30		-1.63	-6.28			4.38	4.76	1.36		1.20	1.10
09/04/2003			-2.21	-6.03								
	3.30		-1.64	-6.31			4.42	4.77	1.41		1.23	1.14
09/07/2003		-1.09	-2.21	-6.00		-1.23						
	3.31	6.66	-1.65	-6.29		14.28	4.41	4.82	1.31		1.29	1.17
16/09/2003		-1.09	-2.21	-5.98		-1.24						
	3.29	6.72	-1.65	-6.24		14.39	4.34	4.70	1.38		1.11	1.03
06/11/2003		-1.19	-2.24	-6.05		-1.44						
	3.26	6.50	-1.66	-6.38		13.95	4.48	4.76	1.56		1.27	1.21
15/03/2004		1.10	-2.21	-5.99		3.16						
	3.30	6.57	-1.66	-6.24		14.08	4.35	4.70	1.39		1.11	1.03

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.9 (indices de saturation eaux minérales - dissolution de 3 phases)

Salt en Donzy	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hydroxylapatite	si_Hematite	si_Illite	si_Kaolinite	si_K-Feldspar	si_K-mica	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K
26/03/2002			-3.14	-6.22								
	3.66		-2.63	-6.25			4.52	5.56	0.22		1.77	1.38
23/07/2002			-2.82	-6.20								
	3.41		-2.52	-6.22			4.14	5.07	0.30		1.45	1.08
17/10/2002			-2.90	-6.20								
	3.55		-2.55	-6.22			4.34	5.34	0.25		1.64	1.25
20/03/2003			-3.10	-6.19								
	3.56		-2.47	-6.23			4.29	5.08	0.64		1.24	0.99
29/04/2003			-3.34	-6.17								
	3.80		-2.65	-6.20			4.77	5.78	0.36		1.85	1.52
26/06/2003			-3.33	-6.20								
	3.69		-2.64	-6.23			4.62	5.59	0.37		1.75	1.41
21/07/2003			-3.31	-6.19								
	3.78		-2.66	-6.22			4.66	5.75	0.20		1.85	1.47
29/08/2003			-3.28	-6.18								
	3.81		-2.64	-6.20			4.72	5.80	0.21		1.89	1.51
06/11/2003			-3.17	-6.22								
	3.78		-2.57	-6.25			4.77	5.76	0.39		1.89	1.55

St-Alban	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hydroxylapatite	si_Hematite	si_Illite	si_Kaolinite	si_K-Feldspar	si_K-mica	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K
23/07/2002			-2.55	-6.95								
	3.32		-2.34	-7.32			4.71	5.47	0.80		2.46	1.99
17/10/2002			-2.55	-6.96								
	3.32		-2.34	-7.26			4.53	5.33	0.69		2.25	1.78
04/02/2003			-2.55	-6.92								
	3.50		-2.36	-7.19			5.12	5.86	0.91		2.66	2.28
08/02/2003			-2.48	-6.97								
	3.27		-2.25	-7.49			4.88	5.55	1.01		2.69	2.23
09/07/2003			-2.53	-6.91								
	3.29		-2.30	-7.44			4.93	5.57	1.05		2.68	2.24
21/07/2003			-2.57	-6.92								
	3.31		-2.33	-7.50			5.05	5.71	1.04		2.86	2.41
29/08/2003			-2.55	-6.93								
	3.28		-2.32	-7.48			4.87	5.59	0.92		2.74	2.25

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.9 (indices de saturation eaux minérales - dissolution de 3 phases)

St-Galmier	si_Gibbsite	si_Goethite	si_Gypsum	si_Halite	si_Hydroxylapatite	si_Hematite	si_Illite	si_Kaolinite	si_K-Feldspar	si_K-mica	si_Montmor-Ca	si_Montmor-K
09/07/2002			-2.04	-6.78								
	3.31		-1.91	-6.93			2.12	5.18	-3.72		2.52	0.61
14/09/2002			-1.91	-6.72								
	3.42		-1.78	-6.86			3.57	5.62	-1.67		2.74	1.50
17/10/2002			-1.99	-6.80								
	3.22		-1.76	-7.46			3.88	5.71	-1.18		3.38	2.09
08/02/2003			-2.07	-6.67								
	3.22		-1.83	-7.16			2.45	5.33	-3.33		2.94	1.06
25/03/2003			-1.99	-6.72								
	3.22		-1.76	-7.26			3.20	5.49	-2.13		3.08	1.55
26/04/2003			-2.02	-6.73								
	3.11		-1.72	-7.93			4.66	6.00	-0.16		4.05	2.94
26/06/2003			-1.97	-6.74								
	3.25		-1.75	-7.47			4.43	5.88	-0.42		3.49	2.45
22/07/2003			-1.97	-6.73								
	3.24		-1.76	-7.53			4.38	5.90	-0.56		3.58	2.47
29/08/2003			-1.97	-6.73								
	3.24		-1.74	-7.54			4.62	5.95	-0.17		3.60	2.62
06/11/2003			-1.97	-6.75								
	3.13		-1.74	-7.80			4.28	5.87	-0.68		3.84	2.61

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.9 (indices de saturation eaux minérales - dissolution de 3 phases)

Chorsin	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite	si_Phlogopite	si_Pyrite	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg
23/07/2002							0.87	-1.88		-0.50	
	9.97	7.85	12.67	4.43	-1.00	-224.61	1.62	-7.57	1.19	0.25	1.40
29/08/2002							0.87	-2.21		-0.51	
	9.97	7.85	12.59	4.37	-1.00	-227.95	1.63	-8.63	1.11	0.25	0.65
09/04/2003							0.95			-0.51	
	10.31	8.11	11.52	3.75	-1.00		1.83		0.43	0.37	
29/04/2003							0.91			-0.51	
	10.34	8.14	12.38	4.01	-1.00		1.81		0.81	0.39	
26/06/2003							0.77	-1.95		-0.59	
	9.80	7.73	12.76	4.58	-1.00	-224.81	1.55	-8.02	1.30	0.18	0.95
21/07/2003							0.83	-2.07		-0.53	
	9.97	7.85	12.68	4.51	-1.00	-224.53	1.60	-7.56	1.28	0.24	1.39
29/08/2003							0.83	-2.07		-0.53	
	9.97	7.85	12.68	4.51	-1.00	-224.53	1.60	-7.56	1.28	0.24	1.39
16/09/2003							0.94	-0.17		-0.46	
	9.50	7.49	11.55	4.41	-1.00	-34.75	1.46	0.82	0.93	0.07	4.57

Moingt	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite	si_Phlogopite	si_Pyrite	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg
23/07/2002							0.78			-0.57	
	0.78	0.93	9.13	6.32	-1.00		-1.30		0.23	-2.65	
17/10/2002							0.83			-0.53	
	0.48	0.71	9.12	6.36	-1.00		-1.38		0.15	-2.74	
04/02/2003							0.87			-0.51	
	0.23	0.52	9.09	6.21	-1.00		-1.41		-0.10	-2.79	
26/06/2003							0.73			-0.62	
	0.54	0.75	9.16	6.38	-1.00		-1.37		0.21	-2.72	
21/07/2003							0.71			-0.64	
	0.86	0.99	9.20	6.39	-1.00		-1.29		0.33	-2.63	
29/08/2003							0.77			-0.59	
	0.56	0.76	9.04	6.37	-1.00		-1.37		0.21	-2.72	
06/11/2003							0.79			-0.58	
	0.56	0.77	9.08	6.23	-1.00		-1.33		0.05	-2.70	

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.9 (indices de saturation eaux minérales - dissolution de 3 phases)

Montrond	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite	si_Phlogopite	si_Pyrite	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg
23/07/2002							0.38			-0.89	
	1.47	1.43	8.95	7.13	-1.00		-1.33		1.29	-2.61	
21/08/2002							0.42			-0.87	
	1.24	1.26	8.85	7.14	-1.00		-1.40		1.19	-2.68	
17/10/2002							0.48			-0.82	
	1.21	1.24	8.76	7.05	-1.00		-1.39		1.08	-2.68	
25/03/2003							0.46			-0.84	
	1.20	1.22	8.65	6.89	-1.00		-1.35		0.94	-2.65	
24/04/2003							0.40			-0.89	
	1.36	1.35	8.82	6.89	-1.00		-1.31		1.02	-2.60	
26/06/2003							0.39			-0.88	
	1.38	1.36	8.86	7.01	-1.00		-1.33		1.16	-2.61	
21/07/2003							0.43			-0.86	
	1.36	1.34	8.62	6.91	-1.00		-1.32		1.03	-2.61	
29/08/2003							0.41			-0.87	
	1.44	1.40	8.72	6.95	-1.00		-1.31		1.12	-2.58	
06/11/2003							0.46			-0.84	
	1.32	1.31	8.62	6.81	-1.00		-1.31		0.91	-2.60	

Sail/Couzan	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite	si_Phlogopite	si_Pyrite	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg
16/11/2002							0.76			-0.60	
	0.80	0.96	9.64	6.32	-1.00		-1.27		0.22	-2.63	
18/02/2003							0.68			-0.68	
	0.50	0.74	9.71	6.52	-1.00		-1.39		0.30	-2.75	
20/03/2003							0.69			-0.68	
	0.87	1.01	9.53	6.25	-1.00		-1.24		0.19	-2.60	
09/04/2003							0.65			-0.71	
	0.90	1.03	9.58	6.25	-1.00		-1.23		0.20	-2.59	
09/07/2003							0.69	-1.20		-0.66	
	0.98	1.09	9.51	6.28	-1.00	-227.06	-1.22	-8.76	0.27	-2.57	-4.37
16/09/2003							0.73	-1.14		-0.64	
	0.78	0.93	9.53	6.23	-1.00	-226.62	-1.26	-8.83	0.13	-2.62	-4.45
06/11/2003							0.71	-1.45		-0.65	
	0.93	1.05	9.64	6.17	-1.00	-224.53	-1.20	-8.84	0.12	-2.56	-4.43
15/03/2004							0.72	-1.11		-0.65	
	0.77	0.93	9.55	6.24	-1.00	-226.53	-1.26	-8.99	0.13	-2.63	-4.55

