

## REMERCIEMENTS

C'est avec plaisir et soulagement que je tiens à remercier tous les acteurs qui de près comme de loin, ont permis la réalisation de cette étude. Mes remerciements vont tout particulièrement à :

- Martial DRAY, hydrogéologue, Maître de conférences à l'Université de Pierre et Marie Curie (Paris VI), ancien Directeur du C.R.G de Thonon-les-Bains. Sa connaissance, ces conseils, son écoute, sa relecture et sa patience m'ont été plus que précieux. Il a su m'apprendre à être rigoureux dans la rédaction et à construire un raisonnement scientifique. Il m'a permis d'entrevoir les subtilités de l'hydrogéologie isotopique alors qu'à la base, j'ai une formation de géographe. Encore merci notamment pour les nombreux ouvrages qu'il m'a transmis
- Jean-Pierre FILLION, Président du Syndicat Intercommunal des Eaux des Moises (SIEM) jusqu'en mai 2008. La possibilité qu'il m'a offert de reprendre un cursus universitaire a été un signe d'encouragement et de confiance. Encore merci
- Lucien CHESSEL, Président du Syndicat Intercommunal des Eaux des Moises à partir de mai 2008
- Jean-Paul MOILLE, conseiller régional de la région Rhône-Alpes. Son écoute, sa disponibilité et son aide m'ont été fort agréable
- Joël BAUD-GRASSET, Jean DENAIS et Frédéric ZORY, conseillers généraux
- Le comité syndical du Syndicat Intercommunal des Eaux des Moises. Leur écoute (après plus de deux heures de réunion), leurs applaudissements et les questions qu'ils m'ont posées, le vendredi 10 décembre 2010 m'ont énormément touchés
- Sylvain IRMANN et Laurent CADILHAC de l'Agence de l'Eau pour les conseils qu'ils m'ont faits part
- Jean-Philippe BOIS et Florence CARMELLE du département de la Haute-Savoie
- Karine FOREST de la région Rhône-Alpes
- Les mairies de Draillant, d'Habère-Poche, de Lullin et d'Orcier. Elles m'ont ouvert les portes de leur installation et ont su m'apporter une aide pratique quand cela était nécessaire. Un merci tout particulier est adressé à la Mairie de Lullin qui a permis l'installation de la station météorologique de Très le Mont
- Marc DZIKOWSKI, hydrogéologue et Maître de Conférences à l'Université de Savoie. Sa connaissance, ces conseils et son écoute, m'ont été très précieux. Encore merci
- Anne GUYOMARD, hydrogéologue, chargé de missions du Géoparc du Chablais. Sa connaissance, son écoute, ces conseils, sa relecture, m'ont été grandement utile
- Milanka BABIC, technicienne au laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon pour la réalisation des analyses isotopiques

- Philippe QUETIN de l'INRA de Thonon et Philippe ROUSSET de la Régie Départementale d'Assistance. Leurs connaissances respectives de la mesure des paramètres météorologiques et hydrométriques, m'ont été d'un grand secours
- Patrick LACHASSAGNE, hydrogéologue à la SAEME (Société Anonyme des Eaux Minérales d'Evian), et Abel HENRIOT, étudiant. Un grand merci à eux pour leurs accueils et la possibilité qu'ils m'ont offertes de mutualiser nos informations météorologiques
- Jean-Yves JOSNIN, hydrogéologue et Maître de Conférences à l'Université de Savoie et Stéphanie GALLINO, Docteur en hydrogéologie à l'Université de Savoie. Un grand merci à eux pour la description et la démonstration du protocole « *bicarbonates* »
- Grégory TISSIER, doctorant en hydrogéologie à l'Université de Savoie. Son écoute et ces conseils m'ont été fort utiles
- Max MICHOUUD de la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt de Haute-Savoie qui a autorisé l'installation des stations de mesures au niveau des cours d'eau
- Bernadette JORDAN de la Chambre d'Agriculture de la Haute-Savoie. Ayant appris très récemment ces problèmes de santé, je tiens par ces quelques mots à lui souhaiter un bon rétablissement
- Les Agents techniques de la Direction Départementale de l'Équipement de la Haute-Savoie. Leurs accueils et la possibilité qu'ils m'ont offertes de pouvoir installer des équipements au niveau des ponts dont ils ont la gestion
- Les agents techniques du SIEM et surtout Alain BORDET et René GILLET qui m'ont aidé et conseillé dans l'installation des équipements. Un grand merci à Alain pour m'avoir autorisé à utiliser son matériel de mesures
- Tous ceux qui par leur amitié et leur soutien, m'ont permis de m'évader ponctuellement du Forchat : Patrice, Peggy, Mila, Karoline, Jérôme, Val et Nath, Hassen, Lolo, Thomas R. et Thomas B., Gérard, Benjamin, Edouard, D'nis, Guillaume, Bruce, Céline, Zouzou et Juju, ... et tous les autres (et je sais que j'en oublie)

Je remercie également mes parents sans qui tout cela n'aurait pas été possible et surtout mon père qui m'a apporté des conseils et une aide précieuse dans l'installation des stations de mesures. Je remercie infiniment Delphine, qui partage ma vie depuis maintenant trois ans (soit toute la durée de l'étude !) et qui a su être d'une patience à toutes épreuves pour supporter mes hausses mais surtout mes baisses de moral, dont la fréquence a augmenté de manière significative au cours de la dernière année.

## RESUME

### Etude hydrogéologique du massif du Mont Forchat (Haute-Savoie, France)

#### Caractérisation du fonctionnement et de la structure des aquifères fissurés karstiques

L'étude hydrogéologique du massif du Mont Forchat en Haute-Savoie vise à :

- Améliorer la connaissance du fonctionnement et de la structure des aquifères fissurés karstiques
- Caractériser la qualité sanitaire des dix sources utilisées pour l'alimentation en eau potable
- Préciser l'impact quantitatif des prélèvements d'eau potable sur les milieux aquatiques environnants

Le protocole d'étude a été mis en œuvre sur l'année 2009 et il a reposé sur l'acquisition d'informations climatiques, météorologiques, hydrodynamiques (sur les cours d'eau et les captages d'eau potable) et hydrochimiques (sur les captages d'eau potable). Les principaux résultats de l'interprétation de ces informations sont les suivants.

L'étude climatique régionale montre que la période de suivi se caractérise par rapport aux moyennes annuelles des vingt dernières années, par une température moyenne annuelle supérieure de 0.2°C et par un déficit pluviométrique de l'ordre de 23 %. L'étude de la composition chimique des eaux de pluie (précipitations récoltées au Col du Feu et à Très le Mont), met en évidence l'influence des précipitations provenant de l'océan Atlantique, marquées par la présence des ions sodium. Les masses d'air d'origine océanique sont « *enrichies* » au cours de leur trajet par divers éléments (particulièrement le calcium, les sulfates, les nitrates et le potassium) liés à l'environnement et à l'activité humaine de la région.

L'interprétation des informations hydrodynamique a permis :

- D'estimer les surfaces d'alimentations et de préciser les volumes de tarissement (ou de réserves) des captages d'eau potable
- D'émettre des hypothèses sur la structure et le fonctionnement des systèmes hydrogéologiques alimentant les captages d'eau potable. Ces hypothèses concernent le fonctionnement fissuré et/ou karstique, la mise en fonctionnement de trop plein en période de crue, l'apport d'une réserve issue d'un cycle antérieur ou encore la constitution d'une réserve
- De réaliser une étude comparative entre les prélèvements d'eau potable et le débit des cours d'eau. Cette étude montre que les débits prélevés sont inférieurs aux débits mesurés des cours d'eau sauf sur le bassin versant des Moises. Sur ce bassin versant, l'estimation du débit minimal du cours d'eau (au sens de l'article L. 214-18 du code de l'environnement) met en évidence entre 8 jours (scénario optimiste) et 38 jours (scénario pessimiste) durant lesquelles le débit du cours d'eau est inférieur au débit

minimal estimé. Néanmoins, ces résultats sont à nuancer du fait de la distance séparant les sources à la station de mesures du débit du cours d'eau, du fait que le débit minimal a été calculé à partir des informations d'un cycle hydrologique et du fait de la densité de drainage (deux fois plus faible que le bassin versant du Pamphiot et que le bassin versant de la Menoge)

L'interprétation des informations hydrochimiques a permis :

- De déterminer les faciès chimiques et de caractériser les phénomènes de mélange en précisant l'origine du calcium
- De préciser l'état de saturation vis-à-vis de la calcite et de la dolomie
- D'estimer le temps moyen de séjour, l'altitude préférentielle du bassin d'alimentation et la participation moyenne de la zone saturée et de la zone non saturée à l'écoulement
- De caractériser l'état sanitaire des captages d'eau potable et de formuler des propositions d'actions pour limiter les contaminations microbiologiques
- De formuler des hypothèses sur le fonctionnement et la structure des systèmes hydrogéologiques alimentant les captages d'eau potable. Ces hypothèses concernent le fonctionnement fissuré et/ou karstique, le caractère ouvert ou fermé des systèmes, la prédominance des circulations profondes ou superficielles, la présence de circulations rapides à court temps de séjour,

Au final, le couplage des interprétations issues des informations hydrodynamiques et hydrochimiques a permis de réaliser des schémas conceptuels de fonctionnement des systèmes hydrogéologiques alimentant les captages d'eau potable et de proposer une délimitation des bassins d'alimentations préférentiels des captages d'eau potable.

**Mots clés :** *Aquifère fissuré karstique, bassin d'alimentation, hydrodynamique, hydrochimie, isotopes, zone saturée, zone non saturée, massif du Forchat*

« *En apprenant, j'apprends à apprendre* »  
Edgar MORIN  
La connaissance de la connaissance

# SOMMAIRE

Remerciements .....	1
Résumé .....	3
Sommaire .....	6
Table des illustrations .....	11
Préambule .....	19
CHAPITRE 1. Cadre géographique, géologique et hydrogéologique .....	21
1.1. Cadre géographique.....	22
1.2. Cadre géologique .....	25
1.2.1. Contexte structural.....	25
1.2.1.1. Le Trias supérieur .....	26
1.2.1.2. Le Rhétien .....	26
1.2.1.3. L'Hettangien .....	26
1.2.1.4. Le Lias inférieur .....	26
1.2.1.5. Le Lias moyen .....	26
1.2.1.6. Le Lias supérieur et le Dogger .....	26
1.2.2. Le quaternaire.....	26
1.2.2.1. Les moraines argilo-détritiques .....	27
1.2.2.2. Les éboulis et les alluvions torrentielles .....	27
1.2.2.3. Les cours d'eau et les zones humides .....	27
1.2.3. Contexte géomorphologique .....	28
1.3. Cadre hydrogéologique .....	32
1.3.1. Hypothèses concernant l'origine des eaux captées .....	32
1.3.1.1. Le captage des Moises.....	32
1.3.1.2. Les captages d'Habère-Poche .....	33
1.3.1.3. Les captages d'Orcier .....	34
1.3.1.4. Le captage du Col du Feu .....	36
1.3.2. Etat sanitaire des ressources en eau potable .....	36
1.3.2.1. Les données issues des analyses de la DDASS .....	36
1.3.2.2. Les traçages d'essais .....	37
1.3.2.3. Les suivis bactériologiques des captages des Arces et des Granges Mamet .....	39
1.3.2.4. Etude « Origine des contaminations microbiologiques des captages des Arces et des Granges Mamet ».....	39
1.4. Problématique de l'étude.....	44
1.4.1. Problématique générale.....	44
1.4.2. La problématique de l'étude des aquifères fissurés karstiques.....	45

CHAPITRE 2. Outils de caractérisation et moyens mis en œuvre.....	50
2.1. Les principaux outils de caractérisation des aquifères fissurés karstiques.	51
2.1.1. Les outils hydrodynamiques .....	51
2.1.1.1. Bilan hydrologique.....	51
2.1.1.2. Analyse des courbes de récession.....	51
2.1.1.3. Analyse des débits classés .....	52
2.1.2. Les outils hydrogéochimiques.....	53
2.1.2.1. Principes généraux et cas des aquifères fissurés karstiques .....	53
2.1.2.2. Etude des équilibres calco-carboniques.....	54
2.1.2.3. Les isotopes de l'eau.....	56
2.1.2.4. Plan d'échantillonnage .....	57
2.1.3. Périodicité des mesures et des prélèvements.....	60
2.2. Description et équipements des captages d'eau potable .....	64
2.2.1. Description des sites.....	64
2.2.2. Centrales de mesure.....	64
2.3. Description et équipements des cours d'eau.....	65
2.3.1. Description des sites.....	65
2.3.2. Centrale de mesure .....	69
2.4. Description et équipements des stations météorologiques .....	70
 CHAPITRE 3. Interprétation des informations météorologiques et hydrodynamiques	
.....	73
3.1. Les informations climatologiques et météorologiques .....	74
3.1.1. Caractéristiques climatiques de la région Thonon – Evian .....	74
3.1.1.1. Les précipitations .....	74
3.1.1.2. Les températures et l'humidité .....	75
3.1.1.3. Les vents.....	75
3.1.2. Les informations météorologiques .....	77
3.1.2.1. Les températures .....	78
3.1.2.2. Les précipitations .....	78
3.1.2.3. Evolution de la chimie des précipitations au Col du Feu et à Très le Mont	81
3.2. Les informations hydrodynamiques.....	84
3.2.1. Les jaugeages et les courbes de tarage .....	84
3.2.1.1. Objectif et méthodes de jaugeage utilisées.....	84
3.2.1.2. Les courbes de tarage.....	84
3.2.2. Les lacunes d'informations .....	89
3.2.2.1. Les informations manquantes .....	89
3.2.2.2. Les informations biaisées.....	89
3.2.3. La reconstitution des lacunes d'informations .....	90
3.2.4. Les chroniques de débit des sources.....	91
3.2.4.1. Les sources d'Habère-Poche .....	91
3.2.4.2. Les sources d'Orcier .....	93
3.2.4.3. Les sources des Moises.....	95
3.2.4.4. Conclusions.....	98
3.3. Bilans hydrologiques .....	99
3.3.1. Estimation des coefficients d'infiltration .....	99
3.3.2. Estimation des surfaces d'alimentation des sources.....	100
3.4. Analyse des courbes de récession.....	100

3.4.1.	Résultats de la décomposition de l'hydrogramme de récession à partir de deux fonctions exponentielles .....	101
3.4.2.	Estimation des réserves de tarissement .....	105
3.5.	Analyse des débits classés .....	106
3.6.	Etude comparative entre les prélèvements d'eau potable et le débit des cours d'eau.....	112
3.6.1.	Bassin versant du Pamphiot .....	112
3.6.2.	Bassin versant des Moises .....	114
3.6.3.	Bassin versant de la Menoge.....	117
3.6.4.	Conclusions .....	120
CHAPITRE 4.	Interprétation des informations hydrochimiques, isotopiques et sanitaires .....	124
4.1.	Etude des variations de la température et de la conductivité électrique à l'exutoire.....	125
4.1.1.	Les lacunes d'informations .....	125
4.1.2.	Analyse des données.....	125
4.1.2.1.	Les sources d'Orcier et du Col du Feu .....	125
4.1.2.2.	Les sources d'Habère-Poche .....	130
4.1.2.3.	Les sources des Moises .....	134
4.1.3.	Distribution de la fréquence de la conductivité électrique .....	137
4.1.3.1.	Objectifs .....	137
4.1.3.2.	Résultats .....	138
4.1.4.	Conclusions .....	138
4.2.	Etude de la balance ionique .....	142
4.3.	Etude des variations des paramètres du suivi hydrochimique (majeurs, mineurs et élément traces).....	142
4.3.1.	Principales caractéristiques du suivi hydrochimique .....	142
4.3.2.	Etude des paramètres majeurs .....	144
4.3.2.1.	Valeurs observées.....	145
4.3.2.2.	Faciès chimique des eaux.....	160
4.3.2.3.	Caractérisation des phénomènes de mélange à l'émergence.....	162
4.3.2.4.	Conclusions de l'étude des variations des paramètres majeurs... ..	166
4.3.3.	Etude des paramètres mineurs et des éléments traces .....	168
4.3.3.1.	Les sources d'Habère-Poche .....	168
4.3.3.2.	Les sources d'Orcier et du Col du Feu .....	170
4.3.3.3.	Les sources des Moises .....	172
4.3.3.4.	Conclusions.....	174
4.3.4.	Etude des paramètres de l'équilibre calco-carbonique .....	174
4.3.4.1.	Evolution du pH, de l'oxygène dissous et du COT .....	174
4.3.4.2.	Les indices de saturation de la calcite ( $I_{SC}$ ) et de la dolomie ( $I_{SD}$ ) .....	186
4.3.4.3.	Etude de la relation $pCO_2/I_{SC}$ .....	193
4.3.4.4.	Conclusions.....	197
4.4.	Etude des variations des paramètres isotopiques.....	199
4.4.1.	Principales caractéristiques du suivi .....	199
4.4.2.	La relation à la droite météorique mondiale .....	200
4.4.3.	Altitude moyenne de recharge et temps de séjour.....	201
4.4.3.1.	Principes généraux.....	201
4.4.3.2.	Interprétation des valeurs isotopiques.....	204
4.4.3.3.	Conclusions.....	210

4.5.	Estimation de la participation des pôles de mélange à l'exutoire .....	212
4.5.1.	Principe de la méthode EMMA.....	212
4.5.2.	Caractérisation hydrochimique globale par ACP.....	212
4.5.2.1.	Objectif de l'ACP .....	212
4.5.2.2.	Résultats .....	213
4.5.3.	Choix des paramètres, détermination et caractéristiques des pôles de mélange .....	214
4.5.4.	Quantification de la participation à l'exutoire des pôles .....	217
4.5.5.	Conclusions .....	226
4.6.	Caractérisation hydrochimique par ACP .....	228
4.6.1.	Objectifs.....	228
4.6.2.	Signification des axes factoriels .....	228
4.6.3.	Diagramme des individus.....	230
4.6.4.	Conclusions .....	233
4.7.	Etude des paramètres sanitaires.....	233
4.7.1.	Caractéristiques du suivi sanitaire .....	233
4.7.2.	Valeurs observées .....	234
4.7.3.	Evolution des paramètres sanitaires .....	244
4.7.4.	Etude des paramètres sanitaires par ACP .....	256
4.7.5.	Evolution de l'activité humaine.....	262
4.7.6.	Conclusions .....	262
CHAPITRE 5. Synthèse générale, propositions de délimitation des bassins d'alimentations préférentiels et de schéma conceptuel de fonctionnement des captages d'eau potable .....		266
5.1.	Synthèse des résultats.....	268
5.1.1.	Définition de la géométrie des aquifères du Forchat.....	268
5.1.2.	Caractérisation du signal d'entrée : les données climatologiques et météorologiques .....	269
5.1.3.	Caractérisation hydrodynamique du signal de sortie .....	270
5.1.4.	Caractérisation hydrogéochimique et sanitaire du signal de sortie .....	276
5.2.	Propositions de schéma conceptuel de fonctionnement et de délimitation des bassins d'alimentations .....	285
CHAPITRE 6. Annexes .....		307
6.1	Schéma d'implantation de la station météorologique et des stations de mesures des cours d'eau .....	307
6.2	Convention de passage avec les propriétaires privés riverains des stations de mesures .....	307
6.3	Autorisation d'occuper le domaine public routier départemental et réglementation de la circulation durant les travaux .....	307
6.4	Déclaration de travaux de la station météorologique de Très le Mont.....	307
6.5	Demande d'autorisation des stations de mesures au titre de la police des eaux et de la police de la pêche.....	307
6.6	Agrément de travaux délivré au titre de la police des eaux pour l'installation de différents appareils de mesure pour l'étude de débit sur les cours d'eau.....	307
6.7	Convention d'échange des données météorologiques avec la SAEME ...	307
6.1	Schéma d'implantation de la station météorologique et des stations de mesures des cours d'eau .....	308

6.2	Convention de passage avec les propriétaires privés riverains des stations de mesures .....	316
6.3	Autorisation d'occuper le domaine public routier départemental et réglementation de la circulation durant les travaux .....	322
6.4	Déclaration de travaux de la station météorologique de Très le Mont.....	325
6.5	Demande d'autorisation des stations de mesures au titre de la police des eaux et de la police de la pêche .....	330
6.6	Agrément de travaux délivré au titre de la police des eaux pour l'installation de différents appareils de mesure pour l'étude de débit sur les cours d'eau.....	335
6.7	Convention d'échange des données météorologiques avec la SAEME ...	338
	Bibliographie sélective .....	340

## TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Localisation géographique des périmètres de protection des captages d'eau potable du massif du Mont Forchat en Haute-Savoie .....	23
Figure 2 : Carte tectonique simplifiée des Préalpes du Chablais.....	25
Figure 3 : carte des pentes du massif du Mont Forchat.....	28
Figure 4 : Aperçu en 3D du massif du Mont Forchat .....	29
Figure 5 : Aperçu géomorphologique du massif du Mont Forchat .....	31
Figure 6 : Synoptique du captage des Moises.....	32
Figure 7 : Evolution du débit moyen aux captages des Moises, entre 1995 et 2005	33
Figure 8 : Evolution de la turbidité et des coliformes totaux aux différents captages AEP du Forchat entre 1987 et 2006 .....	38
Figure 9 : Arbre de classement de la résistance aux antibiotiques des souches d'entérocoques fécaux .....	41
Figure 10 : Evolution de l'origine des contaminations microbiologiques aux captages des Arces et des Granges Mamet durant la période de suivi .....	43
Figure 11 : Représentation schématique des trois types de réservoirs et des vitesses d'écoulements dans les aquifères .....	46
Figure 12 : Modelé karstique et fonctionnement hydrogéologique .....	48
Figure 13 : Systèmes karstiques en fonction de la nature de l'impluvium .....	48
Figure 14 : Schématisation d'un système karstique .....	49
Figure 15 : Différents cas de rupture de pente de la droite représentative des débits classés.....	53
Figure 16 : Réactions chimiques eau/roche dans les aquifères carbonatés .....	55
Figure 17 : Modules mensuels moyens aux captages des Moises de Janvier 1996 à Décembre 2005.....	61
Figure 18 : Evolution de la concentration en magnésium et du débit de la Fontaine de Vaucluse au cours du cycle hydrologique .....	63
Figure 19 : Localisation des bassins versants topographiques et des exutoires du Pamphiot et des Moises .....	67
Figure 20 : Localisation des principaux bassins versants topographiques et des exutoires du bassin de la Menoge .....	68
Figure 21 : Localisation des stations météorologiques utilisées dans le cadre du suivi météorologique.....	71
Figure 22 : Principaux types de vents de la région lémanique.....	77
Figure 23 : Evolution des températures moyennes mensuelles des stations météorologiques de la région Thonon – Evian, de novembre 2008 à octobre 2009.	79
Figure 24 : Relation altitude – température moyenne annuelle des stations météorologiques de la région Thonon – Evian, de novembre 2008 à octobre 2009.	79
Figure 25 : Evolution des cumuls mensuels des précipitations des stations météorologiques de la région Thonon – Evian, de novembre 2008 à octobre 2009.	80
Figure 26 : Relation altitude – précipitation moyenne annuelle des stations météorologiques de la région Thonon – Evian, de novembre 2008 à octobre 2009.	81
Figure 27 : Fonte du manteau neigeux en fonction des températures atmosphériques aux stations météorologiques de Très le Mont et de Sciez, du 1 <sup>er</sup> décembre 2008 au 31 mars 2009.....	82

Figure 28 : Evolution de la hauteur d'eau mesurée par rapport à la hauteur d'eau pour un débit nul, au captage du Col du Feu en 2009.....	85
Figure 29 : Courbes de tarages selon les jaugeages réalisés et vérifications à partir des lois hydrauliques .....	88
Figure 30 : Evolution des débits moyens journaliers du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009 aux sources des Arces, des Granges Mamet et de Ramble .....	92
Figure 31 : Evolution des débits moyens journaliers du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009 aux sources de l'Epinguy, des Favrats et du Pont du Mouche .....	94
Figure 32 : Evolution des débits moyens journaliers du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009 aux sources de Moises 1, de Moises 2 et de Moises 3.....	97
Figure 33 : Courbe de récession de la source des Arces, du 16 avril 2009 au 31 octobre 2009 et ajustement selon deux fonctions exponentielles.....	102
Figure 34 : Courbe de récession de la source de Ramble, du 13 avril 2009 au 31 octobre 2009 et ajustement selon deux fonctions exponentielles.....	102
Figure 35 : Courbe de récession de la source de l'Epinguy, du 5 mai 2009 au 31 octobre 2009 et ajustement selon deux fonctions exponentielles.....	103
Figure 36 : Courbe de récession de la source des Favrats, du 16 avril 2009 au 31 octobre 2009 et ajustement selon deux fonctions exponentielles.....	103
Figure 37 : Courbe de récession de la source du Pont du Mouche, du 9 mai 2009 au 27 octobre 2009 et ajustement selon deux fonctions exponentielles.....	104
Figure 38 : Courbe de récession de la source des Moises 1, du 30 avril 2009 au 31 octobre 2009 et ajustement selon deux fonctions exponentielles.....	104
Figure 39 : Courbe de récession de la source des Moises 2, du 7 avril 2009 au 29 octobre 2009 et ajustement selon deux fonctions exponentielles.....	105
Figure 40 : Courbe de récession de la source des Moises 3, du 23 avril 2009 au 19 octobre 2009 et ajustement selon deux fonctions exponentielles.....	105
Figure 41 : Débits classés des Arces du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009..	108
Figure 42 : Débits classés des Favrats du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009	108
Figure 43 : Débits classés de Moises 1 du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009	109
Figure 44 : Débits classés de Moises 2 du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009	109
Figure 45 : Débits classés de Moises 3 du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009	110
Figure 46 : Débits classés du Pont du Mouche du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009 .....	110
Figure 47 : Débits classés de Ramble du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009	111
Figure 48 : Evolution du débit prélevé aux sources et du débit du cours d'eau du bassin versant du Pamphiot du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009.....	113
Figure 49 : Evolution en pourcentage de la part du débit du cours d'eau par rapport au débit prélevé aux sources du bassin versant du Pamphiot du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009.....	115
Figure 50 : Evolution du débit prélevé aux sources et du débit du cours d'eau du bassin versant des Moises du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009.....	116
Figure 51 : Evolution en pourcentage de la part du débit du cours d'eau par rapport au débit prélevé aux sources du bassin versant des Moises du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009.....	118
Figure 52 : Evolution du débit prélevé aux sources et du débit des cours d'eau du bassin versant de la Menoge du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009 .....	119
Figure 53 : Evolution en pourcentage de la part du débit des cours d'eau par rapport au débit prélevé aux sources du bassin versant de la Menoge du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009.....	121

Figure 54 : Résumé statistique des informations de conductivité électrique et de température aux sources du Col du Feu et du Pont du Mouche, en 2009.....	126
Figure 55 : Résumé statistique des informations de conductivité électrique et de température aux sources de l'Épinguy et des Favrats, en 2009.....	127
Figure 56 : Résumé statistique des informations de conductivité électrique et de température aux sources d'Habère-Poche, en 2009.....	132
Figure 57 : Résumé statistique des informations de conductivité électrique et de température aux sources des Moises, en 2009.....	135
Figure 58 : Distribution des fréquences relatives des valeurs moyennes journalières de conductivité électrique des sources en 2009.....	139
Figure 59 : Evolution des concentrations en cations et en anions de l'eau de la source du Col du Feu du 08.01.09 au 08.12.09.....	147
Figure 60 : Evolution des concentrations en cations et en anions de l'eau de la source de l'Épinguy du 08.01.09 au 08.12.09.....	148
Figure 61 : Evolution des concentrations en cations et en anions de l'eau de la source des Favrats du 08.01.09 au 08.12.09.....	150
Figure 62 : Evolution des concentrations en cations et en anions de l'eau de la source du Pont du Mouche du 08.01.09 au 08.12.09.....	151
Figure 63 : Evolution des concentrations en cations et en anions de l'eau de la source des Arces du 12.01.09 au 08.12.09.....	153
Figure 64 : Evolution des concentrations en cations et en anions de l'eau de la source des Granges Mamet du 12.01.09 au 08.12.09.....	154
Figure 65 : Evolution des concentrations en cations et en anions de l'eau de la source de Ramble du 12.01.09 au 08.12.09.....	155
Figure 66 : Evolution des concentrations en cations et en anions de l'eau de la source de Moises 1 du 12.01.09 au 24.11.09.....	157
Figure 67 : Evolution des concentrations en cations et en anions de l'eau de la source de Moises 2 du 02.02.09 au 10.11.09.....	158
Figure 68 : Evolution des concentrations en cations et en anions de l'eau de la source de Moises 3 du 12.02.09 au 08.12.09.....	159
Figure 69 : Diagrammes de Piper des sources.....	161
Figure 70 : Diagramme des sulfates en fonction du calcium des sources en 2009	163
Figure 71 : Diagramme des bicarbonates en fonction du calcium des sources en 2009.....	164
Figure 72 : Diagramme du magnésium en fonction du calcium des sources, en 2009.....	165
Figure 73 : Evolution des concentrations en silice et en strontium des sources d'Habère-Poche en 2009.....	169
Figure 74 : Evolution des concentrations en silice et en strontium des sources d'Orcier et du Col du Feu, en 2009.....	170
Figure 75 : Evolution des concentrations en silice et en strontium des sources des Moises, en 2009.....	173
Figure 76 : Evolution du pH, de l'oxygène dissous et du COT aux Arces, en 2009	176
Figure 77 : Evolution du pH, de l'oxygène dissous et du COT au Col du Feu, en 2009.....	176
Figure 78 : Evolution du pH, de l'oxygène dissous et du COT à l'Épinguy, en 2009.....	178
Figure 79 : Evolution du pH, de l'oxygène dissous et du COT aux Favrats, en 2009.....	178

Figure 80 : Evolution du pH, de l'oxygène dissous et du COT aux Granges Mamet, en 2009 .....	180
Figure 81 : Evolution du pH, de l'oxygène dissous et du COT à Moises 1, en 2009 .....	180
Figure 82 : Evolution du pH, de l'oxygène dissous et du COT à Moises 2, en 2009 .....	183
Figure 83 : Evolution du pH, de l'oxygène dissous et du COT à Moises 3, en 2009 .....	183
Figure 84 : Evolution du pH, de l'oxygène dissous et du COT au Pont du Mouche, en 2009 .....	185
Figure 85 : Evolution du pH, de l'oxygène dissous et du COT à Ramble, en 2009 .....	185
Figure 86 : Evolution de l' $I_{SC}$ des sources d'Orcier et du Col du Feu, en 2009.....	187
Figure 87 : Evolution de l' $I_{SD}$ des sources d'Orcier et du Col du Feu, en 2009.....	188
Figure 88 : Evolution de l' $I_{SC}$ des sources d'Habère-Poche, en 2009.....	189
Figure 89 : Evolution de l' $I_{SD}$ des sources d'Habère-Poche, en 2009.....	191
Figure 90 : Evolution de l' $I_{SC}$ des sources des Moises, en 2009.....	192
Figure 91 : Evolution de l' $I_{SD}$ des sources des Moises, en 2009.....	193
Figure 92 : Relation entre l' $I_{SC}$ et le logarithme de la $pCO_2$ aux sources d'Orcier et du Col du Feu, en 2009 .....	195
Figure 93 : Relation entre l' $I_{SC}$ et le logarithme de la $pCO_2$ aux sources d'Habère-Poche, en 2009 .....	196
Figure 94 : Relation entre l' $I_{SC}$ et le logarithme de la $pCO_2$ aux sources des Moises, en 2009 .....	196
Figure 95 : Relation entre la droite météorique mondiale et les analyses isotopiques des sources et des précipitations .....	201
Figure 96 : Evolution de teneurs mensuelles en tritium dans les précipitations récoltées à Thonon, de janvier 1963 à juillet 2009 .....	204
Figure 97 : Cercle de corrélation et diagramme des individus (n = 316) sur les axes factoriels 1 et 2 (76 %).....	214
Figure 98 : Relation Magnésium – Nitrates à l'exutoire et détermination des pôles de mélanges des sources bicarbonatées calciques et des sources bicarbonatées calciques et magnésiennes .....	216
Figure 99 : Déconvolution du signal enregistré à la source des Arces par les traceurs Magnésium – Nitrates, en 2009.....	218
Figure 100 : Déconvolution du signal enregistré à la source des Favrats par les traceurs Magnésium – Nitrates, en 2009.....	219
Figure 101 : Déconvolution du signal enregistré à la source de Moises 1 par les traceurs Magnésium – Nitrates, en 2009.....	221
Figure 102 : Déconvolution du signal enregistré à la source de Moises 2 par les traceurs Magnésium – Nitrates, en 2009.....	222
Figure 103 : Déconvolution du signal enregistré à la source de Moises 3 par les traceurs Magnésium – Nitrates, en 2009.....	223
Figure 104 : Déconvolution du signal enregistré à la source du Pont du Mouche par les traceurs Magnésium – Nitrates, en 2009 .....	224
Figure 105 : Déconvolution du signal enregistré à la source de Ramble par les traceurs Magnésium – Nitrates, en 2009.....	226
Figure 106 : Pourcentage de la variance totale représenté par les cinq premières composantes principales .....	229
Figure 107 : Cercles de corrélation des sources sur les axes factoriels 1 et 2 .....	231
Figure 108 : Diagramme des individus des sources sur les axes factoriels 1 et 2..	232

Figure 109 : Relations débits, précipitations, turbidité, température et conductivité des sources des Arces, des Granges Mamet et de Ramble, en 2009.....	247
Figure 110 : Relations débits, précipitations, pH, Escherichia coli et entérocoque des sources des Arces, des Granges Mamet et de Ramble, en 2009.....	248
Figure 111 : Relations débits, précipitations, turbidité, température et conductivité des sources du Col du Feu, de l'Epinguy, des Favrats et du Pont du Mouche, en 2009 .....	251
Figure 112 : Relations débits, précipitations, pH, Escherichia Coli et entérocoque des sources du Col du Feu, de l'Epinguy, des Favrats et du Pont du Mouche, en 2009.....	252
Figure 113 : Relations débits, précipitations, turbidité, température et conductivité des sources de Moises 1, de Moises 2 et de Moises 3, en 2009.....	254
Figure 114 : Relations débits, précipitations, pH, Escherichia Coli et entérocoque des sources de Moises 1, de Moises 2 et de Moises 3, en 2009 .....	255
Figure 115 : Cercles de corrélation et diagrammes des individus sur les plans F1 – F2 des sources d'Habère-Poche, en 2009 .....	259
Figure 116 : Cercles de corrélation et diagrammes des individus sur les plans F1 – F2 des sources d'Orcier et du Col du Feu, en 2009 .....	260
Figure 117 : Cercles de corrélation et diagrammes des individus sur les plans F1 – F2 des sources de Moises 1 et de Moises 2, en 2009.....	261
Figure 118 : Schéma conceptuel de fonctionnement de la source des Arces .....	287
Figure 119 : Délimitation des bassins d'alimentation des sources.....	288
Figure 120 : Schéma conceptuel de fonctionnement de la source du Col du Feu..	290
Figure 121 : Schéma conceptuel de fonctionnement de la source de l'Epinguy.....	292
Figure 122 : Schéma conceptuel de fonctionnement de la source des Favrats.....	294
Figure 123 : Schéma conceptuel de fonctionnement de la source des Granges Mamet .....	296
Figure 124 : Schéma conceptuel de fonctionnement de la source de Moises 1 .....	298
Figure 125 : Schéma conceptuel de fonctionnement de la source de Moises 2 .....	300
Figure 126 : Schéma conceptuel de fonctionnement de la source de Moises 3 .....	302
Figure 127 : Schéma conceptuel de fonctionnement de la source du Pont du Mouche .....	304
Figure 128 : Schéma conceptuel de fonctionnement de la source de Ramble.....	306
Photo 1 : Moraine argilo-détritique sur l'alpage de Très le Mont.....	27
Photo 2 : Sillons vallonnés de l'alpage de Trécout .....	30
Photo 3 : Cannelure sur un affleurement calcaire à Très le Mont.....	30
Photo 4 : Bloc erratique granitique à Très le Mont.....	30
Photo 5 : Ravine de diffluence (chable) au Col du Feu .....	30
Photo 6 : Le système de comptage du débit au captage des Granges Mamet .....	66
Photo 7 : Déversoir triangulaire au Col du Feu.....	66
Photo 8 : Déversoir rectangulaire au captage de l'Epinguy .....	66
Photo 9 : Déversoir triangulaire au captage des Arces.....	66
Photo 10 : Canal venturi du ruisseau du Pamphiot (Orcier).....	69
Photo 11 : Seuil jaugeur du ruisseau des Moises (Drillant) .....	69
Photo 12 : Déversoir des Arces amont sur le ruisseau des Arces (Habère-Poche)..	69
Photo 13 : Déversoir des Arces aval sur le ruisseau des Arces (Habère-Poche).....	69

Tableau 1 : Etat d'avancement de la procédure des périmètres de protection des captages d'eau potable sur le massif du Mont Forchat .....	22
Tableau 2 : Evolution des principaux paramètres physico-chimiques au captage des Moises, entre 1999 et 2006 .....	33
Tableau 3 : Evolution du débit, de la température et de la conductivité électrique aux captages des Arces et des Granges Mamet durant les étés 2002 et 2003 .....	35
Tableau 4 : Exemple de mesure de la résistance aux antibiotiques pour des fèces de lièvre .....	40
Tableau 5 : Les incertitudes de détection des souches d'entérocoques fécaux en fonction de leur origine .....	41
Tableau 6 : Résultats des analyses bactériologiques aux captages des Arces et des Granges Mamet, durant la période de suivi .....	42
Tableau 7 : Origine des contaminations microbiologiques aux captages des Arces et des Granges Mamet .....	42
Tableau 8 : Classification hydrogéologique des réservoirs et leurs échelles de référence .....	46
Tableau 9 : Valeurs de la constante de dissociation des principaux minéraux des roches carbonatés dans l'eau pure .....	47
Tableau 10 : Interprétation des ruptures de pente de la droite des débits classés ...	52
Tableau 11 : Composition minérale des roches consolidées du Forchat .....	57
Tableau 12 : Principales caractéristiques du bassin versant du Pamphiot .....	65
Tableau 13 : Principales caractéristiques du bassin versant des Moises .....	65
Tableau 14 : Principales caractéristiques du bassin versant de la Menoge .....	69
Tableau 15 : Les gradients altimétriques selon les auteurs et leur zone d'étude .....	74
Tableau 16 : Evolution des principales caractéristiques statistiques des précipitations mensuelles observées à Thonon de 1987 à 2007 .....	75
Tableau 17 : Evolution des principales caractéristiques statistiques des températures mensuelles et annuelles observées à Thonon de 1987 à 2007 .....	76
Tableau 18 : Evolution des températures moyennes mensuelles sur le bassin d'Evian en 2004 et 2005 .....	76
Tableau 19 : Evolution des principales caractéristiques statistiques de l'humidité relative de l'air en %, observées à Thonon de 1987 à 2007 .....	77
Tableau 20 : Résumé statistique des températures mensuelles dans la région de Thonon – Evian, du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009 .....	78
Tableau 21 : Résumé statistique des précipitations moyennes mensuelles dans la région de Thonon – Evian, du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009 .....	80
Tableau 22 : Résultats des analyses chimiques des précipitations recueillies au Col du Feu et à Très le Mont durant l'année 2009 .....	83
Tableau 23 : Pourcentage des hauteurs d'eau couverte par les courbes de tarages	85
Tableau 24 : Résultats des jaugeages réalisés .....	86
Tableau 25 : Date, nombre de jours et type de débits durant les absences d'informations du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009 .....	89
Tableau 26 : Date et nombre de jours de trop plein des sources et des cours d'eau	90
Tableau 27 : Synthèse de l'étude des variations de débit .....	99
Tableau 28 : Estimation des aires d'alimentation des sources .....	100
Tableau 29 : Réserves de tarissement calculées à partir des courbes de récession des Arces, de l'Epinguy, des Favrats, des Moises 1, des Moises 2, des Moises 3, de Ramble et du Pont du Mouche .....	106
Tableau 30 : Résumé des interprétations de l'analyse des débits classés .....	111

Tableau 31 : Nombre de jours où le débit prélevé aux sources est supérieur au débit du cours d'eau sur le bassin versant du Pamphiot du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009.....	114
Tableau 32 : Nombre de jours où le débit prélevé aux sources est supérieur au débit du cours d'eau sur le bassin versant des Moises, du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2010.....	117
Tableau 33 : Nombre de jours où le débit prélevé aux sources est supérieur au débit des cours d'eau du bassin versant de la Menoge, du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009.....	120
Tableau 34 : Estimation du débit minimal du cours d'eau des Moises à partir des informations disponibles, du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009 .....	122
Tableau 35 : Nombre de jours où le débit du cours d'eau est inférieur au débit minimal pour le bassin versant des Moises du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009 .....	122
Tableau 36 : Dates et nombre de jours des lacunes d'informations de température et de conductivité électrique, en 2009 .....	125
Tableau 37 : Principales hypothèses issues de l'étude des variations de température et de conductivité électrique des sources, en 2009.....	141
Tableau 38 : Résultats de l'étude de la balance ionique .....	143
Tableau 39 : Principales caractéristiques du suivi chimique.....	144
Tableau 40 : Synthèse de l'étude des variations des paramètres majeurs des sources, en 2009.....	167
Tableau 41 : Synthèse des interprétations issues de l'étude des paramètres de l'équilibre calco-carbonique .....	197
Tableau 42 : Principales caractéristiques du suivi isotopique.....	200
Tableau 43 : Valeurs observées en oxygène 18 et en deutérium et quantification des excès en deutérium .....	202
Tableau 44 : Valeurs observées en deutérium et en oxygène 18 des précipitations récoltées.....	203
Tableau 45 : Précipitations mensuelles à Thonon et valeurs en tritium des précipitations et des sources .....	206
Tableau 46 : Synthèse des interprétations issues de l'étude des paramètres isotopiques .....	211
Tableau 47 : Valeurs de saturation des variables sur les 5 premiers axes, en %... ..	214
Tableau 48 : Résumé statistique de la déconvolution Magnésium – Nitrates de la source des Arces en 2009, à partir des 3 pôles de mélange .....	218
Tableau 49 : Contributions moyennes des 3 pôles de mélange à partir de la déconvolution Magnésium – Nitrates à la source des Favrats, en 2009.....	219
Tableau 50 : Contributions moyennes des 3 pôles de mélange à partir de la déconvolution Magnésium – Nitrates à la source de Moises 1, en 2009.....	221
Tableau 51 : Contributions moyennes des 3 pôles de mélange à partir de la déconvolution Magnésium – Nitrates à la source de Moises 2, en 2009.....	222
Tableau 52 : Contributions moyennes des 3 pôles de mélange à partir de la déconvolution Magnésium – Nitrates à la source de Moises 3, en 2009.....	223
Tableau 53 : Contributions moyennes des 3 pôles de mélange à partir de la déconvolution Magnésium – Nitrates à la source du Pont du Mouche, en 2009 ....	224
Tableau 54 : Contributions moyennes des 3 pôles de mélange à partir de la déconvolution Magnésium – Nitrates à la source de Ramble, en 2009 .....	226
Tableau 55 : Synthèse des résultats issus des déconvolutions des hydrogrammes des sources .....	227

Tableau 56 : Valeurs de saturation des variables sur l'axe factoriel 1 en pourcentage .....	229
Tableau 57 : Valeurs de saturation des variables sur l'axe factoriel 2 en pourcentage .....	230
Tableau 58 : Principales caractéristiques du suivi sanitaire .....	234
Tableau 59 : Valeurs observées pour le suivi sanitaire de la source du Col du Feu	235
Tableau 60 : Valeurs observées pour le suivi sanitaire de la source de l'Epinguy..	236
Tableau 61 : Valeurs observées pour le suivi sanitaire de la source des Favrats ..	237
Tableau 62 : Valeurs observées pour le suivi sanitaire de la source du Pont du Mouche.....	238
Tableau 63 : Valeurs observées pour le suivi sanitaire de la source des Arces .....	239
Tableau 64 : Valeurs observées pour le suivi sanitaire de la source des Granges Mamet .....	240
Tableau 65 : Valeurs observées pour le suivi sanitaire de la source de Ramble....	241
Tableau 66 : Valeurs observées pour le suivi sanitaire de la source des Moises 1	242
Tableau 67 : Valeurs observées pour le suivi sanitaire de la source des Moises 2	243
Tableau 68 : Valeurs observées pour le suivi sanitaire de la source des Moises 3	244
Tableau 69 : Synthèse de l'étude des paramètres sanitaires .....	263
Tableau 70 : Synthèse de l'étude des variations de débit .....	273
Tableau 71 : Estimation de la surface d'alimentation des captages d'eau potable à partir des informations de débit du 1 <sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009.....	273
Tableau 72 : Réserves de tarissement calculées à partir des courbes de récession correspondantes.....	274
Tableau 73 : Résumé des interprétations de l'analyse des débits classées.....	274

## PREAMBULE

Le Syndicat Intercommunal des Eaux des Moises, les communes de Draillant, d'Habère Poche, de Lullin et d'Orcier souhaitent assurer la pérennité des ressources en eau exploitées pour l'alimentation en eau potable de 30 000 personnes environ. Ces ressources (débit moyen : 250 m<sup>3</sup>/h exploité par 8 captages) sont localisées sur les versants du Mont Forchat entre 1 000 et 1539 mètres d'altitude, sur la bordure occidentale du massif du Chablais.

Ces structures envisagent, pour répondre à cet objectif, la création d'un espace protégé : le Parc Naturel Hydrogéologique du Mont Forchat. Le projet est actuellement en phase d'étude. Ces études menées par étapes, comprennent :

- Un état des lieux dont l'objectif est de préciser le fonctionnement et l'état sanitaire de la ressource, ses relations avec les milieux superficiels, les conditions d'exploitation actuelles et les activités anthropiques développées sur le bassin versant
- Un diagnostic de la situation actuelle établi à partir des observations précédentes, précisant les problèmes observés, leurs origines et leurs conséquences sur la qualité des eaux exploitées
- La définition des objectifs retenus en fonction du diagnostic précédent
- Un programme d'actions retenues par le Maître d'Ouvrage ; programme précisant les éléments techniques des actions prévues, l'impact attendu sur la qualité de la ressource, les coûts d'investissement et de fonctionnement éventuels, les délais de réalisation, les actions à entreprendre pour évaluer l'efficacité des actions réalisées

L'état des lieux est à ce jour en cours. Deux études ont été réalisées :

- Caractérisation des sols et des peuplements du bassin versant de la source des Moises. Rôle sur la protection de la ressource en eau. Fanny Dunoyer. 2003
- Rapport sur la structure hydrogéologique de « *l'Espace Forchat* ». Anaïs Bovet. 2003

Ces études mettent en évidence :

- Le rôle protecteur mais limité, des sols vis à vis de la ressource. La qualité de l'eau des Moises est liée à la faible activité anthropique développée sur le bassin versant. « *Dans le cas de pollutions trop importantes ou répétées, le sol ne suffirait pas pour épurer* » (DUNOYER, 2003)
- La présence de zones d'infiltration sensibles, à protéger
- La sensibilité des sols à l'érosion, l'appauvrissement de la diversité du couvert végétal, la nécessité de régénérer un couvert végétal forestier permanent et la nécessité de lutter contre l'invasion des résineux

Elles ont également permis l'établissement d'un inventaire exhaustif des émergences, des cours d'eau superficiels et une première analyse de l'origine probable des eaux en fonction de la valeur des paramètres physico-chimiques disponibles. « *Celles-ci semblent, pour la plupart, provenir de l'aquifère puissant*

*constitué* » (BOVET, 2003) par les calcaires liasiques. « *Le milieu karstique, constituant en majeure partie le potentiel hydrogéologique du Mont Forchat, se révèle être vulnérable vis à vis des pollutions bactériologiques* » (BOVET, 2003).

Ces deux études sont la base d'un programme d'étude présenté par la Régie Départementale d'Assistance de la Haute-Savoie (RDA74) en 2004 et qui a été actualisé en 2006 : « *Programme d'intervention pour l'étude de la structure et du fonctionnement des aquifères du Mont Forchat. Programme descriptif et estimatif. Régie Départementale d'Assistance de la Haute-Savoie. 2006* ». Le programme en question a été proposé dans l'objectif de réunir les informations permettant de préciser :

- La structure et le fonctionnement de ou des aquifères locaux
- L'état sanitaire de la ressource
- Les relations qu'il existe entre le milieu superficiel et les aquifères profonds

Il a ensuite été repris et développé par un mémoire de master de recherche intitulé : « *Proposition méthodologique pour l'étude des aquifères du Mont Forchat (Haute-Savoie). Bertrand Deville. 2008* ». Ce rapport s'est notamment traduit par :

- L'identification des méthodes et des techniques utilisées en hydrométrie (débit, précipitation, évapotranspiration et paramètres fugaces) et en hydrogéochimie (analyses en laboratoire et méthodes de prélèvements)
- Le développement d'outils d'aide à la décision pour l'implantation des stations de mesures
- L'implantation des stations de mesures et des appareillages. Au total, 18 stations sont dénombrées
- La réalisation d'un cahier des charges techniques visant à choisir un prestataire de services pour la réalisation des analyses physico-chimiques et bactériologiques

Le présent rapport se présente sous la forme de cinq chapitres :

- Chapitre 1 : Cadre géographique, géologique et hydrogéologique
- Chapitre 2 : Outils de caractérisation et moyens mis en œuvre
- Chapitre 3 : Interprétation des informations météorologiques et hydrodynamiques
- Chapitre 4 : Interprétation des informations hydrochimiques, isotopiques et sanitaires
- Chapitre 5 : Synthèse générale

# **CHAPITRE 1. CADRE GEOGRAPHIQUE, GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE**

Le chapitre 1 vise à établir un bilan des connaissances hydrogéologiques du site d'étude. La synthèse bibliographique des études techniques réalisées sur le secteur permet de définir plus précisément le point de départ et la problématique de la présente étude.

## 1.1. Cadre géographique

Le massif du Forchat se situe dans la partie septentrionale du département de la Haute-Savoie (cf. Figure 1). Plus précisément, le secteur étudié est limité au :

- Nord par les hameaux des Favrats et de La Basse (commune d'Orcier)
- Sud par les hameaux des Arces d'en Haut, des Arces d'en Bas, du Vernay et de Ramble (commune d'Habère-Poche)
- A l'Est par les hameaux des Moises et de Sur le Mont (commune de Draillant)
- A l'Ouest par les hameaux du Coteau, de Vauverdanne et de Monterrebout (commune de Lullin)

Le secteur d'étude représente une superficie proche de 12 km<sup>2</sup> au sein duquel 8 captages d'eau potable se localisent en pied de versant à des altitudes comprises entre 1000 et 1180 m. (cf. Figure 1). Les captages ont fait l'objet de la procédure des périmètres de protection (cf. Tableau 1) et sont pourvus d'une Déclaration d'Utilité Publique (D.U.P) sauf celui du Col du Feu (procédure en cours).

Nom	N°	Altitude en m.	Commune	Exploitant	Arrêté D.U.P
Moises	1	1040 - 1060	Draillant	SIEM	09/09/1997
Ramble	8	1090 - 1100	Habère-Poche	Habère-Poche	18/11/1988
Granges Mamet	7	1150 - 1160	Habère-Poche	Habère-Poche	18/11/1988
Arces	6	1180	Habère-Poche	Habère-Poche	18/11/1988
Col du Feu	5	1110	Lullin	Lullin	
Pont du Mouche	4	990 - 1020	Orcier	SIEM	18/07/2006
Favrats	3	1000 - 1020	Orcier	SIEM	18/07/2006
Epinguy	2	1080	Orcier	SIEM	18/07/2006

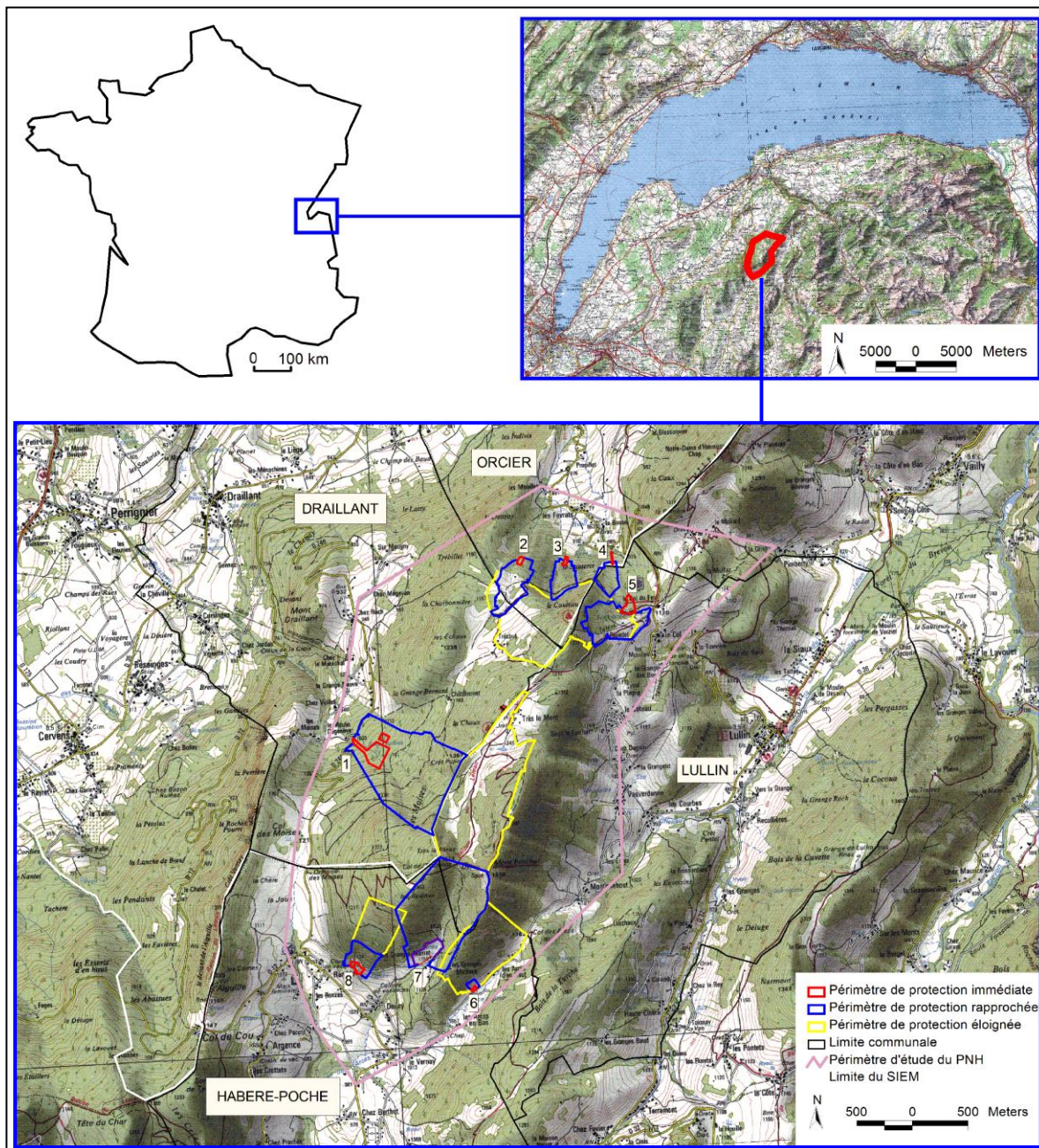
Source : Rampoux (1983, 1985, 1987, 1994, 1999 et 2001) et D.U.P (1988, 1997 et 2006)

Tableau 1 : Etat d'avancement de la procédure des périmètres de protection des captages d'eau potable sur le massif du Mont Forchat

Le périmètre d'étude est occupé par :

- 80 % de forêt. Celle-ci se localise essentiellement sur les versants
- 15 % de surfaces en herbe. Elles sont présentes sur les parties les plus plates (alpage de Très le Mont et de Trécout, pied de versant)
- 5 % de bâti (habitations et routes) et de roches nues et d'éboulis

Le contexte biogéographique a été précisé par l'ONF (ONF, 1995, 2002), Dunoyer (DUNOYER, 2003) et la SEA74 (Société d'Economie Alpestre 74, 2004). Il en ressort que le massif du Forchat se situe dans l'étage montagnard (série de la hêtraie-sapinière à faciès acidophile). Les parties sommitales atteignent l'étage subalpin (à partir de 1500 m.). La durée de la période végétative est estimée à 5 mois à 1000 m. (ONF, 1995).



Source : base de données RGD74

Figure 1 : Localisation géographique des périmètres de protection des captages d'eau potable du massif du Mont Forchat en Haute-Savoie

A notre connaissance, les espaces forestiers ne renferment pas d'espèces végétales remarquables ou protégées. On rencontre principalement des essences communes aux milieux mésophiles (acidophiles et neutrophiles). Les essences forestières principales sont l'épicéa, le sapin et l'hêtre. Quelques érables, frênes ou saules se présentent au-dessous de 1300 m. Les structures forestières sont généralement de type hêtraie-sapinière avec une prédominance de l'épicéa au fur et à mesure qu'on s'élève en altitude.

Au lendemain de la seconde guerre mondiale, des parcelles agricoles ont été replantées en épicéas. La forte densité de peuplement et l'interruption rapide de l'exploitation a eu pour conséquence l'apparition d'une forêt sombre qui empêche la régénération. Le mauvais état sanitaire favorise la prolifération du bostryche notamment sur les fronts de coupe. L'exploitation de ces parcelles se réalise par des coupes à blanc.

Les deux principales zones agricoles se présentent sous la forme d'alpages. L'alpage de Très le Mont est bien connu (DUNOYER, 2003 et SEA 74, 2004) ce qui n'est pas le cas de l'alpage de Trécourt. Nous notons sur les deux alpages la présence de certaines espèces caractéristiques de déprise agricole comme le millepertuis quadrangulé. Certains espaces sont également en cours de recolonisation par les ligneux (hêtre, épicéas, rosier sauvage, genévrier).

La pédologie du bassin versant topographique de la source des Moises est connue (DUNOYER, 2003). Il en est de même pour la forêt communale d'Habère-Poche (ONF, 1995) et de la forêt du Syndicat Intercommunal du Comté d'Allinges (ONF, 2002). Il apparaît que la différenciation des sols résulte davantage de facteurs lithologiques et topographiques que de facteurs climatiques. De manière générale, nous observons que les sols développés sur :

- Dépôts morainiques et pente faible, sont de type brun acide avec un horizon hydromorphe profond
- Dépôts morainiques et pente forte, sont de type brun acide voire ocreux avec un horizon hydromorphe profond moins marqué que dans le premier cas car le drainage superficiel est satisfaisant
- Roches calcaires et pente faible, sont de type brun calcique avec un horizon hydromorphe profond (tourbières, mares et dolines à Très le Mont)
- Roches calcaires et pente forte, sont de type brun calcique peu profond (rendzines localisées sur les lignes de crêtes)
- Roches calcaires siliceuses, ont tendance à « *podzoliser* » et à favoriser le développement de pessière pure (sommet de l'alpage de Très le Mont)

Les sols du secteur d'étude permettent une bonne filtration et une bonne épuration des eaux de part les activités biologiques qu'ils supportent sauf les sols type brun calcique peu profond. De manière générale, « *les sols supporteront une pollution diffuse mais ils seront rapidement saturés par une pollution massive ou accidentelle* » (DUNOYER, 2003).

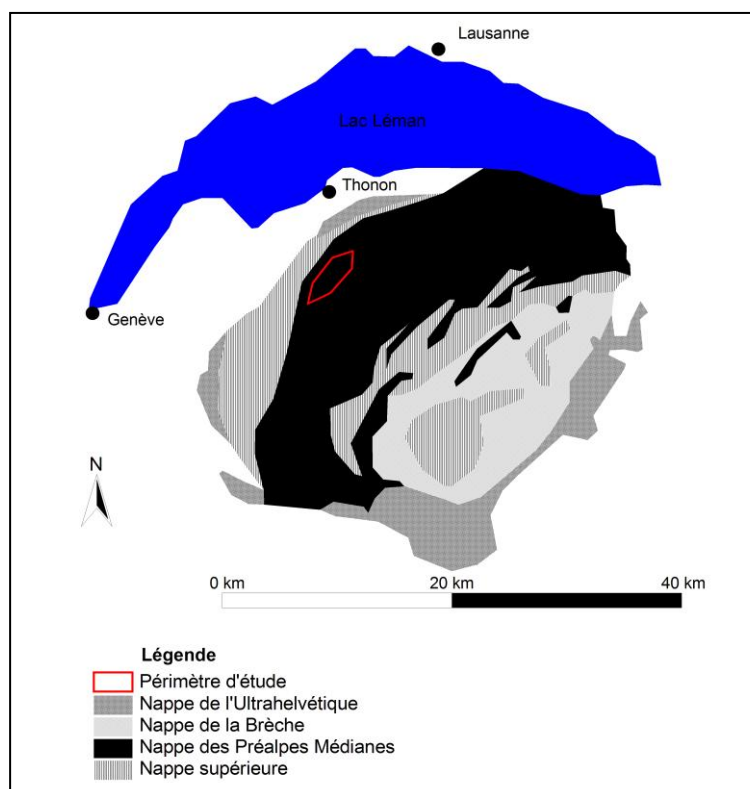
## 1.2. Cadre géologique

### 1.2.1. Contexte structural

Le massif du Forchat appartient au Préalpes du Chablais. Celles-ci se caractérisent par une tectonique complexe avec la superposition de roches issues du déplacement de nappes de charriages. Nous simplifierons la situation (cf. Figure 2) en différenciant :

- La nappe Ultrahelvétique. Constituée principalement de flysch éocènes, elle se situe en bordure des Préalpes du Chablais
- La nappe de la Brèche. Riche en matériaux détritiques d'âge jurassique, elle se localise au centre des Préalpes
- La nappe des Préalpes Médiannes. Il s'agit de l'unité la plus présente. Elle constitue le « cœur » du substratum rocheux de notre secteur d'étude
- Les nappes supérieures. Constituée principalement de flysch, elles se situent soit en bordure soit au centre des Préalpes du Chablais

Ainsi, le massif du Forchat se localise sur le front de la nappe des Préalpes Médiannes (cf. Figure 2). Dans son ensemble, cette unité présente de grandes variations de faciès et se caractérise par une succession de plis généralement symétriques et souples dont l'anticlinal du Forchat (cf. Figure 5).



Source : Charolais et Badoux, 1990

Figure 2 : Carte tectonique simplifiée des Préalpes du Chablais

#### 1.2.1.1. Le Trias supérieur

Les terrains du Trias supérieur forment le cœur de l'anticlinal. Ils s'observent sur l'alpage de Très le Mont et se présentent sous la forme de dolomies blondes, de cargneules et d'argilites vertes. Au sommet de la série, les bancs de dolomies et d'argilites vertes alternent sur une épaisseur de 15 m. Les cargneules apparaissent sur une épaisseur de 10 m. Ces dernières sont de couleurs jaunes et vacuolaires. Au pied de la série, les dolomies blondes s'observent sur une épaisseur de 120 m. Celles-ci peuvent être à la base en contact avec du gypse.

#### 1.2.1.2. Le Rhétien

Il s'agit d'un faciès constant constitué d'une alternance de schistes noirs et de bancs de calcaires dolomitiques. L'épaisseur varie de 20 à 25 m. Ils sont visibles à l'entrée de l'alpage de Très le Mont

#### 1.2.1.3. L'Hettangien

Son sommet est représenté par des calcaires massifs oolithiques ou lités, à pâte fine et à silex. Sa base débute par une alternance de calcaires argileux et de marnes. Ce niveau repose sur des grès glauconieux surmontant des marnes dolomitiques.

#### 1.2.1.4. Le Lias inférieur

Cette série caractérise la zone frontale de la nappe et elle se caractérise par une épaisseur variable allant de 10 à 250 m. Il s'agit de calcaires spathiques<sup>1</sup> blancs ou roses qui peuvent présenter de grains de glauconie<sup>2</sup>. Localement, les calcaires peuvent être dolomitiques.

#### 1.2.1.5. Le Lias moyen

Il s'agit de calcaires siliceux foncés, parfois légèrement spathiques et glauconieux, dont l'épaisseur varie de 100 à 240 m. A la base de la série, des calcaires clairs à pâte fine tachetée se présentent. Ce dernier niveau est riche en Bélemnites (mollusques marins sécrétant une coquille cloisonnée unique, proches des seiches).

#### 1.2.1.6. Le Lias supérieur et le Dogger

Les terrains du Lias supérieur et du Dogger sont constitués par une alternance de calcaires argileux et siliceux ainsi que de marnes jaunes. Son épaisseur oscille entre 200 et 400 m.

### 1.2.2. Le quaternaire

Durant le Quaternaire, la région lémanique a connu des phases de glaciation et de déglaciation. Les dépôts sont présents sous la forme de moraines argilo-détritiques et de dépôts fluvioglaciers.

---

<sup>1</sup> Nom donné à divers minéraux présentant des faces cristallines nettes (FOUCAULT & RAOULT, 2000)

<sup>2</sup> Association de minéraux argileux à forte teneur en Fe<sup>3+</sup> (FOUCAULT & RAOULT, 2000)

### 1.2.2.1. Les moraines argilo-détritiques

« Le faciès est constant : argiles bleues, jaunes lorsqu'elles sont altérées, à galets striés et blocs quelquefois volumineux (1 à 2 m.). Cette moraine a perdu parfois, son argile par délavage et le matériel restant est peu différenciable des sédiments des terrasses de Thonon, si ce n'est l'absence de stratification. » (Notice géologique). L'épaisseur des moraines varie généralement de 2 à 10 m. (cf. Photo 1) mais un forage réalisé en 2001 à l'aval des captages des Moises, met en évidence un dépôt morainique d'environ 20 m.



Photo 1 : Moraine argilo-détritique sur l'alpage de Très le Mont

### 1.2.2.2. Les éboulis et les alluvions torrentielles

Les éboulis sont présents à la base des falaises liasiques où ils peuvent former de larges tabliers (Nord du sommet du Forchat). Les alluvions torrentielles sont peu présentes. Ils peuvent s'observer au niveau du ruisseau des Arces.

### 1.2.2.3. Les cours d'eau et les zones humides

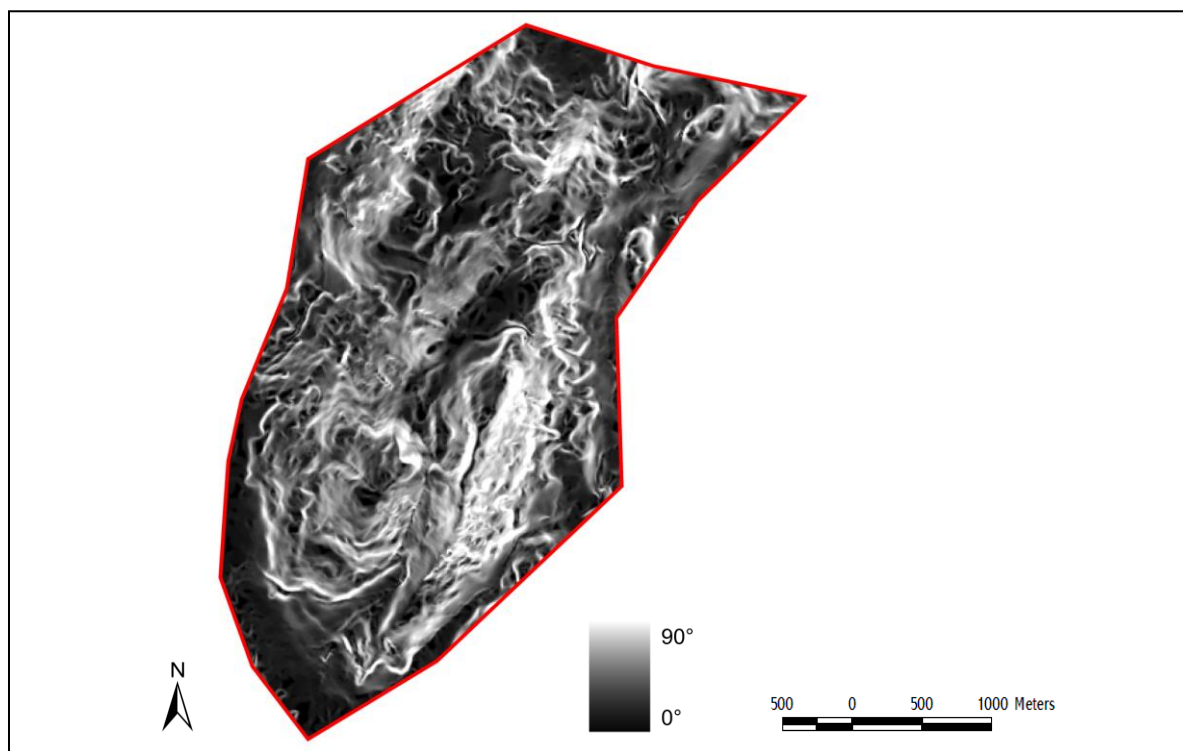
On observe une tourbière au niveau du Col des Moises et des zones humides sur l'alpage de Très le Mont et au Col du Feu. Les ruisseaux qui sillonnent le secteur d'étude sont :

- Au Sud-est, le ruisseau des Arces. L'origine se situe au col des Arces
- A l'Ouest, la Menoge qui débute à la tourbière du col des Moises
- Au sud-ouest, le ruisseau des Granges Mamet qui prend sa source au niveau du captage des Granges Mamet
- Au nord-ouest, le ruisseau des Moises. Il commence au captage des Moises
- Au nord, le ruisseau du Pamphiot. L'origine se situe au Col du Feu
- A l'est, le ruisseau des Courbes. Il prend sa source à Très le Mont

### 1.2.3. Contexte géomorphologique

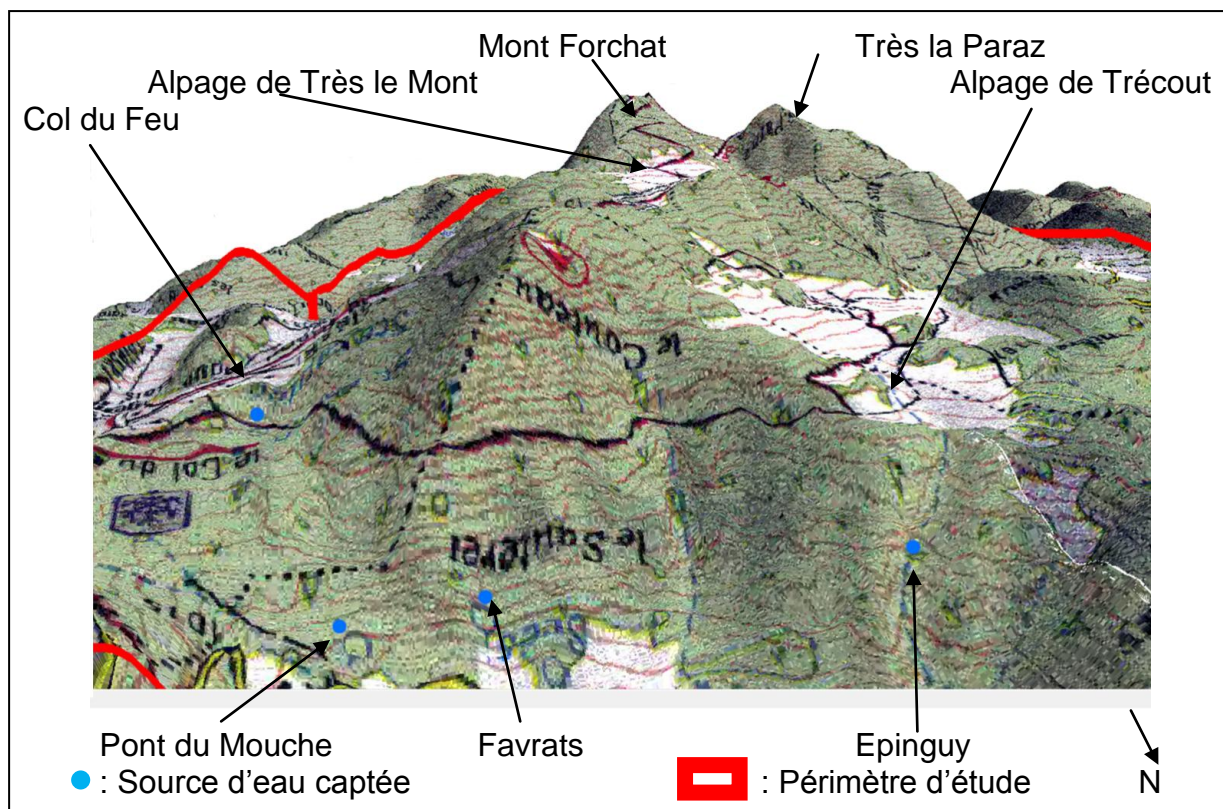
Les formes et formations sont héritées principalement de trois types d'actions morphogéniques : glaciaire, périglaciaire et hydrique. Un aperçu géomorphologique a été réalisé sur l'ensemble du secteur d'étude (cf. Figure 5). Il permet de mettre en évidence les éléments suivants :

- Les versants orientés au Nord présentent un relief en marches d'escaliers (cf. Figure 4) qui font penser à des plans d'épaulement caractéristiques des vallées glaciaires
- Les versants dirigés au Sud sont abrupts avec de nombreux tabliers d'éboulis
- La partie inférieure des versants ont atteint un profil d'équilibre ce qui a permis le développement d'aménagements humains (routes, maisons, etc.)
- Les formes liées à l'action des eaux courantes correspondent aux ravinements et autres incisions induits par le ruissellement. Ils sont particulièrement visibles sur les dépôts morainiques. L'action de l'eau est perceptible à travers la présence de dolines à Très le Mont et d'une fine épaisseur d'alluvions torrentielles au ruisseau des Arces



Source : IGN BD Alti 5

Figure 3 : carte des pentes du massif du Mont Forchat



Source : BD Alti 5 et Top 25 IGN  
Figure 4 : Aperçu en 3D du massif du Mont Forchat



Photo 2 : Sillons vallonnés de l'alpage de Trécout



Photo 4 : Bloc erratique granitique à Très le Mont



Photo 3 : Cannelure sur un affleurement calcaire à Très le Mont

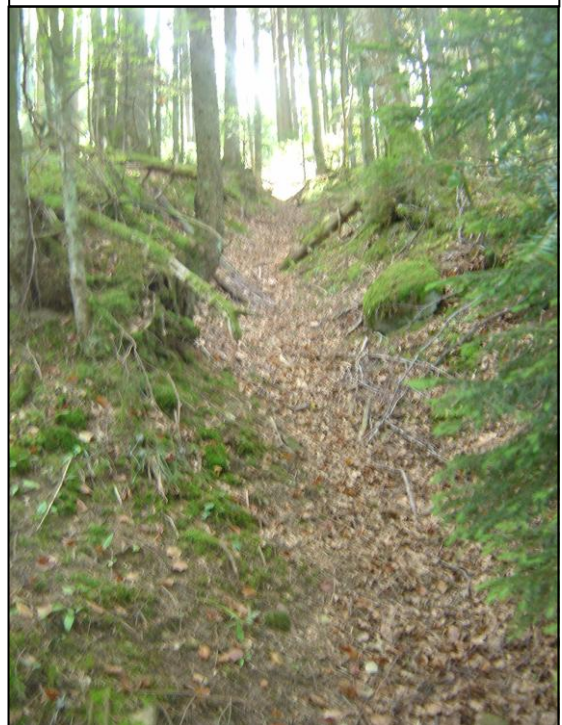


Photo 5 : Ravine de diffluence (chable) au Col du Feu

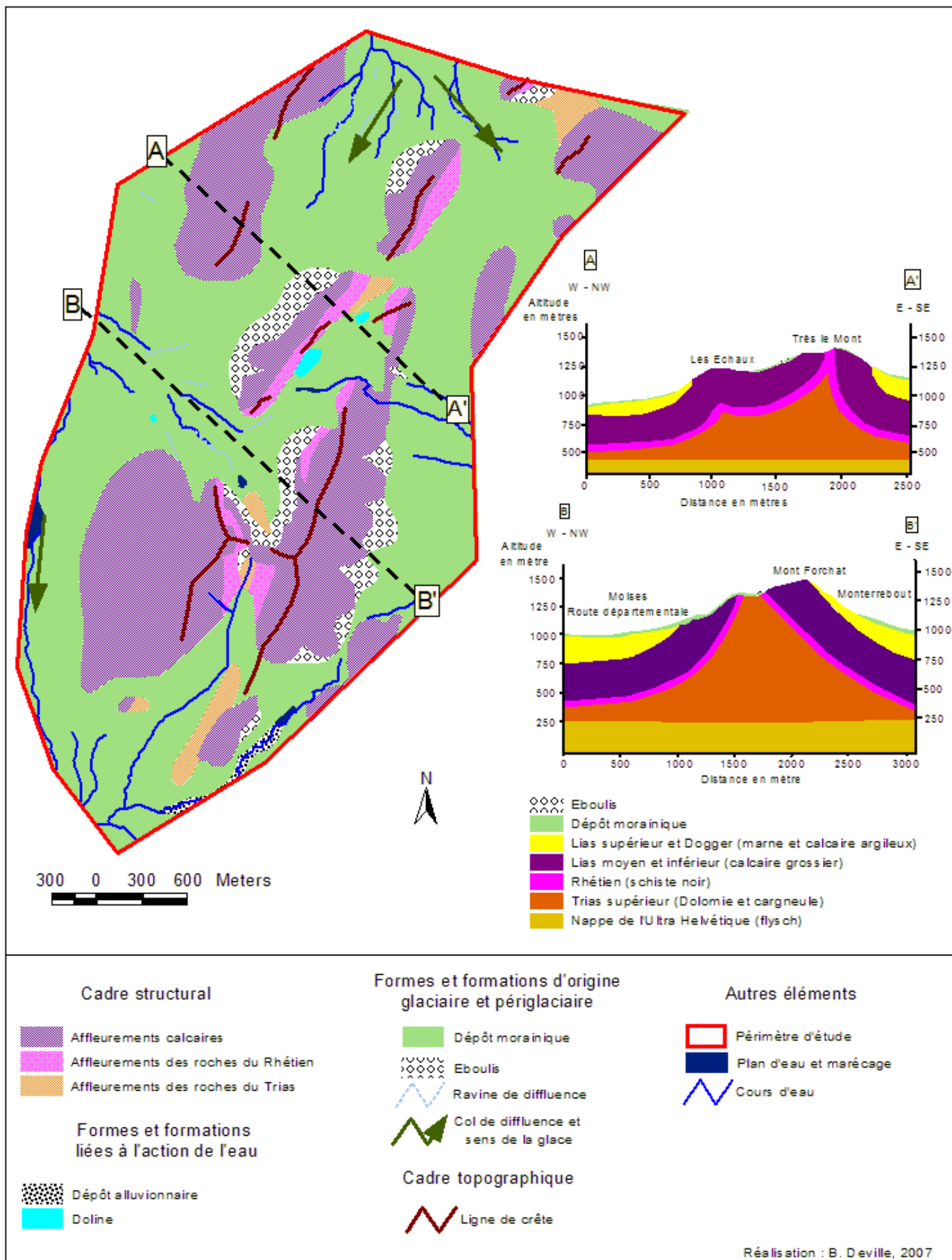


Figure 5 : Aperçu géomorphologique du massif du Mont Forchat

### 1.3. Cadre hydrogéologique

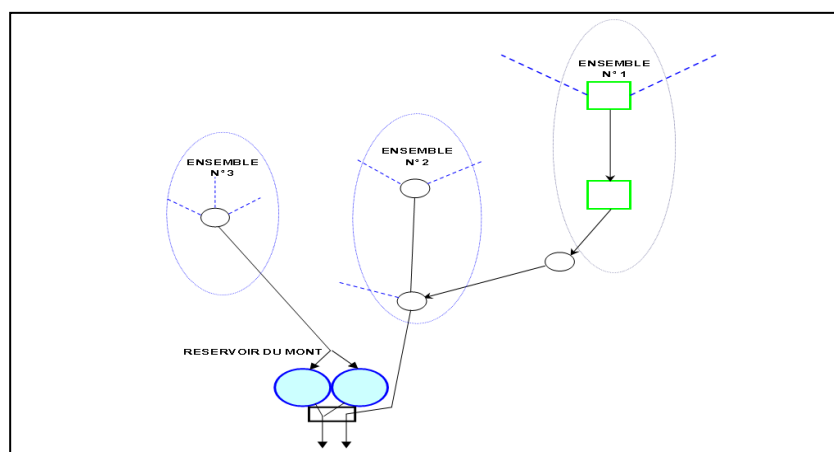
Des rapports hydrogéologiques ont été réalisés sur les captages d'eau potable situés sur le massif du Forchat (GIDON, 1954 ; RAMPNOUX, 1983, 1985, 1987, 1994, 1999, 2001 ; HOLE & MALATRAIT, 1991 ; BAPTENDIER, 2000 ; GEO-ARVE, 2001 ; RDA74, 2002a, 2002b, 2004 ; BOVET, 2003). Nous les présentons brièvement afin de préciser les hypothèses émises concernant l'origine des eaux, de caractériser l'état sanitaire des ressources et de réaliser une synthèse hydrogéologique.

