

Académie d'Aix-Marseille
Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse

thèse
pour obtenir le grade de docteur de l'Université d'Avignon et des pays de Vaucluse

Discipline: Sciences de la Terre
Spécialité: Hydrogéologie
Ecole Doctorale 380 – Sciences et Agronomie

Présentée par
Rémi de La Vaissière

Etude de l'aquifère néogène du Bas-Dauphiné

Apports de la géochimie et des isotopes dans le fonctionnement hydrogéologique du bassin de Valence (Drôme, Sud-Est de la France)

Soutenue le 17 Mai 2006 devant le jury composé de:

O. Banton	Professeur, Université d'Avignon	Examinateur
B. Blavoux	Professeur, Université d'Avignon	Directeur de thèse
G. Clauzon	Maître de Conférence (H.C.), CEREGE	Examinateur
G. Faure	Docteur, Idées-Eaux Bourg/Péage	Examinateur
J. Mudry	Professeur, Université de Besançon	Rapporteur
G.M. Zuppi	Professeur, Université de Venise	Rapporteur
J-L. Bonnet	Président, SIE Sud Valentinois	Invité
L. Cadilhac	Ingénieur, Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse	Invité

Avant-propos

Cela fait maintenant plus de trois ans, presque quatre que j'ai débuté ce passionnant travail mais ô combien difficile et fastidieux. L'arrivée dans la région ne fut pas facile, les campagnes d'échantillonnages furent aussi très longues et chaudes surtout en pleine canicule 2003. Cependant, les moments difficiles s'estompent devant les bons souvenirs tels que les apéros en fin de semaine au bureau ou bien quelques fois chez les agriculteurs, les parties de pétanque ou de freesbee...ou la sortie spéléo avec Laurent et Anne. Il y a évidemment l'exaltation intellectuelle de voir s'imbriquer les résultats dans un ensemble cohérent.

Cette étude n'aurait pas pu voir le jour sans la rencontre de quatre mousquetaires qui sont Jean-Louis Bonnet, président du Syndicat Intercommunal des Eaux du Sud Valentinois, Jean-Claude Métrailler son fidèle vice-président, Guy Faure directeur du bureau d'étude Idées-Eaux et Laurent Cadilhac de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse. Je n'oublie pas non plus Anne Martelat de la DIREN Rhône-Alpes qui était aux premières loges dans la préparation et le suivi du projet. Inquiets devant l'utilisation sans cesse croissante de cette ressource et devant les signes de sa dégradation, ils ont su convaincre les autres collectivités territoriales de financer cette étude d'envergure. Je tiens donc à les en remercier.

Mes remerciements vont aussi à Madame Bes, présidente du Syndicat Intercommunal des Eaux de la Plaine de Valence et au personnel du syndicat pour avoir pris la charge administrative de cette étude.

Je remercie vivement mes deux directeurs de thèse, Bernard Blavoux (Université d'Avignon) et Guy Faure (Idées-Eaux), pour m'avoir accueilli dans leurs bureaux respectifs et m'avoir toujours poussé vers l'avant, ainsi que pour leurs disponibilités.

Je remercie sincèrement Jacques Mudry (Université de Besançon) et Gian Maria Zuppi (Université de Venise) d'avoir accepté d'être rapporteurs de mon travail de recherche, Olivier Banton pour avoir présidé le jury de soutenance et pour nos discussions fructueuses. Je tiens à remercier en particulier Georges Clauzon (CEREGE) pour m'avoir inculqué le goût de la géologie et fait découvrir cette spectaculaire crise messinienne.

Je tiens aussi à remercier la grande famille Drômoise avec bien sur le personnel d'Idées-Eaux (permanent ou de passage). Il y bien sur Guy & Zizou (encore merci pour le déménagement, le matelas et plein d'autre chose), Jérôme, Pierre-Yann, Florian, Mathieu, Nicolas et Benoît. Un remerciement spécial revient à Simon, Lisbeth son amie et ses parents (pâte de coing, repas d'apéro délicieux et gargantuesques). Je souhaite vivement remercier les entreprises de forages qui m'ont toujours bien accueilli et donné des informations. Il y a bien sur Aquifore (Jean-Luc, Nathalie, Marshella, Sylvain et la dream team), Abyss (Franck et Clarisse), l'entreprise Combet et Truchet. Une mention spéciale revient à l'entreprise Briès Père & Fils et leurs employés qui m'ont apporté beaucoup d'informations. Il me revient à l'esprit la discussion avec Mr Bries père qui m'a proposé de survoler ma zone d'étude afin de se remémorer des forages effectués il y a 30 ans!

Mes prélèvements n'auraient pas pu se faire sans la participation des agriculteurs, des particuliers et des entreprises. Je les en remercie très chaleureusement. Je remercie l'ensemble des collectivités territoriales pour m'avoir permis d'accéder aux données (SIE, communes, DDAF, Conseil Général ...). Je remercie également toutes les personnes qui m'ont donné des informations et aidé à avancer, notamment: Jean Lafosse (ancien hydrogéologue du département), François Dubocs de la Chambre d'Agriculture de la Drôme, Mr Flachaire vice-président du SI Canal de la Bourne, François Dols et Pierre-Marie Bechon de la DIREN Rhône-Alpes, Philippe Berna de la Général des Eaux, Franck Hanot et Olivier Serrano du BRGM Orléans, Christophe Rigolet de Gaz de France. Mes remerciements vont aussi à Michel Bakalowicz qui m'a toujours encouragé depuis le Liban, à Eric Siwertz et Georges Truc pour leurs conseils.

Je tiens ensuite à remercier tous les membres du Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon: Yves Travi pour ses encouragements, Vincent Vallès pour son aide en géochimie, pour les discussions sur le carbone 13 avec Christophe Emblanch, sur l'hydrologie avec Vincent Marc et Anne-Laure Cognard-Planq, sur le karst avec Jean-Michel Puig, sur la géologie avec Yves Bellion et Claude Galzi ; un grand merci aussi à Dominique Pawłowski, Ginette Daniel et Richard Barrachia pour leur aide et leur bonne humeur. Ce document n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide de Michel Daniel et Roland Simler pour les prélèvements carbone 14, les analyses au laboratoire. Je remercie Roland d'avoir toujours été à l'écoute des améliorations à apporter à son logiciel Diagramme. Mes remerciements vont

aussi aux anciens du Centre Géodynamique de Thonon pour mes analyses tritium et en particulier à Milanka Babic nouvellement arrivée au labo. Un grand merci aux thésards du labo, Frédéric (dont la délivrance est proche), Benjamin, Maxime, Edith, Cécile, Véronique, Thibault et Sylvain dont leur amitié et les discussions ont été enrichissants pour moi.

Pour finir et comme le veut l'usage, je remercie mes proches qui m'ont toujours soutenu et encouragé: mes parents, mes frères et belles-sœurs, ma grand-mère et mes amis éparpillés au quatre coins de la France. Enfin, je dédie ce travail à Lattana, ma moitié, qui a supporté mes absences et qui m'a toujours épaulé lors de mes moments de découragement.

Table des matières

Introduction	10
Partie I Cadre de l'Etude	15
Chapitre 1 Géologie	17
1.1 Présentation générale	17
1.2 Genèse du bassin et stratigraphie	20
1.2.1 Naissance et fermeture du bassin subalpin	20
1.2.2 Le rift ouest européen	23
1.2.3 Le sillon subalpin	25
1.2.4 La crise messinienne et le cycle pliocène	32
1.2.5 La dynamique glaciaire et le relief actuel	39
1.3 Connaissances nouvelles sur le bassin de Valence	43
1.3.1 Base de données	43
1.3.2 Géométrie du bassin	45
1.4 Sédimentologie du Néogène	52
1.4.1 La molasse miocène	52
1.4.2 Le remplissage des canyons messiniens	57
1.5 Synthèse	60
Chapitre 2 Hydrogéologie	61
2.1 Climatologie et pluie efficace	61
2.1.1 Description régionale	61
2.1.2 Pluviométrie de la zone d'étude	62
2.1.3 Evapotranspiration	64
2.1.4 Calcul de la pluie utile	65
2.1.5 Incertitudes sur la pluie utile	66
2.2 Hydrogéologie générale	67
2.2.1 Les alluvions du Rhône, de l'Isère et de la Drôme	67
2.2.2 Les cailloutis d'Alixan	68
2.2.3 Les ressources karstiques	69
2.2.4 La molasse miocène	70
2.3 Hydrogéologie de l'aquifère néogène	70
2.3.1 Piézométrie	70
2.3.2 Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère néogène	77