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.9 (indices de saturation eaux minérales - dissolution de 3 phases)

Salt en Donzy	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite	si_Phlogopite	si_Pyrite	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg
26/03/2002							0.20			-1.05	
	1.75	1.63	9.24	7.13	-1.00		-1.25		1.47	-2.50	
23/07/2002							0.20			-1.05	
	1.34	1.30	8.81	6.63	-1.00		-1.25		0.96	-2.50	
17/10/2002							0.21			-1.04	
	1.57	1.49	9.03	6.90	-1.00		-1.25		1.24	-2.49	
20/03/2003							0.19			-1.16	
	1.02	1.13	9.35	6.79	-1.00		-1.34		0.66	-2.70	
29/04/2003							0.09			-1.16	
	1.84	1.72	9.64	7.40	-1.00		-1.28		1.69	-2.53	
26/06/2003							0.06			-1.18	
	1.72	1.61	9.44	7.18	-1.00		-1.26		1.52	-2.51	
21/07/2003							0.12			-1.13	
	1.85	1.72	9.45	7.36	-1.00		-1.27		1.67	-2.53	
29/08/2003							0.14			-1.11	
	1.90	1.76	9.52	7.42	-1.00		-1.27		1.72	-2.53	
06/11/2003							0.24			-1.03	
	1.87	1.74	9.62	7.33	-1.00		-1.26		1.60	-2.52	

St-Alban	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite	si_Phlogopite	si_Pyrite	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg
23/07/2002							0.63			-0.70	
	2.32	2.07	9.06	6.35	-1.00		-0.92		0.74	-2.24	
17/10/2002							0.64			-0.69	
	2.08	1.90	8.92	6.32	-1.00		-0.98		0.60	-2.32	
04/02/2003							0.53			-0.74	
	2.63	2.30	9.58	6.78	-1.00		-0.93		1.38	-2.19	
08/02/2003							0.69			-0.63	
	2.55	2.25	9.16	6.24	-1.00		-0.83		0.71	-2.16	
09/07/2003							0.63			-0.68	
	2.54	2.24	9.25	6.30	-1.00		-0.84		0.79	-2.16	
21/07/2003							0.61			-0.69	
	2.77	2.40	9.30	6.36	-1.00		-0.80		0.94	-2.10	
29/08/2003							0.66			-0.65	
	2.62	2.29	9.10	6.27	-1.00		-0.83		0.78	-2.14	

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.9 (indices de saturation eaux minérales - dissolution de 3 phases)

St-Galmier	si_Montmor-Mg	si_Montmor-Na	si_Muscovite	si_Paragonite	si_Phlogopite	si_Pyrite	si_Quartz	si_Siderite	si_Sillimanite	si_SiO2(am)	si_Smectite-high-Fe-Mg
09/07/2002							0.57			-0.79	
	2.55	2.19	4.47	6.27	-1.00		-1.03		0.42	-2.39	
14/09/2002							0.46			-0.84	
	2.78	2.39	6.80	6.58	-1.00		-0.96		1.00	-2.26	
17/10/2002							0.44			-0.90	
	3.37	2.83	6.85	6.12	-1.00		-0.69		0.69	-2.03	
08/02/2003							0.62			-0.74	
	2.98	2.51	4.69	6.10	-1.00		-0.88		0.42	-2.23	
25/03/2003							0.51			-0.83	
	3.08	2.60	5.90	6.12	-1.00		-0.80		0.54	-2.15	
26/04/2003							0.46			-0.87	
	4.04	3.34	7.66	5.92	-1.00		-0.44		0.74	-1.78	
26/06/2003							0.43			-0.88	
	3.49	2.93	7.71	6.22	-1.00		-0.65		0.92	-1.96	
22/07/2003							0.47			-0.85	
	3.59	3.00	7.53	6.19	-1.00		-0.63		0.91	-1.94	
29/08/2003							0.45			-0.86	
	3.60	3.01	7.94	6.21	-1.00		-0.61		0.96	-1.92	
06/11/2003							0.54			-0.80	
	3.83	3.18	7.17	5.93	-1.00		-0.52		0.67	-1.86	

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.9 (indices de saturation eaux minérales - dissolution de 3 phases)

Chorsin	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
23/07/2002		-3.31	-7.89
	4.01	-0.89	-7.73
29/08/2002		-2.58	-8.94
	3.54	-0.77	-8.90
09/04/2003			-8.79
			-10.03
29/04/2003		-3.45	-8.63
		-0.66	-9.05
26/06/2003		-2.81	-8.36
	3.66	-0.89	-8.22
21/07/2003		-3.42	-9.15
	3.99	-0.89	-8.71
29/08/2003		-3.42	-9.15
	3.99	-0.89	-8.71
16/09/2003		-1.66	-9.20
	5.46	-0.51	-9.69

Moingt	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
23/07/2002		-0.35	-6.04
		2.29	-6.37
17/10/2002		0.40	-6.07
		2.53	-6.37
04/02/2003		0.11	-5.97
		2.62	-6.24
26/06/2003		0.37	-6.05
		2.50	-6.32
21/07/2003		0.04	-6.24
		2.28	-6.53
29/08/2003		0.00	-6.09
		2.40	-6.41
06/11/2003		-0.01	-6.07
		2.50	-6.37

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.9 (indices de saturation eaux minérales - dissolution de 3 phases)

Montrond	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
23/07/2002		-0.23	-7.88
		1.10	-7.89
21/08/2002		0.15	-7.82
		1.31	-7.95
17/10/2002		-0.01	-7.83
		1.32	-8.00
25/03/2003		-0.65	-7.75
		1.27	-7.88
24/04/2003		-0.57	-7.71
		1.22	-7.76
26/06/2003		-0.39	-7.75
		1.19	-7.77
21/07/2003		-0.63	-7.97
		1.20	-7.94
29/08/2003		-0.77	-8.01
		1.09	-7.88
06/11/2003		-0.76	-7.83
		1.24	-7.90

Sail/Couzan	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
16/11/2002		-0.16	-6.07
		2.13	-6.25
18/02/2003		0.43	-6.11
		2.13	-6.27
20/03/2003		-0.77	-6.10
		2.06	-6.30
09/04/2003		-0.75	-6.09
		2.05	-6.28
09/07/2003		-0.48	-6.13
	-2.44	2.08	-6.36
16/09/2003		-0.60	-6.05
	-2.53	2.14	-6.25
06/11/2003		-0.74	-6.03
	-2.47	2.11	-6.21
15/03/2004		-0.41	-6.05
	-2.59	2.14	-6.25

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.9 (indices de saturation eaux minérales - dissolution de 3 phases)

Salt en Donzy	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
26/03/2002		0.23	-7.35
		0.43	-7.29
23/07/2002		0.52	-7.18
		0.49	-7.18
17/10/2002		0.30	-7.26
		0.41	-7.23
20/03/2003			-6.94
			-6.96
29/04/2003		-0.13	-7.17
		0.28	-7.10
26/06/2003		0.16	-7.15
		0.37	-7.12
21/07/2003		-0.10	-7.41
		0.32	-7.28
29/08/2003		-0.16	-7.40
		0.31	-7.25
06/11/2003		-0.35	-7.20
		0.34	-7.14

St-Alban	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
23/07/2002		-0.72	-7.25
		1.42	-7.86
17/10/2002		-0.32	-7.24
		1.59	-7.92
04/02/2003		-0.63	-7.32
		0.97	-7.56
08/02/2003		-1.05	-7.22
		1.38	-7.83
09/07/2003		-1.05	-7.21
		1.36	-7.73
21/07/2003		-1.06	-7.30
		1.25	-7.78
29/08/2003		-1.18	-7.27
		1.36	-7.89

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.9 (indices de saturation eaux minérales - dissolution de 3 phases)

St-Galmier	si_Smectite-low-Fe-Mg	si_Strontianite	si_Sylvite
09/07/2002		0.26	-7.29
		1.72	-12.03
14/09/2002		0.15	-7.24
		1.07	-9.86
17/10/2002		-0.98	-7.33
		1.15	-10.00
08/02/2003		-2.46	-7.96
		0.40	-11.87
25/03/2003		-1.66	-7.25
		1.16	-10.76
26/04/2003		-1.56	-7.23
		0.97	-9.45
26/06/2003			-7.33
			-9.22
22/07/2003			-7.66
			-9.42
29/08/2003		-1.51	-7.38
		1.00	-9.04
06/11/2003			-7.37
			-9.84

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.10 (indices de saturation eaux minérales - 50 à 250°C)

CH	min TDS	state	pH	pe	Aragonite	Calcite	Chalcedony	Chamosite-7A	Clinochlore-14A	Cordierite_anhyd
	09/04/2003	i_soln	5.16	2.51	-3.83	-3.68	0.66			
	5.1	react	9.32	-5.35	1.63	1.77	-1.29	3.27	1.97	-11.08
	50	react	7.01	-3.16	-0.91	-0.77	-1.25	5.62	4.17	-3.26
	100	react	6.12	-2.54	-2.69	-2.54	-1.22	5.79	4.17	-0.20
	150	react	5.57	-2.16	-4.29	-4.14	-1.19	5.69	3.93	1.78
	200	react	5.37	-2.06	-5.42	-5.26	-1.17	5.24	3.38	2.67
	250	react	5.46	-2.23	-6.05	-5.89	-1.15	4.52	2.57	2.69