#### 1.3.1. Hypothèses concernant l'origine des eaux captées

Les informations hydrodynamiques et hydrochimiques suivantes ont été collectées : débit, magnésium (mg/l), calcium (mg/l), silice (mg/l), dureté (en °F), sulfate (mg/l) et conductivité électrique ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

##### 1.3.1.1. Le captage des Moises

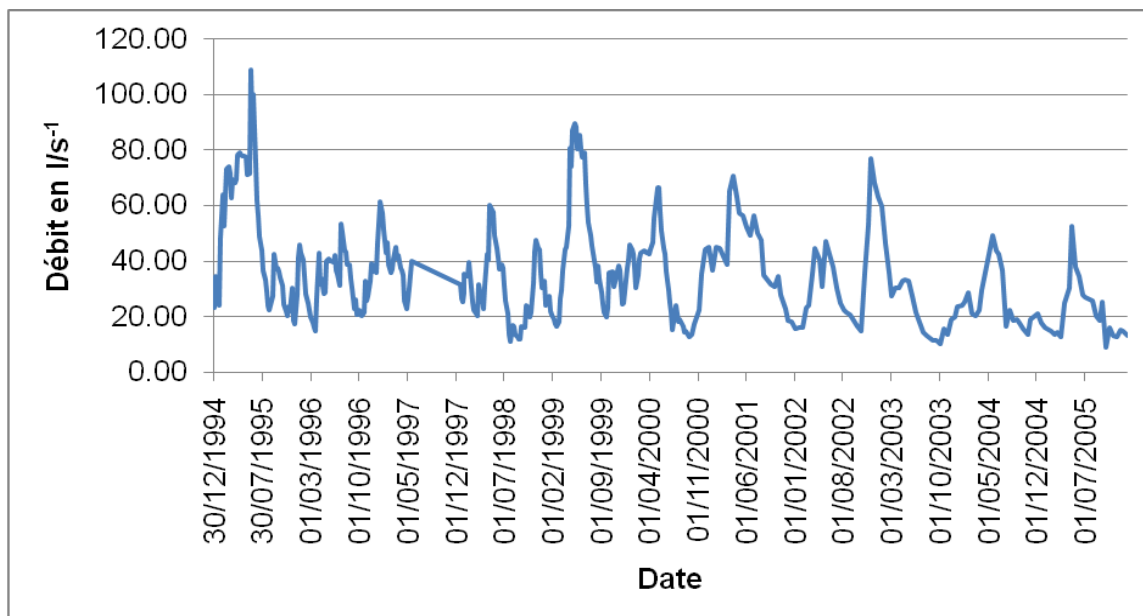
Le captage des Moises est quantitativement la principale ressource du massif. Exploité par le SIEM depuis 1951, il est composé de trois ensembles (cf. Figure 6), à des altitudes comprises entre 1040 et 1060 m. Le site est isolé dans la hêtraie-sapinière du Comté d'Allinges dont la gestion est assurée par l'ONF. Les trois sites sont clôturés, l'ensemble 3 étant isolé des deux autres. La localisation des périmètres de protection immédiate est matérialisée par des poteaux plantés régulièrement et marqués du nom du SIEM. La description détaillée des captages est présentée par Rampnoux (RAMPNOUX, 1994).



Source : SIEM, 2007

Figure 6 : Synoptique du captage des Moises

Entre 1995 et 2005, les relevés de débits effectués tous les 15 jours (cf. Figure 7), indiquent un débit moyen de 36.06 l/s. Dans le détail, les débits varient du simple au décuple. Le débit le plus faible a été de 8.97 l/s du 15 au 29 septembre 2005, et le débit le plus élevé a été de 108.83 l/s du 2 au 8 juin 1995. Les analyses physico-chimiques sont effectuées sur le mélange des eaux des trois ensembles.



Source : SIEM, 2007

Figure 7 : Evolution du débit moyen aux captages des Moises, entre 1995 et 2005

Les résultats des analyses des principaux paramètres physico-chimiques entre 1999 et 2006 (cf. Tableau 2) font apparaître une faible minéralisation avec :

- Des conductivités électriques à 20°C comprises entre 271 et 327  $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Des conductivités électriques à 25°C comprises entre 295 et 336  $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Une dureté comprise entre 16.2 et 17.8°F
- Des valeurs en sulfates inférieures à 8.2 mg/l ce qui laisse supposer une absence de gypse en contact avec l'aquifère d'origine

	juin-99	mai-01	avr-02	avr-03	juin-04	mai-05	mai-06
Température (°C)		6.2	6.2	6.7	8.9		
Conductivité à 20°C ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	271	285.9	327	303.1			
Conductivité à 25°C ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )		317	295	336	307	310	308
pH à 20°C	8.02	8	8.1	7.8	8	8	8
Dureté (°F)	16.2	16.3	17.1	17.8	16.3	16.8	16.2
Sulfates (mg/l)	8.2	7.6	8	8	7.6	7.2	8.1

Source : DDASS, 2007

Tableau 2 : Evolution des principaux paramètres physico-chimiques au captage des Moises, entre 1999 et 2006

Selon Rampnoux (RAMPNOUX, 1994) la circulation des eaux souterraines se réalise dans les tills. Bovet (BOVET, 2003) notent des conductivités électriques différentes à chaque source.

### 1.3.1.2. Les captages d'Habère-Poche

Les 3 captages (Arces, Granges Mamet et Ramble) utilisés pour la production d'eau potable de la commune d'Habère-Poche, se situent sur le massif du Forchat. Plus précisément, ils se situent sur le flanc Sud-ouest du massif à des altitudes comprises

entre 1090 et 1180 m. La description détaillée des captages a été réalisé par Rampnoux (RAMPNOUX, 1983, 1985, 1999).

De manière générale, les données hydrodynamiques et physico-chimiques sont peu abondantes. Pour les captages des Arces et des Granges Mamet, les informations de la RDA74 (Régie Départementale d'Assistance de la Haute-Savoie, 2002 ; 2004) font apparaître des débits compris entre 2.38 et 13 l/s aux Arces et de 0.33 à 2 l/s aux Granges Mamet (cf. Tableau 3). A Ramble, les données sont moindres. Rampnoux (RAMPNOUX, 1983) donne un débit moyen de 5 l/s. En été 2003, la source a presque été à sec avec un débit mesuré de 0.2 l/s (BOVET, 2003). En reprenant les données du Tableau 3, les valeurs suivantes s'observent :

- Températures : de 7.7 à 8.9°C aux Arces et de 7.8 à 10.8°C aux Granges Mamet
- Conductivités électriques (CE) à 25°C : de 308.7 à 428  $\mu\text{S}/\text{cm}$  aux Arces et oscillant entre 300 et 368.5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  aux Granges Mamet
- Conductivités électriques (CE) à 20°C : de 260  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à Ramble
- Silice (mg/l) : de 5 aux Arces, de 3.8 aux Granges Mamet et de 5.2 à Ramble
- Magnésium (mg/l) : de 10.9 aux Arces, de 4.5 aux Granges Mamet et de 4.1 à Ramble
- Sulfate (mg/l) : de 23.7 aux Arces, de 5.1 aux Granges Mamet et de 5.8 à Ramble

Les informations récoltées ne permettent pas de tirer des conclusions sur l'origine des eaux captées. Selon Rampnoux (RAMPNOUX, 1999), les eaux des Arces proviendraient du réseau des cargneules, des dolomies et du gypse et du réseau des calcaires liasiques. Pour l'auteur, les deux réseaux seraient plus ou moins communicants. Aux Granges Mamet et à Ramble, la circulation des eaux souterraines dans les cargneules, dolomies et gypse paraît difficile. Le suivi hydrodynamique et bactériologique réalisé aux Granges Mamet dans l'année 2003 laisse supposer un bassin versant réel différent que le bassin versant topographique « *Les conditions hydrogéologiques et topographiques conduiraient à rechercher, en périodes de hautes eaux, des infiltrations (...) dans une zone inscrite dans le triangle : sommets du Mont Forchat, de Trè la Paraz, Crêt Pujin* » (RDA74, 2004).

#### 1.3.1.3. Les captages d'Orcier

Les 3 captages (Epinguy, Favrats et Pont du Mouche) d'Orcier sont localisés sur le flanc Nord du massif. Exploités depuis 2003 par le SIEM, ils se situent à des altitudes comprises entre 990 et 1080 m. Les sites sont isolés dans des hêtraies-sapinières privés. La description détaillée des captages a été réalisé par Rampnoux (RAMPNOUX, 2001).

Là-aussi, les données hydrodynamiques et hydrochimiques, sont peu nombreuses. Rampnoux (RAMPNOUX, 2001), relève en juillet 2001, des débits de 3 l/s au Pont du Mouche, 5 l/s au Favrats et de 5.88 l/s à l'Epinguy. Les analyses physico-chimiques permettent d'observer les valeurs suivantes :

- Silice (mg/l) : de 7.2 au Pont du Mouche, de 6 aux Favrats et de 6.3 à l'Epinguy (analyse DDASS du 23 janvier 2001)

- Magnésium (mg/l) : de 17.4 au Pont du Mouche, de 7.8 aux Favrats et de 7.6 à l'Épinguy (analyse DDASS du 23 janvier 2001)
- Sulfates (mg/l) : de 117.91 au Pont du Mouche, de 13.7 aux Favrats et de 4.82 à l'Épinguy (analyses DDASS de 1990 à 2006)
- Conductivités électriques à 25°C (µS/cm) : de 539 au Pont du Mouche, de 403 aux Favrats et de 423 à l'Épinguy (analyses DDASS de 1999 à 2006)

Date	Débit (l/s)		Température (°C)		Conductivité à 25°C (µS/cm)	
	Arces	Granges Mamet	Arces	Granges Mamet	Arces	Granges Mamet
03/06/2002	13.00		7.90		346.00	
11/06/2002	11.40		7.70		348.00	
17/06/2002	10.40		7.90		356.00	
24/06/2002	9.50		7.70		360.00	
01/07/2002	10.00		7.80		362.00	
08/07/2002	9.70		7.70		367.00	
15/07/2002	9.00		7.80		368.00	
18/07/2002	7.00		7.70		368.00	
19/07/2002	7.40		7.80		370.00	
22/07/2002	8.00		7.90		368.00	
29/07/2002	8.60		8.00		371.00	
05/08/2002	8.50		8.10		374.00	
12/08/2002	8.50		7.90		355.00	
14/05/2003	8.06	0.88	7.70	7.80	313.20	300.20
21/05/2003	8.06	0.74	7.80	7.80	325.80	307.90
28/05/2003	7.55	0.65	7.80	7.80	308.70	301.60
05/06/2003	6.73	0.67	7.70	8.00	353.70	335.90
12/06/2003	7.47	0.60	7.60	8.10	356.00	334.00
19/06/2003	6.99	0.58	7.70	8.20	353.00	328.00
26/06/2003	5.97	0.52	7.70	9.50	357.50	332.00
02/07/2003	5.83	0.47	7.80	8.60	389.50	360.00
09/07/2003	5.54	0.48	7.80	8.70	389.50	353.00
17/07/2003	5.03	0.46	8.00	9.00	391.00	356.00
24/07/2003	4.65	0.44	8.10	9.60	357.00	318.50
28/07/2003	4.63	0.44	8.00	9.90	396.50	353.50
07/08/2003	4.09	0.37	8.50	10.00	359.50	319.00
13/08/2003	3.96	0.33	8.90	10.40	375.00	327.50
18/08/2003	3.65	0.33	8.00	9.90	374.00	329.00
29/08/2003	3.00	0.33	8.40	10.30	334.00	333.90
11/09/2003	2.55	0.47	8.20	9.90	416.00	351.50
18/09/2003	2.49	0.44	8.30	9.60	406.50	347.00
24/09/2003	2.49	0.44	8.30	9.80	413.50	350.30
02/10/2003	2.38	0.40	8.30	9.90	428.00	364.00
08/10/2003	5.63	2.00	8.30	10.80	398.00	368.50
16/10/2003	6.41	0.89	8.20	9.80	389.00	344.00
03/11/2003	9.81	1.98	8.20	8.80	374.00	362.00
Moyenne	6.78	0.65	7.98	9.23	368.66	338.14

Source : RDA (2002 et 2004)

Tableau 3 : Evolution du débit, de la température et de la conductivité électrique aux captages des Arces et des Granges Mamet durant les étés 2002 et 2003

Les informations récoltées ne permettent pas de conclure sur l'origine des eaux captées. Selon Rampoux (RAMPNOUX, 2001), les eaux du Pont du Mouche, des

Favrats et de l'Epinguy auraient pour origine principale le réseau karstique et fissural des calcaires liasiques. Elles émergeraient dans les éboulis ou au contact avec la moraine argileuse. Au Pont du Mouche, il semble également que des apports sulfatés proviennent du gypse. Pour l'Epinguy, les eaux souterraines émergeraient à la faveur de l'entaille du thalweg, très pentu à l'émergence, et probablement de la présence sous-jacente d'horizons plus imperméables (moraine argileuse ou marno-calcaires du Lias supérieur et du Dogger)

#### 1.3.1.4. Le captage du Col du Feu

Le captage du Col du Feu se situe sur le flanc Nord-ouest du massif, sur la commune de Lullin, à une altitude de 1110 m. Le site est isolé dans un ancien marécage, progressivement transformé en hêtraie-sapinière, en contrebas de la route forestière de Trécout. La description détaillée des captages a été réalisé par Rampnoux (RAMPNOUX, 1987).

Aucun volume d'eau n'est mesuré. Rampnoux (RAMPNOUX, 1987) donne un débit moyen de  $5 \text{ l/s}^{-1}$  et un débit d'étiage de  $1.5 \text{ l/s}$ . Les analyses physico-chimiques sont peu abondantes. Nous observons les valeurs suivantes :

- Silice (mg/l) : de 9.1 (analyse DDASS du 12 octobre 1999)
- Magnésium (mg/l) : de 50.2 (analyse DDASS du 12 octobre 1999)
- Sulfates (mg/l) : de 534 (analyse DDASS de 1988 à 2005)
- Conductivités électriques à  $25^{\circ}\text{C}$  ( $\mu\text{S/cm}$ ) : de 1083 (analyse DDASS de 1988 à 2003)

Selon Rampnoux (RAMPNOUX, 1987), les eaux proviennent « *incontestablement de dissolution des gypses et des cargneules ; elles sont en effet, fortement chargées en sulfates* ». Les eaux sont donc non potables car le taux de sulfates est deux fois supérieur à la norme (décret n° 2001-1220 du 20 décembre 2001 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux minérales naturelles).

### 1.3.2. Etat sanitaire des ressources en eau potable

Le risque chimique est peu élevé sauf au captage du Col du Feu. Mais, le risque microbiologique existe du fait de la présence de faune sauvage, de bovin et humaine.

#### 1.3.2.1. Les données issues des analyses de la DDASS

Les informations sanitaires (paramètres microbiologiques et turbidité) issues des analyses de la DDASS, sont présentées sur la Figure 8. De manière générale, les valeurs observées :

- Aux captages des Moises, d'Orcier et de Ramble, sont satisfaisantes. Les contaminations microbiologiques sont peu nombreuses et les valeurs de turbidité sont faibles
- Au captage du Col du Feu, les informations récoltées laissent supposer une qualité microbiologique satisfaisante même si en août 1988, un pic de turbidité (17 NTU) et de coliformes thermotolérants (300/100 ml), a été observé. Rampnoux explique que cette « *forte turbidité est apparue le jour*

*où il y a eu un léger mouvement de terrain au droit de la piste forestière » (RAMPNOUX, 1987).*

- Aux captages des Arces et des Granges Mamet, la qualité microbiologique est variable et donc mauvaise. Aux Arces sur 20 analyses effectuées, la présence de coliformes fécaux a été observée à 12 reprises avec notamment un pic à 139 en juillet 2000. Aux Granges Mamet sur 8 analyses effectuées, la présence de coliformes fécaux a été détectée à 7 reprises avec un pic à 36 en juin 2001

Rampnoux (RAMPNOUX, 1999), évoque deux possibilités au captage des Arces :

- L'origine de la pollution est lointaine et se situe dans le secteur de Très le Mont. Les contaminations peuvent être d'origine bovine et/ou humaine (restaurant d'altitude notamment)
- L'origine de la pollution est proche et se situe dans le bassin-versant hydrographique du ruisseau des Arces. Les contaminations peuvent être d'origine humaine (exploitation forestière, assainissement des habitations en amont du captage) et/ou bovine

Afin de préciser l'origine géographique des contaminations, des études ont été effectuées (traçages, suivis bactériologiques, étude INRA).

#### 1.3.2.2. Les traçages d'essais

Un premier traçage a été réalisé au niveau des dispositifs d'assainissement des chalets situés au-dessus du captage des Arces en 1999 (BAPTENDIER, 2000). Cette étude a mobilisé 5 kg de rhodamine et a révélé le mauvais état des systèmes d'assainissement non collectif. Les colorations ont montré que les écoulements traversaient la route dans le secteur du captage mais aucune coloration n'a été observée dans les eaux captées après un suivi de 20 jours.

Un second traçage a été effectué en novembre 2000 par la RDA (RDA74, 2002) afin de préciser les relations hydrogéologiques entre le secteur de Très le Mont et les principales sources du Forchat. L'opération a mobilisé 5kg d'iodure de sodium, chassés avec 25 m<sup>3</sup> d'eau. Le traceur a été injecté dans la doline principale de Très le Mont. Les sources des Granges Mamet, des Arces et des Moises ont été équipées d'un préleveur automatique. Les échantillonnages ont été effectués toutes les 2 heures pendant 31 jours. Les résultats laissent apparaître :

- A la source des Arces. Des concentrations maximales de 2 µg/l, 8 jours après l'injection
- A la source des Granges Mamet. Des concentrations maximales de 2 µg/l 2 jours après l'injection
- A la source des Moises. Un 1<sup>er</sup> pic s'observe à 4 µg/l 2 jours après l'injection puis s'abaisse à 3 µg/l pendant 3 jours. Un second pic se présente 6 jours après l'injection, à 5 µg/l

Les conclusions du rapport soulignent que *« le traçage des eaux infiltrées dans le secteur de Très le Mont met en évidence l'absence de relation franche et directe entre le point d'injection et les différentes émergences surveillées. Comme tout traçage où la détection du traceur injecté dans les eaux des émergences surveillées n'est pas franche, il ne permet pas d'affirmer formellement l'absence de relation. (...) »*

*Dans l'hypothèse d'une contamination bactériologique en provenance du secteur de Très le Mont, les fortes contaminations bactériologiques relevées aux sources des Arces et les très faibles concentrations de traceur restitué ne sont pas cohérentes. » (RDA74, 2002).*

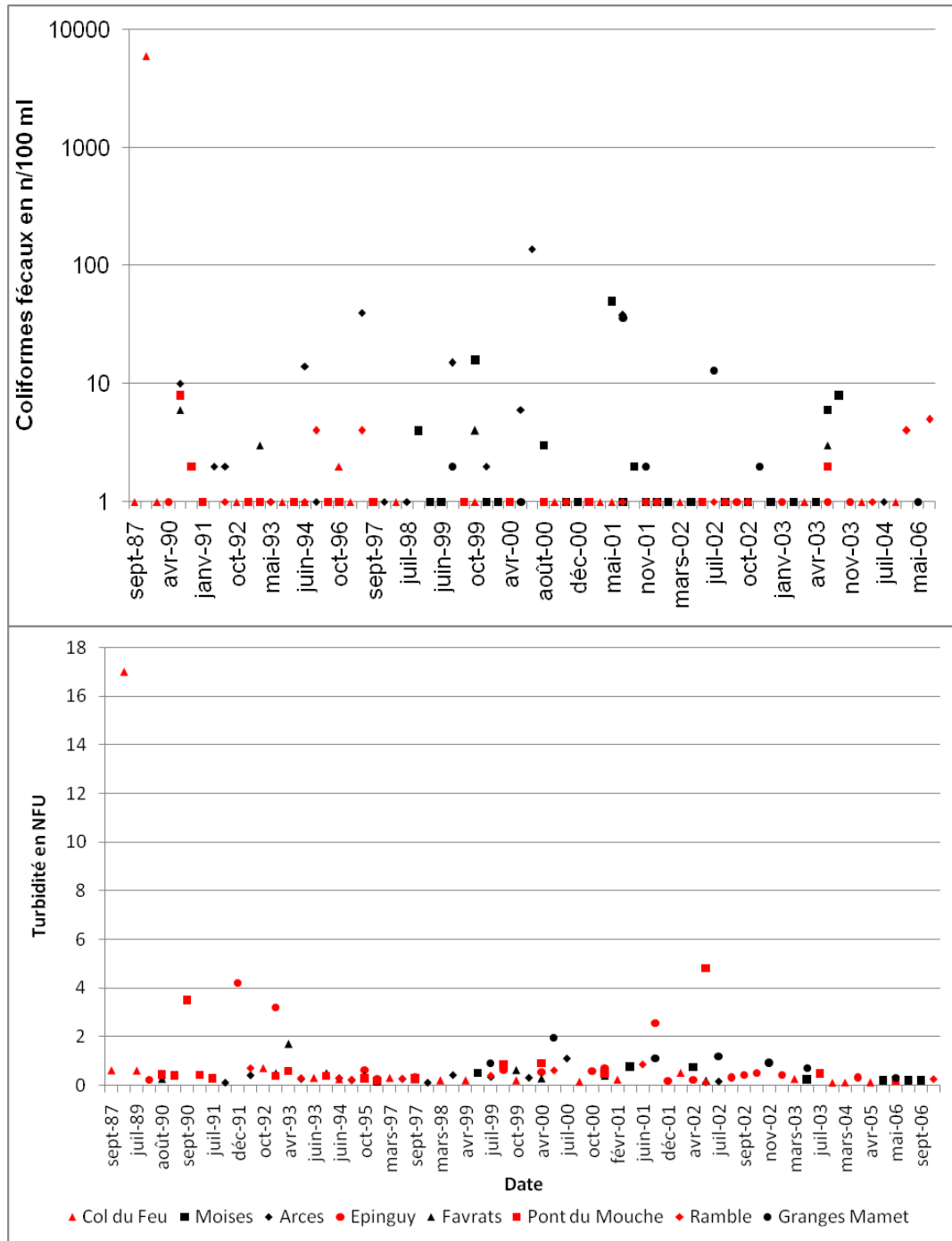


Figure 8 : Evolution de la turbidité et des coliformes totaux aux différents captages AEP du Forchat entre 1987 et 2006

### 1.3.2.3. Les suivis bactériologiques des captages des Arces et des Granges Mamet

Un suivi hebdomadaire de l'évolution bactériologique des eaux captées et des variations de l'activité humaine sur le bassin versant des Arces et des Granges Mamet a également été réalisés par la RDA (RDA74, 2002, 2004). Ces suivis ont été entrepris du 1<sup>er</sup> juin 2002 au 12 août 2002 et du 14 mai 2003 au 3 novembre 2003 au captage des Arces, et du 14 mai 2003 au 3 novembre 2003 au captage des Granges Mamet.

A la source des Arces, le 1<sup>er</sup> suivi semble indiquer que les contaminations observées sont liées « à une activité cyclique (cycle annuel), temporaire (une semaine à quinze jours), avec une charge polluante forte, concentrée, et très probablement localisée dans les environs immédiats de la source » (RDA74, 2004). Le second suivi réalisé met en évidence les éléments suivants :

- Une amélioration de la qualité bactériologique qui peut être lié au fait de l'absence de bétail sur le bassin versant topographique proche de l'émergence ou/et à l'absence de précipitations abondantes
- Les contaminations les plus importantes sont liées à des épisodes pluvieux sans augmentation significative du débit. Ce constat suggère une contamination liée à des infiltrations relativement proches de l'émergence
- Le passage de la contamination est rapide, calquée sur les précipitations
- Les précipitations importantes de fin septembre – début octobre 2002 ne sont pas suivies de contaminations

Aux Granges Mamet, le suivi réalisé met en évidence une contamination bactériologique chronique (7 analyses sur 23 sont conformes) en relation directe avec les précipitations. Les précipitations de faible intensité génèrent la présence d'entérocoques et de bactéries revivifiables. Les précipitations de forte intensité se caractérisent par une augmentation du débit et par la présence de coliformes totaux et thermotolérants.

Aux Arces, en l'« absence de contamination par les systèmes d'assainissement des chalets avoisinants, il est fort probable que ces contaminations soient liées à l'activité agricole (pâturage), à l'amont et à l'aval immédiat du captage » (Régie Départementale d'Assistance de la Haute-Savoie, 2004). Aux Granges Mamet, les observations indiquent que les contaminations sont liées à l'infiltration d'un volume d'eau significatif dans l'aquifère. Au vu de l'absence d'activité agricole sur le bassin versant immédiat de la source durant l'année, l'hypothèse d'une origine lointaine est possible en périodes de hautes eaux.

### 1.3.2.4. Etude « Origine des contaminations microbiologiques des captages des Arces et des Granges Mamet »

Dans l'objectif d'affiner les hypothèses émises par la RDA74, une étude a été menée par l'INRA de Thonon-les-Bains. Cette étude vise la définition de la part de responsabilité des différentes activités (bovine, humaine et faune sauvage) dans la contamination des sources des Arces et des Granges Mamet. La démarche mise en œuvre repose sur 4 étapes :

- L'isolement des souches représentatives humaines ou animales

- La mesure de leur résistance aux antibiotiques
- La création d'une typologie de référence des résistances animales ou bovines
- L'identification à posteriori de l'origine bovine, faune sauvage ou humaine des contaminations des eaux

L'isolement des souches représentatives s'est déroulé du 20 mai 2007 au 25 octobre 2007 avec les prélèvements, sur le mont Forchat, de :

- Fèces provenant de faune sauvage (lièvre, chevreuil, renard, fouine, renard, bouquetin, martre, blaireau et de chien)
- Bouses bovines
- Eau provenant des sorties des systèmes d'assainissement

Au total, 1900 souches d'entérocoques fécaux ont été isolées. 30 % d'entre elles sont d'origine humaine, 45 % sont de la faune sauvage et 25 % correspondent aux bovins.

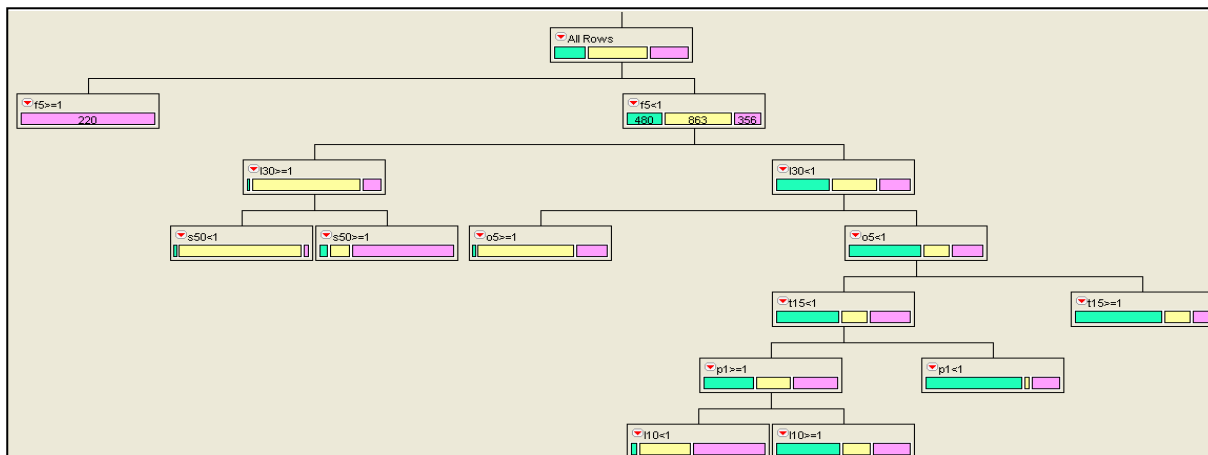
La résistance aux antibiotiques (amoxicilline, vancomycine, tétracycline, pénicilline G, cefaclor, spiramycine, lycomycine, ofloxacine, florfenicol) des entérocoques fécaux récoltés a été mesurée. Pour exemple, le Tableau 4 indique la résistance aux antibiotiques mentionnés pour des fèces de lièvre. Le chiffre 1 informe de la résistance et le chiffre 0 souligne la non-résistance. P01 signifie que l'antibiotique testé est la pénicilline G à une concentration de 0,1. P1 désigne que l'antibiotique testé est également la pénicilline G mais que la concentration est de 1.

	ech	cat	p01	p1	p10	p20	s5	s10	s30
1	lievre	FS	1	1	0	0	0	0	0
2	lievre	FS	1	1	0	0	0	0	0
3	lievre	FS	1	1	0	0	0	0	0
4	lievre	FS	1	1	0	0	0	0	0
5	lievre	FS	1	1	0	0	0	0	0
6	lievre	FS	1	1	0	0	0	0	0
7	lievre	FS	1	1	0	0	0	0	0
8	lievre	FS	1	1	0	0	0	0	0
9	lievre	FS	1	1	0	0	0	0	0
10	lievre	FS	1	1	0	0	0	0	0

Source : INRA, 2008

Tableau 4 : Exemple de mesure de la résistance aux antibiotiques pour des fèces de lièvre

A partir des mesures de résistance aux antibiotiques des entérocoques fécaux, un arbre de classement a été dressé (cf. Figure 9). Chaque branche correspond à un type homogène de réponse. Pour chaque branche, le nombre de souches provenant des origines humaine, bovine ou faune sauvage, a été dénombré. Pour la plupart des branches, les souches ont la même origine. Pour certaines branches, les souches ont des origines différentes ce qui se traduit par des incertitudes de détection (sous-estimation et/ou surestimation). Le Tableau 5 présente les résultats des sous-estimations et des surestimations en fonction de l'origine.



Source : INRA, 2008

Figure 9 : Arbre de classement de la résistance aux antibiotiques des souches d'entérocoques fécaux

Origine	Surestimation	Sous-estimation
Bovine	32 %	5 %
Faune sauvage	11 %	19 %
Humaine	11 %	40 %

Source : INRA, 2008

Tableau 5 : Les incertitudes de détection des souches d'entérocoques fécaux en fonction de leur origine

De fin octobre 2007 à début avril 2008, il a été réalisé 13 prélèvements au Granges Mamet et 14 aux Arces. Le Tableau 6 présente les résultats des analyses. La méthode est précise lorsqu'un nombre suffisant d'entérocoques sont détectées dans l'échantillon (96 entérocoques repiqués signalent une forte contamination de l'eau, situation favorable à l'application de la méthode). Il y a donc 2 analyses dans ce cas pour les Arces (le 3/12/2007 et le 7/01/2008) et 5 pour les Granges Mamet (le 3/12/2007, le 6/02/2008, le 19/02/2008, le 12/03/2008 et le 3/04/2008).

La Figure 10 retrace l'évolution de l'origine humaine, bovine ou faune sauvage, des contaminations microbiologiques durant la période de suivi. Les flèches rouges indiquent les dates où 96 colonies d'entérocoques repiqués ont été atteintes et où la précision sur l'origine est forte. Les résultats exposés démontrent que la faune sauvage constitue le principal émetteur des pollutions bactériologiques avec 68 % des contaminations aux Granges Mamet et 48 % aux Arces. Le réservoir humain représente 19 % des pollutions bactériologiques aux Granges Mamet et 33 % aux Arces. Les bovins constituent 13 % des pollutions bactériologiques aux Granges Mamet et 19 % aux Arces.

Dates	Granges Mamet			Arces		
	E.coli cfu.100ml <sup>-1</sup>	entero cfu.100ml <sup>-1</sup>	entero repiqués	E.coli cfu.100ml <sup>-1</sup>	entero cfu.100ml <sup>-1</sup>	entero repiqués
13/11/2007	nd	2	8	nd	0	1
26/11/2007	2	2	14	1	1	4
03/12/2007	48	150	96	40	20	96
11/12/2007	2	2	14	0	1	4
07/01/2008				50	20	96
08/01/2008	4	2	28			
21/01/2008				0	0	
28/01/2008	0	1	8	0	0	
06/02/2008	3	20	96	1	1	
19/02/2008	0	10	96	0	0	
27/02/2008	1	2	24	0	0	1
05/03/2008	0	2	24	0	1	1
12/03/2008	11	16	96	2	3	24
20/03/2008	1	1	19	0	0	1
03/04/2008	1	15	96	0	0	1

Source : INRA, 2008

Tableau 6 : Résultats des analyses bactériologiques aux captages des Arces et des Granges Mamet, durant la période de suivi

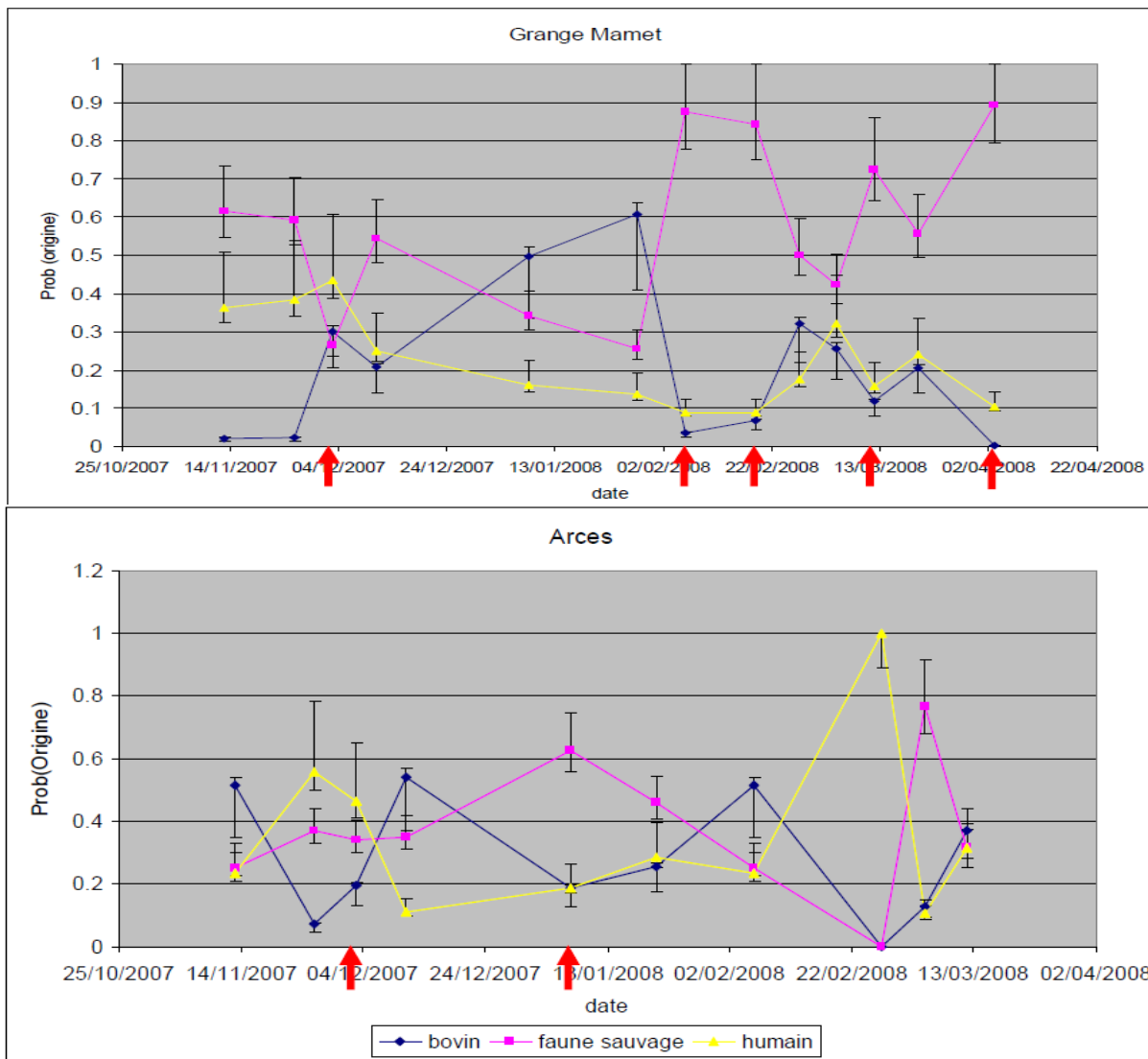
	Bovins	Faune sauvage	Humains
Granges Mamet	13 %	68 %	19 %
Arces	19 %	48 %	33%

Source : INRA, 2008

Tableau 7 : Origine des contaminations microbiologiques aux captages des Arces et des Granges Mamet

Cette étude a fait l'objet d'une présentation aux élus locaux. La discussion qui a suivie a permis de souligner :

- L'absence de mesure de la résistance aux antibiotiques de fèces de sangliers alors que leurs présences sur le secteur sont connues
- Les suivis bactériologiques ont été réalisés d'octobre 2007 à début avril 2008. Dans cette période, les activités humaines et agricoles sont faibles



Source : INRA, 2008

Figure 10 : Evolution de l'origine des contaminations microbiologiques aux captages des Arces et des Granges Mamet durant la période de suivi

## 1.4. Problématique de l'étude

### 1.4.1. Problématique générale

Les intersections entre les grands accidents tectoniques et les placages morainiques sont souvent des lieux de convergence d'eaux souterraines, profondes et superficielles, circulant dans les versants encadrant les vallées. Le massif du Forchat en est un exemple.

En effet, la présentation du cadre géographique et géologique ainsi que la synthèse des études hydrogéologiques menées indiquent une structure géologique caractérisée par une succession de plis symétriques souples dont l'anticlinal du Forchat. Le cœur de l'anticlinal est formé par les terrains du Trias supérieur (dolomies blondes, cargneules et argilites vertes). Les flancs sont constitués par les terrains du Lias comprenant, à la base une alternance de schistes noirs et de bancs calcaires dolomitiques du Rhétien, puis par les calcaires grossiers du Lias inférieur à moyen. Ces calcaires supportent à la base de la structure, une épaisse série de marnes et calcaires argileux du Lias supérieur et du Dogger.

Le pli anticlinal plonge du nord nord-est au sud sud-ouest. Le cœur à « *cargneules* » passe par Très le Mont (1350 m.), les Granges Mamet (1159 m.) et par Doucy (1050 m.). Au nord, la structure est affectée par une faille décrochante de direction sud-sud-ouest nord-nord-est qui individualise probablement l'anticlinal du Forchat du reste de la chaîne des Hermônes. Les terrains du substratum sont partiellement masqués, sur les versants et le fond des vallées, par des formations superficielles et en particulier, des éboulis et des moraines argilo-détritiques.

Il en résulte que d'importantes ressources souterraines se localisent :

- Dans le réseau de dissolution des dolomies, des cargneules et du gypse, perméables en grand (porosité de chenaux et de fissures)
- Dans le réseau karstique et fissuré des calcaires liasiques également perméable en grand (réseau diffus et connecté du fait du gros degré de fissuration, de la présence de joints de stratification et de diaclases)

Les deux aquifères potentiels sont individualisés par les schistes du Rhétien mais l'épaisseur de cette formation est relativement modeste (20 à 25 m.). Ainsi, une relation entre les deux aquifères est possible.

L'étude du système hydrogéologique du Forchat se fait en partenariat financier avec l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse, la région Rhône-Alpes, le département de la Haute-Savoie et les propriétaires de la ressource, à savoir : le Syndicat Intercommunal des Eaux des Moises, la commune d'Habère-Poche et la commune de Lullin. Participent également à ces travaux l'Agence Régionale de Santé de Rhône-Alpes par l'intermédiaire de la délégation départementale de la Haute-Savoie, l'Office National des Forêts, la Chambre d'agriculture de la Haute-Savoie, le CRPF, ...

Les éléments de compréhension, amenés par cette étude, serviront de bases pour répondre aux questions de ces acteurs. Ces questions concernent non seulement des aspects pratiques :

- Quel est le degré de vulnérabilité du système hydrogéologique ?
- Quelles en sont les conséquences pour la gestion et l'exploitation de la ressource ?
- Quelles sont les conséquences de l'exploitation de la ressource sur les milieux aquatiques ?

Mais également des aspects fondamentaux plus généraux, nécessaires à la communication envers la population locale et qui peuvent se résumer ainsi : « *Pourquoi une ressource hydrogéologique de cette nature existe-t-elle sur le massif du Forchat ?* »

#### 1.4.2. La problématique de l'étude des aquifères fissurés karstiques

Les eaux souterraines sont contenues dans des aquifères de type fissuré et/ou karstique (cf. Figure 11). Les premiers sont des milieux discontinus et anisotropes qui se caractérisent par des réseaux de discontinuités. Ils affectent un massif rocheux, le plus souvent peu perméable. L'eau suit les discontinuités ouvertes, diaclases, fractures et joints de stratification, qui forment un réseau continu plus ou moins ramifié. La vitesse d'écoulement dépend de l'ouverture des fissures, de leur fréquence et de leur degré d'interconnexion (cf. Tableau 8). La capacité d'emmagasinement reste la plupart du temps faible et la capacité d'autoépuration des roches fissurées dépend du degré de fracturation. Si l'ouverture des fissures est importante, donc si les vitesses d'écoulement sont élevées, les substances polluantes éventuelles sont insuffisamment filtrées et adsorbées (cf. Figure 11). Ce type d'aquifère est particulièrement vulnérable en l'absence de couches de couvertures superficielles.

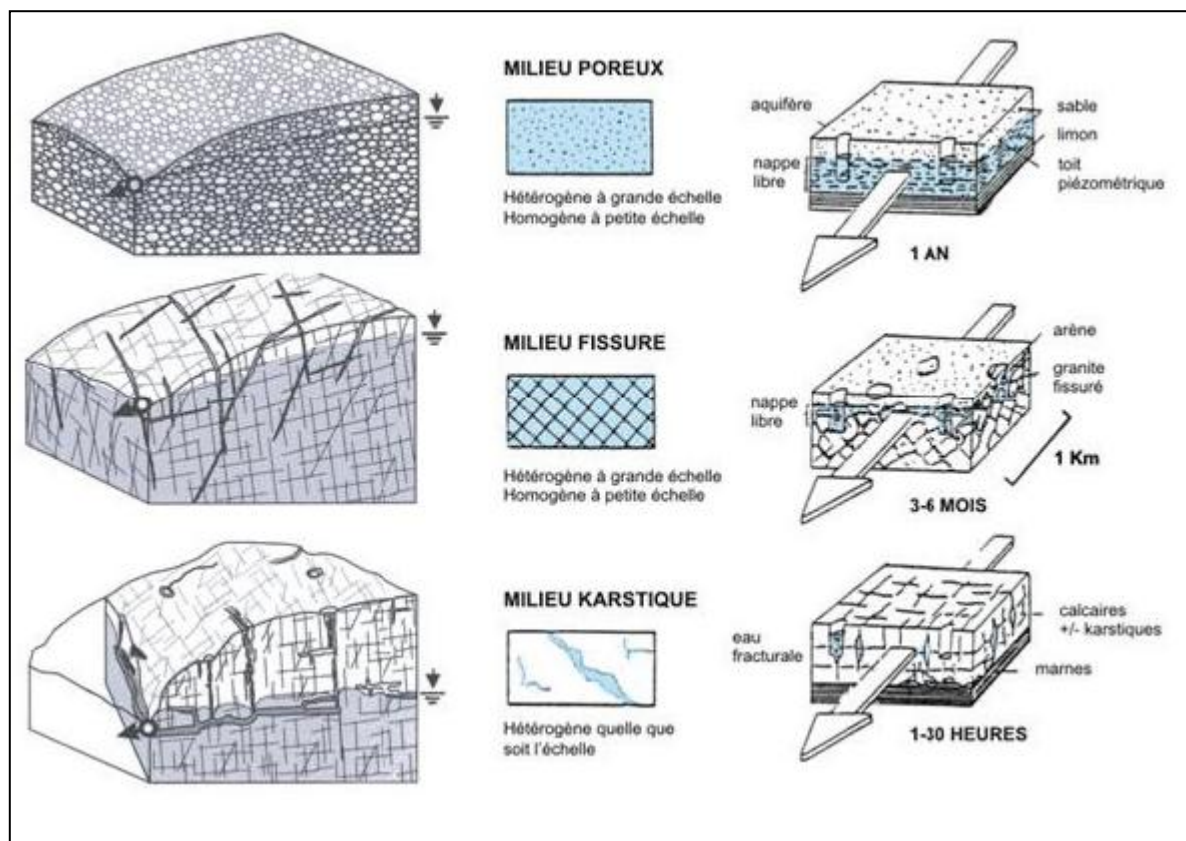
Le terme « *karst* » se définit comme un « *paysage résultant de processus particuliers d'érosion (la karstification). Ces processus sont commandés par la dissolution des roches carbonatées (calcaires et dolomies) constituant le sous-sol des régions concernées. C'est l'eau de pluie infiltrée dans ces roches qui assure cette dissolution. L'eau acquiert l'acidité nécessaire à la mise en solution de la roche en se chargeant de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) produits dans les sols par les végétaux et les colonies bactériennes. (...). Le karst est par conséquent un paysage original créé par les écoulements d'eau souterraine. L'eau circule en son sein, s'y accumule et émerge par des sources aux débits souvent considérables mais très fluctuants dans le temps. **Le karst est donc également un aquifère : l'aquifère karstique** » (Agence de l'Eau R-M-C, 1999)*

La karstification a pour moteur des processus chimiques (dissolution des minéraux) et physiques (énergie hydraulique potentielle entre le bassin versant et l'émergence). Ce phénomène permet à une formation carbonatée fracturée, l'aquifère carbonaté fissuré, caractérisé par une structure géologique propre, d'évoluer en aquifère karstique. « *L'aquifère karstique est le seul type d'aquifère où c'est la circulation d'eaux dans la formation géologique qui façonne les vides de l'aquifère et induit des caractéristiques aquifères spécifiques.* » (Agence de l'Eau R-M-C, 1999)

Echelle	Types de vides			Types de milieux	
	Microscopique (de 0.1 à 1 mm)	Pores	Intercristaux et intergrains		Poreux
Microfissures		Diaclases, joints et schistosité		Fissuré	
Macroscopique (supérieur à 1 mm)	Macrofissures	Chenaux et cavités	Karst		

Source : CASTANY, 1982

Tableau 8 : Classification hydrogéologique des réservoirs et leurs échelles de référence



Source : LALLEMAND-BARRES & ROUX, 1999

Figure 11 : Représentation schématique des trois types de réservoirs et des vitesses d'écoulements dans les aquifères

Les processus physico-chimiques sont en partie soumis à la capacité des minéraux formant les roches calcaires (calcite, aragonite, magnésite, dolomite), à être dissous dans l'eau. Cette capacité se traduit par une valeur, appelée « *valeur de constante de dissociation* ». Plus la valeur est forte, plus la solubilité du minéral est grande. Dans l'eau pure, les constantes de dissociation des principaux minéraux des roches carbonatées sont très faibles (cf. Tableau 9). Cependant, la présence de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) provoque une augmentation de l'acidité du milieu et accélère la dissolution des carbonates.

La karstification est donc un processus en perpétuelle évolution. « *Dans le cas de karst classiques, sans interactions avec l'eau de mer ou non affectés par la remontée de CO<sub>2</sub> profond, ce phénomène dépend essentiellement de deux paramètres :*

- Le potentiel de karstification, lié aux conditions climatiques (précipitations et CO<sub>2</sub> du sol) ainsi qu'à la géométrie du réservoir et l'existence d'un gradient
- La structure interne du massif : lithologie, fracturation, porosité
- Le CO<sub>2</sub> du sol. Il provient de la respiration racinaire et de la dégradation de la matière organique du sol par l'activité bactérienne. C'est le principal moteur de la karstification
- La lithologie et la texture de la roche. Plus la roche sera riche en dolomite, plus la mise en solution sera longue
- La fracturation » (BATIOT, 2002)

Minéral	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	Aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	Magnésite (MgCO <sub>3</sub> )	Dolomite (CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )
Constante de dissociation	3.8 x 10 <sup>-9</sup>	6.09 x 10 <sup>-9</sup>	5.75 x 10 <sup>-9</sup>	Environ 10 <sup>-17</sup>

Source : BAKALOWICZ, 1979 in REY, 2007

Tableau 9 : Valeurs de la constante de dissociation des principaux minéraux des roches carbonatés dans l'eau pure

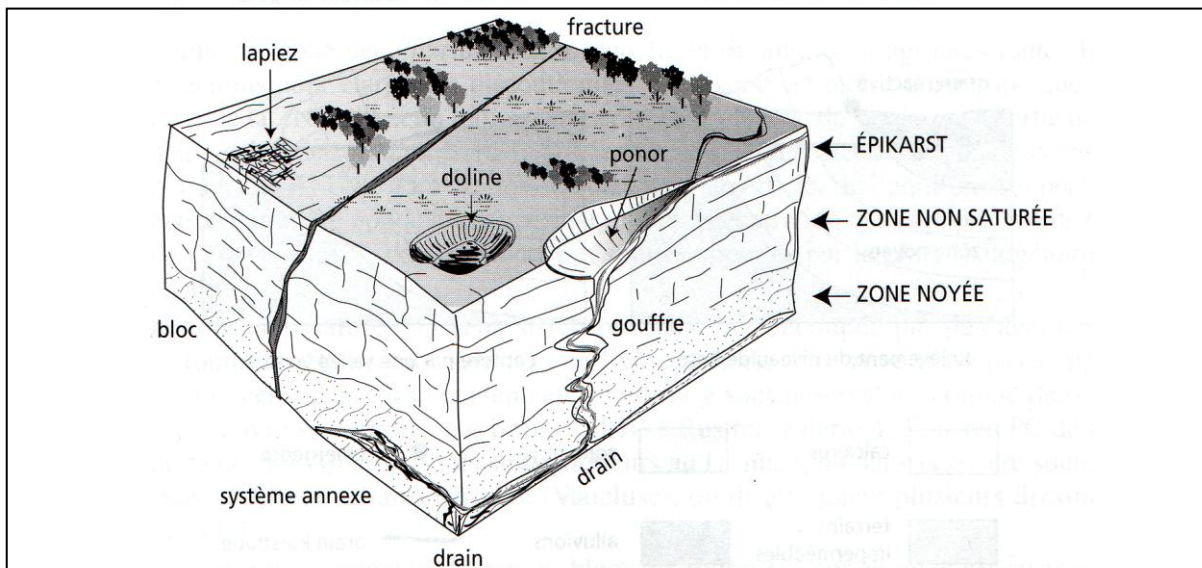
La structure du karst s'apparente à un réseau souterrain. Les faibles écoulements de l'amont confluent vers l'aval pour donner des drains de plus en plus importants mais de moins en moins nombreux. Verticalement, la structure du karst se caractérise par une zone non saturée à structure différenciée (cf. Figure 12). Du haut vers le bas, on distingue :

- L'épikarst (ou zone de dégazage). Il s'agit d'une zone décomprimée située à une dizaine de mètres sous la surface du sol. Il constitue un aquifère proche de la surface qui diffère l'infiltration par stockage sous forme de nappes perchées locales et discontinues. Les eaux stockées sont reconcentrées par évapotranspiration pouvant entraîner une augmentation des teneurs en Cl<sup>-</sup> et Na<sup>+</sup> (BATIOT, 2002). Ces nappes sont drainées soit par des vides larges (ruissellement souterrain rapide), soit par des vides de petites dimensions (infiltration lente écoulant un mélange d'eau et d'air). Si l'infiltration et le transit de l'eau sont rapides dans l'épikarst alors le potentiel de karstification est favorisé dans la zone noyée
- La zone non saturée (ou zone d'infiltration). Il s'agit d'une zone hétérogène qui assure le transfert des eaux d'infiltration par un nombre réduit de conduits karstiques. La vitesse d'infiltration sera fonction de la taille et de la verticalité des conduits empruntés
- La zone saturée (ou noyée). Il s'agit d'une zone qui correspond globalement à la « nappe » dans un aquifère poreux. Elle est alimentée par l'intermédiaire des conduits de la zone d'infiltration. Le drainage peut être assuré soit par une matrice micro-fissurée en connexion avec des conduits drainants perméables, soit par des systèmes annexes au drainage (SAD) c'est-à-dire des grands vides connectés au réseau de conduits

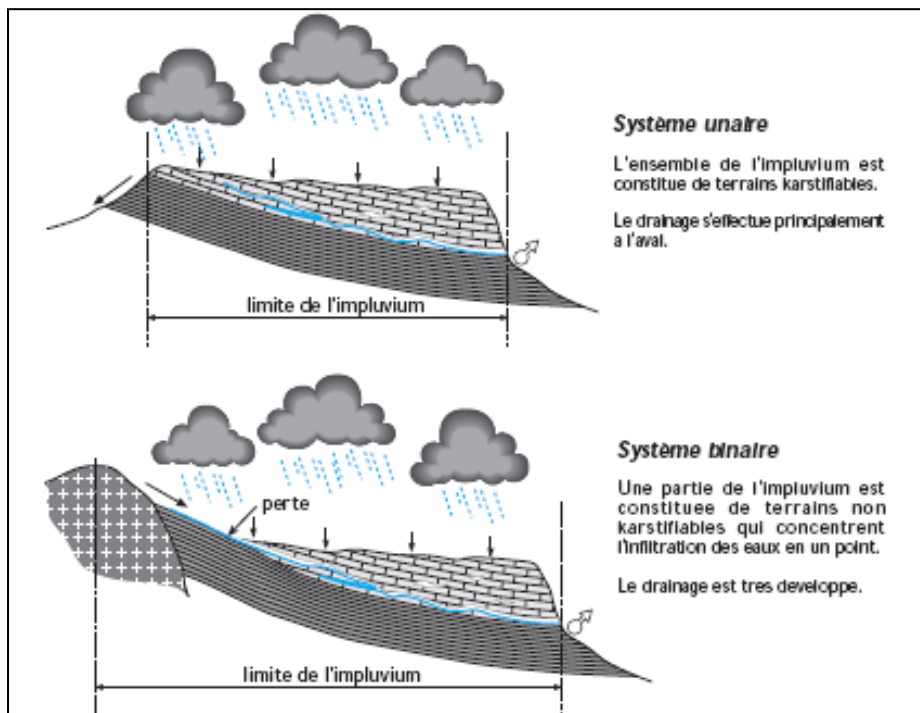
Selon la nature de l'impluvium, on distingue (cf. Figure 13) :

- Les karsts unaires, pour lesquels l'ensemble de l'impluvium est constitué de terrains karstiques. L'infiltration peut être lente ou rapide
- Les karsts binaires, pour lesquels l'impluvium comprend des terrains non karstiques et imperméables. Les écoulements de surface se concentrent et s'infiltrent au niveau de pertes situées au contact d'une formation

imperméable et des formations calcaires. Ce fonctionnement a pour conséquence d'accélérer le développement de la structure drainante



Source : GILLI, MANGAN, & MUDRY, 2004  
Figure 12 : Modelé karstique et fonctionnement hydrogéologique



Source : Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, 1999  
Figure 13 : Systèmes karstiques en fonction de la nature de l'impluvium

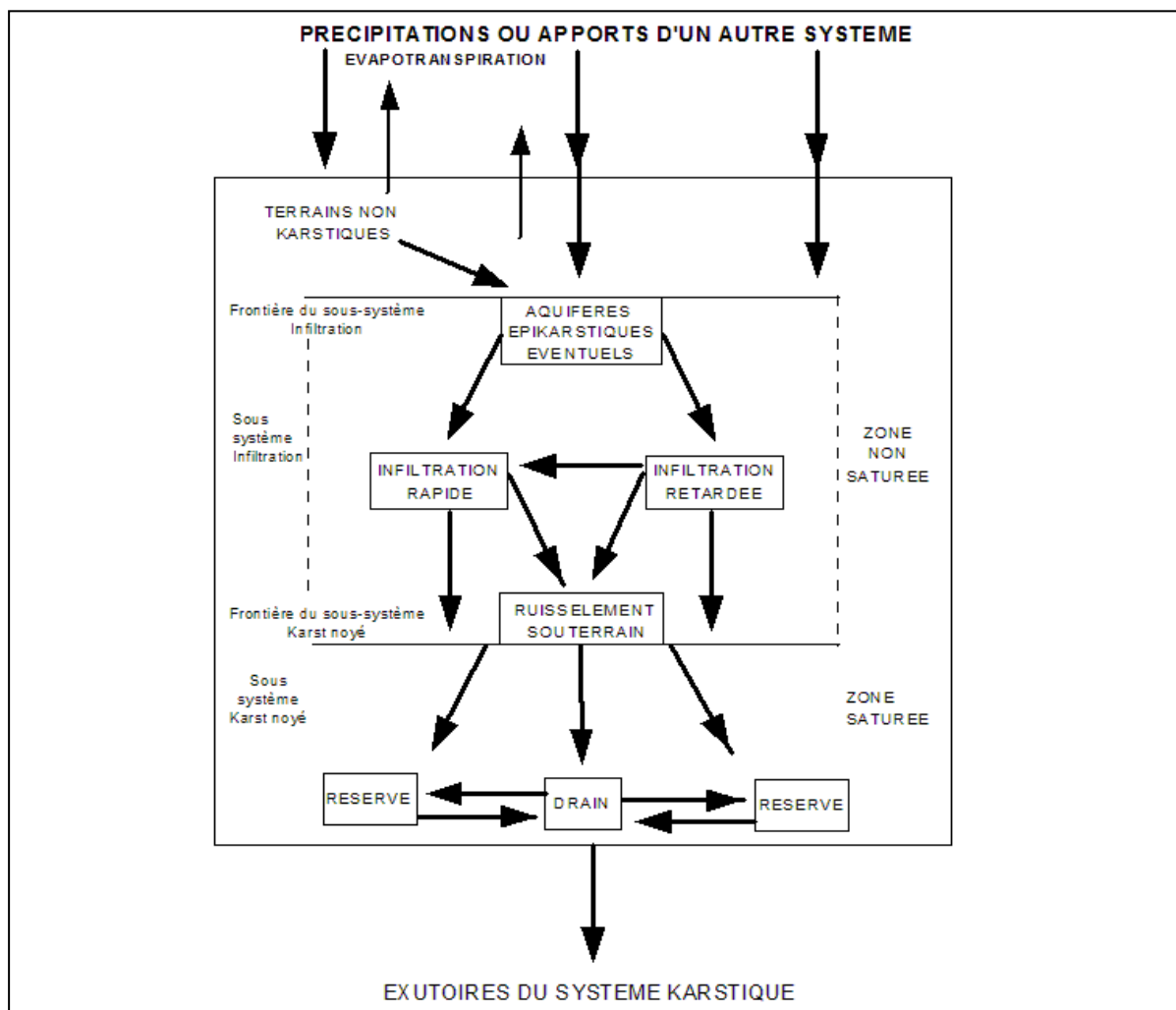
La qualité des eaux souterraines issues d'aquifères fissurés karstiques, est variable (faible rôle filtrant de la zone d'infiltration, faibles effets de dispersion et de dilution, court temps de séjour de l'eau). En contrepartie, cette vulnérabilité apparente présente certains caractères intéressants :

- Elimination généralement rapide des pollutions accidentelles
- Effets retardateurs (adsorption, dispersion) en général réduits

- Amélioration rapide de la qualité de l'eau. Les effets cumulatifs d'un cycle sur le suivant sont faibles ou négligeables, du fait du temps de séjour très souvent inférieur à un an
- Nette différence de qualité et de comportement entre les périodes d'étiage (fonctionnement capacitif, temps de séjour long) et de crue ou de hautes eaux (fonctionnement transmissif, temps de séjour court)

La schématisation du système karstique (Figure 14) permet de visualiser :

- Les frontières du système. Le système karstique est à la fois isolé et inclus dans un environnement. Les frontières permettent de caractériser les entrées (les précipitations) et les sorties (l'évapotranspiration et les exutoires)
- Des éléments (...) qui communiquent entre eux par un réseau
- Des réservoirs dans lesquels de l'eau peut être stockée
- Des flux qui circulent dans les divers réseaux et transitent dans les réservoirs du système
- Des délais



Source : MANGIN (1975) In BATIOT (2002)  
 Figure 14 : Schématisation d'un système karstique

## **CHAPITRE 2. OUTILS DE CARACTERISATION ET MOYENS MIS EN ŒUVRE**

La seconde partie présente les outils de caractérisation utilisés dans la présente étude et les moyens qui ont été mis en œuvre pour permettre l'application des outils.

## 2.1. Les principaux outils de caractérisation des aquifères fissurés karstiques

La fissuration et la karstification entraînent des comportements hydrauliques variés. Les blocs microfissurés sont proches du milieu poreux et les drains s'apparentent au milieu fracturé. L'étude des aquifères fissurés karstiques induit la mise en œuvre d'outils d'analyse de types hydrodynamiques et hydrogéochimiques.

### 2.1.1. Les outils hydrodynamiques

Nous présentons trois outils de type hydrodynamique (bilan hydrologique, analyse des débits classés et analyse des courbes de récession) dans le but d'identifier leurs intérêts, leurs limites et les besoins en informations qu'ils supposent.

#### 2.1.1.1. Bilan hydrologique

Un bilan hydrologique repose sur l'évaluation pour une période donnée (généralement un cycle hydrologique afin de s'affranchir de la variation des réserves) du volume d'eau écoulé à l'exutoire (**V**) et du volume des précipitations (**P**) qui semble alimenter le système. Cette opération nécessite de calculer les précipitations efficaces (**P<sub>eff</sub>**) c'est-à-dire la quantité d'eau fournie par les précipitations disponibles pour alimenter le système après soustraction des pertes par évapotranspiration réelle (**ETR**). Les précipitations efficaces sont déterminées le plus souvent au pas de temps mensuel. Pour le calcul de l'**ETR**, plusieurs formules existent dont celle de Turc mensuel qui semble être la plus usitée car en utilisant uniquement les données de précipitations et de températures, elle s'affranchit de certains paramètres climatiques. Elle permet d'estimer le déficit d'écoulement (**D**). Elle est donnée par la formule suivante :

$$D = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad \text{Avec } L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

Dans cette formule, **P** représente les précipitations en mm et **T** est la température (en °C) moyenne de l'air. La surface d'alimentation est alors estimée en appliquant le rapport suivant :

$$S_{\text{alimentation}} = V / (P - D)$$

Ainsi, un bilan hydrologique permet d'estimer la surface d'alimentation d'une source et/ou d'un cours d'eau. Son utilisation se heurte à des problèmes méthodologiques (localisation des stations de mesures, nature des mesures, fréquence et répétitivité des mesures) et métrologiques (représentativité et validité de la mesure)

#### 2.1.1.2. Analyse des courbes de récession

Cette analyse consiste à décomposer l'hydrogramme d'une crue en deux parties : la crue (montée du débit) et la récession (diminution du débit). Elle considère le système comme une « *boîte grise* » constitué de réservoirs se vidangeant les uns dans les autres. Deux parties se distinguent dans les courbes de récession, à savoir :

la décrue, période durant laquelle l'infiltration influence la vidange du réservoir, et le tarissement, qui débute à l'instant où le débit d'infiltration devient nul.

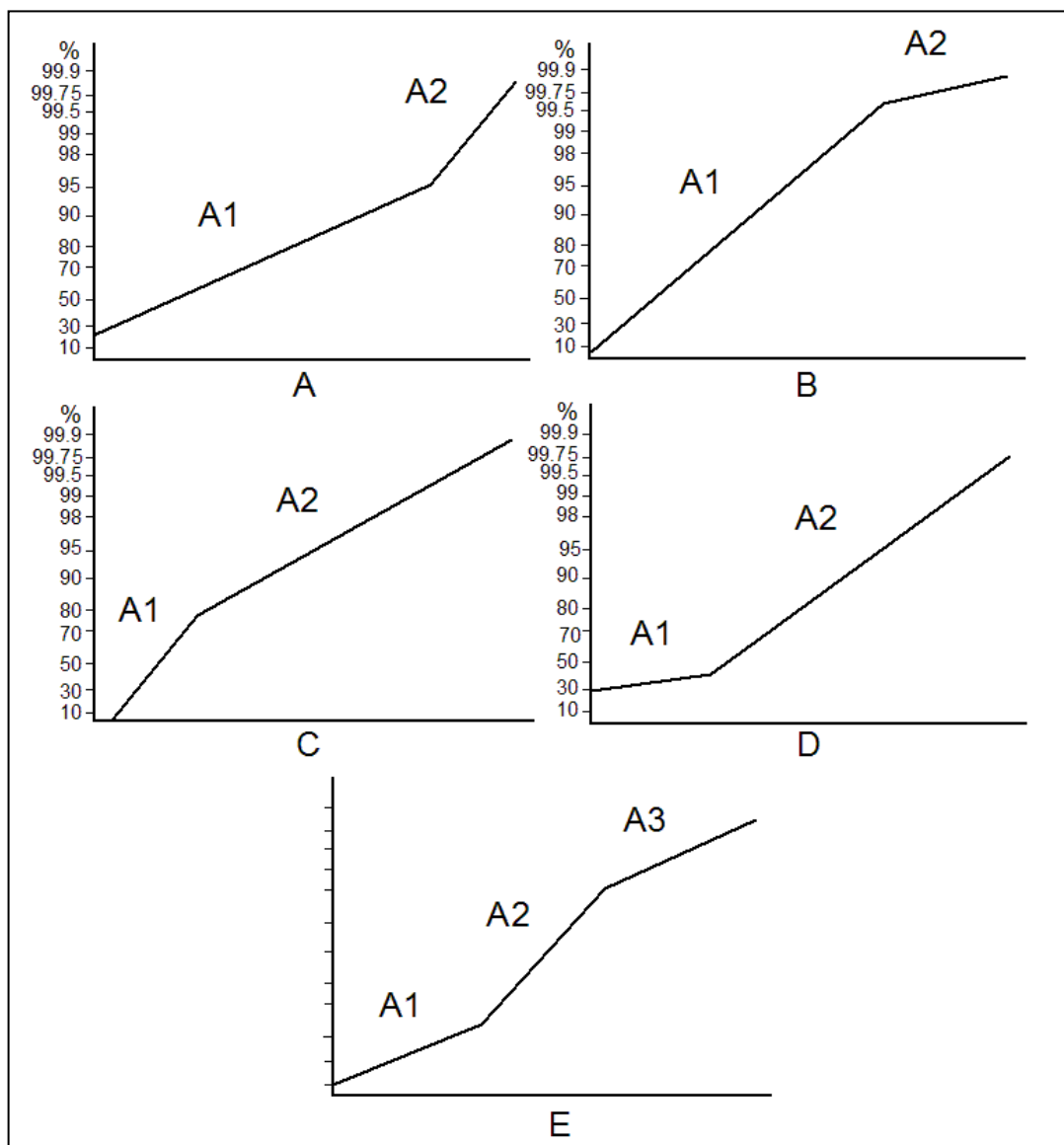
L'ajustement des paramètres de la loi décrivant la récession permet à la fois de caractériser le fonctionnement de la zone d'infiltration et d'estimer le volume d'eau contenu dans le réservoir. Cette approche permet d'apprécier la présence d'une zone noyée et l'importance des réserves qu'elle contient. Le plus souvent, la courbe de récession est décomposée en trois fonctions exponentielles. Chaque fonction caractérise un régime d'écoulements. Cette méthode permet de calculer les réserves de tarissement ou « *réserves écoulables* ». Ces réserves correspondent à la vidange des volumes peu perméables.