2.4 Relations avec les eaux de surface	85
2.4.1 Comparaison module et pluie efficace estimée	85
2.4.2 Données bibliographiques	86
2.4.3 Jaugeages différentiels	87
2.5 Equilibre eaux souterraines, nappe superficielle et écoulements de surface	93
2.6 Conclusions	95
2.7 Synthèse 'cadre de l'étude'	96
Partie II Investigations	97
Préambule à la partie investigations	99
Chapitre 3 Géochimie des eaux souterraines	103
3.1 Familles d'eau	103
3.1.1 Les aquifères superficiels	103
3.1.2 La nappe profonde	111
3.1.3 Commentaires	117
3.2 Acquisition de la minéralisation	117
3.2.1 Le rôle des carbonates	117
3.2.2 Le rôle des argiles	123
3.2.3 Les minéraux silicatés	126
3.2.4 Les apports anthropiques	129
3.2.5 Commentaires	133
3.3 Répartition géographique	135
3.3.1 Lignes d'écoulements	135
3.3.2 Distribution spatiale des éléments	139
3.4 Conclusions	153
Chapitre 4 Les isotopes de la molécule d'eau	155
4.1 Le tritium	155
4.1.1 Principe	155
4.1.2 Données tritium	157
4.1.3 Répartition spatiale des activités tritium de l'aquifère néogène	161
4.1.4 Evolution dans le temps sur quelques forages	165
4.2 Les isotopes stables: Oxygène 18 (^{18}O) et Deutérium (^2H ou D)	169
4.2.1 Principes du marquage naturel	169
4.2.2 Données	171

4.2.3	Marquage isotopique: les droites météoriques	173
4.2.4	Interprétation des teneurs isotopiques	176
4.2.5	Relation ^{18}O - ^2H	181
4.2.6	Altitude des bassins d'alimentations	186
4.3	Conclusions	190
Chapitre 5 Datation des eaux		191
5.1	Principes	191
5.1.1	Le carbone 13	192
5.1.2	Le carbone 14	194
5.1.3	Principe du traçage isotopique du Carbone Minéral Total Dissous (C.M.T.D.)	196
5.2	Les eaux de l'aquifère néogène	202
5.2.1	Signatures isotopiques des eaux et réservoirs	202
5.2.2	Teneurs en isotopes du CMTD des eaux	206
5.3	Calculs de l'âge de l'eau	208
5.3.1	Définition d'un indice de temps de séjour	208
5.3.2	Application des modèles correction	210
5.3.3	Relation activité carbone 14 et teneur en carbone 13	212
5.3.4	Effet de la dissolution de dolomite et de la précipitation de la calcite	216
5.4	Conclusions	222
5.5	Synthèse 'investigations'	223
Partie III Synthèse		225
Chapitre 6 Fonctionnement de l'aquifère		227
6.1	Circulation de l'eau souterraine	227
6.1.1	Hydrodynamique et hydrocinétique souterraine	227
6.1.2	Comparaison des vitesses hydrauliques et des vitesses isotopiques réelles (V_{ir})	229
6.1.3	Modèle conceptuel de l'écoulement de l'eau souterraine	232
6.1.4	Circulations préférentielles	234
6.2	Vitesses d'écoulements de l'eau dans l'aquifère	235
6.2.1	Exemple de la vallée de la Joyeuse	235
6.2.2	Vitesses moyennes	239
6.2.3	Mélanges d'eaux	240
6.3	Fonctionnement de l'aquifère par sections d'écoulements	242
6.3.1	Plaine de Valence	243

TABLE DES MATIERES

6.3.2	Bassin de Crest	247
6.3.3	Drôme des Collines	248
6.4	Conclusions	251
Chapitre 7 Etat de la ressource		253
7.1	Bilan quantitatif de l'aquifère molassique	253
7.1.1	Volume aquifère	253
7.1.2	Entrées dans le système	254
7.1.3	Les prélèvements	257
7.1.4	Comparaison prélèvements/entrées	259
7.1.5	Les sorties naturelles de la nappe	259
7.2	Atteintes qualitatives à l'aquifère molassique	262
7.2.1	Les nitrates	262
7.2.2	Campagne pesticides	264
7.3	Evaluation des échanges: exemple de la nappe de Romans	269
7.4	Conclusions	271
Conclusions générales		273
Bibliographie		279
Annexes		291
Liste des figures & tableaux		333

Introduction

Dans la région Rhône-Alpes, les bassins molassiques tel que celui de Valence constituent la réserve d'eau souterraine la plus importante. Cette ressource en eau est d'autant plus précieuse qu'elle est de très bonne qualité en particulier pour l'AEP¹. Les aquifères molassiques ont été reconnus dans le SDAGE² Rhône-Méditerranée-Corse comme aquifères à forte valeur patrimoniale, encore peu sollicités, à préserver pour les générations futures. Le bassin molassique de Valence situé au Nord du département de la Drôme constitue une ressource importante pour l'eau potable mais aussi pour l'irrigation. Sa population est de l'ordre de 270000 habitants dont les deux tiers sont concentrés dans les agglomérations (Valence, Romans) et cette région est largement tournée vers l'agriculture avec une Surface Agricole Utilisée (S.A.U.) représentant 56 % de la surface totale du bassin de Valence (1600 km²) et avec une surface irriguée de 23 % (chiffre RGA 2000).

L'utilisation de cette ressource pour l'eau potable a débuté dans les années 1950 mais la ressource principale a été, jusque dans les années 1980-1990, la nappe des alluvions quaternaires. Devant l'augmentation des teneurs en nitrate dans la nappe superficielle, les communes et les syndicats des eaux se sont tournés vers l'aquifère molassique sous-jacent. D'un autre coté, l'utilisation de l'aquifère molassique pour l'agriculture s'est elle aussi largement développée au cours de ces 30 dernières années. Aucun signe de surexploitation de l'aquifère molassique n'a été décelé mais il apparaît localement une dégradation progressive de la qualité, liée aux pollutions diffuses d'origine agricole.

Sous l'impulsion de Jean-Louis Bonnet, Laurent Cadilhac et Guy Faure, les collectivités territoriales de la Drôme avec l'aide du Conseil Général, l'Agence de l'Eau et de la MISE ont donc décidé de lancer un projet d'étude visant à améliorer la connaissance du fonctionnement hydrogéologique de ce système pour organiser la gestion de ce patrimoine. Les objectifs fixés au cahier des charges du projet d'étude de l'aquifère de la molasse miocène du Bas-Dauphiné visaient l'amélioration de la connaissance sur les thèmes suivants:

¹ Alimentation en Eau Potable.

² Schéma Directeur d'Aménagement Général des Eaux.

- préciser la lithologie et la géométrie du réservoir, pour estimer la variabilité latérale et verticale de la vulnérabilité aux pollutions depuis la surface du sol ;
- définir l'état qualitatif de la nappe et préciser les variations latérales et verticales de la qualité des eaux ;
- évaluer les réserves, la recharge et les ressources exploitables de la nappe ;
- déterminer les temps de renouvellement ;
- recenser les ouvrages existants, leur position géographique, leurs caractéristiques lithologiques et techniques, leurs débits ;
- décrire les relations entre la nappe du miocène et les cours d'eau de surface ;
- préciser les relations entre la nappe de la molasse et les nappes d'alluvions quaternaires superposées ;
- actualiser les données existantes sur l'aquifère et organiser leur archivage dans une base de données informatique en liaison avec un système d'information géographique et organiser les modalités de sa mise à jour.

Ce vaste programme nécessitait donc l'acquisition des données quantitatives et qualitatives.

Les données **quantitatives** ont été acquises tout d'abord en utilisant les documents bibliographiques existants, puis à partir d'investigations de terrain et simultanément par la réinterprétation de données de sismique réflexion. Ces investigations de terrain regroupent les mesures faites sur des forages déjà en fonctionnement, les échanges d'informations avec les entreprises de forages (suivi de chantier en cours de réalisation) mais aussi le jaugeage différentiel de quelques rivières. Elles ont abouti à la constitution d'une base de données. Cependant, devant la complexité de cet aquifère très étendu et la dégradation de sa qualité, nous avons axé notre travail d'investigation sur une approche principalement **qualitative**. Cette approche est basée sur l'utilisation des outils géochimiques (éléments majeurs) et isotopiques (molécule d'eau et carbone). Ces outils ont montré leur efficacité pour appréhender le fonctionnement de systèmes hydrogéologiques complexes. Ils permettent ainsi:

- de définir des zones d'alimentation ou des conditions de recharge;
- d'évaluer l'étendue d'une pollution anthropique et par corollaire le degré de protection de la ressource;

- de suivre l'évolution de la minéralisation au cours de l'écoulement souterrain;
- de montrer et quantifier des flux entre réservoirs (profonds et superficiels);
- d'estimer le temps de séjour de l'eau dans l'aquifère;
- de proposer un schéma conceptuel de fonctionnement de l'aquifère.