MGT	min TDS	state	pH	pe	Aragonite	Calcite	Chalcedony	Chamosite-7A	Clinochlore-14A	Cordierite_anhyd
	23/07/2002	i_soln	6.06	1.04	-0.82	-0.68	0.50			
	16.7	react	8.27	-4.20	2.53	2.68	-1.28	3.70	2.36	-9.34
	50	react	6.81	-2.88	1.22	1.36	-1.25	4.57	3.11	-5.37
	100	react	6.08	-2.45	-0.07	0.07	-1.22	4.17	2.55	-3.44
	150	react	5.79	-2.35	-1.43	-1.28	-1.19	3.80	2.04	-1.99
	200	react	5.26	-1.90	-3.36	-3.20	-1.17	4.18	2.32	0.55
	250	react	4.79	-1.47	-5.17	-5.01	-1.15	4.64	2.69	2.92

MTD	min TDS	state	pH	pe	Aragonite	Calcite	Chalcedony	Chamosite-7A	Clinochlore-14A	Cordierite_anhyd
	23/07/2002	i_soln	6.68	-0.44	-0.68	-0.54	0.11			
	26.3	react	7.67	-3.61	1.66	1.80	-1.27	4.47	3.10	-7.11
	50	react	7.10	-3.22	1.18	1.32	-1.25	4.20	2.75	-6.10
	100	react	6.64	-3.11	0.19	0.33	-1.22	3.42	1.80	-4.94
	150	react	6.62	-3.39	-0.57	-0.43	-1.19	2.50	0.74	-4.60
	200	react	6.63	-3.60	-1.29	-1.14	-1.17	1.80	-0.06	-4.21
	250	react	6.61	-3.69	-2.11	-1.95	-1.15	1.35	-0.60	-3.65

S/C	min TDS	state	pH	pe	Aragonite	Calcite	Chalcedony	Chamosite-7A	Clinochlore-14A	Cordierite_anhyd
	18/02/2003	i_soln	7.00	4.00	-0.44	-0.29	0.40			
	15.4	react	8.41	-4.34	2.35	2.50	-1.28	3.73	2.40	-9.37
	50	react	7.08	-3.18	1.23	1.38	-1.25	4.23	2.77	-6.04
	100	react	6.65	-3.10	0.30	0.44	-1.22	3.36	1.74	-5.06
	150	react	6.72	-3.48	-0.34	-0.19	-1.19	2.28	0.52	-5.05
	200	react	6.77	-3.71	-0.97	-0.82	-1.17	1.50	-0.36	-4.81
	250	react	6.54	-3.50	-2.17	-2.01	-1.15	1.48	-0.47	-3.39

SD	min TDS	state	pH	pe	Aragonite	Calcite	Chalcedony	Chamosite-7A	Clinochlore-14A	Cordierite_anhyd
	26/03/2002	i_soln	7.84	-2.87	-0.08	0.06	-0.07			
	29.9	react	7.98	-4.07	1.06	1.20	-1.27	4.06	2.68	-7.68
	50	react	7.65	-3.90	0.67	0.82	-1.25	3.70	2.24	-7.10
	100	react	7.42	-4.07	-0.21	-0.06	-1.22	2.64	1.02	-6.51
	150	react	7.53	-4.49	-0.70	-0.55	-1.19	1.42	-0.34	-6.75
	200	react	7.65	-4.82	-1.01	-0.85	-1.17	0.43	-1.43	-6.95
	250	react	7.66	-4.92	-1.46	-1.30	-1.15	-0.08	-2.03	-6.52

SA	min TDS	state	pH	pe	Aragonite	Calcite	Chalcedony	Chamosite-7A	Clinochlore-14A	Cordierite_anhyd
	17/10/2002	i_soln	6.39	0.01	-0.35	-0.21	0.36			
	18.5	react	8.20	-4.15	1.90	2.05	-1.28	4.01	2.67	-8.58
	50	react	6.96	-3.07	0.66	0.80	-1.25	4.71	3.26	-5.08
	100	react	6.26	-2.69	-0.79	-0.64	-1.22	4.48	2.86	-2.82
	150	react	6.09	-2.77	-1.88	-1.73	-1.19	3.87	2.11	-1.87
	200	react	5.84	-2.63	-3.19	-3.04	-1.17	3.66	1.79	-0.50
	250	react	5.38	-2.18	-4.92	-4.76	-1.15	4.05	2.10	1.75

SG	min TDS	state	pH	pe	Aragonite	Calcite	Chalcedony	Chamosite-7A	Clinochlore-14A	Cordierite_anhyd
	17/10/2002	i_soln	6.14	0.58	-0.85	-0.71	0.16			
	18.3	react	8.23	-4.18	1.83	1.97	-1.28	4.03	2.69	-8.55
	50	react	6.90	-2.97	0.30	0.45	-1.25	5.08	3.63	-4.33
	100	react	6.10	-2.43	-1.38	-1.23	-1.22	5.10	3.47	-1.59
	150	react	5.64	-2.13	-3.01	-2.86	-1.19	5.02	3.26	0.44
	200	react	5.20	-1.78	-4.69	-4.54	-1.17	5.14	3.27	2.46
	250	react	5.07	-1.72	-5.75	-5.59	-1.15	4.83	2.88	3.31

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.10 (indices de saturation eaux minérales - 50 à 250°C)

CH	CO2(g)	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Hematite	Illite
09/04/2003	-1.19	0.35	-6.42				-2.84		
5.1	-4.28	-1.60	2.48	-4.20	3.11	0.24	-1.36	1.40	3.13
50	-1.51	-1.50	0.84	-3.77	3.84	0.27	-3.30	1.63	4.75
100	-0.60	-1.42	-1.57	-3.42	3.65	0.04	-4.60	1.45	4.61
150	-0.34	-1.36	-4.08	-3.17	3.47	-0.20	-5.34	1.36	4.33
200	-0.34	-1.31	-6.12	-2.99	3.20	-0.47	-5.62	1.30	3.82
250	-0.42	-1.27	-7.55	-2.84	2.86	-0.79	-5.56	1.25	3.10

MGT	CO2(g)	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Hematite	Illite
23/07/2002	-0.19	0.21	-0.17				-2.39		
16.7	-2.10	-1.57	5.02	-4.08	3.18	0.40	-0.63	1.75	3.38
50	-0.42	-1.50	4.05	-3.77	3.31	0.36	-1.60	1.81	3.86
100	0.39	-1.42	2.03	-3.42	2.84	0.10	-2.59	1.56	3.23
150	0.63	-1.36	-0.25	-3.17	2.52	-0.18	-3.34	1.39	2.73
200	0.66	-1.31	-3.06	-2.99	2.67	-0.42	-4.17	1.41	2.92
250	0.58	-1.27	-5.66	-2.84	2.91	-0.70	-5.07	1.43	3.20

MTD	CO2(g)	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Hematite	Illite
23/07/2002	-0.62	-0.17	-0.01				-3.54		
26.3	-1.54	-1.55	4.29	-3.98	3.47	0.41	-1.27	1.81	3.96
50	-0.83	-1.50	3.60	-3.77	3.13	0.30	-1.66	1.69	3.55
100	-0.10	-1.42	1.81	-3.42	2.47	-0.01	-2.61	1.34	2.59
150	0.19	-1.36	0.16	-3.17	1.87	-0.38	-3.45	0.99	1.62
200	0.34	-1.31	-1.31	-2.99	1.48	-0.75	-4.11	0.75	0.89
250	0.35	-1.27	-2.84	-2.84	1.27	-1.09	-4.54	0.64	0.41

S/C	CO2(g)	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Hematite	Illite
18/02/2003	-0.90	0.11	1.26				-2.87		
15.4	-2.34	-1.57	4.66	-4.09	3.22	0.39	-0.77	1.72	3.42
50	-0.75	-1.50	3.74	-3.77	3.14	0.32	-1.54	1.73	3.57
100	-0.04	-1.42	1.97	-3.42	2.44	0.01	-2.38	1.39	2.54
150	0.19	-1.36	0.40	-3.17	1.76	-0.37	-3.14	1.01	1.43
200	0.36	-1.31	-0.97	-2.99	1.33	-0.72	-3.66	0.79	0.64
250	0.41	-1.27	-2.83	-2.84	1.33	-0.98	-3.87	0.87	0.52

SD	CO2(g)	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Hematite	Illite
26/03/2002	-2.13	-0.34	0.49				-3.14		
29.9	-2.32	-1.54	2.76	-3.94	3.23	0.29	-1.70	1.58	3.58
50	-1.84	-1.50	2.09	-3.77	2.88	0.17	-2.04	1.44	3.12
100	-1.27	-1.42	0.23	-3.42	2.08	-0.19	-3.04	1.00	1.93
150	-1.01	-1.36	-1.16	-3.17	1.33	-0.57	-3.72	0.61	0.70
200	-0.74	-1.31	-2.10	-2.99	0.80	-0.94	-4.13	0.35	-0.27
250	-0.43	-1.27	-2.97	-2.84	0.55	-1.28	-4.43	0.26	-0.81

SA	CO2(g)	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Hematite	Illite
17/10/2002	-0.65	0.08	0.41				-2.55		
18.5	-2.28	-1.57	4.13	-4.06	3.32	0.38	-1.10	1.71	3.64
50	-0.84	-1.50	3.07	-3.77	3.39	0.31	-2.08	1.71	3.98
100	-0.01	-1.42	0.91	-3.42	3.00	0.03	-3.35	1.44	3.49
150	0.24	-1.36	-1.09	-3.17	2.56	-0.30	-4.23	1.16	2.78
200	0.30	-1.31	-3.25	-2.99	2.41	-0.57	-4.75	1.10	2.47
250	0.23	-1.27	-5.77	-2.84	2.62	-0.81	-5.25	1.21	2.70

SG	CO2(g)	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Hematite	Illite
17/10/2002	-0.58	-0.12	-0.37				-1.99		
18.3	-2.35	-1.57	3.99	-4.06	3.34	0.38	-1.11	1.72	3.65
50	-0.83	-1.50	2.73	-3.77	3.57	0.36	-2.15	1.80	4.30
100	0.02	-1.42	0.35	-3.42	3.31	0.13	-3.25	1.64	4.02
150	0.27	-1.36	-2.20	-3.17	3.13	-0.11	-4.04	1.54	3.76
200	0.27	-1.31	-4.78	-2.99	3.15	-0.36	-4.77	1.51	3.73
250	0.19	-1.27	-6.63	-2.84	3.01	-0.66	-5.01	1.50	3.37