### 2.1.1.3. Analyse des débits classés

Appliquée par Mangin (MANGIN, 1971), l'analyse des débits classés met en évidence les spécificités du comportement hydrodynamique des sources telles que l'existence de trop-pleins, de stockages et de déstockages, d'apports ou de fuites d'eau. L'analyse repose sur le classement par ordre décroissant des débits journaliers et le regroupement en classes. Pour chaque classe, le pourcentage de jours est calculé et une courbe « *cumulative de fréquences* » est construite. L'interprétation des graphes repose sur l'identification des modifications de la pente de la droite représentative. Les principaux cas de rupture de pente de la droite et leur interprétation sont présentés sur le Tableau 10 et la Figure 15. Dans certains cas, plusieurs interprétations peuvent être formulées. Dès lors, il s'agit de mettre en œuvre d'autres méthodes d'investigation qui permettent d'affiner l'interprétation.

Cas	Pentes des droites	Position de la rupture	Interprétation
A	$\alpha_2 > \alpha_1$	Forts pourcentages	Mise en fonctionnement de trop-plein Fuite vers un autre système Stockage momentané Fuite ou débordement de la station de jaugeage
B	$\alpha_2 < \alpha_1$		Apports en provenance d'un autre système La station de jaugeage prend en compte lors des crues des écoulements n'appartenant pas au système
C	$\alpha_2 < \alpha_1$	Faibles pourcentages	Apports d'une réserve issue d'un cycle antérieur
D	$\alpha_2 > \alpha_1$		Constitution d'une réserve
E	$\alpha_2 > \alpha_1$ $\alpha_3 > \alpha_2$	Double rupture	Piégeage d'une réserve lors de la décrue et restitution au cours du tarissement

Source : VERNOUX, WUILLEMIER, SEGUIN, & DOERTFLIGER, 2007  
Tableau 10 : Interprétation des ruptures de pente de la droite des débits classés



Source : VERNOUX, WUILLEMIER, SEGUIN, & DOERTFLIGER, 2007  
 Figure 15 : Différents cas de rupture de pente de la droite représentative des débits classés

## 2.1.2. Les outils hydrogéochimiques

Dans ce paragraphe, nous présentons tout d'abord les principes généraux des outils hydrogéochimiques puis nous nous intéressons à l'étude des paramètres de l'équilibre calco-carbonique et à l'étude des paramètres isotopiques. Ensuite, nous décrivons les paramètres inclus dans le plan d'échantillonnage. Enfin, nous définissons la périodicité des mesures.

### 2.1.2.1. Principes généraux et cas des aquifères fissurés karstiques

Dans le milieu naturel, l'eau est contrainte par la gravité et elle circule au sein des milieux rocheux pour se frayer un chemin vers le point d'exutoire. Ce faisant, elle interagit avec les minéraux des roches à travers une série d'équilibres chimiques qui la poussent soit à les dissoudre, soit au contraire à précipiter de nouveaux minéraux

à partir de ses éléments dissous. Le contenu géochimique d'une eau constitue donc une signature d'un environnement naturel. En d'autres termes, la connaissance du signal géochimique permet de retracer le cheminement et l'histoire de l'eau.

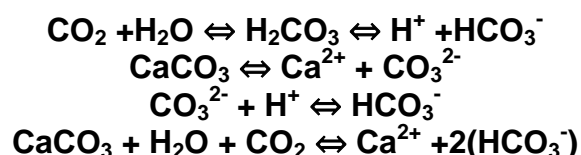
Pour les aquifères fissurés karstiques, les concentrations des échantillons prélevés en étiage permettent de caractériser la signature géochimique de l'eau contenue dans la partie capacitive de la zone noyée. En période de crue, les débits mesurés peuvent être expliqués comme le résultat de la superposition de différents écoulements distincts comme par exemple :

- Un écoulement de base assuré par le drainage des systèmes annexes au drainage (SAD) de la zone noyée
- Un écoulement épikarstique assuré par le drainage plus ou moins rapide de l'eau contenue dans un réservoir épikarstique
- Un écoulement rapide assuré par des conduits plus ou moins verticaux directement connectés avec le système de drainage de la zone noyée (le réservoir épikarstique est court-circuité)

De manière générale, les différentes contributions d'eau sont rattachées à des signatures géochimiques distinctes. L'étude géochimique permet d'obtenir des informations sur les modalités d'écoulement des eaux et donc d'appréhender la structure et le fonctionnement des aquifères.

#### 2.1.2.2. Etude des équilibres calco-carboniques

L'état du système calco-carbonique ( $\text{Ca}^{2+} - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{HCO}_3^-$ ) commande la karstification. Le  $\text{CO}_2$  se présente sous forme gazeuse et l'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) d'infiltration est liquide. La phase solide est constituée par les carbonates de la roche ( $\text{CaCO}_3$ ). La réaction de dissolution ou de précipitation d'un carbonate est un ensemble d'équilibres réversibles (cf. Figure 16). Elle fait intervenir plusieurs réactions d'équilibre entre les trois phases :



Le passage du  $\text{CO}_2$  gazeux en  $\text{CO}_2$  dissous (ou libre) entraîne une chaîne de réactions qui aboutit à la dissolution des carbonates. La teneur en  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère permet aux eaux de surface de dissoudre les calcaires à l'affleurement mais elle est trop faible pour poursuivre le processus de karstification plus en profondeur. En conséquence, le  $\text{CO}_2$  introduit au sein de l'aquifère karstique provient des nombreux phénomènes pédologiques ayant lieu à la surface et dans l'épikarst. La respiration des organismes et micro-organismes vivant dans les sols, ainsi que la dégradation de la matière organique produisent du  $\text{CO}_2$  gazeux avec des teneurs pouvant atteindre cent fois celle de l'atmosphère. Le  $\text{CO}_2$  gazeux est ensuite dissout dans l'eau lors de la percolation. L'état d'équilibre calco-carbonique d'une solution peut être défini par deux paramètres :

- La  $p\text{CO}_2$  équilibrante qui correspond à la pression partielle de la phase gazeuse fictive associée à la solution, dont la minéralisation ( $\text{HCO}_3^-$ ) et le

pH sont donnés, pour laquelle chacun des équilibres serait atteint. Elle est donnée par la formule suivante :

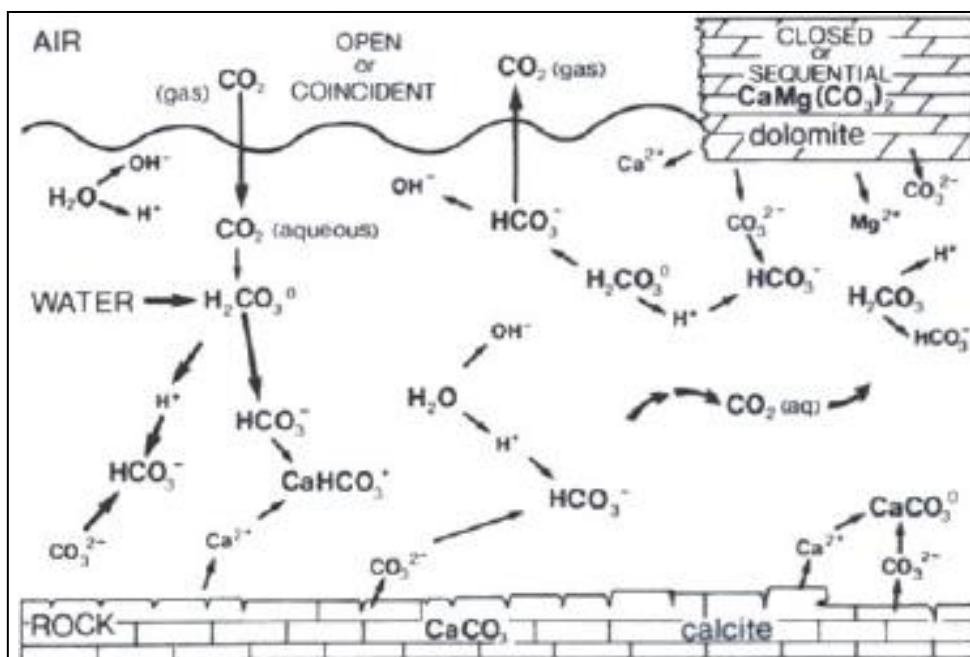
$$\text{Log (pCO}_2 \text{ équilibrante)} = \text{log [HCO}_3^-] - \text{log (K}_1) - \text{log (K}_0) + \text{pH (mesuré)}$$

Avec  $K_1$  : constante de dissociation de  $\text{H}_2\text{CO}_3$  ;  $K_0$  : constante de dissociation de Henry

- L'indice de saturation ( $I_{SC}$  ou  $d_{pH} = \text{pH (mesuré)} - \text{pH (calculé)}$ ). Elle est donnée par la formule suivante :

$$I_{SC} = \text{log [Ca}^{2+}] + \text{log (K}_2) + \text{log [HCO}_3^-] - \text{log (K}_S) + \text{pH (mesuré)}$$

Avec  $K_S$  : constante d'équilibre de la calcite (à la température de l'échantillon) ;  $K_2$  : constante d'équilibre de dissociation des bicarbonates (à la température de l'échantillon).



Source : FORD & WILLIAMS, 1992 in REY, 2007

Figure 16 : Réactions chimiques eau/roche dans les aquifères carbonatés

Si  $I_{SC}$  est compris entre 0.1 et -0.1 la solution est considérée à l'équilibre. Si  $I_{SC}$  est supérieur à 0.1 alors la solution est sursaturée et il y a précipitation de carbonates (colmatage). Si  $I_{SC}$  est inférieur à -0.1 alors la solution est sous-saturée et il y a dissolution de carbonates.

L'étude des relations entre l'indice de saturation et le logarithme de la  $\text{pCO}_2$  équilibrante est couramment utilisé dans les études hydrogéologiques sur les aquifères carbonatés (EMBLANCH, LASTENNET et Al. 2003 ; BATIOT, LINAN, ANDREO, EMBLANCH, CARRASCO, & BLAVOUX, 2003 ; BATIOT C. 2002 ; REY, 2007). L'indice de saturation de la calcite (et de la dolomite) apporte des indications sur l'état d'équilibre des systèmes et la  $\text{pCO}_2$  équilibrante va aider à déterminer l'origine des différents types d'eau rencontrés aux émergences. Néanmoins, la  $\text{pCO}_2$  équilibrante est impossible à mesurer et doit être estimée.

### 2.1.2.3. Les isotopes de l'eau

Les isotopes utilisés en hydrogéologie sont principalement les éléments constitutifs de l'eau ( $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$  et  $^{18}\text{O}$ ). Par opposition aux paramètres chimiques, le deutérium ( $^2\text{H}$ ) et l'oxygène 18 ( $^{18}\text{O}$ ) sont dits stables et conservatifs car il existe aux températures habituellement rencontrées dans l'hydrogéologie de sub-surface, aucun échange isotopique entre l'eau et la matrice minérale des aquifères. Leur intérêt réside dans le fait qu'ils permettent de tracer fidèlement les flux hydriques qui s'écoulent dans les aquifères. La mesure du deutérium et de l'oxygène 18 se pratique en faisant la différence relative entre la teneur en isotope de l'échantillon et la teneur en isotope d'un étalon. La déviation par à l'étalon, notée  $\delta$ , est très faible et s'exprime en ‰.

$[^2\text{H}]$  et  $[^1\text{H}]$  étant les concentrations en deutérium et en hydrogène, on a pour le deutérium :

$$\delta^2\text{H} = \frac{\left(\frac{[^2\text{H}]}{[^1\text{H}]}\right)_{\text{échantillon}} - \left(\frac{[^2\text{H}]}{[^1\text{H}]}\right)_{\text{standard}}}{\left(\frac{[^2\text{H}]}{[^1\text{H}]}\right)_{\text{standard}}} \times 1000$$

$[^{18}\text{O}]$  et  $[^{16}\text{O}]$  étant les concentrations en oxygène 18 et oxygène 16, on a pour l'oxygène 18 :

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{\left(\frac{[^{18}\text{O}]}{[^{16}\text{O}]}\right)_{\text{échantillon}} - \left(\frac{[^{18}\text{O}]}{[^{16}\text{O}]}\right)_{\text{standard}}}{\left(\frac{[^{18}\text{O}]}{[^{16}\text{O}]}\right)_{\text{standard}}} \times 1000$$

La composition isotopique en oxygène 18 et en deutérium est dépendante de la température à laquelle les précipitations ont condensé dans les nuages. Ainsi, l'utilisation des isotopes stables de l'eau permet d'estimer une altitude moyenne de recharge et de caractériser l'influence des recharges saisonnières.

Le tritium ( $^3\text{H}$ ) comme le deutérium, est un isotope de l'hydrogène mais il est dit instable et radioactif. Les atomes de tritium se désintègrent (période de demi-vie de 12.32 ans) en formant des atomes stables d'hélium et un rayonnement  $\beta^-$ . Dans la pratique, on ne mesure pas la concentration en tritium de l'eau mais le nombre de particules  $\beta^-$  émises par l'échantillon par unité de temps. On mesure donc la radioactivité en tritium de l'eau de laquelle on peut déduire une concentration massique que l'on exprime en unités tritium (UT). Une unité tritium correspond à 1 atome de tritium pour  $10^{18}$  atomes de deutérium et d'hydrogène.

La production naturelle totale de tritium est estimée à 0,25 atomes par centimètre d'épaisseur d'atmosphère et par seconde, soit 20 g par an pour toute l'atmosphère. Mais, le tritium a été produit par tous les types de tests nucléaires en atmosphère. La quantité de tritium injectée dans l'environnement a été estimée à 600 kg entre octobre 1952 et fin 1962. A partir de 1963, la quantité de tritium dans les précipitations de l'hémisphère Nord a progressivement diminué. Ainsi, la

connaissance de la radioactivité en tritium des eaux souterraines apparaît comme un outil de datation intéressant.

#### 2.1.2.4. Plan d'échantillonnage

Au vu du Tableau 11, les éléments inclut dans le suivi hydrogéochimique sont :

- Les éléments majeurs (calcium, chlore, magnésium, nitrates, potassium, sodium et sulfate)
- Les éléments mineurs et les éléments traces (baryum, manganèse, silice et strontium)
- Les éléments fugaces (conductivité électrique, oxygène dissous, pH et température de l'eau)
- Les isotopes de l'eau (deutérium, tritium et oxygène 18)
- Le Carbone Organique Total (COT)

##### 2.1.2.4.1. Les éléments majeurs

#### Calcium

Le calcium (Ca) est un métal alcalino-terreux de couleur blanche. Il est réducteur et se combine avec de multiples éléments. Il n'existe pas à l'état libre. L'altération de ces minéraux le fait passer en solution sous forme de bicarbonate ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ). Il précipite surtout en carbonate (aragonite, calcite et dolomite) ou il se fixe à de multiples organismes. Le calcium est l'élément principal de la dureté de l'eau. Sa teneur dans les eaux souterraines est liée à la nature des sols et des roches traversées, elle varie généralement de 1 à 150 mg/l. Sa concentration est dépendante de la température, du pH et de l'alcalinité de l'eau. *« Cet élément renseigne sur l'état de réalisation des équilibres calco-carboniques (dissolution, précipitation, etc.) et donc le temps de séjour de l'eau (...). Ce traceur est (...) sensible et dépend du régime hydrologique. Cependant son interprétation en terme de temps de séjour est délicate, car bien que la saturation de la solution vis-à-vis de cet élément soit longue à atteindre, plus de 90 % de la minéralisation est atteinte en quelques jours »* (BATIOT, 2002).

Roche	Période	Composition chimique
Gypse	Trias supérieur	Sulfate hydraté ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ) qui peut contenir des impuretés (Na, Cl, K, etc.)
Dolomie	Trias supérieur	Contient au minimum, 25 % de $\text{CaCO}_3$ et 25 % de $\text{MgCO}_3$
Cargneule	Trias supérieur	Contient 70 % de $\text{CaCO}_3$ et 20 % de $\text{MgCO}_3$ Légère présence de gypse
Calcaire	Lias inférieur	95 à 100 % de $\text{CaCO}_3$
Calcaire dolomitique	Lias inférieur	Au moins 50 % de $\text{CaCO}_3$ et entre 10 et 50 % de dolomie
Calcaire siliceux	Lias moyen	Entre 5 et 35 % de silice. Le reste est du calcaire

Source : FOUCAULT & RAOULT, 2000

Tableau 11 : Composition minérale des roches consolidées du Forchat

### Chlore

Le chlore (Cl) est présent dans certains minéraux. Son altération libère des ions chlorures (Cl<sup>-</sup>) qui peuvent s'associer au sodium (NaCl), au potassium (KCl) et au calcium (CaCl<sub>2</sub>). Peu présent dans les sols, les ions chlorures sont sur le secteur d'étude un marqueur intéressant pour caractériser l'existence d'un épikarst et pour mesurer l'impact anthropique.

### Magnésium

Le magnésium (Mg) s'associe notamment aux carbonates (calcite, dolomite et magnésite). Il contribue à la dureté de l'eau sans en être l'élément essentiel. Le sol ne contient quasiment pas de magnésium. Sa teneur dans les eaux souterraines est directement liée à la nature géologique des terrains traversés. Sur le secteur d'étude, les fortes valeurs de magnésium témoignent d'une circulation dans les calcaires, les dolomies et les calcaires dolomitiques. Par ailleurs, le magnésium est un indicateur de temps de séjour car « *les cinétiques de mise en solution de cet élément sont très lentes et son acquisition ne se fait qu'au sein de l'aquifère. Ce traceur apparaît donc peu sensible. Toutefois, le magnésium est un traceur particulièrement intéressant en période d'étiage, lorsque les concentrations croissent du fait de la participation prépondérante à l'écoulement de l'eau (...), à long temps de séjour dans le système* » (BATIOT, 2002).

### Nitrate

Les nitrates (NO<sup>3-</sup>) constituent le stade final d'oxydation de l'azote (N) organique. Ils sont présents dans le sol et les végétaux. Ils sont solubles et se retrouvent donc dans les eaux souterraines. Sans apport artificiel, les eaux souterraines ne contiennent pas plus de 10 mg/l de nitrates. « *Au cours du transit de l'eau dans le système, ils seront peu dégradés par les microorganismes du milieu. La sensibilité de ce traceur est comparable au magnésium. Les nitrates peuvent être de bons traceurs de l'infiltration rapide en période de crues. Ils sont d'excellents marqueurs de la pollution anthropique* » (BATIOT, 2002).

### Potassium

Le potassium (K) est un élément très oxydable. « *Il s'unit à la plupart des métalloïdes, et on le trouve essentiellement sous forme de chlorure* » (FOUCAULT & RAOULT, 2000). Sur le secteur d'étude, le potassium est un marqueur intéressant pour caractériser l'existence d'un épikarst et pour mesurer l'impact anthropique.

### Sodium

Le sodium (Na) est présent dans les structures de divers minéraux des roches magmatiques. Très soluble, il est facilement entraîné par l'eau et se dépose « *dans les séries évaporitiques pour donner la halite (NaCl), et d'autres minéraux tels que le natron et la mirabilite* » (FOUCAULT & RAOULT, 2000). Sur le secteur d'étude, le sodium est un marqueur intéressant pour caractériser l'existence d'un épikarst et pour mesurer l'impact anthropique.

### Sulfate

Il est généralement associé au calcium (Ca), au baryum (Ba), au magnésium (Mg), au strontium (Sr), au sodium (Na). La forme hydratée du sulfate est le gypse (CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O). A part ceux associés, au strontium et au baryum, les ions sulfates sont solubles. Ils peuvent se réduire en sulfure, se volatiliser dans l'atmosphère (H<sub>2</sub>S), se

précipiter en sel et être assimilés par des microorganismes. Sur le secteur d'étude, les sulfates sont des marqueurs intéressants pour caractériser la nature des aquifères et le temps de séjour des eaux.

#### 2.1.2.4.2. Les éléments mineurs et les éléments traces

##### Baryum

Il peut provenir de la celsiane ( $Ba(Si_2Al_2O_8)$ ) qui constitue « *un minéral rare du métamorphisme de contact des calcaires et des dolomies* » (FOUCAULT & RAOULT, 2000). Sur le secteur d'étude, le baryum peut constituer un marqueur intéressant pour caractériser la nature des aquifères et les relations entre aquifères.

##### Manganèse

Il est présent dans les eaux réduites dans les aquifères confinés. Sur le secteur d'étude, le manganèse est un marqueur intéressant des impacts anthropiques.

##### Silice

Il s'agit d'un minéral caractérisé par le radical ( $SiO_2$ ). Il se présente sous diverses variétés polymorphes (quartz, tridymite, cristobalite, coésite, stishovite, calcédoine, opale). Le pH a peu d'action sur sa solubilité dans les conditions normales (la solubilité de la silice augmente au delà de  $pH = 9$ ). En présence d'ions  $Al^{3+}$ , peu de silice est transportée car ces derniers réagissent sur elle pour donner des amas colloïdaux silico-alumineux peu mobiles. La température agit sur la solubilité de la silice (la quantité de silice perdue par le cristal et passant en solution, est grossièrement multipliée par 10 entre 0 et  $60^\circ C$ ). Sur le secteur d'étude, la silice apparaît comme un marqueur intéressant pour caractériser le temps de séjour de l'eau.

##### Strontium

Le strontium est un métal qui se trouve dans divers minéraux (carbonates, sulfates, phosphates et rares silicates). Il peut notamment précipiter sous forme de carbonate de strontium (strontianite) et de sulfate de strontium (céléstite). Sur le secteur d'étude, le strontium est un marqueur intéressant pour caractériser la nature des aquifères et le temps de séjour des eaux.

#### 2.1.2.4.3. Les paramètres fugaces

En hydrogéologie, la température, le pH, la conductivité électrique et l'oxygène dissous, sont dits fugaces et doivent être mesurés sur le terrain.

##### La température

La mesure de la température permet d'ajuster les valeurs de conductivités, d'apprécier l'origine plus ou moins profonde de l'eau et de calculer les équilibres de dissolution. Sur le terrain, sa mesure est simple (thermomètre à Hg ou thermocouple) et peu onéreuse.

##### Le pH (potentiel Hydrogène)

La valeur du pH est utile pour établir l'état des équilibres de dissolution et ainsi connaître le caractère agressif ou incrustant de l'eau (particulièrement par les carbonates). Comme la variation de la pression des gaz ( $CO_2$ ,  $O_2$ ) modifie le pH, il

est important de le mesurer directement lors de la prise d'échantillon dans un flacon de volume limité.

#### La conductivité électrique (C.E)

L'eau peut être considérée comme une solution électrolytique, car presque tous ses constituants dissous, majeurs et mineurs, sont présents sous forme ionique. Grâce à la présence de ces ions, l'eau devient susceptible de se laisser traverser par un courant électrique. Cette caractéristique s'appelle la conductivité électrique. Sa mesure est simple et peu onéreuse, elle s'effectue à l'aide d'une cellule portative légère sur le terrain. Pas de difficulté particulière à signaler, sauf qu'il ne faut pas utiliser la solution qui a servi pour la mesure du pH. Elle s'exprime généralement en micro-siemens ( $\mu\text{S.cm}$ ) à une température de 20 et 25°C. Cette mesure est importante car elle donne directement une estimation de la minéralisation totale. Elle est influencée par le pH, la valence des ions et surtout leur degré d'ionisation. Sur le secteur d'étude, les valeurs :

- Supérieures à 2000  $\mu\text{S.cm}$  informent d'une circulation préférentielle dans le réseau des cargneules et des gypses
- Comprises entre 300 et 400  $\mu\text{S.cm}$ , indiquent une circulation privilégiée dans le réseau des calcaires du Lias

#### L'oxygène dissous

L'eau contient toujours de l'oxygène dissous. « *Les concentrations varient avec la température et la pression partielle dans l'atmosphère. Du fait de l'équilibre entre l'oxygène de l'air et de l'eau, plus les eaux sont superficielles et plus elles sont chargées en oxygène* » (POTELON & ZYSMAN, 1993). Pour les eaux de surface, ce paramètre constitue un indice de qualité de l'eau et sa mesure s'effectue sur le terrain à l'aide d'une petite cellule (l'oxygène traverse une membrane poreuse avant de réagir avec un électrolyte et d'être mesurée par un voltage).

#### 2.1.2.4.4. Le Carbone Organique Total (COT)

Le Carbone Organique Total appelé aussi COT désigne, dans un échantillon donné, la teneur en carbone ayant une origine organique. Les teneurs en COT sont faibles dans l'eau de mer, les eaux souterraines et les précipitations, elles oscillent entre 0.5 et 1.1 mg/l. Dans les eaux souterraines, les faibles valeurs s'expliquent par le temps, généralement important, de résidence de l'eau au sein de l'aquifère. Le COT est alors en grand partie dégradé et transformé en  $\text{CO}_2$  par l'activité bactérienne.

Le COT est généralement utilisé comme traceur de l'infiltration rapide de l'eau dans les systèmes fissurés et karstiques. En le couplant avec d'autres paramètres chimiques (Na et  $\text{Mg}^{2+}$  notamment) et les isotopes, son suivi permet de mieux appréhender le fonctionnement des aquifères (BATIOT, LINAN, ANDREO, EMBLANCH, CARRASCO, & BLAVOUX, 2003 ; BATIOT C. , 2002 ; EMBLANCH, LASTENNET, BATIOT, DANIEL, GARRY, & BLONDEL, 2003)

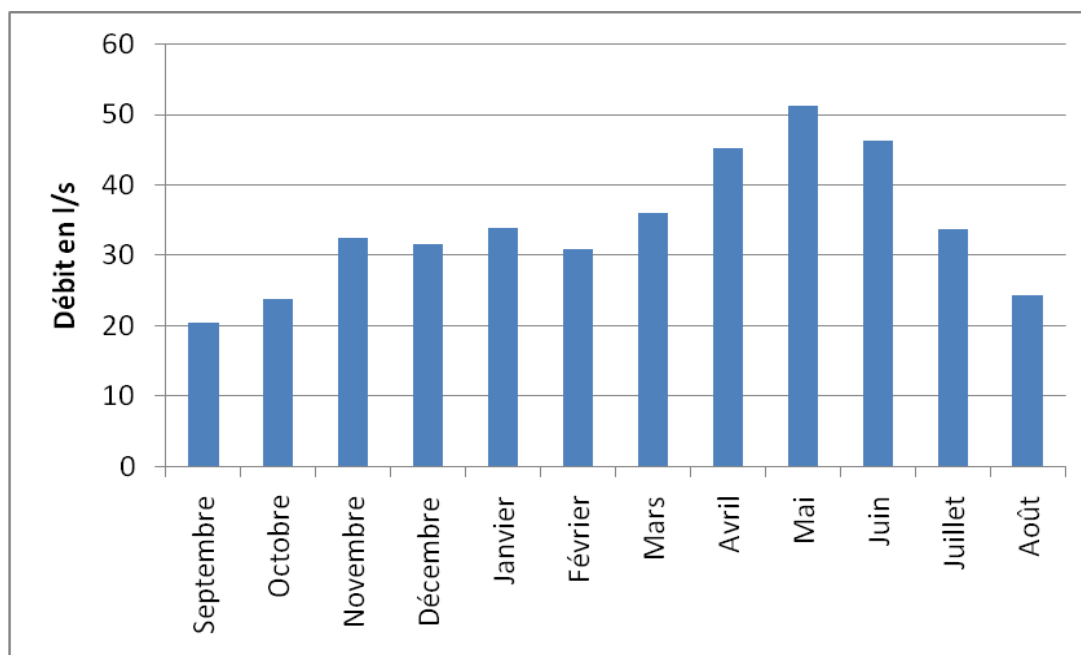
### 2.1.3. Périodicité des mesures et des prélèvements

De manière générale, les relevés des débits d'une source alimentée par un aquifère fissuré karstique, pendant une longue série d'années montrent des variations saisonnières systématiques (position des hautes et basses eaux) en fonction des

principaux facteurs influençant l'écoulement : le régime des précipitations, la géomorphologie du bassin versant, la nature et la géométrie du réservoir, la situation géographique, l'infiltration, l'évapotranspiration, etc. Une source a donc un régime hydrogéologique particulier (ensemble des caractéristiques hydrogéologiques et son mode de variation) qui se définit par les variations de son débit habituellement représentées par le graphique de l'écoulement mensuel moyen (calculé sur un certain nombre d'années et aussi appelé débit « inter-mensuel » ou module mensuel.

Les chroniques de débits (1995 – 2005, relevés tous les 15 jours) du captage des Moises peuvent être considérées comme représentatives de l'état général du système hydrogéologique du Forchat. Sur la Figure 17, les observations suivantes peuvent être formulées :

- Le débit mensuel moyen maximum apparaît au mois de mai (51.33 l/s) et le débit mensuel moyen minimum se situe au mois de septembre (20.4 l/s)
- L'allure générale du graphique se présente en paliers avec un point bas en septembre. A partir de là, le débit augmente légèrement pour parvenir à une première marche en novembre. Le débit stagne ensuite jusqu'au mois de mars puis il s'élève et arrive à sa deuxième marche, au mois de mai. Dernièrement, il dégringole régulièrement pour revenir au premier palier c'est-à-dire celui du mois de septembre
- Trois périodes s'observent :
  - o Une période de basses eaux (d'étiage d'été) du mois d'août au mois d'octobre. Les débits moyens mensuels sont inférieurs à 30 l/s
  - o Une période de hautes eaux (crue) du mois d'avril au mois de juin. Les débits moyens mensuels sont supérieurs à 40 l/s
  - o Une période d'eaux « normales » (d'étiage d'hiver) du mois de novembre au mois de mars. Les débits moyens mensuels varient peu et sont compris entre 30 et 40 l/s



Source : SIEM, 2007

Figure 17 : Modules mensuels moyens aux captages des Moises de Janvier 1996 à Décembre 2005

Le débit moyen mensuel minimum de septembre peut s'expliquer par les précipitations relativement moyennes (la médiane du mois de septembre est de 72.5 mm) et les températures moyennes mensuelles élevées (entraînant une forte ETP) de ce mois et de ceux d'avant (20.3°C pour les mois de juillet et d'août, 15.8°C pour le mois de septembre). L'augmentation du débit observé à partir du mois d'octobre est liée à une augmentation des précipitations (mois le plus pluvieux) et à une diminution des températures (12°C) (diminution de l'ETP). Le mois de novembre est relativement pluvieux également (85 mm) et l'affaiblissement des températures continue (6.7°C).

Les légères fluctuations observées du mois de décembre à mars avec des modules mensuels dans la moyenne, sont certainement associées aux faibles températures (ETP nulle). Les faibles précipitations (entre 48 et 67 mm.) qui tombent principalement sous forme neigeuse (coefficient nivométrique moyen à Vinzier sur le bassin d'Evian à 920 m. de 50 % durant les mois de décembre, janvier, février et mars, pour la période 1966 – 1974, JEREMIE, 1976), contribuent également à alimenter efficacement le système (infiltration lente et diffuse).

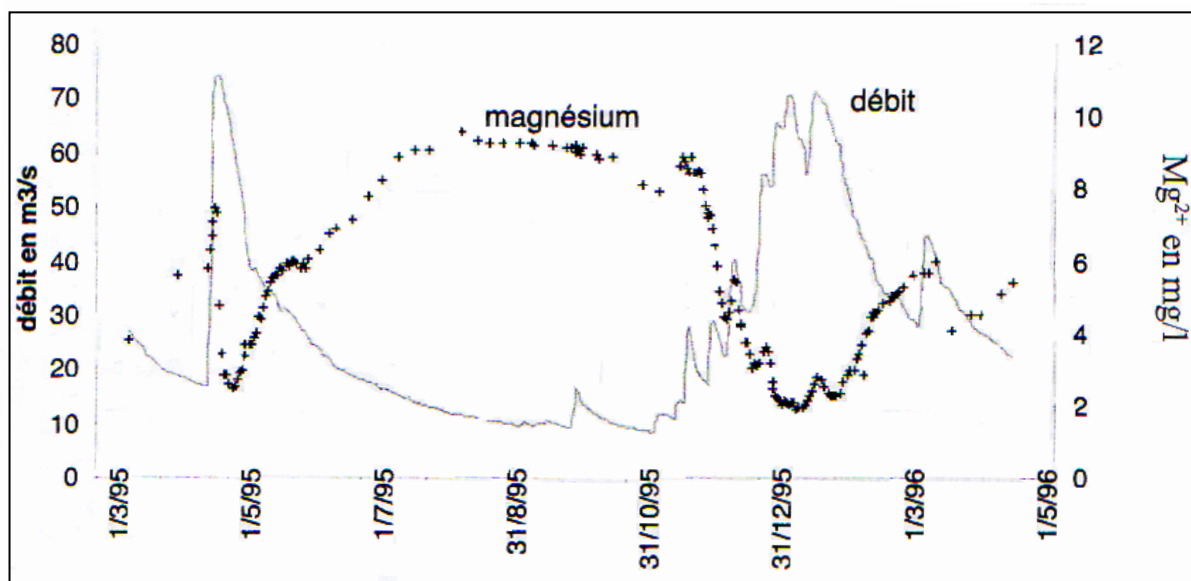
A partir du mois de mars et jusqu'au mois de mai, l'augmentation du débit se corrèle avec l'accroissement des températures moyennes (faible croissance de l'ETP) qui annonce le début de la fusion nivale. Cette dernière se couple également à la hausse des précipitations (59 à 97 mm.). La diminution régulière des débits du mois de juin jusqu'au mois de septembre sont liées à l'influence de la végétation (fortes augmentation de l'ETP du fait des températures moyennes élevées, entre 15.8 et 20.3°C).

Ainsi, le régime des captages des Moises peut être qualifié de type nivo-alpin. Un suivi hydrodynamique peut donc s'envisager sur une période minimum d'une année. Mais, le débit des captages des Moises peut varier fortement (cf. Figure 17). Les mesures périodiques de débits sont inexploitable et un suivi hydrodynamique en continu s'impose.

Par ailleurs, la chimie des eaux peut varier fortement entre les périodes de hautes et de basses eaux, et dans une même période de hautes eaux. Pour exemple, la Figure 18 témoigne de la corrélation entre le débit et le magnésium au niveau de la Fontaine de Vaucluse (département du Vaucluse. Nous observons que le débit fluctue entre 12 et 75 l/s (coefficient de 6) et que les concentrations en magnésium oscillent entre 2 et 10 mg/l (coefficient de 5). D'une manière générale, l'augmentation du débit s'accompagne d'une diminution de la valeur en magnésium, et inversement.

La crue d'avril 1995 est rapide et elle permet de distinguer trois périodes :

- Une phase très rapide de montée des débits couplée à une chute des valeurs en magnésium (avril 1995)
- Une phase rapide de diminution des débits et une augmentation des valeurs en magnésium augmentent (avril à juillet 1995)
- Une phase de bas débits et de valeurs élevées en magnésium



Source: EMBLANCH, LASTENNET, BATIOU, DANIEL, GARRY, & BLONDEL, 2003  
 Figure 18 : Evolution de la concentration en magnésium et du débit de la Fontaine de Vacluse au cours du cycle hydrologique

Ainsi, des fortes variations de faciès chimiques se produisent en périodes de crue et de décrue alors qu'en période de tarissement le chimisme des eaux semble peu évoluer. L'enregistrement en continu de la conductivité de l'eau et de sa température est alors la meilleure solution pour obtenir les informations nécessaires pour la réalisation de l'échantillonnage. En effet, deux points voisins dans l'espace et le temps et présentant la même conductivité électrique auront toutes les chances d'être similaires quant à l'ensemble des paramètres physico-chimiques. Dès lors, trois rythmes de prélèvements sont à envisager :

- Un rythme rapide durant les crues (prélèvement journalier)
- Un rythme normal durant les périodes de décrue (prélèvement hebdomadaire)
- Un rythme lent durant les périodes de tarissement (prélèvement tous les 15 jours)

En prenant en considération une période d'étiage et une période de crue, 35 analyses par point de mesures se comptabilisent. Ce chiffre apparaît suffisant pour effectuer les tests statistiques usuels tels que l'analyse de la variabilité (analyse de variance pour chaque variable et analyse en composantes principales).

## 2.2. Description et équipements des captages d'eau potable

### 2.2.1. Description des sites

Les 10 captages d'eau potable ont été équipés. Dans le cas d'une confluence de plusieurs drains, des mesures de conductivité ont été réalisées afin de déterminer l'emplacement pertinent. Au vu de la localisation des sites, des aménagements déjà existants et des possibilités budgétaires, les stations de mesures ont été équipées soit de débitmètres avec un système d'enregistrement des valeurs, soit de déversoirs. Chaque station a été pourvue de capteurs autonome de pression, de température et de conductivité électrique.

Concrètement, les stations des Arces (cf. Photo 9), de l'Épinguy (cf. Photo 8), du Col du Feu (cf. Photo 7) et de Ramble ont été équipées de déversoirs. Pour ces sites, la connaissance des débits et des volumes d'eau passent par la réalisation d'une courbe de tarage. Pour les autres sites (sauf pour les trois captages des Moises qui sont déjà équipés), des compteurs d'eau accompagnés d'un système autonome d'enregistrement des valeurs ont été installés (cf. Photo 6).

### 2.2.2. Centrales de mesure

La marque STS a été choisie pour la fourniture des capteurs autonome de pression (0 – 1 m. d'eau), de température et de conductivité électrique (C.E). La hauteur d'eau est calculée par différence de pression entre celle exercée par l'eau et la pression atmosphérique. La résolution est de 0.1 cm et la précision, donnée par le certificat d'étalonnage fourni par le fabricant, est inférieure ou égale à 0.25 % de la valeur mesurée. Pour la température, la plage de mesure s'étend de -5 à 50°C. La résolution des capteurs est de 0.1°C et la précision est de plus ou moins 0.25°C. Pour la C.E, la plage de mesure est comprise entre 20  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  à 20  $\text{mS}/\text{cm}^{-1}$ . Les capteurs ont une résolution de 1  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  et la précision est de plus ou moins 2 % de la valeur mesurée. Chaque système fonctionne avec une pile à lithium interchangeable sur site. La durée de la pile est estimée à 5 ans au pas de mesure retenu soit toutes les 30 minutes.

Au niveau de la source des Moises, le réservoir de Sur le Mont, situé en 100 m. en contrebas des captages, a été mis en service au cours de l'année 2006. Dans cet aménagement, une colonne pour chaque captage est équipée d'un compteur de type Woltman WS dont l'axe d'hélice est perpendiculaire à l'axe de la conduite. Il en est de même pour le trop-plein. L'ensemble est relié à un système de télégestion qui retransmet de manière autonome et journalier, au SIEM les informations récoltées.

Pour les sources des Favrats, des Granges Mamet et du Pont du Mouche, des débitmètres « *Woltman WP* », à hélice axiale, ont été choisis (cf. Photo 6). Ils sont équipés en série d'un totalisateur verre/métal orientable. Leur installation ont été complétées avec des émetteurs d'impulsions de type « *reed* » et des enregistreurs autonomes Cosmos Data Logger (CDL). Dans la pratique, une impulsion est émise tous les 100 l. ou tous les  $\text{m}^3$ . Elle est enregistrée et stockée par le CDL. Le passage sur site pour récupérer les informations et effectuer l'entretien s'effectue tous les mois.

## 2.3. Description et équipements des cours d'eau

### 2.3.1. Description des sites

#### Le B.V du Pamphiot

Le site retenu (cf. Photo 10) est celui en-dessous du pont de la RD 36 (Station du Pamphiot : Lambert II, X : 920763 – Y : 2149438 – Z : 810 m.) car les deux principaux ruisseaux drainant le B.V arrivent juste en amont du pont. La pente du pont est sérieuse ce qui se traduit par des vitesses d'eau importante mais il s'agit du seul endroit relativement accessible. Choisir un autre site, aurait contraint à se déplacer beaucoup plus en aval et donc à recueillir des eaux d'autres bassins versants.

Un canal venturi préfabriqué en résine polyester de chez Hydrologic (type « 1253 F ») avec une plage de mesure compris entre 16 et 300 l/s<sup>-1</sup>, a été installé. Concrètement, le canal Venturi se décompose en deux parties. Le premier lot constitue le canal d'approche et le deuxième est le canal Venturi. La mesure du niveau se réalise à l'amont de la contraction latérale. Le débit est obtenu à partir de la courbe d'étalonnage fournie par Hydrologic. La précision du canal Venturi est de 3 % pour les débits compris entre 5 et 15 % et de 1.5 % pour les débits supérieurs à 15 %. Néanmoins, la validité des mesures est influencée par la pente réelle du canal Venturi qui doit être inférieure ou égale à 0.5 %. Le cadre topographique du site, a imposé de réaliser deux charpentes en acier afin de pouvoir régler la hauteur et la pente du canal Venturi et du canal d'approche. Le site a été opérationnel au cours du mois de juin 2008.

Au sein du bassin versant topographique du Pamphiot (cf. Figure 19), les caractéristiques physiques suivantes ont été retenues (cf. Tableau 12) :

Bassin du Pamphiot					
Périmètre en m.	Aire (en Ha)	Altitude de l'exutoire (en m.)	Altitude maximale du bassin (en m.)	Cours d'eau cadastré (en m.)	Densité de drainage
9395	317.79	810	1385	5610	0.0018

Tableau 12 : Principales caractéristiques du bassin versant du Pamphiot

#### Le B.V des Moises

Le site retenu (cf. Photo 11) est celui en-dessous du pont de la RD 12 (Station des Moises : Lambert II, X : 918000 – Y : 2151889 – Z : 760 m.) car il s'agit d'un endroit facilement accessible. Un seuil jaugeur en béton a été installé. Le site est opérationnel depuis le mois de juillet 2007. Au sein du bassin versant topographique des Moises (cf. Figure 19), les principales caractéristiques physiques ont été retenues (cf. Tableau 13) :

Bassin des Moises					
Périmètre en m.	Aire (en Ha)	Altitude de l'exutoire (en m.)	Altitude maximale du bassin (en m.)	Cours d'eau (en m.)	Densité de drainage
9695	394.41	750	1539	4274	0.0011

Tableau 13 : Principales caractéristiques du bassin versant des Moises



Photo 6 : Le système de comptage du débit au captage des Granges Mamet



Photo 8 : Déversoir rectangulaire au captage de l'Épinguy



Photo 7 : Déversoir triangulaire au Col du Feu

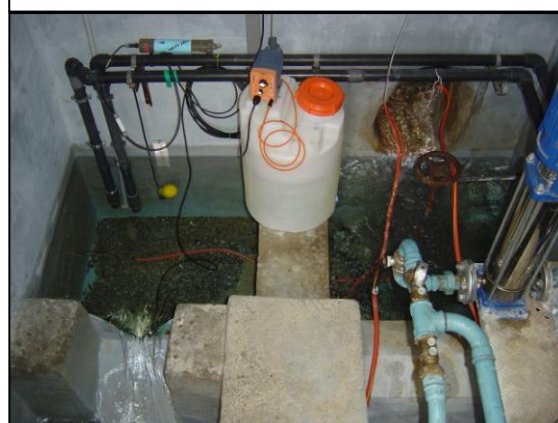
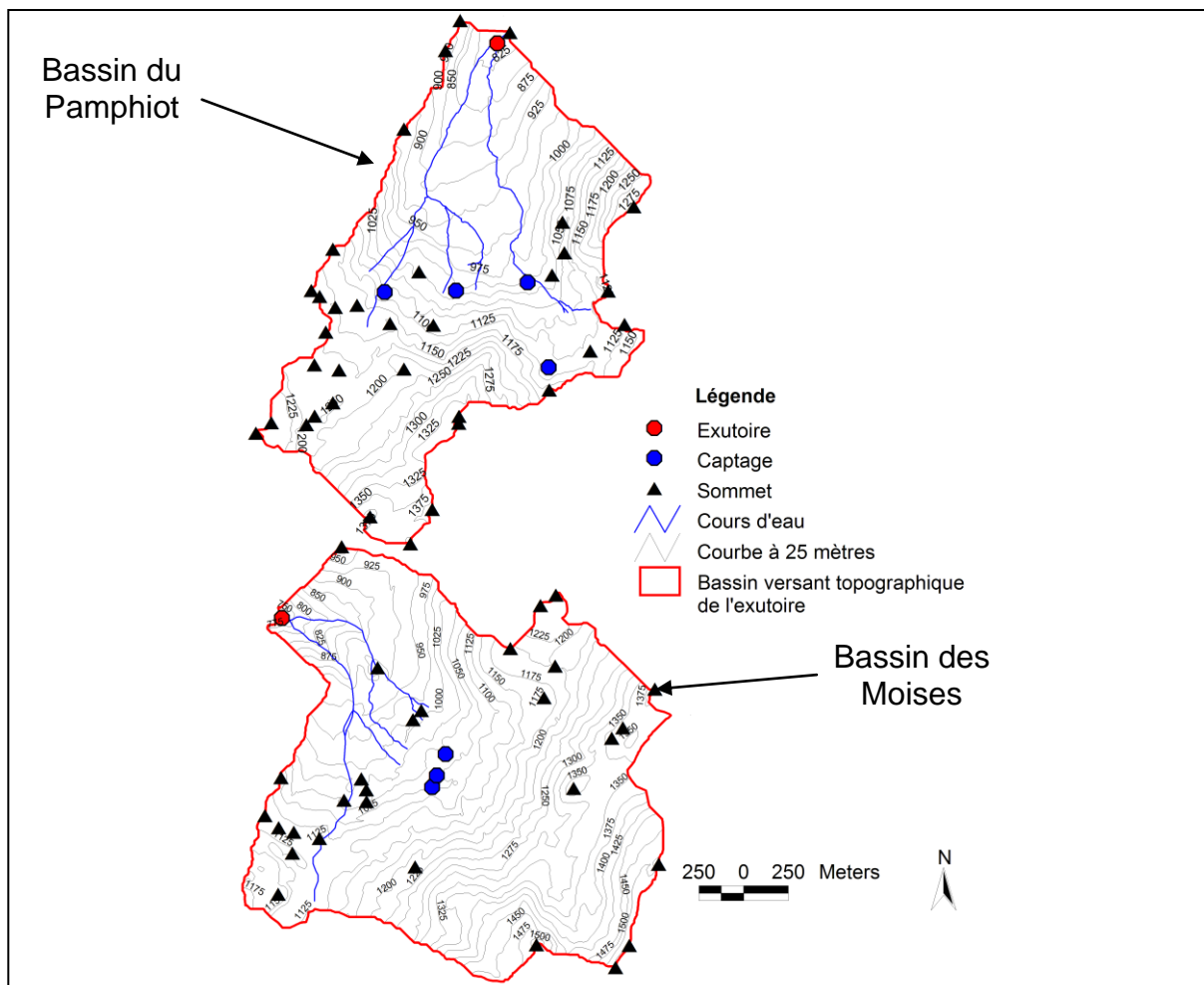


Photo 9 : Déversoir triangulaire au captage des Arces

### Le B.V de la Menoge

Un travail cartographique permet de démontrer que :

- Aucun cours d'eau ne se situe dans les bassins versants topographiques des captages de Ramble et des Arces
- Le cours d'eau qui draine le bassin versant topographique du captage des Granges Mamet n'est pas aménageable
- Deux cours d'eau sont en aval du captage de Ramble. Ils ne sont pas aménageables après leur confluence
- Le cours d'eau en aval du captage des Arces est aménageable dans sa partie amont et aval
- Le cours d'eau qui draine la tourbière des Moises est aménageable



Source : RGD74

Figure 19 : Localisation des bassins versants topographiques et des exutoires du Pamphiot et des Moises

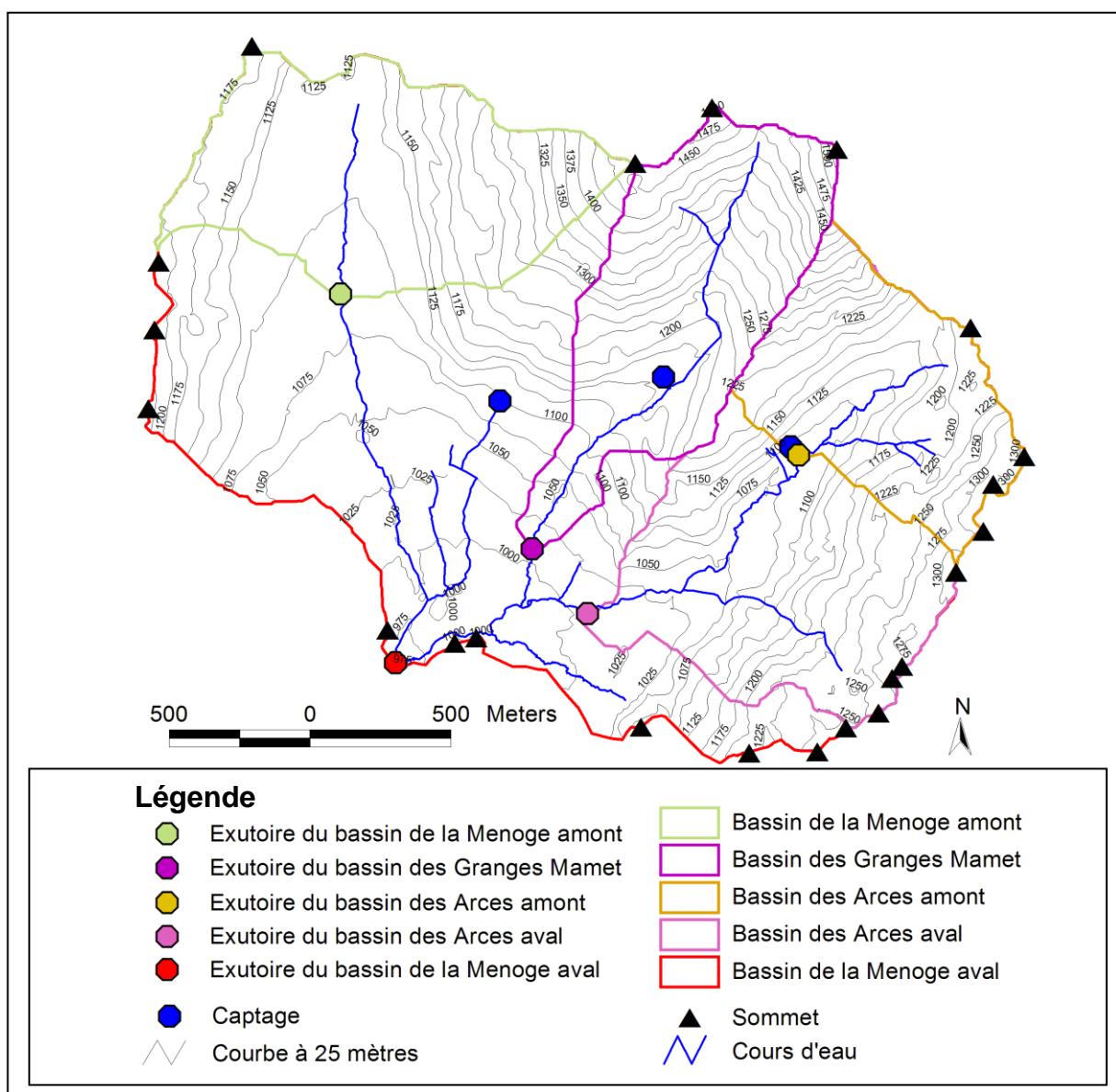
La mesure de l'impact quantitatif des prélèvements sur les cours d'eau drainant le captage de Ramble est difficile car elle nécessite l'installation de deux stations de mesures. Le ruisseau des Granges Mamet est aménageable mais uniquement dans sa partie aval. Aux Arces, la situation est différente. Le ruisseau des Arces passe à proximité du captage et le secteur est favorable à l'implantation d'une station hydrométrique. A ce niveau, il est possible de réunir des informations concernant le volume d'eau d'origine souterraine (captage des Arces) et les volumes d'eau d'origine superficielle (ruisseau des Arces) du bassin versant topographique. Il est également envisageable d'installer une station hydrométrique en aval car de nombreux cours d'eau sont drainés par le ruisseau des Arces.

Dans les nombreux cours d'eau drainant le B.V de la Menoge, quatre stations ont été retenues, à savoir :

- Station des Arces amont (Lambert II, X : 919703 – Y : 2148867 – Z : 1085 m.). Elle se situe juste en amont du captage. Le débit et la pente sont faibles. Un déversoir rectangulaire (cf. Photo 12) a été installé en juin 2007
- Station des Arces aval (Lambert II, X : 918955 – Y : 2148305 – Z : 1005 m.). Le site du pont de la fruitière du Vernay a été choisi et il a été

opérationnel en juin 2008 avec la mise en place d'un déversoir rectangulaire (cf. Photo 13)

- Station des Granges Mamet aval (Lambert II, X : 918955 – Y : 2148547 – Z : 1005 m.). Dans le secteur choisi, la pente est faible et le lit du cours d'eau se présente en forme de marches d'escaliers. Un déversoir rectangulaire a été placé. Le site est opérationnel depuis juin 2007
- Station de la Menoge amont (Lambert II, X : 918081 – Y : 2149438 – Z : 1085 m.). Les informations récoltées permettront de préciser le fonctionnement hydrologique de la tourbière et de préciser son influence sur le fonctionnement hydrologique du Bassin versant topographique de la Menoge. Au niveau du site retenu, la pente est peu importante. Un déversoir rectangulaire a été installé. Le site est opérationnel depuis août 2007



Source : RGD74

Figure 20 : Localisation des principaux bassins versants topographiques et des exutoires du bassin de la Menoge

Au sein du bassin versant topographique de la Menoge (cf. Figure 20), les caractéristiques physiques suivantes ont été retenues :

	Arces amont	Arces aval	Granges Mamet	Menoge amont	Menoge aval
Périmètre en m.	3737	5715	4565	4616	10509
Aire (en Ha)	63.32	149.06	81.63	89.75	515.58
Altitude de l'exutoire (en m.)	1085	1005	1005	1085	975
Altitude maximale du bassin (en m.)	1450	1470	1539	1450	1539
Cours d'eau cadastré (en m.)	1335	3347	2045	732	11098
Densité de drainage	0.0021	0.0022	0.0025	0.0008	0.0022

Tableau 14 : Principales caractéristiques du bassin versant de la Menoge



Photo 10 : Canal venturi du ruisseau du Pamphiot (Orcier)



Photo 12 : Déversoir des Arces amont sur le ruisseau des Arces (Habère-Poche)

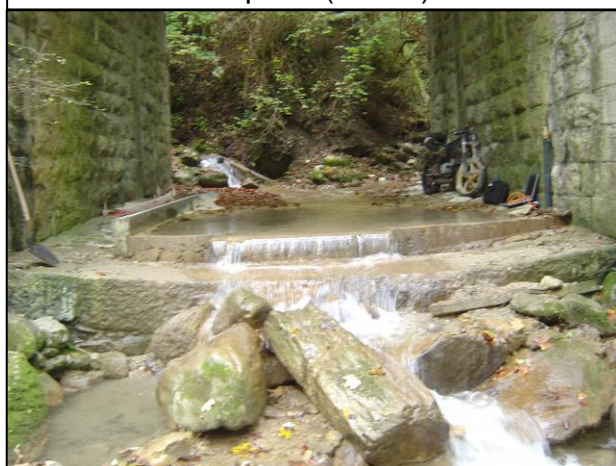


Photo 11 : Seuil jaugeur du ruisseau des Moises (Drailant)



Photo 13 : Déversoir des Arces aval sur le ruisseau des Arces (Habère-Poche)

### 2.3.2. Centrale de mesure

Les capteurs de pression autonome (0 – 1 m. d'eau) ont été fournis par STS. La hauteur d'eau est calculée par différence de pression entre l'eau et la pression atmosphérique. La résolution est de 0.1 cm et la précision est inférieure ou égale à 0.25 %. Chaque capteur fonctionne avec une pile à lithium interchangeable sur site. Les capteurs sont installés dans un tube de protection en acier ou en PVC.

## 2.4. Description et équipements des stations météorologiques

Le Bas Chablais a fait l'objet de nombreux suivis climatiques au cours de ces quarante dernières années (AL-CHARIDEH, 1988 ; DRAY, 1970 ; GUYOMARD, 2006 ; JEREMIE, 1976). Ces études ont donné lieu à des chroniques et des modèles d'évolution des précipitations, des températures, des vents, de l'influence du lac et des effets de relief. Par contre, le massif du Forchat a été peu instrumenté et nous n'avons pas de suivis réguliers.

Une station météorologique est présente sur le secteur d'étude. Il s'agit de la station de Très le Mont (Lambert II, X : 920280 – Y : 2151371 – Z : 1375 m.) que nous avons installé en octobre 2006. Elle est équipée d'un pluviomètre, d'un thermo-hygromètre, d'un anémomètre et d'un pyranomètre (cf. Photo de couverture). Les enregistrements se font chaque demi-heure au moyen d'un datalogger Davis. Elle est alimentée par une batterie de 7 ampères par heure et par un panneau solaire. Son seul défaut est d'avoir été livré sans certificat d'étalonnage.

En dehors du périmètre d'étude, nous avons recueilli les informations émanant des stations météorologiques de Thonon INRA (Lambert II, X : 917 965 – Y : 2 160 820 – Z : 375 m.), de Sciez (Lambert II, X : 911 450 – Y : 2 155 850 – Z : 390 m.), d'Evian-Scionnax (Lambert II, X : 926 500 – Y : 2 162 230 – Z : 720 m.) et de la Chapelle d'Abondance (Lambert II, X : 945 100 – Y : 2 152 170 – Z : 1030 m.). Leurs localisations sont précisées par la Figure 21.

### Les stations de Sciez (390 m.), de la Chapelle d'Abondance (1030 m.) et de Très le Mont (1375 m.)

Les pluviomètres sont de type augets basculeurs. Dans la pratique, le cône de réception du pluviomètre récolte les précipitations. Les eaux se dirigent vers un exutoire au bas duquel se situe un système avec 2 augets. Progressivement, l'auget se remplit puis quand il est plein, il bascule pour laisser la place au second auget. Quand le second auget est plein, il bascule lui aussi pour laisser sa place au premier auget. A chaque basculement, une impulsion est donnée en direction de la console qui enregistre la valeur mesurée de manière horodatée.

Les pluviomètres sont de marque Davis et ils ont un diamètre est de 16.5 cm. Leur résolution est de 0.2 mm/m<sup>2</sup> et leur précision est affichée à plus ou moins 4 %. Nous avons pu constater à l'aide d'un injecteur à débit constant (2.15 l/h ou 21.5 mm/h), prêté par l'INRA de Thonon, que le pluviomètre sous estimait à hauteur de 10 % les précipitations. Nous retiendrons donc cette erreur de 10 %.

Les pyranomètres sont constitués d'une photodiode au silicium, installée avec un angle de 180°. Les données obtenues sont en Watts par m<sup>2</sup> (W/m<sup>2</sup>). La résolution est de 1 W/m<sup>2</sup> et l'erreur est estimée à plus ou moins 5 %. La direction et la force du vent sont appréciées à l'aide d'un anémomètre de marque Davis. Il est disposé à une hauteur de 2 m. au-dessus du sol. Pour la direction, la résolution est de 1° et la précision est de 7°. Pour la vitesse du vent, la résolution est de 0.1 m/s et la précision est de 5 % pour des vents allant de 1 à 67 m/s.



Source : RGD74

Figure 21 : Localisation des stations météorologiques utilisées dans le cadre du suivi météorologique

### La station de Thonon INRA et la station Météo-France d'Evian-Scionnex

Les pluviomètres, de marque Campbell (SBS500), sont à augets basculants. Le diamètre du cône de réception est de 25.5cm. A chaque volume discret de pluie de 0.199mm (valeur certifiée par étalonnage) l'auget bascule et comptabilise une impulsion qui est « traduite » au pas horaire en mm de précipitation par heure. Ce type de pluviomètre est cependant sujet à des pertes de précipitations. En effet, lors d'une pluie, un volume supplémentaire est perdu dans la mesure. La résultante des pertes est d'environ 4% pour des précipitations d'environ 25mm.h<sup>-1</sup> et de 8% pour des précipitations de 133mm.h<sup>-1</sup> (GUYOMARD, 2006).

Les sondes de température sont à thermistance au platine à vocation unique. Nous n'avons pas d'informations concernant :

- La résolution et les erreurs de mesures des sondes de températures
- La nature, la résolution et les erreurs de mesures des sondes d'humidité de l'air

Les pyranomètres utilisés sont au silicium et de marque Campbell (SP-Lite), installés avec un angle de 180°. Les données obtenues sont en Watts par mètre carré (Wm<sup>2</sup>) avec une erreur maximale estimée à plus ou moins 5%. Les anémomètres utilisés sont de marque Campbell. Ils enregistrent la direction du vent à plus ou moins 3° et la vitesse du vent avec une précision de plus ou moins 0,3m.s<sup>-1</sup> de 1 à 60m.s<sup>-1</sup> et de plus ou moins 1m.s<sup>-1</sup> de 60 à 100m.s<sup>-1</sup>.

## **CHAPITRE 3. INTERPRETATION DES INFORMATIONS METEOROLOGIQUES ET HYDRODYNAMIQUES**

Le chapitre 3 traite des aspects hydrodynamiques des systèmes hydrologiques. Il présente :

- Les informations climatologiques et météorologiques dans le but de caractériser l'année hydrologique sélectionnée
- Les informations hydrodynamiques afin de reconstituer les chroniques de débit et de caractériser le régime des captages d'eau potable
- Les résultats des bilans hydrologiques
- Les résultats de l'analyse des courbes de récession
- Les résultats de l'analyse des débits classés
- Les résultats de l'étude comparative entre les prélèvements d'eau potable et le débit des cours d'eau

### 3.1. Les informations climatologiques et météorologiques

La connaissance des informations climatologiques et météorologiques est essentielle à la compréhension des systèmes hydrologiques. Les précipitations représentent le signal d'entrée des systèmes hydrologiques, le débit étant le signal de sortie. La température agit notamment sur la nature des précipitations (pluie, neige), sur la fusion nivale et sur le processus d'évapotranspiration.

#### 3.1.1. Caractéristiques climatiques de la région Thonon – Evian

Afin de caractériser la période de suivi météorologique sélectionnée, nous présentons les caractéristiques climatiques de la région Thonon – Evian.

##### 3.1.1.1. Les précipitations

Durant la période 1966 – 2007, Thonon a reçu en moyenne 983 mm d'eau par an. Il est à noter que les années 2003 (660 mm), 2004 (881.50 mm) et 2005 (644 mm) ont été fortement déficitaires. Des gradients altimétriques, compris entre 57 et 80 mm/100 m. ont été proposés (cf. Tableau 15).

Entre 1987 et 2007, les données mensuelles à la station de Thonon INRA (cf. Tableau 16) informent que les mois les plus pluvieux sont ceux de mai, juin, septembre et octobre, et les mois les plus secs vont de décembre à mars. Le site d'étude se situant à des altitudes supérieures à 900 m. une grande partie des précipitations tombe sous la forme de neige. Pour fournir une idée, Jérémie (JEREMIE, 1976) calcule un coefficient de nivométrie moyen à Vinzier (bassin d'Evian, 920 m.) pour la période 1966 – 1974 de l'ordre de 20 %. Ce coefficient est supérieur à 50 % durant les mois de décembre, janvier, février et mars.

Auteurs (année)	Gradient en mm/100 m.	Zone d'étude
Blavoux (1965)	65	Bassin d'Evian
Dray (1970)	80	Bassin de Thonon
Siwertz (1973)	60	Thonon et Evian
Haubert (1974)	61	Bassin du Brevon
Jérémie (1976)	57	Bassin du Maravant
Vial (1976)	64	Bassin de Thonon
Al-Charideh (1988)	60	Bassin du Redon

Tableau 15 : Les gradients altimétriques selon les auteurs et leur zone d'étude

Mois	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Ecart-type
Janvier	57.28	48.50	7.50	153.00	42.00
Février	48.31	41.50	4.00	153.00	38.63
Mars	59.14	41.00	6.00	257.50	59.59
Avril	74.11	71.00	21.00	142.50	40.39
Mai	97.03	83.50	27.50	188.00	52.48
Juin	94.03	74.00	21.50	233.00	63.44
Juillet	83.09	85.00	32.50	136.50	31.78
Août	81.62	86.00	12.00	204.50	47.38
Septembre	96.16	72.50	21.50	221.00	56.06
Octobre	109.59	104.00	38.00	169.50	37.42
Novembre	85.12	68.00	19.50	221.00	54.77
Décembre	67.12	71.00	16.00	103.50	29.40
Année	952.58				

Source : INRA Thonon, 2007

Tableau 16 : Evolution des principales caractéristiques statistiques des précipitations mensuelles observées à Thonon de 1987 à 2007

### 3.1.1.2. Les températures et l'humidité

Entre 1987 et 2007, la température moyenne est de 11.26°C à la station de Thonon INRA (cf. Tableau 17). A cette même station, les données mensuelles signalent que le mois le plus froid est janvier (3.06°C) et le mois le plus chaud est juillet (20.34°C). L'amplitude thermique moyenne est de 17.28°C. Les gradients altimétriques proposés pour la région de Thonon et d'Evian (DRAY, 1970 ; AL-CHARIDEH, 1988) sont soit annoncées pour des altitudes inférieures à 900 m. soit calculés pour une année précise. Entre 2004 et 2005, les données citées par Guyomard (GUYOMARD, 2006) sur le bassin d'Evlan (cf. Tableau 18) permettent de calculer un gradient de - 0.5°C/100 m.

Entre 1987 et 2007, les données mensuelles à la station de Thonon INRA informent d'une humidité relative moyenne annuelle de 78.11 % (cf. Tableau 19). Les mois les plus humides sont octobre (85.30 %), novembre, décembre et janvier et les mois les moins humides sont juin, juillet (70.32 %) et août. En comparant les moyennes annuelles de l'humidité de l'air de Genève, de Lausanne et de Thonon, Jérémie (JEREMIE, 1976) signale des moyennes annuelles de l'humidité de l'air remarquablement constantes d'un lieu à un autre du pourtour immédiat du Léman.

### 3.1.1.3. Les vents

Deux « familles » de vent agissent sur le secteur (cf. Figure 22). Il s'agit des vents « régionaux » et des vents « périodiques » comme les brises ou les vents d'orage. Au Sud-ouest de Thonon, les trois vents régionaux sont le Sudois (du SO vers le NE. Il apporte des pluies quelque soit la saison), le Joran (du NO vers le SE. Il a les mêmes caractéristiques que le Sudois) et la Bise (du NE vers le SO. C'est un vent froid et sec, particulièrement présent en hiver et au printemps).

Mois	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Ecart-type
Janvier	3.06	3.17	1.37	5.77	1.18
Février	3.97	4.11	1.09	7.48	2.10
Mars	7.11	7.19	5.16	9.97	1.30
Avril	9.91	9.87	8.03	14.66	1.43
Mai	14.55	14.69	11.02	16.52	1.33
Juin	18.08	17.89	15.88	23.40	1.86
Juillet	20.34	20.11	18.16	23.61	1.54
Août	20.33	20.30	17.29	24.12	1.53
Septembre	15.81	16.15	11.40	18.38	2.08
Octobre	12.02	11.84	9.26	14.81	1.61
Novembre	6.73	6.68	4.64	9.32	1.34
Décembre	3.80	3.34	1.81	5.79	1.35
Année	11.26				

Source : INRA Thonon, 2007

Tableau 17 : Evolution des principales caractéristiques statistiques des températures mensuelles et annuelles observées à Thonon de 1987 à 2007

	Evian (385 m.)	Saint Paul (848 m.)	Bénant (1240 m.)	Mémises (1600 m.)
Janvier	2.6	-1	-1	-3.3
Février	2.45	-1.75	-1.9	-7.3
Mars	6.2	2.75	1.55	3
Avril	10.2	6.85	5.1	5.65
Mai	14.35	10.75	9.65	9.7
Juin	19.45	17.15	14.6	12.2
Juillet	20.45	18.2	15.65	14.5
Août	20.45	17.3	14.35	12.2
Septembre	17.3	15.1	12.65	8
Octobre	12.95	11.25	9.9	9.8
Novembre	6.35	2.35	1.65	0.4
Décembre	2.2	-1.65	-1.5	-4.8
Moyenne	11.25	8.11	6.73	5.00

Source : GUYOMARD, 2006

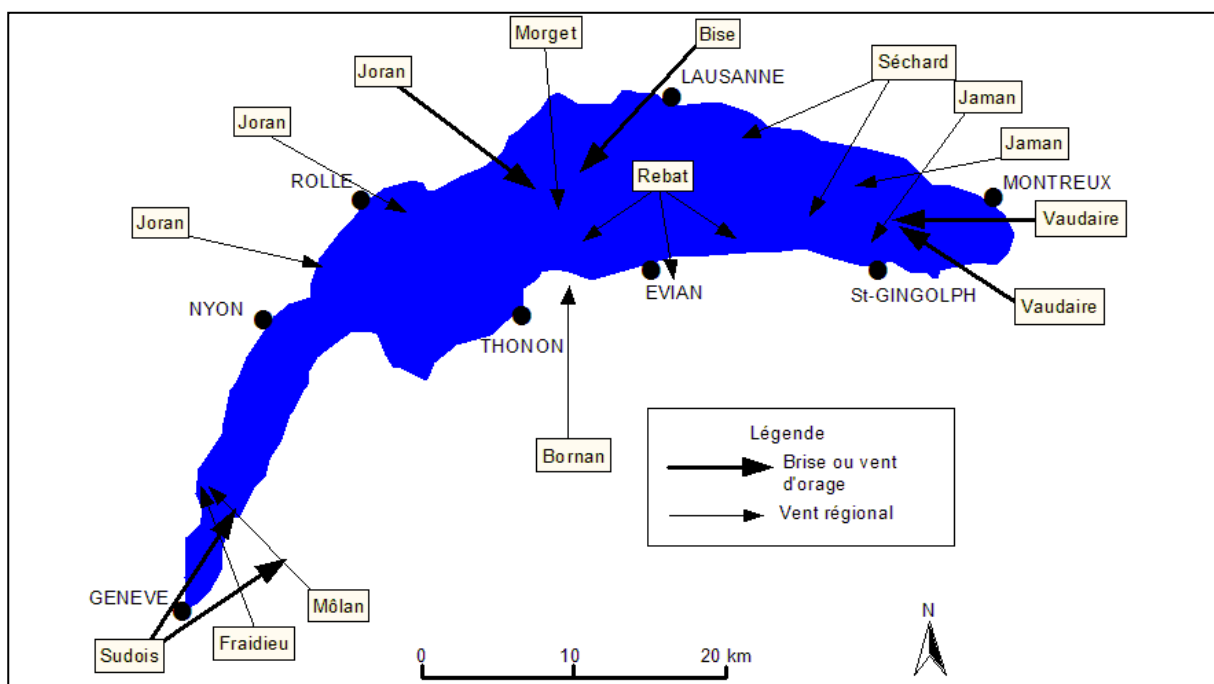
Tableau 18 : Evolution des températures moyennes mensuelles sur le bassin d'Evian en 2004 et 2005

Au niveau local, la présence du lac Léman et des montagnes environnantes induisent des phénomènes thermodynamiques. Ainsi, il est courant d'observer de puissants vents d'orages qui descendent des reliefs comme le Bornan (du S vers le N) ou des brises thermiques comme le Morget qui souffle la nuit de la côte vers le lac et l'inverse le jour.

Mois	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Ecart-type
Janvier	84.26	84.86	71.53	94.77	6.07
Février	80.43	81.70	70.80	87.55	4.83
Mars	77.43	77.70	69.27	83.90	3.92
Avril	74.77	75.94	59.61	87.13	6.55
Mai	75.41	75.74	59.66	84.75	5.93
Juin	70.78	68.88	59.02	83.78	6.93
Juillet	70.32	71.20	57.34	80.56	6.21
Août	71.26	71.94	56.29	79.18	5.87
Septembre	78.50	78.50	69.75	88.73	4.63
Octobre	84.23	84.33	76.95	93.60	3.68
Novembre	85.30	84.88	77.90	91.78	4.23
Décembre	84.47	83.21	76.98	92.07	4.40
Moyenne	78.11	78.48	71.75	85.34	3.50

Source : INRA Thonon, 2007

Tableau 19 : Evolution des principales caractéristiques statistiques de l'humidité relative de l'air en %, observées à Thonon de 1987 à 2007



Source : in DRAY, 1970

Figure 22 : Principaux types de vents de la région lémanique

### 3.1.2. Les informations météorologiques

Les données de température et de précipitations utilisées sont issues des stations météorologiques décrites (cf. 2.4). Dans ce paragraphe, nous détaillons les données allant du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009.

### 3.1.2.1. Les températures

Le Tableau 20 et la Figure 23 présentent les températures mensuelles de l'air de la région de Thonon – Evian calculées à partir des données provenant des stations de Thonon INRA, de Sciez, d'Evian-Scionnex, de Saint-Paul, de la Chapelle d'Abondance et de Très le Mont, du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009.