Nous avons du acquérir de nouvelles données grâce à plusieurs campagnes de prélèvements des eaux des différents réservoirs du bassin de Valence (eaux souterraines et superficielles). Tous les résultats chimiques et isotopiques ainsi que ceux provenant de l'approche quantitative ont été regroupés dans la base de données.

Ce présent document développe l'aspect scientifique de cette étude et permet d'apporter une contribution originale à l'utilisation des traceurs géochimiques et isotopiques. Un second document, à l'attention des collectivités territoriales de la Drôme, synthétisera les résultats essentiels de ce mémoire et proposera des règles de gestion et protection de cette ressource.

Ce mémoire de thèse s'articule en sept chapitres qui sont regroupés en trois parties:

- La première partie "cadre de l'étude" présente :
 - **la géologie (chapitre 1).** Il retracera l'évolution géologique du bassin de Valence, précisera la géométrie du réservoir grâce à la réinterprétation de deux profils sismiques et la mise en perspective des informations reportées dans la base de données.
 - **l'hydrogéologie du bassin de Valence (chapitre 2).** Il présentera les ressources en eau du secteur étudié, la climatologie, l'hydrologie, la piézométrie et les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère néogène.
- La seconde partie "investigations" concerne les résultats provenant de l'utilisation des outils géochimiques et isotopiques. En préambule à cette partie, les échantillonnages et les analyses développées au cours de ce travail sont présentés. Cette partie est divisée en trois chapitres qui présentent tour à tour:
 - **les résultats de la chimie des éléments majeurs (chapitre 3).** Il mettra en évidence les mécanismes géochimiques dans l'acquisition de la minéralisation et l'influence anthropique.

- **les isotopes de la molécule d'eau - tritium, oxygène 18 et deutérium - (chapitre 4).**
Il précisera les zones d'alimentation et le renouvellement de la ressource.
 - **la datation des eaux par le carbone 14 (chapitre 5).** Il donnera une estimation du temps de résidence des eaux dans le réservoir.
-
- La dernière partie "synthèse" met en perspective tous les résultats. Elle est constituée de deux chapitres:
 - **fonctionnement de l'aquifère (chapitre 6).** Un schéma de fonctionnement global de l'aquifère néogène du Bas-Dauphiné sera proposé.
 - **état de la ressource (chapitre 7).** Un bilan quantitatif et qualitatif de la ressource finalisera cette étude.

Ce travail a pu voir le jour grâce à la collaboration de divers organismes publics : ce sont les collectivités territoriales de la Drôme (DDAF, CA, CG, SIE et communes avec pour maître d'ouvrage le Syndicat Intercommunal des Eaux de la Plaine de Valence), celles de la région (Agence de l'Eau R-M-C et DIREN), le laboratoire d'Hydrogéologie de l'université d'Avignon et le bureau d'étude Idées Eaux, maître d'œuvre, en tant que conseiller technique. L'élaboration de ce travail a été suivie par un comité de pilotage composé des principaux intéressés. Deux rapports intermédiaires ont précédé ce document et nous avons présenté régulièrement l'état d'avancement de l'étude lors des réunions du comité de pilotage.

Partie I CADRE DE L'ETUDE

Chapitre 1 Géologie

Ce premier chapitre présente le cadre géologique et structural du bassin de Valence. Cette présentation constitue un préalable à toute étude de l'eau souterraine à une échelle régionale. Dans un premier temps, le cadre géographique du secteur étudié sera décrit. Nous présenterons ensuite l'histoire géologique et paléogéographique du bassin de Valence. La mise en perspective des données de forage et la réinterprétation de deux profils sismiques préciseront les limites du bassin et l'organisation sédimentaire des terrains néogènes.

1.1 PRESENTATION GENERALE

La région de Valence se situe dans le Sud-Est de la France, au niveau de la moyenne vallée du Rhône (figures 1-1 et 1-2). Le secteur d'étude est situé dans la partie Nord du département de la Drôme et couvre environ 1600 km². Les limites de la région étudiée correspondent :

- à l'Ouest, au Rhône, qui sépare les départements de l'Ardèche, de la Drôme ;
- au Nord, la vallée fluvio-glaciaire de Bièvre-Valloire ;
- au Nord-Est, la limite est imprécise et déborde légèrement du département et empiète sur le département de l'Isère ;
- à l'Est de Valence, aux premiers contreforts du Vercors ;
- au Sud, les reliefs périphériques oligocènes et crétacés de Livron à Crest.

Par ailleurs, cette grande région est séparée par l'Isère, en deux sous-secteurs aux reliefs bien distincts. En effet, on distingue une zone située au Nord de l'Isère de 900 km², constituée de collines molassiques et de plateaux dépassant, à l'Est, 500 m d'altitude (plateaux de Thivolet et de Chambaran), appelée « Drôme des Collines » ; d'une zone de plaine située au Sud appelée « Plaine de Valence » de 700 km². Bien que le relief soit moins marqué au Sud, des buttes molassiques s'individualisent au sein de la plaine comme par exemple la butte du Mont-Lagat, qui culmine à 418 m, les plateaux de Lautagne et de Fouillouse d'altitudes plus modestes.

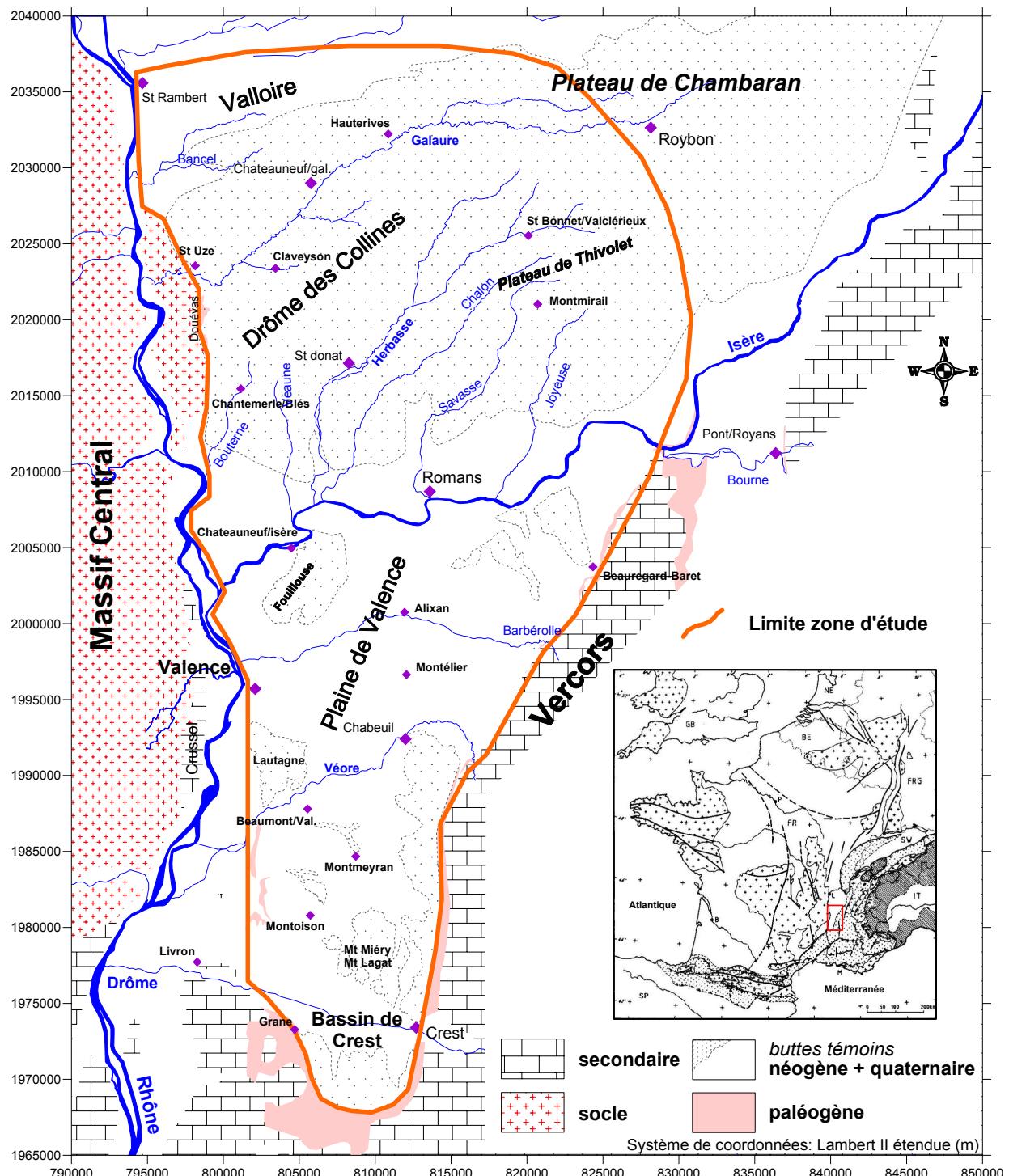


Figure 1-1: Présentation du secteur d'étude.