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.10 (indices de saturation eaux minérales - 50 à 250°C)

CH	Kaolinite	Montmor	Muscovite	SiO2(am)
09/04/2003				-0.51
5.1	4.75	1.61	6.69	-2.46
50	6.51	2.87	8.49	-2.12
100	6.18	2.66	8.24	-1.89
150	5.68	2.35	7.83	-1.74
200	4.91	1.85	7.14	-1.62
250	3.90	1.21	6.21	-1.51

MGT	Kaolinite	Montmor	Muscovite	SiO2(am)
23/07/2002				-0.57
16.7	5.01	1.80	6.95	-2.35
50	5.46	2.12	7.44	-2.12
100	4.55	1.50	6.61	-1.89
150	3.79	1.00	5.94	-1.74
200	3.85	1.10	6.08	-1.62
250	4.02	1.29	6.33	-1.51

MTD	Kaolinite	Montmor	Muscovite	SiO2(am)
23/07/2002				-0.89
26.3	5.65	2.26	7.60	-2.28
50	5.09	1.86	7.07	-2.12
100	3.80	0.97	5.86	-1.89
150	2.49	0.08	4.64	-1.74
200	1.46	-0.59	3.70	-1.62
250	0.73	-1.04	3.05	-1.51

S/C	Kaolinite	Montmor	Muscovite	SiO2(am)
18/02/2003				-0.68
15.4	5.06	1.84	7.00	-2.36
50	5.12	1.88	7.10	-2.12
100	3.74	0.92	5.80	-1.89
150	2.26	-0.08	4.41	-1.74
200	1.17	-0.81	3.40	-1.62
250	0.86	-0.95	3.17	-1.51

SD	Kaolinite	Montmor	Muscovite	SiO2(am)
26/03/2002				-1.05
29.9	5.20	1.93	7.15	-2.25
50	4.59	1.50	6.57	-2.12
100	3.02	0.41	5.08	-1.89
150	1.41	-0.69	3.56	-1.74
200	0.10	-1.57	2.33	-1.62
250	-0.70	-2.06	1.61	-1.51

SA	Kaolinite	Montmor	Muscovite	SiO2(am)
17/10/2002				-0.69
18.5	5.30	2.01	7.25	-2.34
50	5.60	2.22	7.58	-2.12
100	4.86	1.72	6.92	-1.89
150	3.85	1.05	6.00	-1.74
200	3.32	0.73	5.56	-1.62
250	3.43	0.88	5.75	-1.51

SG	Kaolinite	Montmor	Muscovite	SiO2(am)
17/10/2002				-0.90
18.3	5.33	2.02	7.27	-2.34
50	5.98	2.49	7.95	-2.12
100	5.48	2.16	7.54	-1.89
150	5.01	1.87	7.16	-1.74
200	4.80	1.78	7.04	-1.62
250	4.21	1.43	6.53	-1.51

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.10 (indices de saturation eaux minérales - 50 à 250°C)

CH	max TDS	state	pH	pe	Aragonite	Calcite	Chalcedony	Chamosite-7A	Clinochlore-14A	Cordierite_anhyd
	16/09/2003	i_soln	6.27	1.73	-1.39	-1.24	0.65			
	11.8	react	8.78	-4.79	1.54	1.69	-1.28	3.74	2.42	-9.62
	50	react	7.00	-3.15	-0.60	-0.45	-1.25	5.49	4.04	-3.52
	100	react	6.15	-2.59	-2.35	-2.20	-1.22	5.63	4.01	-0.52
	150	react	5.60	-2.22	-3.99	-3.84	-1.19	5.58	3.82	1.55
	200	react	5.25	-1.97	-5.39	-5.24	-1.17	5.41	3.54	3.00
	250	react	5.23	-2.02	-6.20	-6.04	-1.15	4.87	2.92	3.38

MGT	max TDS	state	pH	pe	Aragonite	Calcite	Chalcedony	Chamosite-7A	Clinochlore-14A	Cordierite_anhyd
	26/06/2003	i_soln	6.46	-0.81	-0.22	-0.08	0.45			
	16.4	react	8.30	-4.22	2.68	2.82	-1.28	3.67	2.34	-9.41
	50	react	6.89	-2.96	1.48	1.63	-1.25	4.37	2.92	-5.76
	100	react	6.36	-2.76	0.54	0.69	-1.22	3.55	1.93	-4.67
	150	react	6.33	-3.02	-0.28	-0.13	-1.19	2.66	0.90	-4.29
	200	react	6.28	-3.15	-1.17	-1.02	-1.17	2.07	0.20	-3.67
	250	react	5.82	-2.66	-2.92	-2.76	-1.15	2.52	0.57	-1.32

MTD	max TDS	state	pH	pe	Aragonite	Calcite	Chalcedony	Chamosite-7A	Clinochlore-14A	Cordierite_anhyd
	26/06/2003	i_soln	6.44	-0.75	-0.88	-0.73	0.12			
	25.9	react	7.65	-3.59	1.90	2.04	-1.27	4.39	3.03	-7.28
	50	react	6.97	-3.07	1.30	1.44	-1.25	4.33	2.87	-5.85
	100	react	6.44	-2.88	0.28	0.42	-1.22	3.60	1.98	-4.58
	150	react	6.40	-3.12	-0.56	-0.41	-1.19	2.74	0.98	-4.13
	200	react	6.39	-3.32	-1.37	-1.21	-1.17	2.07	0.21	-3.67
	250	react	6.34	-3.36	-2.29	-2.13	-1.15	1.70	-0.26	-2.96

S/C	max TDS	state	pH	pe	Aragonite	Calcite	Chalcedony	Chamosite-7A	Clinochlore-14A	Cordierite_anhyd
	09/07/2003	i_soln	6.09	0.05	-0.87	-0.72	0.41			
	16.6	react	8.29	-4.22	2.47	2.62	-1.28	3.73	2.40	-9.28
	50	react	6.83	-2.88	1.10	1.24	-1.25	4.66	3.21	-5.18
	100	react	6.11	-2.45	-0.24	-0.10	-1.22	4.31	2.68	-3.17
	150	react	5.83	-2.36	-1.57	-1.42	-1.19	3.91	2.15	-1.78
	200	react	5.37	-1.97	-3.34	-3.19	-1.17	4.14	2.27	0.47
	250	react	4.92	-1.57	-5.08	-4.92	-1.15	4.52	2.57	2.69

SD	max TDS	state	pH	pe	Aragonite	Calcite	Chalcedony	Chamosite-7A	Clinochlore-14A	Cordierite_anhyd
	23/07/2002	i_soln	8.29	-4.22	0.53	0.68	-0.07			
	29.6	react	8.07	-4.18	1.07	1.21	-1.27	3.84	2.47	-8.13
	50	react	7.76	-4.05	0.73	0.87	-1.25	3.39	1.94	-7.71
	100	react	7.67	-4.38	-0.02	0.13	-1.22	2.06	0.44	-7.66
	150	react	7.87	-4.91	-0.44	-0.29	-1.19	0.69	-1.07	-8.22
	200	react	7.99	-5.23	-0.73	-0.58	-1.17	-0.28	-2.15	-8.38
	250	react	7.89	-5.20	-1.22	-1.06	-1.15	-0.59	-2.54	-7.53

SA	max TDS	state	pH	pe	Aragonite	Calcite	Chalcedony	Chamosite-7A	Clinochlore-14A	Cordierite_anhyd
	21/07/2003	i_soln	5.82	0.64	-1.02	-0.87	0.34			
	22.6	react	7.89	-3.84	1.85	2.00	-1.27	4.24	2.89	-7.82
	50	react	6.83	-2.91	0.64	0.79	-1.25	4.95	3.50	-4.59
	100	react	6.02	-2.42	-0.98	-0.83	-1.22	4.90	3.27	-1.99
	150	react	5.55	-2.16	-2.68	-2.53	-1.19	4.87	3.11	0.14
	200	react	5.10	-1.81	-4.43	-4.27	-1.17	5.05	3.18	2.28
	250	react	4.96	-1.74	-5.53	-5.37	-1.15	4.79	2.84	3.22

SG	max TDS	state	pH	pe	Aragonite	Calcite	Chalcedony	Chamosite-7A	Clinochlore-14A	Cordierite_anhyd
	26/06/2003	i_soln	5.92	0.48	-0.98	-0.83	0.16			
	21.5	react	7.98	-3.93	1.79	1.94	-1.27	4.20	2.85	-7.98
	50	react	6.83	-2.89	0.43	0.58	-1.25	5.08	3.63	-4.34
	100	react	6.00	-2.32	-1.29	-1.14	-1.22	5.13	3.50	-1.54
	150	react	5.43	-1.91	-3.16	-3.01	-1.19	5.27	3.51	0.94
	200	react	4.95	-1.53	-4.94	-4.79	-1.17	5.47	3.61	3.13
	250	react	4.80	-1.45	-6.02	-5.86	-1.15	5.20	3.24	4.04

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.10 (indices de saturation eaux minérales - 50 à 250°C)

CH	CO2(g)	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Hematite	Illite	Kaolinite
09/04/2003	-1.13	0.36	-1.50	-5.93		2.50	-2.75	5.95		
5.1	-3.39	-1.58	2.96	-4.13	3.26	0.30	-1.42	1.53	3.46	5.13
50	-1.31	-1.50	1.35	-3.77	3.78	0.27	-3.14	1.64	4.64	6.39
100	-0.42	-1.42	-1.05	-3.42	3.57	0.02	-4.61	1.40	4.47	6.01
150	-0.15	-1.36	-3.59	-3.17	3.41	-0.24	-5.51	1.28	4.23	5.56
200	-0.15	-1.31	-5.90	-2.99	3.28	-0.50	-6.00	1.24	3.96	5.07
250	-0.23	-1.27	-7.51	-2.84	3.03	-0.80	-6.04	1.22	3.40	4.25