	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	Moyenne
Thonon INRA (375 m.)	7.2	2.5	0.8	2.5	6.2	12.1	16.4	18.3	20.6	21.7	17.5	11.9	11.5
Sciez (390 m.)	6	1.4	0.1	1.3	5.6	11.4	15.9	17.9	20	20.4	16	10.4	10.5
Evian-Scionnex (720 m.)	4.4	-0.1	-2	0.1	4.1	10.3	14.9	18.6	18.8	19.8	14.9	9.4	9.4
Chapelle d'Abondance (1030 m.)	1	-1.4	-4.6	-2.7	1.3	7.6	12.8	13.9	15.6	16.8	12.8	7.8	6.7
Très le Mont (1375 m.)	-0.2	-1.7	-6	-3.4	0.2	6.1	11.4	11.9	14.7	16.3	11.6	7.4	5.8
Moyenne	3.7	0.1	-2.3	-0.4	3.5	9.5	14.3	16.1	17.9	19	14.6	9.4	

Sources : [www.meteo-sciez.com](http://www.meteo-sciez.com), [www.valdabondance.com](http://www.valdabondance.com), INRA Thonon, SAEME, SIEM. 2010

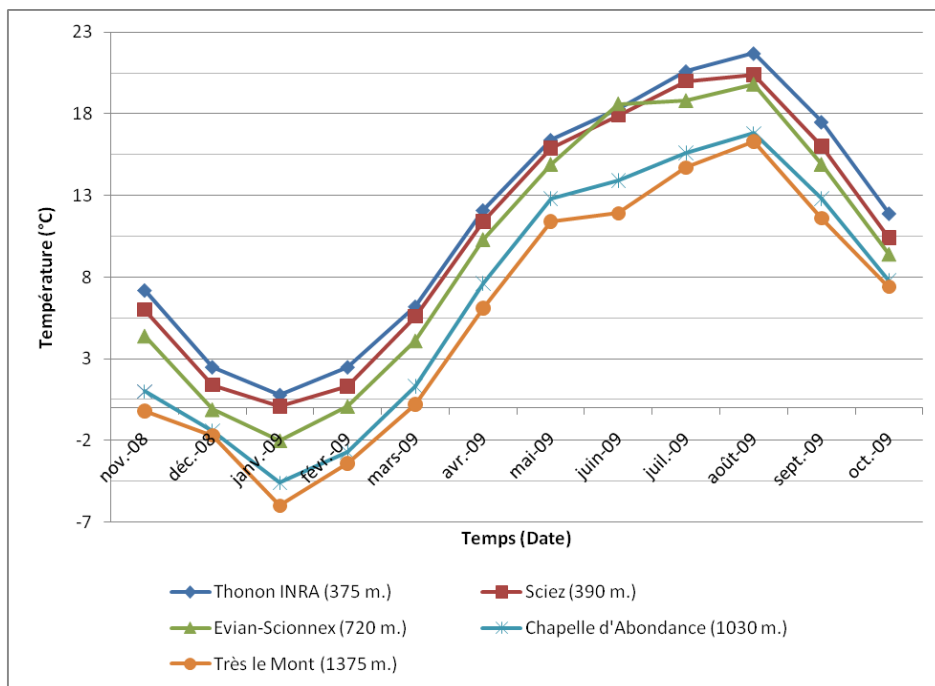
Tableau 20 : Résumé statistique des températures mensuelles dans la région de Thonon – Evian, du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009

A Thonon, la température moyenne annuelle est de 11.5°C. Le mois le plus chaud est août (21.7°C) et le mois le plus froid est janvier (0.8°C). Les températures moyennes annuelles présentées sur le Tableau 20, ont permis de calculer un gradient altimétrique de -0.56°C/100 m. (cf. Figure 24).

### 3.1.2.2. Les précipitations

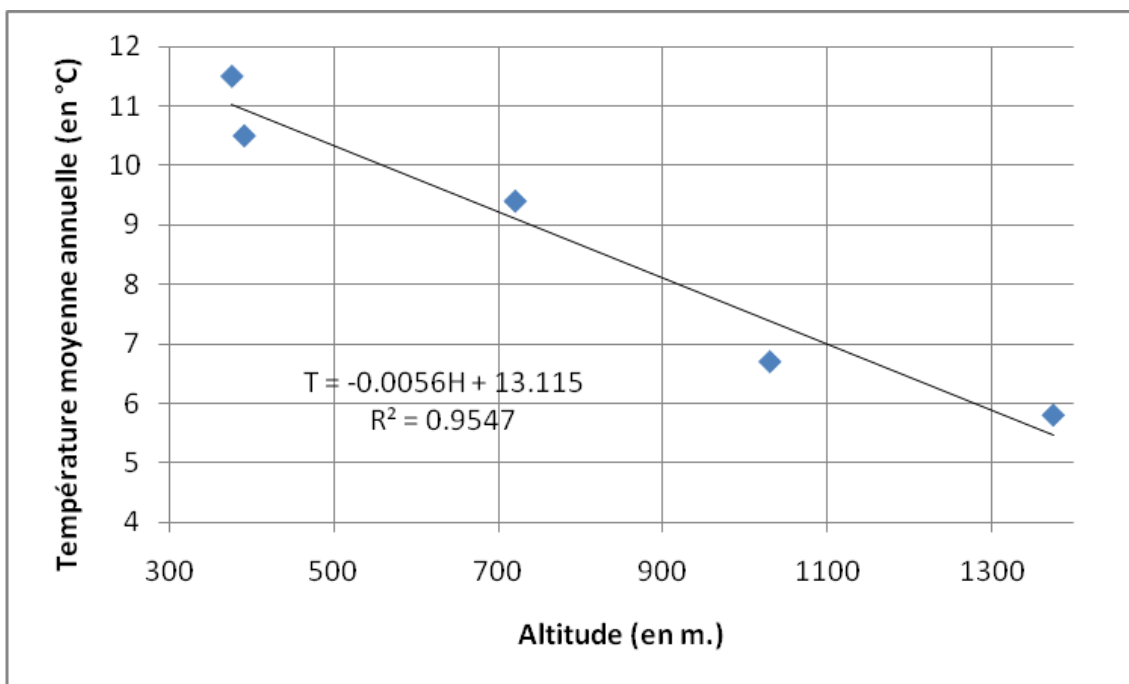
Le Tableau 21 et la Figure 25 présentent les précipitations mensuelles moyennes de la région de Thonon – Evian estimées à partir des données provenant des stations de Thonon INRA, de Sciez, d'Evian-Scionnex, de la Chapelle d'Abondance et de Très le Mont, du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009.

Les données recueillies à Thonon-les-Bains montrent un cumul annuel des précipitations de 733 mm ce qui représente un déficit de l'ordre de 23 % par rapport aux moyennes des 20 dernières années. La période d'étude n'est donc pas représentative d'une situation pluviométrique « normale ». Les mois les plus pluvieux sont le mois de décembre 2008 avec une moyenne de 114.5 mm et le mois de juillet 2009 avec une moyenne 107.2 mm. Les mois les plus secs sont les mois d'avril 2009 avec une moyenne de 37.2 mm) et le mois d'octobre 2009 avec une moyenne de 37.8 mm.



Sources : [www.meteo-sciez.com](http://www.meteo-sciez.com), [www.valdabondance.com](http://www.valdabondance.com), INRA Thonon, SAEME, SIEM. 2010

Figure 23 : Evolution des températures moyennes mensuelles des stations météorologiques de la région Thonon – Evian, de novembre 2008 à octobre 2009



Sources : [www.meteo-sciez.com](http://www.meteo-sciez.com), [www.valdabondance.com](http://www.valdabondance.com), INRA Thonon, SAEME, SIEM. 2010

Figure 24 : Relation altitude – température moyenne annuelle des stations météorologiques de la région Thonon – Evian, de novembre 2008 à octobre 2009

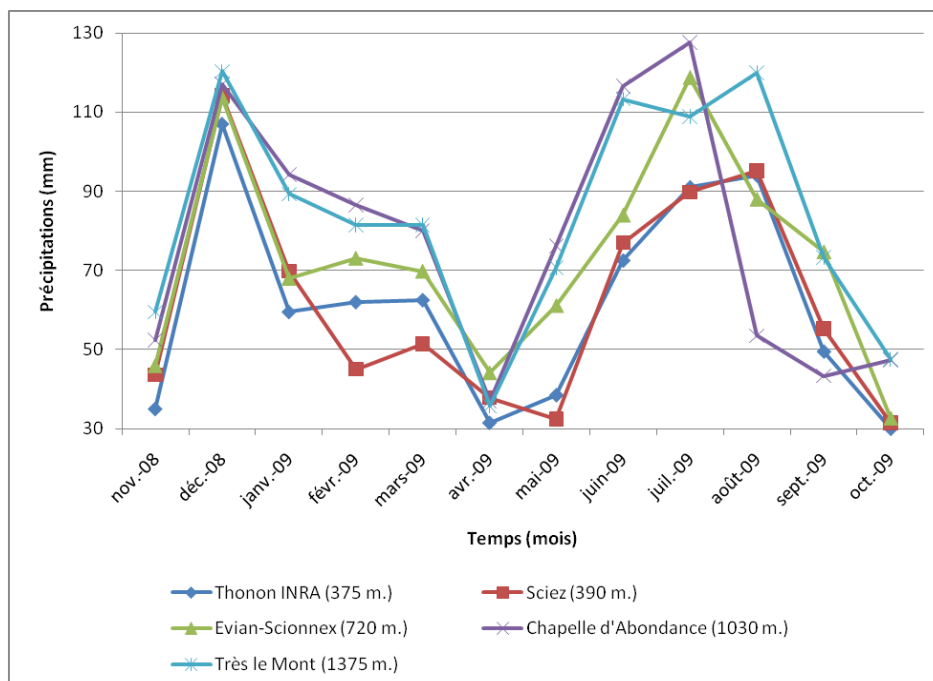
De novembre 2008 à avril 2009, une partie des précipitations se réalise sous forme de neige. Le pluviomètre de la station météorologique de Très le Mont n'étant pas équipé d'un système de chauffage, les précipitations neigeuses ne sont pas traduites

en hauteur d'eau. La neige s'accumule dans le pluviomètre et l'enregistrement se fait lors de la fonte. Les mesures sont donc biaisées par la saturation du pluviomètre en neige. Afin d'estimer les précipitations de cette période, des gradients altimétriques ont été réalisés mois par mois à partir des informations des autres stations météorologiques. Les résultats sont présentés en rouge sur le Tableau 21. Le gradient pluviométrique altitudinal (cf. Figure 26) a été estimé à +27mm/an/100 m. avec un coefficient de régression de près de 97 %. Ce gradient est deux à trois fois moins important que ceux proposés sur le Tableau 15.

	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	Cumul
Thonon INRA (375 m.)	35	107	59.5	62	62.5	31.5	38.5	72.5	91	94	49.5	30	733
Sciez (390 m.)	43.6	114.2	69.8	45	51.4	37.8	32.4	77	89.8	95.2	55.2	31.4	742.8
Evian-Scionnex (720 m.)	45.9	113.8	68	73.1	69.8	44.1	61.1	84	118.8	88	74.7	32.6	873.9
Chapelle d'Abondance (1030 m.)	52.4	117	85.6	78.6	72.8	33.6	69.2	106	116	48.6	39.4	43	931.5
Très le Mont (1375 m.)	59.5	120.3	89.3	81.5	81.4	35.8	64.2	103	99	109	66.6	43.2	1101.4
Moyenne	47.3	114.5	76.2	69.6	69	37.2	55.8	92.7	107.2	90.1	59.2	37.8	

Sources : [www.meteo-sciez.com](http://www.meteo-sciez.com), [www.valdabondance.com](http://www.valdabondance.com), INRA Thonon, SAEME, SIEM. 2010

Tableau 21 : Résumé statistique des précipitations moyennes mensuelles dans la région de Thonon – Evian, du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009  
**Les valeurs en rouge signalent une évaluation des précipitations neigeuses**

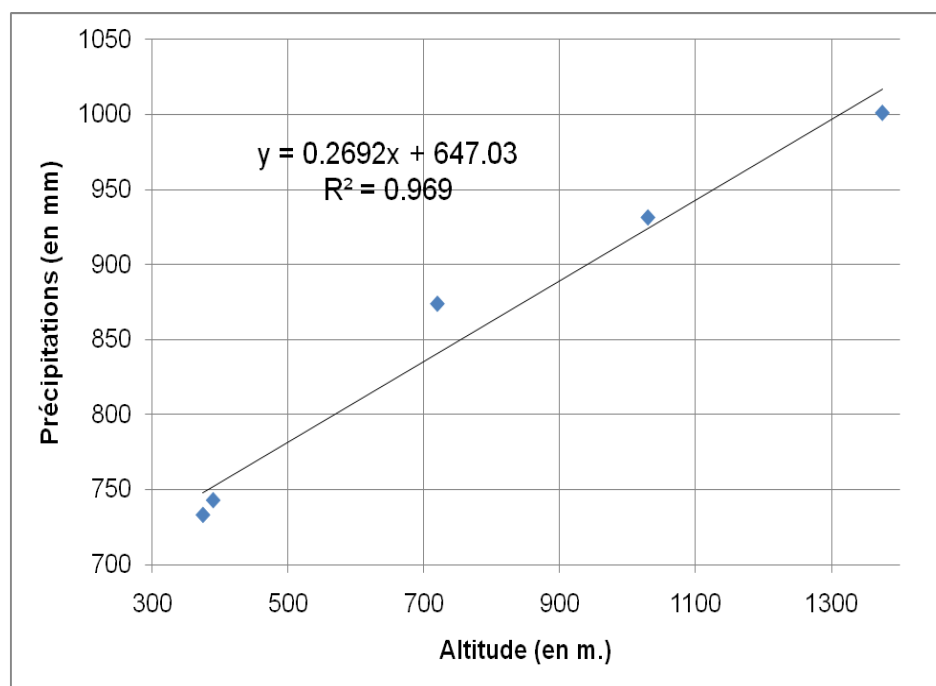


Sources : [www.meteo-sciez.com](http://www.meteo-sciez.com), [www.valdabondance.com](http://www.valdabondance.com), INRA Thonon, SAEME, SIEM. 2010

Figure 25 : Evolution des cumuls mensuels des précipitations des stations météorologiques de la région Thonon – Evian, de novembre 2008 à octobre 2009

Les périodes de fusion nivale ont été déterminées à partir des éléments suivants :

- Le déclenchement de la fonte se produit lorsque la température moyenne journalière des 3 jours précédents est supérieure à  $-1.5^{\circ}\text{C}$  (Guyomard, 2006)
- L'altitude moyenne du secteur d'étude est de 1250 m. La température moyenne journalière de la station de Très le Mont est celle qui représente le mieux l'évolution des températures du secteur d'étude
- Nos observations de terrains qui permettent d'affirmer que la couverture neigeuse a été continue du 6 décembre 2008 au 31 mars 2009 à l'altitude de 1000 m. et du 6 décembre 2008 au 15 avril 2009 à l'altitude de 1400 m
- La Figure 27 qui présente l'évolution des températures moyennes journalières des stations météorologiques de Très le Mont (1375 m.) et de Sciez (390 m.)



Sources : [www.meteo-sciez.com](http://www.meteo-sciez.com), [www.valdabondance.com](http://www.valdabondance.com), INRA Thonon, SAEME, SIEM. 2010

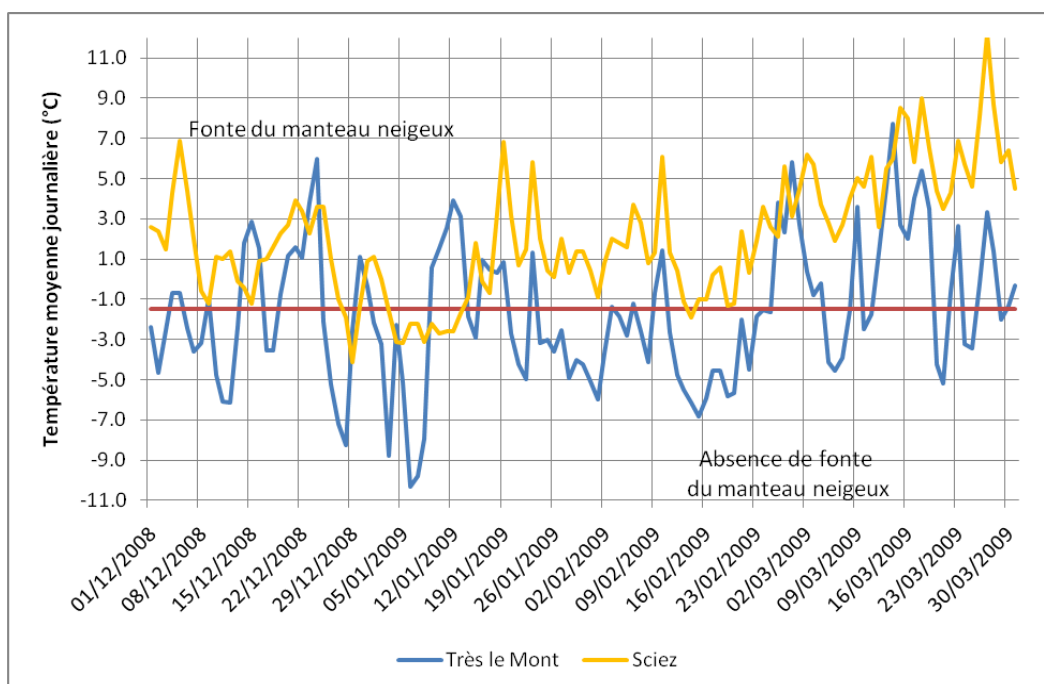
Figure 26 : Relation altitude – précipitation moyenne annuelle des stations météorologiques de la région Thonon – Evian, de novembre 2008 à octobre 2009

Les périodes de fusion nivale du secteur d'étude sont les suivantes : Le 17 décembre 2008, du 22 décembre au 24 décembre 2008, le 12 et le 13 janvier 2009, le 19 janvier 2009, du 1<sup>er</sup> au 4 mars 2009, du 15 au 19 mars 2009 et tous le mois d'avril 2009.

### 3.1.2.3. Evolution de la chimie des précipitations au Col du Feu et à Très le Mont

L'objectif de ce paragraphe est de préciser l'origine spatiale du « *signal d'entrée* » à partir de l'étude des concentrations en éléments chimiques des précipitations. La composition chimique des précipitations dépend de la nature et de la quantité de composés contenus dans l'atmosphère. Les principales sources des composés chimiques présents dans l'atmosphère, qui constituent par la suite les précipitations, sont définies par trois pôles d'influence majeurs (LOYE-PILOT, 1995) :

- Origine marine :  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$
- Origine continentale :  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$
- Origine humaine :  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$



Sources : [www.meteo-sciez.com](http://www.meteo-sciez.com), SAEME, SIEM. 2010

Figure 27 : Fonte du manteau neigeux en fonction des températures atmosphériques aux stations météorologiques de Très le Mont et de Sciez, du 1<sup>er</sup> décembre 2008 au 31 mars 2009

Le Tableau 22 présente les résultats des analyses chimiques de l'année 2009. Les pluies (et les précipitations neigeuses) ont été recueillies au Col du Feu et à Très le Mont. Les eaux météoriques ont été collectées dans des bassines et les prélèvements ont été réalisés après les épisodes pluvieux. Après chaque prélèvement, les bassines ont été vidées et nettoyées à l'aide d'eau déminéralisée. Le nombre de prélèvements et d'analyses s'élève à 40. Des vols de contenants sont à signaler.

Pour les chlorures et les sulfates, les valeurs sont dans la plupart des cas en deçà du seuil de quantification du laboratoire (2.5 mg/l). Pour les autres éléments, les valeurs sont majoritairement en deçà des seuils de quantification mais on observe des pics :

- Pour le calcium, de 3.1 mg/l, le 24 mars au Col du Feu et de 8.9 mg/l, le 30 avril à Très le Mont. L'ion calcium semble le plus prédominant ce qui est probablement dû à l'environnement carbonaté du secteur du Forchat (dissolution de particules calcaires provenant de l'érosion éolienne)
- Pour les nitrates, de 3.06 mg/l, le 2 février au Col du Feu et de 2.99 g/l, le 9 février à Très le Mont. Ils sont généralement issus des émissions d'oxyde d'azote par les véhicules à moteurs thermiques
- Pour le magnésium, 0.21 mg/l, le 7 juillet au Col du Feu et de 1.63 mg/l, le 7 juillet à Très le Mont. Ils proviennent probablement de l'environnement magnésien du secteur du Forchat (dissolution de particules magnésiennes)
- Pour le sodium, de 1.2 mg/l, le 9 octobre au Col du Feu et de 1.51 le 7 juillet à Très le Mont. L'origine du sodium est essentiellement marine. La

variabilité des valeurs peut s'expliquer par la recharge (par évaporation) qui s'effectue au niveau du lac Léman

- Pour le potassium, de 2.5 mg/l, le 27 octobre au Col du Feu et de 10.2 mg/l, le 7 juillet à Très le Mont. Il peut avoir une origine marine mais, loin des côtes, il est bien souvent lié aux activités humaines (agriculture et industrie notamment)

La composition chimique des eaux de pluie au Col du Feu et à Très le Mont, résulte des influences marines (majoritairement de l'Océan Atlantique du fait du flux d'ouest), avec la présence des ions sodium. Les masses d'air d'origine océanique sont « enrichies » au cours de leur trajet par divers éléments (calcium, sulfates, nitrates et potassium) liés à l'environnement et à l'activité humaine de la région.

Date	Nitrates		Chlorures		Sulfates		Silice		Calcium		Magnésium		Sodium		Potassium	
	CdF	TLM	CdF	TLM	CdF	TLM	CdF	TLM	CdF	TLM	CdF	TLM	CdF	TLM	CdF	TLM
22/01/2009	<1	<1	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<0.1	<0.1	2.6	<0.5	<0.1	<0.1	0.3	0.4	<0.5	<0.5
02/02/2009	3.1	1.8	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<0.1	<0.1	2.6	2.4	<0.1	<0.1	0.6	0.4	<0.5	<0.5
09/02/2009	1.8	3	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<0.1	<0.1	2.5	2.5	<0.1	<0.1	0.3	<0.25	<0.5	<0.5
24/02/2009	<1	<1	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<0.1	<0.1	1.1	1.1	<0.1	<0.1	<0.25	<0.25	<0.5	<0.5
24/03/2009	2.3		<2.5		<2.5		<0.1		3.1		<0.1		0.3		<0.5	
30/04/2009	<1	1.7	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<0.1	<0.1	0.8	8.9	<0.1	0.3	0.4	1.1	<0.5	<0.5
08/06/2009		<1		<2.5		<2.5		<0.1		0.7		<0.1		0.3		0.5
07/07/2009	1.9	<1	<2.5	4.4	<2.5	3.6	<0.1	0.1	1.2	4.7	0.2	1.6	0.6	1.5	1.52	10.2
17/07/2009	1.8	1.6	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<0.1	0.1	1.5	1.8	0.2	0.3	0.4	0.5	0.57	1.82
28/07/2009	2.2	2.1	<2.5	8.1	<2.5	<2.5	<0.1	<0.1	1.3	0.9	0.1	0.1	0.9	0.3	<0.5	<0.5
25/08/2009	1		<2.5		<2.5		<0.1		1.4		0.1		0.3		0.51	
09/10/2009	2.3	3.9	3.2	<2.5	<2.5	<2.5	<0.1	0.1	3.1	2.7	0.2	0.2	1.2	0.8	2.3	2.2
13/10/2009	<1	<1	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<0.1	<0.1	0.6	0.8	<0.1	<0.1	<0.25	<0.25	1.1	1.3
23/10/2009	1.3	2	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<0.1	<0.1	0.9	0.8	<0.1	<0.1	0.5	0.3	<0.5	<0.5
27/10/2009	1.4	1.6	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<0.1	<0.1	1.7	1.5	0.2	0.1	0.6	0.6	2.5	1.3
03/11/2009	<1	<1	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<0.1	<0.1	<0.5	<0.5	<0.1	<0.1	<0.25	0.3	<0.5	1
06/11/2009	<1	<1	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<0.1	<0.1	0.6	<0.5	<0.1	<0.1	<0.25	0.3	0.45	<0.5
09/11/2009	<1	1.8	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<0.1	<0.1	<0.5	3.4	<0.1	0.2	0.3	0.3	<0.5	1.3
13/11/2009	<1	<1	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<0.1	<0.1	<0.5	<0.5	<0.1	<0.1	<0.25	<0.25	<0.5	<0.5
16/11/2009	1.3	1.6	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<0.1	<0.1	<0.5	<0.5	<0.1	<0.1	0.5	0.4	<0.5	<0.5
23/11/2009		2.5		<2.5		<2.5		<0.1		1.7		0.2		0.7		<0.5
27/11/2009	<1	1.1	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<0.1	<0.1	<0.5	<0.5	<0.1	<0.1	0.5	0.4	<0.5	<0.5

Tableau 22 : Résultats des analyses chimiques des précipitations recueillies au Col du Feu et à Très le Mont durant l'année 2009

CdF : Col du Feu ; TLM : Très le Mont

## 3.2. Les informations hydrodynamiques

Pour la période sélectionnée (1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009), les informations hydrodynamiques sont présentées dans le but de :

- Traduire les hauteurs d'eau en débit et préciser les incertitudes de mesures
- Déterminer et reconstituer les lacunes d'informations
- Caractériser les chroniques de débit des sources

### 3.2.1. Les jaugeages et les courbes de tarage

Les informations hydrodynamiques recueillies sont de deux types. Il s'agit soit de mesures de débits réalisées par des débitmètres avec enregistrement des valeurs, soit de mesures de hauteurs d'eau exécutées par des capteurs de pression avec enregistrement de valeurs. Dans le premier cas, les informations utilisées sont brutes alors que dans le second cas, des campagnes de jaugeages et des courbes de tarage ont été réalisées afin de relier les hauteurs d'eau mesurées à un débit. Dans ce paragraphe, nous présentons la méthode de jaugeage sélectionnée, les résultats des campagnes de jaugeage et les courbes de tarage réalisées.

#### 3.2.1.1. Objectif et méthodes de jaugeage utilisées

L'objectif des jaugeages est de réaliser des courbes d'étalonnages (courbes de tarage) afin de convertir les hauteurs d'eau mesurées en débits.

Pour les cours d'eau, la méthode dite par injection à base de sel (NaCl) a été utilisée car elle est la plus appropriée au secteur montagneux (écoulements turbulents, lits rugueux, ...). Le principe est d'injecter une solution de NaCl en une fois. Puis en aval de la distance de bon mélange, la concentration en sel est déterminée de manière indirecte par un conductimètre. Cette méthode est simple à mettre en place mais elle se caractérise par une marge d'erreur de l'ordre de 20% (GUYOMARD, 2006).

Pour les sources, la méthode dite volumétrique a été utilisée. Elle consiste à mesurer un volume d'eau pendant un temps donné. Dans la pratique, les eaux arrivent dans un contenant équipé d'un système de vidange (trop-plein). Lorsque le système de vidange est actionné, les eaux s'évacuent par un trop-plein et le niveau d'eau baisse. Lorsque le niveau d'eau est au minimum, le système de vidange est arrêté. Le niveau d'eau remonte et une mesure de la hauteur d'eau est réalisée de manière régulière (généralement toutes les 5 secondes). Le débit est ensuite calculé à partir de la connaissance du volume du contenant, du temps et de la mesure de la remontée des eaux. La méthode est simple et la marge d'erreur est estimée à 5 %.

#### 3.2.1.2. Les courbes de tarage

Sur le site d'étude, 10 courbes de tarage sont à utiliser et 9 courbes de tarage sont à réaliser (la courbe de tarage du Pamphiot est fournie par le fabricant). Au Col du Feu, des mesures inférieures à la hauteur d'eau équivalente à un débit nul sont apparues (cf. Figure 28) alors qu'aucun dysfonctionnement du capteur n'est à signaler. Notre hypothèse serait celle d'un problème de mesures de la pression atmosphérique de l'air. **Ce constat contraint à supprimer le site du suivi hydrodynamique**

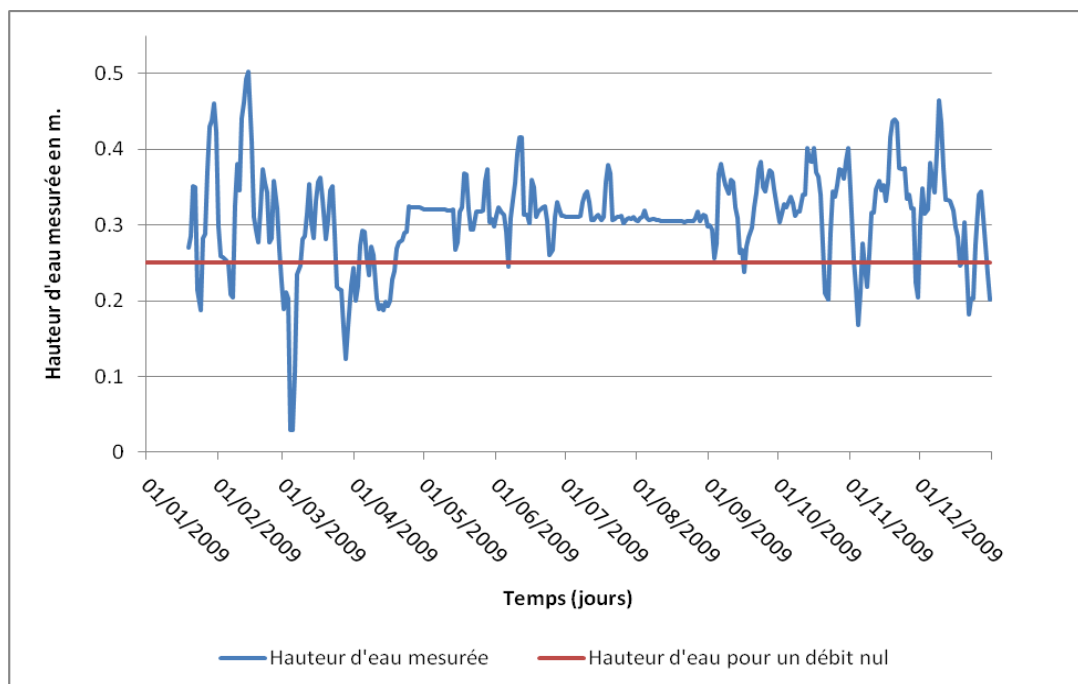


Figure 28 : Evolution de la hauteur d'eau mesurée par rapport à la hauteur d'eau pour un débit nul, au captage du Col du Feu en 2009

Le Tableau 23 présente le pourcentage des hauteurs d'eau couverte par les courbes de tarage. Il avoisine les 95 % sauf pour la source de l'Epinguy (77.8 %), le site des Granges Mamet rivière (81.9 %) et le site des Moises rivière (82.7 %).

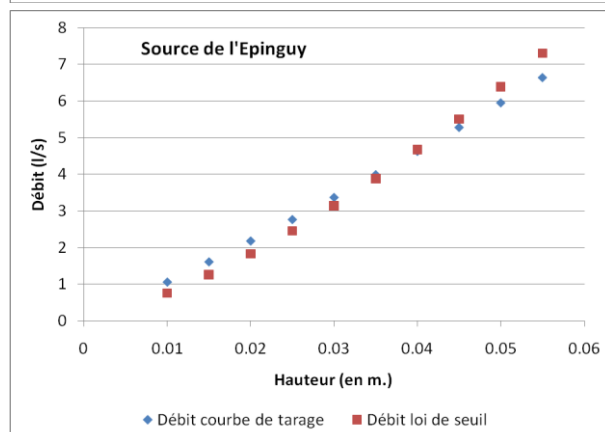
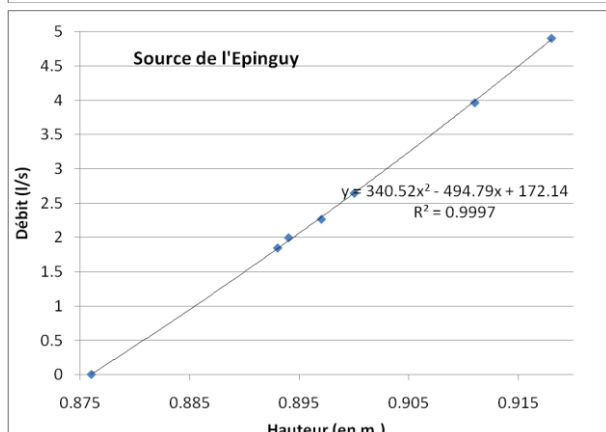
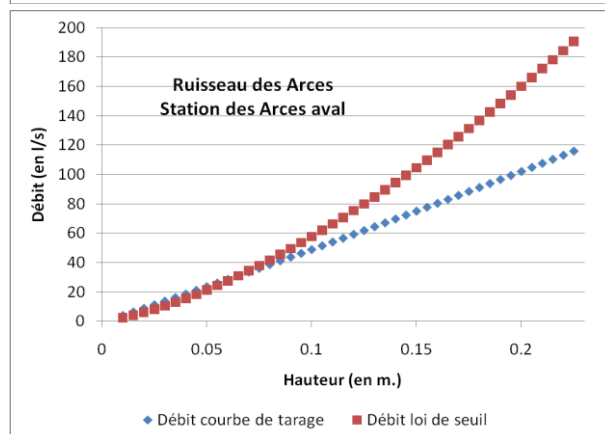
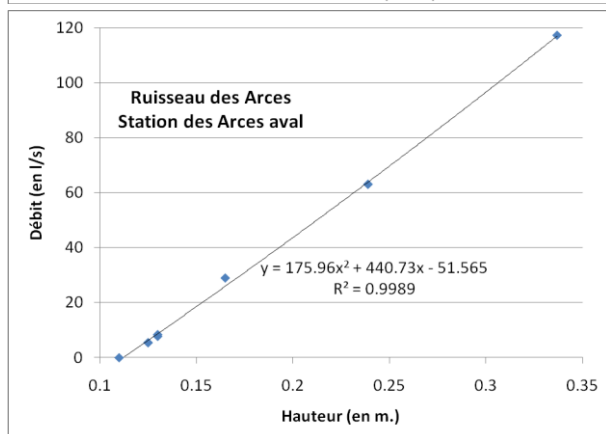
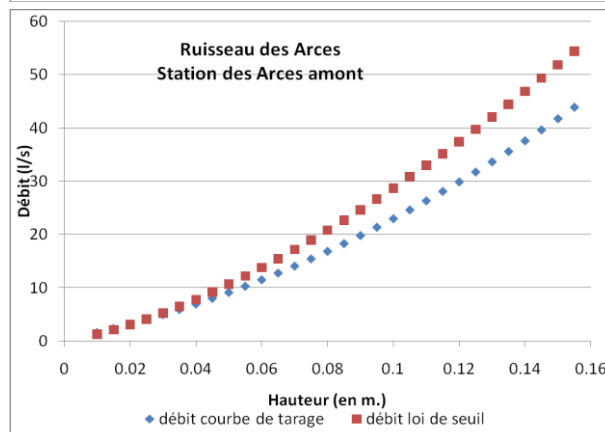
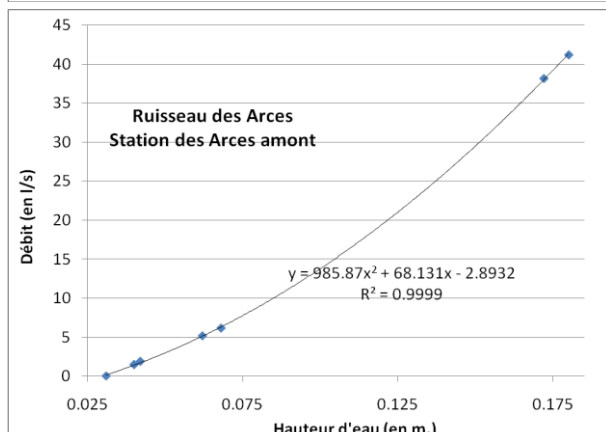
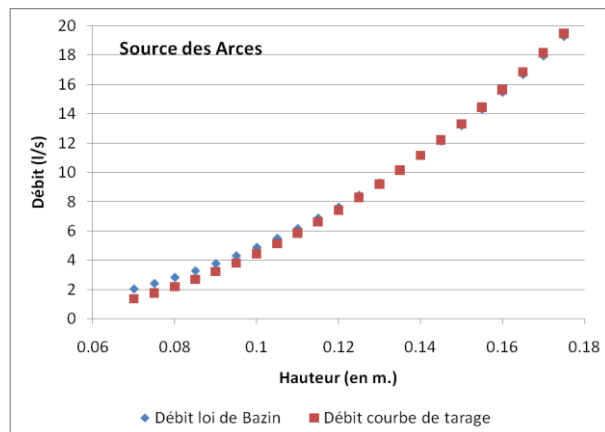
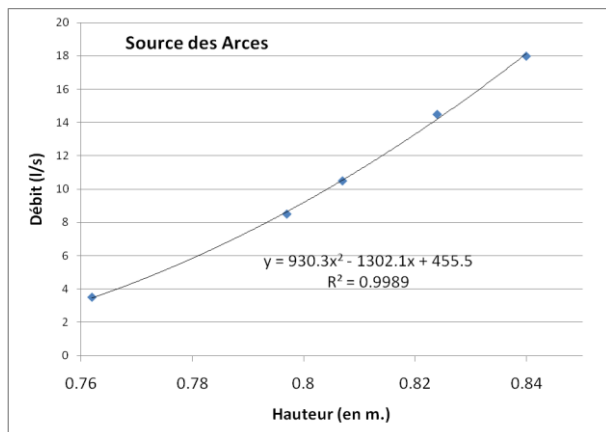
	Hauteur minimum mesurée	Hauteur maximum mesurée	Hauteur minimum jaugée	Hauteur maximum jaugée	% des hauteurs d'eau couverte par les courbes de tarage
Arces	0.7559	0.8448	0.762	0.84	91.87 %
Arces amont	0.0392	0.181	0.04	0.18	98.99 %
Arces aval	0.1151	0.312	0.125	0.31	93.96 %
Epinguy	0.892	0.9254	0.893	0.918	77.84 %
Granges Mamet rivière	0.0141	0.2193	0.019	0.183	81.92 %
Menoge	0.0896	0.278	0.095	0.275	95.54 %
Moises rivière	0.0461	0.1346	0.047	0.121	82.68 %
Ramble	0.3799	0.4591	0.38	0.455	94.7 %

Tableau 23 : Pourcentage des hauteurs d'eau couverte par les courbes de tarages

Le Tableau 24 présente les résultats des jaugeages. Il informe sur la date, la méthodologie employée, le débit estimé et la hauteur d'eau mesurée. La Figure 29 expose les courbes de tarages et les courbes de débits obtenus à partir des lois hydrauliques (Loi de Bazin, Formule de la SIA, Formule de Staus et de Von Sanden). De manière générale, les différences entre les débits issus des courbes de tarage et les débits calculés à partir des lois hydrauliques, sont négligeables. Les marges d'erreur sont de 15 % pour les cours d'eau et de 5 % pour les sources.

	Date	Méthodologie	Débit mesuré	Hauteur mesurée
Arces	13/03/2009	Capacitif	9.5	0.798
	16/03/2009	Capacitif	11	0.807
	9/04/2009	Capacitif	18	0.84
	30/09/2009	Capacitif	2.5	0.762
	8/12/2009	Capacitif	14.5	0.824
Arces amont	31/08/2009	NaCl	1.5	0.04
	11/09/2009	NaCl	1.9	0.042
	17/11/2009	NaCl	5.6	0.068
	22/03/2010	NaCl	38.1	0.172
	29/03/2010	NaCl	41.2	0.18
Arces aval	24/08/2009	NaCl	5.5	0.125
	11/09/2009	NaCl	8.2	0.13
	3/12/2009	NaCl	29	0.165
	9/12/2009	NaCl	63.1	0.239
	22/03/2010	NaCl	98.2	0.31
Epinguy	27/07/2009	Capacitif	2.6	0.9
	27/08/2009	Capacitif	2.3	0.897
	6/10/2009	Capacitif	2	0.894
	14/10/2009	Capacitif	4	0.911
	27/11/2009	Capacitif	1.8	0.893
	9/04/2010	Capacitif	4.9	0.918
Granges Mamet rivière	24/08/2009	NaCl	0.6	0.019
	26/11/2009	NaCl	23.4	0.086
	4/12/2009	NaCl	28.1	0.095
	11/12/2009	NaCl	20.6	0.081
	22/03/2010	NaCl	70	0.183
	28/03/2010	NaCl	49.2	0.153
	29/03/2010	NaCl	36.5	0.117
Menoge	24/08/2009	NaCl	1	0.095
	15/02/2010	NaCl	6.7	0.123
	19/03/2009	NaCl	65.2	0.275
	25/03/2009	NaCl	25.2	0.191
	2/04/2010	NaCl	33.6	0.207
Moises rivière	24/08/2009	NaCl	3.6	0.047
	6/10/2009	NaCl	5.8	0.052
	17/11/2009	NaCl	22.9	0.077
	19/11/2009	NaCl	23.5	0.078
	1/12/2009	NaCl	30	0.085
	10/12/2009	NaCl	34.2	0.09
	25/03/2010	NaCl	36.4	0.092
	24/11/2009	NaCl	44	0.097
	27/03/2010	NaCl	191.4	0.121
Ramble	8/09/2008	Capacitif	1.7	0.411
	3/11/2008	Capacitif	1.9	0.418
	25/08/2009	Capacitif	0.7	0.382
	15/09/2009	Capacitif	0.7	0.381
	30/09/2009	Capacitif	0.6	0.38
	18/01/2010	Capacitif	2.7	0.443
	09/04/2010	Capacitif	3.2	0.455

Tableau 24 : Résultats des jaugeages réalisés



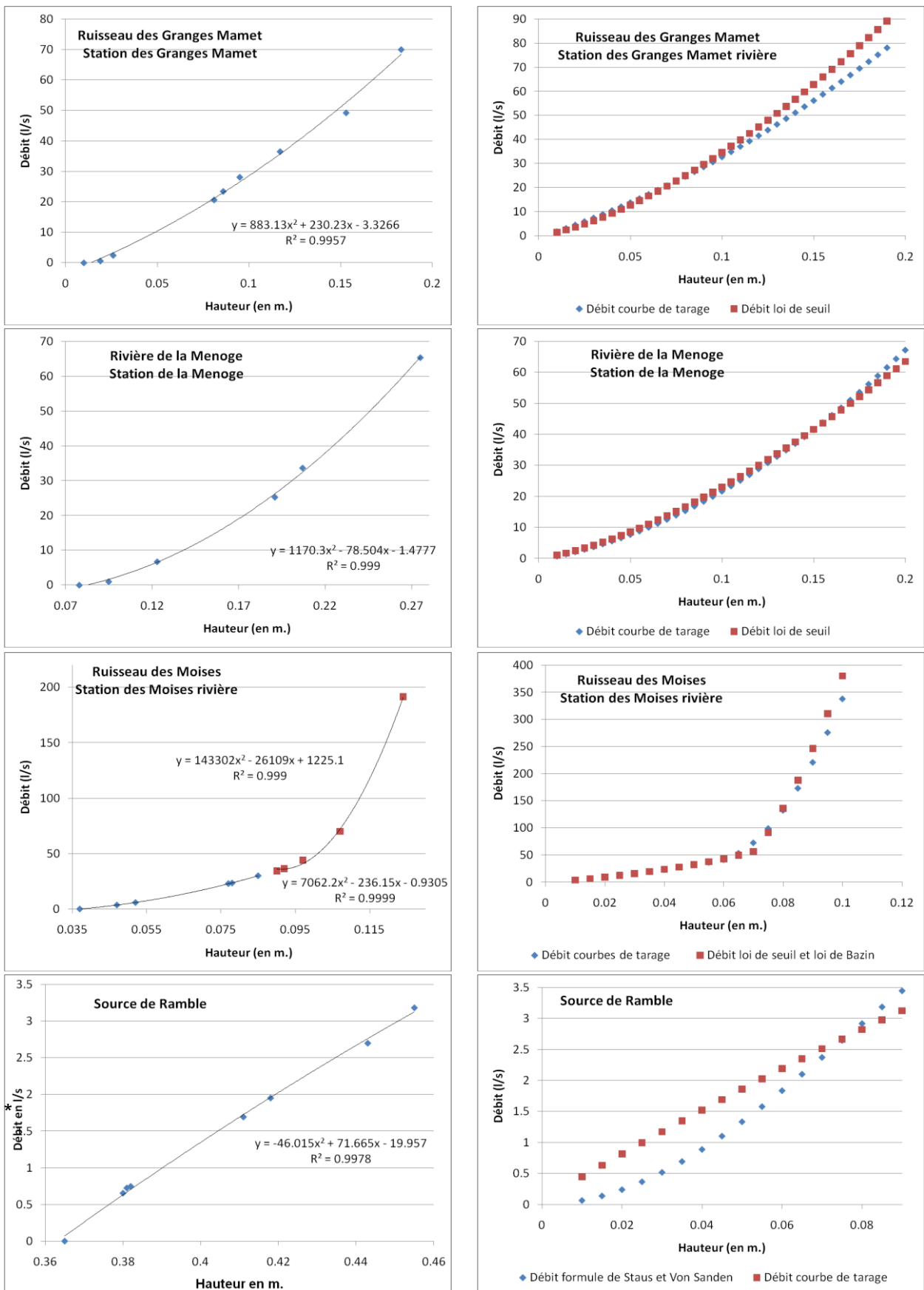


Figure 29 : Courbes de tarages selon les jaugeages réalisés et vérifications à partir des lois hydrauliques

### 3.2.2. Les lacunes d'informations

Dans ce paragraphe, les lacunes d'informations sont présentées et identifiées selon leur nature (informations manquantes si aucune mesure n'a été réalisée et informations biaisées si la valeur semble sous-estimée ou surestimée). Une reconstitution des informations par approche linéaire est ensuite entreprise.

#### 3.2.2.1. Les informations manquantes

Le Tableau 25 présente les dates et les nombres de jours présentant une absence d'informations entre le 1<sup>er</sup> novembre 2008 et le 31 octobre 2009. Il renseigne sur le type supposé de débits (bas, moyen et haut) durant les périodes d'absence d'informations.

	Date absence d'informations	Nombre de jours	Débit (bas, moyen, haut)
Arces aval	1/11/2008 au 29/12/2008	59	Moyen/Haut
	17/03/2009 au 24/03/2009	8	Haut
Epinguy	23/11/2008 au 23/12/2008	31	Moyen/Haut
	26/03/2009 au 5/05/2009	40	Haut
Favrats	7/10/2009 au 31/10/2009	25	Bas
Granges Mamet rivière	1/11/2008 au 2/11/2008	2	Moyen
Moises rivière	6/01/2009 au 19/01/2009	14	Moyen
	15/02/2009 au 24/02/2009	9	Moyen
Pamphiot	1/11/2008 au 11/11/2008	11	Moyen
	1/09/2009	1	Haut
Pont du Mouche	1/11/2008 au 11/11/2008	11	Moyen

Tableau 25 : Date, nombre de jours et type de débits durant les absences d'informations du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009

211 jours d'informations manquantes ont été dénombrés (107 jours pour les sources et 104 jours pour les cours d'eau). Aux Favrats et au Pont du Mouche, les absences d'informations ont été causées par des blocages de compteurs. Ailleurs, il s'agit d'un dysfonctionnement de la sonde de pression.

#### 3.2.2.2. Les informations biaisées

Pour les sources, les dispositifs de trop plein ont fonctionné aux Arces (à partir d'un débit de 18 l/s), aux Granges Mamet (à partir d'un débit de 3.6 l/s) et au Pont du Mouche (à partir d'un débit de 5 l/s). Pour les cours d'eau, les dispositifs de trop plein ont fonctionné aux Arces amont (à partir d'un débit de 41 l/s), aux Arces aval (à partir d'un débit de 102 l/s), à la Menoge (à partir d'un débit de 68 l/s) et au Pamphiot (à partir de 90 l/s). Pour ces sites, des volumes d'eau sont évacués et ne sont pas comptabilisés durant les périodes présentées sur le Tableau 26. 154 jours de mise en service du trop plein ont ainsi été identifiés (74 jours pour les sources et 80 jours pour les cours d'eau).

	Date début	Date fin	Date trop plein	Nombre de jours
Arces	01/11/2008	31/10/2009	7/04/2009 au 15/04/2009	9
Arces amont	01/11/2008	31/10/2009	1/11/2008 au 2/11/2008	2
			23/01/2009	1
			28/03/2009	1
			3/04/2009 au 16/04/2009	14
			17/07/2009	1
Arces aval	01/11/2008	31/10/2009	7/04/2009 au 12/04/2009	6
Granges Mamet (source)	01/11/2008	31/10/2009	24/01/2009 au 29/01/2009	6
			15/03/2009 au 8/04/2009	25
Menoge	01/11/2008	31/10/2009	1/11/2008 au 3/11/2008	3
			5/12/2008	1
			20/01/2009	1
			23/01/2009 au 24/01/2009	2
			10/02/2009	1
			16/03/2009 au 19/03/2009	4
			27/03/2009 au 29/03/2009	3
			1/04/2009 au 9/04/2009	9
			Pamphiot	01/11/2008
19/01/2009 au 21/01/2009	3			
23/01/2009 au 25/01/2009	3			
10/02/2009 au 11/02/2009	2			
15/03/2009 au 19/03/2009	5			
27/03/2009 au 30/03/2009	4			
2/04/2009 au 12/04/2009	11			
Pont du Mouche	01/11/2008	31/12/2009	6/04/2009 au 9/05/2009	34

Tableau 26 : Date et nombre de jours de trop plein des sources et des cours d'eau

### 3.2.3. La reconstitution des lacunes d'informations

En ajoutant les jours d'informations manquantes et les jours d'informations biaisées, nous obtenons 416 jours de lacunes d'informations (221 jours pour les sources et 195 pour les cours d'eau). De manière générale, les lacunes d'informations sont de courte durée (inférieures à 15 jours). La reconstitution linéaire entraîne des biais faibles et donc acceptables.

La reconstitution linéaire entraîne des biais plus importants et donc une déformation des traitements pour les sources de l'Epinguy (31 et 40 jours consécutifs d'absence d'informations), des Granges Mamet (57 jours consécutifs de mise en service du trop-plein) et du Pont du Mouche (36 jours consécutifs de fonctionnement du trop-plein).

En cas de mise en service du trop plein des cours d'eau, il semble logique d'admettre que l'impact quantitatif des prélèvements d'eau potable sur les milieux aquatiques est faible. Les informations biaisées des cours d'eau n'ont donc pas été reconstituées.

### 3.2.4. Les chroniques de débit des sources

Dans ce paragraphe, les chroniques de débit des sources sont présentées dans le but de caractériser l'influence des saisons et des précipitations ponctuelles. Ces informations sont ensuite reprises afin de préciser les types d'infiltration.

#### 3.2.4.1. Les sources d'Habère-Poche

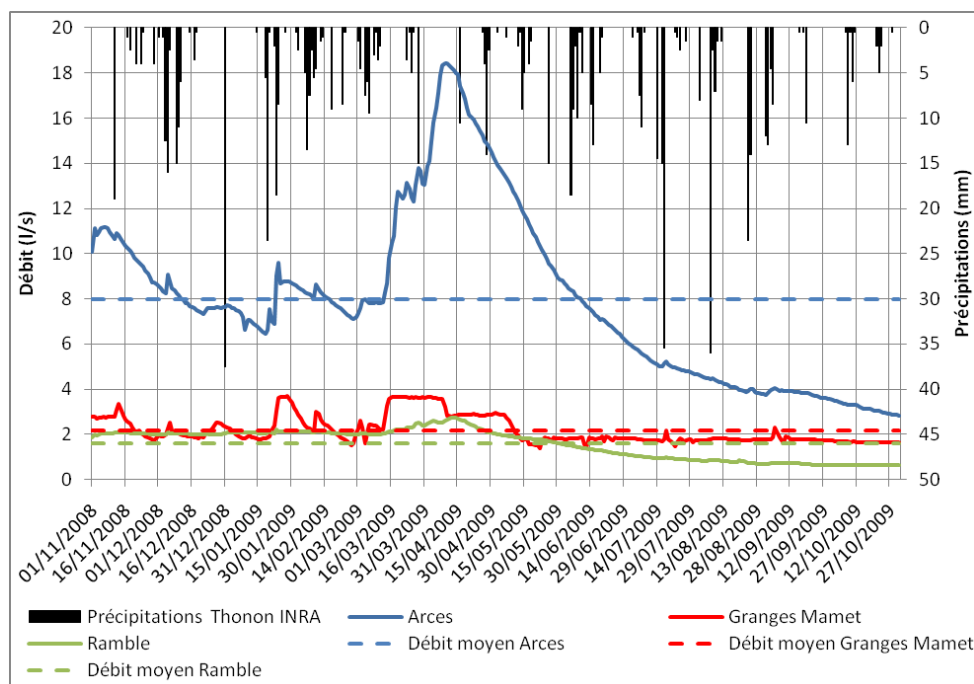
La Figure 30 présente l'évolution des débits moyens journaliers aux Arces, aux Granges Mamet et à Ramble, du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009. Le tableau statistique expose les informations suivantes :

- Aux Arces, la moyenne est de 7.96 l/s et la médiane est de 7.61 l/s (la moyenne est influencée par de forts débits). Le débit minimum est enregistré le 31 octobre avec un débit de 2.81 l/s. Le débit maximum mesuré est de 18.41 l/s, le 9 avril. L'écart type est de 3.78 et le coefficient de variation est de 47.5 % (rapport entre l'écart type et la moyenne, exprimé en pourcentage). Le rapport entre le débit maximum et le débit minimum est de 6.5
- Aux Granges Mamet, la moyenne est de 2.18 l/s et la médiane est de 1.85 l/s (la moyenne est influencée par de forts débits). Le débit minimum est enregistré le 22 mai avec un débit de 1.38 l/s. Le débit maximum mesuré est de 3.68 l/s, le 28 janvier (débit sous estimé du fait du fonctionnement du trop plein à partir de 2.7 l/s). L'écart type est de 0.61 et le coefficient de variation est de 28 %. Le rapport entre le débit maximum et le débit minimum est de 2.7
- A Ramble, la moyenne est de 1.58 l/s et la médiane est de 1.97 l/s (la moyenne est influencée par de faibles débits). Le débit minimum est enregistré le 29 septembre avec un débit de 0.63 l/s. Le débit maximum mesuré est de 2.74 l/s, le 13 avril. L'écart type est de 0.65 et le coefficient de variation est de 39.9 %. Le rapport entre le débit maximum et le débit minimum est de 4.35

Pour la source des Arces, nous observons :

- Une phase de hautes eaux du 1<sup>er</sup> novembre au 11 décembre avec un pic légèrement supérieur à 11 l/s. Ces forts débits font suite à un fort cumul des précipitations (96.5 mm de précipitations à Thonon) du 16 au 31 octobre, provoquant l'infiltration d'importantes quantités d'eau météorique
- Une phase de basses eaux du 12 décembre au 12 mars avec des débits compris entre 6 et 8 l/s. Durant cette période, les précipitations sont sous forme de neige et ont peu d'influence sur le débit. Nous observons une faible et courte phase de hautes eaux (du 23 janvier au 15 février) qui correspond à une fusion partielle du manteau neigeux
- Une phase de hautes eaux du 13 mars au 9 juin avec un pic à 18.41 l/s. L'augmentation du débit est rapide et il fait suite à la fusion nivale printanière
- Une phase de basses eaux du 10 juin au 31 octobre avec un point bas à 2.81 l/s le 31 octobre. Les faibles débits font suite à la reprise de la saison végétative et nous observons un faible impact des précipitations sur le débit. Pour exemple, nous notons 47 mm de pluie à la station de Très le

Mont du 17 au 18 juillet qui se traduit par augmentation faible du débit qui passe de 5 à 5.22 l/s (+4.4 %), du 16 au 18 juillet



	Arces	Granges Mamet	Ramble
Moyenne	7.96	2.18	1.58
Médiane	7.61	1.85	1.97
Écart type	3.78	0.61	0.65
Coefficient de variation	47.5 %	28 %	39.9 %
Minimum	2.81	1.38	0.63
Date	31/10/2009	22/05/2009	29/09/2009
Maximum	18.41	3.68	2.74
Date	09/04/2009	28/01/2009	13/04/2009
Rapport entre les débits maximum et minimum	6.55	2.67	4.35

Figure 30 : Evolution des débits moyens journaliers du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009 aux sources des Arces, des Granges Mamet et de Ramble

Pour la source des Granges Mamet, nous observons :

- Une phase de hautes eaux du 1<sup>er</sup> au 20 novembre avec un pic légèrement supérieur à 3.3 l/s. Les débits supérieurs à la moyenne font suite à un fort cumul des précipitations (96.5 mm de précipitations à Thonon) du 16 au 31 octobre, provoquant l'infiltration d'importantes quantités d'eau météorique
- Une phase de basses eaux du 21 novembre au 21 janvier avec un débit compris entre 1.7 et 2.2 l/s. Nous observons dans cette période deux courtes phases de hautes eaux (le 5 et le 6 décembre ; du 25 décembre au 2 janvier) qui correspondent soit à des précipitations (32 mm. entre le 3 et le 6 décembre) soit à une fusion partielle du manteau neigeux (du 25 décembre au 2 janvier)
- Une phase de hautes eaux du 22 janvier au 10 mai avec un pic à 3.68 l/s. Durant cette période, nous notons deux courtes phases de basses eaux (du 19 au 28 février ; du 4 et 5 mars). La fusion nivale printanière débute

au début du mois de mars et l'augmentation du débit est probablement rapide et conséquente (informations biaisées)

- Une phase de basses eaux du 11 mai au 31 octobre avec un point bas à 1.38 l/s le 22 mai. Les faibles débits font suite à la reprise de la saison végétative et nous observons une forte influence des précipitations sur le débit. Pour exemple, nous notons 52.4 mm de pluie à la station de Très le Mont du 1<sup>er</sup> au 4 septembre qui se traduit par une forte augmentation du débit qui passe de 1.76 à 2.29 l/s (+30.1 %), du 3 au 5 septembre

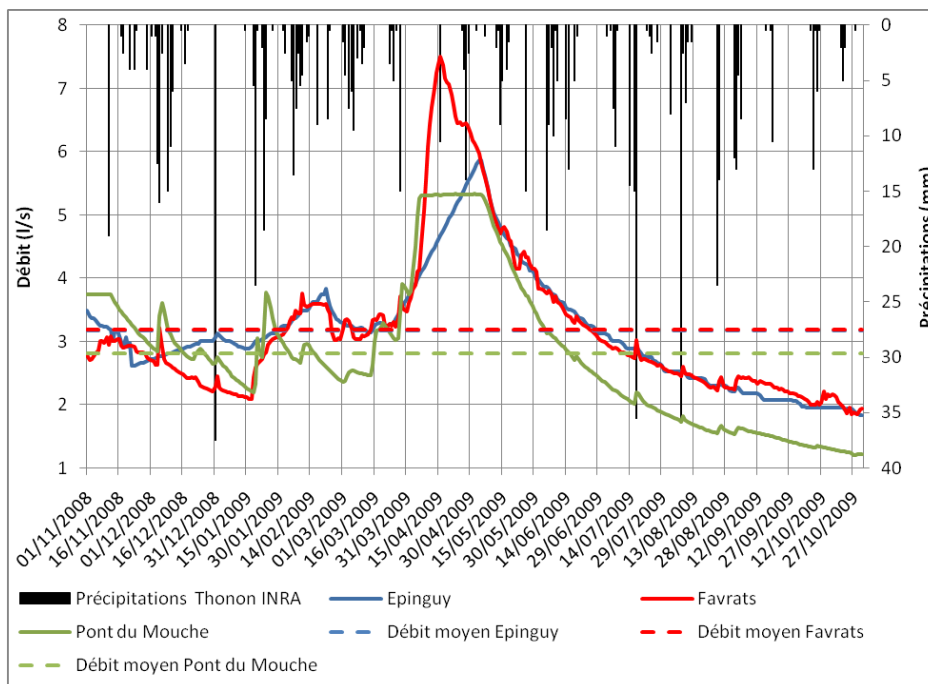
Pour la source de Ramble, nous observons :

- Une phase de hautes eaux du 1<sup>er</sup> novembre au 31 mai avec un pic à 2.74 l/s. Jusqu'à mi-novembre, les précipitations alimentent directement le système. A partir de la mi-novembre, les précipitations sont le plus souvent sous forme de neige et les fusions partielles du manteau neigeux permettent l'infiltration d'importantes quantités d'eau. A partir de mi-mars, la fusion nivale printanière provoque une augmentation lente du débit jusqu'au pic du 13 avril
- Une phase de basses eaux du 1<sup>er</sup> juin au 31 octobre avec un point bas à 0.63 l/s le 29 octobre. Les faibles débits font suite à la reprise de la saison végétative et nous observons un faible impact des précipitations sur le débit. Pour exemple, nous notons 52.4 mm de pluie à la station de Très le Mont du 1<sup>er</sup> au 4 septembre qui se traduit par une faible augmentation du débit qui passe de 0.67 à 0.74 l/s (+7.2 %), du 2 au 6 septembre

#### 3.2.4.2. Les sources d'Orcier

La Figure 31 présente l'évolution du débit aux sources de l'Epinguy, des Favrats et du Pont du Mouche, du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009. Le tableau statistique expose les informations suivantes :

- A l'Epinguy, la moyenne est de 3.17 l/s et la médiane est de 3.06 l/s (la moyenne est influencée par des forts débits). Le débit minimum est enregistré le 31 octobre avec un débit de 1.84 l/s. Le débit maximum mesuré est de 5.87 l/s, le 5 mai (la chronique est entachée d'une longue période d'absences d'informations en période de hautes eaux). L'écart type est de 0.9 et le coefficient de variation est de 28.4 %. Le rapport entre le débit maximum et le débit minimum est de 3.2
- Aux Favrats, la moyenne est de 3.19 l/s et la médiane est de 2.9 l/s (la moyenne est influencée par des forts débits). Le débit minimum est enregistré le 27 octobre avec un débit de 1.85 l/s. Le débit maximum mesuré est de 7.5 l/s, le 16 avril. L'écart type est de 1.2 et le coefficient de variation est de 37.6 %. Le rapport entre le débit maximum et le débit minimum est de 4.05
- Au Pont du Mouche, la moyenne est de 2.81 l/s et la médiane est de 2.71 l/s (la moyenne est influencée par des forts débits). Le débit minimum est enregistré le 27 octobre avec un débit de 1.2 l/s. Le débit maximum mesuré est de 5.33 l/s, le 23 avril. L'écart type est de 1.15 et le coefficient de variation est de 40.9 %. Le rapport entre le débit maximum et le débit minimum est de 4.4



	Epinguy	Favrats	Pont du Mouche
Moyenne	3.17	3.19	2.81
Médiane	3.06	2.90	2.71
Écart type	0.90	1.20	1.15
Coefficient de variation	28.4 %	37.6 %	40.9 %
Minimum	1.84	1.85	1.20
Date	31/10/2009	27/10/2009	27/10/2009
Maximum	5.87	7.50	5.33
Date	05/05/2009	16/04/2009	23/04/2009
Rapport entre les débits maximum et minimum	3.19	4.05	4.44

Figure 31 : Evolution des débits moyens journaliers du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009 aux sources de l'Epinguy, des Favrats et du Pont du Mouche

Pour la source de l'Epinguy, nous observons :

- Une phase de hautes eaux du 1<sup>er</sup> au 15 novembre avec un pic à 3.5 l/s. Les forts débits font suite à un fort cumul des précipitations (96.5 mm de précipitations à Thonon) du 16 au 31 octobre, provoquant l'infiltration d'importantes quantités d'eau météorique
- Une phase de basses eaux du 16 novembre au 29 janvier avec un débit compris entre 2.6 et 3.2 l/s. Durant cette période, les précipitations sont le plus souvent sous forme de neige et ont peu d'influence sur le débit
- Une phase de hautes eaux du 30 janvier au 27 juin avec un pic à 5.87 l/s. Elle ne peut être décrite du fait du manque d'informations
- Une phase de basses eaux du 28 juin au 31 octobre avec un point bas à 1.84 l/s le 31 octobre. Les faibles débits font suite à la reprise de la saison végétative et nous observons un faible impact des précipitations sur le débit. Pour exemple, nous notons 29 mm de pluie à la station de Très le Mont le 1<sup>er</sup> et le 2 septembre qui se traduit par une faible augmentation du débit qui passe de 2.21 à 2.27 l/s du 1<sup>er</sup> au 2 septembre (+2.7 %)

Pour la source des Favrats, nous observons :

- Une phase de basses eaux du 1<sup>er</sup> novembre au 21 janvier avec un point bas à 2.1 l/s, le 17 janvier. Durant cette période, les précipitations sont le plus souvent sous forme de neige et ont peu d'influence sur le débit
- Une phase de hautes eaux du 22 janvier au 25 juin avec un pic à 7.5 l/s, le 16 avril. A partir du 1<sup>er</sup> avril, l'augmentation du débit est rapide et fait suite à la fusion nivale printanière
- Une phase de basses eaux du 26 juin au 31 octobre avec un point bas à 1.85 l/s, le 27 octobre. Les faibles débits font suite à la reprise de la saison végétative et nous observons un impact des précipitations sur les débits. Pour exemple, nous notons 43 mm de pluie à la station de Très le Mont le 17 juillet qui se traduit par une augmentation modérée du débit qui passe de 2.74 à 3.02 l/s, du 16 au 17 juillet (+10.2 %)

Pour la source du Pont du Mouche, nous observons :

- Une phase de hautes eaux du 1<sup>er</sup> novembre au 16 décembre avec un pic à 3.74 l/s, le 12 novembre. Les forts débits sont la conséquence des précipitations enregistrées du 16 octobre à mi-décembre. Jusqu'à fin novembre, les précipitations alimentent directement le système. A partir de début décembre, les précipitations sont le plus souvent sous forme de neige et elles n'alimentent plus le système
- Une phase de basses eaux du 17 décembre au 15 mars avec un point bas à 2.2 l/s le 18 janvier. Durant cette période, les précipitations sont sous forme de neige et ont peu d'influence sur le débit. Nous notons deux petites et courtes phases de hautes eaux (du 20 janvier au 3 février ; du 10 au 15 février) qui correspondent à des fusions partielles du manteau neigeux
- Une phase de hautes eaux du 16 mars au 15 juin avec un pic à 5.33 l/s, le 23 avril. L'augmentation du débit est rapide et fait suite à la fusion nivale printanière (fonctionnement du trop-plein à partir du 6 avril)
- Une phase de basses eaux du 16 juin au 31 octobre avec un point bas à 1.21 l/s, le 27 octobre. Ces faibles débits font suite à la reprise de la saison végétative et nous observons un impact des précipitations sur les débits. Pour exemple, nous notons 43 mm de pluie à la station de Très le Mont le 17 juillet qui se traduit par une augmentation modérée du débit qui passe de 2.01 à 2.2 l/s du 16 au 17 juillet (+9.5 %)

#### 3.2.4.3. Les sources des Moises

La Figure 32 présente l'évolution des débits (avec une échelle logarithmique) aux sources des Moises 1, des Moises 2 et des Moises 3, du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009. Le tableau statistique expose les informations suivantes :

- A Moises 1, la moyenne est de 21.19 l/s et la médiane est de 14.36 l/s (la moyenne est influencée par de forts débits). Le débit minimum est enregistré le 31 octobre avec un débit de 6.37 l/s. Le débit maximum mesuré est de 98.74 l/s, le 24 avril. L'écart type est de 18.45 et le coefficient de variation est de 87 %. Le rapport entre le débit maximum et le débit minimum est de 15.5
- A Moises 2, la moyenne est de 5.96 l/s et la médiane est de 4.7 l/s (la moyenne est influencée par de forts débits). Le débit minimum est

enregistré le 29 octobre avec un débit de 1.55 l/s. Le débit maximum mesuré est de 32.36 l/s, le 7 avril. L'écart type est de 4.78 et le coefficient de variation est de 80 %. Le rapport entre le débit maximum et le débit minimum est de 20.9

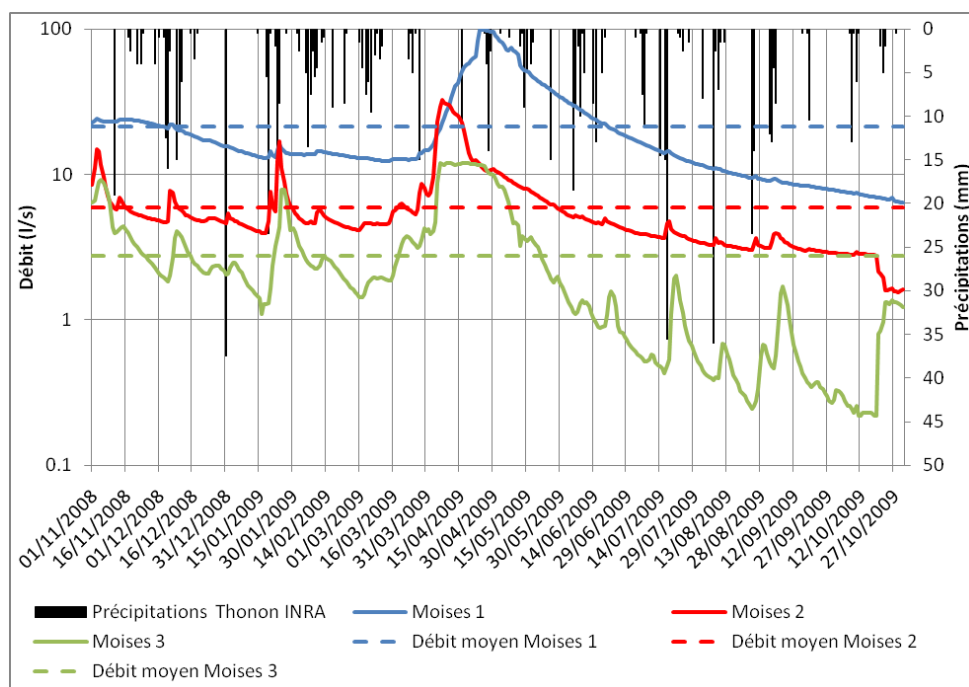
- A Moises 3, la moyenne est de 2.75 l/s et la médiane est de 1.9 l/s (la moyenne est influencée par de forts débits). Le débit minimum est enregistré le 18 octobre avec un débit de 0.22 l/s. Le débit maximum mesuré est de 12 l/s, le 17 avril. L'écart type est de 3 et le coefficient de variation est de 109.1 %. Le rapport entre le débit maximum et le débit minimum est de 54.5

Pour la source des Moises 1, nous observons :

- Une phase de hautes eaux du 1<sup>er</sup> au 29 novembre avec un pic légèrement inférieur à 24 l/s. Les forts débits font suite aux précipitations du 16 octobre au 11 novembre (115.5 mm à Thonon), provoquant l'infiltration d'importantes quantités d'eau météorique
- Une phase de basses eaux du 30 novembre au 6 avril avec un point bas à 12.3 l/s. Les précipitations sont sous forme de neige et ont peu d'influence sur le débit
- Une phase de hautes eaux du 7 avril au 20 juin avec un pic à 98.7 l/s. L'augmentation du débit est rapide et fait suite à la fusion nivale printanière
- Une phase de basses eaux du 21 juin au 31 octobre. Les faibles débits font suite à la reprise de la saison végétative et nous observons un faible impact des précipitations sur les débits. Pour exemple, nous notons 47 mm de pluie à la station de Très le Mont du 17 au 18 juillet qui se traduit par une augmentation faible du débit qui passe de 13.96 à 14.51 l/s, du 16 au 18 juillet (+3.9 %)

Pour la source des Moises 2, nous observons :

- Une phase de hautes eaux du 1<sup>er</sup> au 15 novembre avec un pic légèrement supérieur à 14.8 l/s. Les forts débits font suite aux précipitations du 16 au 31 octobre (96.5 mm de pluie à Thonon)
- Une phase de basses eaux du 16 novembre au 27 mars avec un point bas 3.9 l/s. Durant cette période, les précipitations sont le plus souvent sous forme de neige et ont peu d'influence sur le débit. Nous observons trois courtes phases de hautes eaux (du 6 au 9 décembre ; du 20 au 29 janvier ; du 19 au 21 mars) qui correspondent soit à des précipitations (32 mm est comptabilisé à Thonon entre le 3 et le 6 décembre) soit à une fusion partielle du manteau neigeux (du 20 au 29 janvier ; du 19 au 21 mars)
- Une phase de hautes eaux du 28 mars au 28 mai avec un pic à 32.4 l/s. L'augmentation du débit est rapide et fait suite à la fusion nivale printanière
- Une phase de basses eaux du 29 mai au 31 octobre avec un point bas à 1.55 l/s. Les faibles débits font suite à la reprise de la saison végétative et nous observons un impact des précipitations sur les débits. Pour exemple, nous notons 47 mm de pluie à la station de Très le Mont du 17 au 18 juillet qui se traduit par une forte augmentation du débit qui passe de 3.63 à 4.76 l/s, du 16 au 18 juillet (+31.1 %)



	Moises 1	Moises 2	Moises 3
Moyenne	21.19	5.96	2.75
Médiane	14.36	4.70	1.90
Écart type	18.45	4.78	3.00
Coefficient de variation	87.1 %	80.2 %	109.1 %
Minimum	6.37	1.55	0.22
Date	31/10/2009	29/10/2009	18/10/2009
Maximum	98.74	32.36	12.00
Date	24/04/2009	07/04/2009	17/04/2009
Rapport entre les débits maximum et minimum	15.5	20.9	54.5

Figure 32 : Evolution des débits moyens journaliers du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009 aux sources de Moises 1, de Moises 2 et de Moises 3

Pour la source des Moises 3, nous observons :

- Une phase de hautes eaux du 1<sup>er</sup> au 24 novembre avec un pic légèrement supérieur à 9.2 l/s. Les forts débits font suite aux précipitations du 16 au 31 octobre (96.5 mm de pluie à Thonon) provoquant l'infiltration d'importantes quantités d'eau météorique
- Une phase de basses eaux du 25 novembre au 19 mars avec un point bas à 1.09 l/s. Durant cette période, les précipitations sont le plus souvent sous forme de neige et ont peu d'influence sur le débit. Nous observons deux courtes phases de hautes eaux (du 8 au 14 décembre ; du 22 janvier au 4 février) qui correspondent soit à des précipitations (32 mm est comptabilisé à Thonon entre le 3 et le 6 décembre) soit à une fusion partielle du manteau neigeux (du 22 janvier au 4 février)
- Une phase de hautes eaux du 20 mars au 21 mai avec un pic à 12 l/s. L'augmentation du débit est rapide et fait suite à la fusion nivale printanière
- Une phase de basses eaux du 22 mai au 31 octobre avec un point bas à 0.22 l/s. Les faibles débits font suite à la reprise de la saison végétative et nous observons un fort impact des précipitations sur les débits. Pour exemple, nous notons 47 mm de pluie à la station de Très le Mont du 17

au 18 juillet qui se traduit par une augmentation forte du débit qui passe de 0.43 à 2.01 l/s, du 17 au 21 juillet (+367.4 %)

#### 3.2.4.4. Conclusions

La présentation des chroniques de débit des sources met en évidence des phases de basses eaux en été et en hiver, et des phases des hautes eaux au printemps et en automne. Les débits maximum apparaissent au mois d'avril sauf à l'Epinguy (absence d'informations du 26 mars au 5 avril) et au Granges Mamet (informations biaisées du fait du fonctionnement du trop plein à partir de 3.6 l/s). Ainsi, le processus de recharge des aquifères est contrôlé en ordre d'importance, par la fusion nivale printanière et par les précipitations automnales.