Les limites de la zone étudiée correspondent, excepté au Nord et au Nord-Est, à des terrains de nature parfois très différentes.

Dans le bassin de Valence, nous distinguons les dépôts d'âge miocène constitués principalement de sables molassiques³, plus ou moins grésifiés et/ou argileux, et de cailloutis à leurs sommets, où une puissante nappe aquifère circule objet de l'étude. Une bonne partie de ces dépôts est masquée par des recouvrements d'âges plus récents qui sont:

- D'une part, des argiles plus ou moins sableuses surmontées de cailloutis d'âge pliocène souvent masquées par les alluvions. Toutefois, quelques affleurements d'argiles subsistent notamment à l'Est de Chabeuil et sous forme de cailloutis au niveau des buttes de Montoison et de Montmeyran mais aussi au niveau de l'interfluve Valloire-Galaure.
- D'autre part, les alluvions et cailloutis d'âge quaternaire qui affleurent très largement (vallée fluvio-glaciaire de la Valloire, cailloutis d'Alixan et alluvions de l'ancienne Isère au niveau de la plaine de Valence).

Ce bassin molassique s'est, en fait, surimposé sur un ancien fossé d'effondrement d'âge oligocène dont les affleurements sont assez restreints, uniquement en bordure de la plaine de Valence:

- à l'Ouest au niveau d'Etoile-sur-Rhône;
- au Sud de Grane à Crest;
- de manière discontinue en bordure du Vercors, de Crest jusqu'à Pont-en-Royans.

Ils sont composés principalement de calcaires, de marnes et de marnes sableuses.

Sous ces terrains, nous retrouvons aussi en affleurements les sables kaolinitiques rouge et blanc d'âge Eocène, exploités dans des carrières en bordure du Vercors (Beauregard-Baret) mais aussi en bordure du Massif Central (sables de Douevas).

Un des traits géologiques majeurs de la région est la dominante architecture du Vercors à l'Est de la plaine de Valence. Les plus proches sommets de la plaine dépassent mille mètres d'altitude. L'assise de ce vaste massif est composée de marnes et de calcaires d'âge crétacé. On retrouve ces assises d'âge crétacé dans le massif de Livron et autour du bassin de Crest.

³ cf. définition § 1.4.1

Les affleurements de terrains datant du Jurassique et du Trias sont inexistant sur notre secteur d'étude mais affleurent en rive droite du Rhône, côté ardéchois. Ils sont représentés, en face de Valence, par l'éperon de Crussol qui se prolonge vers le Sud-Ouest du coté de Privas. Le Jurassique se compose principalement de marnes et de calcaires tandis que le Trias se compose principalement de grès.

Enfin, le socle granitique du Massif Central constitue la bordure occidentale du bassin miocène. Il est constitué de roches plus ou moins métamorphosées, et de roches magmatiques de profondeur.

1.2 GENESE DU BASSIN ET STRATIGRAPHIE

L'histoire géologique et paléogéographique de la zone d'étude se conjugue sur près de 425 millions d'années (Ma). Nous nous bornerons dans les deux premiers paragraphes à décrire brièvement les grandes étapes de structuration de ce bassin jusqu'à l'Oligocène. Pour les phases suivantes du Miocène au Quaternaire, nous détaillerons la paléogéographie et la tectonique.

1.2.1 Naissance et fermeture du bassin subalpin

L'ouverture océanique du Sud-Est de la France a débuté dès le Trias vers -250 Ma par la déchirure de la plate-forme continentale hercynienne (Dercourt, 1997). Celle-ci s'accentue au Lias (-203 à -175 Ma) par une importante distension ESE-WNW (épisode du rift téthysien).

La zone qui nous intéresse peut se découper en deux domaines situés de part et d'autre d'une ligne approximative Grane - La Baume Cornillane, avec côté Sud-Est la zone effondrée et, au Nord-Ouest la plate-forme du Bas-Dauphiné. En effet, l'analyse des forages profonds montre un net approfondissement du Lias vers le Sud (figure 1-3). Par ailleurs, notre réinterprétation du profil sismique (transversale Nord-Sud) montre clairement le jeu important d'une faille synsédimentaire au Sud du forage profond de Montoison (voir annexe I). Ce phénomène distensif se poursuit jusqu'au Crétacé inférieur (-135 Ma). Du Lias au Jurassique supérieur, les faciès des dépôts sont essentiellement marneux et calcaires. Cependant, au Jurassique

supérieur s'individualisent, entre autres, les formations récifales du Tithonique en bordure du bassin. Dans le bassin, ce faciès se transforme en calcaires à base très fine en bancs massifs.

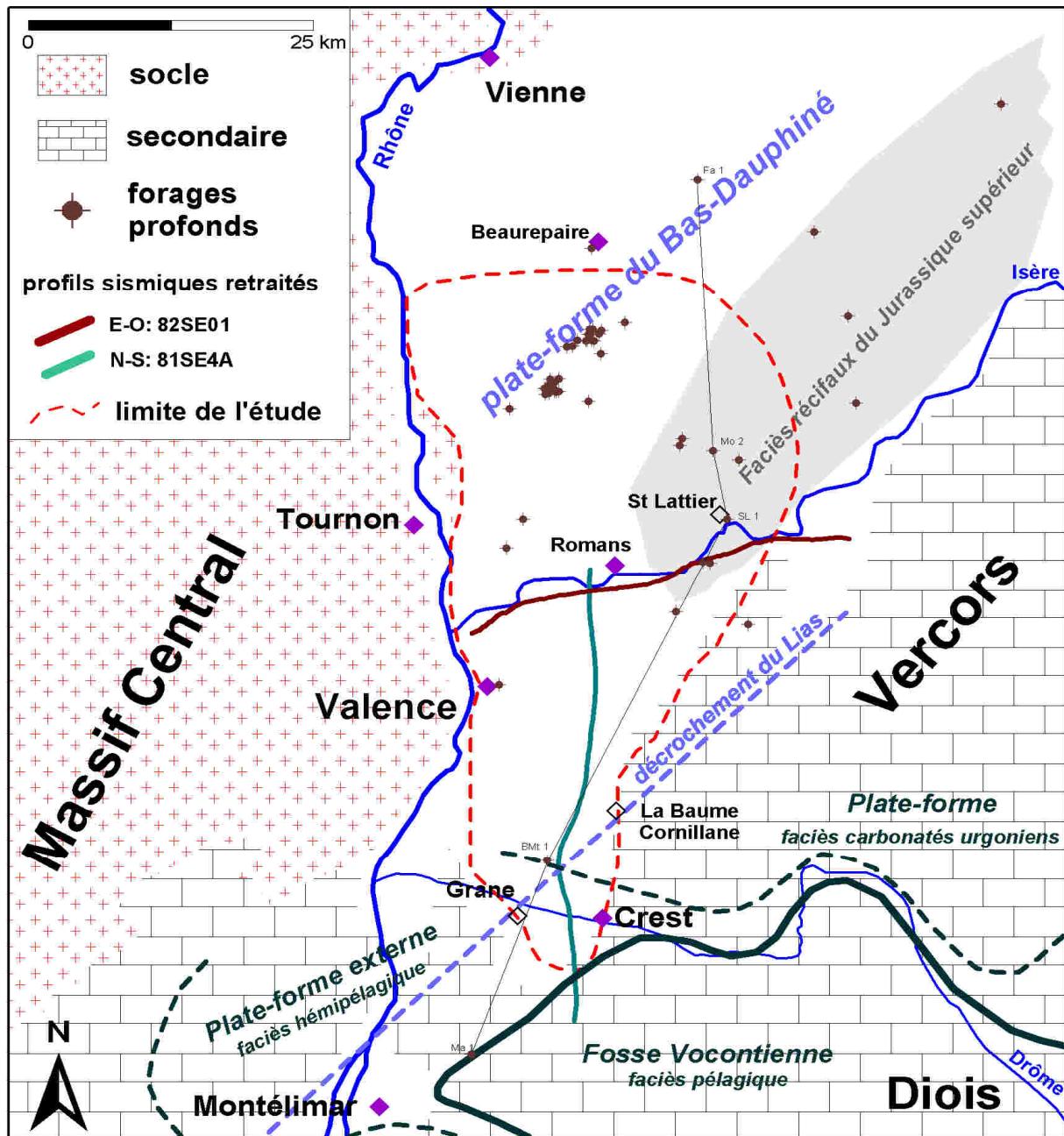


Figure 1-2: Situation géographique et contexte géologique général du bassin de Valence. Répartition des deux principaux faciès karstifiables du Secondaire (D'après Germain *et al.*, 1958 et Debrand-Passard *et al.*, 1984 modifié)

La fermeture du bassin téthysien, devenu bassin vocontien, provient d'une part de la conjugaison de la collision de l'Ibérie contre la plaque européenne et, d'autre part, du poinçonnement de la microplaque apulienne vers la plaque européenne.