MGT	CO2(g)	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Hematite	Illite	Kaolinite
23/07/2002	-0.26	0.16	1.08				-2.83			
16.7	-2.00	-1.57	5.28	-4.08	3.18	0.41	-0.55	1.77	3.36	4.99
50	-0.36	-1.50	4.38	-3.77	3.22	0.36	-1.43	1.80	3.69	5.26
100	0.40	-1.42	2.65	-3.42	2.53	0.06	-2.25	1.48	2.71	3.94
150	0.64	-1.36	0.91	-3.17	1.95	-0.30	-3.07	1.15	1.75	2.64
200	0.73	-1.31	-0.79	-2.99	1.61	-0.65	-3.70	0.94	1.12	1.73
250	0.71	-1.27	-3.29	-2.84	1.85	-0.85	-4.04	1.12	1.40	1.90

MTD	CO2(g)	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Hematite	Illite	Kaolinite
23/07/2002	-0.32	-0.15	-0.32				-3.55			
26.3	-1.41	-1.55	4.68	-3.98	3.44	0.43	-1.10	1.84	3.90	5.59
50	-0.59	-1.50	3.97	-3.77	3.19	0.33	-1.58	1.75	3.65	5.22
100	0.18	-1.42	2.17	-3.42	2.56	0.03	-2.51	1.42	2.75	3.98
150	0.44	-1.36	0.43	-3.17	1.99	-0.34	-3.37	1.08	1.82	2.72
200	0.54	-1.31	-1.18	-2.99	1.61	-0.70	-4.07	0.84	1.12	1.74
250	0.51	-1.27	-2.85	-2.84	1.44	-1.03	-4.47	0.76	0.70	1.07

S/C	CO2(g)	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Hematite	Illite	Kaolinite
18/02/2003	-0.23	0.12	-0.21	-7.63		-1.09	-2.21	-1.23		
15.4	-2.13	-1.57	4.93	-4.08	3.20	0.40	-0.67	1.75	3.41	5.05
50	-0.45	-1.50	3.91	-3.77	3.36	0.37	-1.63	1.83	3.94	5.55
100	0.36	-1.42	1.83	-3.42	2.91	0.12	-2.54	1.62	3.34	4.69
150	0.60	-1.36	-0.42	-3.17	2.58	-0.15	-3.21	1.46	2.81	3.89
200	0.63	-1.31	-3.07	-2.99	2.65	-0.38	-3.92	1.47	2.88	3.80
250	0.55	-1.27	-5.61	-2.84	2.86	-0.66	-4.72	1.49	3.10	3.90

SD	CO2(g)	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Hematite	Illite	Kaolinite
26/03/2002	-2.71	-0.34	1.37				-2.82			
29.9	-2.54	-1.54	2.56	-3.95	3.13	0.27	-1.65	1.53	3.40	4.99
50	-2.09	-1.50	1.89	-3.77	2.73	0.14	-1.96	1.37	2.86	4.29
100	-1.66	-1.42	0.03	-3.42	1.79	-0.25	-2.89	0.88	1.44	2.45
150	-1.49	-1.36	-1.37	-3.17	0.97	-0.65	-3.53	0.45	0.08	0.68
200	-1.18	-1.31	-2.27	-2.99	0.44	-1.02	-3.94	0.20	-0.88	-0.62
250	-0.70	-1.27	-2.99	-2.84	0.30	-1.33	-4.26	0.17	-1.24	-1.21

SA	CO2(g)	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Hematite	Illite	Kaolinite
17/10/2002	-0.26	0.06	-0.89				-2.57			
18.5	-1.83	-1.56	4.36	-4.02	3.39	0.40	-1.14	1.78	3.79	5.48
50	-0.61	-1.50	3.28	-3.77	3.51	0.34	-2.13	1.77	4.18	5.85
100	0.21	-1.42	0.95	-3.42	3.20	0.06	-3.55	1.50	3.85	5.28
150	0.45	-1.36	-1.68	-3.17	3.06	-0.23	-4.74	1.30	3.63	4.86
200	0.45	-1.31	-4.33	-2.99	3.10	-0.49	-5.57	1.26	3.65	4.71
250	0.37	-1.27	-6.23	-2.84	2.99	-0.79	-5.85	1.25	3.33	4.17

SG	CO2(g)	Cristobalite(alpha)	Dolomite	Fe(OH)2	Gibbsite	Goethite	Gypsum	Hematite	Illite	Kaolinite
17/10/2002	-0.38	-0.12	-0.58				-1.97			
18.3	-2.00	-1.56	4.17	-4.03	3.38	0.40	-1.12	1.77	3.77	5.45
50	-0.70	-1.50	2.99	-3.77	3.57	0.36	-2.09	1.82	4.29	5.97
100	0.14	-1.42	0.56	-3.42	3.32	0.14	-3.23	1.65	4.04	5.51
150	0.37	-1.36	-2.25	-3.17	3.26	-0.10	-4.21	1.56	3.97	5.26
200	0.36	-1.31	-4.93	-2.99	3.31	-0.36	-5.07	1.52	4.01	5.13
250	0.28	-1.27	-6.82	-2.84	3.19	-0.66	-5.35	1.51	3.68	4.57

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.10 (indices de saturation eaux minérales - 50 à 250°C)

CH	Montmor	Muscovite	SiO2(am)
09/04/2003			-0.46
5.1	1.88	7.06	-2.39
50	2.78	8.36	-2.12
100	2.54	8.07	-1.89
150	2.26	7.72	-1.74
200	1.97	7.31	-1.62
250	1.46	6.56	-1.51

MGT	Montmor	Muscovite	SiO2(am)
23/07/2002			-0.62
16.7	1.78	6.93	-2.35
50	1.98	7.24	-2.12
100	1.06	6.00	-1.89
150	0.19	4.80	-1.74
200	-0.40	3.97	-1.62
250	-0.21	4.21	-1.51

MTD	Montmor	Muscovite	SiO2(am)
23/07/2002			-0.88
26.3	2.21	7.53	-2.28
50	1.95	7.20	-2.12
100	1.10	6.04	-1.89
150	0.24	4.87	-1.74
200	-0.40	3.97	-1.62
250	-0.80	3.39	-1.51

S/C	Montmor	Muscovite	SiO2(am)
18/02/2003			-0.66
15.4	1.82	6.99	-2.35
50	2.19	7.53	-2.12
100	1.60	6.75	-1.89
150	1.08	6.05	-1.74
200	1.07	6.04	-1.62
250	1.21	6.22	-1.51

SD	Montmor	Muscovite	SiO2(am)
26/03/2002			-1.05
29.9	1.78	6.94	-2.25
50	1.29	6.26	-2.12
100	0.00	4.51	-1.89
150	-1.21	2.83	-1.74
200	-2.07	1.62	-1.62
250	-2.42	1.11	-1.51

SA	Montmor	Muscovite	SiO2(am)
17/10/2002			-0.69
18.5	2.13	7.42	-2.30
50	2.40	7.82	-2.12
100	2.02	7.34	-1.89
150	1.76	7.01	-1.74
200	1.71	6.95	-1.62
250	1.40	6.48	-1.51

SG	Montmor	Muscovite	SiO2(am)
17/10/2002			-0.88
18.3	2.11	7.39	-2.31
50	2.49	7.95	-2.12
100	2.18	7.57	-1.89
150	2.05	7.41	-1.74
200	2.02	7.37	-1.62
250	1.69	6.89	-1.51

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.11 (températures calculées par géothermométrie)