Par ailleurs, le coefficient de variation est :

- Faible aux Arces avec 47.5 %, à l'Epinguy avec 28.4 %, aux Favrats avec 37.6 %, aux Granges Mamet avec 28 %, au Pont du Mouche avec 40.9 % et à Ramble avec 39.9 %
- Fort à Moises 1 avec 87 %, à Moises 2 avec 80 % et à Moises 3 avec 109.1 %

Le rapport entre le débit maximum et le débit minimum est :

- Faible aux Arces (valeur sous estimée du fait du fonctionnement du trop-plein en hautes eaux), à l'Epinguy (valeur sous estimée du fait des lacunes d'informations), aux Favrats, au Pont du Mouche et à Ramble
- Fort à Moises 1, à Moises 2 et à Moises 3

Enfin, la réponse hydrodynamique à un événement pluvieux est :

- Faible aux Arces, à l'Epinguy et à Moises 1
- Moyenne aux Favrats, au Pont du Mouche et à Ramble
- Forte aux Granges Mamet, à Moises 2 et à Moises 3

Le Tableau 27 synthétise les différents éléments issus de l'observation des chroniques de débits des sources. La lecture de ce tableau permet de constater les similarités et les particularités du comportement hydrodynamique des sources.

#### Les systèmes hydrogéologiques des Arces, de l'Epinguy et de Ramble

Ils se caractérisent par de faibles coefficients de variation de débit et un faible rapport entre le débit maximum et le débit minimum. Ces informations laissent envisager un fonctionnement de type fissuré. Les réponses hydrodynamiques aux événements pluvieux sont faibles ce qui soulignent le fort caractère capacitif des systèmes hydrogéologiques des Arces, de l'Epinguy et de Ramble.

#### Les systèmes hydrogéologiques des Favrats, des Granges Mamet et du Pont du Mouche

Ils se caractérisent par de faibles coefficients de variation de débit et de faibles rapports entre le débit maximum et le débit minimum. Ces informations laissent envisager un fonctionnement de type fissuré. Les réponses hydrodynamiques aux événements pluvieux sont moyennes ce qui soulignent le caractère transmissif des systèmes hydrogéologiques des Favrats, des Granges Mamet et du Pont du Mouche.

### Le système hydrogéologique de Moises 1

Il se caractérise par un fort coefficient de variation de débit et par un fort rapport entre le débit maximum et minimum. Ces informations laissent suggérer un fonctionnement de type karstique. Les réponses hydrodynamiques aux événements pluvieux sont faibles ce qui souligne le caractère capacitif du système hydrogéologique de Moises 1.

### Les systèmes hydrogéologiques de Moises 2 et de Moises 3

Ils se caractérisent par un fort coefficient de variation de débit et par un fort rapport entre le débit maximum et minimum. Ces informations laissent suggérer un fonctionnement de type karstique. Les réponses hydrodynamiques aux événements pluvieux sont fortes ce qui souligne le caractère transmissif des systèmes hydrogéologiques de Moises 2 et de Moises 3.

	Débit moyen	Coefficient de variation	Rapport entre les débits maximum et minimum	Réponse aux précipitations	Hypothèse sur le fonctionnement du système
Arces	<u>7.96</u>	<u>47.5%</u>	<u>6.6</u>	Faible	Fissuré capacitif
Epinguy	<u>3.17</u>	<u>28.4%</u>	<u>3</u>	Faible	Fissuré capacitif
Favrats	3.19	37.6%	4.1	Moyenne	Fissuré transmissif
Granges Mamet	<u>2.18</u>	<u>28%</u>	<u>2</u>	Forte	Fissuré transmissif
Moises 1	21.19	87%	15.5	Faible	Karstique capacitif
Moises 2	5.96	80%	21	Forte	Karstique transmissif
Moises 3	2.75	109.1%	54.5	Forte	Karstique transmissif
Pont du Mouche	<u>2.81</u>	<u>40.9%</u>	<u>4.5</u>	Moyenne	Fissuré transmissif
Ramble	1.58	39.9%	4.5	Faible	Fissuré capacitif

Tableau 27 : Synthèse de l'étude des variations de débit  
Les valeurs soulignées sont sous-évaluées du fait de lacunes d'informations

## 3.3. Bilans hydrologiques

La surface d'alimentation des sources a été calculée à partir des données de précipitations annuelles et de l'estimation des coefficients d'infiltration.

### 3.3.1. Estimation des coefficients d'infiltration

Les coefficients d'infiltration sont estimés à partir de la relation suivante :

$$\text{Coefficient d'Infiltration (n\%)} + \text{Coefficient de Ruissellement (m\%)} + \text{ETR (p\%)} = \text{Pluie (n+m+p=100 \%)}$$

Ils dépendent de la pente (influe sur le coefficient de ruissellement), la couverture végétale (influe sur l'ETR), la nature du substratum et la présence (ou non) de sol identifiées sur les bassins versant des sources. De manière générale, le massif du mont Forchat se caractérise par la présence de dolines, une végétation dense, des pentes importantes, des sols développés de nature limono-argileuse, des précipitations neigeuses pendant 6 mois de l'année. Nous avons donc choisi de prendre un coefficient d'infiltration de 50 % pour l'ensemble des sources.

### 3.3.2. Estimation des surfaces d'alimentation des sources

Les estimations des surfaces d'alimentation des sources sont présentées sur le Tableau 28. Nous constatons que :

- Pour les sources d'Habère-Poche. Les surfaces d'alimentation sont égales à 12.55 Ha pour la source des Arces, à 3.43 Ha pour la source des Granges Mamet et à 2.49 Ha pour la source de Ramble
- Pour les sources d'Orcier. Les surfaces d'alimentation sont égales à 4.99 Ha pour la source de l'Epinguy, à 5.04 Ha pour la source des Favrats et à 4.43 Ha pour la source du Pont du Mouche
- Pour les sources des Moises. Les surfaces d'alimentation sont égales à 33.42 Ha pour la source des Moises 1, à 9.4 Ha pour la source des Moises 2 et à 4.34 Ha pour la source des Moises 3

	Volume en m <sup>3</sup> /an	Précipitations annuelles en mm	Coefficient d'infiltration	Précipitations infiltrées en mm	Aire d'alimentation en Ha
Arces	250930	1000	0.5	500	12.55
Epinguy	99875	1000	0.5	500	4.99
Favrats	100740	1000	0.5	500	5.04
Granges Mamet	68670	1000	0.5	500	3.43
Moises 1	668300	1000	0.5	500	33.42
Moises 2	187975	1000	0.5	500	9.4
Moises 3	86810	1000	0.5	500	4.34
Pont du Mouche	88590	1000	0.5	500	4.43
Ramble	49880	1000	0.5	500	2.49

Tableau 28 : Estimation des aires d'alimentation des sources

Des incertitudes demeurent dans les résultats présentés et notamment concernant les volumes, les précipitations et les coefficients d'infiltration. En effet, si les valeurs de débits présentés aux Favrats, à Moises 1, à Moises 2, à Moises 3 et à Ramble, semblent proches de la réalité (pas de lacunes d'informations), il n'en est pas de même pour aux Arces, à l'Epinguy, aux Granges Mamet et au Pont du Mouche.

### 3.4. Analyse des courbes de récession

Comme nous avons pu le voir dans le 2.1.1.2, l'analyse des courbes de récession s'effectue en décomposant l'hydrogramme de récession de la crue en trois fonctions exponentielles. Le but de l'analyse étant de préciser les réserves de tarissement ou « *réserves écoulables* », nous avons choisi de regrouper les deux premières fonctions exponentielles.

D'un point de vue méthodologique, chaque courbe de récession a été divisé en deux périodes de temps égales. Pour exemple, si nous avons étudié la courbe de récession d'un site sur une durée de 100 jours alors nous avons divisé en deux parties la courbe. La première partie correspond aux 50 premiers jours et la seconde partie de la courbe représente les 50 derniers jours.

### 3.4.1. Résultats de la décomposition de l'hydrogramme de récession à partir de deux fonctions exponentielles

#### Les sources d'Habère-Poche

La Figure 33 présente la courbe de récession de la source des Arces, du 16 avril au 31 octobre 2009 et son ajustement par deux fonctions exponentielles. Le coefficient de la courbe exponentielle Q1 est égal à 0.035 et le coefficient de la courbe exponentielle Q2 est égal à 0.006.

La Figure 34 expose la courbe de récession de la source de Ramble du 13 avril au 31 octobre 2009 et son ajustement par deux fonctions exponentielles. Le coefficient de la courbe exponentielle Q1 est égal à 0.021 et le coefficient de la courbe exponentielle Q2 est égal à 0.0008. A la source des Granges Mamet, les informations de débit n'ont pas permis d'ajuster de manière correcte, la courbe de récession selon deux fonctions exponentielles.

#### Les sources d'Orcier

La Figure 35 présente la courbe de récession de la source de l'Epinguy, du 5 mai au 31 octobre 2009 et son ajustement par deux fonctions exponentielles. Le coefficient de la courbe exponentielle Q1 est égal à 0.03 et le coefficient de la courbe exponentielle Q2 est égal à 0.003.

La Figure 36 expose la courbe de récession de la source des Favrats du 16 avril au 31 octobre 2009 et son ajustement par deux fonctions exponentielles. Le coefficient de la courbe exponentielle Q1 est égal à 0.032 et le coefficient de la courbe exponentielle Q2 est égal à 0.004.

La Figure 37 présente la courbe de récession de la source du Pont du Mouche du 9 mai au 27 octobre 2009 et son ajustement par deux fonctions exponentielles. Le coefficient de la courbe exponentielle Q1 est égal à 0.034 et le coefficient de la courbe exponentielle Q2 est égal à 0.004.

#### Les sources des Moises

La Figure 38 expose la courbe de récession de la source des Moises 1 du 30 avril au 31 octobre 2009 et son ajustement par deux fonctions exponentielles. Le coefficient de la courbe exponentielle Q1 est égal à 0.047 et le coefficient de la courbe exponentielle Q2 est égal à 0.007.

La Figure 39 présente la courbe de récession de la source des Moises 2 du 7 avril au 29 octobre 2009 et son ajustement par deux fonctions exponentielles. Le coefficient de la courbe exponentielle Q1 est égal à 0.044 et le coefficient de la courbe exponentielle Q2 est égal à 0.003.

La Figure 40 affiche les résultats des courbes exponentielles Q1 et Q2 à partir de la courbe de récession de la source des Moises 3, du 23 avril au 19 octobre 2009. Le coefficient de la courbe exponentielle Q1 est égal à 0.062 et le coefficient de la courbe exponentielle Q2 est égal à 0.007.

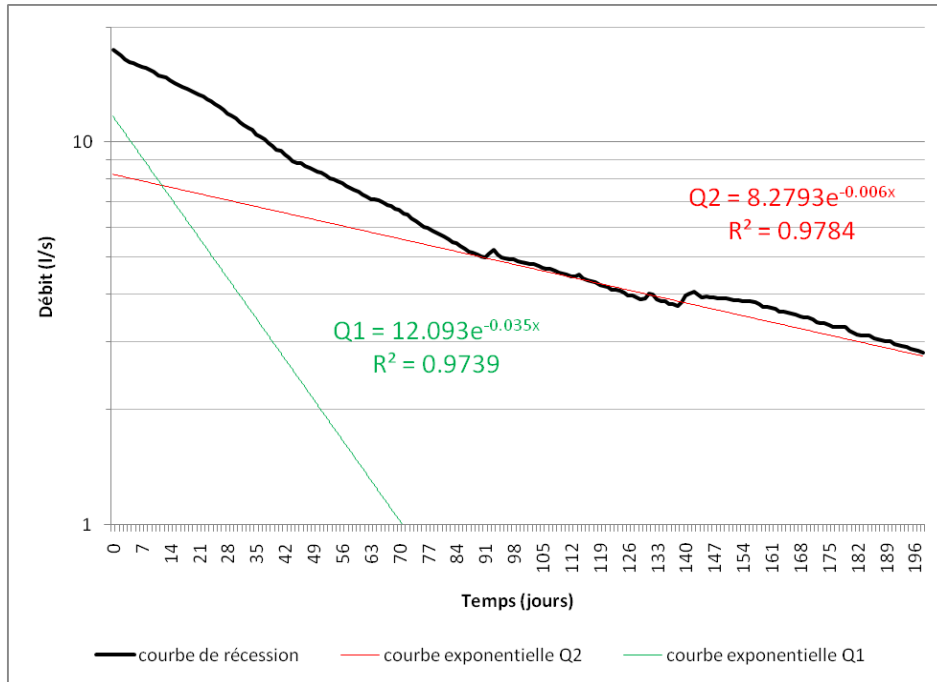


Figure 33 : Courbe de récession de la source des Arces, du 16 avril 2009 au 31 octobre 2009 et ajustement selon deux fonctions exponentielles

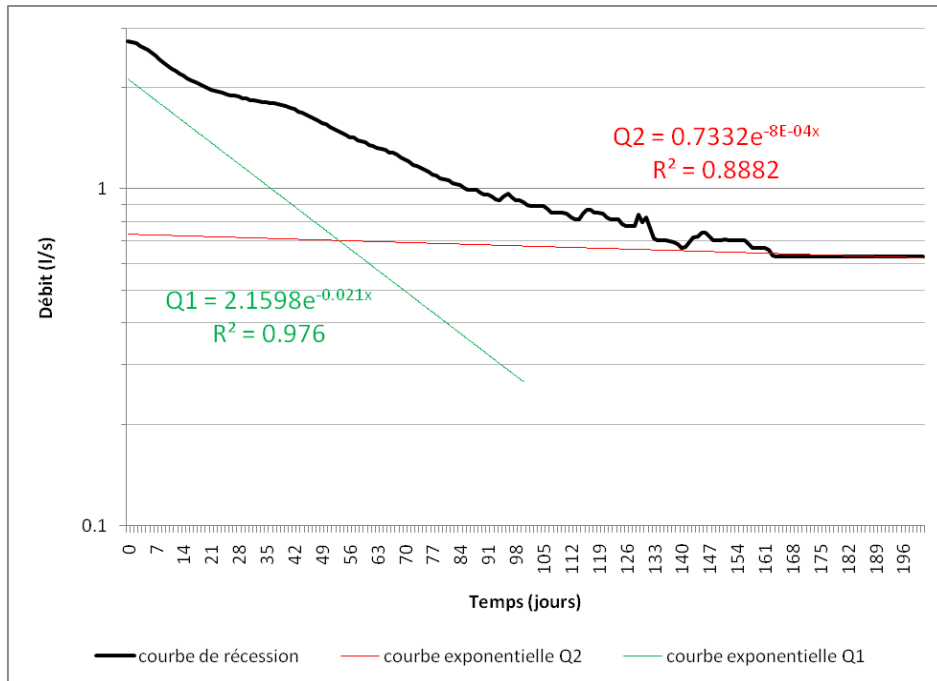


Figure 34 : Courbe de récession de la source de Ramble, du 13 avril 2009 au 31 octobre 2009 et ajustement selon deux fonctions exponentielles

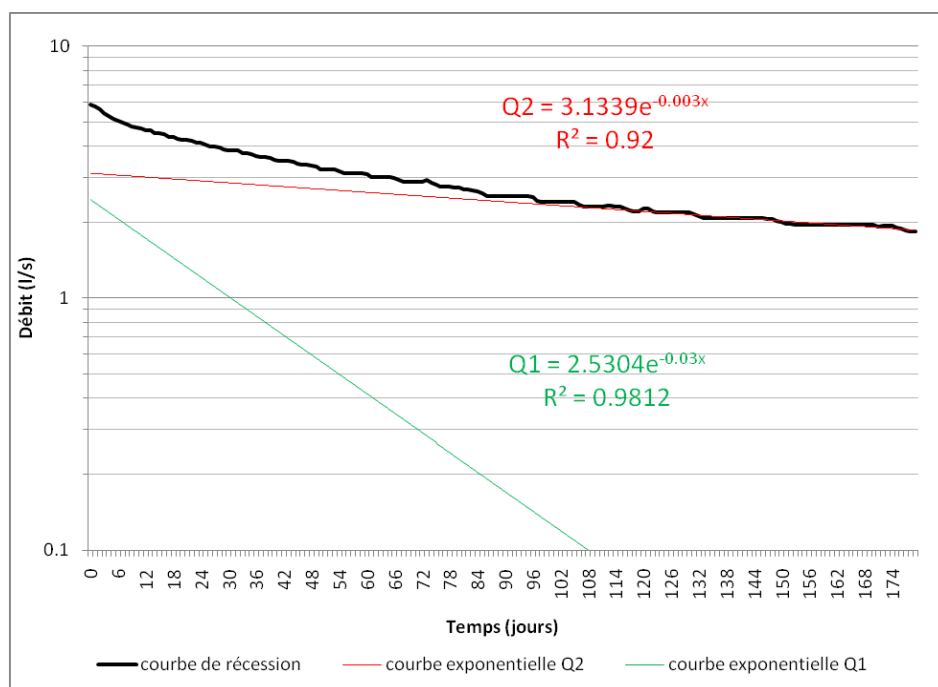


Figure 35 : Courbe de récession de la source de l'Epinguy, du 5 mai 2009 au 31 octobre 2009 et ajustement selon deux fonctions exponentielles

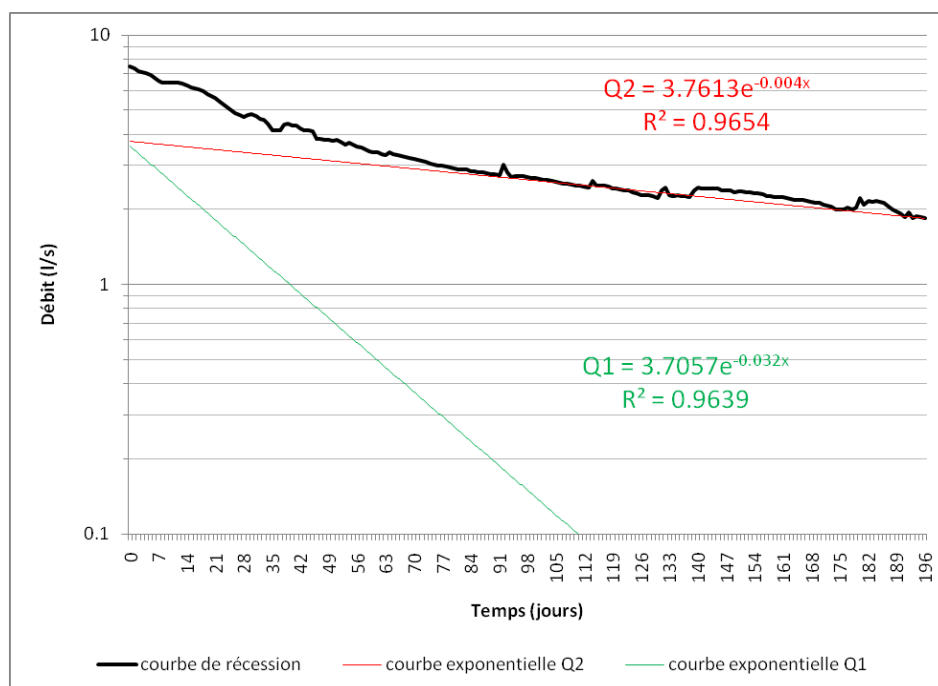


Figure 36 : Courbe de récession de la source des Favrats, du 16 avril 2009 au 31 octobre 2009 et ajustement selon deux fonctions exponentielles

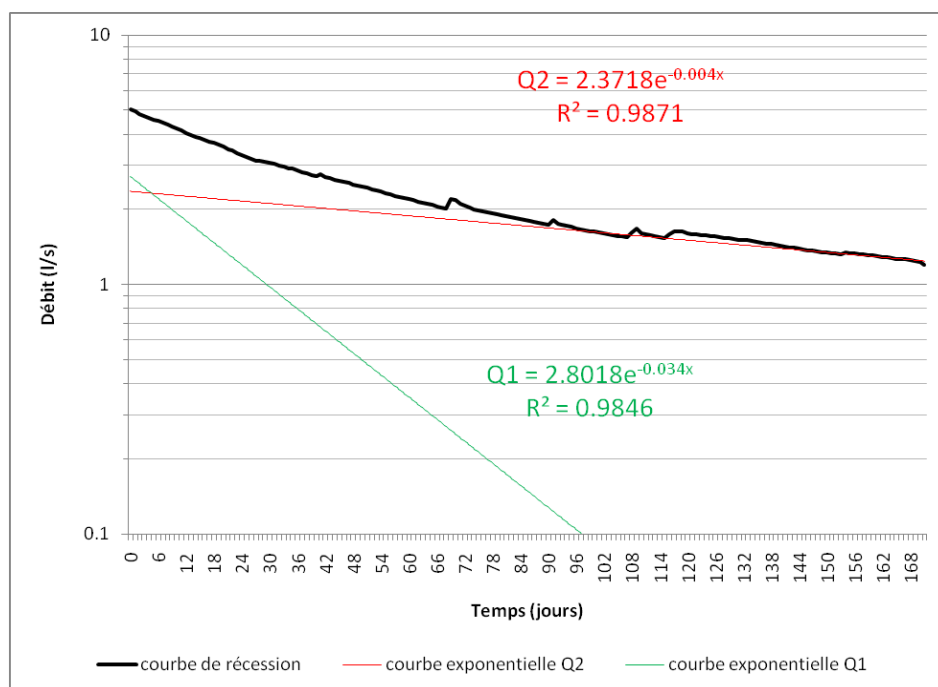


Figure 37 : Courbe de récession de la source du Pont du Mouche, du 9 mai 2009 au 27 octobre 2009 et ajustement selon deux fonctions exponentielles

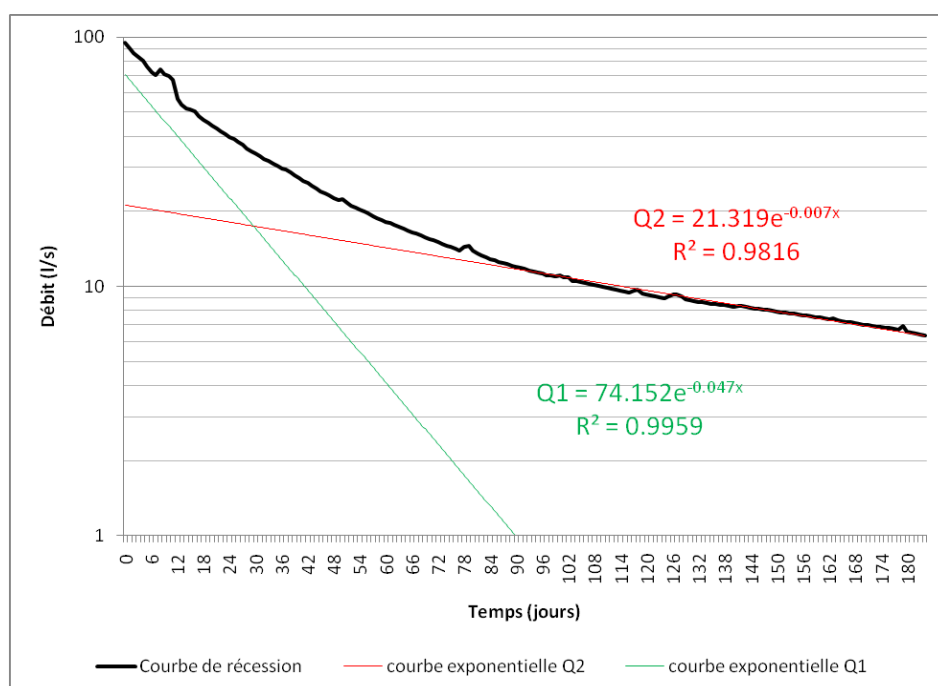


Figure 38 : Courbe de récession de la source des Moises 1, du 30 avril 2009 au 31 octobre 2009 et ajustement selon deux fonctions exponentielles

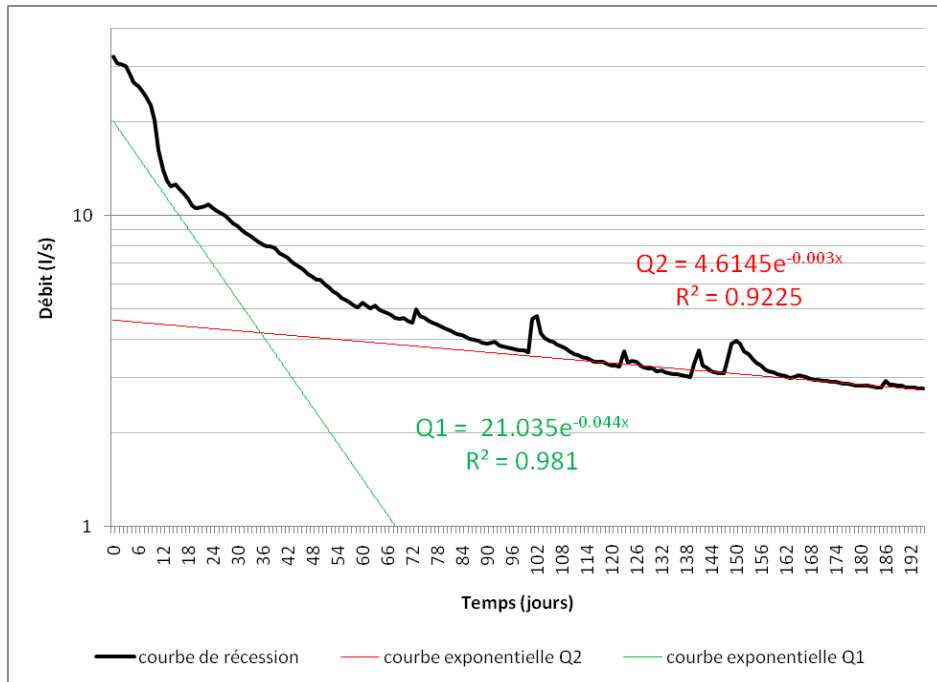


Figure 39 : Courbe de récession de la source des Moises 2, du 7 avril 2009 au 29 octobre 2009 et ajustement selon deux fonctions exponentielles

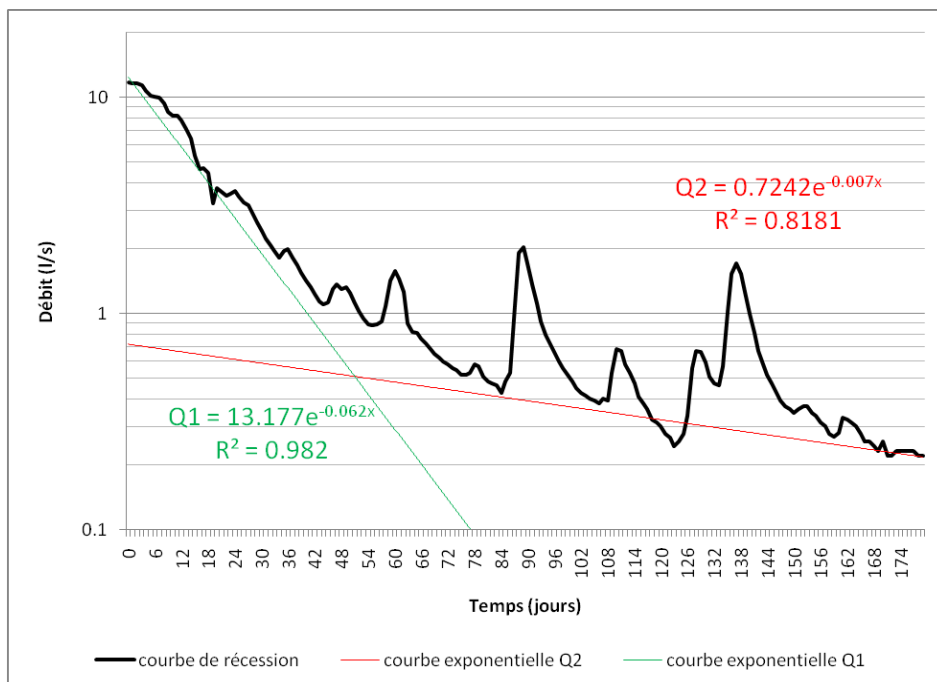


Figure 40 : Courbe de récession de la source des Moises 3, du 23 avril 2009 au 19 octobre 2009 et ajustement selon deux fonctions exponentielles

### 3.4.2. Estimation des réserves de tarissement

Les réserves de tarissement ou « *réserves écoulables* » d'un système fissuré karstique correspondent au volume d'eau qui se trouve dans les parties peu perméables de l'aquifère. Pour calculer ces réserves, il faut intégrer la courbe exponentielle Q2 qui représente la vidange des volumes peu perméables et la

courbe exponentielle Q1 qui correspond à la vidange des volumes perméables, pour un temps qui va du début du tarissement à l'infini. Comme une fonction exponentielle ne devient jamais nulle, nous avons défini 3 temps, à savoir :

- Q200 : il s'agit du débit estimé en l/s au 200<sup>ème</sup> jour après la pointe de crue à partir de l'intégration des courbes exponentielles Q2 et Q1
- Q300 : il s'agit du débit estimé en l/s au 300<sup>ème</sup> jour après la pointe de crue à partir de l'intégration des courbes exponentielles Q2 et Q1
- Q400 : il s'agit du débit estimé en l/s au 400<sup>ème</sup> jour après la pointe de crue à partir de l'intégration des courbes exponentielles Q2 et Q1

Pour chaque temps (Q200, Q300 et Q400), nous avons estimé les réserves de tarissement (R200, R300 et R400) en m<sup>3</sup>. Les résultats sont présentés sur le Tableau 29. Nous observons que les réserves de tarissement à R400 sont environ comprises entre 27000 et 385000 m<sup>3</sup>. Nous distinguons globalement trois groupes de sources :

- Les sources à faibles réserves (inférieures à 50000 m<sup>3</sup> à R400) qui sont les sources de Moises 3, de Ramble et du Pont du Mouche
- Les sources à moyennes réserves (entre 50000 et 100000 m<sup>3</sup> à R400) qui sont les sources de l'Epinguy et des Favrats
- Les sources à fortes réserves (supérieures à 100000 m<sup>3</sup> à R400) qui sont les sources des Arces, de Moises 1 et de Moises 2

	Q200	R200	Q300	R300	Q400	R400
Arces	2.505	114130	1.369	130309	0.751	139175
Epinguy	1.726	48312	1.274	61148	0.944	70645
Favrats	1.696	55124	1.133	67151	0.759	75203
Moises 1	5.263	333283	2.611	365846	1.296	382010
Moises 2	2.536	102485	1.876	121366	1.39	135350
Moises 3	0.179	25711	0.089	26817	0.044	27366
Ramble	0.657	20615	0.581	25916	0.533	30717
Pont du Mouche	1.069	35594	0.714	43175	0.479	48252

Tableau 29 : Réserves de tarissement calculées à partir des courbes de récession des Arces, de l'Epinguy, des Favrats, des Moises 1, des Moises 2, des Moises 3, de Ramble et du Pont du Mouche

### 3.5. Analyse des débits classés

Au vu des informations manquantes (cf. 3.2.3), l'analyse des débits classés a été réalisée pour les sources des Arces, des Favrats, de Moises 1, de Moises 2, de Moises 3, du Pont du Mouche et de Ramble. En ordonnée, la distribution des débits moyens journaliers est exprimée en pourcentage cumulé. En abscisse, la distribution des débits moyens journaliers est représentée sur une échelle logarithmique. Les résultats sont présentés dans les paragraphes suivants.

#### La source des Arces

La Figure 41 présente la courbe cumulative de fréquences de la source des Arces du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009. Les 4 droites en noir permettent d'observer :

- En basses eaux : une rupture à 6.7 l/s (20 %) avec une augmentation de la pente. Ce type de rupture correspond à la constitution d'une réserve

- En hautes eaux : une première rupture à 15 l/s (86.5 %) et une seconde rupture à 18 l/s (96 %) avec, dans les deux cas, une augmentation de la pente. La rupture à 18 l/s coïncide avec le débordement de la station de jaugeage alors que la rupture à 15 l/s peut correspondre soit à un stockage momentané soit à la mise en fonctionnement de trop plein soit à la fuite vers un autre système

### La source des Favrats

La Figure 42 présente la courbe cumulative de fréquences de la source des Favrats du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009. Les 2 droites en noir permettent d'observer une rupture à 3.6 l/s (69.5 %) avec une diminution de la pente. Cette rupture met en évidence l'apport d'eau issue d'un cycle antérieur.

### La source de Moises 1

La Figure 43 présente la courbe cumulative de fréquences de la source des Moises 1 du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009. Les 2 droites en noir permettent d'observer une rupture à 24 l/s (54 %) avec une diminution de la pente. Cette rupture met en évidence l'apport d'eau d'un cycle antérieur.

### La source de Moises 2

La Figure 44 présente la courbe cumulative de fréquences de la source des Moises 2 du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009. Les 3 droites en noir permettent d'observer :

- Une rupture à 6 l/s (52.5 %) avec une diminution de la pente. Cette rupture met en évidence l'apport d'eau d'un cycle antérieur
- En hautes eaux : une rupture à 14 l/s (85.5 %) avec une diminution de la pente. Cette rupture correspond à des apports en provenance d'un autre système

### La source de Moises 3

La Figure 45 présente la courbe cumulative de fréquences de la source des Moises 3 du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009. Les 3 droites en noir permettent d'observer :

- Une rupture à 4.4 l/s (52.5 %) avec une diminution de la pente. Cette rupture met en évidence l'apport d'eau d'un cycle antérieur
- En hautes eaux : une rupture à 11.6 l/s (79 %) avec une forte augmentation de la pente. Cette rupture peut correspondre soit à un stockage momentané soit à la mise en fonctionnement de trop-plein soit à la fuite vers un autre système

### La source du Pont du Mouche

La Figure 46 présente la courbe cumulative de fréquences de la source du Pont du Mouche du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009. Les 4 droites en noir permettent d'observer une rupture à 2.6 l/s (30 %) avec une augmentation de la pente et une rupture à 3.8 l/s (73.5 %) avec une diminution de la pente. Cette double rupture peut

résulter du piégeage d'une réserve lors de la décrue et à sa restitution durant la phase de tarissement. Une dernière rupture s'observe à 5.3 l/s (85 %) avec une augmentation de la pente. Cette rupture coïncide avec le débordement de la station de jaugeage.

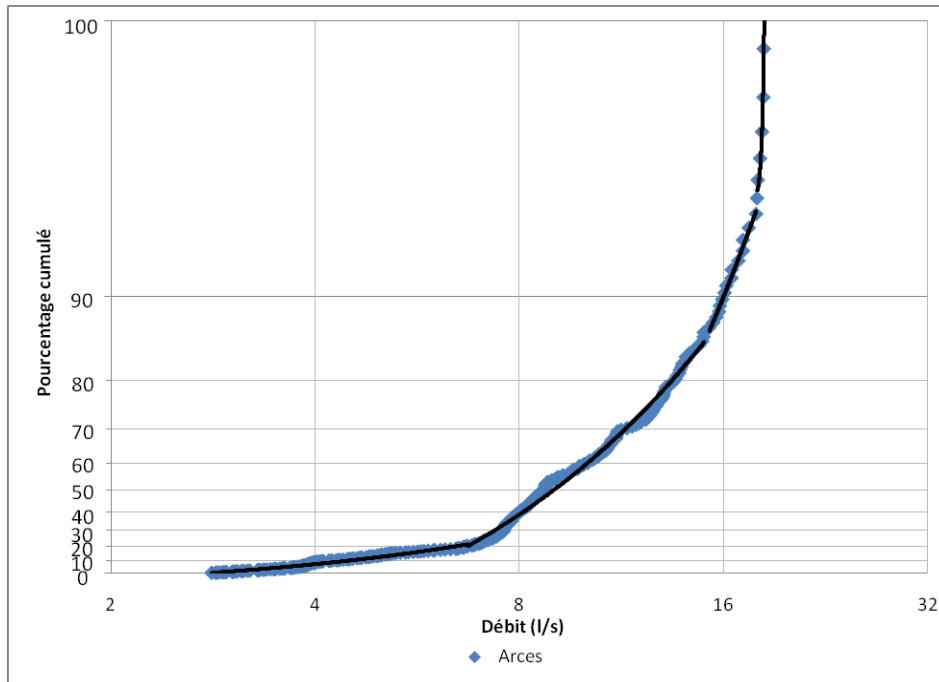


Figure 41 : Débits classés des Arces du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009

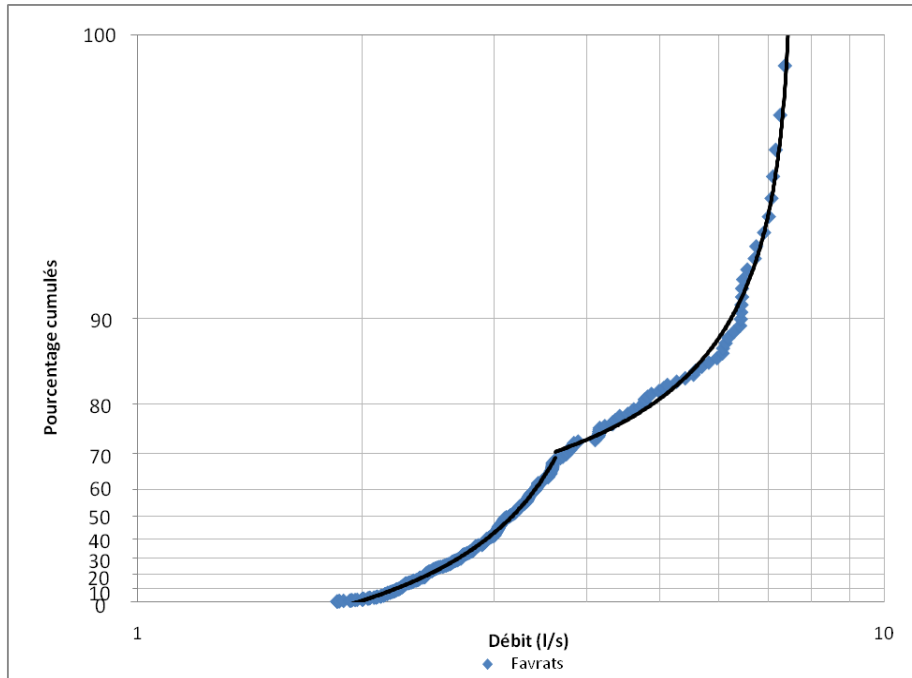


Figure 42 : Débits classés des Favrats du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009

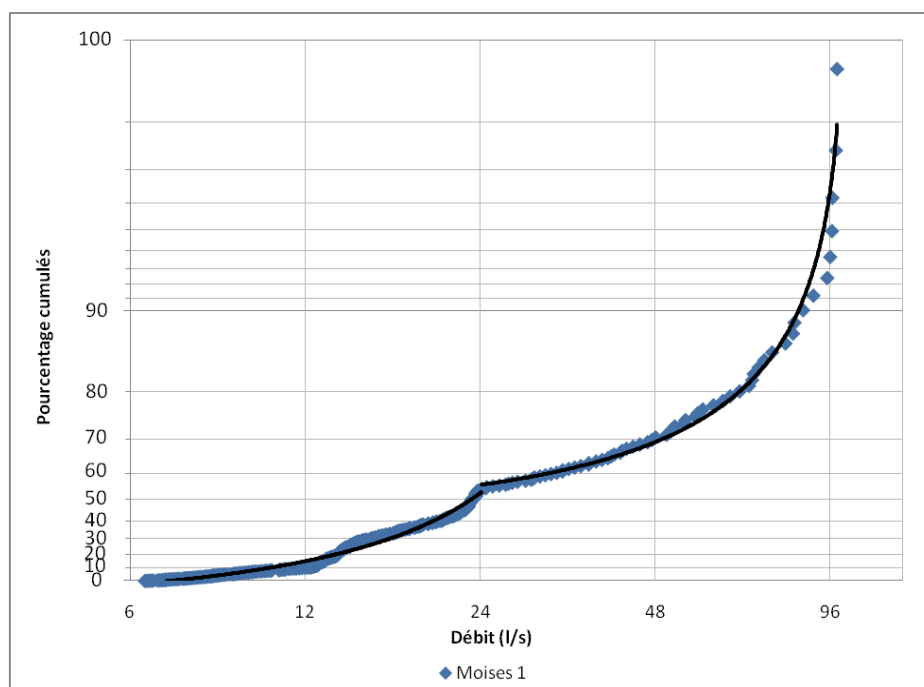


Figure 43 : Débits classés de Moises 1 du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009

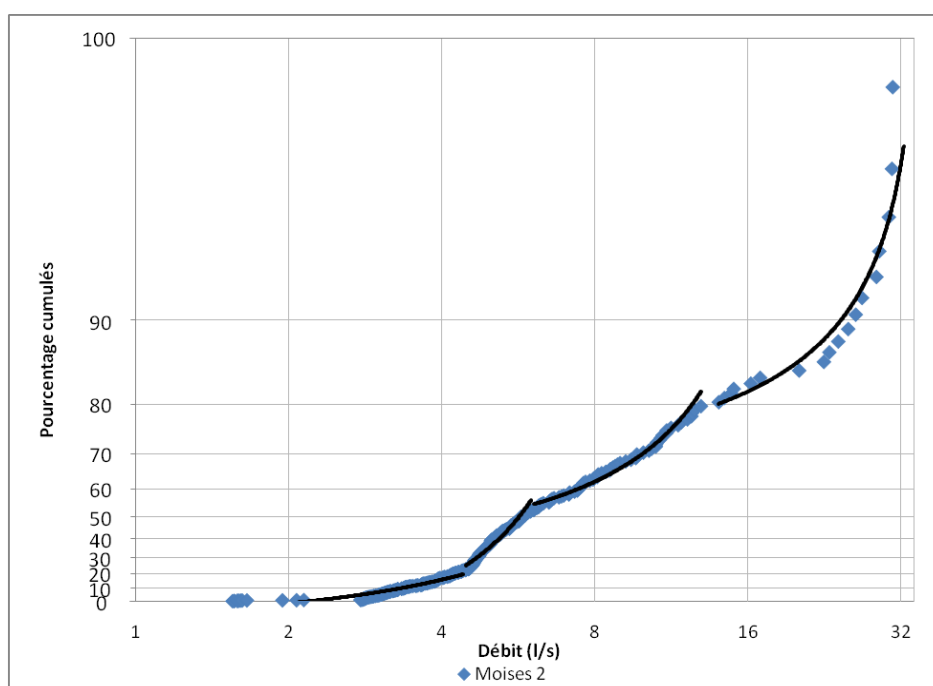


Figure 44 : Débits classés de Moises 2 du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009

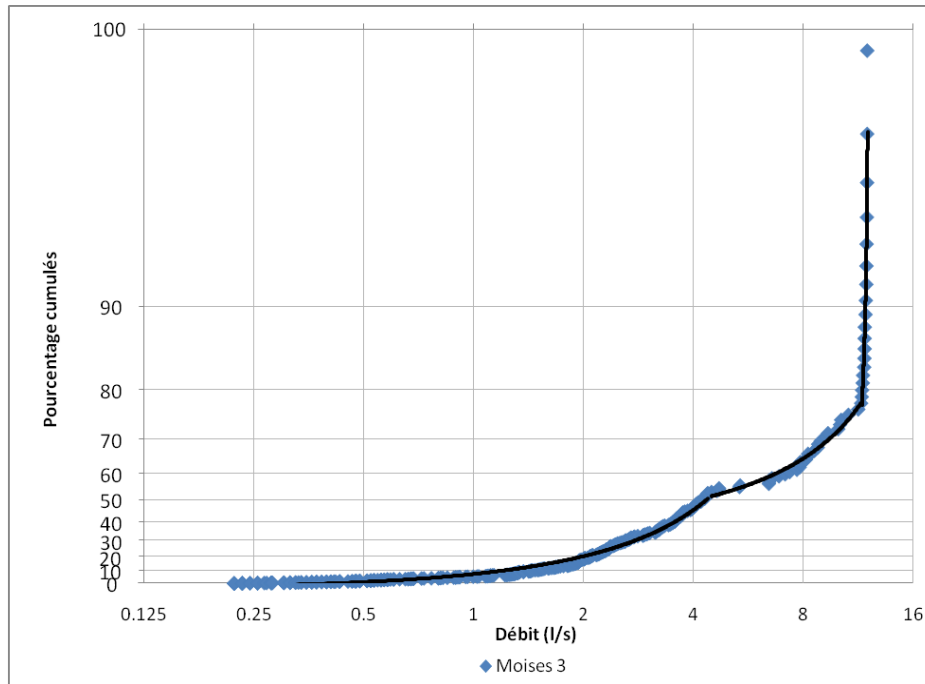


Figure 45 : Débits classés de Moises 3 du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009

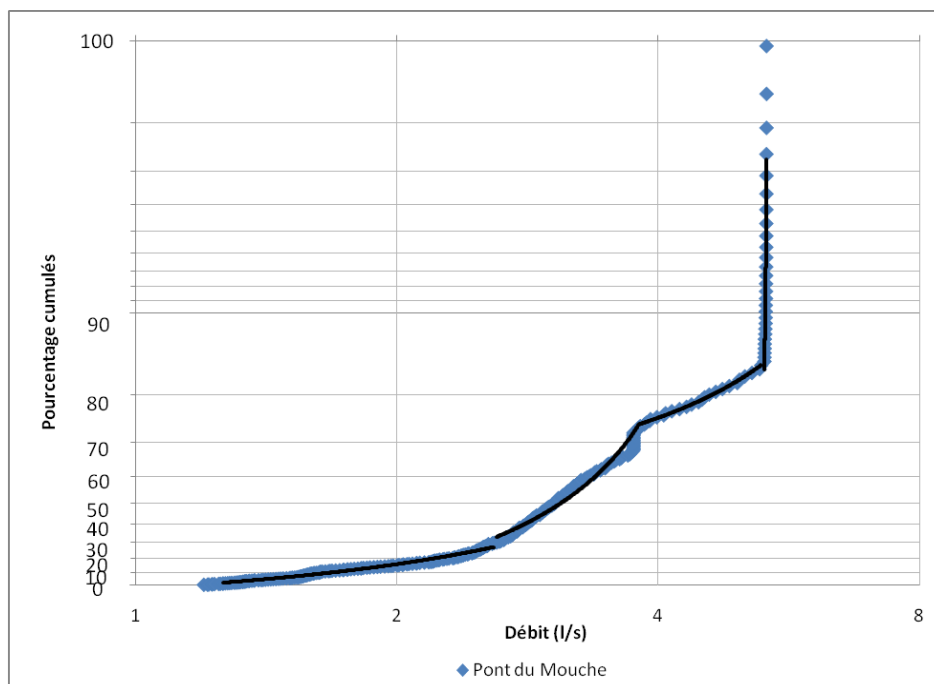


Figure 46 : Débits classés du Pont du Mouche du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009

### La source de Ramble

La Figure 47 présente la courbe cumulative de fréquences de la source de Ramble du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009. Les 3 droites en noir permettent d'observer une première rupture à 2 l/s (30 %) avec une augmentation de la pente et une seconde rupture à 5.3 l/s (85 %) avec une diminution de la pente. Cette double rupture coïncide avec le piégeage d'une réserve lors de la décrue et de sa restitution au cours du tarissement.

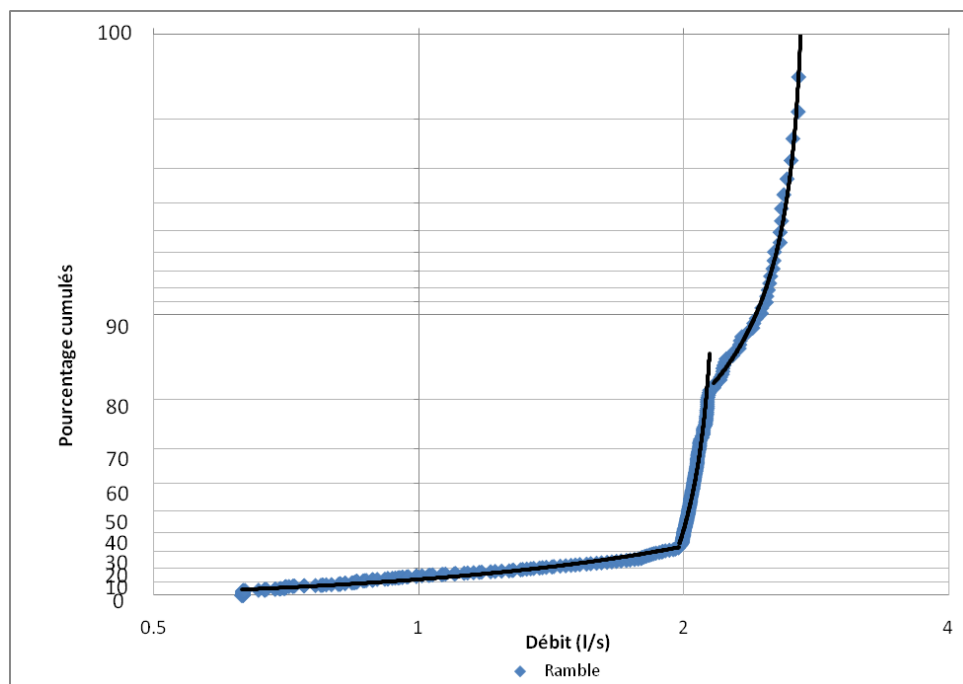


Figure 47 : Débits classés de Ramble du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009

### Conclusion

Les éléments présentés sur le Tableau 30 sont retenus comme hypothèses de travail notamment aux Arces (débordement de la station de jaugeage et réalisation d'une courbe de tarage), aux Favrats (absence d'informations en période d'étiage) et à Ramble (réalisation d'une courbe de tarage).

	Arces	Favrats	Moises 1	Moises 2	Moises 3	Pont du Mouche	Ramble
Mise en fonctionnement de trop-plein	X				X		
Stockage momentanée	X				X		
Fuite vers un autre système	X				X		
Débordement de la station de jaugeage						X	
Apports d'une réserve issue d'un cycle antérieur		X	X	X	X		
Apports en provenance d'un autre système				X			
Constitution d'une réserve	X						
Piégeage d'une réserve en décrue et restitution en tarissement						X	X

Tableau 30 : Résumé des interprétations de l'analyse des débits classés

### 3.6. Etude comparative entre les prélèvements d'eau potable et le débit des cours d'eau

Pour cette étude, la période du suivi débute le 1<sup>er</sup> novembre 2008 et se termine le 31 octobre 2009. Pour chaque bassin versant (Menoge, Moises et Pamphiot), les volumes prélevés ont été compilés (Moises 1, Moises 2, Moises 3 pour le bassin versant des Moises ; Epinguy, Favrats et Pont du Mouche pour le bassin versant du Pamphiot ; Arces, Granges Mamet et Ramble pour le bassin versant de la Menoge). Les volumes prélevés ont ensuite été comparés au débit mesuré des cours d'eau (station des Moises rivière pour le bassin versant des Moises ; station du Pamphiot pour le bassin versant du Pamphiot ; stations des Arces aval, des Granges Mamet rivière et de la Menoge, pour le bassin versant de la Menoge).

Nous rappelons que :

- La période de suivi se caractérise par des lacunes d'informations qui se présentent sous la forme d'informations manquantes (absence d'informations) et d'informations biaisées (dus à la mise en fonctionnement du système de trop plein)
- Les mesures de débit se caractérisent par des incertitudes qui se déclinent sous la forme de marges d'erreur. Ces marges d'erreur ont été intégrées aux résultats

Les résultats présentés ont amenés à distinguer deux périodes hydrologiques. La première période se définit par des débits mesurés au niveau du cours d'eau qui sont supérieurs aux débits prélevés aux sources. La seconde période se caractérise par des débits mesurés au niveau du cours d'eau qui sont inférieurs aux débits prélevés aux sources. Dans cette étude, nous nous sommes attachés à définir en fonction des incertitudes de mesures de débit, les deux périodes hydrologiques.

#### 3.6.1. Bassin versant du Pamphiot

Le Tableau 25 et le Tableau 26 (cf.3.2.2) présentent les lacunes d'informations des stations (Epinguy, Favrats, Pamphiot et Pont du Mouche) du bassin versant du Pamphiot. Nous observons 184 jours de lacunes d'informations qui se déclinent sous la forme :

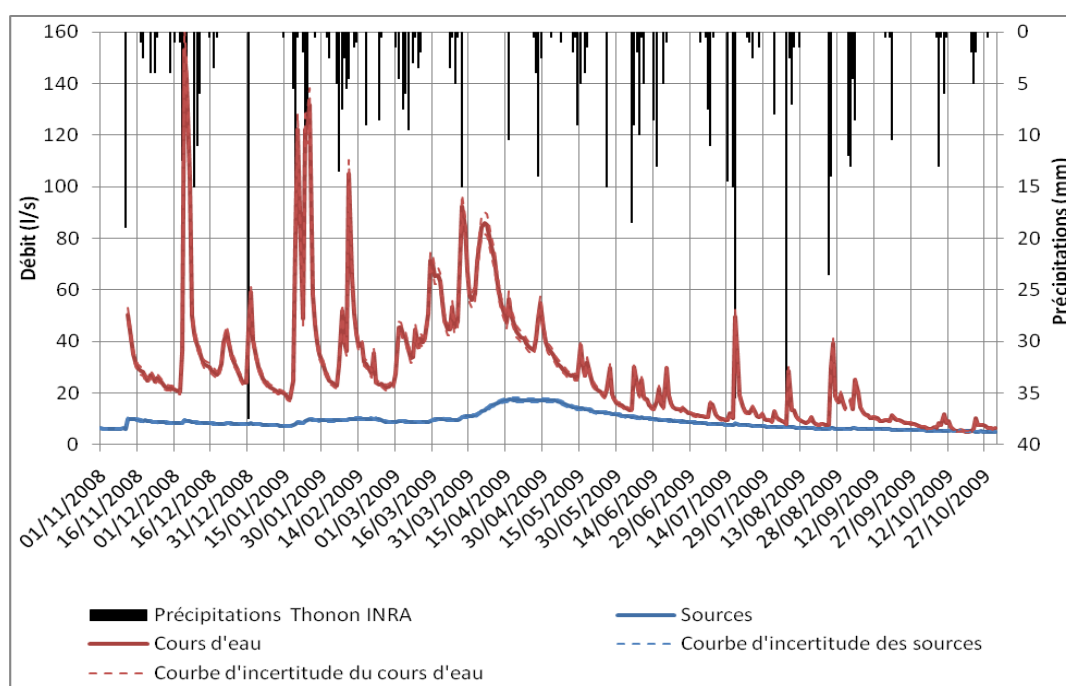
- D'informations manquantes à Epinguy (du 23 novembre 2008 au 23 décembre 2008 et du 26 mars 2009 au 4 mai 2009), aux Favrats (du 7 octobre 2009 au 31 octobre 2009), au Pamphiot (du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 11 novembre 2008 et le 1<sup>er</sup> septembre 2009) et au Pont du Mouche (du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 11 novembre 2008)
- D'informations biaisées (dus à la mise en fonctionnement du système de trop plein) au Pamphiot (à la source de Moises 1 (du 23 avril 2009 au 15 mai 2009).

Au Col du Feu (3.2.1.2), des mesures inférieures à la hauteur d'eau équivalente à un débit nul sont apparues (cf. Figure 28) ce qui a contraint à supprimer le site de la présente étude.

La Figure 48 présente l'évolution des débits moyens journaliers prélevés aux sources (addition des débits prélevés à Epinguy, aux Favrats et au Pont du Mouche) et du

cours d'eau (débit du Pamphiot) du bassin versant du Pamphiot, du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009. Au vu des sites présents, nous avons intégré des courbes d'incertitudes qui représentent les marges d'erreur de mesures de débits. Nous avons choisi les valeurs de 5 % (-5 % et +5 %) pour le cours d'eau et les sources. De manière générale, nous observons que le débit du cours d'eau est inférieur au débit prélevé aux sources. Le tableau statistique expose les informations suivantes :

- Pour les sources, le débit moyen journalier prélevé est de 9.1 l/s et la médiane est de 8.5 l/s (la moyenne est influencée par de forts débits). Le débit prélevé minimum est enregistré le 29 octobre 2009 (4.9 l/s). Le débit prélevé maximum est mesuré le 16 mai 2009 (17.5 l/s)
- Pour le cours d'eau, le débit moyen est de 28.9 l/s et la médiane est de 23.4 l/s (la moyenne est influencée par de forts débits). Le débit minimum est enregistré le 19 octobre 2009 (5 l/s). Le débit maximum est mesuré le 5 décembre 2008 (153.3 l/s)



N = 353	Sources			Cours d'eau		
	Sans incertitude	Incertitude de -2 %	Incertitude de +2 %	Sans incertitude	Incertitude de -15 %	Incertitude de +15 %
Moyenne	9.06	8.61	9.51	28.94	27.50	30.39
Médiane	8.53	8.10	8.96	23.37	22.20	24.54
Ecart type	3.17	3.01	3.33	23.57	22.40	24.75
Minimum	4.93	4.69	5.18	5.02	4.77	5.28
Date	29/10/2009	29/10/2009	29/10/2009	19/10/2009	19/10/2009	19/10/2009
Maximum	17.49	16.61	18.36	153.30	145.64	160.97
Date	16/04/2009	16/04/2009	16/04/2009	05/12/2008	05/12/2008	05/12/2008

Figure 48 : Evolution du débit prélevé aux sources et du débit du cours d'eau du bassin versant du Pamphiot du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009

Le Tableau 31 identifie le nombre de jours où le débit mesuré aux sources est supérieur au débit mesuré du cours d'eau du bassin versant du Pamphiot, du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009. En utilisant les mesures de débit brutes (sans

application des incertitudes de mesures de débit), nous constatons que le débit prélevé aux sources est supérieur au débit du cours d'eau pendant 5 jours sur 353. En appliquant des incertitudes de mesures de +5 % pour le cours d'eau et de -5 % pour les sources, nous constatons que le débit du cours d'eau est toujours supérieur au débit prélevé aux sources. En utilisant des incertitudes de mesures de -5 % pour le cours d'eau et de +5 % pour les sources, nous constatons que le débit prélevé aux sources est supérieur au débit des cours d'eau pendant 8 jours.

N = 353	Sans incertitude de mesures de débit	Avec incertitude de mesures de débit	
		+5 % pour le cours d'eau et -5 % pour les sources	-5 % pour le cours d'eau et de +5 % pour les sources
Débit des sources supérieur au débit des cours d'eau	5 jours	0 jours	8 jours

Tableau 31 : Nombre de jours où le débit prélevé aux sources est supérieur au débit du cours d'eau sur le bassin versant du Pamphiot du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009

La Figure 49 présente l'évolution en pourcentage de la part du débit du cours d'eau par rapport au débit prélevé aux sources du bassin versant du Pamphiot du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009. Le tableau statistique exposé amène les commentaires suivants :

- Les courbes se situent de manière générale au-dessus de 100 % ce qui signifie que le débit prélevé aux sources est inférieur au débit du cours d'eau. En moyenne, la part du débit du cours d'eau par rapport au débit prélevé aux sources oscille entre 276 et 337 %
- La différence prononcée entre les valeurs de la moyenne (entre 276 et 337 %) et de la médiane (entre 220 et 268 %) s'explique par la réactivité du débit du cours d'eau aux événements pluvieux
- Au minimum, la part du débit du cours d'eau par rapport au débit prélevé aux sources est comprise entre 85 et 104 %. Le minimum a été mesuré le 19 octobre 2009, en fin de période d'été
- Au maximum, la part du débit du cours d'eau par rapport au débit prélevé aux sources est comprise entre 1479 et 1807 %. Le maximum a été mesuré le 5 décembre 2008 après de fortes précipitations (29.5 mm de pluie a été mesuré à la station de Thonon INRA du 3 au 5 décembre 2008)

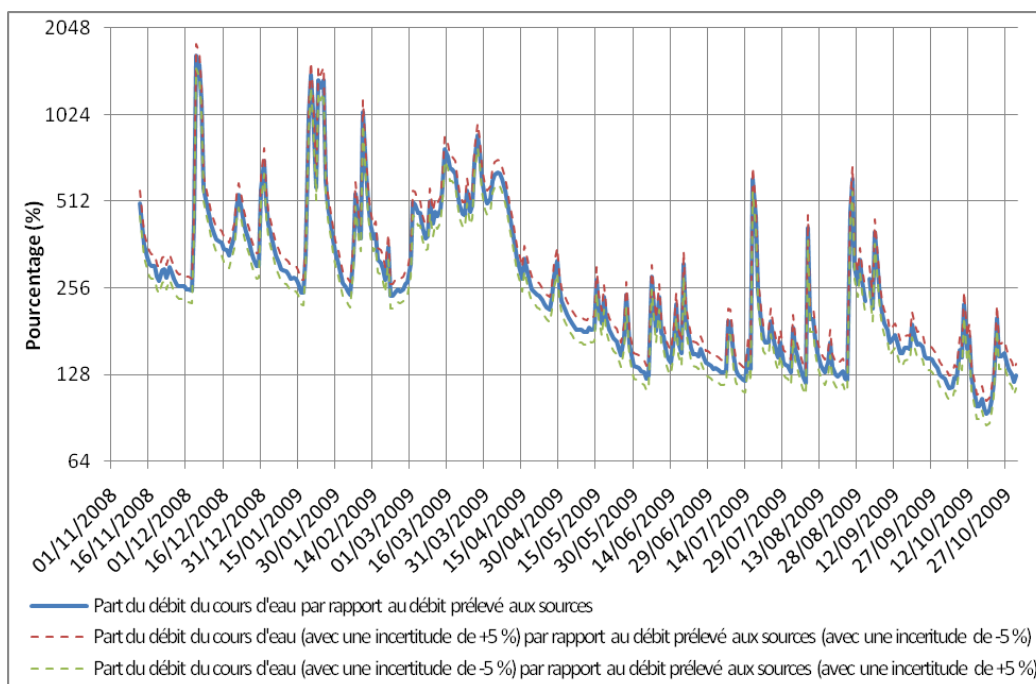
### 3.6.2. Bassin versant des Moises

Le Tableau 25 et le Tableau 26 (cf. 3.2.2) présentent les lacunes d'informations des stations du bassin versant des Moises (Moises 1, Moises 2, Moises 3 et Moises rivière). Nous observons 48 jours de lacunes d'informations qui se déclinent sous la forme d'informations manquantes à Moises rivière (du 6 janvier 2009 au 20 janvier 2009 et du 15 février 2009 au 24 février 2009) et d'informations biaisées (dus à la mise en fonctionnement du système de trop plein) à la source de Moises 1 (du 23 avril 2009 au 15 mai 2009).

La Figure 50 présente l'évolution des débits moyens journaliers prélevé aux sources (addition des débits prélevés de Moises 1, de Moises 2 et de Moises 3) et du cours d'eau (débit de Moises rivière) du bassin versant des Moises, du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009. Au vu des sites présents, nous avons intégré des courbes

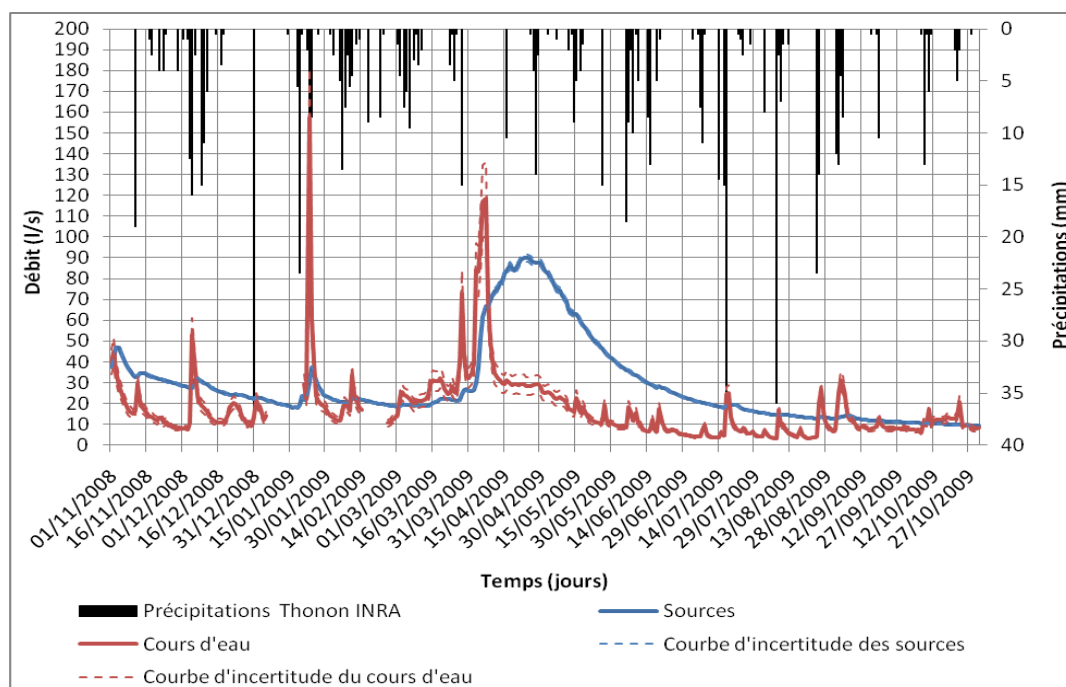
d'incertitudes qui représentent les marges d'erreur de mesures de débits. Nous avons choisi les valeurs de 15 % (-15 % et +15 %) pour le cours d'eau et de 2 % (-2 % et +2 %) pour les sources. De manière générale, nous observons que le débit du cours d'eau est inférieur au débit prélevé aux sources. Le tableau statistique expose les informations suivantes :

- Pour les sources, la moyenne des débits prélevés est de 28.8 l/s et la médiane est de 22 l/s (la moyenne est influencée par de forts débits). Le débit minimum prélevé est enregistré le 31 octobre 2009 (9.2 l/s). Le débit maximum prélevé est mesuré le 24 avril 2009 (90.1 l/s)
- Pour le cours d'eau, la moyenne est de 17.5 l/s et la médiane est de 12.6 l/s (la moyenne est influencée par de forts débits). Le débit minimum est enregistré le 7 août 2009 (3.2 l/s). Le débit maximum est mesuré le 23 janvier 2009 (133.7 l/s)



N = 353	Sans incertitude de mesures de débit	Avec incertitude de mesures de débit	
		+5 % pour le cours d'eau et -5 % pour les sources	-5 % pour le cours d'eau et +5 % pour les sources
Moyenne	305.08	337.20	276.03
Médiane	242.74	268.29	219.62
Ecart type	227.79	251.77	206.09
Minimum	93.86	103.74	84.92
Date	19/10/2009	19/10/2009	19/10/2009
Maximum	1634.97	1807.08	1479.26
Date	05/12/2008	05/12/2008	05/12/2008

Figure 49 : Evolution en pourcentage de la part du débit du cours d'eau par rapport au débit prélevé aux sources du bassin versant du Pamphiot du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009



N = 340	Sources			Cours d'eau		
	Sans incertitude	Incertitude de +2 %	Incertitude de -2 %	Sans incertitude	Incertitude de +15 %	Incertitude de -15 %
Moyenne	28.79	29.36	28.21	17.50	20.12	14.87
Médiane	21.96	22.40	21.52	12.56	14.44	10.67
Ecart type	20.17	20.57	19.76	16.63	19.13	14.14
Minimum	9.20	9.39	9.02	3.19	3.67	2.71
Date	31/10/2009	31/10/2009	31/10/2009	07/08/2009	07/08/2009	07/08/2009
Maximum	90.08	91.88	88.28	157.23	180.82	133.65
Date	24/04/2009	24/04/2009	24/04/2009	23/01/2009	23/01/2009	23/01/2009

Figure 50 : Evolution du débit prélevé aux sources et du débit du cours d'eau du bassin versant des Moises du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009

Le Tableau 32 identifie le nombre de jours où le débit mesuré aux sources est supérieur au débit mesuré du cours d'eau du bassin versant des Moises, du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009. En utilisant les mesures de débit brutes (sans application des incertitudes de mesures de débit), nous constatons que le débit prélevé aux sources est supérieur au débit du cours d'eau pendant 266 jours sur 340. En appliquant des incertitudes de mesures de +15 % pour le cours d'eau et de -2 % pour les sources, nous constatons que le débit prélevé aux sources est supérieur au débit du cours d'eau pendant 250 jours. En utilisant des incertitudes de mesures de -15 % pour le cours d'eau et de +2 % pour les sources, nous constatons que le débit prélevé aux sources est supérieur au débit du cours d'eau pendant 294 jours.