Au Crétacé inférieur, la fosse vocontienne, bien identifiée dans le Diois, est entourée par une plate-forme périvocontienne qui comprend entre autre le Bas-Dauphiné et le secteur Ardéchois (figure 1-2) (Debrand-Passard *et al.*, 1984). Une zone de transition permet de joindre par un talus la plate-forme du Bas-Dauphiné à la fosse. On observe une évolution et un épaississement des séries marno-calcaires du Valanginien et de l'Hauterivien entre le forage de Saint-Lattier SL 1 (faciès de plate-forme) et le forage de Marsanne Ma 1 (faciès pélagique) (figure 1-3). Le forage de Montoison BMt 1 représente la transition avec un faciès hémipelagique (domaine de plate-forme externe). Du milieu et jusqu'à la fin du Crétacé inférieur (Barrémien-Aptien), nous avons la progradation vers le Sud-Est des calcaires récifaux à faciès Urgonien. Dans le Vercors, l'épaisseur de ces assises calcaires récifales est de l'ordre de 200 à 300 m. Cette épaisseur se réduit sous la plaine de Valence et n'est plus que d'une centaine de mètres aux forages de Montoison (BMt 1) et de Valence (GVa 1). Au forage de Marsanne, le Barrémien calcaire ne fait plus qu'une vingtaine de mètres.

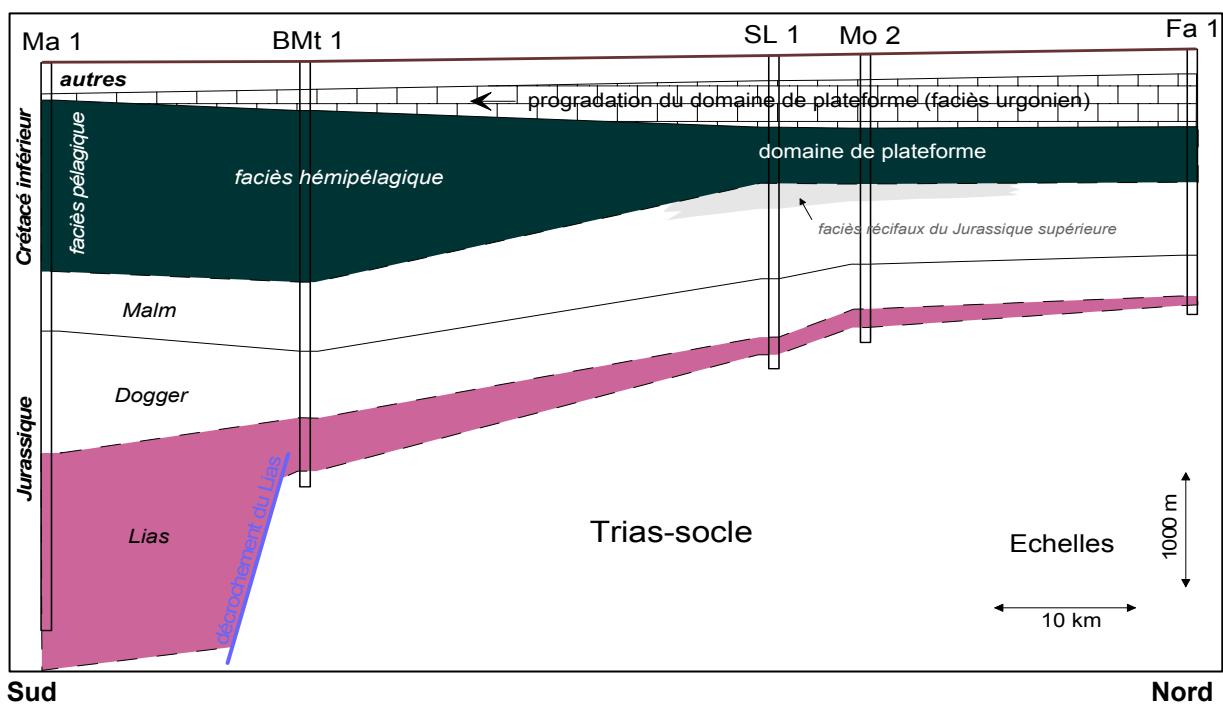


Figure 1-3: Sédimentation secondaire et faciès de transitions vers la fosse Vocontienne (plan de situation des forages sur la figure précédente) (d'après Mandier, 1988 modifié).

Au début du Crétacé supérieur, une importante phase régressive se développe dans une grande partie du Sud-Est, entraînant sa large émersion. Seul subsiste le golfe « rhodano-vocontien », diverticule de la mer alpine, mais ses limites demeurent imprécises (Debrand-Passard *et al.*, 1984). Le Crétacé supérieur se caractérise par une absence de dépôts et/ou érosion au Nord d'une ligne Grane/Saint-Lattier.

1.2.2 Le rift ouest européen

De la fin du Secondaire jusqu'au milieu du Tertiaire, se propage sur près de 1100 km une large déchirure de la plaque européenne, liée aux collisions des plaques Ibériques, Apulienne et Européenne, entre la mer du Nord et la Méditerranée Occidentale. Ces contraintes tectoniques donnent naissance à une série de grabens intra-continentaux de direction méridienne (Roer, Rhin, Bresse, Limagne, bassin de Valence, fossé d'Alès, fossé de Manosque et de Camargue) qui constituent le rift ouest européen (Debrand-Passard *et al.*, 1984; Dèzes *et al.*, 2004).

Au droit de notre secteur d'étude, les dépôts d'âges de la fin du Crétacé jusqu'au début de l'Eocène, sont absents du fait de l'exondation de ce secteur pendant toute cette période. C'est au cours de l'Eocène terminal que s'individualise la fosse de Valence (Dumas, 1988). A partir de cette époque et jusqu'à l'Oligocène terminal, le jeu de la tectonique et de la subsidence permet l'accumulation de plus de 2000 mètres de sédiments avec une épaisseur maximale cumulée de 1100 m de sels (figure 1-4). La tectonique joue un rôle primordial sur la nature et la puissance de ces dépôts. En effet, la tectonique crée, par le jeu subsident de certains secteurs, un réceptacle favorisant l'accumulation des dépôts salifères (Dumas, 1988). Par ailleurs, les directions tectoniques contrôlent l'alimentation en matériel détritique dans le bassin en guidant le réseau hydrographique. Pour permettre cette puissante accumulation de sédiments (plus de 2000 m), le rejet des failles bordières a été plus ou moins continu durant toute cette période.