	CH		MGT		MTD		S/C		SD		SA		SG				
thermomètre	**min**	**max**	**min**	**max**	**min**	**max**	**min**	**max**	**min**	**max**	**min**	**max**	**min**	**max**	**référence**	**gamme T**	**unité**
silice amorphe	**-60**	**-50**	**-57**	**-52**	**-67**	**-63**	**-63**	**-57**	**-87**	**-72**	**-60**	**-55**	**-72**	**-65**	**Fournier 1977**	**0-250**	
silice amorphe	-63		-47		-58		-53		-70		-49		-61		Fournier, 1977	0-250	mol/l
silice amorphe	-42		-43		-55		-50		-67		-46		-58		Michard, 1979	0-250	mol/l
silice	68		67		52		59		36		64		48		Fournier et Potter, 1979	20-330	ppm
silice (<295ppm)	68		67		52		59		35		64		48		Fournier et Potter, Verma	20-210	ppm
cristobalite alpha	**1**	**13**	**5**	**11**	**-7**	**-2**	**-2**	**6**	**-31**	**-12**	**2**	**8**	**-13**	**-4**	**Fournier 1977**	**0-250**	
cristobalite alpha	18		17		4		10		-10		15		0		Fournier, 1977	0-250	ppm
calcédoine	**17**	**30**	**21**	**28**	**9**	**14**	**13**	**22**	**-17**	**3**	**18**	**25**	**2**	**12**	**Fournier 1977**	**0-250**	
calcédoine	36		35		20		27		5		32		16		Fournier, 1977	0-250	ppm
quartz	**50**	**62**	**54**	**60**	**41**	**46**	**46**	**55**	**16**	**35**	**50**	**57**	**35**	**44**	**Fournier 1977**	**0-250**	
Quartz, pas de perte de vapeur	68		67		53		59		37		64		49		Fournier, 1977	0-250	ppm
quartz, perte vapeur	**57**	**68**	**60**	**66**	**49**	**53**	**53**	**61**	**26**	**44**	**57**	**63**	**43**	**52**	**Fournier 1977**	**0-250**	
Quartz, perte de vapeur max à 100°C	73		72		59		65		46		69		56		Fournier, 1977	0-250	ppm
K/Mg	**56**	**69**	**39**	**40**	**41**	**47**	**33**	**36**	**14**	**22**	**46**	**48**	**61**	**83**	**Giggenbach 1983**		
K/Mg	62		39		44		34		19		47		66		Giggenbach et al, 1983	50-300	ppm
Mg/K^2	40		98		62		111		94		75		43		Giggenbach et al, 1983	50-300	ppm
Sr/K^2	86		198		95		256		114		143		100		Michard, 1990		mol/kg H2O
Mg/Li	**28**	**28**	**110**	**118**	**137**	**141**	**108**	**111**	**124**	**151**	**86**	**90**	**58**	**62**	**Kharaka 1989**	**0-350**	
Mg/Li	190		260		312		258		358		242		211		Kharaka et Mariner, 1989	30-350	mol/l
Mg/Li	36		112		133		108		128		90		65		Kharaka et Mariner, 1989	30-350	ppm
Na/Li	**322**	**322**	**235**	**253**	**229**	**245**	**257**	**273**	**209**	**214**	**277**	**297**	**252**	**257**	**Kharaka 1989**	**0-350**	
Na/Li Cl<10000ppm	**219**	**219**	**128**	**147**	**123**	**139**	**151**	**167**	**103**	**108**	**171**	**191**	**146**	**150**	**Fouillac 1981**		
Na/Li (Cl<0.3mol/l)	298		192		188		218		152		241		204		Fouillac et Michard, 1981		mol/kg H2O
Na/Li (Cl<0.3mol/l)	219		139		135		158		107		177		148		Fouillac et Michard, 1981		ppm
Na/Li (Cl<0.3mol/l)	306		202		197		227		162		250		214		Fouillac et Michard, Verma		mol/kg H2O
Na/Li	304		200		195		225		160		249		212		Michard, 1990		mol/kg H2O
Na/Li	322		245		241		265		213		282		254		Kharaka, 1989		ppm
Na/K	**329**	**623**	**161**	**189**	**-5**	**26**	**280**	**335**	**51**	**110**	**212**	**246**	**29**	**172**	**Fournier 1973**		
Na/K	**318**	**563**	**167**	**192**	**7**	**37**	**275**	**323**	**62**	**119**	**214**	**244**	**41**	**177**	**Truesdell 1976**	**100-275**	
Na/K	438		184		30		296		88		227		143		Truesdell, 1975	T>120	ppm
Na/K	**347**	**526**	**219**	**242**	**63**	**94**	**312**	**352**	**119**	**174**	**261**	**287**	**98**	**228**	**Fournier et Potter**		
Na/K	436		234		87		330		145		272		196		Fournier et Potter, 1979		ppm
Na/K	**314**	**464**	**200**	**220**	**58**	**87**	**283**	**317**	**110**	**160**	**238**	**261**	**90**	**209**	**Fournier 1979**	**100-275**	
Na/K	388		213		79		298		133		247		179		Fournier, 1979		mol/l
Na/K	389		214		80		298		133		247		179		Fournier, 1979		ppm
Na/K	381		217		87		297		139		249		184		Fournier, Verma		ppm
Na/K	437		194		40		303		99		235		153		Michard, 1979		mol/l
Na/K	310		166		50		236		97		194		136		Michard, 1990		mol/kg H2O
Na/K/Ca (β=1/3)	**170**	**228**	**190**	**199**	**86**	**110**	**233**	**258**	**120**	**153**	**179**	**190**	**25**	**155**	**Fournier 1979**	**100-350**	
Na-K-Ca (β=1/3)	200		196		102		244		135		184		137		Fournier et Truesdell, 1973	4-340	ppm
Na-K-Ca corr eau riche CO_2	294														Paces, 1975		mol/kg H2O
Na/K/Ca Mg corr	**28**	**36**	**20**	**27**	**37**	**46**	**35**	**48**	**122**	**137**	**53**	**56**	**18**	**30**	**Fournier 1979**	**100-350**	

Tab. A.11 : températures calculées par les géothermomètres à silice et les géothermomètres à cations; les valeurs en gras correspondent aux valeurs minimale et maximale calculées pour les différents échantillons prélevés (calcul en utilisant Aquachem) ; les autres valeurs sont calculées à partir de la composition chimique moyenne de chaque source (formules initiales des thermomètres)

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.12 (températures calculées par géothermométrie - forage Montrond 1)

thermomètre	Mon1-3.5	Mon1-22	Mon1-25	Mon1-43	Mon1-46	Mon1-172	Mon1-186	Mon1-192	Mon1-198	référence	gamme de T	unité
K/Mg	**52**	**52**	**52**	**41**	**39**	**37**	**34**	**36**	**37**	**Giggenbach 1983**		
K/Mg	61	60	56	57	57	67	69	68	40	Giggenbach et al, 1983	50-300	ppm
Mg/K²	42	44	49	48	48	31	28	30	97	Giggenbach et al, 1983	50-300	ppm
Na/K	**207**	**47**	**40**	**-11**	**-9**	**94**	**10**	**-19**	**-17**	**Fournier 1973**		
Na/K	233	106	100	52	54	146	72	44	45	Fournier, 1979		mol/l
Na/K	236	113	107	60	61	152	80	52	53	Fournier, Verma		ppm
Na/K	257	116	109	57	59	159	79	49	50	Fournier et Potter, 1979		ppm
Na/K	218	69	62	11	13	113	33	3	5	Michard, 1979		mol/l
Na/K	183	74	68	26	28	108	44	19	20	Michard, 1990		mol/kg H2O
Na/K	**209**	**59**	**52**	**2**	**3**	**103**	**22**	**-7**	**-5**	**Truesdell 1976**	**100-275**	
Na/K	209	58	52	1	3	103	22	-7	-5	Truesdell, 1975	T>120	ppm
Na/K	**257**	**116**	**109**	**57**	**59**	**159**	**79**	**49**	**50**	**Fournier et Potter**		
Na/K	**234**	**106**	**100**	**52**	**54**	**146**	**72**	**44**	**45**	**Fournier 1979**	**100-275**	
Na/K/Ca	**155**	**102**	**61**	**76**	**79**	**163**	**104**	**78**	**79**	**Fournier 1979**	**100-350**	
Na-K-Ca	155	102	100	76	79	162	104	78	78	Fournier et Truesdell, 1973	4-340	ppm
Na/K/Ca Mg corr	**75**	**35**		**59**	**56**		**37**	**64**	**62**	**Fournier 1979**	**100-350**	

Tab. A.12 : températures calculées par les géothermomètres à cations pour le forage Montrond1; les valeurs en gras correspondent aux valeurs calculées en utilisant Aquachem; les autres valeurs sont calculées à partir des formules initiales des thermomètres

ANNEXES CHAP 4: Fig. A.6 (variations rapports O,H en fonction de T)

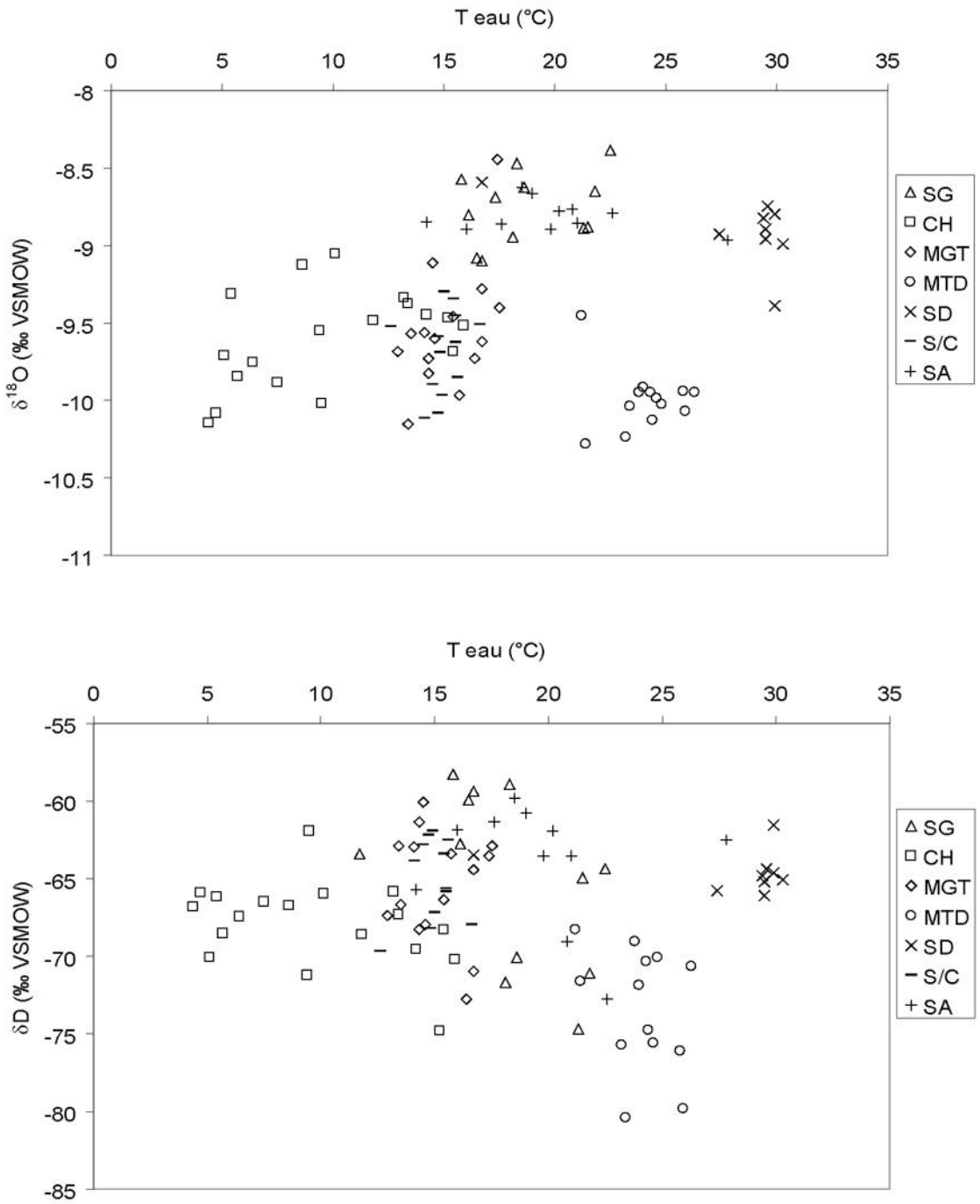


Fig. A.6.1 : variations de $\delta^{18}O$ et δD des eaux minérales en fonction de la température de la source (°C) lors de l'échantillonnage.