La Figure 51 présente l'évolution en pourcentage de la part du débit du cours d'eau par rapport au débit prélevé aux sources du bassin versant des Moises du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009. Le tableau statistique exposé amène les commentaires suivants :

- Les courbes se situent de manière générale en-dessous de 100 % ce qui signifie que le débit prélevé aux sources est supérieur au débit du cours

d'eau. En moyenne, la part du débit du cours d'eau par rapport au débit prélevé aux sources oscille entre 58 et 81 %

- La différence entre les valeurs de la moyenne (entre 58 et 81 %) et de la médiane (entre 46 et 65 %) s'explique par la réactivité du débit du cours d'eau aux événements pluvieux
- Au minimum, la part du débit du cours d'eau par rapport au débit prélevé aux sources est comprise entre 16 et 22 %. Le minimum a été mesuré le 12 juillet 2009, au début de période d'étiage. A cette époque, le débit du cours d'eau est faible (compris entre 3 et 4 l/s) même s'il n'est pas à son minimum et le débit (prélevé) des sources est encore important (environ 19 l/s)
- Au maximum, la part du débit du cours d'eau par rapport au débit prélevé aux sources est comprise entre 425 et 599 %. Le maximum a été mesuré le 23 janvier 2009 après de fortes précipitations (50 mm de pluie a été mesuré à la station de Thonon INRA du 18 au 23 janvier 2009)

N = 340	Sans incertitude de mesures de débit	Avec incertitude de mesures de débit	
		Incertitudes de +15 % pour le cours d'eau et de -2 % pour les sources	Incertitudes de -15 % pour les cours d'eau et de +2 % pour les sources
Débit des sources supérieur au débit des cours d'eau	266 jours	250 jours	294 jours

Tableau 32 : Nombre de jours où le débit prélevé aux sources est supérieur au débit du cours d'eau sur le bassin versant des Moises, du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2010

### 3.6.3. Bassin versant de la Menoge

Le Tableau 25 et le Tableau 26 (cf. 3.2.2) présentent les lacunes d'informations des stations (Arces, Arces aval, Granges Mamet, Granges Mamet rivière, Menoge et Ramble) du bassin versant de la Menoge. Nous observons 142 jours de lacunes d'informations qui se déclinent sous la forme :

- D'informations manquantes aux Arces aval (du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 29 décembre 2008, du 17 mars 2009 au 24 mars 2009 et du 3 avril 2009 au 6 avril 2009), aux Granges Mamet rivière (du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 2 novembre 2008)
- D'informations biaisées dues à la mise en fonctionnement des systèmes de trop plein aux sources des Arces (du 7 avril 2009 au 15 avril 2009) et des Granges Mamet (du 24 janvier 2009 au 29 janvier 2009 et du 15 mars 2009 au 8 avril 2009) ainsi qu'au niveau des stations des Arces aval (du 7 avril 2009 au 12 avril 2009) et de la Menoge (du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 5 novembre 2008, le 5 décembre 2008, le 20 janvier 2009, du 23 janvier 2009 au 24 janvier 2009, le 10 février 2009, du 16 mars 2009 au 19 mars 2009, du 27 mars 2009 au 29 mars 2009 et du 1<sup>er</sup> avril 2009 au 9 avril 2009)

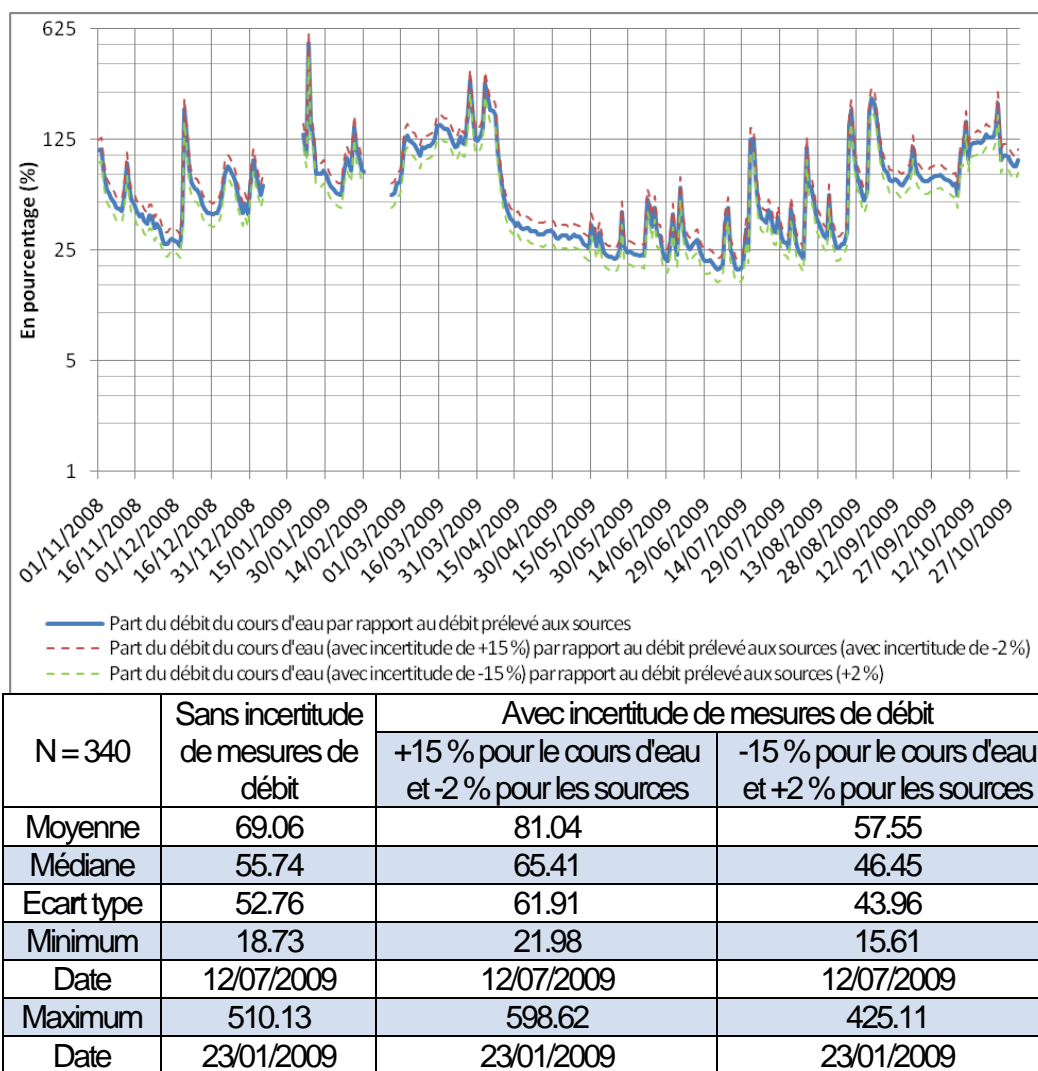
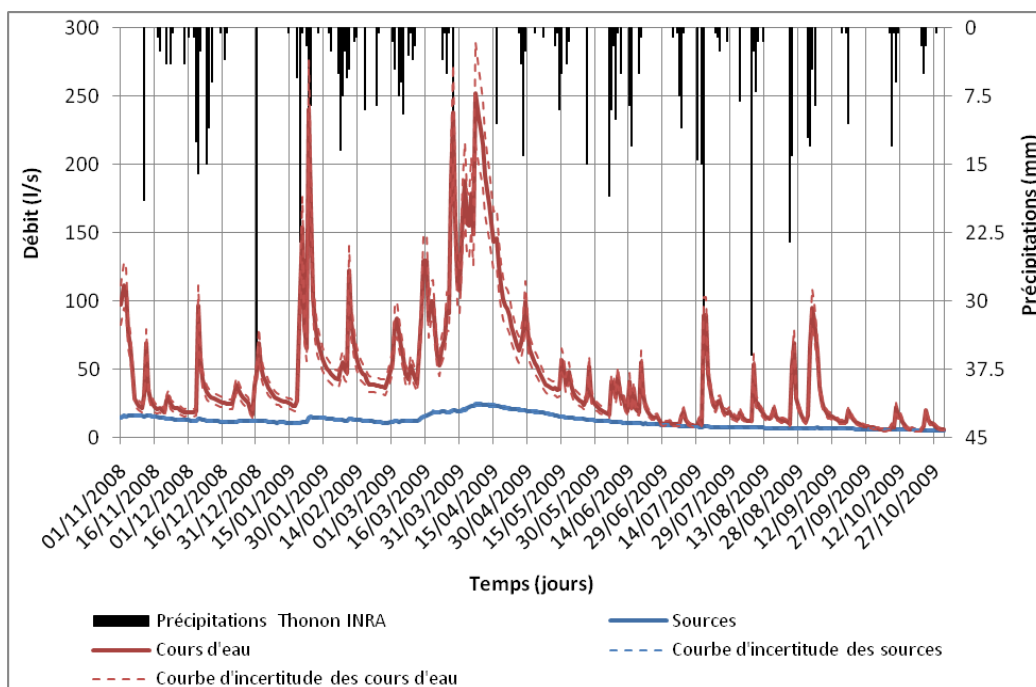


Figure 51 : Evolution en pourcentage de la part du débit du cours d'eau par rapport au débit prélevé aux sources du bassin versant des Moises du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009

La Figure 52 présente l'évolution du débit moyen journalier prélevé aux sources (addition des débits prélevés aux Arces, aux Granges Mamet et à Ramble) et des cours d'eau (addition des débits des Arces aval, des Granges Mamet rivière et de la Menoge) du bassin versant de la Menoge, du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009. Au vu des sites présents, nous avons intégré des courbes d'incertitudes qui représentent les marges d'erreur de mesures de débits. Nous avons choisi les valeurs de 15 % (-15 % et +15 %) pour les cours d'eau et de 5 % (-5 % et +5 %) pour les sources. De manière générale, nous observons que le débit des cours d'eau est supérieur au débit prélevé aux sources. Le tableau statistique expose les informations suivantes :

- Pour les sources, le débit moyen annuel prélevé est de 11.7 l/s et la médiane est de 11.6 l/s, (la moyenne est légèrement influencée par de forts débits). Le débit minimum est enregistré le 31 octobre 2009 (5.1 l/s) et le débit maximum est mesuré le 8 avril 2009 (24.5 l/s)
- Pour le cours d'eau, le débit moyen annuel est de 44.7 l/s et la médiane est de 28.3 l/s (la moyenne est fortement influencée par de forts débits). Le

débit minimum est enregistré le 19 octobre 2009 (4.7 l/s) et le débit maximum est mesuré le 7 avril 2009 (252.1 l/s)



N = 365	Sources			Cours d'eau		
	Sans incertitude	Incertitude de -5 %	Incertitude de +5 %	Sans incertitude	Incertitude de -15 %	Incertitude de +15 %
Moyenne	11.72	11.13	12.30	44.73	38.02	51.44
Médiane	11.60	11.02	12.18	28.29	24.05	32.53
Ecart type	4.81	4.57	5.05	44.99	38.24	51.74
Minimum	5.07	4.82	5.33	4.70	3.99	5.40
Date	31/10/2009	31/10/2009	31/10/2009	19/10/2009	19/10/2009	19/10/2009
Maximum	24.46	23.24	25.69	252.10	214.29	289.92
Date	08/04/2009	08/04/2009	08/04/2009	07/04/2009	07/04/2009	07/04/2009

Figure 52 : Evolution du débit prélevé aux sources et du débit des cours d'eau du bassin versant de la Menoge du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009

Le Tableau 32 identifie le nombre de jours où le débit mesuré aux sources est supérieur au débit mesuré du cours d'eau du bassin versant de la Menoge, du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009. En utilisant les mesures de débit brutes (sans application des incertitudes de mesures de débit), nous constatons que le débit prélevé aux sources est supérieur au débit du cours d'eau pendant 8 jours sur 365. En appliquant des incertitudes de mesures de +15 % pour le cours d'eau et de -5 % pour les sources, nous constatons que le débit prélevé aux sources est toujours inférieur au débit du cours d'eau. En utilisant des incertitudes de mesures de -15 % pour le cours d'eau et de +5 % pour les sources, nous constatons que le débit prélevé aux sources est supérieur au débit du cours d'eau pendant 28 jours.

N = 365	Sans incertitude de mesures de débit	Avec incertitude de mesures de débit	
		+15 % pour le cours d'eau et -5 % pour les sources	-15 % pour les cours d'eau et +5 % pour les sources
Débit des sources supérieur au débit des cours d'eau	8 jours	0 jours	28 jours

Tableau 33 : Nombre de jours où le débit prélevé aux sources est supérieur au débit des cours d'eau du bassin versant de la Menoge, du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009

La Figure 53 présente l'évolution en pourcentage de la part du débit du cours d'eau par rapport au débit prélevé aux sources du bassin versant des Moises du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009. Le tableau statistique exposé amène les commentaires suivants :

- Les courbes se situent de manière générale au-dessus de 100 % ce qui signifie que le débit prélevé aux sources est inférieur au débit du cours d'eau. En moyenne, la part du débit du cours d'eau par rapport au débit prélevé aux sources oscille entre 276 et 413 %
- La différence prononcée entre les valeurs de la moyenne (entre 276 et 413 %) et de la médiane (entre 209 et 313 %) s'explique par la réactivité du débit du cours d'eau aux événements pluvieux
- Au minimum, la part du débit du cours d'eau par rapport au débit prélevé aux sources est comprise entre 71 et 106 %. Le minimum a été mesuré le 19 octobre 2009, en fin de période d'étiage. A cette époque, le débit du cours d'eau est au minimum (cf. Figure 52)
- Au maximum, la part du débit du cours d'eau par rapport au débit prélevé aux sources est comprise entre 1356 et 2030 %. Le maximum a été mesuré le 23 janvier 2009 après de fortes précipitations (50 mm de pluie a été mesuré à la station de Thonon INRA du 18 au 23 janvier 2009)

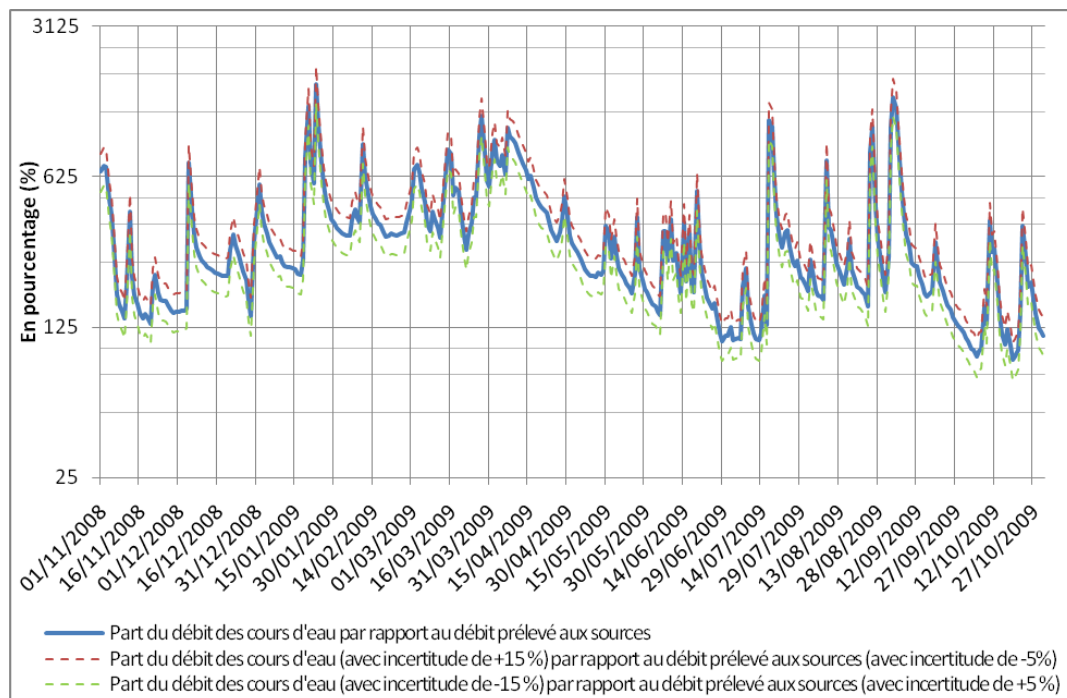
### 3.6.4. Conclusions

L'étude comparative entre les prélèvements d'eau potable et le débit des cours d'eau sur les bassins versants de la Menoge, des Moises et du Pamphiot, a été réalisée sur un cycle hydrologique, à savoir du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009. Elle montre que les débits prélevés aux sources sont en moyenne :

- Inférieurs aux débits mesurés des cours d'eau sur les bassins versants de la Menoge et du Pamphiot sauf en fin de période d'étiage
- Supérieurs aux débits mesurés des cours d'eau sur le bassin versant des Moises sauf lors de la fusion nivale printanière (du 2 mars 2009 au 8 avril 2009), de la période pluvieuse automnale (du 8 au 26 octobre 2009) et ponctuellement à la suite de précipitations abondantes

Ces constats amènent la question de savoir si les prélèvements d'eau potable sur le bassin versant des Moises sont en accord avec la loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006 qui a instauré au sein de l'article L.214-18 du code de l'environnement, une disposition imposant à tous les ouvrages, quel qu'en soit l'usage, des obligations relatives pour le maintien d'un débit minimal garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces aquatiques dans le cours d'eau à l'aval des ouvrages. « *Ce débit minimal ne doit pas être inférieur au dixième du « module » du cours d'eau en aval immédiat ou au droit de l'ouvrage*

correspondant au débit moyen interannuel, évalué à partir des informations disponibles portant sur une période minimale de cinq années, ou au débit à l'amont immédiat de l'ouvrage, si celui-ci est inférieur. (...). Toutefois, pour les cours d'eau ou sections de cours d'eau présentant un « fonctionnement atypique » rendant non pertinente la fixation d'un débit minimal dans les conditions prévues ci-dessus, le débit minimal peut être fixé à une valeur inférieure ».



N = 365	Sans incertitude de mesures de débit	Avec incertitude de mesures de débit	
		+15 % pour les cours d'eau et -5% pour les sources	-15 % pour les cours d'eau et +5% pour les sources
Moyenne	341.09	412.90	276.12
Médiane	258.23	312.60	209.05
Ecart type	245.63	297.35	198.85
Minimum	87.79	106.27	71.07
Date	19/10/2009	19/10/2009	19/10/2009
Maximum	1677.37	2030.50	1357.87
Date	23/01/2009	23/01/2009	23/01/2009

Figure 53 : Evolution en pourcentage de la part du débit des cours d'eau par rapport au débit prélevé aux sources du bassin versant de la Menoge du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009

La lecture de l'article L. 214-18 du code de l'environnement définit la notion de débit minimal comme ne devant pas être inférieur au dixième du module du cours d'eau en aval immédiat ou au droit de l'ouvrage correspondant. En admettant que la station des Moises se localise à l'aval immédiat des sources alors nous pouvons « évaluer » le débit minimal du cours d'eau pour la période du suivi en calculant le dixième du module du cours d'eau. Dans cette simulation, le débit du cours d'eau correspond à la somme du débit prélevé aux sources et du débit mesuré à la station des Moises.

Le Tableau 34 présente les valeurs estimées du débit minimal du cours d'eau des Moises, en fonction de l'intégration (ou non) des incertitudes de mesures de débit,

pour la période du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009. Nous observons que le débit minimal du cours d'eau des Moises est estimé entre 4.2 et 4.8 l/s. Le Tableau 35 informe du nombre de jours où le débit mesuré au cours d'eau est inférieur au débit minimal que nous avons estimé durant la période de suivi. En fonction des incertitudes de mesures de débit, nous constatons que le nombre de jours varie entre 8 (scénario optimiste) et 38 jours (scénario pessimiste).

N = 340	Sans incertitude de mesures de débit	Avec incertitude de mesures de débit	
		+15 % pour le cours d'eau et +2 % pour les sources	-15 % pour le cours d'eau et -2 % pour les sources
Moyenne (l/s)	45.09	48.11	42.07
Débit minimal du cours d'eau (l/s)	4.51	4.81	4.21

Tableau 34 : Estimation du débit minimal du cours d'eau des Moises à partir des informations disponibles, du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009

N = 340	Sans incertitude de mesures de débit	Avec incertitude de mesures de débit		
		+15 % pour le cours d'eau et +2 % pour les sources	-15 % pour le cours d'eau et -2 % pour les sources	
Débit minimal estimé (l/s)	4.51	4.81	4.21	
Débit minimal supérieur au débit du cours d'eau	Sans incertitude	26 jours	28 jours	20 jours
	Incertitude de +15 % du débit du cours d'eau	11 jours	20 jours	8 jours
	Incertitude de -15 % du débit du cours d'eau	35 jours	38 jours	31 jours

Tableau 35 : Nombre de jours où le débit du cours d'eau est inférieur au débit minimal pour le bassin versant des Moises du 1<sup>er</sup> novembre 2008 au 31 octobre 2009

Si les résultats présentés sur le Tableau 35 montrent que le débit du cours d'eau est inférieur au débit minimal estimé et ce en fonction des scénarii (optimiste et pessimiste), nous précisons que :

- Le débit minimal du cours d'eau a été estimé en ajoutant le débit mesuré du cours d'eau et le débit prélevé aux sources. Or, la distance séparant la station des Moises et les sources des Moises est conséquente. Il apparaît possible qu'en l'absence de prélèvement d'eau potable, une partie des eaux provenant des captages et s'écoulant en direction de la station des Moises, puisse s'infiltrer. En ce sens, le débit minimal du cours d'eau est surestimé
- Le débit minimal du cours d'eau a été estimé à partir des informations d'un cycle hydrologique. Or, le cumul des précipitations durant la période de suivi fait apparaître un déficit pluviométrique de l'ordre de 25 %. En ce sens, le débit mesuré et le débit minimal du cours d'eau sont sous-estimés

Ces éléments de précision posent la question des facteurs géologiques. En d'autres termes, **est-ce que la géologie du bassin versant des Moises est plus favorable à l'infiltration que les autres bassins versants.** Selon Allier, Vittecoq et Mardhel (ALLIER, VITTECOQ, & MARDHEL, 2008), la densité de drainage est un indicateur « révélateur des propriétés des formations géologiques. Un bassin formé de matériaux très perméables aura en général une densité de drainage faible. A

*l'inverse, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes ou des argiles, va souvent présenter une densité de drainage plus élevée ». Or, la densité de drainage (rapport entre la superficie du bassin versant et la longueur des cours d'eau cadastrés) est environ deux fois moins importante (cf. 2.3.1) pour le bassin versant des Moises (0.0011) que pour les bassins versants de la Menoge (supérieur à 0.002) et du Pamphiot (0.0018).*

**Dans l'objectif de préciser le fonctionnement du cours d'eau des Moises et de déterminer si des phénomènes de pertes se produisent, des opérations de traçage artificiel pourraient être entreprises. Par ailleurs et dans l'objectif de définir le débit minimal du cours d'eau des Moises, le suivi hydrodynamique du bassin versant doit être poursuivi durant les prochaines années. Le suivi envisagé se doit d'être couplé avec l'acquisition d'informations météorologiques.**

## **CHAPITRE 4. INTERPRETATION DES INFORMATIONS HYDROCHIMIQUES, ISOTOPIQUES ET SANITAIRES**

Le chapitre 4 vise à interpréter les informations hydrochimiques, isotopiques et sanitaires, récoltées au niveau des captages d'eau potable. Il présente les résultats de :

- L'étude des variations de la température et de la conductivité électrique
- L'étude de la balance ionique
- L'étude des variations des paramètres du suivi hydrochimique
- L'étude des variations des paramètres isotopiques
- L'estimation de la participation des pôles de mélange à l'exutoire
- L'étude de caractérisation du signal hydrochimique par ACP
- L'étude des paramètres sanitaires

## 4.1. Etude des variations de la température et de la conductivité électrique à l'exutoire

Ce paragraphe présente les résultats de l'étude des variations de température et de conductivité électrique des sources, en 2009. Dans un premier temps, les lacunes d'informations sont identifiées puis dans un second temps, l'évolution temporelle des valeurs est présentée dans le but de préciser l'influence des fluctuations à l'échelle de l'année (des saisons) et d'un événement pluvieux. Dans un troisième temps, une courbe de distribution de la fréquence de la conductivité électrique est dressée pour chaque source afin caractériser le fonctionnement (fissuré et/ou karstique) des aquifères et de préciser le degré d'organisation des écoulements souterrains. Dans un dernier temps, les informations sont reprises et synthétisées.

### 4.1.1. Les lacunes d'informations

Le Tableau 36 présente les dates et le nombre de jours des lacunes d'informations. Au total, 493 jours de lacunes d'informations ont été identifiés. Elles ont été causées par :

- Des problèmes de communication entre le capteur de pression et le logiciel d'acquisition. Après renvoi et test des capteurs par le fabricant, des problèmes d'étanchéité et d'humidité ont été identifiés et sont à l'origine des dysfonctionnements
- Des erreurs humaines. En s'introduisant sur les sites, les capteurs ont été soit enlevés (cas des cantonniers à Habère-Poche qui ont ôté les capteurs pour nettoyer le site des Arces et qui ont oublié de les réinstaller à leur départ) soit immergés (cas d'une entreprise privée sur le site des Moises)

### 4.1.2. Analyse des données

#### 4.1.2.1. Les sources d'Orcier et du Col du Feu

La Figure 54 et la Figure 55 présentent l'évolution des moyennes journalières de température et de conductivité électrique aux sources du Col du Feu, de l'Epinguy, des Favrats et du Pont du Mouche, en 2009.

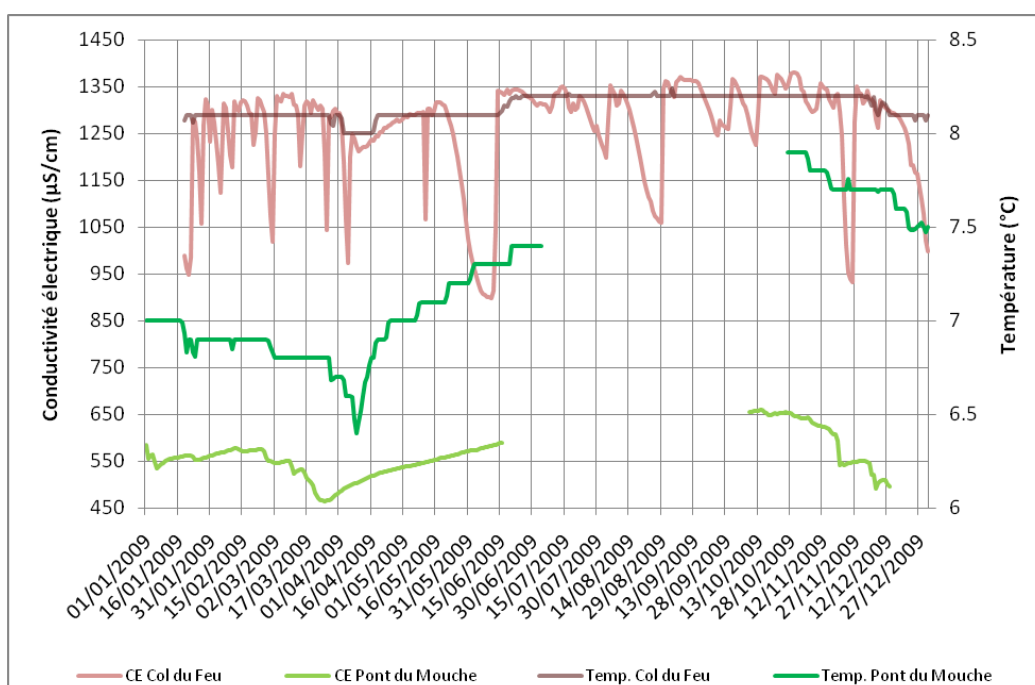
	Dates lacunes	Lacunes (jours)
Arces	Du 2/12/2009 au 7/12/2009	6
	Du 12/12/2009 au 31/12/2009	20
Col du Feu	Du 1/01/2009 au 18/01/2009	18
Epinguy	Du 26/03/2009 au 4/05/2009	40
Favrats	1/01/2009 au 25/02/2009	56
Moises 2	Du 25/08/2009 au 9/12/2009	107
Moises 3	Du 25/04/2009 au 24/06/2009	61
Pont du Mouche	Du 5/07/2009 au 26/10/2009	114
Ramble	Du 1/10/2009 au 10/12/2009	71

Tableau 36 : Dates et nombre de jours des lacunes d'informations de température et de conductivité électrique, en 2009

## La source du Col du Feu

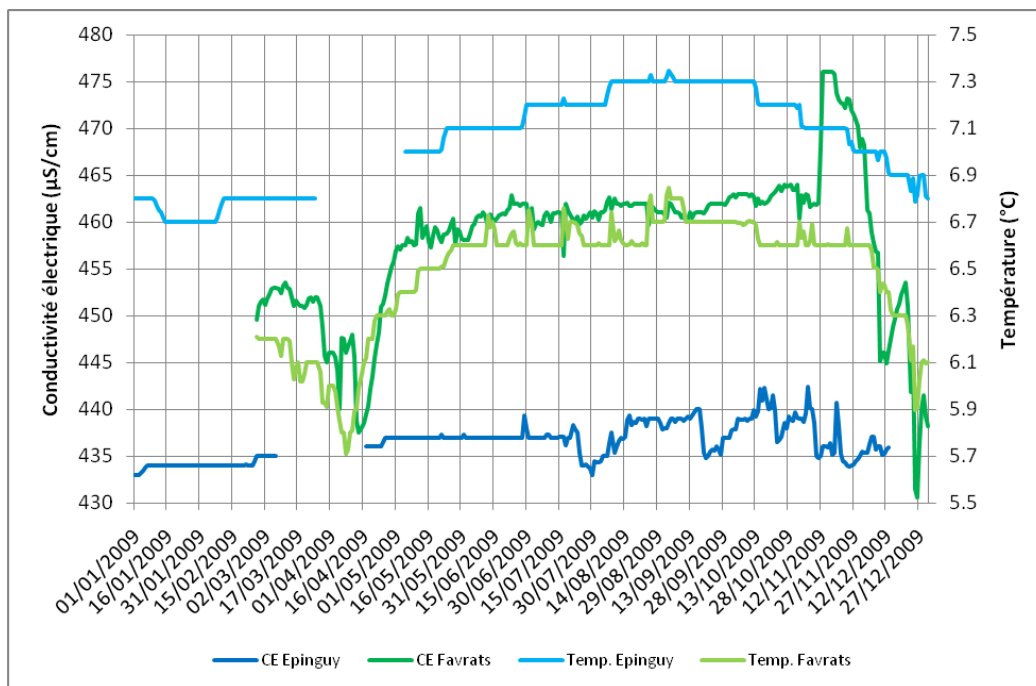
Les valeurs de la conductivité électrique (C.E) sont élevées avec une moyenne de 1260  $\mu\text{S/cm}$ . Elle varie fortement passant de 897 à 1380  $\mu\text{S/cm}$  avec un écart type de 109.7. Le coefficient de variation (rapport entre l'écart type et la moyenne) est de 8.7 %. Le minimum a eu lieu le 11 juin (71.3 %) et le maximum est intervenu le 30 octobre (109.6 %).

Sur la Figure 54, nous remarquons que les valeurs de conductivité sont irrégulières. Elles chutent brutalement puis remontent de manière spectaculaire. Malgré ces variations brusques, nous notons une tendance à l'augmentation des valeurs en hiver, suivie d'une diminution au début de printemps. Par la suite, les valeurs de conductivité augmentent légèrement jusqu'à fin octobre puis diminuent jusqu'à la fin de l'année. Ainsi, nous constatons une faible corrélation entre la C.E et les changements saisonniers et une forte corrélation entre la C.E et les précipitations.



	Col du Feu		Pont du Mouche	
	CE	Temp.	CE	Temp.
Moyenne	1259,43	8,14	561,66	7,17
Médiane	1296,96	8,15	557,80	7,00
Ecart type	109,69	0,06	45,44	0,38
Minimum	897,50	8,00	464,80	6,40
Coefficient de variation	8.7 %	0.7 %	8.1 %	5.3 %
Date	11/06/2009	3/04/2009	12/04/2009	09/04/2009
Maximum	1380,40	8,24	659,04	7,90
Date	30/10/2009	3/09/2009	01/11/2009	27/10/2009

Figure 54 : Résumé statistique des informations de conductivité électrique et de température aux sources du Col du Feu et du Pont du Mouche, en 2009



	Epinguy		Favrats	
	CE	Temp.	CE	Temp.
Moyenne	436,34	7,05	457,99	6,48
Médiane	437,00	7,10	460,60	6,60
Ecart type	2,08	0,20	7,77	0,25
Minimum	433,00	6,70	430,58	5,71
Coefficient de variation	0.5 %	2.8 %	1.7 %	3.9 %
Date	17/08/2009	15/01/2009	26/12/2009	8/04/2009
Maximum	442,38	7,35	476,08	6,85
Date	24/11/2009	03/09/2009	15/11/2009	3/09/2009

Figure 55 : Résumé statistique des informations de conductivité électrique et de température aux sources de l'Epinguy et des Favrats, en 2009

La température de l'eau est élevée par rapport aux autres sources avec en moyenne 8.14°C. L'amplitude thermique est faible avec 0.24°C et un écart type de 0.06. Le coefficient de variation est faible lui-aussi avec 0.5 %. Le minimum est atteint le 3 avril avec 8°C (98.3 %) et le maximum est apparu le 3 septembre avec 8.24°C (101.2 %). Nous constatons une faible corrélation entre la température de l'eau et les changements saisonniers et une absence de corrélation entre la température de l'eau et les précipitations.

### La source de l'Epinguy

Sur la Figure 55, le tableau statistique présenté montre une moyenne journalière de la C.E de 436 µS/cm. La C.E varie faiblement avec des valeurs comprises entre 433 et 442 µS/cm. L'écart type est de 2.08 et le coefficient de variation est de 0.5 %. Le minimum est atteint le 17 août (99.2 %) et le maximum se produit le 24 novembre (101.4 %).

De janvier à fin mars, les valeurs de la C.E sont stables et légèrement inférieures à la moyenne. Les lacunes d'informations du 26 mars au 4 mai ne permettent pas de

suivre l'évolution de la C.E en crue. De début mai à début août, la C.E est stable et légèrement au-dessus de la moyenne. D'août à fin décembre, de légères oscillations de la C.E s'observent avec des valeurs comprises entre 433 et 442  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Par ailleurs, les fusions partielles du manteau neigeux n'ont pas d'influence sur la C.E. Les précipitations estivales et automnales se traduisent par une légère augmentation puis une légère diminution de la C.E. Les lacunes d'informations du 26 mars au 4 mai ne permettent pas d'observer l'influence de la fusion nivale printanière sur l'évolution de la C.E.

Ainsi, nous constatons une faible corrélation entre la C.E et les précipitations et une faible corrélation entre les changements saisonniers et la C.E.

La température de l'eau est modérée par rapport aux autres sources avec en moyenne 7.05°C. L'amplitude thermique est faible avec 0.65°C et un écart type de 0.20. Le coefficient de variation est faible également avec 2.8 %. Le minimum se produit le 15 janvier avec 6.7°C (95 %) et le maximum a lieu le 3 septembre avec 7.35°C (104.3 %). De janvier à mars, la température est stable et elle se situe en-dessous de la moyenne. Par la suite, les lacunes d'informations du 26 mars au 4 mai ne permettent pas d'observer l'évolution de la température de l'eau en crue. De juin à mi-octobre, la température augmente régulièrement. Puis, elle diminue régulièrement jusqu'à fin décembre.

Les fusions partielles du manteau neigeux et les précipitations automnales se traduisent par une faible diminution de la température. Les précipitations estivales se manifestent par une faible augmentation de la température de l'eau. Les lacunes d'informations du 26 mars au 4 mai ne permettent pas d'observer l'influence de la fusion nivale printanière sur l'évolution de la température de l'eau.

Ainsi, nous constatons une faible corrélation entre les changements saisonniers et la température de l'eau et une faible corrélation entre les précipitations et la température de l'eau.

### La source des Favrats

Sur la Figure 55, le tableau statistique présenté montre des valeurs de conductivité électrique (C.E) modérées avec une moyenne de 458  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La C.E varie faiblement avec des valeurs oscillant entre 431 et 476  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . L'écart type est de 7.77 et le coefficient de variation est de 3.9 %. Le minimum a eu lieu le 26 décembre (94 %) et le maximum a été atteint le 15 novembre (103.9 %).

Du 1<sup>er</sup> janvier au 26 février, des lacunes d'informations se produisent et ne permettent pas d'observer l'évolution de la C.E. En mars, les valeurs sont moyennes. Elles diminuent rapidement de fin mars à début avril. Elles remontent brusquement de début avril à mi-avril et baissent brutalement en mi-avril. De mi-avril à fin avril, les valeurs augmentent rapidement puis de mai à début novembre, les valeurs augmentent progressivement. Début novembre, les valeurs montent brusquement puis elles diminuent fortement jusqu'à début décembre. Elles augmentent rapidement de début décembre à mi-décembre et elles baissent brutalement jusqu'à fin décembre.

La fusion nivale printanière se traduit par une diminution de la C.E. Les précipitations estivales n'ont pas d'influence sur la C.E. Les précipitations automnales du début novembre (62 mm de pluie du 1<sup>er</sup> au 12 novembre à Thonon) se manifestent par une forte augmentation de la C.E. et celles du début décembre (45 mm de pluie du 1<sup>er</sup> au 7 décembre à Thonon) provoquent une forte diminution de la C.E. Les lacunes d'informations du 1<sup>er</sup> janvier au 26 février ne permettent pas d'observer l'influence des fusions partielles du manteau neigeux.

Ainsi, nous constatons une faible corrélation entre les changements saisonniers et la C.E et une forte corrélation entre la C.E et les précipitations.

La température de l'eau est froide par rapport aux autres sources avec une moyenne de 6.48°C. L'amplitude thermique est modérée avec 1.14°C. L'écart type est de 0.25 et le coefficient de variation est de 3.9 %. Le minimum est atteint le 8 avril avec 5.71°C (88.1 %) et le maximum est intervenu le 3 septembre avec 6.85°C (105.7 %).

Du 1<sup>er</sup> janvier au 26 février, les lacunes d'informations ne permettent pas d'observer l'évolution de la température. En mars, la température est inférieure à la moyenne. De début avril à mi-avril, elle diminue rapidement puis elle augmente progressivement jusqu'à début septembre. De début septembre à début décembre, la température baisse légèrement puis elle diminue fortement jusqu'à la fin de l'année. La fusion nivale printanière se traduit par une diminution de la température. Les précipitations estivales se traduisent par une augmentation de la température. Les lacunes d'informations du 1<sup>er</sup> janvier au 26 février ne permettent pas d'observer l'influence des fusions partielles du manteau neigeux sur la température.

Ainsi, nous constatons une faible corrélation entre les changements saisonniers et la température de l'eau et une forte corrélation entre la température de l'eau et les précipitations.

#### La source du Pont du Mouche

Sur la Figure 54, nous remarquons que les valeurs de la C.E sont élevées par rapport aux autres sources avec une moyenne de 562  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Les valeurs varient fortement avec un écart type de 45.44, passant de 465 à 659  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Le coefficient de variation est important avec 8.1 %. Le minimum se produit le 12 avril (82.8 %) et le maximum apparaît le 1<sup>er</sup> novembre (117.3 %).

De janvier à mi-mars, la C.E augmente légèrement puis les valeurs chutent de mi-mars à mi-avril. La C.E augmente ensuite progressivement de mi-avril à fin octobre (nous le supposons du fait des lacunes d'informations du 5 juillet au 26 octobre). Enfin, les valeurs diminuent faiblement en novembre puis fortement en décembre.

Les fusions partielles du manteau neigeux, la fusion nivale printanière et les précipitations automnales, provoquent une forte diminution de la C.E. Les lacunes d'informations du 5 juillet au 26 octobre ne permettent pas d'observer l'influence des précipitations estivales sur l'évolution de la C.E.

Ainsi, nous constatons une forte corrélation la C.E et les précipitations et nous supposons une forte corrélation entre les changements saisonniers et la C.E (du fait des lacunes d'informations du 5 juillet au 26 octobre).

Sur la Figure 54, nous remarquons que la température de l'eau est assez chaude par rapport aux autres sources avec une moyenne de 7.17°C. L'amplitude thermique est assez faible avec 1.5°C. L'écart type est de 0.38 et le coefficient de variation est de 5.3 %. Le minimum se produit le 9 avril avec 6.4°C (89.3 %) et le maximum a lieu le 27 octobre avec 7.9°C (110.2 %).

De janvier à mars, la température de l'eau est inférieure à la moyenne et elle diminue régulièrement. Au début avril, les valeurs chutent puis elles augmentent progressivement de mi-avril à début juillet. Les lacunes d'informations du 5 juillet au 26 octobre ne permettent pas d'observer l'évolution de la température en été. En fin octobre, la température atteint son maximum puis elle baisse progressivement en novembre et en décembre.

Les fusions partielles du manteau neigeux, la fusion nivale printanière et les précipitations automnales, provoquent une diminution de la température de l'eau. Les lacunes d'informations du 5 juillet au 26 octobre ne permettent pas d'observer l'influence des précipitations estivales sur l'évolution de la température.

Ainsi, nous constatons une forte corrélation entre la température de l'eau et les précipitations et nous supposons une forte corrélation entre les changements saisonniers et la température de l'eau (du fait des lacunes d'informations du 5 juillet au 26 octobre).

#### 4.1.2.2. Les sources d'Habère-Poche

La Figure 56 présente l'évolution des moyennes journalières de température et de conductivité électrique aux Arces, aux Granges Mamet et à Ramble, en 2009.

##### La source des Arces

Les valeurs de C.E sont assez faibles avec une moyenne de 386  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . L'écart type est de 22.41 et le coefficient de variation est de 5.8 %. Le minimum est atteint le 15 avril avec 338.2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (87.7 %) et le maximum se produit le 6 novembre avec 425  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (110.2 %).

De janvier à mi-mars, les valeurs de la C.E sont moyennes et elles oscillent entre 378 et 392  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . De mi-mars à fin avril, les valeurs chutent puis elles augmentent progressivement pour atteindre le maximum observé au début novembre. Enfin, elles diminuent progressivement en novembre puis rapidement en décembre (nous le supposons du fait des lacunes d'informations du 2 au 7 décembre et du 12 au 31 décembre).

Les fusions partielles du manteau neigeux, la fusion nivale printanière et les précipitations automnales, provoquent une légère diminution de la C.E. Les précipitations estivales se manifestent par une légère augmentation de la C.E.

Ainsi, nous constatons une corrélation entre les changements saisonniers et la C.E et une corrélation entre la C.E et les précipitations.

La température de l'eau est chaude par rapport aux autres sources avec une moyenne de 7.45°C. L'écart type est de 0.28 et le coefficient de variation est de 3.8 %. L'amplitude thermique est modérée avec 1°C. Le minimum est atteint le 8 avril avec 6.8°C (91.3 %) et le maximum apparaît le 19 septembre avec 7.8°C (113.4 %).

En janvier, la température de l'eau est moyenne puis elle diminue progressivement jusqu'à mi-avril (le moment s'accélère légèrement au début avril). Elles augmentent progressivement de mi-avril à mi-novembre puis elles diminuent progressivement également de mi-novembre à fin décembre (nous le supposons du fait des lacunes d'informations du 2 au 7 décembre et du 12 au 31 décembre).

Les fusions partielles du manteau neigeux, la fusion nivale printanière et les précipitations automnales, provoquent une faible diminution de la température de l'eau. Les précipitations estivales se manifestent par une légère augmentation de la température de l'eau.

Ainsi, nous constatons une faible corrélation entre les changements saisonniers et la température de l'eau et une faible corrélation entre les précipitations et la température de l'eau.

#### La source des Granges Mamet

Les valeurs de C.E sont assez faibles avec une moyenne de 388 µS/cm. L'écart type est de 19.12 et le coefficient de variation est de 4.9 %. Le minimum a lieu le 18 avril avec 340 µS/cm (87.6 %) et le maximum est atteint le 3 novembre avec 465 µS/cm (119.8 %).

Les valeurs de la C.E sont oscillantes en hiver, en été et en automne. Malgré les oscillations, nous observons de janvier à fin mars, des valeurs moyennes, comprises entre 374 et 422 µS/cm. De fin mars à mi-avril, les valeurs chutent puis elles augmentent progressivement jusqu'à début septembre. Les valeurs baissent légèrement de septembre à début novembre. Elles augmentent brusquement début novembre pour diminuer ensuite progressivement jusqu'à fin décembre.

Les fusions partielles du manteau neigeux provoquent une forte diminution de la C.E suivie d'une forte augmentation. La fusion nivale printanière se traduit par une forte diminution de la C.E. Les précipitations automnales et les précipitations estivales provoquent une forte augmentation de la C.E.

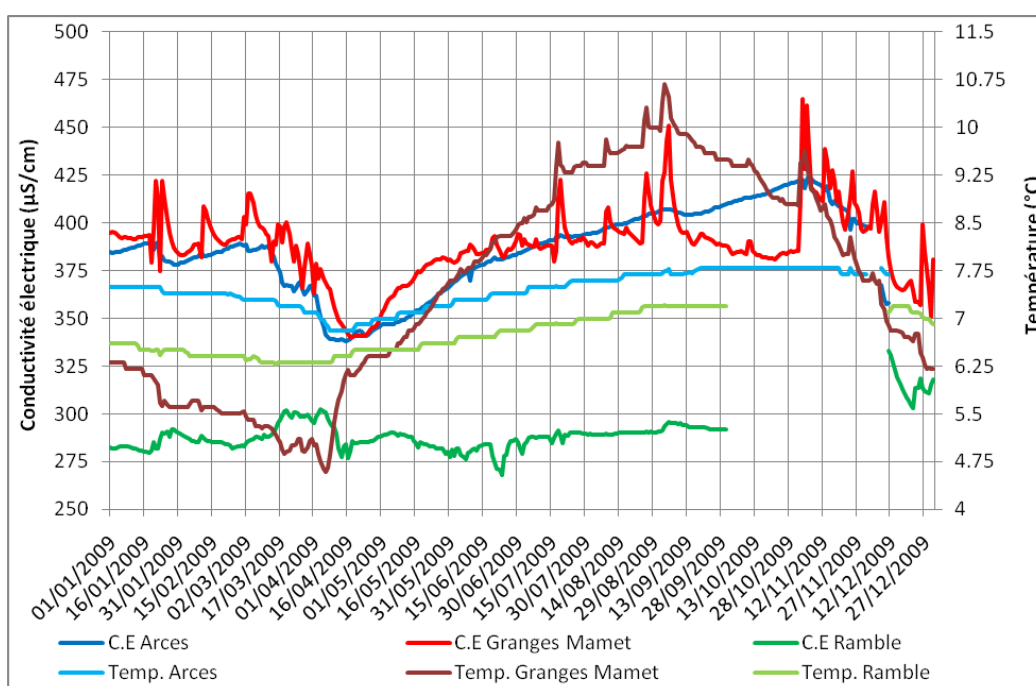
Ainsi, nous constatons une faible corrélation entre les changements saisonniers et la C.E et une forte corrélation entre la C.E et les précipitations.

La température de l'eau est chaude par rapport aux autres sources avec une moyenne de 7.56°C. L'amplitude thermique est très forte avec 6.1°C. L'écart type est important avec 1.67 ainsi que le coefficient de variation avec 22.1 %. Le minimum se produit le 6 avril avec 4.59°C (60.7 %) et le maximum a lieu le 3 septembre avec 10.69°C (141.4 %).

De janvier à début avril, la température diminue fortement puis elle augmente fortement d'avril à début septembre. De septembre à début novembre, la température baisse progressivement puis elle diminue fortement jusqu'à fin décembre.

Les fusions partielles du manteau neigeux provoquent une faible augmentation de la température de l'eau suivie d'une forte diminution. La fusion nivale printanière se traduit par une très forte diminution de la température. Les précipitations estivales et automnales se manifestent par une forte augmentation de la température.

Ainsi, nous constatons une forte corrélation entre la température de l'eau et les changements saisonniers ainsi qu'une forte corrélation entre la température de l'eau et les précipitations.



	Arces		Granges Mamet		Ramble	
	CE	Temp.	CE	Temp.	CE	Temp.
Moyenne	385,73	7,45	388,12	7,56	289,63	6,71
Médiane	387,00	7,50	388,80	7,60	288,40	6,60
Ecart type	22,41	0,28	19,12	1,67	9,25	0,31
Coefficient de variation	5.8 %	3.8 %	4.9 %	22.1 %	3.2 %	4.6 %
Minimum	338,20	6,80	340,10	4,59	268,10	6,28
Date	15/04/2009	08/04/2009	18/04/2009	06/04/2009	23/06/2009	15/03/2009
Maximum	425,00	7,80	464,96	10,69	333,00	7,21
Date	06/11/2009	19/09/2009	03/11/2009	03/09/2009	11/12/2009	03/09/2009

Figure 56 : Résumé statistique des informations de conductivité électrique et de température aux sources d'Habère-Poche, en 2009

### La source de Ramble

Les valeurs de la C.E sont faibles avec une moyenne de 290  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . L'écart type est de 9.52 et le coefficient de variation est de 3.2 %. Le minimum a lieu le 23 juin avec 268  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (92.6 %) et le maximum intervient le 11 décembre avec 333  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (117 %).

De janvier à début avril, les valeurs de la C.E sont moyennes et elles augmentent légèrement. De début à mi-avril, les valeurs diminuent puis elles se stabilisent de juin à juillet pour augmenter faiblement de juillet à début octobre. Les lacunes d'informations du 1<sup>er</sup> octobre au 10 décembre ne permettent pas d'observer l'évolution de la C.E. Mi-décembre, les valeurs sont maximums puis elles baissent rapidement jusqu'à la fin de l'année.

Les fusions partielles du manteau neigeux provoquent une faible augmentation de la C.E. La fusion nivale printanière se traduit par une diminution progressive de la C.E et les précipitations estivales provoquent une faible augmentation de la C.E. Les lacunes d'informations du 1<sup>er</sup> octobre au 10 décembre ne permettent pas d'observer l'évolution de la C.E.

Ainsi, nous constatons une faible corrélation entre la C.E et les changements saisonniers ainsi qu'une faible corrélation entre la C.E et les précipitations.

La température de l'eau est froide par rapport aux autres sources avec une moyenne de 6.71°C. L'amplitude thermique est assez faible avec 0.93°C. L'écart type est de 0.31 et le coefficient de variation est de 4.6 %. Le minimum est atteint le 15 mars avec 6.28°C (93.6 %) et le maximum intervient le 3 septembre avec 7.21°C (107.5 %).

De janvier à début avril, la température diminue faiblement puis elle augmente progressivement de début avril à début octobre. Les lacunes d'informations du 1<sup>er</sup> octobre au 10 décembre ne permettent pas d'observer l'évolution de la température. En mi-décembre, la température est élevée puis elle diminue faiblement jusqu'à fin décembre.

Les fusions partielles du manteau neigeux provoquent une très légère diminution de la température. La fusion nivale printanière se traduit par une faible diminution de la température et les précipitations estivales provoquent une très légère augmentation de la température. Les lacunes d'informations du 1<sup>er</sup> octobre au 10 décembre ne permettent pas d'observer l'influence des précipitations automnales sur l'évolution de la température.

Ainsi, nous constatons une faible corrélation entre la température de l'eau et les changements saisonniers ainsi qu'une faible corrélation entre la température de l'eau et les précipitations.

#### 4.1.2.3. Les sources des Moises

La Figure 57 présente l'évolution des moyennes journalières de température et de conductivité électrique aux sources des Moises 1, des Moises 2 et des Moises 3, en 2009.

##### La source de Moises 1

Les valeurs de la C.E sont faibles par rapport aux autres sources avec une moyenne de 322  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Le minimum est atteint le 23 janvier avec 317  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (98.5 %) et le maximum se produit le 8 décembre avec 334  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (103.7 %). L'écart type est très faible avec 2.57 ainsi que le coefficient de variation avec 0.8 %.

De janvier à novembre, les valeurs de la C.E sont moyennes et stables. De légères variations (légère diminution puis légère augmentation) s'observent en janvier et en avril. De novembre à début décembre, les valeurs augmentent faiblement puis elles diminuent légèrement jusqu'à fin décembre.

Les fusions partielles du manteau neigeux provoquent une légère diminution de la C.E tout comme la fusion nivale printanière. Les précipitations estivales et automnales se traduisent par une légère augmentation de la C.E.

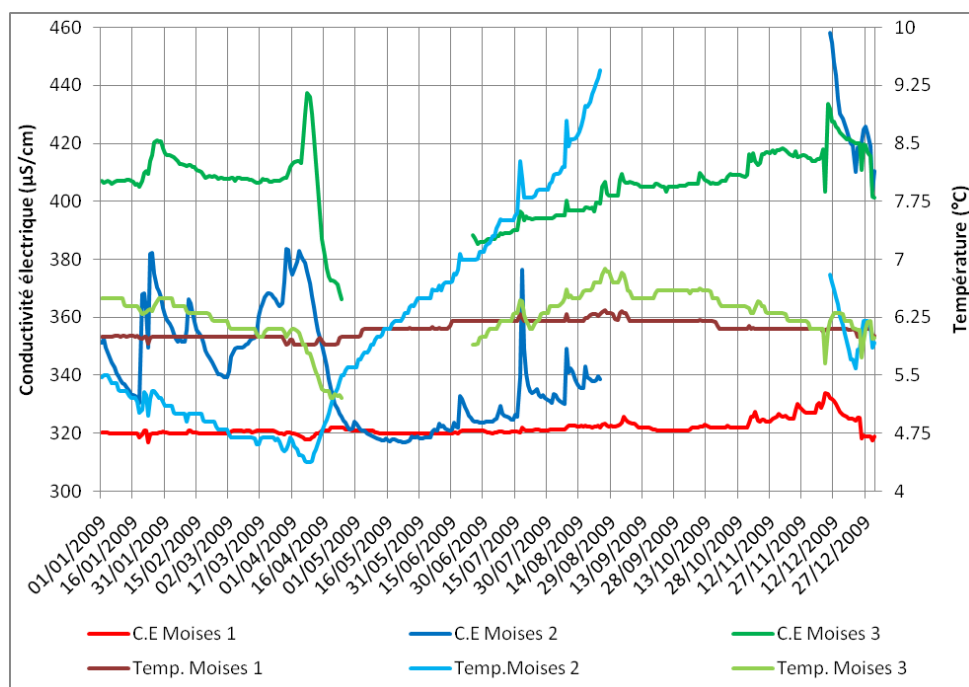
Ainsi, nous constatons une faible corrélation entre la C.E et les changements saisonniers ainsi qu'une faible corrélation entre la C.E et les précipitations.

La température de l'eau est froide par rapport aux autres sources avec une moyenne de 6.1°C. L'amplitude thermique est très faible avec 0.44°C. L'écart type est de 0.1 et le coefficient de variation est 1.6 %. Le minimum est atteint le 29 mars avec 5.9°C (96.7 %) et le maximum est apparu le 26 août avec 6.34°C (103.9 %).

De janvier à fin mars, la température est stable et légèrement inférieure à la moyenne puis elles diminuent très faiblement jusqu'à mi-avril. Les valeurs augmentent légèrement et régulièrement de mi-avril à début septembre puis elles baissent faiblement et régulièrement de début septembre à fin décembre.

Les fusions partielles du manteau neigeux, la fusion nivale printanière et les précipitations automnales provoquent une très légère diminution de la température de l'eau. Les précipitations estivales se manifestent par une très faible augmentation de la température de l'eau.

Ainsi, nous constatons une faible corrélation entre la température de l'eau et les changements saisonniers ainsi qu'une faible corrélation entre la température de l'eau et les précipitations.



	Moises 1		Moises 2		Moises 3	
	CE	Temp.	CE	Temp.	CE	Temp.
Moyenne	321,70	6,10	347,59	6,07	406,28	6,28
Médiane	321,00	6,10	339,20	5,81	407,10	6,30
Ecart type	2,57	0,10	30,12	1,29	11,23	0,30
Coefficient de variation	0,8 %	1,6 %	8,7 %	21,3 %	2,8 %	4,8 %
Minimum	316,90	5,90	316,90	4,37	366,10	5,20
Date	23/01/2009	29/03/2009	23/05/2009	08/04/2009	24/04/2009	24/04/2009
Maximum	333,73	6,34	458,07	9,44	437,50	6,89
Date	08/12/2009	26/08/2009	10/12/2009	24/08/2009	08/04/2009	26/08/2009

Figure 57 : Résumé statistique des informations de conductivité électrique et de température aux sources des Moises, en 2009

### La source des Moises 2

Les valeurs de la C.E sont faibles par rapport aux autres sources avec une moyenne de 348 µS/cm. Le minimum a lieu le 23 mai avec 317 µS/cm (91.2 %) et le maximum est atteint le 10 décembre avec 458 µS/cm (131.8 %). L'écart type est de 30.12 et le coefficient de variation est important avec 8.7 %.

Les valeurs de la C.E oscillent de manière fréquente avec une forte intensité. Malgré les oscillations, nous observons de janvier à début avril, une augmentation de la C.E avec des valeurs comprises entre 330 et 382 µS/cm. En avril, les valeurs augmentent brusquement puis elles chutent brutalement jusqu'à fin mai. De juin à fin août, la C.E augmente progressivement. Les lacunes d'informations du 25 août au 9 décembre ne permettent pas d'observer l'évolution de la C.E. Au début décembre, les valeurs sont élevées puis elles diminuent fortement jusqu'à fin décembre. Enfin, nous observons une chute des valeurs de début à fin décembre.

Les fusions partielles du manteau neigeux provoquent une forte augmentation de la C.E. La fusion nivale printanière se caractérise par une forte augmentation de la C.E

suivie d'une forte diminution de la C.E. Les précipitations estivales se traduisent par une forte augmentation de la C.E. Les lacunes d'informations du 25 août au 9 décembre ne permettent pas d'observer l'influence des précipitations automnales sur l'évolution de la C.E.

Ainsi, nous constatons une faible corrélation entre la C.E et les changements saisonniers ainsi qu'une forte corrélation entre la C.E et les précipitations.

La température de l'eau est froide par rapport aux autres sources avec une moyenne de 6.07°C. Le minimum se produit le 8 avril avec 4.37°C (72 %) et le maximum a lieu le 24 août avec 9.44°C (155.5 %). L'écart type est de 1.29 et le coefficient de variation est important avec 21.3 %.

De janvier à mi-avril, la température diminue régulièrement et fortement puis de mi-avril à fin août, la température augmente régulièrement et très fortement. Les lacunes d'informations du 25 août au 9 décembre ne permettent pas d'observer l'évolution de la température. Début décembre, la température est légèrement supérieure à la moyenne puis elle diminue très rapidement jusqu'à fin décembre.

Les fusions partielles du manteau neigeux et la fusion nivale printanière se traduisent par une diminution de la température. Les précipitations estivales se manifestent par une forte augmentation de la température de l'eau. Les lacunes d'informations du 25 août au 9 décembre ne permettent pas d'observer l'influence des précipitations automnales sur l'évolution de la température.

Ainsi, nous constatons une forte corrélation entre la température de l'eau et les changements saisonniers ainsi qu'une forte corrélation entre la température de l'eau et les précipitations.

### La source des Moises 3

Les valeurs de la C.E sont modérées par rapport aux autres sources avec une moyenne de 406  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Le minimum se produit le 24 avril avec 366  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (90.1 %) et le maximum intervient le 8 avril avec 438  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (107.7 %). L'écart type est de 11.23 et le coefficient de variation est de 2.8 %.

Les valeurs de la C.E oscillent de manière fréquente mais avec une plus faible intensité qu'à Moises 2. Malgré les oscillations, nous observons de janvier à mars une légère augmentation de la C.E avec des valeurs comprises entre 405 et 421  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En avril, les valeurs augmentent rapidement puis elles chutent brutalement. Les lacunes d'informations du 25 avril au 24 juin, ne permettent pas d'observer l'évolution de la C.E. De fin juin à début décembre, les valeurs augmentent progressivement. En début décembre, les valeurs augmentent fortement puis elles diminuent progressivement jusqu'à fin décembre.

Les fusions partielles du manteau neigeux se traduisent par une augmentation de la C.E et la fusion nivale printanière provoque une augmentation de la C.E suivie d'une forte diminution. Les précipitations estivales se manifestent par une augmentation de la C.E tout comme les précipitations automnales.

Ainsi, nous constatons une corrélation moyenne entre la C.E et les changements saisonniers et une forte corrélation entre la C.E et les précipitations.

La température de l'eau est froide par rapport aux autres sources avec une moyenne de 6.28°C. Le minimum est atteint le 24 avril avec 5.2°C (82.8 %) et le maximum intervient le 26 août avec 6.89°C (109.7 %). L'écart type est de 0.3 et le coefficient de variation est de 4.8 %.

De janvier à début avril, la température diminue progressivement puis elle chute brutalement jusqu'à fin avril. Les lacunes d'informations du 25 avril au 24 juin, ne permettent pas d'observer l'évolution de la C.E. De fin juin à début septembre, les valeurs augmentent progressivement puis elles diminuent progressivement jusqu'à fin décembre.

Les fusions partielles du manteau neigeux, la fusion nivale printanière et les précipitations automnales se traduisent par une diminution de la température. Les précipitations estivales se manifestent par une augmentation de la température.

Ainsi, nous constatons une faible corrélation entre la température de l'eau et les changements saisonniers et une forte corrélation entre la température de l'eau et les précipitations.

### 4.1.3. Distribution de la fréquence de la conductivité électrique

#### 4.1.3.1. Objectifs

« *La courbe de distribution d'un paramètre géochimique d'échantillons d'eau, représentatifs des variations saisonnières au cours d'un cycle hydrologique, donne une image convenable du degré d'organisation des écoulements souterrains dans les aquifères carbonatés* » (Bakalowicz, 1979). La distribution des fréquences de minéralisation (ou de conductivité) est une méthode descriptive des variations hydrochimiques qui s'applique quasi systématiquement dans les études portant sur les exutoires des aquifères karstiques et plus généralement des systèmes carbonatés.

La méthode consiste à considérer la courbe des variations de la minéralisation au cours du cycle hydrologique comme la fonction aléatoire de la variable régionalisée « *minéralisation* ». La distribution de fréquence des valeurs de cette variable représente une loi de probabilité qui définit cette fonction aléatoire. La courbe obtenue permet d'une part, de mettre en évidence le fonctionnement des aquifères étudiés et d'autre part, de déterminer le degré de développement du système de drainage karstique en profondeur. Toutefois, ces interprétations n'ont de sens qu'à la condition que les échantillons (les mesures) soient suffisamment nombreux et répartis de manière homogène au cours du cycle hydrologique.

A partir de divers exemples connus et représentatifs d'un mode de fonctionnement particulier (fissurés, poreux, karstifiés, etc.), Bakalowicz (1979) a proposé une classification des systèmes carbonatés en fonction des distributions de fréquence de minéralisation. Les aquifères carbonatés fissurés et/ou poreux présenteront systématiquement une courbe de distribution unimodale et peu dispersée, traduisant

une chimie homogène au cours du cycle hydrologique. Les aquifères karstiques montreront des courbes de distribution plurimodales et très étalées, caractérisant une grande variabilité de la minéralisation au cours de l'année, due à un réseau de drainage karstique complexe et bien développé.

#### 4.1.3.2. Résultats

La Figure 58 présente les courbes de distribution des fréquences relatives des valeurs moyennes journalières de conductivité électrique des sources, en 2009. Nous observons :

- Des courbes de distribution unimodales avec un faible degré d'étalement à Epinguy et à Moises 1 ce qui traduit une chimie homogène et caractérise un fonctionnement de type fissuré
- Des courbes de distribution plurimodales avec un faible degré d'étalement aux Favrats, à Moises 3 et à Ramble ce qui traduit une chimie relativement homogène et caractériserait davantage un fonctionnement fissuré
- Des courbes de distribution plurimodales avec un fort degré d'étalement aux Arces, aux Granges Mamet, à Moises 2 et au Pont du Mouche ce qui traduit une chimie hétérogène et caractériserait davantage un fonctionnement karstique
- Une courbe de distribution très étalée et quasi plane au Col du Feu ce qui traduit une chimie hétérogène et caractérise un fonctionnement karstique

#### 4.1.4. Conclusions

Le Tableau 37 présente les principales observations réalisées à partir de l'étude des variations de la température et de la conductivité électrique. Les principales hypothèses concernant le fonctionnement des sources sont décrites dans les paragraphes suivants.

##### La source des Arces

Les valeurs de la conductivité électrique réagissent faiblement aux précipitations et fortement aux variations saisonnières. La température de l'eau est faiblement influencée par les variations saisonnières et par les précipitations. La courbe de distribution des fréquences relatives des valeurs moyennes journalières de conductivité électrique, est plurimodale et étalée. Au vu de l'ensemble de ces informations, l'hypothèse d'un système hydrogéologique fissuré avec un fort caractère capacitif comme formulée au paragraphe 3.2.4.4 est possible. Cependant et pour expliquer la forme de la courbe de distribution des fréquences relatives de la conductivité électrique, il convient d'émettre l'idée d'un contact du système hydrogéologique principal avec un autre système ayant une signature hydrochimique différente.

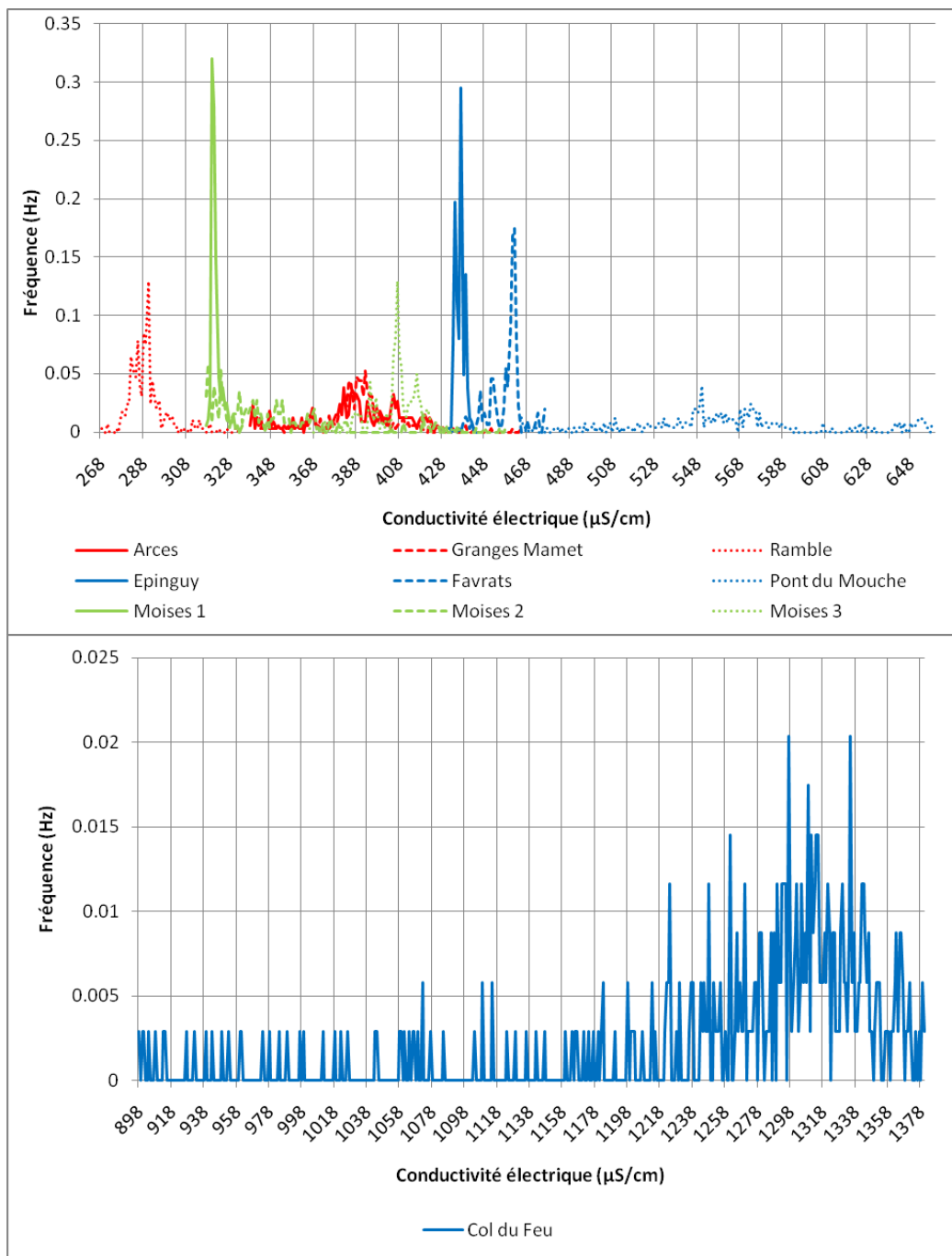


Figure 58 : Distribution des fréquences relatives des valeurs moyennes journalières de conductivité électrique des sources en 2009

La source du Col du Feu

La température de l'eau ne varie quasiment pas tout au long de l'année. Les valeurs de conductivité électrique réagissent fortement aux précipitations et sont faiblement influencées par les variations saisonnières. La courbe de distribution des fréquences relatives des valeurs moyennes journalières de conductivité électrique, est très étalée. Ces observations amènent à rejeter l'idée d'apports superficiels du fait de l'absence de variation significative de la température de l'eau.

Notre principale hypothèse pour expliquer ces observations consiste à affirmer que le système hydrogéologique du Col du Feu est de type karstique et qu'il se caractérise par des circulations profondes.

#### La source de l'Epinguy

La température de l'eau et les valeurs de la conductivité électrique sont faiblement influencées par les précipitations et par les variations saisonnières. La courbe de distribution des fréquences relatives des valeurs moyennes journalières de conductivité électrique, est unimodale et peu étalée. Pour rappel, l'hypothèse d'un système hydrogéologique de type fissuré avec un fort caractère capacitif avait été émise au paragraphe 3.2.4.4. Cette hypothèse nous semble cohérente avec les observations faites dans ce paragraphe.

#### La source des Favrats

Les événements pluvieux ont une forte influence sur la température de l'eau et les valeurs de la conductivité électrique. La température de l'eau et les valeurs de la conductivité électrique réagissent faiblement aux variations saisonnières. La courbe de distribution des fréquences relatives des valeurs moyennes journalières de conductivité électrique, est plurimodale et peu étalée. Pour rappel, l'hypothèse d'un système hydrogéologique de type fissuré transmissif avait été émise au paragraphe 3.2.4.4. Cette hypothèse nous semble cohérente avec les observations faites dans ce paragraphe.

#### La source des Granges Mamet

La température de l'eau et les valeurs de la conductivité électrique réagissent fortement aux événements pluvieux et aux variations saisonnières. La courbe de distribution des fréquences relatives des valeurs moyennes journalières de conductivité électrique, est plurimodale et étalée. Pour rappel, l'hypothèse d'un système hydrogéologique de type fissuré avec un fort caractère transmissif avait été émise au paragraphe 3.2.4.4. Cette hypothèse nous semble cohérente avec les observations faites dans ce paragraphe.

#### La source de Moises 1

La température de l'eau et les valeurs de la conductivité électrique réagissent très faiblement aux événements pluvieux et aux variations saisonnières. La courbe de distribution des fréquences relatives des valeurs moyennes journalières de conductivité électrique, est unimodale et peu étalée. Pour rappel, l'hypothèse d'un système hydrogéologique de type karstique avec un fort caractère capacitif avait été émise au paragraphe 3.2.4.4. Cette hypothèse nous semble cohérente avec les observations faites dans ce paragraphe.

#### La source de Moises 2

La température de l'eau et les valeurs de la conductivité électrique réagissent fortement aux événements pluvieux et aux variations saisonnières. La courbe de distribution des fréquences relatives des valeurs moyennes journalières de

conductivité électrique, est plurimodale et étalée. Pour rappel, l'hypothèse d'un système hydrogéologique de type karstique avec un fort caractère transmissif avait été émise au paragraphe 3.2.4.4. Cette hypothèse nous semble cohérente avec les observations faites dans ce paragraphe.

### La source de Moises 3

Les valeurs de la conductivité électrique réagissent fortement aux événements pluvieux et faiblement aux variations saisonnières. La température de l'eau est fortement influencée par les événements pluvieux et faiblement influencée par les variations saisonnières. La courbe de distribution des fréquences relatives des valeurs moyennes journalières de conductivité électrique, est plurimodale et peu étalée. Pour rappel, l'hypothèse d'un système hydrogéologique de type karstique avec un fort caractère transmissif avait été émise au paragraphe 3.2.4.4. Cette hypothèse nous semble cohérente avec les observations faites dans ce paragraphe.

### La source du Pont du Mouche

les précipitations influencent fortement les valeurs de conductivité électrique et de température. Nous supposons (du fait des lacunes d'informations du 5 juillet au 26 octobre) une forte influence des variations saisonnières sur les valeurs de conductivité électrique et de température. La courbe de distribution des fréquences relatives des valeurs moyennes journalières de conductivité électrique, est plurimodale et étalée. Pour rappel, l'hypothèse d'un système hydrogéologique de type fissuré avec un fort caractère transmissif avait été émise au paragraphe 3.2.4.4. Cette hypothèse nous semble cohérente avec les observations faites dans ce paragraphe.

	Variation de la conductivité électrique			Variation de la température	
	Pluie	Saisonnalité	Courbe de fréquence	Pluie	Saisonnalité
Arces	Faible	Forte	Plurimodale et étalée	Faible	Faible
Col du Feu	Forte	Faible	Plane et étalée	Faible	Faible
Epinguy	Faible	Faible	Unimodale et peu étalée	Faible	Faible
Favrats	Forte	Faible	Plurimodale et peu étalée	Forte	Faible
Granges Mamet	Forte	Forte	Plurimodale et étalée	Forte	Forte
Moises 1	Faible	Faible	Unimodale et peu étalée	Faible	Faible
Moises 2	Forte	Forte	Plurimodale et étalée	Forte	Forte
Moises 3	Forte	Faible	Plurimodale et peu étalée	Forte	Faible
Pont du Mouche	Forte	Forte ?	Plurimodale et étalée	Forte	Forte ?
Ramble	Faible	Faible	Unimodale et peu étalée	Faible	Faible

Tableau 37 : Principales hypothèses issues de l'étude des variations de température et de conductivité électrique des sources, en 2009

### La source de Ramble

La température de l'eau et les valeurs de la conductivité électrique réagissent faiblement aux événements pluvieux et aux variations saisonnières. La courbe de distribution des fréquences relatives des valeurs moyennes journalières de conductivité électrique, est unimodale et peu étalée. Pour rappel, l'hypothèse d'un système hydrogéologique de type fissuré avec un fort caractère capacitif avait été

émise au paragraphe 3.2.4.4. Cette hypothèse nous semble cohérente avec les observations faites dans ce paragraphe.

## 4.2. Etude de la balance ionique

Les résultats d'analyse provenant d'un laboratoire ne peuvent pas être utilisés avant de s'assurer de leur qualité et de leur fiabilité. La vérification de la balance ionique est un test simple qui permet de répondre à cet enjeu. Concrètement, il s'agit de vérifier si les solutions sont électriquement équilibrées et si la somme des charges positives est égale à la somme des charges négatives. L'écart relatif sert de critère principal pour l'évaluation de la qualité des résultats de l'analyse. Si le défaut de balance est égal ou excède 10 %, les analyses sont de mauvaise qualité et elles sont supprimées des interprétations. Si le défaut de balance est inférieur à 10 % alors les analyses sont globalement de bonne qualité et elles sont utilisées pour les interprétations.

Pour éviter des résultats « *arrangés* », les analyses de bicarbonates ont été réalisées par nos soins. A ce titre, nous remercions le laboratoire EDYTEM de l'Université de Chambéry pour la fourniture et la démonstration du protocole d'analyses.

L'étude de la balance ionique a été réalisée à partir du logiciel « *Diagramme* », développé par l'Université d'Hydrogéologie d'Avignon. Les résultats sont présentés sur le Tableau 38. Au total, 379 analyses ont été réalisées soit une moyenne d'environ 38 analyses par source. 23 analyses soit 6.07 %, ont été identifiées comme étant de mauvaise qualité ou ayant des balances ioniques égales ou supérieures à 10 %.