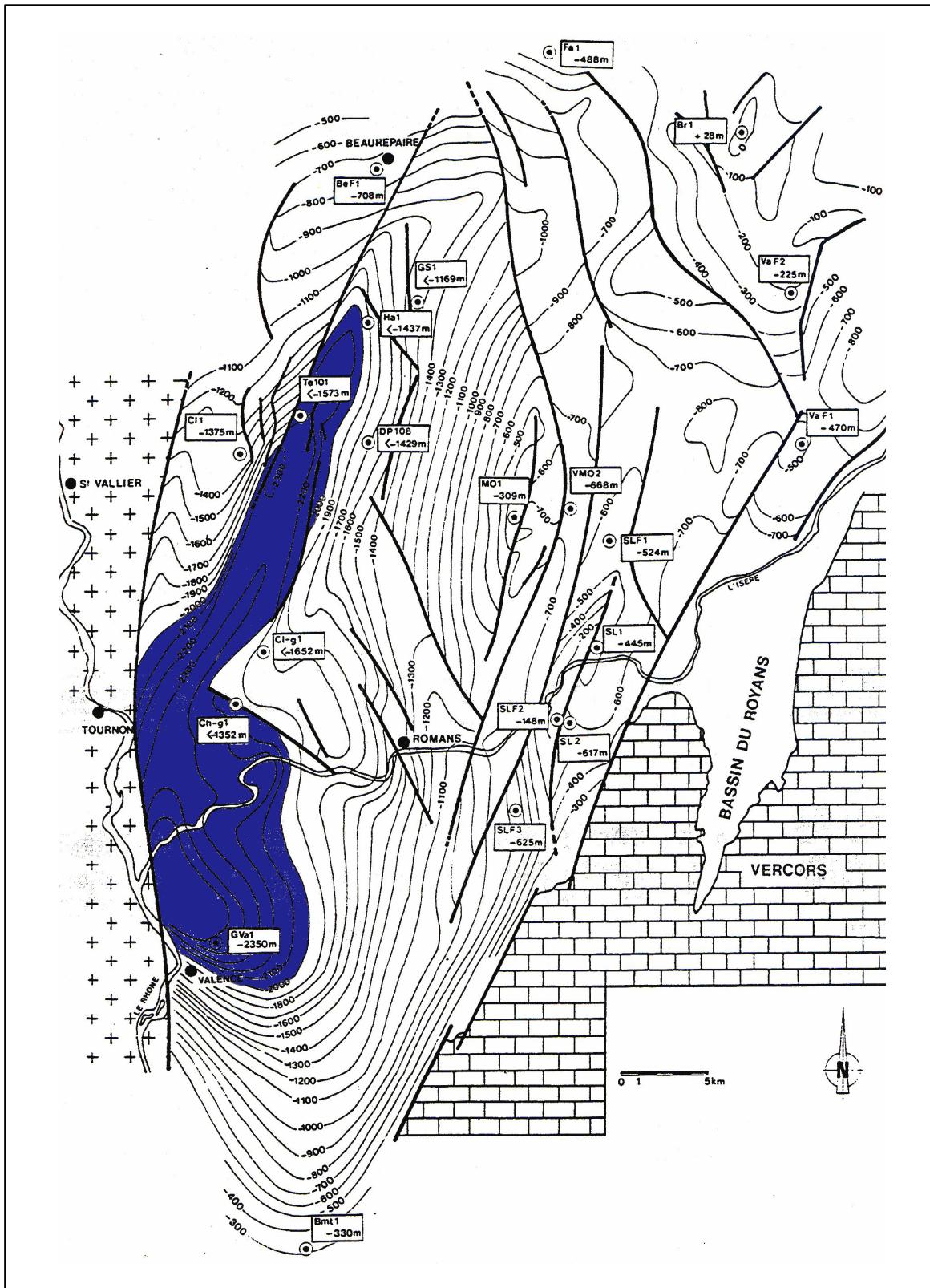


Figure 1-4: Carte des isobathes de la discordance du Paléogène sur le Crétacé ou le Jurassique et le socle (cotes NGF en mètres). En bleu correspond la zone profonde, supérieure à 2000 m de profondeur (d'après Dumas, 1988 modifié).

La résultante de ce contrôle tectonique sur la subsidence du bassin de Valence est la genèse d'une double dissymétrie (Dumas, 1988) :

- une première dissymétrie entre un secteur septentrional très tectonisé et le secteur méridional, qui lui, est peu faillé ;
- une seconde dissymétrie Est-Ouest, entre l'effondrement brutal du rebord occidental de la fosse salifère et la remontée progressive de son flanc oriental jusqu'au horst de Montmiral, correspondant à la "chaîne Dauphinoise". On note la présence d'un important accident méridien (faille N20°), bordant le Massif Central, qui décale le substratum de plus de 1000 m.

La présence d'argiles-sableuses bariolées, à l'Oligocène terminal, montre à l'évidence d'une part, une évolution sub-aérienne (pédogenèse) et d'autre part l'érosion des massifs bordiers (Dumas, 1988; Mandier, 1988). Vers le Sud du bassin, on note la présence de calcaires lacustres et de marnes. Bien que l'Aquitanien fasse partie du Miocène, cet étage termine en fait le cycle ouverture/remplissage de ce rift de la moyenne vallée du Rhône. C'est pourquoi, on rattache, dans la littérature, l'Aquitanien *sensu lato* comme appartenant à l'Oligocène. A la fin de l'Aquitanien, l'érosion continentale a pratiquement réduit le secteur à une "pénéplaine". Cette paléotopographie, inclinée vers l'Est, constitue le mur de la série néogène (Mandier, 1988; Clauzon, 1990).

D'un point de vue paléogéographique, le Sud-Est de la France est continental. Plus loin à l'Est s'avance l'orogénèse alpine, précédée de son avant-fosse constituée par le reste de l'océan téthysien.

1.2.3 Le sillon subalpin

Ce sillon subalpin provient de la superposition de l'avant-fosse alpine, liée au rapprochement du front Alpin de l'Est vers l'Ouest avec le rift ouest européen déjà colmaté. Par ailleurs, ce sillon subalpin n'existerait pas sans un méga-cycle de transgression/régression d'un bras de mer joignant, au Sud la Méditerranée, au Nord-Est, la Paratéthys (dont la mer Noire est la relique actuelle).

- A l'échelle du Sud-Est de la France :

D'un point de vue paléogéographique, le méga-cycle miocène commence à l'Aquitainien (-23,8 Ma), par une transgression de la mer Méditerranée (mer qui n'a pas encore acquis sa configuration actuelle). Cette première transgression est d'amplitude très limitée car elle ne dépasse pas la Camargue (Demarcq, 1970). La submersion de la vallée du Rhône ne commence réellement qu'au Burdigalien (-20,3 Ma) mais celle-ci ne dépasse pas le seuil de Reauville (Rubino *et al.*, 1990; Sissingh, 2001). Cependant, il se peut qu'une communication marine ait relié le golfe de Digne et le bassin suisse via un chenal au niveau de Gap (Sissingh, 2001). Ce vaste bras de mer péri-alpin, qui était connecté à la Paratéthys en contournant les Carpates, était dès lors soumis aux variations eustatiques de l'océan universel (Haq *et al.*, 1987; Sissingh, 2001). La transgression suivante, à partir du Burdigalien supérieur (entre -17,5 et -17,3 Ma), rejoindra aussi le bassin molassique suisse (figure 1-5.A) (Demarcq, 1970; Rubino *et al.*, 1990). La mer transgresse encore plus fortement durant le Langhien et le Serravallien (de -16,4 à -11,2 Ma) (figure 1-5.B) (Lesueur *et al.*, 1990; Rubino *et al.*, 1990; Sissingh, 2001). Suivant la courbe eustatique de Haq *et al.* (1987), la mer régresse lors de la transition Serravallien-Tortonien. C'est en effet au Tortonien que se met en place un système fluvio-lacustre, amorce du réseau de drainage actuel du Rhône.

D'un point de vue tectonique, le fait majeur est la poussée compressive des Alpes externes vers l'Ouest à partir du Burdigalien dans le Sud-Est de la France (Menard *et al.*, 1987; Mugnier *et al.*, 1987; Mascle *et al.*, 1996; Dèzes *et al.*, 2004). Cette poussée compressive provoque le développement d'une anomalie, *i.e.* flux asthénosphérique, du manteau sous le Massif Central. Celle-ci provoque donc d'une part, l'apparition d'un forte activité volcanique et d'autre part, le soulèvement et le basculement vers le Nord du Massif Central (Sissingh, 2001; Dèzes *et al.*, 2004).