ANNEXES CHAP 4: Fig. A.6 (variations rapports O,H en fonction de T)

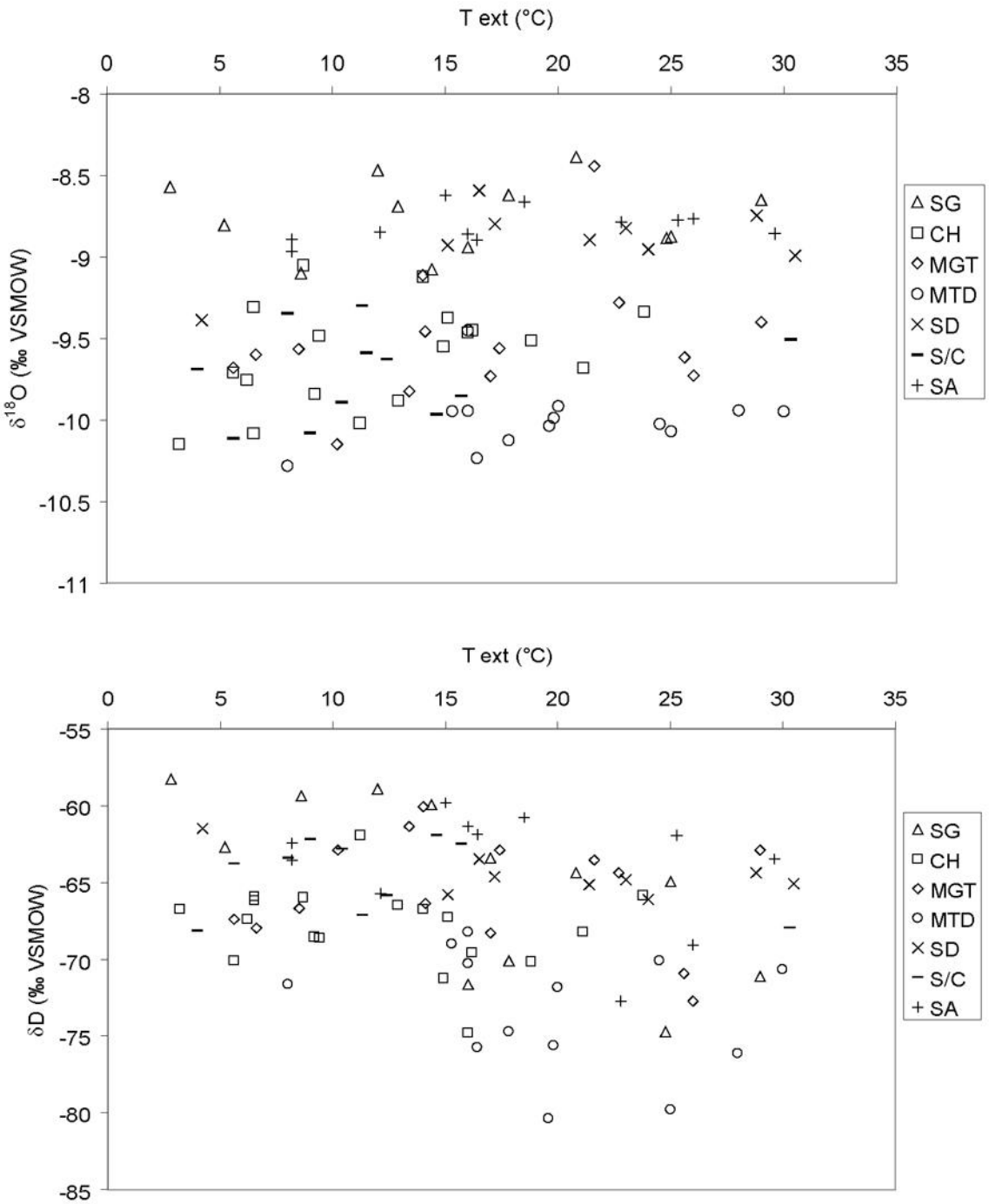


Fig. A.6.2 : variations de $\delta^{18}O$ et δD des eaux minérales en fonction de la température extérieure (°C) lors de l'échantillonnage.

ANNEXES CHAP 4 : calcul des âges carbone 14

Datation au carbone 14

De nombreux modèles de datation des eaux en utilisant l'activité en carbone 14 de l'échantillon (mesurée en pourcentage de carbone moderne pCM sur un précipité de carbonate de baryum) peuvent être employés. Dans cette étude, il est fait appel aux modèles suivants :

- **"âge maximum"** : c'est l'emploi le plus simple possible de l'équation de désintégration radioactive du 14C ; l'âge t est alors :

$$t = \frac{5730}{\ln 2} \times \ln\left(\frac{A0}{Amesurée}\right) = 8266 \times \ln\left(\frac{A0}{Amesurée}\right)$$

  A_0 est l'activité initiale de l'échantillon, soit 100 pCM en moyenne. $A_{mesurée}$ est l'activité de l'échantillon déterminée par comptage à scintillation. La demi-vie utilisée dans le calcul (5730 ans) est celle de Godwin (1962).

Les âges calculés de cette manière représentent les temps de trajet maximum de l'eau en profondeur. Ils supposent que cette eau ne subit aucune modification depuis sa soustraction à l'atmosphère. Il existe quantité de facteurs pouvant altérer la teneur initiale en carbone 14, la composition isotopique en carbone 13 : mélanges, interactions dans le sol, dans l'aquifère…. Pour essayer d'en tenir compte, il est fait appel aux modèles suivants pour recalculer l'activité initiale A_0 :

- **modèle de Tamers (1960, in Jones, 2000)** :
  modèle de mélange chimique, dans lequel 50% des carbonates proviennent du CO_2 du sol et 50% des minéraux (HCO_3 à carbone minéral donc activité nulle). Il est basé sur un mélange du type :

$$CO_2\,(g) + H_20 + XCO_3 \Rightarrow X^{2+} + 2HCO_3^{-} \text{ où } X = Ca^{2+} \text{ par exemple}$$

  A_0 s'exprime alors comme suit :

$$A_0 = \frac{mCO2 + 0{,}5mHCO3}{mCO2 + mHCO3} \times A_{gaz}$$

  avec m = concentration molaire et A_{gaz} = activité ^{14}C du CO_2 du sol.

- **modèle de Pearson (Carrillo-Rivera, 1992 & Jones, 2000)** :
  modèle de mélange isotopique qui calcule l'activité initiale sur la base des rapports isotopiques $\delta^{13}C$ de chaque espèce carbonée présente. Cette distinction vient de la différence de fractionnement entre ^{14}C et ^{13}C, alors que leurs comportements chimiques sont identiques. Avec m = minéral carbonaté et g = gaz du sol, il vient :

$$A_0 = \frac{\delta s - \delta m}{\delta g - \delta m} \times (A_g - A_m) + A_m$$

- **modèle à correction statistique (EIH, 2000)** :
  ici est inclus un terme correctif égal à 0,7, et appliqué à l'activité initiale de l'atmosphère (A_{atmo}). Cette correction s'applique majoritairement en système à aquifères carbonatés :

$$t = -8266 \times \ln\left(\frac{ADIC}{q \times Aatmo}\right)$$

- **modèle à correction d'alcalinité (EIH, 2000)** :
  ici le facteur de dilution à appliquer est basé sur le pH de l'eau et la distribution des espèces carbonatées dans cette eau. En effet, la connaissance de la première constante

de dissociation de l'eau K_1 permet de déterminer le nombre de moles de H_2CO_3 en solution, celui de HCO_3^- étant directement issu des déterminations de l'alcalinité :

$$K_1 = 10^{-pH} = \frac{mHCO3 \times mH+}{mH2CO3}$$

alors le terme correctif à appliquer à A_0 est :

$$q_{alc} = \frac{mH2CO3+0,5mHCO3}{mH2CO3+mHCO3}$$

- **<u>modèle en système mixte ouvert puis fermé (EIH, 2000)</u>** :

la première étape considère le système comme ouvert. On calcule un $\delta^{13}C_{DIC}$ à partir du pH de l'eau et du $\delta^{13}C_{sol}$. A pH<8,4, en système ouvert et sous régime de dissolution des carbonates, l'échange isotopique avec le CO_2 du sol est prépondérant (par rapport à l'échange avec les carbonates), les espèces prépondérantes sont donc CO_2(aq) et HCO_3. Alors :

$$mHCO_3/mCO_2 = K_1/(10^{-pH}) \text{ et } mCO_2+mHCO_3=1$$

il vient :

$\delta^{13}C_{DIC\text{-}calculé} = mCO_2\ [\delta^{13}C_{CO2} + \varepsilon(CO_{2(aq)}\text{-}CO_{2(g)})] + mHCO_3\ [\delta^{13}C_{CO2} + \varepsilon(HCO_{3(aq)}\text{-}CO_{2(g)})]$

le facteur correctif q étant alors :

$$q = (\delta^{13}C_{DIC} - \delta^{13}C_{carbonates}) / (\delta^{13}C_{DIC\text{-}calculé} - \delta^{13}C_{carbonates})$$

- **<u>modèle de Fontes et Garnier (1979)</u>** :

modèle basé sur la dissolution de carbonates et les échanges d'espèces chimiques pouvant s'ensuivre. La première étape est le calcul de la contribution des carbonates à partir des données chimiques :

$$m_{DICcarbonate} = m_{Ca} + m_{Mg} - m_{SO4} + 0,5(m_{Na} + M_K - m_{Cl})$$

En second lieu, il faut calculer l'influence de ces échanges avec le CO_2 du sol en système ouvert :

$$m_{DIC_{CO_2\text{-}ech}} = \frac{\delta^{13}C_{DIC} \times m_{DIC} - \delta^{13}C_{carb} \times m_{DICcarb} - \delta^{13}C_{sol}(m_{DIC} - m_{DICcarb})}{\delta^{13}C_{sol} - \varepsilon^{13}C_{CO_2\text{-}CaCO_3} - \delta^{13}C_{carb}}$$