## 4.3. Etude des variations des paramètres du suivi hydrochimique (majeurs, mineurs et élément traces)

L'étude de l'évolution des paramètres chimiques (majeurs, mineurs et éléments traces) permet de :

- Mettre en évidence le comportement global des systèmes hydrogéologiques au cours de différentes périodes hydrologiques (crue et étiage) et de distinguer leur fonctionnement
- Caractériser les échanges fluides – roches et d'évaluer les phénomènes de mélange dans la zone d'émergence

### 4.3.1. Principales caractéristiques du suivi hydrochimique

Les principales caractéristiques du suivi des paramètres hydrochimiques sont résumées sur le Tableau 39. Les limites de quantification et les incertitudes de mesures estimées par le laboratoire d'analyses sont les suivantes :

- Pour les chlorures : la limite de quantification est de 2.5 mg/l et les incertitudes de mesures sont estimées à 10 %
- Pour les nitrates : la limite de quantification est de 1 mg/l et les incertitudes de mesures sont estimées à 8 %
- Pour les sulfates : la limite de quantification est de 2.5 mg/l et les incertitudes de mesures sont estimées à 10 %

Date	Arees	Coldu Feu	Epinguy	Favrats	Granges Marnet	Moises 1	Moises 2	Moises 3	Pontdu Mouche	Ramble
8/01/2009		-3	-7	-2					-4	
12/01/2009	-3				-3	-6	-11	-4		-7
22/01/2009		-2	-4	-12					1	
2/02/2009	2				0	-1	-9	-5		1
9/02/2009		-3	-9	0					1	
12/02/2009	-2				-2					0
16/02/2009						-8	-7	-5		
19/02/2009		-4	2	-4					1	
3/03/2009	-8					0	1	3		9
10/03/2009		1	3	2					-3	
16/03/2009	-8				-2					-4
17/03/2009						1	-4	-1		
24/03/2009		-1	-1	-2					-3	
30/03/2009	1				0	-6	0	0		-3
7/04/2009	6	-1	3	4	-8	0	1	1	1	0
8/04/2009	-2	-2	-6	1	-4	4	-3	2	1	-3
9/04/2009	-4	1	1	5	1	1	6	3	1	-5
10/04/2009	-3	-2	-5	-3	-2	-10	1	-2	1	-2
11/04/2009	1	-14	-3	1	-4	0	5	2	3	1
12/04/2009	2	8	-1	0	4	3	3	-2	-1	1
13/04/2009	0	-2	1	-4	5	4	4	-2	1	1
14/04/2009	2	-3	-3	-2	4	8	2	-2	2	-3
17/04/2009	6	-2	1	1	0	8	7	-2	4	7
21/04/2009	2	0	0	6	-2	5	-2	1	3	4
24/04/2009		0	6			11		9		
18/05/2009	1	4	6	-1	0	6	1	8	-1	3
2/06/2009	-5	-1	1	3	4	1	-3	4	-1	0
16/06/2009	-3	1	2	-2	-2	-4	-6	6	0	2
30/06/2009	8	2	12	18	8	1	3	13	6	7
7/07/2009	8	2	10	16	19	1	8	10	5	10
16/07/2009	4		8	11	14	-2	4	7	6	11
21/07/2009	1	2	-2	0	9	-3	-2	7	2	8
28/07/2009	-7	-3	-10	-2	1	0	-1	-4	-4	-2
6/08/2009	2	-3	0	6	3	2	1	4	1	5
13/08/2009	4	3	1	5	2	1	3	4	0	3
20/08/2009	4	1	3	5	3	3	1	5	-3	4
25/08/2009	4	1	1	5	3	2	3	5	1	4
1/09/2009	2	0	3	3	2	1	3	4	2	2
8/09/2009	1	1	4	2	1	0	2	1	-2	1
15/09/2009	0	0	1	0	0	-1	0	1	2	1
23/09/2009	3	-1	1	1	-4	1	-1	1	-3	-2
30/09/2009	3	-3	2	2	-1	-1	3	-3	3	2
13/10/2009	4	5	13	6	2	3	6	6	5	6
27/10/2009	2	2	4	4	1	1	2	-2	2	4
10/11/2009	3	0	3	5	5	2	5	3	-1	4
24/11/2009	7	5	8	7	5	3	11	10	-2	13
8/12/2009	3	-2	5	-3	4	10	10	6	-3	8

Tableau 38 : Résultats de l'étude de la balance ionique

- Pour la silice (dioxyde de silicium) : la limite de quantification est de 0.2 mg/l et les incertitudes de mesures sont estimées entre 15 et 20 %
- Pour le calcium : la limite de quantification est de 0.5 mg/l et les incertitudes de mesures sont estimées entre 15 et 20 %
- Pour le magnésium : la limite de quantification est de 0.1 mg/l et les incertitudes de mesures sont estimées entre 15 et 20 %
- Pour le potassium : la limite de quantification est de 0.5 mg/l et les incertitudes de mesures sont estimées entre 15 et 20 %
- Pour le sodium : la limite de quantification est de 0.25 mg/l et les incertitudes de mesures sont estimées entre 15 et 20 %
- Pour le strontium : la limite de quantification est de 0.01 mg/l et les incertitudes de mesures sont estimées entre 15 et 20 %
- Pour le manganèse : la limite de quantification est de 0.01 mg/l et les incertitudes de mesures sont estimées entre 15 et 20 %
- Pour le baryum : la limite de quantification est de 0.01 mg/l et les incertitudes de mesures sont estimées entre 15 et 20 %
- Pour le COT : la limite de quantification est de 0.5 mg/l et les incertitudes de mesures sont estimées entre 15 %

Certains paramètres ont été supprimés du suivi car les résultats obtenus sont pour la plupart en-dessous des limites de quantification. Il s'agit :

- Des chlorures, du potassium, du manganèse et du baryum, pour les sources des Arces, des Favrats, des Granges Mamet, des Moises 1, des Moises 2, des Moises 3 et de Ramble
- Des chlorures, du manganèse et du baryum, pour les sources du Col du Feu, de l'Epinguy et du Pont du Mouche

Période d'observation	Du 1 <sup>er</sup> janvier 2009 au 31 décembre 2009
Paramètres pris en compte	Mesure en continu du débit, de la conductivité électrique et de la température Analyses suivant périodicité des paramètres suivants : bicarbonates, chlorures, nitrates, sulfates, silice (dioxyde de silicium), calcium, magnésium, potassium, sodium, strontium, manganèse, baryum
Périodicité	Cf. 2.1.3
Nombre d'analyses	bicarbonates : 361 / chlorures : 317 / nitrates : 361 / sulfates : 361 / silice : 361 / calcium : 361 / magnésium : 361 / potassium : 331 / sodium : 361 / strontium : 361 / manganèse : 317 / baryum : 317 / COT : 361 / pH : 352 / Oxygène dissous : 352

Tableau 39 : Principales caractéristiques du suivi chimique

La mesure du pH et de l'oxygène dissous, a été réalisée à l'aide d'un multi 340i provenant de l'entreprise WTW. Les sondes de pH SenTix 41-3) et d'oxygène dissous (CellOx 325) ont été étalonnées mensuellement avec les solutions tampons fournies par le fabricant.

#### 4.3.2. Etude des paramètres majeurs

Dans ce paragraphe, l'évolution des cations (calcium, magnésium, sodium et potassium) et des anions (sulfates, nitrates, et bicarbonates) est présentée. Le faciès chimique des sources est caractérisé par la réalisation d'un diagramme de Piper.

Les phénomènes de mélange sont évalués qualitativement par l'étude des relations sulfates/calcium, bicarbonates/calcium et magnésium/calcium.

#### 4.3.2.1. Valeurs observées

##### Les sources d'Orcier et du Col du Feu

La Figure 59, la Figure 60, la Figure 61 et la Figure 62, présentent l'évolution des cations et des anions des analyses réalisées en 2009 aux sources d'Orcier et du Col du Feu et selon les périodicités détaillées dans le paragraphe 2.1.3. Les informations apportées par les chroniques sont les suivantes.

Le calcium est le cation le plus abondant. Nous observons des concentrations moyennes de :

- 236 mg/l au Col du Feu. La valeur la plus forte est de 273 mg/l, le 24 novembre. La valeur la plus faible est de 195 mg/l, le 8 décembre. Le coefficient de variation (rapport en %, entre l'écart-type et la moyenne) est de 7 %
- 81.4 mg/l à l'Epinguy. La valeur la plus forte est de 91.7 mg/l, le 24 novembre. La valeur la plus faible est de 74.4 mg/l, le 8 avril. Le coefficient de variation est de 4.2 %
- 74.1 mg/l aux Favrats. La valeur la plus forte est de 81.8 mg/l, le 24 novembre. La valeur la plus faible est de 65.7 mg/l, le 8 décembre. Le coefficient de variation est de l'ordre de 4.6 %
- 86.6 mg/l au Pont du Mouche. La valeur la plus forte est de 116 mg/l, le 10 novembre. La valeur la plus faible est de 72.3 mg/l, le 21 avril. Le coefficient de variation est de 12.2 %

Les bicarbonates sont les anions les plus présents sauf au Col du Feu où les ions sulfates sont plus abondants. Dans le détail, nous observons pour les bicarbonates des concentrations moyennes de :

- 246 mg/l au Col du Feu. La valeur la plus forte est de 297.7 mg/l, le 8 janvier. La valeur la plus faible est de 202.5 mg/l, le 7 juillet. Le coefficient de variation est de 8.1 %
- 277.5 mg/l à l'Epinguy. La valeur la plus forte est de 317.2 mg/l, le 8 janvier. La valeur la plus faible est de 231.8 mg/l, le 16 juillet. Le coefficient de variation est de 6.2 %
- 248.3 mg/l aux Favrats. La valeur la plus forte est de 279.4 mg/l, le 19 février. La valeur la plus faible est de 207.4 mg/l, le 21 avril. Le coefficient de variation est de 6 %
- 241.6 mg/l au Pont du Mouche. La valeur la plus forte est de 273 mg/l, le 24 mars. La valeur la plus faible est de 192 mg/l, le 16 juillet. Le coefficient de variation est de l'ordre de 7.9 %

Pour le magnésium, nous observons en moyenne des valeurs :

- Très élevées au Col du Feu (50.9 mg/l). La valeur la plus forte est de 61.2 mg/l, le 13 octobre. La valeur la plus faible est de 43.9 mg/l, le 21 avril. Le coefficient de variation est de 8.3 %

- Elevées au Pont du Mouche (20.1 mg/l). La valeur la plus forte est de 26.5 mg/l, le 10 novembre. La valeur la plus faible est de 13.5 mg/l, le 12 avril. Le coefficient de variation est de l'ordre de 19.8 %
- Faibles aux Favrats (8.7 mg/l). La valeur la plus forte est de 9.7 mg/l, le 13 octobre. La valeur la plus faible est de 7.7 mg/l, le 21 avril. Le coefficient de variation est de 6.7 %
- Faibles à l'Epinguy (7.9 mg/l). La valeur la plus forte est de 8.8 mg/l, le 8 janvier. La valeur la plus faible est de 2.64 mg/l, le 9 février. Le coefficient de variation est de 12.5 %

Pour le potassium, nous observons des concentrations moyennes de :

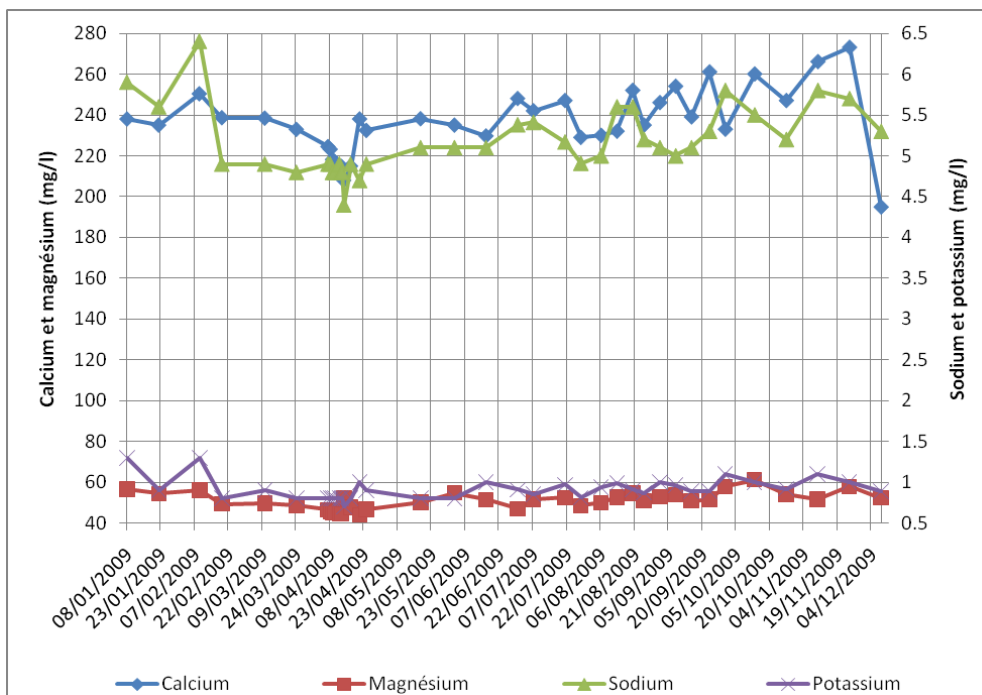
- 0.9 mg/l au Col du Feu. La valeur la plus forte est de 1.3 mg/l, le 9 février. La valeur la plus faible est de 0.7 mg/l, le 14 avril. Le coefficient de variation est de 14.3 %
- 1.4 mg/l à l'Epinguy. La valeur la plus forte est de 1.9 mg/l, le 8 janvier. La valeur la plus faible est en-dessous des limites de quantification du laboratoire (inférieure à 0.5 mg/l), le 8 avril. Le coefficient de variation est de 12.1 %

Les valeurs en nitrates sont faibles avec une concentration moyenne de l'ordre de :

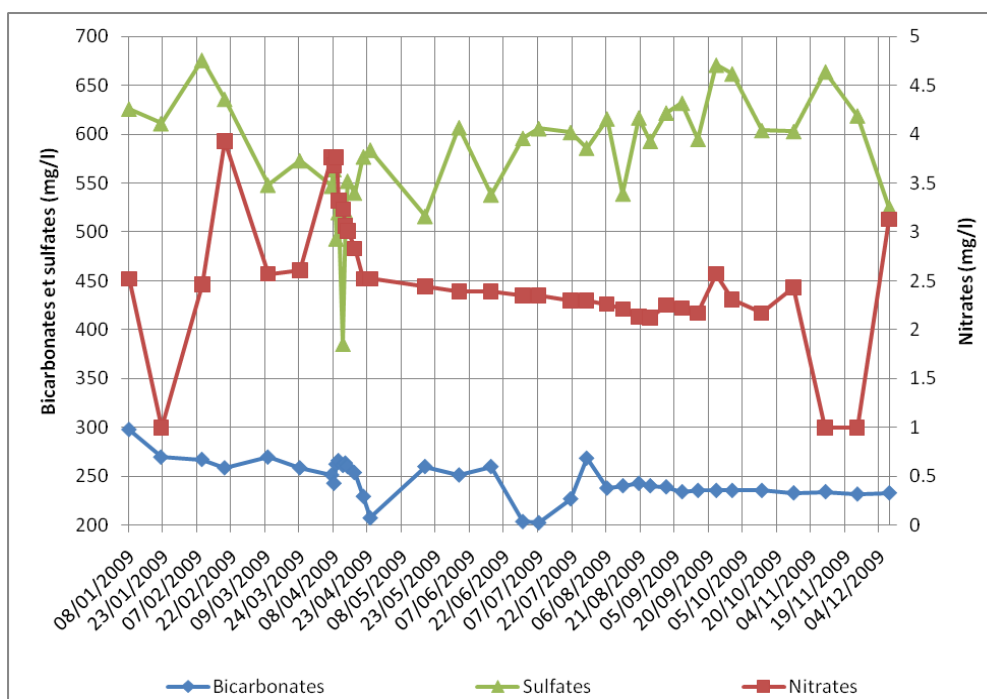
- De 2.7 mg/l au Col du Feu. Le minimum observé est inférieur au seuil de quantification du laboratoire, à savoir 1 mg/l, le 22 janvier. Le maximum observé est de 3.9 mg/l le 19 février. Le coefficient de variation est de 19.8 %
- De 5 mg/l à l'Epinguy. Le minimum observé est de 4.5 mg/l, le 8 décembre et le maximum observé est de 5.6 mg/l le 19 février. Le coefficient de variation est de 5.1 %
- De 5.5 mg/l aux Favrats. Le minimum observé est de 4.4 mg/l, le 21 avril et le maximum observé est de 7.7 mg/l le 8 décembre. Le coefficient de variation est de 9.7 %
- De 7.6 mg/l au Pont du Mouche. Le minimum observé est de 6 mg/l, le 13 octobre et le maximum observé est de 10.9 mg/l le 8 décembre. Le coefficient de variation est de 14.8 %

Les valeurs en sodium sont variées. Elles sont en moyenne :

- Elevées au Col du Feu avec 5.2 mg/l. Le minimum observé est de 4.4 mg/l, le 14 avril. Le maximum observé est de 6.4 mg/l le 9 février. Le coefficient de variation est de 7.9 %
- Moyennes au Pont du Mouche avec 3.3 mg/l. Le minimum observé est de 2.1 mg/l, le 12 avril et le maximum observé est de 4.6 mg/l le 10 novembre. Le coefficient de variation est de 22.9 %
- Faibles aux Favrats avec 1.7 mg/l. Le minimum observé est de 1.4 mg/l, le 10 avril et le maximum observé est de 2.1 mg/l le 30 septembre. Le coefficient de variation est de 10.5 %
- Faibles à l'Epinguy avec 1.3 mg/l. Le minimum observé est de 1 mg/l, le 6 août et le maximum observé est de 1.6 mg/l le 9 février. Le coefficient de variation est de l'ordre de 9.8 %



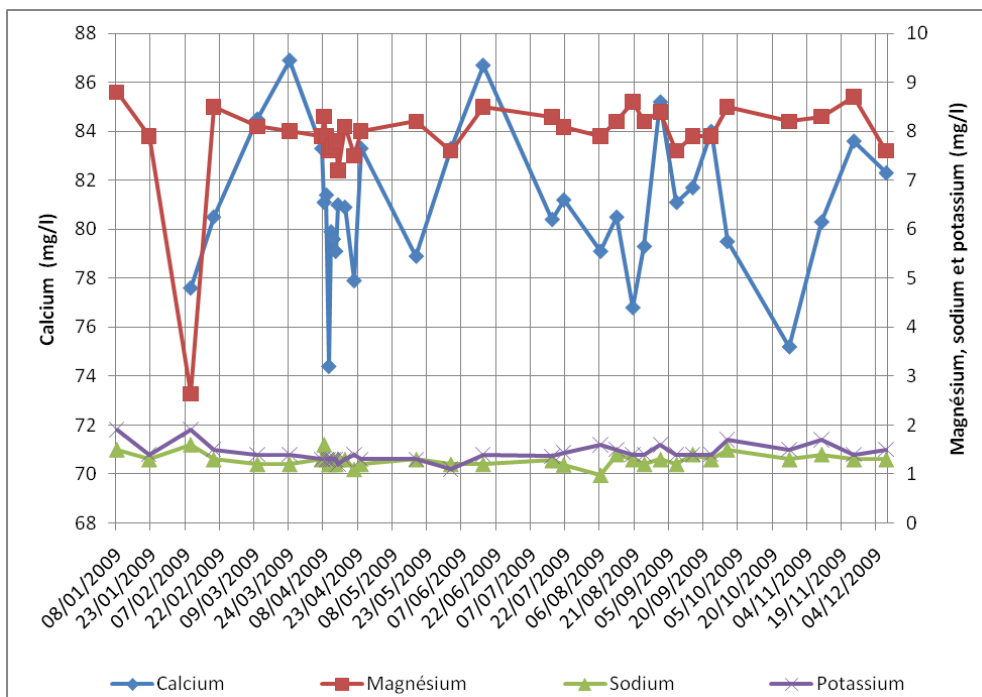
N=36	Moyenne	Ecart type	Médiane	C. Var.	Max	Date	Min	Date
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	235.94	16.51	235	7%	273	24/11/2009	195	08/12/2009
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	50.93	4.21	51.4	8.3%	61.2	13/10/2009	43.9	21/04/2009
Na <sup>+</sup> (mg/l)	5.19	0.41	5.1	7.9%	6.4	09/02/2009	4.4	14/04/2009
K <sup>+</sup> (mg/l)	0.91	0.13	0.9	14.3%	1.3	09/02/2009	0.7	14/04/2009



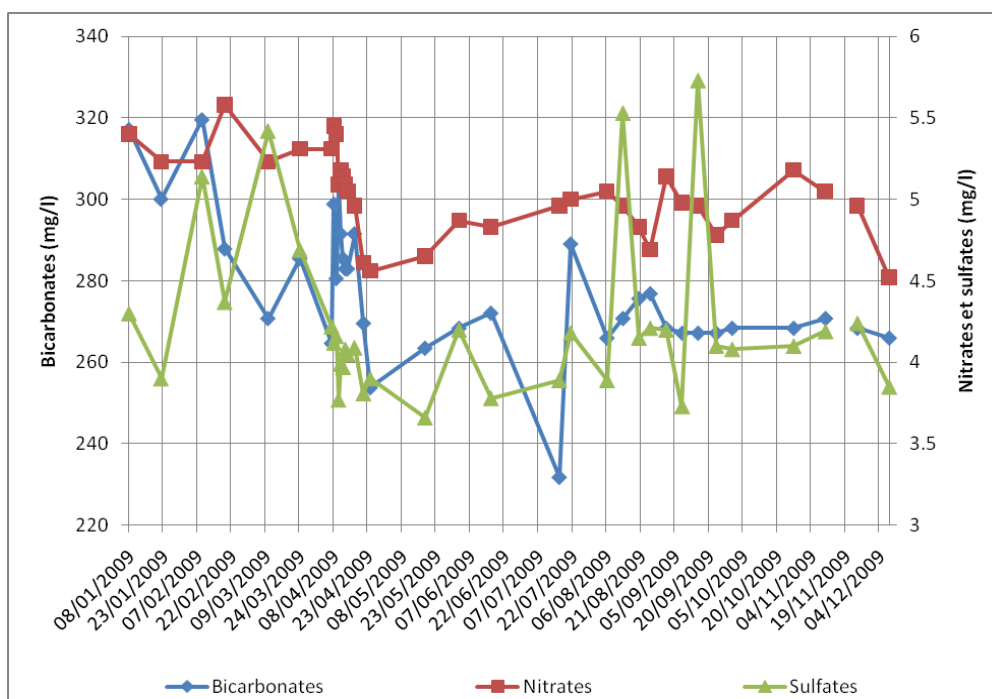
N = 38	Moyenne	Ecart type	Médiane	C. Var.	Max	Date	Min	Date
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	245.95	19.88	242.80	8.1%	297.7	08/01/2009	202.5	07/07/2009
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	2.66	0.52	2.45	19.8%	3.93	19/02/2009	<1	22/01/2009
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	582.86	57.15	595.00	9.8%	676	09/02/2009	385	12/04/2009

Figure 59 : Evolution des concentrations en cations et en anions de l'eau de la source du Col du Feu du 08.01.09 au 08.12.09.

N : taille de l'échantillon ; C. Var. : Coefficient de variation ; Max : maximum ; Min : minimum



N = 35	Moyenne	Ecart type	Médiane	C. Var.	Max	Date	Min	Date
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	81.38	3.45	81.00	4.2 %	91.7	24/11/2009	74.4	08/04/2009
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	7.89	0.99	8.00	12.5 %	8.8	08/01/2009	2.64	09/02/2009
Na <sup>+</sup> (mg/l)	1.29	0.13	1.30	9.8 %	1.6	09/02/2009	0.98	06/08/2009
K <sup>+</sup> (mg/l)	1.43	0.17	1.40	12.1 %	1.9	08/01/2009	<0.5	08/04/2009



N = 35	Moyenne	Ecart type	Médiane	C. Var.	Max	Date	Min	Date
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	277.53	17.22	270.80	6.2 %	317.2	08/01/2009	231.8	16/07/2009
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	5.03	0.26	5.05	5.1 %	5.58	19/02/2009	4.52	08/12/2009
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	4.22	0.50	4.10	11.8 %	5.73	15/09/2009	3.66	18/05/2009

Figure 60 : Evolution des concentrations en cations et en anions de l'eau de la source de l'Epinguy du 08.01.09 au 08.12.09.

N : taille de l'échantillon ; C. Var. : Coefficient de variation ; Max : maximum ; Min : minimum

Les valeurs en sulfates sont variées. Elles sont en moyenne :

- Très élevées au Col du Feu avec 582.86 mg/l. Le minimum observé est de 385 mg/l, le 12 avril et le maximum observé est de 676 mg/l le 9 février. Le coefficient de variation est de 9.8 %
- Elevées au Pont du Mouche avec 101.01 mg/l. Le minimum observé est de 41.4 mg/l, le 12 avril et le maximum observé est de 206 mg/l le 10 novembre. Le coefficient de variation est de 41.5 %
- Faibles aux Favrats avec 10.34 mg/l. Le minimum observé est de 9.51 mg/l, le 21 avril et le maximum observé est de 14.3 mg/l le 8 décembre. Le coefficient de variation est de 7.7 %
- Très faibles à l'Epinguy avec 4.22 mg/l. Le minimum observé est de 3.66 mg/l, le 18 avril et le maximum observé est de 5.73 mg/l le 15 septembre. Le coefficient de variation est de 11.8 %

### Les sources d'Habère-Poche

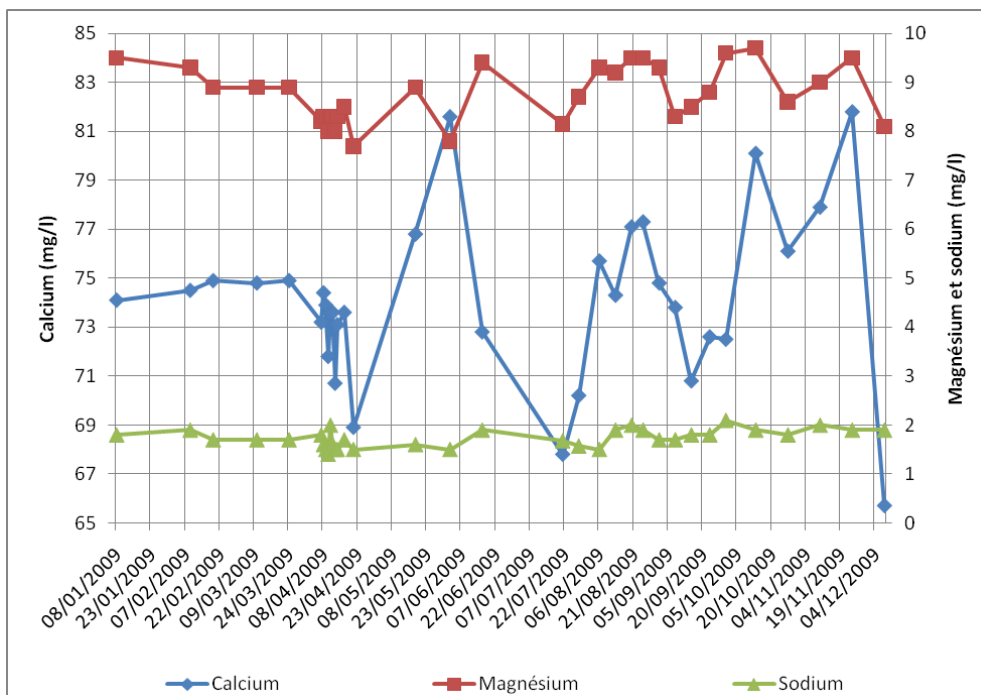
La Figure 63, la Figure 64 et la Figure 65 présentent les résultats des analyses chimiques en cations et en anions réalisées en 2009 aux sources d'Habère-Poche et selon les périodicités détaillées dans le paragraphe 2.1.3. Les informations apportées par les chroniques sont les suivantes.

Le calcium est le cation le plus abondant. Nous observons des concentrations moyennes de :

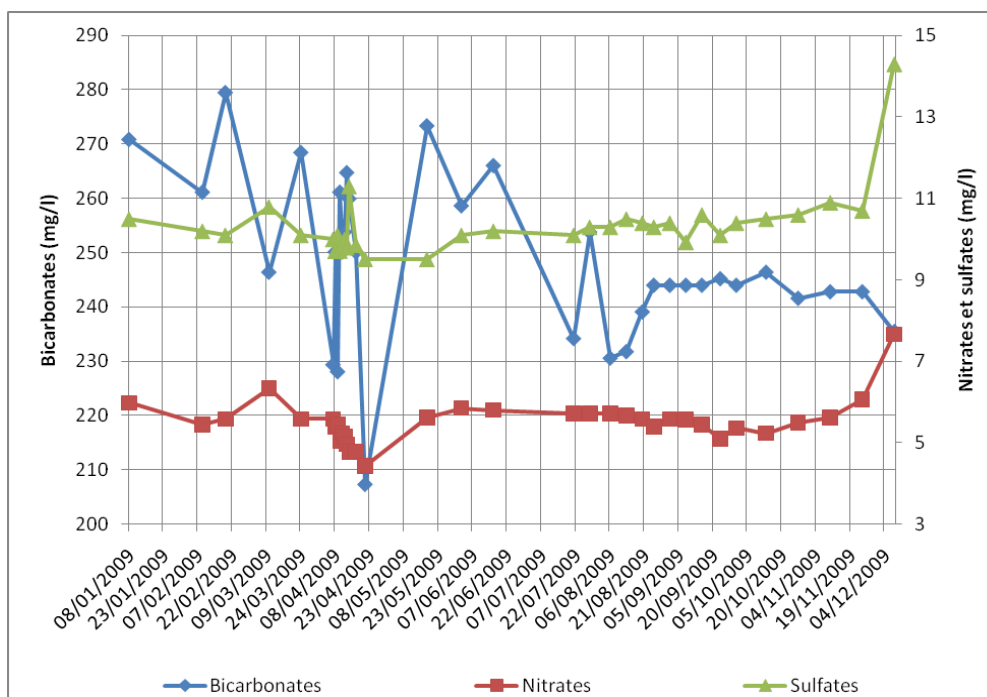
- 60 mg/l aux Arces. Le minimum observé est de 52 mg/l, le 21 avril et le maximum observé est de 70.5 mg/l le 24 novembre. Le coefficient de variation est de 4.8 %
- 71 mg/l aux Granges Mamet. Le minimum observé est de 58.9 mg/l, le 21 avril et le maximum observé est de 82.1 mg/l le 24 novembre. Le coefficient de variation est de 7.6 %
- 53.2 mg/l à Ramble. Le minimum observé est de 49.6 mg/l, le 21 avril et le maximum observé est de 60.5 mg/l le 3 mars. Le coefficient de variation est de 4.8 %

Les bicarbonates sont les anions les plus présents. Nous observons des concentrations moyennes de :

- 198.3 mg/l aux Arces. Le minimum observé est de 162.3 mg/l, le 7 juillet et le maximum observé est de 245.2 mg/l le 12 février. Le coefficient de variation est de 8.4 %
- 235.6 mg/l aux Granges Mamet. Le minimum observé est de 196.4 mg/l, le 13 avril et le maximum observé est de 269.6 mg/l le 12 janvier. Le coefficient de variation est de 8.2 %
- 173.6 mg/l à Ramble. Le minimum observé est de 151.3 mg/l, le 21 avril et le maximum observé est de 203.7 mg/l le 12 janvier. Le coefficient de variation est de 7 %



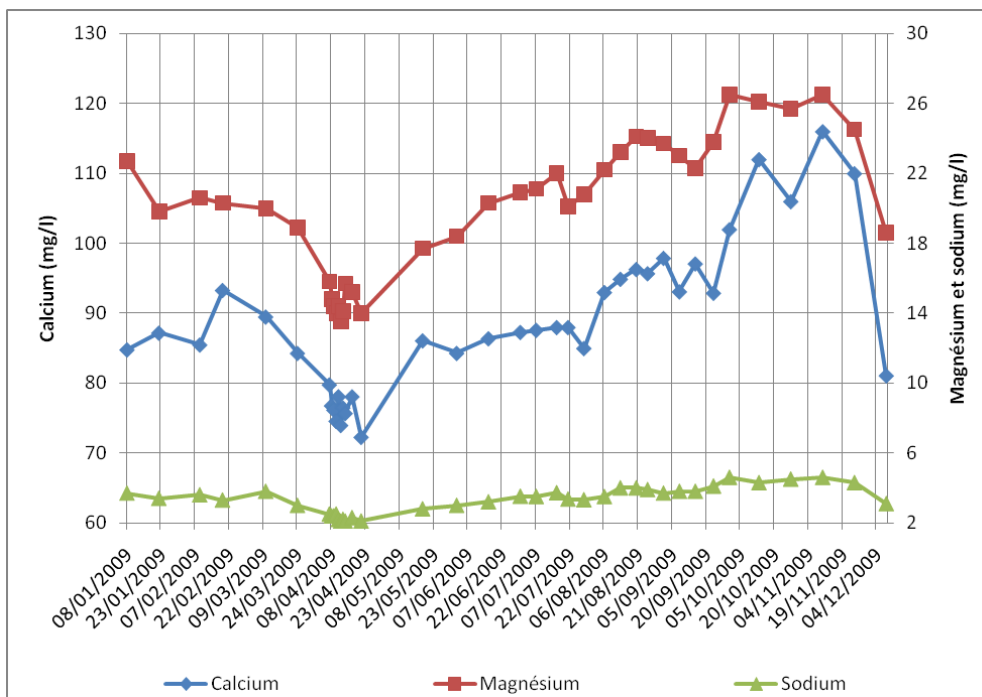
N=34	Moyenne	Ecart type	Médiane	C. Var.	Max	Date	Min	Date
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	74.11	3.44	74.00	4.6 %	81.8	24/11/2009	65.7	08/12/2009
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	8.74	0.58	8.75	6.7 %	9.7	13/10/2009	7.7	21/04/2009
Na <sup>+</sup> (mg/l)	1.74	0.18	1.70	10.5 %	2.1	30/09/2009	1.4	10/04/2009



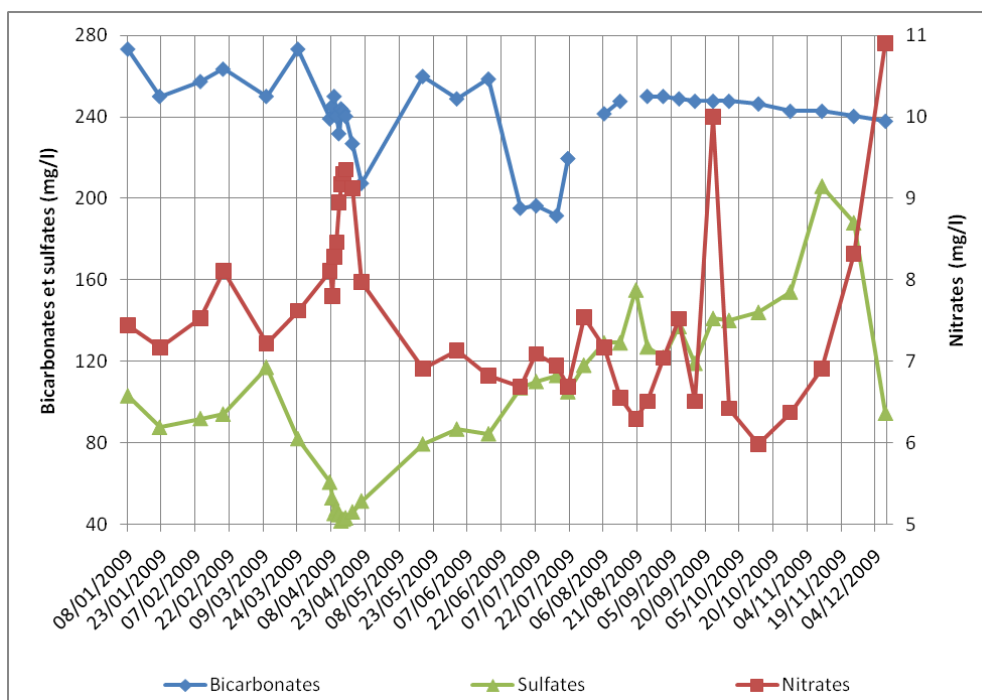
N=34	Moyenne	Ecart type	Médiane	C. Var.	Max	Date	Min	Date
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	248.31	14.98	245.80	6 %	279.4	19/02/2009	207.4	21/04/2009
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	5.53	0.54	5.57	9.7 %	7.66	08/12/2009	4.43	21/04/2009
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	10.34	0.80	10.20	7.7 %	14.3	08/12/2009	9.51	21/04/2009

Figure 61 : Evolution des concentrations en cations et en anions de l'eau de la source des Favrats du 08.01.09 au 08.12.09.

N : taille de l'échantillon ; C. Var. : Coefficient de variation ; Max : maximum ; Min : minimum



N=38	Moyenne	Ecart type	Médiane	C. Var.	Max	Date	Min	Date
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	88.62	10.85	87.25	12.2%	116	10/11/2009	72.3	21/04/2009
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	20.10	3.99	20.45	19.8%	26.5	10/11/2009	13.5	12/04/2009
Na <sup>+</sup> (mg/l)	3.32	0.76	3.45	22.9%	4.6	10/11/2009	2.1	12/04/2009



N=38	Moyenne	Ecart type	Médiane	C. Var.	Max	Date	Min	Date
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	241.59	19.07	245.80	7.9%	273	24/03/2009	192	16/07/2009
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	7.63	1.13	7.33	14.8%	10.9	08/12/2009	5.98	13/10/2009
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	101.01	41.94	104.00	41.5%	206	10/11/2009	41.4	12/04/2009

Figure 62 : Evolution des concentrations en cations et en anions de l'eau de la source du Pont du Mouche du 08.01.09 au 08.12.09.

N : taille de l'échantillon ; C. Var. : Coefficient de variation ; Max : maximum ; Min : minimum

Les teneurs en magnésium sont variées. Elles sont :

- Moyennes aux Arces avec une concentration moyenne de 11.2 mg/l. Le minimum observé est de 8.2 mg/l, le 21 avril et le maximum observé est de 13.8 mg/l le 30 septembre. Le coefficient de variation est de 8.2 %
- Faibles aux Granges Mamet avec une concentration moyenne de 5.8 mg/l. Le minimum observé est de 4 mg/l, le 7 avril et le maximum observé est de 7.6 mg/l le 25 août. Le coefficient de variation est de 18.3 %
- Très faibles à Ramble avec une concentration moyenne de 4.6 mg/l. Le minimum observé est de 4.2 mg/l, le 16 mars et le maximum observé est de 6.4 mg/l le 3 mars. Le coefficient de variation est de 8.2 %

Les concentrations en nitrates sont faibles. Nous observons des concentrations moyennes de :

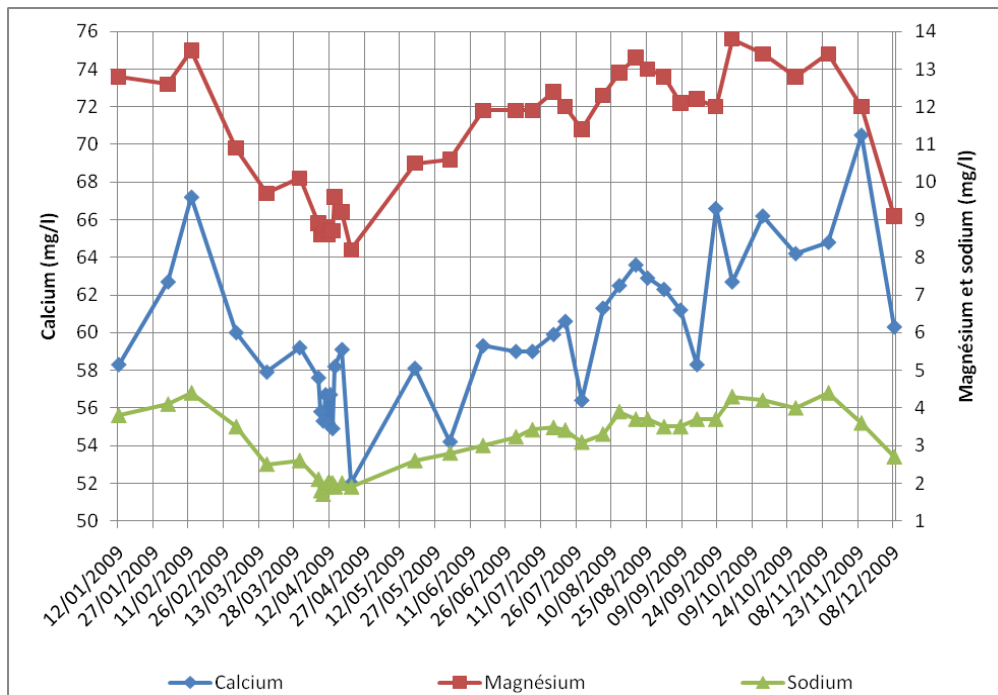
- 3.9 mg/l aux Arces. Le minimum observé est de 3.3 mg/l, le 13 octobre et le maximum observé est de 4.8 mg/l le 16 mars. Le coefficient de variation est de 8.2 %
- 1.8 mg/l aux Granges Mamet. Le minimum observé est de 1.3 mg/l, le 30 juin et le maximum observé est de 3.5 mg/l le 25 août. Le coefficient de variation est de 29.4 %
- 2 mg/l à Ramble. Le minimum observé est de 1.6 mg/l, le 23 septembre et le maximum observé est de 2.6 mg/l le 16 mars. Le coefficient de variation est de 10 %

Les valeurs en sodium sont variées. Les concentrations moyennes sont :

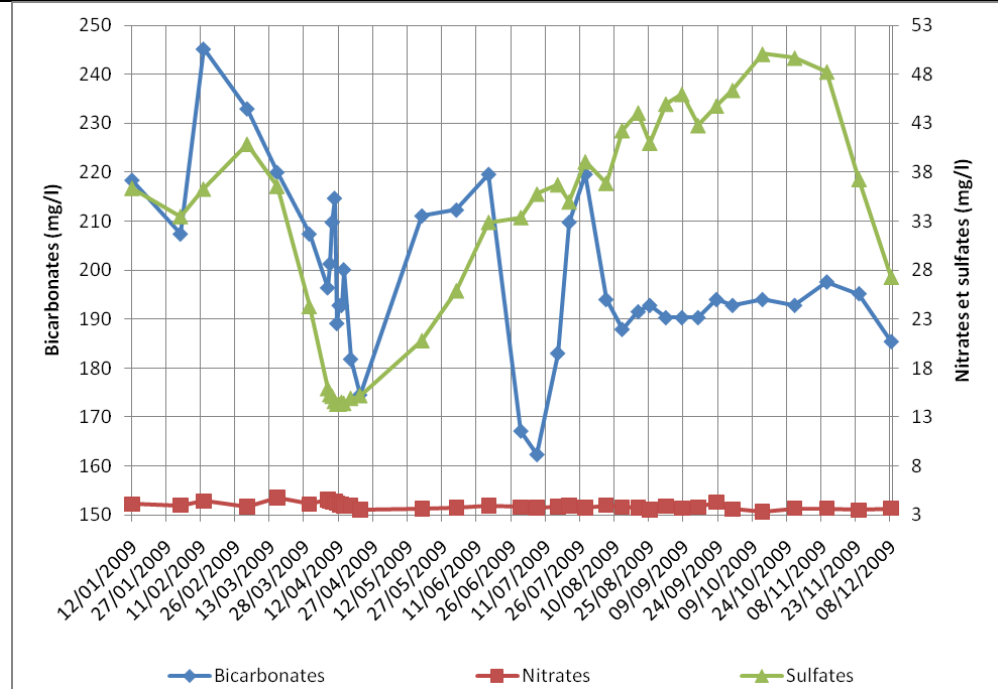
- Moyennes aux Arces avec 3.1 mg/l. Le minimum observé est de 1.7 mg/l, le 9 avril. Le maximum observé est de 4.4 mg/l le 10 novembre. Le coefficient de variation est de 25.1 %
- Très faibles aux Granges Mamet avec 0.8 mg/l. Le minimum observé est de 0.4 mg/l, le 6 août et le maximum observé est de 2 mg/l le 7 avril. Le coefficient de variation est de 31.3 %
- Très faibles à Ramble avec 0.9 mg/l. Le minimum observé est de 0.5 mg/l, le 6 août et le maximum observé est de 1.9 mg/l le 3 mars. Le coefficient de variation est de 25.1 %

Les concentrations en sulfates sont variées. Elles sont en moyenne :

- Elevées aux Arces avec 32.5 mg/l. Le minimum observé est de 14.3 mg/l, le 11 avril et le maximum observé est de 50.1 mg/l le 13 octobre. Le coefficient de variation est de 37.4 %
- Faibles à Ramble avec 5.1 mg/l. Le minimum observé est de 3.8 mg/l, le 8 décembre et le maximum observé est de 6.8 mg/l le 30 septembre. Le coefficient de variation est de 10.9 %
- Très faibles aux Granges Mamet avec 4.4 mg/l. Le minimum observé est de 2.7 mg/l, le 10 avril et le maximum observé est de 5.9 mg/l le 20 août. Le coefficient de variation est de 23.6 %



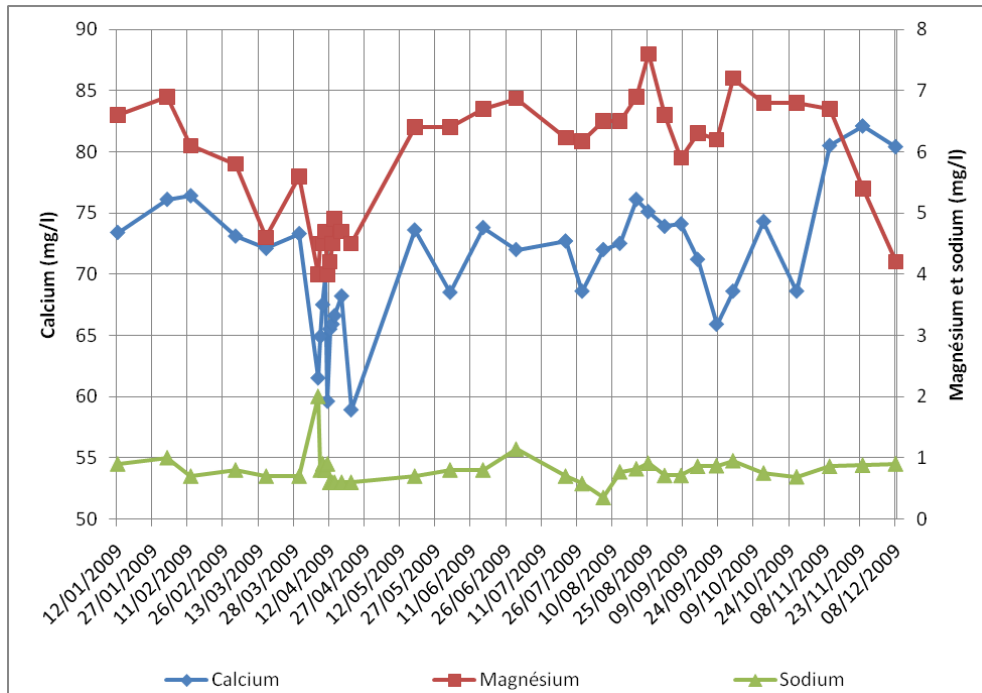
N=38	Moyenne	Ecart type	Médiane	C. Var.	Max	Date	Min	Date
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	60.02	3.97	59.25	6.6%	70.5	24/11/2009	52	21/04/2009
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	11.19	1.79	11.90	16%	13.8	30/09/2009	8.2	21/04/2009
Na <sup>+</sup> (mg/l)	3.09	0.85	3.36	27.4%	4.4	10/11/2009	1.7	09/04/2009



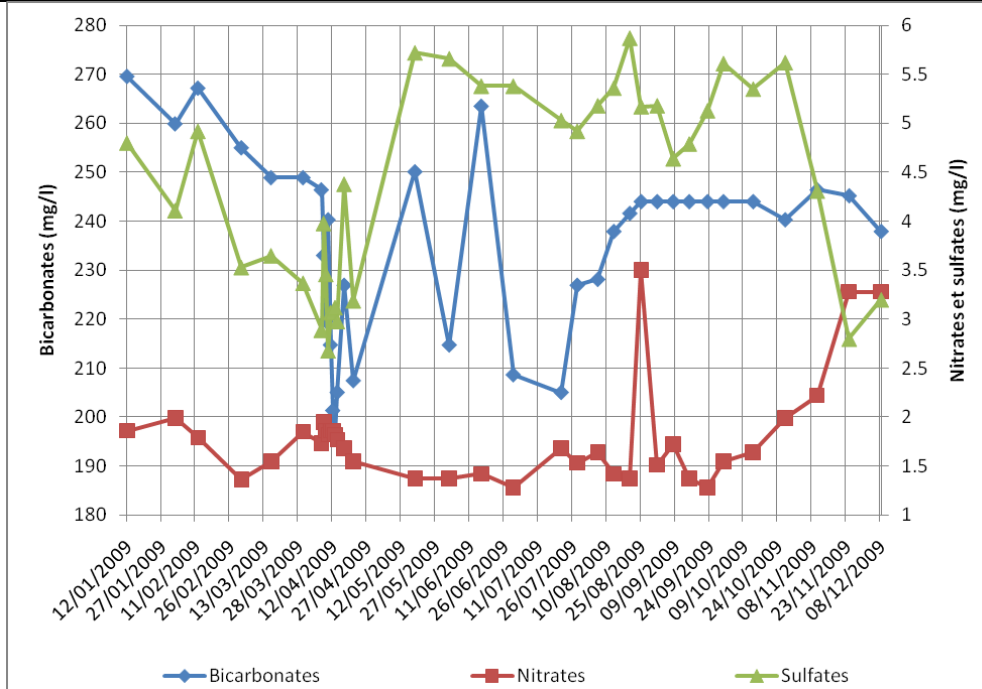
N=38	Moyenne	Ecart type	Médiane	C. Var.	Max	Date	Min	Date
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	198.34	16.62	194.00	8.4%	245.2	12/02/2009	162.3	07/07/2009
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	3.93	0.32	3.88	8.2%	4.78	16/03/2009	3.32	13/10/2009
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	32.49	12.14	36.30	37.4%	50.1	13/10/2009	14.3	11/04/2009

Figure 63 : Evolution des concentrations en cations et en anions de l'eau de la source des Arces du 12.01.09 au 08.12.09.

N : taille de l'échantillon ; C. Var. : Coefficient de variation ; Max : maximum ; Min : minimum



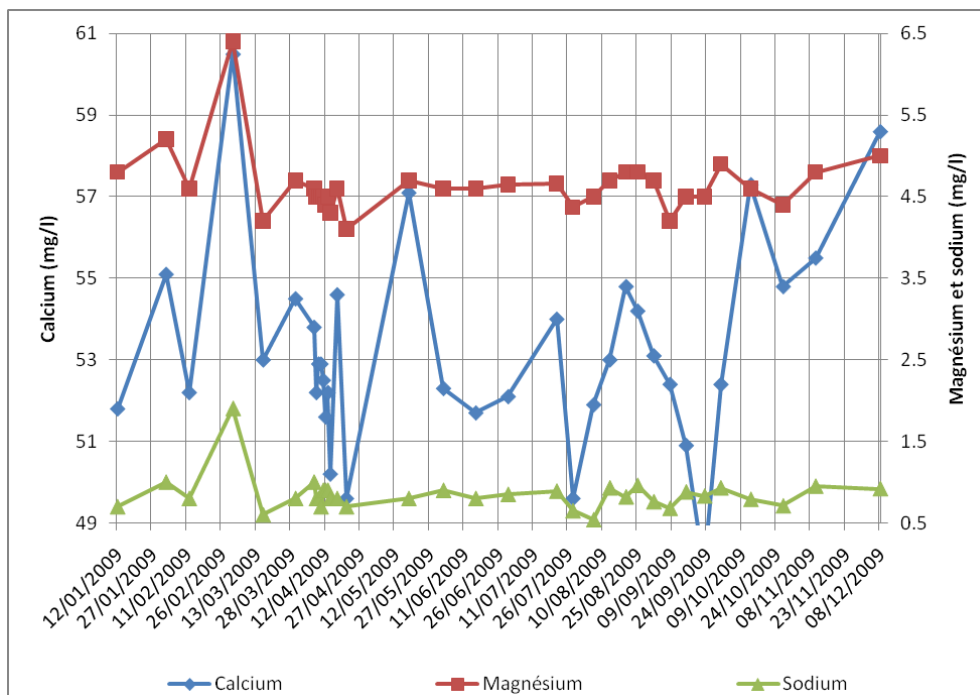
N=36	Moyenne	Ecart type	Médiane	C. Var.	Max	Date	Min	Date
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	71.04	5.39	72.05	7.6%	82.1	24/11/2009	58.9	21/04/2009
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	5.79	1.06	6.19	18.3%	7.6	25/08/2009	4	07/04/2009
Na <sup>+</sup> (mg/l)	0.80	0.25	0.80	31.3%	2	07/04/2009	0.35	06/08/2009



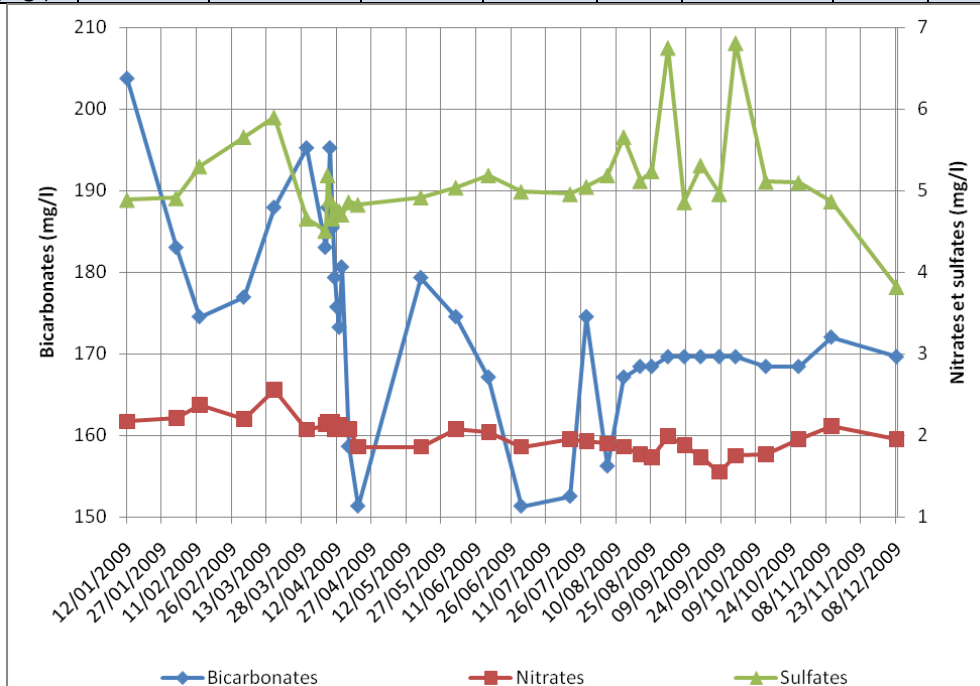
N=36	Moyenne	Ecart type	Médiane	C. Var.	Max	Date	Min	Date
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	235.59	19.29	241.60	8.2%	269.6	12/01/2009	196.4	13/04/2009
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	1.80	0.53	1.70	29.4%	3.5	25/08/2009	1.28	30/06/2009
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	4.38	1.03	4.72	23.6%	5.87	20/08/2009	2.68	10/04/2009

Figure 64 : Evolution des concentrations en cations et en anions de l'eau de la source des Granges Mamet du 12.01.09 au 08.12.09.

N : taille de l'échantillon ; C. Var. : Coefficient de variation ; Max : maximum ; Min : minimum



N=35	Moyenne	Ecart type	Médiane	C. Var.	Max	Date	Min	Date
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	53.23	2.53	52.90	4.8 %	60.5	03/03/2009	49.6	21/04/2009
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	4.64	0.38	4.60	8.2 %	6.4	03/03/2009	4.2	16/03/2009
Na <sup>+</sup> (mg/l)	0.85	0.21	0.80	25.1 %	1.9	03/03/2009	0.54	06/08/2009



N=35	Moyenne	Ecart type	Médiane	C. Var.	Max	Date	Min	Date
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	173.63	12.07	172.00	7 %	203.7	12/01/2009	151.3	21/04/2009
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	2.01	0.20	2.04	10 %	2.56	16/03/2009	1.55	23/09/2009
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	5.09	0.55	4.96	10.9 %	6.81	30/09/2009	3.82	08/12/2009

Figure 65 : Evolution des concentrations en cations et en anions de l'eau de la source de Ramble du 12.01.09 au 08.12.09.

N : taille de l'échantillon ; C. Var. : Coefficient de variation ; Max : maximum ; Min : minimum

### Les sources des Moises

La Figure 66, la Figure 67 et la Figure 68, présentent les résultats des analyses chimiques en cations et en anions réalisées en 2009 aux sources des Moises et selon les périodicités détaillées dans le paragraphe 2.1.3. Les informations apportées par les chroniques sont les suivantes.

Le calcium est le cation le plus abondant. Nous observons des concentrations moyennes de :

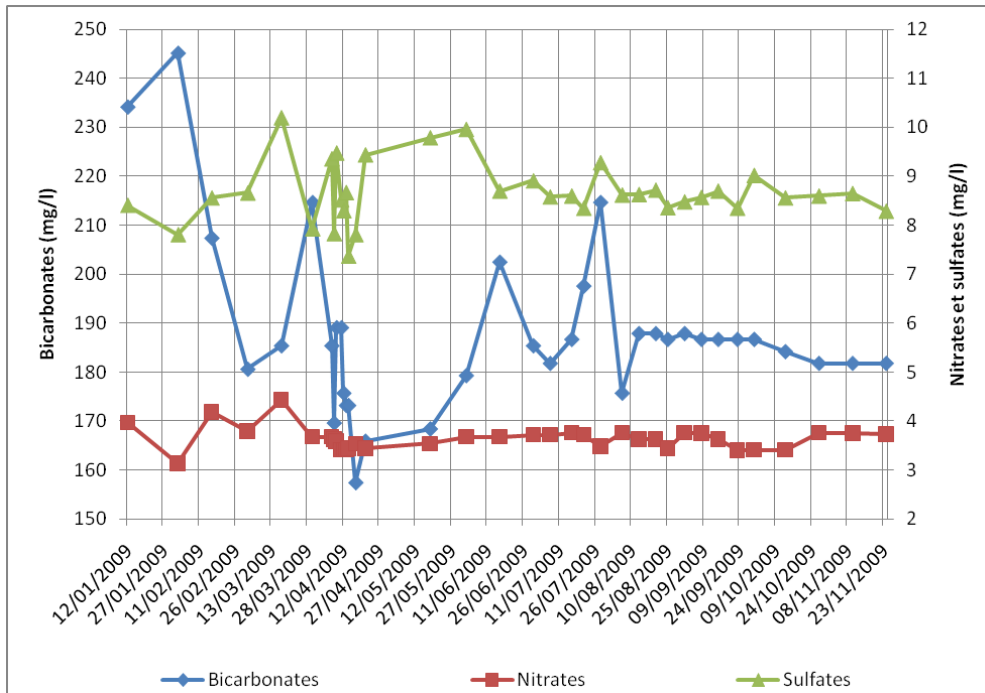
- 49.8 mg/l à Moises 1. Le minimum observé est de 52 mg/l, le 21 avril et le maximum observé est de 70.5 mg/l le 24 novembre. Le coefficient de variation est de 5.5 %
- 59.4 mg/l à Moises 2. Le minimum observé est de 58.9 mg/l, le 21 avril et le maximum observé est de 82.1 mg/l le 24 novembre. Le coefficient de variation est de 8.7 %
- 72.8 mg/l à Moises 3. Le minimum observé est de 49.6 mg/l, le 21 avril et le maximum observé est de 60.5 mg/l le 3 mars. Le coefficient de variation est de 8.5 %

Les bicarbonates sont les anions les plus présents. Nous observons des concentrations moyennes de :

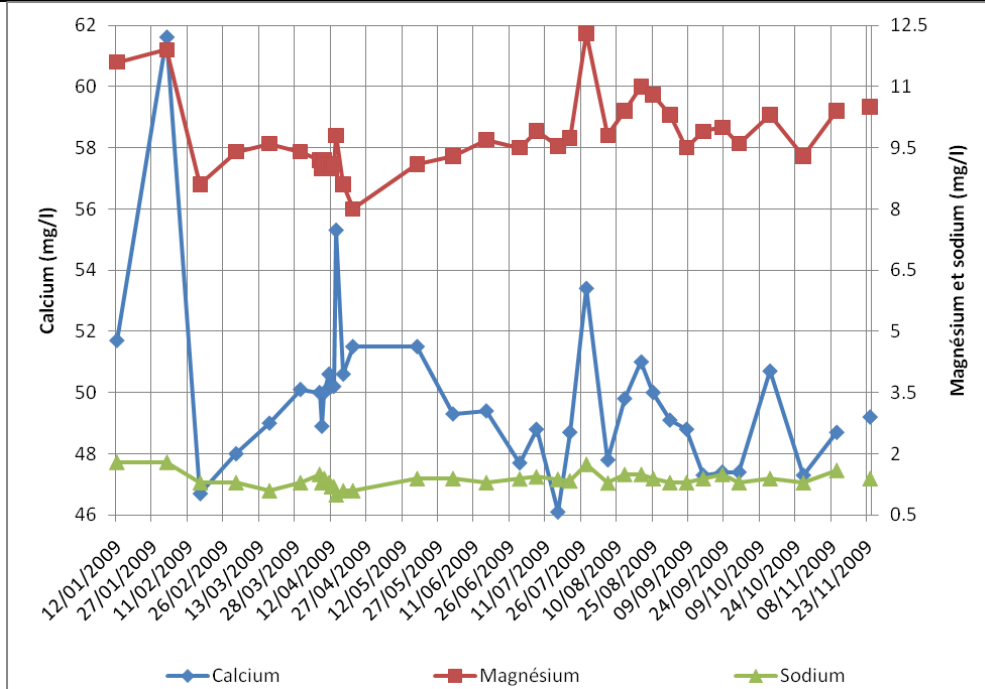
- 188 mg/l à Moises 1. Le minimum observé est de 157.4 mg/l, le 17 avril et le maximum observé est de 245.2 mg/l le 2 février. Le coefficient de variation est de 9.4 %
- 221.5 mg/l à Moises 2. Le minimum observé est de 196.4 mg/l, le 13 avril et le maximum observé est de 269.6 mg/l le 12 janvier. Le coefficient de variation est de 6.4 %
- 244.7 mg/l à Moises 3. Le minimum observé est de 151.3 mg/l, le 21 avril et le maximum observé est de 203.7 mg/l le 12 janvier. Le coefficient de variation est de 10.6 %

Les teneurs en magnésium sont variées. Elles sont :

- Moyennes à Moises 1 avec une concentration moyenne de 9.8 mg/l. Le minimum observé est de 8.2 mg/l, le 21 avril et le maximum observé est de 13.8 mg/l le 30 septembre. Le coefficient de variation est de 9.3 %
- Moyennes à Moises 2 avec une concentration moyenne de 10.8 mg/l. Le minimum observé est de 4 mg/l, le 7 avril et le maximum observé est de 7.6 mg/l le 25 août. Le coefficient de variation est de 26.6 %
- Faibles à Moises 3 avec une concentration moyenne de 7.4 mg/l. Le minimum observé est de 4.2 mg/l, le 16 mars et le maximum observé est de 6.4 mg/l le 3 mars. Le coefficient de variation est de 22.8 %



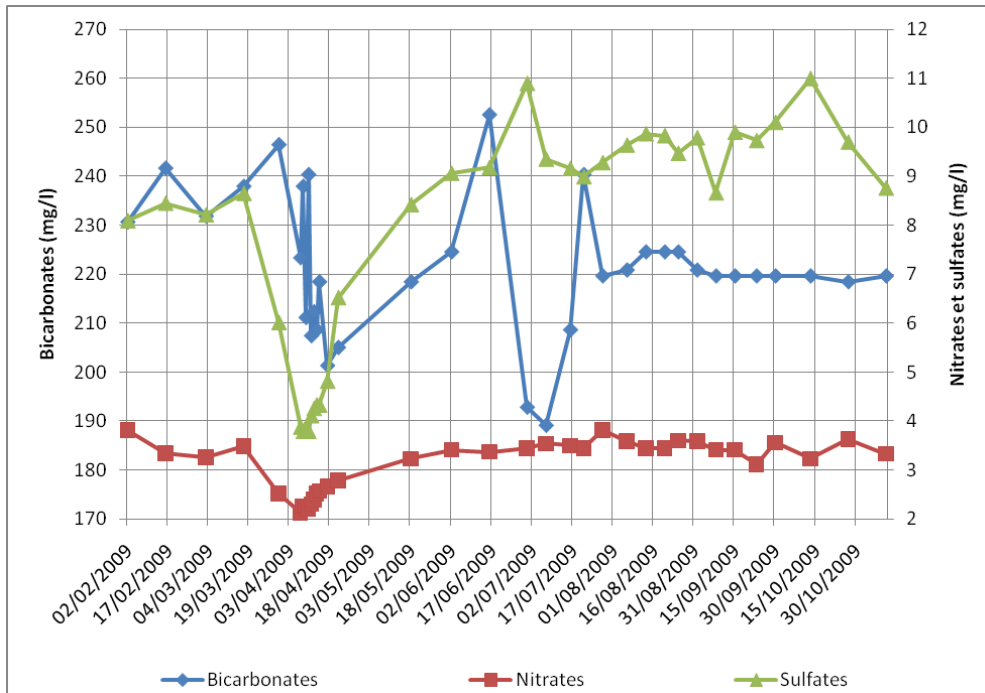
N=36	Moyenne	Ecart type	Médiane	C. Var.	Max	Date	Min	Date
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	187.99	17.76	186.70	9.4 %	245.2	02/02/2009	157.4	17/04/2009
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	3.64	0.23	3.66	6.4 %	4.43	17/03/2009	3.14	02/02/2009
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	8.67	0.60	8.60	7 %	10.20	17/03/2009	7.37	14/04/2009



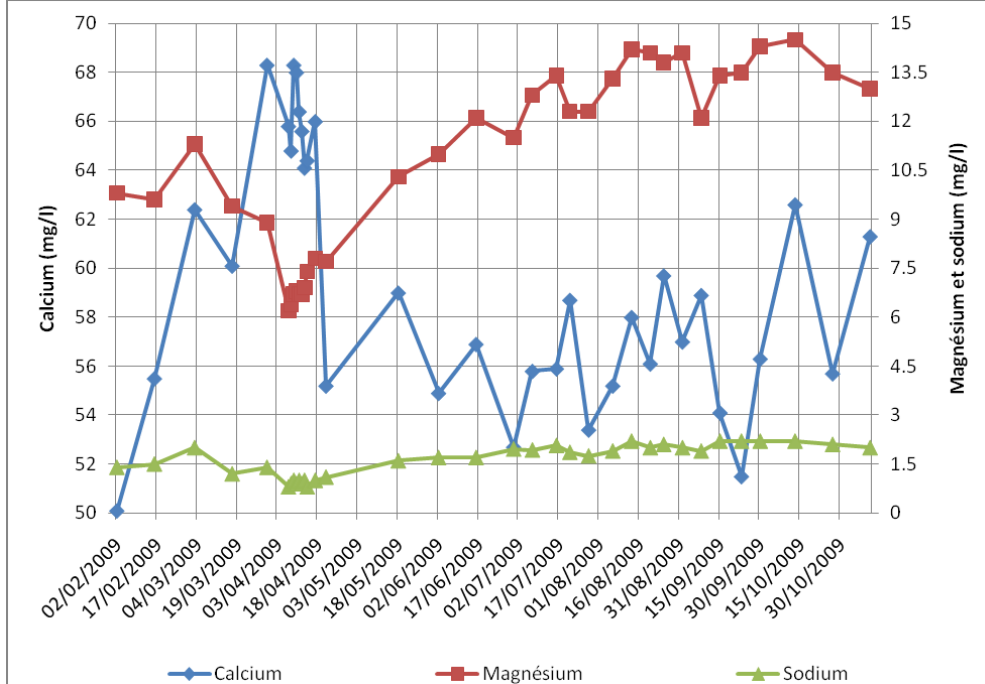
N=36	Moyenne	Ecart type	Médiane	C. Var.	Max	Date	Min	Date
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	49.83	2.74	49.35	5.5 %	61.6	02/02/2009	46.1	16/07/2009
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	9.79	0.91	9.60	9.3 %	12.30	28/07/2009	8.00	21/04/2009
Na <sup>+</sup> (mg/l)	1.37	0.18	1.36	13 %	1.80	12/01/2009	1.00	14/04/2009

Figure 66 : Evolution des concentrations en cations et en anions de l'eau de la source de Moises 1 du 12.01.09 au 24.11.09.

**N** : taille de l'échantillon ; **C. Var.** : Coefficient de variation ; **Max** : maximum ; **Min** : minimum



N=35	Moyenne	Ecart type	Médiane	C. Var.	Max	Date	Min	Date
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	221.45	14.13	219.60	6.4 %	252.5	16/06/2009	189.1	07/07/2009
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	3.13	0.52	3.37	16.7 %	3.81	02/02/2009	2.13	07/04/2009
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	7.93	2.37	8.88	29.9 %	11	13/10/2009	3.78	08/04/2009



N=35	Moyenne	Ecart type	Médiane	C. Var.	Max	Date	Min	Date
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	59.39	5.16	58.70	8.7 %	68.3	30/03/2009	50.1	02/02/2009
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	10.79	2.87	11.50	26.6 %	14.5	13/10/2009	6.2	07/04/2009
Na <sup>+</sup> (mg/l)	1.61	0.50	1.75	30.8 %	2.2	13/08/2009	0.8	07/04/2009

Figure 67 : Evolution des concentrations en cations et en anions de l'eau de la source de Moises 2 du 02.02.09 au 10.11.09.

N : taille de l'échantillon ; C. Var. : Coefficient de variation ; Max : maximum ; Min : minimum

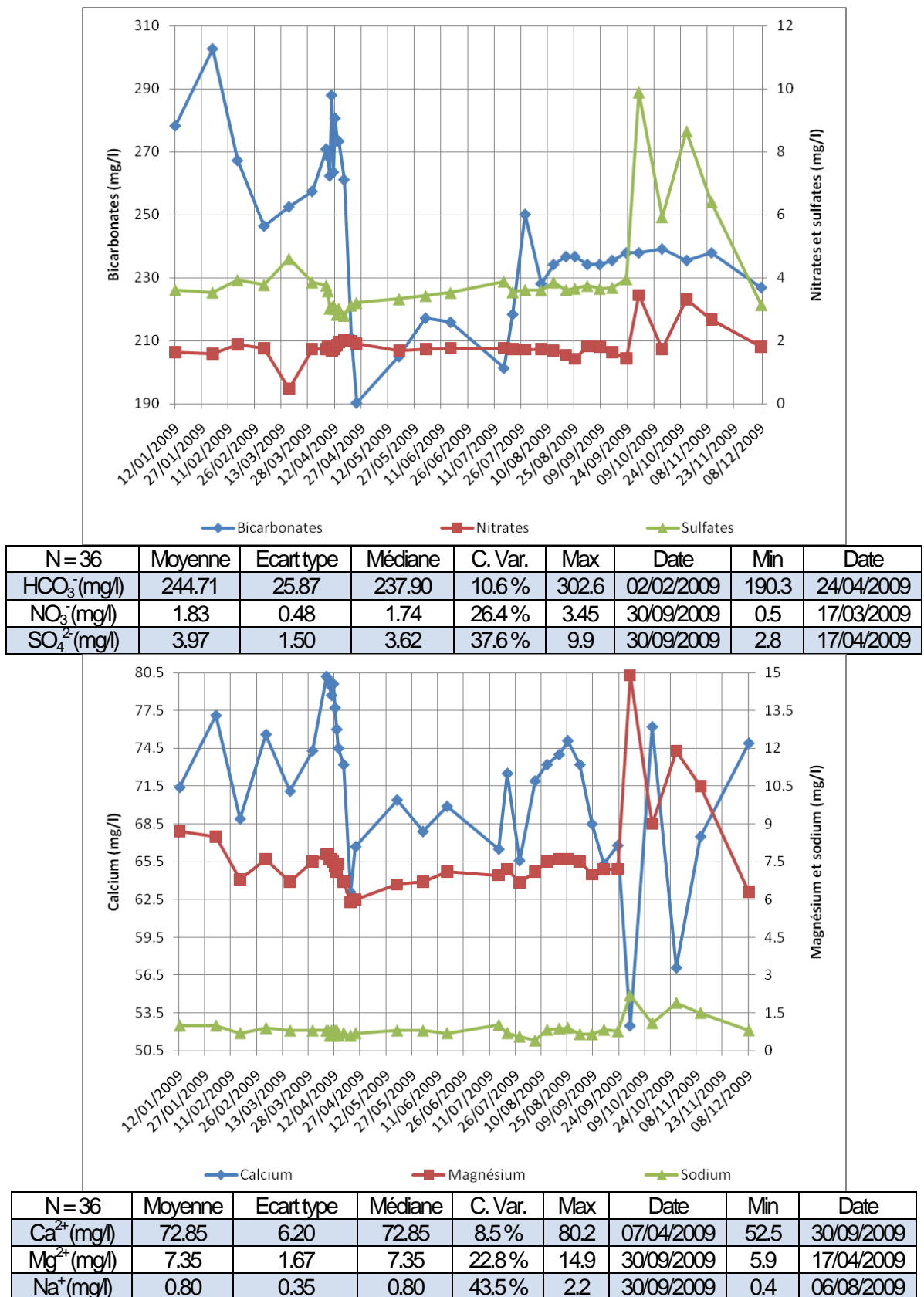


Figure 68 : Evolution des concentrations en cations et en anions de l'eau de la source de Moises 3 du 12.02.09 au 08.12.09.