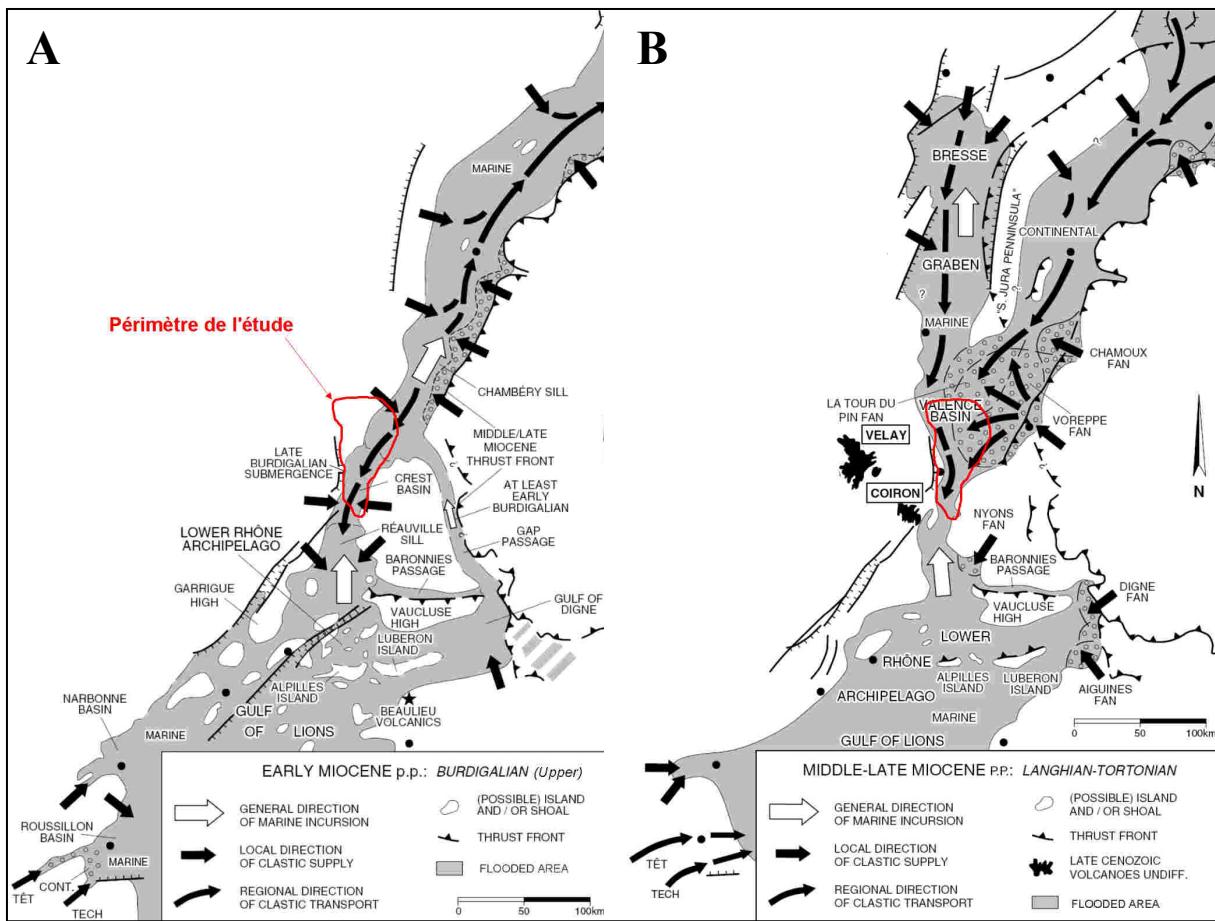


Figure 1-5: Cartes de la paléogéographie du sillon subalpin du Burdigalien supérieur jusqu'au Tortonien (d'après Sissingh, 2001 modifié).

La présence de massifs bordiers (naissance des Alpes externes à l'Est et rehaussement du Massif Central à l'Ouest) en périphérie de la mer pétroalpine, du moins dans la partie Sud-Est de la France, a permis la sédimentation de matériaux détritiques qui recouvrent plus ou moins le rift ouest Européen. Ces matériaux issus de l'altération superficielle de ces massifs bordiers caractérisent le Miocène. Il s'agit d'une molasse constituée de sédiments fins tels que des sables, silts, limons ou argiles ou bien grossiers tels que graviers, galets qui se sont déposés en milieu marin ou fluvio-lacustre. La répartition de ces sédiments est, bien évidemment, fonction de l'hydrodynamisme: les éléments les plus fins ne pouvant se déposer que dans un environnement à énergie négligeable.

- A l'échelle du secteur d'étude :

Les différentes phases du méga-cycle sédimentaire miocène débutent seulement au Burdigalien supérieur entre -17,5 et -17,3 Ma (Rubino *et al.*, 1990). Cette transgression envahit le bassin de Crest, le Royans et l'actuel Vercors et Chartreuse pour rejoindre le bassin molassique suisse.

A l'emplacement de ces massifs, il devait sans doute exister des îlots ressemblant aux côtes dalmates actuelles (Demarcq, 1970). Cette transgression est probablement plus étendue que ne le montre la carte du Burdigalien proposé par Demarcq (1970). En effet, cette carte ne tient pas compte des raccourcissements matérialisés par les plis et chevauchements de la Chartreuse et du Vercors (Gillcrist *et al.*, 1987; Mugnier *et al.*, 1987; Rubino *et al.*, 1990; Masclé *et al.*, 1996; Dèzes *et al.*, 2004). Il faut donc élargir vers l'Est l'étroit sillon de la mer Burdigaliennes (Rubino *et al.*, 1990). Par ailleurs, vers l'Ouest, l'attribution des "marnes de Saint-Lattier", dans le Royans, au Burdigalien supérieur et au Langhien, permet de reconsiderer les limites de cette transgression vers l'Ouest (Rubino *et al.*, 1990). Etant donné, que ces marnes seraient du même âge que les marnes de la Grenette dans le bassin de Crest (Demarcq, 1970; Jeannolin, 1985), on peut se demander si, les faciès marno-sableux bleutés en contact avec les calcaires Oligocène, mis en évidence dans divers forages de la plaine de Valence, ne montreraient pas une transgression plus importante en direction du Massif Central. En effet, le témoin le plus occidental de ce faciès serait le forage profond de Clérieux (ClG 1), qui montre au-dessus des marnes brunes attribuables à l'Oligocène (BRGM, 1977; Dumas, 1988) un niveau d'argiles plastiques grises à passées sableuses (épaisseur 43 m dans le rapport de fin de sondage). Mes données m'amènent à rejoindre Rubino *et al.* (1990) sur le fait que l'extension du Burdigalien est probablement plus importante que ce qui était admis auparavant (cf. § 1.4.1).

Suivant la charte eustatique de Haq *et al.* (1987) (figure 1-6), deux cycles de haut niveau marin de 3^{ème} ordre (TB 2.3 et TB 2.4 calibrés tous les deux à +150 m) se suivent au Langhien et au Serravallien, mais leurs résultantes en transgression sont différentes (Rubino *et al.*, 1990). Ainsi, au Langhien, la mer ne semble pas transgresser au-delà d'où elle se situait au Burdigalien supérieur, contrairement à la transgression datée du Serravallien qui atteint le socle du Massif Central vers Saint-Barthélemy de Vals (Clauzon, 1990). De plus, cette

dernière transgression est à son amplitude maximale au début du Tortonien (-11,2 Ma) alors que la charte eustatique montre une régression. Le niveau marin baisse de +150 à +65 m pendant la deuxième moitié du Serravallien (Haq *et al.*, 1987). Il est donc clair que ces poussées transgressives à contre-temps ne sont pas attribuables à l'eustatisme mais reviennent à la tectonique (Clauzon, 1990).

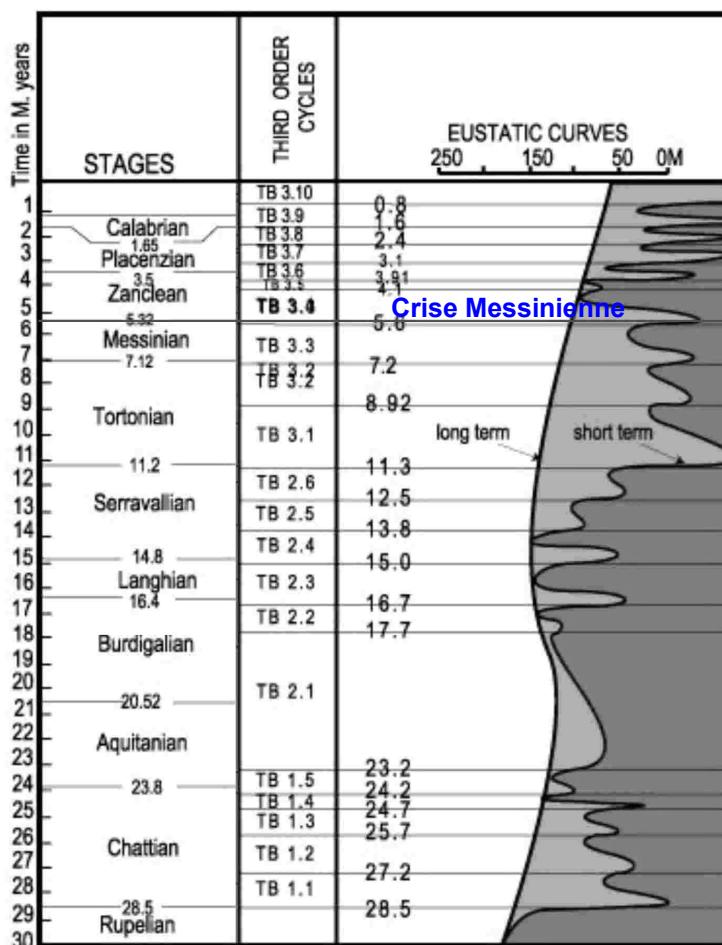


Figure 1-6: Charte eustatique du Tertiaire et Quaternaire (d'après Haq *et al.*, 1987 modifié).

Enfin, au Miocène supérieur (Tortonien-Messinien), une phase de régression marine laisse place à un système continental fluvio-lacustre (Demarcq, 1970). D'Est en Ouest et du Nord au Sud, le bassin péréalpin émerge dans son intégralité (Clauzon, 1990). Des cailloutis et conglomérats à matrice sableuse d'origine fluviatile se généralisent (Mandier, 1988). En effet, les torrents alpins apportent leurs éléments conglomératiques. A la fin du Tortonien (-7.2 Ma), s'installe un vaste réseau hydrographique aux ramifications complexes. Ainsi, jusqu'au déclenchement de la "crise de salinité Messinienne" (-5,8 Ma), le Rhône et ses affluents se mettent en place progressivement.

La formation du relief actuel subit une importante étape de structuration au cours du Miocène. En effet, le Vercors et la Chartreuse, bien que n'atteignant pas encore leurs altitudes actuelles, se mettent en place à partir du Burdigalien. Cette structuration majeure de la moyenne vallée du Rhône est liée à une poussée compressive Est-Ouest de l'orogenèse Alpine (Gillcrist *et al.*, 1987; Mugnier *et al.*, 1987; Blès *et al.*, 1991; Mascle *et al.*, 1996; Dèzes *et al.*, 2004).