Le facteur de dilution est alors obtenu comme suit :

$$q = \frac{m_{DIC} - m_{DICcarb} + m_{DIC_{CO_2\text{-}ech}}}{m_{DIC}}$$

l'âge est alors calculé selon :

$$t = -8266 \times \ln\left(\frac{Amesurée}{q \times 100}\right)$$

ANNEXES CHAP 4 : Tab. A.13 : âges carbone 14

SOURCES MINERALES

modèle (âge BP)	CH age +CO_2	CH age -CO_2	MGT age +CO_2	MGT age -CO_2	MTD age +CO_2	S/C age +CO_2	SD	SA age +CO_2	St-Rambert	
extrême	25130	23270	26860	21680	20540	25620	7950	22060	900	application directe formule décroissante radioactive
Tamers	19660	17790	21380	16200	15070	20140	2480	16590	<0	act. ini. = 100pCM; 30ppm CO_2 dans le sol
Tamers	20815	18949	21326	16147	15148	20186	3283	16771	<0	act. ini. = 100pCM; 57ppm CO_2 dans le sol (Rochetaillée)
Tamers	23320	21460	21990	16820	16290	21220	5320	18130	<0	act. ini. = 100pCM; 300ppm CO_2 dans le sol
Tamers	24109	22244	23054	17875	17488	22401	6585	19416	408	act. ini. = 100pCM; 820ppm CO_2 dans le sol (Barbanche)
Tamers	24880	23010	24770	19590	19240	24170	7500	21020	750	act. ini. = 100pCM; 3000ppm CO_2 dans le sol
Tamers	23880	22120	23870	18690	18340	23270	6600	20120	<0	act. ini. = StRambert ; 3000ppm CO_2 dans le sol
Pearson	9900	8040	10170	4990	6660	11620	1540	8440	<0	calcite = 0‰; CO_2 = -25‰; act gaz = 100; act calcite = 0pMC
Pearson	14700	12830	16420	11240	10110	15180	<0	11630	<0	calcite = 0‰; CO_2 = -17‰; act gaz = 100; act calcite = 0pMC
corr stat	22190	20320	23910	18730	17600	22670	5010	19120	<0	facteur de correction de l'activité = 0,7
alc corr	24490	22620	23900	18720	17040	24110	2490	20820	<0	K_1 déterminé par Alkalinity Calculator (USGS)
sys mixte	10040	8170	12030	6850	8570	12380	4330	8960	560	utilise alc corr + 0‰, -25‰, ^{13}C mesuré
Fontes et Garnier	20290	18420	23990	18810	imp.	24070	imp.	17620	imp.	en utilisant les proportions en majeurs sur calcites du bassin
Fontes et Garnier	24480	22610	26370	21190	18140	25350	1050	21420	imp.	en utilisant les proportions en majeurs sur dolostones du bassin
si sys ouvert : $\delta^{13}C$	*-24.6*		*-20*		*-19.8*	*-22.8*	*-17.8*	*-23.5*	*-17*	
$\delta^{13}C$ mesuré	*-4*		*-3.3*		*-4.7*	*-4.6*	*-11.5*	*-4.8*	*-16.3*	

FORAGE

modèle (âge BP)	Mon1 39m		Mon1 186m	Mon1 192m	Mon1 198m	
extrême	23980		25630	24130	23260	application directe formule décroissante radioactive
Tamers	19050		20220	18680	17810	act. ini. = 100pCM; 30ppm CO_2 dans le sol
Tamers	19594		20466	18905	18038	act. ini. = 100pCM; 57ppm CO_2 dans le sol (quantité calculée à Rochetaillée)
					17614	*act. ini. = 95pCM; 57ppm CO_2 dans le sol (quantité calculée à Rochetaillée)*
					18441	*act. ini. = 105pCM; 57ppm CO_2 dans le sol (quantité calculée à Rochetaillée)*
Tamers	21770		21980	20320	19460	act. ini. = 100pCM; 300ppm CO_2 dans le sol
Tamers	22899		23371	21711	20852	act. ini. = 100pCM; 820ppm CO_2 dans le sol (quantité calculée à Barbanche)
Tamers	23630		24760	23170	22300	act. ini. = 100pCM; 3000ppm CO_2 dans le sol
Tamers	22730		23860	22270	21400	act. ini. = StRambert ; 3000ppm CO_2 dans le sol
Pearson	11280		13710	11210	10760	calcite = 0‰; CO_2 = -25‰; act gaz = 100; act calcite = 0pMC (Fontes et Garnier, 1979)
Pearson	9760	calcite = -1.1‰	11160	8140	7910	calcite = -1.9‰; CO_2 = -25‰; act gaz = 100; act calcite = 0pMC (Fontes et Garnier, 1979)
Pearson	14470		16900	14400	13940	calcite = 0‰; CO_2 = -17‰; act gaz = 100; act calcite = 0pMC (Fontes, 1978)
corr stat	21030		22690	21180	20310	facteur de correction de l'activité = 0,7
alc corr	18260		19940	18430	17560	K_1 fixé à -6.3 (sa variation n'entraîne que des écarts mineurs)
sys mixte	15070		16970	14480	14030	utilise alc corr + 0‰, -25‰, ^{13}C mesuré, K_1 fixé à -6.3
sys mixte	13770	utilise alc corr -1.1‰	14750	11740	11520	utilise alc corr -1.9‰, -25‰, ^{13}C mesuré, K_1 fixé à -6.3
Fontes et Garnier	imp.		imp.	imp.	imp.	en utilisant les proportions en majeurs sur calcites du bassin
si sys ouvert : $\delta^{13}C$	*-16.8*		*-16.8*	*-16.9*	*-15.8*	
$\delta^{13}C$ mesuré	*-5.4*		*-5.9*	*-5.2*	*-5.5*	

Résumé

Ce travail est basé sur l'étude d'un continuum eau de pluie – eau de surface – eau minérale, en utilisant différents outils chimiques et géochimiques. La zone d'étude se situe en bordure Est du Massif Central Français. Elle comprend des entités géographiques et géologiques variées (complexe granito-gneissique et cristallophyllien – Monts du Forez et du Lyonnais d'âge hercynien, graben Oligocène du Forez à venues volcaniques miocènes).

La première partie repose sur l'étude en isotopes stables (^{18}O, ^{2}H) des précipitations locales (3 points de mesures ; prélèvements journaliers sur 1 à 3 ans), dont les contenus en tritium permettent de déterminer le bruit de fond atmosphérique actuel. Les mesures ^{18}O, ^{2}H ont permis de construire une droite locale des eaux météoriques et de quantifier les gradients d'appauvrissement des rapports isotopiques en fonction de l'altitude. Ceci permet aussi de déterminer les temps de transit de l'eau dans les aquifères superficiels et de détecter la présence d'eaux récentes dans des eaux plus minéralisées. De plus, une évaluation des quantités d'eau réellement disponibles à l'infiltration (et de leur signature isotopique) a été entreprise en se basant sur différentes méthodes de calcul de l'évapotranspiration.

La seconde partie consiste en l'étude de rivières et d'aquifères peu profonds, majoritairement situés en zone d'arène granitique et connaissant des variations de débit marquées. La détermination des contenus en éléments majeurs cations et anions donne des gammes de Solides Totaux Dissous variant de 30 à 500 mg/l pour les sources, de pH acide à neutre et de faciès Na-Ca-Cl-HCO_3. Les calculs d'indice de saturation, incluant les phases minérales des sols locaux, montrent une interaction limitée avec les produits d'altération d'une matrice rocheuse granitique. Les rapports isotopiques en carbone 13 indiquent une forte proportion de matière organique dissoute. La détermination des $\delta^{18}O$ et δD permet d'envisager une recharge préférentielle en hiver ainsi que des gradients d'altitude proches de ceux enregistrés par les pluies. L'utilisation de modèles de transit souterrain de type « dispersion » permet d'estimer des temps de transit moyens de 10 à 15 mois en oxygène et 8 à 13 mois en hydrogène.

Enfin, 7 sources minérales, en contexte granitique faillé ou sédimentaire, ont également fait l'objet de prélèvements réguliers. Six d'entre elles sont carbogazeuses, deux ont un caractère thermal. Trois faciès chimiques, marquant une augmentation de la minéralisation, sont représentés : Ca-Mg-HCO_3, Na-HCO_3-Cl et Na-HCO_3. Les indices de saturation indiquent une nouvelle fois une nette interaction avec le socle. Or, les précipitations/dissolutions d'espèces minérales modifient les concentrations en cations. Dès lors, les estimations de température profonde des réservoirs (géothermomètres à cations) donnent une gamme de variation de 150 à 240°C. Les rapports isotopiques en oxygène et hydrogène sont beaucoup plus stables que ceux des eaux de surface, les eaux Na-HCO_3 ayant des deltas appauvris par rapport à leurs altitudes d'émergence. La détermination des altitudes des aires de recharge, en utilisant les gradients déterminés sur les pluies, donne des altitudes compatibles avec celles des reliefs locaux. Les signatures en carbone 13 sont influencées par la signature du CO_2 profond pour les sources carbogazeuses. Une source thermale (faciès Na-Cl-HCO_3) a des valeurs très différentes. Certaines sources du faciès Ca-Mg-HCO_3, par leur contenu en tritium, attestent de mélanges avec des eaux de surface, de faible importance cependant (^{13}C, ^{14}C). Pour l'ensemble des sources minérales, les durées maximales de temps de transit obtenues par le carbone 14 sont de l'ordre de 20000 à 25000 ans, alors que cette durée est de 8000 ans pour la source thermale précédemment mentionnée.