N : taille de l'échantillon ; C. Var. : Coefficient de variation ; Max : maximum ; Min : minimum

Les concentrations en nitrates sont faibles. Nous observons des concentrations moyennes de :

- 3.6 mg/l à Moises 1. Le minimum observé est de 3.1 mg/l, le 2 février et le maximum observé est de 4.4 mg/l le 17 mars. Le coefficient de variation est de 6.4 %
- 3.1 mg/l à Moises 2. Le minimum observé est de 2.1 mg/l, le 7 avril et le maximum observé est de 3.8 mg/l le 2 février. Le coefficient de variation est de 16.7 %
- 1.8 mg/l à Moises 3. Le minimum observé est de 0.5 mg/l, le 1<sup>er</sup> mars et le maximum observé est de 3.5 mg/l le 30 septembre. Le coefficient de variation est de 26.4 %

Les valeurs en sodium sont :

- Faibles à Moises 1 avec 1.4 mg/l. Le minimum observé est de 1 mg/l, le 14 avril. Le maximum observé est de 1.8 mg/l le 12 janvier. Le coefficient de variation est de 13 %
- Faibles à Moises 2 avec 1.6 mg/l. Le minimum observé est de 0.8 mg/l, le 7 avril et le maximum observé est de 2.2 mg/l le 13 août. Le coefficient de variation est de 30.8 %
- Très faibles à Moises 3 avec 0.8 mg/l. Le minimum observé est de 0.4 mg/l, le 6 août et le maximum observé est de 2.2 mg/l le 30 septembre. Le coefficient de variation est de 43.5 %

Les concentrations en sulfates sont assez faibles avec en moyenne :

- 8.7 mg/l aux Moises 1. Le minimum observé est de 7.4 mg/l, le 14 avril et le maximum observé est de 10.2 mg/l le 17 mars. Le coefficient de variation est de 7 %
- 7.9 mg/l aux Moises 2. Le minimum observé est de 3.8 mg/l, le 8 avril et le maximum observé est de 11 mg/l le 13 octobre. Le coefficient de variation est de 29.9 %
- 4 mg/l aux Moises 3. Le minimum observé est de 2.8 mg/l, le 17 avril et le maximum observé est de 9.9 mg/l le 30 septembre. Le coefficient de variation est de 37.6 %

#### 4.3.2.2. Faciès chimique des eaux

La Figure 69 présente les diagrammes de Piper. Ils montrent que :

- La source des Arces a un faciès bicarbonaté calcique légèrement magnésien
- La source du Col du Feu se définit par un faciès sulfaté calcique et magnésien
- Les sources de l'Epinguy, des Favrats, des Granges Mamet, de Moises 1, de Moises 2, de Moises 3 et de Ramble, se caractérisent par un faciès chimique bicarbonaté calcique
- La source du Pont du Mouche présente un faciès bicarbonaté calcique et magnésien

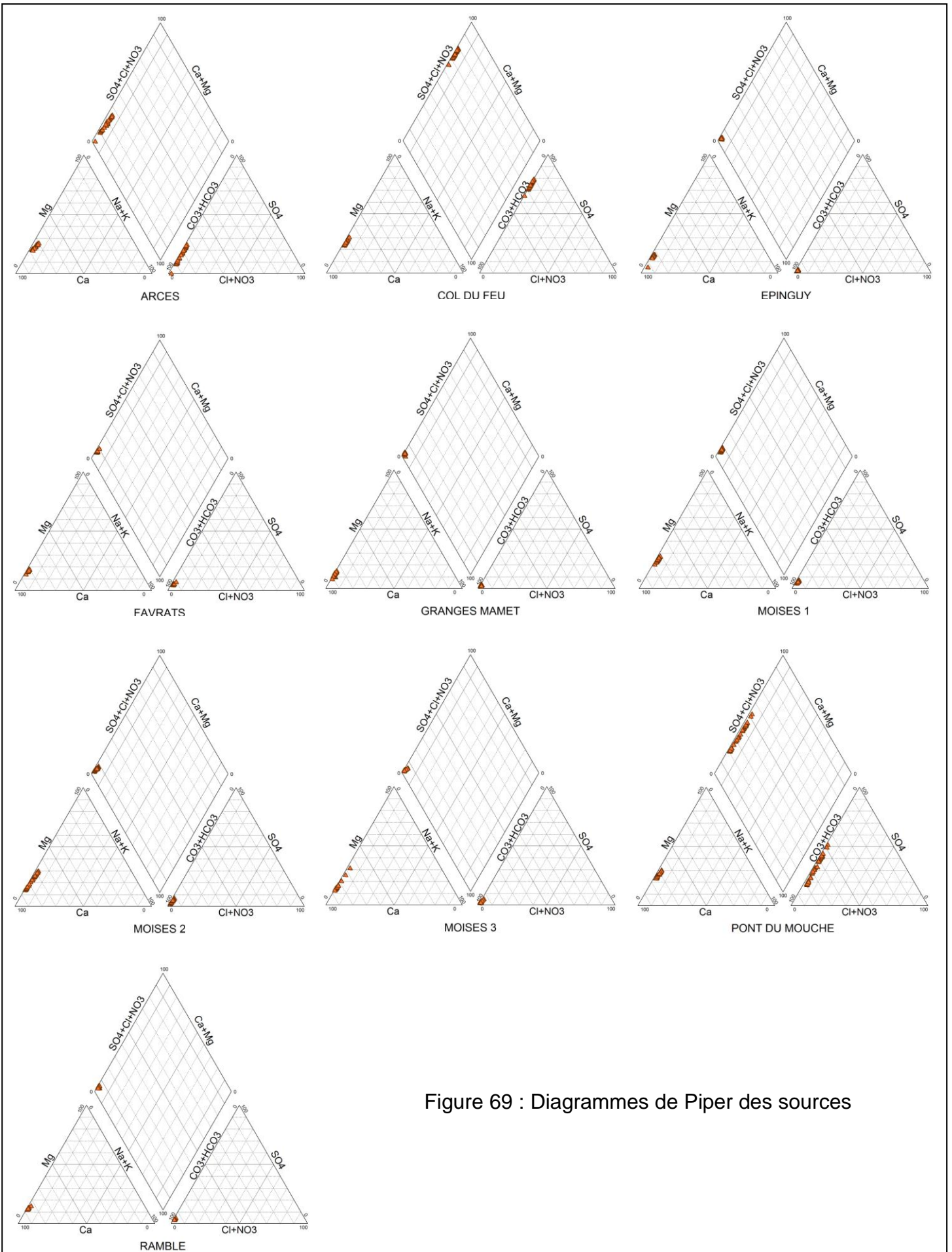


Figure 69 : Diagrammes de Piper des sources

La plus ou moins forte dispersion des individus permet de définir deux groupes de sources, à savoir :

- Les sources des Arces, du Col du Feu, de Moises 2, de Moises 3 et du Pont du Mouche, où nous observons une forte dispersion des individus ce qui signifie une variabilité importante de la chimie des eaux
- Les sources de l'Épinguy, des Favrats, des Granges Mamet, de Moises 1 et de Ramble, où nous observons une faible dispersion des individus ce qui souligne une faible variabilité de la chimie des eaux

#### 4.3.2.3. Caractérisation des phénomènes de mélange à l'émergence

Sur le site d'étude, le calcium provient de la dissolution de la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), de la dolomie ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), des calcaires dolomitiques (mélange de calcite et de dolomie) et de l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ). L'étude des relations sulfates/calcium, bicarbonates/calcium et magnésium/calcium, permet de caractériser les phénomènes de mélange à l'émergence.

##### Relation sulfates/calcium

La Figure 70 présente les concentrations (en méq/l) des sulfates en fonction du calcium ainsi que la courbe de dissolution de l'anhydrite. Nous observons :

- Au Col du Feu, les teneurs en calcium et en sulfates se corrèlent de manière satisfaisante et les individus s'alignent correctement à la droite de dissolution de l'anhydrite.
- Au Pont du Mouche et dans une moindre mesure aux Arces, les teneurs en calcium et en sulfates se corrèlent convenablement et les individus s'alignent à la droite de dissolution de l'anhydrite avec un excès de 2 à 3 méq/l de calcium.
- A Épinguy, aux Favrats, aux Granges Mamet, à Moises 1, à Moises 2, à Moises 3 et à Ramble, les concentrations en sulfates sont quasi nulles. Le calcium n'est donc pas ou peu produit par la dissolution de l'anhydrite

##### Relation bicarbonates/calcium

La Figure 71 présente les concentrations (en méq/l) des bicarbonates en fonction du calcium des sources ainsi que la courbe de dissolution de la calcite. Nous observons que :

- Au Col du Feu, les individus gardent une concentration constante en bicarbonates, à savoir 4 méq/l, quelle que soit la valeur en calcium. Il ne semble donc pas avoir de corrélation entre les bicarbonates et le calcium
- Au Pont du Mouche, il ne semble pas avoir de corrélation entre les bicarbonates et le calcium car les individus qui représentent les analyses réalisées :
  - o En période de basses eaux, gardent une concentration constante en bicarbonates
  - o En période de hautes eaux sont placés soit au-dessus soit en-dessous, de la courbe de dissolution de la calcite
- Aux Favrats, à Moises 1 et à Moises 2, il ne semble pas y avoir de corrélation entre les bicarbonates et le calcium mais nous constatons que les individus se placent au-dessus de la droite de dissolution de la calcite.

Ainsi, les bicarbonates sont en nombre suffisant pour dissoudre la calcite et produire du calcium à l'émergence

- Aux Arces, A Epinguy, aux Granges Mamet, à Moises 3 et à Ramble, il ne semble pas y avoir de corrélation entre les bicarbonates et le calcium. De manière générale, les individus se localisent au-dessus de la courbe de dissolution de la calcite ce qui signifie que globalement les bicarbonates sont en nombre suffisant pour dissoudre la calcite et produire du calcium à l'émergence

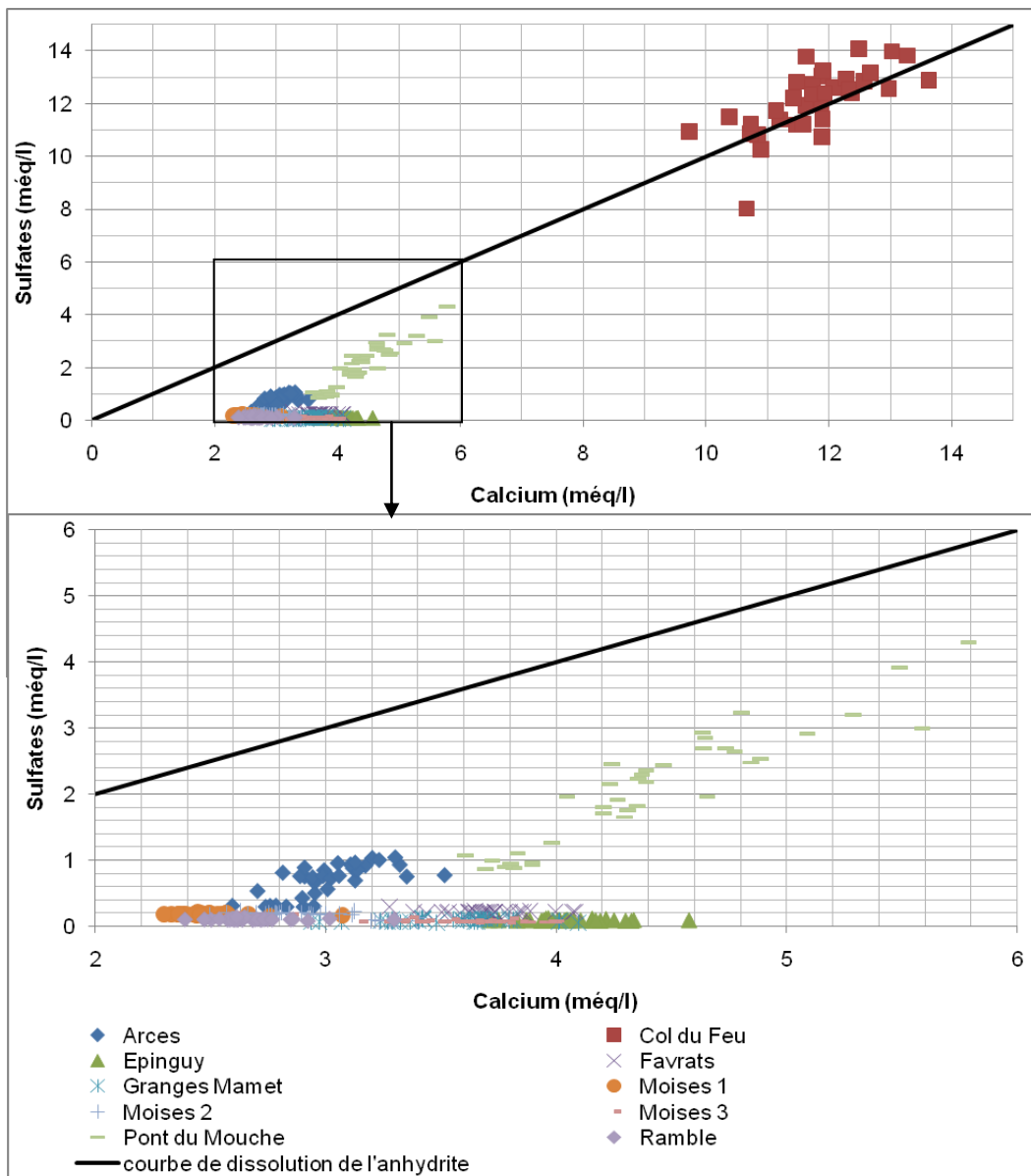


Figure 70 : Diagramme des sulfates en fonction du calcium des sources en 2009

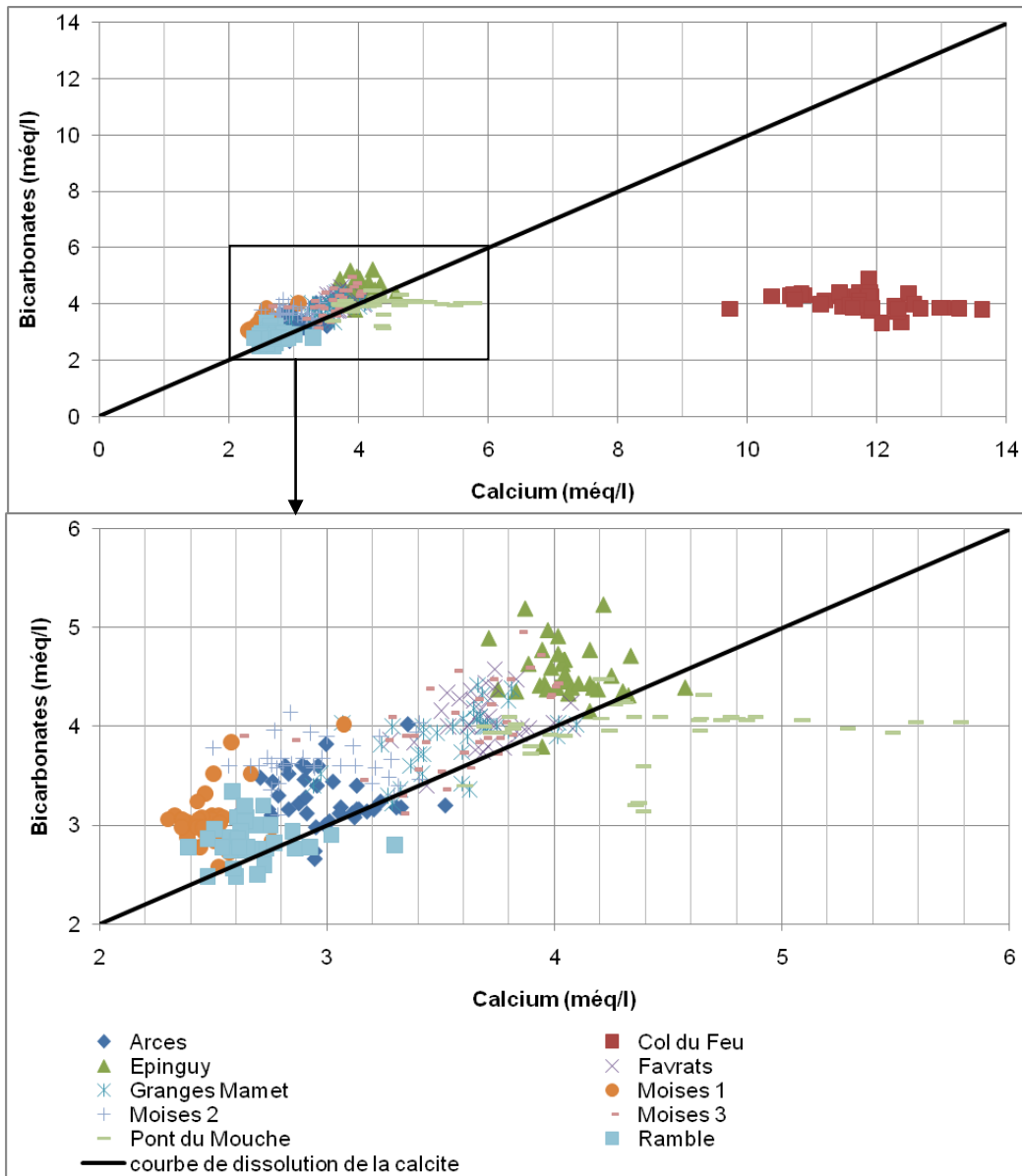


Figure 71 : Diagramme des bicarbonates en fonction du calcium des sources en 2009

### Relation magnésium/calcium

La Figure 72 présente les concentrations (en méq/l) du magnésium en fonction du calcium des sources ainsi que les courbes de dissolution de la dolomie et des calcaires dolomitiques. Nous observons :

- Aux Arces, au Col du Feu, à Moises 1 et à Moises 2, une corrélation entre le magnésium et le calcium mais nous notons que les individus se localisent en-dessous des courbes de dissolution de la dolomie et des calcaires dolomitiques. Ainsi, une partie du calcium est produit par la dissolution de la dolomie et/ou par la dissolution des calcaires dolomitiques
- A l'Epinguy, aux Favrats, aux Granges Mamet, à Moises 3 et à Ramble, une très faible corrélation entre le magnésium et le calcium mais nous notons que les individus se localisent en-dessous des courbes de dissolution de la dolomie et des calcaires dolomitiques. Ainsi, une très

faible partie du calcium est produit par la dissolution de la dolomie et/ou par la dissolution des calcaires dolomitiques

- Au Pont du Mouche, des individus qui se localisent en-dessous des courbes de dissolution de la dolomie et des calcaires dolomitiques. Nous observons une corrélation entre le magnésium et le calcium sauf pour les individus représentant les analyses réalisées en fin de période d'été qui gardent des valeurs en magnésium constantes et des valeurs en calcium qui augmentent.

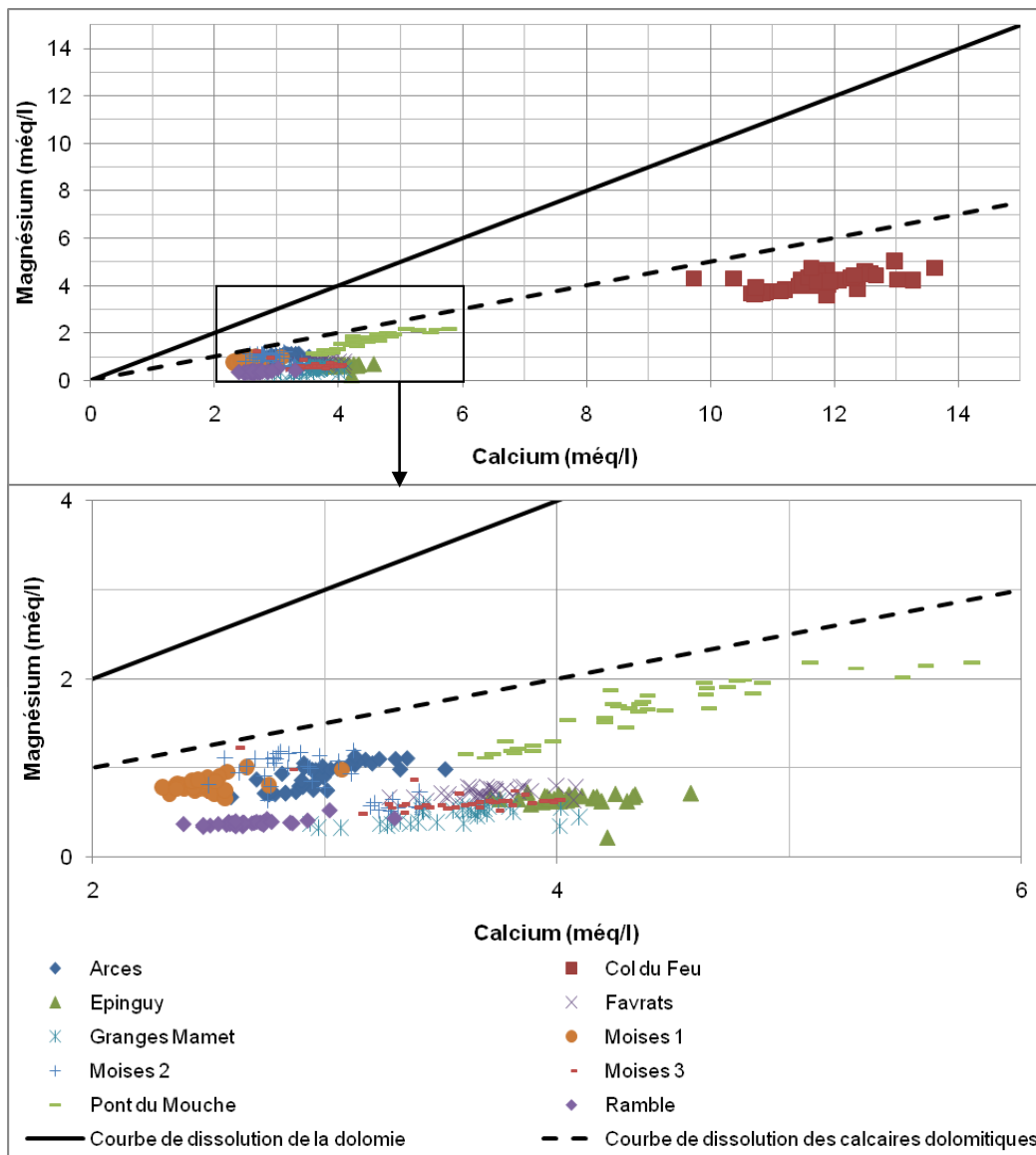


Figure 72 : Diagramme du magnésium en fonction du calcium des sources, en 2009

## Conclusions

Les sources se caractérisent par les phénomènes de mélange suivants :

- Aux Arces, le calcium provient de la dissolution de la calcite et dans une moindre mesure, il résulte de la dissolution de la dolomie et de l'anhydrite. En été, la part du calcium produit par la dissolution de la dolomie et de l'anhydrite augmente

- Au Col du Feu, le calcium provient de la dissolution de l'anhydrite et de la dolomie
- Au Pont du Mouche, le calcium est produit par la dissolution de la dolomie et de l'anhydrite. En dehors des périodes d'étiage, une légère partie du calcium est également produit par la dissolution de la calcite
- A l'Epinguy, aux Favrats, aux Granges Mamet et à Ramble, le calcium provient essentiellement de la dissolution de la calcite. Dans une très faible mesure, il résulte de la dissolution des calcaires dolomitiques
- A Moises 1 et à Moises 2, le calcium provient essentiellement de la dissolution des calcaires dolomitiques et dans une moindre mesure de la dissolution de la calcite
- à Moises 3, le calcium provient de la dissolution de la calcite et dans une moindre mesure de la dissolution des calcaires dolomitiques. En étiage, la part du calcium produit par la dissolution des calcaires dolomitiques augmente et la part du calcium produit par la dissolution de la calcite diminue

#### 4.3.2.4. Conclusions de l'étude des variations des paramètres majeurs

Le Tableau 40 présente une synthèse des informations issues de l'étude des paramètres chimiques des sources en 2009.

##### La source des Arces

Les eaux présentent un faciès bicarbonaté calcique et magnésien, caractérisées par une forte variabilité chimique. Le calcium provient essentiellement de la dissolution de la calcite et dans une moindre mesure de la dissolution de l'anhydrite et de la dolomie. La part du calcium produit par la dissolution de l'anhydrite et de la dolomie augmente en étiage.

##### La source du Col du Feu

Les eaux présentent un faciès sulfaté calcique et magnésien, caractérisées par une forte variabilité chimique. Le calcium provient de la dissolution de l'anhydrite et de la dolomie.

##### La source de l'Epinguy

Les eaux présentent un faciès bicarbonaté calcique, caractérisées par une faible variabilité chimique. Le calcium provient de la dissolution de la calcite et dans une moindre mesure de la dissolution des calcaires dolomitiques.

##### La source des Favrats

Les eaux présentent un faciès bicarbonaté calcique, caractérisées par une faible variabilité chimique. Le calcium provient de la dissolution de la calcite et dans une moindre mesure de la dissolution des calcaires dolomitiques.

### La source des Granges Mamet

Les eaux présentent un faciès bicarbonaté calcique, caractérisées par une faible variabilité chimique. Le calcium provient de la dissolution de la calcite et dans une moindre mesure de la dissolution des calcaires dolomitiques.

	Faciès chimique	Variabilité chimie	Origine du calcium	
			Principale	Secondaire
Arcès	Bicarbonaté calcique et magnésien	Forte	Calcite	Dolomie et anhydrite
Col du Feu	Sulfaté calcique et magnésien	Forte	Anhydrite et dolomie	
Epinguy	Bicarbonaté calcique	Faible	Calcite	Calcaire dolomitique
Favrats	Bicarbonaté calcique	Faible	Calcite	Calcaire dolomitique
Granges Mamet	Bicarbonaté calcique	Faible	Calcite	Calcaire dolomitique
Moises 1	Bicarbonaté calcique	Faible	Calcaire dolomitique	Calcite
Moises 2	Bicarbonaté calcique	Forte	Calcaire dolomitique	Calcite
Moises 3	Bicarbonaté calcique	Forte	Calcite	Calcaire dolomitique
Pont du Mouche	Bicarbonaté calcique et magnésien	Forte	Anhydrite et dolomie	Calcite
Ramble	Bicarbonaté calcique	Faible	Calcite	Calcaire dolomitique

Tableau 40 : Synthèse de l'étude des variations des paramètres majeurs des sources, en 2009

### La source de Moises 1

Les eaux présentent un faciès bicarbonaté calcique, caractérisées par une faible variabilité chimique. Le calcium provient de la dissolution des calcaires dolomitiques et dans une moindre mesure de la dissolution de la calcite.

### La source de Moises 2

Les eaux présentent un faciès bicarbonaté calcique, caractérisées par une forte variabilité chimique. Le calcium provient de la dissolution des calcaires dolomitiques et dans une moindre mesure de la dissolution de la calcite.

### La source de Moises 3

Les eaux présentent un faciès bicarbonaté calcique, caractérisées par une forte variabilité chimique. Le calcium provient de la dissolution de la calcite et dans une moindre mesure de la dissolution des calcaires dolomitiques. La part du calcium produit par la dissolution des calcaires dolomitiques augmente en étiage.

### La source du Pont du Mouche

Les eaux présentent un faciès bicarbonaté calcique et magnésien, caractérisées par une forte variabilité chimique. Le calcium provient de la dissolution de l'anhydrite et de la dolomie et dans une moindre mesure de la dissolution de la calcite. La part du calcium produit par la dissolution de la calcite augmente en période de hautes eaux.

### La source de Ramble

Les eaux présentent un faciès bicarbonaté calcique, caractérisées par une faible variabilité chimique. Le calcium provient de la dissolution de la calcite et dans une moindre mesure de la dissolution des calcaires dolomitiques.

#### 4.3.3. Etude des paramètres mineurs et des éléments traces

Les concentrations de manganèse et de baryum présentent le plus souvent, des résultats en deçà des limites de quantification du laboratoire (0.01 mg/l). Ces paramètres ont donc été supprimés de la présente étude. Dans ce paragraphe, l'évolution des valeurs en silice et en strontium est commentée.

Au vu de notre cadre géologique, la silice provient de la dissolution soit des calcaires siliceux du Lias soit des placages morainiques soit par contact avec les grès de l'Hettangien. Le strontium est produit par la dissolution de la célestine ( $\text{SrSO}_4$ ) et de la strontianite ( $\text{SrCO}_3$ ). Il peut provenir de roches calcaires et de roches gypseuses.

##### 4.3.3.1. Les sources d'Habère-Poche

La Figure 73 présente les valeurs observées dans le cadre du suivi de la silice et du strontium des sources d'Habère-Poche, en 2009.

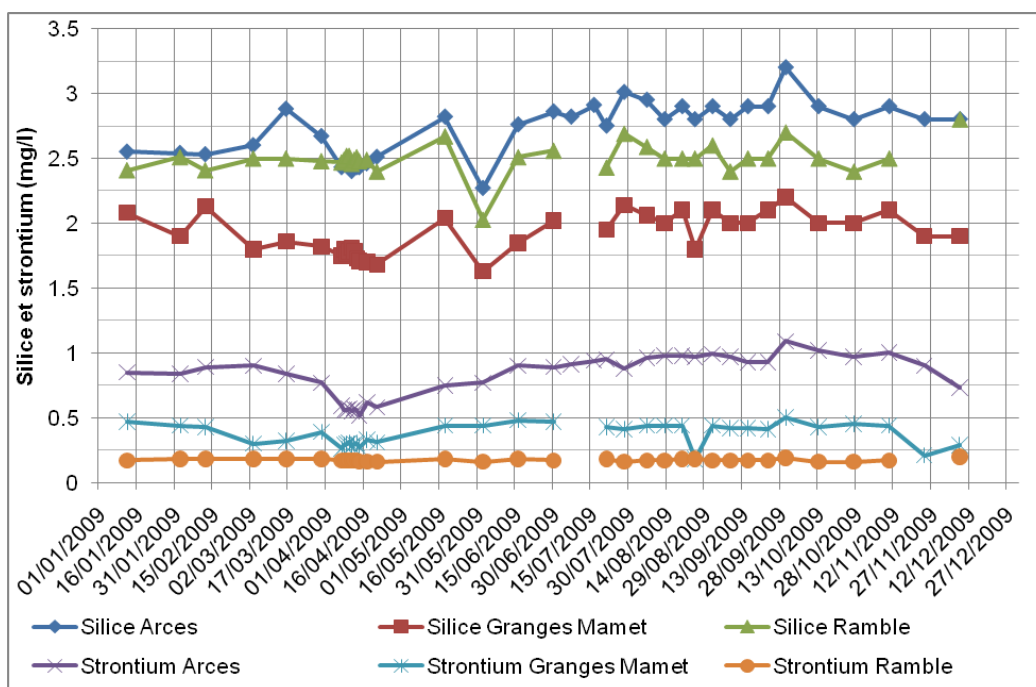
### La source des Arces

Pour la silice, nous observons une moyenne de 2.7 mg/l et une médiane est de 2.8 mg/l (la moyenne est influencée par des valeurs faibles). L'écart type est de 0.22. Le minimum est de 2.27 mg/l, le 2 juin et le maximum est de 3.2 mg/l, le 30 septembre. Les fortes valeurs apparaissent en période d'étiage et les fortes valeurs se produisent en période de hautes eaux. Nous observons donc une forte corrélation entre le débit et la silice.

Pour le strontium, nous observons une moyenne de 0.82 mg/l et une médiane de 0.89 mg/l (la moyenne est influencée par de faibles valeurs). L'écart type est de 0.17. Le minimum est enregistré le 14 avril avec une valeur de 0.52 mg/l et le maximum est apparu le 30 septembre avec une valeur de 1.09 mg/l. Les fortes valeurs apparaissent en période d'étiage et les fortes valeurs se produisent en période de hautes eaux. Nous observons donc une forte corrélation entre le débit et le strontium.

### La source des Granges Mamet

Pour la silice, nous observons une moyenne de 1.92 mg/l et une médiane est de 1.9 mg/l (la moyenne est influencée par des valeurs faibles). L'écart type est de 0.16. Le minimum est enregistré le 2 juin avec une valeur de 1.63 mg/l et le maximum est apparu le 30 septembre avec une valeur de 2.2 mg/l. Malgré les lacunes d'informations (mise en fonctionnement du trop-plein du 23 janvier au 2 février, du 13 mars au 8 juin), nous constatons que les fortes valeurs apparaissent en période d'étiage et les fortes valeurs se produisent en période de hautes eaux. Nous observons donc une forte corrélation entre le débit et la silice.



	Arces		Granges Mamet		Ramble	
	Silice	Strontium	Silice	Strontium	Silice	Strontium
Moyenne	2.70	0.82	1.92	0.37	2.50	0.17
Ecart type	0.22	0.17	0.16	0.08	0.12	0.01
Médiane	2.80	0.89	1.90	0.42	2.50	0.17
Minimum	2.27	0.52	1.63	0.18	2.03	0.16
Date	02/06/2009	14/04/2009	02/06/2009	25/08/2009	02/06/2009	
Maximum	3.2	1.09	2.2	0.5	2.8	0.2
Date	30/09/2009	30/09/2009	30/09/2009	30/09/2009	08/12/2009	08/12/2009

Figure 73 : Evolution des concentrations en silice et en strontium des sources d’Habère-Poche en 2009

Pour le strontium, nous observons une moyenne de 0.37 mg/l et une médiane est de 0.42 mg/l (la moyenne est influencée par des valeurs faibles). L’écart type est de 0.08. Le minimum est enregistré le 25 août avec une valeur de 0.18 mg/l et le maximum est apparu le 30 septembre avec une valeur de 0.5 mg/l. Malgré les lacunes d’informations (mise en fonctionnement du trop-plein du 23 janvier au 2 février, du 13 mars au 8 juin), nous constatons que les fortes valeurs apparaissent en période d’été et les faibles valeurs se produisent en période de hautes eaux. Nous observons donc une forte corrélation entre le débit et le strontium.

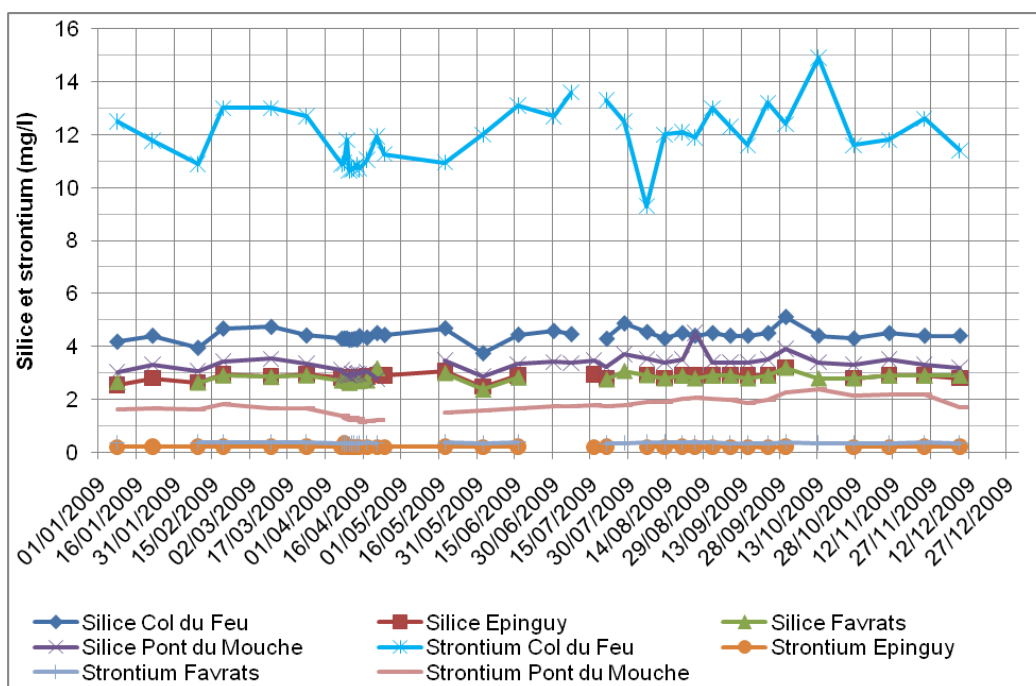
### La source de Ramble

Pour la silice, nous observons une moyenne et une médiane de 2.5 mg/l. L’écart type est de 0.12. Le minimum est enregistré le 2 juin avec une valeur de 2.03 mg/l et le maximum est apparu le 8 décembre avec une valeur de 2.8 mg/l. Les fortes valeurs apparaissent en période d’été (sauf pour le maximum, la valeur s’explique par un effet de chasse des eaux anciennes) et les fortes valeurs se produisent en période de hautes eaux. Nous observons donc une corrélation entre le débit et la silice.

Pour le strontium, nous observons une moyenne et une médiane de 0.17 mg/l. L'écart type est de 0.01. Le minimum est enregistré à 6 reprises (14 avril, 17 avril, 21 avril, 28 juillet, 13 octobre, 27 octobre) avec une valeur de 0.16 mg/l et le maximum est apparu le 8 décembre avec une valeur de 0.2 mg/l. Les fortes valeurs apparaissent en période d'étiage (la valeur du 8 décembre s'explique par un effet de chasse des eaux anciennes) et les fortes valeurs se produisent en période de hautes eaux. Nous observons donc une corrélation entre le débit et le strontium.

#### 4.3.3.2. Les sources d'Orcier et du Col du Feu

La Figure 74 présente les valeurs observées dans le cadre du suivi de la silice et du strontium pour les sources d'Orcier et du Col du Feu, en 2009.



	Col du Feu		Epinguy		Favrats		Pont du Mouche	
	Silice	Strontium	Silice	Strontium	Silice	Strontium	Silice	Strontium
Moyenne	4.41	11.43	2.85	0.21	2.82	0.35	3.30	1.67
Ecart type	0.23	2.67	0.13	0.02	0.16	0.02	0.33	0.40
Médiane	4.4	11.92	2.87	0.2	2.8	0.35	3.335	1.72
Minimum	3.75	0.48	2.48	0.19	2.37	0.32	2.77	0.34
Date	02/06/2009	11/04/2009	02/06/2009		02/06/2009	02/06/2009	21/04/2009	21/04/2009
Maximum	5.1	14.9	3.2	0.33	3.2	0.39	4.5	2.37
Date	30/09/2009	13/10/2009	30/09/2009	08/04/2009	30/09/2009	30/09/2009	25/08/2009	13/10/2009

Figure 74 : Evolution des concentrations en silice et en strontium des sources d'Orcier et du Col du Feu, en 2009

#### La source du Col du Feu

Pour la silice, nous observons une moyenne de 4.41 mg/l et une médiane de 4.4 mg/l (la moyenne est faiblement influencée par les fortes valeurs). L'écart type est de 0.23. Le minimum est de 3.75 mg/l, le 2 juin et le maximum est de 5.1 mg/l, le 30 septembre. Malgré l'absence d'informations de débit, nous pensons qu'il existe une

forte corrélation entre le débit et la silice. Les fortes valeurs apparaissent en période d'étiage et les fortes valeurs se produisent en période de hautes eaux.

Pour le strontium, nous observons une moyenne de 11.43 mg/l et une médiane de 11.92 mg/l (la moyenne est fortement influencée par de faibles valeurs). L'écart type est de 2.67. Le minimum est de 0.48 mg/l, le 11 avril et le maximum est de 14.9 mg/l, le 13 octobre. Malgré l'absence d'informations de débit, nous pensons qu'il existe une forte corrélation entre le débit et le strontium. Les fortes valeurs apparaissent en période d'étiage et les fortes valeurs se produisent en période de hautes eaux.

#### La source de l'Epinguy

Pour la silice, nous observons une moyenne de 2.85 mg/l et une médiane est de 2.87 mg/l (la moyenne est légèrement influencée par de faibles valeurs). L'écart type est de 0.13. Le minimum est de 2.48 mg/l, le 2 juin et le maximum est de 3.2 mg/l, le 30 septembre. Malgré les lacunes d'informations de débit du 26 mars au 4 juin, nous constatons que les fortes valeurs apparaissent en période d'étiage et les fortes valeurs se produisent en période de hautes eaux. Nous observons donc une forte corrélation entre le débit et la silice.

Pour le strontium, nous observons une moyenne de 0.21 mg/l et une médiane de 0.2 mg/l (la moyenne est légèrement influencée par de fortes valeurs). L'écart type est de 0.02. Le minimum est de 0.19 mg/l, enregistré à trois reprises (le 14 avril, le 25 août et le 23 septembre) et le maximum est de 0.33 mg/l, le 8 avril. Malgré les lacunes d'informations de débit du 26 mars au 4 juin, nous constatons que les fortes valeurs apparaissent en période d'étiage et les fortes valeurs se produisent en période de hautes eaux. Nous observons donc une forte corrélation entre le débit et le strontium.

#### La source des Favrats

Pour la silice, nous observons une moyenne de 2.82 mg/l et une médiane de 2.8 mg/l (la moyenne est légèrement influencée par fortes valeurs). L'écart type est de 0.16. Le minimum est de 2.37 mg/l, le 2 juin et le maximum est de 3.2 mg/l, le 30 septembre. Malgré les lacunes d'informations de débit du 7 octobre au 11 novembre, nous constatons que les fortes valeurs apparaissent en période d'étiage et les fortes valeurs se produisent en période de hautes eaux. Nous observons donc une forte corrélation entre le débit et la silice.

Pour le strontium, nous observons une moyenne de 0.38 mg/l et une médiane de 0.35 mg/l (la moyenne est légèrement influencée par de fortes valeurs). L'écart type est de 0.15. Le minimum est de 0.32 mg/l, le 2 juin et le maximum est de 1.2 mg/l, le 21 avril. Malgré les lacunes d'informations de débit du 7 octobre au 11 novembre, nous constatons que les fortes valeurs apparaissent en période d'étiage et les fortes valeurs se produisent en période de hautes eaux. Nous observons donc une forte corrélation entre le débit et le strontium.

### La source du Pont du Mouche

Pour la silice, nous observons une moyenne de 3.3 mg/l et une médiane de 3.34 mg/l (la moyenne est légèrement influencée par de faibles valeurs). L'écart type est de 0.33. Le minimum est de 2.77 mg/l, le 21 avril et le maximum est de 4.5 mg/l, le 25 août. Les fortes valeurs apparaissent en période d'étiage et les fortes valeurs se produisent en période de hautes eaux. Nous observons donc une forte corrélation entre le débit et la silice.

Pour le strontium, nous observons une moyenne de 1.67 mg/l et une médiane de 1.72 mg/l (la moyenne est légèrement influencée par de faibles valeurs). L'écart type est de 0.4. Le minimum est de 0.34 mg/l, le 21 avril et le maximum est 2.37 mg/l, le 13 octobre. Les fortes valeurs apparaissent en période d'étiage et les fortes valeurs se produisent en période de hautes eaux. Nous observons donc une forte corrélation entre le débit et le strontium.

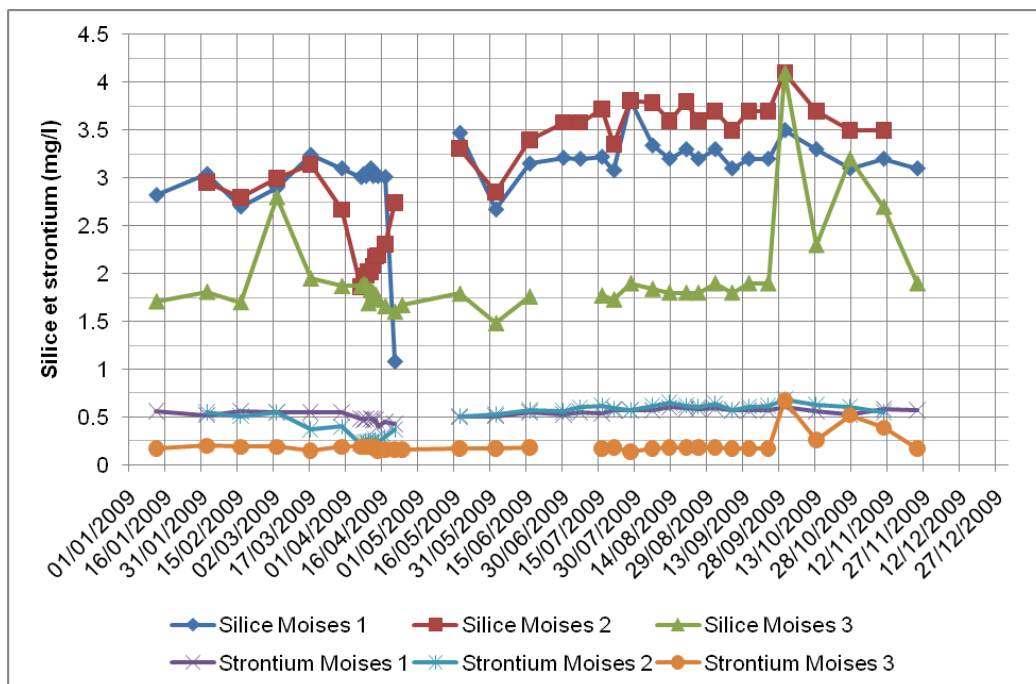
#### 4.3.3.3. Les sources des Moises

La Figure 75 présente les valeurs observées dans le cadre du suivi de la silice et du strontium pour les sources des Moises, en 2009.

#### La source de Moises 1

Pour la silice, nous observons une moyenne de 3.08 mg/l et une médiane est de 3.1 mg/l (la moyenne est légèrement influencée par de faibles valeurs). L'écart type est de 0.4. Le minimum est de 1.08 mg/l, le 21 avril et le maximum est de 3.81 mg/l, le 28 juillet. Les fortes valeurs apparaissent en période d'étiage et les fortes valeurs se produisent en période de hautes eaux. Nous observons donc une forte corrélation entre le débit et la silice. Malgré les lacunes d'informations de débit 19 novembre au 31 décembre, nous constatons que les fortes valeurs apparaissent en période d'étiage et les fortes valeurs se produisent en période de hautes eaux. Nous observons donc une forte corrélation entre le débit et la silice.

Pour le strontium, nous observons une moyenne de 0.53 mg/l et une médiane de 0.55 mg/l (la moyenne est légèrement influencée par de faibles valeurs). L'écart type est de 0.05. Le minimum est de 0.4 mg/l, le 14 avril et le maximum est de 0.61 mg/l, le 30 septembre. Les fortes valeurs apparaissent en période d'étiage et les fortes valeurs se produisent en période de hautes eaux. Nous observons donc une forte corrélation entre le débit et le strontium. Malgré les lacunes d'informations de débit 19 novembre au 31 décembre, nous constatons que les fortes valeurs apparaissent en période d'étiage et les fortes valeurs se produisent en période de hautes eaux. Nous observons donc une forte corrélation entre le débit et le strontium.



	Moises 1		Moises 2		Moises 3	
	Silice	Strontium	Silice	Strontium	Silice	Strontium
Moyenne	3.08	0.53	3.08	0.48	1.96	0.21
Ecart type	0.40	0.05	0.69	0.16	0.50	0.11
Médiane	3.1	0.55	3.35	0.55	1.81	0.18
Minimum	1.08	0.4	1.86	0.22	1.48	0.14
Date	21/04/2009	14/04/2009	07/04/2009	07/04/2009	02/06/2009	28/07/2009
Maximum	3.81	0.61	4.1	0.68	4.1	0.67
Date	28/07/2009	30/09/2009	30/09/2009	30/09/2009	30/09/2009	30/09/2009

Figure 75 : Evolution des concentrations en silice et en strontium des sources des Moises, en 2009

### La source de Moises 2

Pour la silice, nous observons une moyenne de 3.08 mg/l et une médiane de 3.35 mg/l (la moyenne est fortement influencée par de faibles valeurs). L'écart type est de 0.69. Le minimum est de 1.86 mg/l, le 7 avril et le maximum est de 4.1 mg/l, le 30 septembre. Malgré les lacunes d'informations de débit 19 novembre au 31 décembre, nous constatons que les fortes valeurs apparaissent en période d'étiage et les faibles valeurs se produisent en période de hautes eaux. Nous observons donc une forte corrélation entre le débit et la silice.

Pour le strontium, nous observons une moyenne de 0.48 mg/l et une médiane de 0.55 mg/l (la moyenne est fortement influencée par de faibles valeurs). L'écart type est de 0.16. Le minimum est de 0.22 mg/l, le 7 avril et le maximum est de 0.68 mg/l, le 30 septembre. Malgré les lacunes d'informations de débit du 19 novembre au 31 décembre, nous constatons que les fortes valeurs apparaissent en période d'étiage et les faibles valeurs se présentent en période de hautes eaux. Nous observons donc une forte corrélation entre le débit et le strontium.

### La source de Moises 3

Pour la silice, nous observons une moyenne de 1.96 mg/l et une médiane de 1.81 mg/l (la moyenne est fortement influencée par de fortes valeurs). L'écart type est de 0.5. Le minimum est de 1.48 mg/l, le 2 juin et le maximum est de 4.1 mg/l, le 30 septembre. Malgré les lacunes d'informations de débit 19 novembre au 31 décembre, nous constatons que les fortes valeurs apparaissent en période d'étiage et les fortes valeurs se produisent en période de hautes eaux. Nous observons donc une forte corrélation entre le débit et la silice.

Pour le strontium, nous observons une moyenne de 0.21 mg/l et une médiane de 0.18 mg/l (la moyenne est influencée par de fortes valeurs). L'écart type est de 0.11. Le minimum est de 0.14 mg/l, le 28 juillet et le maximum est de 0.67 mg/l, le 30 septembre. Malgré les lacunes d'informations de débit du 19 novembre au 31 décembre, nous constatons que les fortes valeurs apparaissent en période d'étiage et les fortes valeurs se produisent en période de hautes eaux. Nous observons donc une forte corrélation entre le débit et le strontium.

#### 4.3.3.4. Conclusions

De manière générale, nous observons une corrélation entre le débit et les teneurs en strontium et en silice. Plus le débit est faible et plus les concentrations en strontium et en silice sont élevées. Pour chaque source (nous le supposons au Col du Feu du fait des lacunes d'informations), ces deux paramètres constituent un indicateur du temps de séjour des eaux souterraines dans le système.

#### 4.3.4. Etude des paramètres de l'équilibre calco-carbonique

Dans ce paragraphe, l'évolution des paramètres de l'équilibre calco-carbonique (pH, oxygène dissous, COT) est décrite. Ensuite, les valeurs et les évolutions de l'indice de saturation de la calcite et de l'indice de saturation de la dolomie, sont exposées. Enfin, l'étude des relations entre la  $pCO_2$  et l'indice de saturation de la calcite est détaillée.

##### 4.3.4.1. Evolution du pH, de l'oxygène dissous et du COT

La connaissance du pH est fondamentale pour établir l'état des équilibres de dissolution. Le Carbone Organique Total (COT) est utilisé comme traceur de l'infiltration rapide. Pour faciliter la caractérisation de l'influence des circulations rapides, les valeurs en COT inférieures à la limite de quantification ont été ajustées à 0.5 mg/l. L'oxygène dissous informe du caractère ouvert (valeurs supérieures à 3 mg/l) ou fermé (valeurs inférieures à 3 mg/l) du système (LALLAHEM, 2002). Par ailleurs, « *les épisodes pluvieux froids engendrent une oxygénation de la nappe alors que les épisodes pluvieux chauds induisent une baisse de la concentration en oxygène dissous dans la nappe* » (MALARD, FOULQUIER, & DATRY, 2007).

### La source des Arces (cf. Figure 76)

La valeur moyenne du pH est modérée par rapport aux autres sources avec 7.86 unité pH. La médiane est de 7.85 unité pH (la moyenne est légèrement influencée

par de fortes valeurs). Le minimum est enregistré le 3 mars (7.56 unité pH) et le maximum est apparu le 2 février (8.22 unité pH). L'écart type est de 0.12 et le coefficient de variation est 1.5 %.

La valeur moyenne de l'oxygène dissous est élevée par rapport aux autres sources avec 5.52 mg/l. La médiane est de 5.45 mg/l (la moyenne est légèrement influencée par de fortes valeurs). L'écart type est de 0.39 et le coefficient de variation est de 7.1 %. Le minimum apparaît le 12 janvier (4.9 mg/l) et le maximum survient le 25 août (6.8 mg/l). De janvier à juin, les valeurs sont globalement en-dessous de la moyenne puis elles augmentent pour atteindre les pics du 25 août et du 1<sup>er</sup> septembre. Après, les valeurs diminuent pour être en-dessous de la moyenne à partir de mi-octobre et ce jusqu'à la fin de l'année.

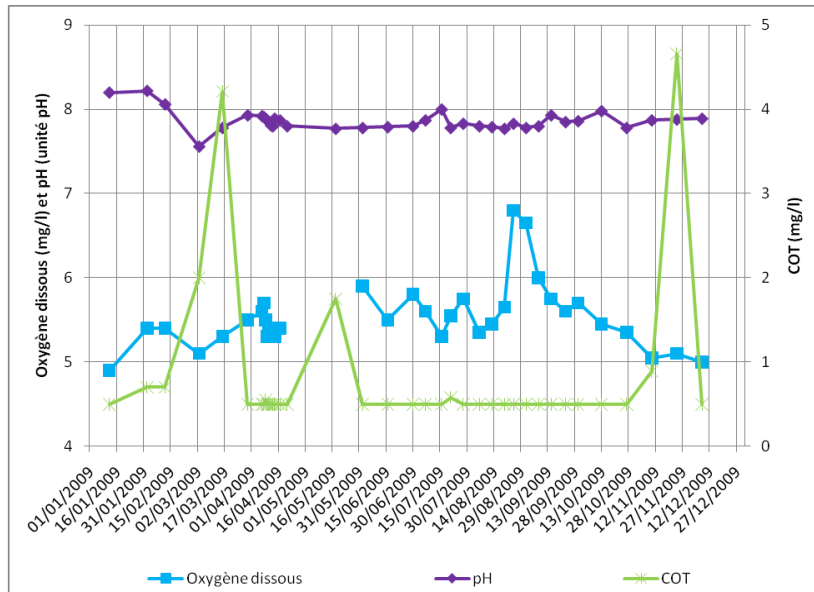
La valeur moyenne du COT est faible par rapport aux autres sources avec 0.8 mg/l. La médiane est de 0.5 mg/l (la moyenne est influencée par de fortes valeurs). L'écart type est de 0.92 et le coefficient de variation est de 115 %. Le minimum est enregistré 29 fois sur 38 analyses (moins de 0.5 mg/l) et le maximum apparaît le 24 novembre (4.66 mg/l). La valeur du 16 mars (4.2 mg/l) est en relation avec la fusion nivale. La valeur du 18 juin (1.75 mg/l) est en lien avec les précipitations du 8 au 18 mai (36 mm de pluie à Très le Mont) et le pic du 24 novembre est la conséquence des précipitations du 11 au 23 novembre (48 mm de pluie à Très le Mont).

#### La source du Col du Feu (cf. Figure 77)

La valeur moyenne du pH est faible par rapport aux autres sources avec 7.62 unité pH. La médiane est de 7.61 unité pH (la moyenne est légèrement influencée par des fortes valeurs). L'écart type est de 0.12 et le coefficient de variation est de 1.6 %. Le minimum est enregistré le 10 mars (7.42 unité pH) et le maximum est apparu le 22 janvier (8 unité pH).

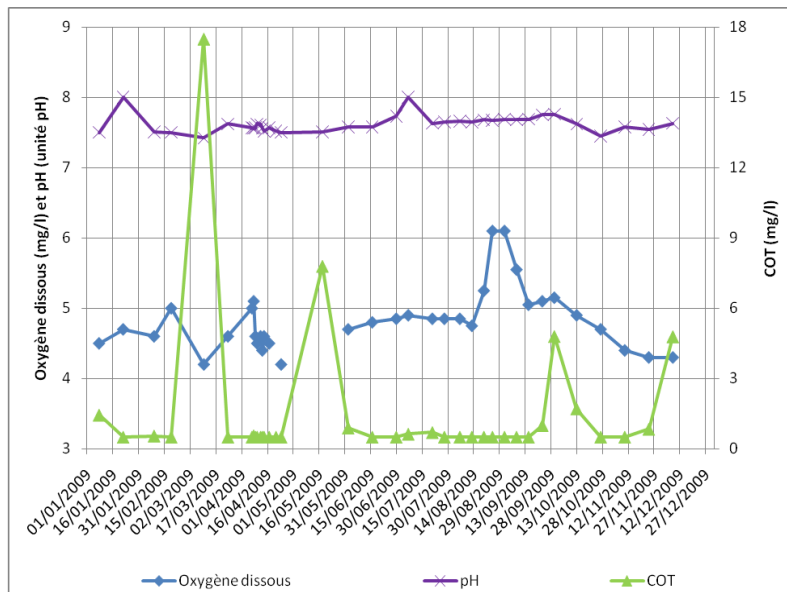
La valeur moyenne de l'oxygène dissous est faible par rapport aux autres sources avec 4.82 mg/l. La médiane est de 4.75 mg/l (la moyenne est influencée par de fortes valeurs). L'écart type est de 0.44 et le coefficient de variation est de 9.1 %. Le minimum est enregistré le 10 mars et le 24 avril (4.2 mg/l) et le maximum apparaît le 25 août et le 1<sup>er</sup> septembre (6.1 mg/l). De janvier à début juin, les valeurs sont globalement en-dessous de la moyenne puis elles augmentent pour atteindre les pics du 25 août et du 1<sup>er</sup> septembre. Après, les valeurs diminuent pour être en-dessous de la moyenne à partir de fin octobre et jusqu'à la fin de l'année.

La valeur moyenne du COT est modérée par rapport aux autres sources avec 1.49 mg/l. La médiane est de 0.5 mg/l (la moyenne est influencée par des fortes valeurs). L'écart type est de 3.1 et le coefficient de variation est de 208 %. Le minimum est enregistré 24 fois sur 37 analyses (0.5 mg/l) et le maximum est apparu le 10 mars (17.5 mg/l). Ce pic est en relation avec la fusion nivale. La valeur du 18 mai (7.8 mg/l) est en lien avec les précipitations du 8 au 18 mai (36 mm de pluie à Très le Mont). Les valeurs du 30 septembre et du 8 décembre (4.8 mg/l) sont les conséquences des précipitations du 16 au 28 septembre (14 mm de pluie à Très le Mont) et du 2 au 8 décembre (50 mm de pluie à Très le Mont).



	Moyenne	Ecart type	Médiane	Coefficient de variation	Minimum	Date	Maximum	Date
COT	0.8	0.92	0.5	115%	0.5		4.66	24/11/2009
pH	7.86	0.12	7.85	1.50%	7.56	03/03/2009	8.22	02/02/2009
Oxygène dissous	5.52	0.39	5.45	7.10%	4.9	12/01/2009	6.8	25/08/2009

Figure 76 : Evolution du pH, de l’oxygène dissous et du COT aux Arces, en 2009



	Moyenne	Ecart type	Médiane	Coefficient de variation	Minimum	Date	Maximum	Date
COT	1.49	3.1	0.5	208%	0.5		17.5	10/03/2009
pH	7.62	0.12	7.61	1.60%	7.42	10/03/2009	8	22/01/2009
Oxygène dissous	4.82	0.44	4.75	9.10%	4.2		6.1	

Figure 77 : Evolution du pH, de l’oxygène dissous et du COT au Col du Feu, en 2009

### La source de l'Epinguy (cf. Figure 78)

La valeur moyenne du pH est modérée par rapport aux autres sources avec 7.84 unité pH. La médiane est de 7.83 unité pH (la moyenne est légèrement influencée par de fortes valeurs). L'écart type est de 0.1 et le coefficient de variation est de 1.6 %. Le minimum est enregistré le 10 mars (7.59 unité pH) et le maximum est apparu le 7 juillet (8.11 unité pH).

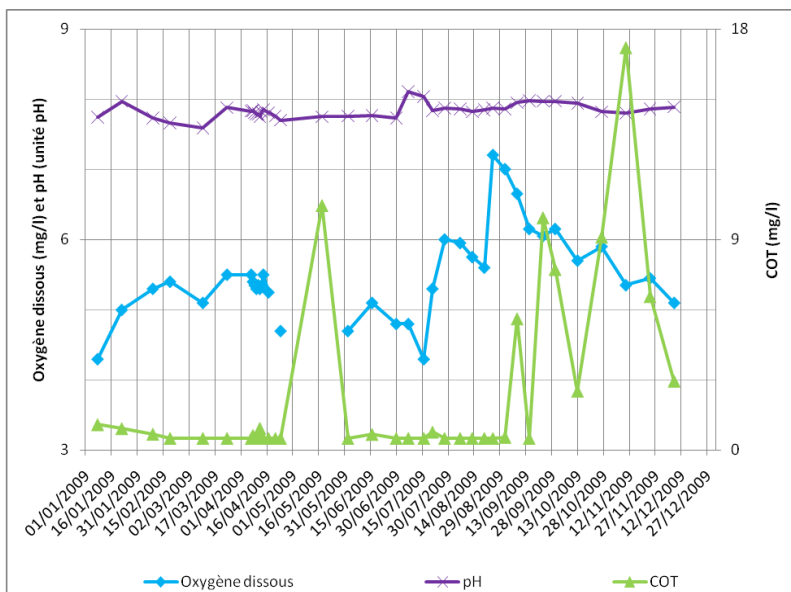
La valeur moyenne de l'oxygène dissous est élevée par rapport aux autres sources avec 5.48 mg/l. La médiane est de 5.35 mg/l (la moyenne est influencée par de fortes valeurs). L'écart type est de 0.64 et le coefficient de variation est de 11.7 %. Le minimum est enregistré le 8 janvier et le 16 juillet (4.3 mg/l) et le maximum est apparu le 25 août (7.2 mg/l). De janvier à fin juillet, les valeurs sont en-dessous de la moyenne puis elles augmentent pour atteindre les pics du 25 août et du 1<sup>er</sup> septembre (7 mg/l). Après, les valeurs diminuent pour être en-dessous de la moyenne à partir de novembre et jusqu'à la fin de l'année.

La valeur moyenne du COT est élevée par rapport aux autres sources avec 2.29 mg/l. La médiane est de 0.5 mg/l (la moyenne est influencée par des fortes valeurs). L'écart type est de 3.78 et le coefficient de variation est de 165 %. Le minimum est enregistré 22 fois sur 39 analyses (0.5 mg/l) et le maximum est apparu le 10 novembre (17.2 mg/l). La valeur du 18 mai (10.45 mg/l) est en lien avec les précipitations du 8 au 18 mai (36 mm de pluie à Très le Mont). La valeur du 8 septembre (5.61 mg/l) est en relation avec les précipitations du 1<sup>er</sup> au 4 septembre (52.4 mm de pluie à Très le Mont). La valeur du 23 septembre (9.93 mg/l) est la conséquence des précipitations du 16 au 28 septembre (14 mm de pluie à Très le Mont). La valeur du 27 octobre (9.1 mg/l) est en lien avec les précipitations du 21 au 27 octobre (14 mm de pluie à Très le Mont). Le pic du 10 novembre est une réponse aux précipitations du 2 au 7 novembre (43 mm de pluie à Très le Mont).

### La source des Favrats (cf. Figure 79)

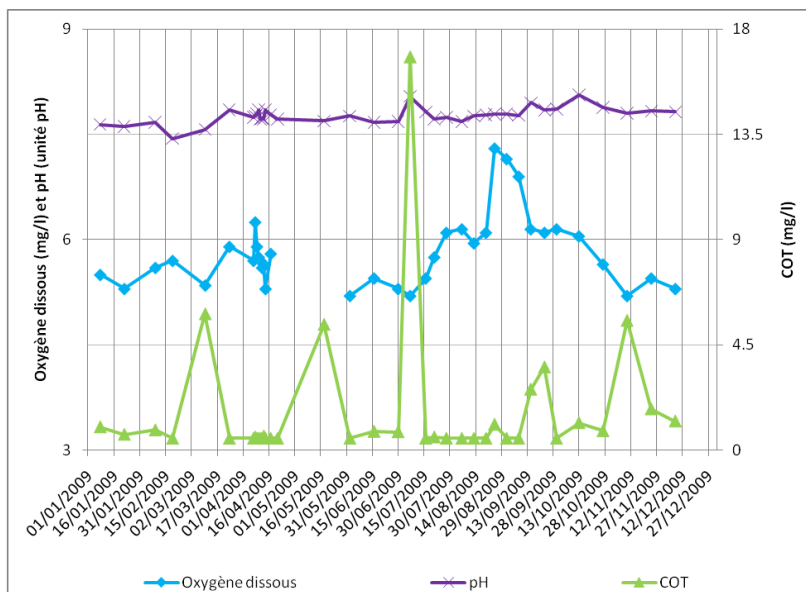
La valeur moyenne du pH est modérée par rapport aux autres sources avec 7.77 unité pH. La médiane est de 7.77 unité pH. L'écart type est de 0.12 et le coefficient de variation est de 1.5 %. Le minimum est enregistré le 19 février (7.44 unité pH) et le maximum est apparu le 13 novembre (8.06 unité pH).

La valeur moyenne de l'oxygène dissous est élevée par rapport aux autres sources avec 5.81 mg/l. La médiane est de 5.7 mg/l (la moyenne est influencée par de fortes valeurs). L'écart type est de 0.51 et le coefficient de variation est de 8.8 %. Le minimum survient le 2 juin et le 7 juillet (5.2 mg/l). Le maximum apparaît le 25 août (7.3 mg/l). De janvier à juillet, les valeurs sont en-dessous de la moyenne (sauf le 8 avril avec une valeur de 6.25 mg/l) puis elles augmentent pour atteindre les pics du 25 août et du 1<sup>er</sup> septembre (7.15 mg/l). Après, les valeurs diminuent pour être en-dessous de la moyenne à partir de fin novembre et jusqu'à la fin de l'année.



	Moyenne	Ecart type	Médiane	Coefficient de variation	Minimum	Date	Maximum	Date
COT	2.29	3.78	0.5	165 %	0.5		17.2	10/11/2009
pH	7.84	0.1	7.83	1.3 %	7.59	10/03/2009	8.11	07/07/2009
Oxygène dissous	5.48	0.64	5.35	11.7 %	4.3		7.2	25/08/2009

Figure 78 : Evolution du pH, de l’oxygène dissous et du COT à l’Epinguy, en 2009



	Moyenne	Ecart type	Médiane	Coefficient de variation	Minimum	Date	Maximum	Date
COT	1.61	2.91	0.53	180.7 %	0.5		16.8	07/07/2009
pH	7.77	0.12	7.77	1.5 %	7.44	19/02/2009	8.06	13/10/2009
Oxygène dissous	5.81	0.51	5.7	8.8 %	5.2		7.3	25/08/2009

Figure 79 : Evolution du pH, de l’oxygène dissous et du COT aux Favrats, en 2009

La valeur moyenne du COT est modérée par rapport aux autres sources avec 1.61 mg/l. La médiane est de 0.53 mg/l (la moyenne est influencée par des fortes valeurs). L'écart type est de 2.91 et le coefficient de variation est 180.7 %. Le minimum est enregistré 19 fois sur 38 analyses (0.5 mg/l) et le maximum est apparu le 7 juillet (16.8 mg/l). La valeur du 10 mars est en relation avec la fusion nivale. La valeur du 18 mai est en lien avec les précipitations du 8 au 18 mai (36 mm de pluie à Très le Mont). Le pic du 7 juillet est une réponse aux précipitations du 7 juillet (20 mm de pluie à Très le Mont). La valeur du 23 septembre est en relation avec les précipitations du 17 au 23 septembre (13 mm de pluie à Très le Mont). La valeur du 10 novembre est en lien avec les précipitations du 2 au 7 novembre (43 mm de pluie à Très le Mont).

#### La source des Granges Mamet (cf. Figure 80)

La valeur moyenne du pH est faible par rapport aux autres sources avec 7.64 unité pH. La médiane est de 7.6 unité pH (la moyenne est influencée par de fortes valeurs). L'écart type est de 0.17 et le coefficient de variation est de 2.2 %. Le minimum est enregistré le 30 juin (7.43 unité pH) et le maximum est apparu le 12 février (8.08 unité pH).

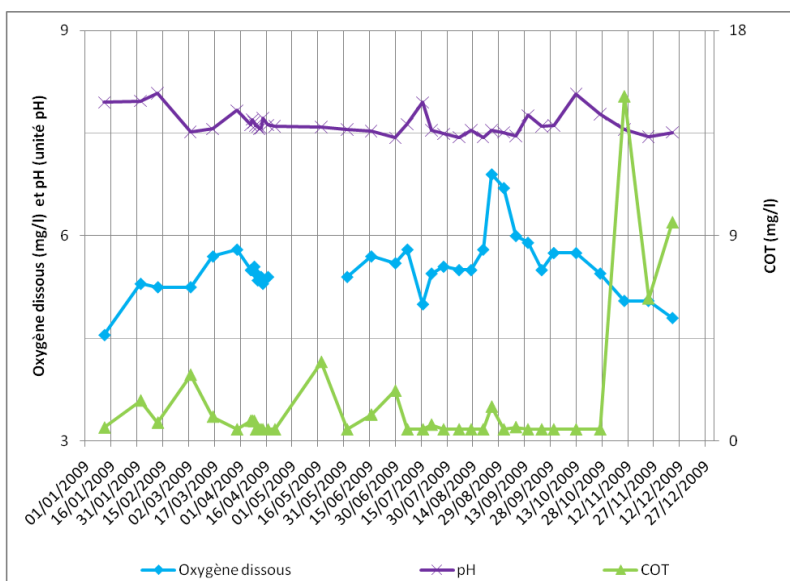
La valeur moyenne de l'oxygène dissous est élevée par rapport aux autres sources avec 5.52 mg/l. La médiane est de 5.5 mg/l (la moyenne est légèrement influencée par de fortes valeurs). L'écart type est de 0.43 et le coefficient de variation est de 7.8 %. Le minimum est enregistré le 12 janvier (4.55 mg/l) et le maximum est apparu le 25 août (6.9 mg/l). De janvier à mi-août, les valeurs sont en-dessous de la moyenne (sauf le 16 et le 30 mars avec des valeurs de 5.7 et de 5.8 mg/l) puis elles augmentent pour atteindre les pics du 25 août et du 1<sup>er</sup> septembre (6.7 mg/l). Après, les valeurs diminuent pour être en-dessous de la moyenne à partir de fin octobre et jusqu'à la fin de l'année.

La valeur moyenne du COT est modérée par rapport aux autres sources avec 1.6 mg/l. La médiane est de 0.5 mg/l (la moyenne est influencée par de fortes valeurs). L'écart type est de 2.87 et le coefficient de variation est de 179.4%. Le minimum est enregistré 20 fois sur 38 analyses (0.5 mg/l) et le maximum est apparu le 10 novembre (15.1 mg/l). Les valeurs du début d'année sont en relation avec les périodes de fusion nivale. La valeur du 18 mai (3.46 mg/l) est en lien avec les précipitations du 8 au 18 mai (36 mm de pluie à Très le Mont). Les valeurs du 16 et du 30 juin (1.15 et 2.2 mg/l) sont en rapport avec les précipitations du 8 au 16 juin (27.2 mm de pluie à Très le Mont) et du 26 et 27 juin (25.4 mm de pluie à Très le Mont). La valeur du 25 août (1.5 mg/l) est une réponse aux précipitations du 25 août (41 mm de pluie à Très le Mont). Les valeurs du 10 novembre, du 24 novembre (6.24 mg/l) et du 8 décembre (9.58 mg/l) sont en lien avec les précipitations automnales.

#### La source de Moises 1 (cf. Figure 81)

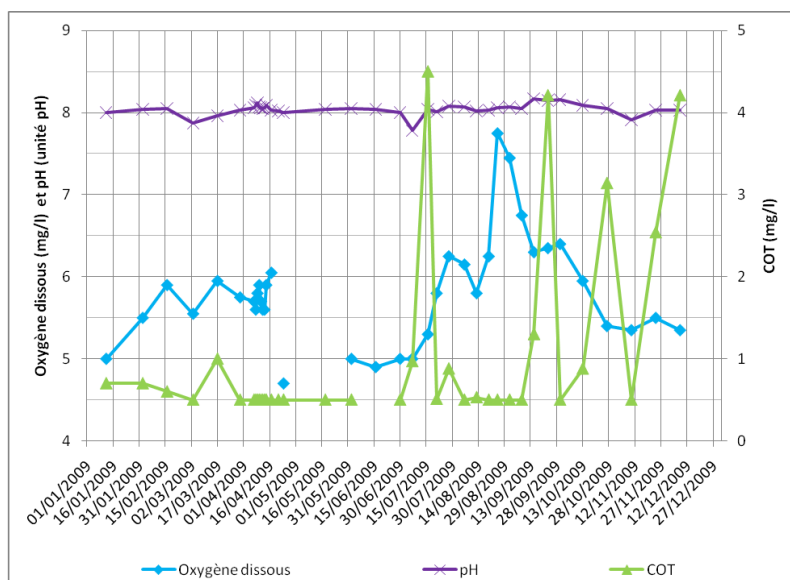
La valeur moyenne du pH est élevée par rapport aux autres sources avec 8.04 unité pH. La médiane est de 8.05 unité pH (la moyenne est légèrement influencée par de faibles valeurs). L'écart type est de 0.07 et le coefficient de variation est de 0.9 %. Le

minimum est enregistré le 7 juillet (7.78 unité pH) et le maximum est apparu le 15 septembre (8.17 unité pH).



	Moyenne	Ecart type	Médiane	Coefficient de variation	Minimum	Date	Maximum	Date
COT	1.6	2.87	0.5	179.4%	0.5		15.1	10/11/2009
pH	7.64	0.17	7.6	2.2%	7.43	30/06/2009	8.08	12/02/2009
Oxygène dissous	5.52	0.43	5.5	7.8%	4.55	12/01/2009	6.9	25/08/2009

Figure 80 : Evolution du pH, de l’oxygène dissous et du COT aux Granges Mamet, en 2009



	Moyenne	Ecart type	Médiane	Coefficient de variation	Minimum	Date	Maximum	Date
COT	1	1.12	0.5	112 %	0.5		4.5	16/07/2009
pH	8.04	0.07	8.05	0.9%	7.78	07/07/2009	8.17	15/09/2009
Oxygène dissous	5.79	0.64	5.75	11.1 %	4.7	24/04/2009	7.75	25/08/2009

Figure 81 : Evolution du pH, de l’oxygène dissous et du COT à Moises 1, en 2009