Le chevauchement du front Alpin soumet son avant-pays à son basculement vers l'Ouest. Le bassin migre vers l'Ouest en même temps qu'il se déforme vers l'Est par les apparitions des premiers chevauchements de la Chartreuse et du Vercors (apparition des conglomérats de Voreppe dès le Langhien cf. Figure 1-20).

Par ailleurs, et simultanément selon le modèle de flexuration lithosphérique développé par Quilan et Beaumont (1984) in Rubino *et al.*, (1990), la faible amplitude de la transgression Langhienne serait due au soulèvement du flanc opposé au front du chevauchement (figure 1-7). Ce modèle est clairement mis en évidence au Sud de la plaine de Valence, dans le bassin de Crest, où la partie inférieure de la série attribuée au Serravallien repose en discordance et avec une forte troncature sur les séquences sous-jacentes avec l'absence des faciès littoraux en allant vers l'Ouest. Il y a donc eu surrection de la bordure Ouest du bassin qui précède la transgression serravallienne (Rubino *et al.*, 1990).

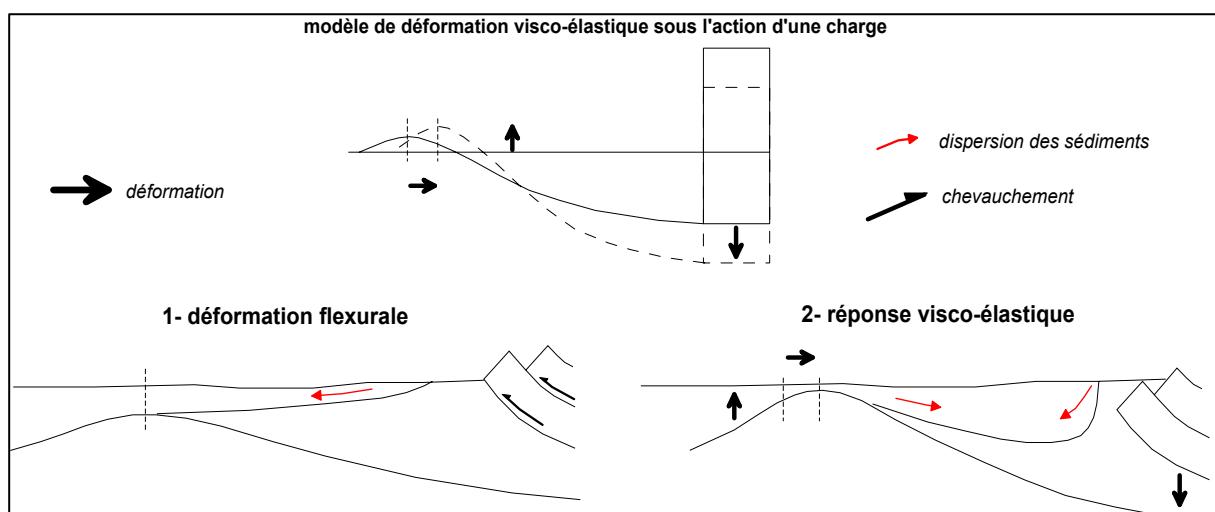


Figure 1-7: Modèle de déformation lithosphérique dans les bassins d'avant-pays (d'après Quilan et Beaumont, 1984 in Rubino *et al.*, 1990 modifié).

Enfin, les conglomérats fini-miocènes (Messinien), qui fossilisent les couches du Tortonien supérieur marneux du plateau de Chambaran⁴ et qui transgressent même jusqu'au socle centralien, marquent probablement une phase de plissement majeur des Alpes (Mandier, 1988). Cette phase majeure est appelée par différents auteurs « phase rhodanienne ». La brutale avancée de ces cailloutis vers l'Ouest s'explique par le rapprochement de la source des apports grossiers isérois et par la surrection du relief qui accroît le régime des cours d'eaux. La largeur initiale du sillon péricalpin a été estimée à 90 km (entre Voreppe et le plateau du Méjans vers Larnage) où ce rapprochement a été de l'ordre de 10 à 15 km (Mugnier *et al.*, 1987). Cette phase de plissement se retrouve d'ailleurs sur le plateau de Chambaran qui est à la fois légèrement comprimé (anticlinaux et synclinaux légèrement esquissés) mais aussi soulevé (BRP, 1955; Germain *et al.*, 1958; Mandier, 1988). L'amplitude de ce soulèvement différentiel, plus important à l'Est qu'à l'Ouest, est difficilement mesurable.

C'est au cours du Messinien, que la bordure occidentale du Vercors s'individualise complètement lors de la « phase rhodanienne » (Mandier, 1988). Le flanc occidental du massif existait déjà avant le déclenchement de la crise de salinité messinienne. Celui-ci sépare le bassin molassique du Royans de celui de la plaine de Valence mais cette barrière n'avait cependant pas encore atteint son altitude actuelle.

L'épaisseur cumulée des sédiments miocènes peut atteindre localement 800 m vers les plateaux de Chambaran et de Thivolet. Au niveau de la plaine de Valence, grâce à notre réinterprétation de la sismique réflexion, son épaisseur atteint au droit du sillon près de 500 m (cf. Figure 1-18). Sur ce secteur de la vallée du Rhône, la subsidence moyenne permettant l'accumulation de ces épaisseurs de sédiments est proche de 100 m par million d'années en ce qui concerne la série marine. L'aggradation de la série continentale n'est, quant à elle, que de 100 m en 5 millions d'années (Clauzon, 1990).

Au final, cette accumulation de molasse miocène, qui correspond à la mise en place du piedmont subalpin, n'a été possible que grâce à la transgression du Burdigalien supérieur qui a, dès lors, initié la subsidence du bassin. Cette accumulation a été, par la suite, entretenue par la flexuration lithosphérique de l'avant-pays, soumis à la poussée compressive du front subalpin,

⁴ cf. Figure 1-22

et par la subsidence. Cette flexuration lithosphérique a pu jouer en sens opposé à la subsidence sur le flanc occidental du bassin en limitant la transgression du Langhien.

1.2.4 La crise messinienne et le cycle pliocène

Cette crise a pour effet d'interrompre le cycle miocène de transgression/régression de la mer péricalpine. Ensuite, un dernier cycle marin de transgression/régression pliocène achèvera définitivement la continentalisation du Sud-Est de la France jusqu'à l'Actuel.

- A l'échelle de la Méditerranée :

La crise de salinité messinienne, qui a eu sa phase de paroxysme entre -5,9 à -5,3 Ma, est un événement qui a eu un impact géomorphologique sur tout le pourtour Méditerranéen. Cet épisode, extrêmement bref à l'échelle du temps géologique, correspond à l'abaissement du plan d'eau de la Méditerranée, d'au moins 1500 m, par dessiccation et genèse d'évaporites au fond de ce bassin (Ryan, 1976; Clauzon, 1982; Rouchy, 2000). Il s'achève par la réinondation de la Méditerranée au Pliocène. La durée de cette crise est, selon les auteurs, comprise entre 450 et 630 mille ans (Gargani, 2004).

Dans le détail, cette chute du niveau d'eau de la Méditerranée s'est, en fait, déroulée en deux étapes principales (Clauzon *et al.*, 1996; Beaudoin *et al.*, 1997). Il y aurait eu une première baisse du niveau d'une amplitude modeste, d'au moins 400 m, pour une durée de 350 à 400 Ka. Puis est survenue une seconde phase, beaucoup plus courte d'une durée comprise entre 50 et 100 Ka, avec un abaissement total du plan d'eau de 1500 m (Clauzon *et al.*, 1996; Beaudoin *et al.*, 1997; Gargani, 2004).

L'origine de cette crise provient de la restriction des échanges océaniques Atlantique/Méditerranée au travers des passages Sud-Rifain et Nord-Bétique (figure 1-8) (Beaudoin *et al.*, 1997; Warny *et al.*, 2003). Il semble que les mouvements tectoniques et les variations glacio-eustatiques ont, à eux seuls, contrôlé la chronologie de cette crise (Warny *et al.*, 2003). En effet, les échanges, par le détroit nord-bétique, ont été en premier, interrompus du fait d'un soulèvement tectonique du secteur (à partir de -6,8 Ma). Par contre, les échanges

au travers du détroit du Rif se sont peu à peu restreints à cause de l'abaissement du niveau marin, plutôt lié au développement de la calotte antarctique, que par le soulèvement tectonique. Les échanges seront ensuite quasiment interrompus vers -5,4 Ma par le soulèvement tectonique du Rif (Warny *et al.*, 2003).

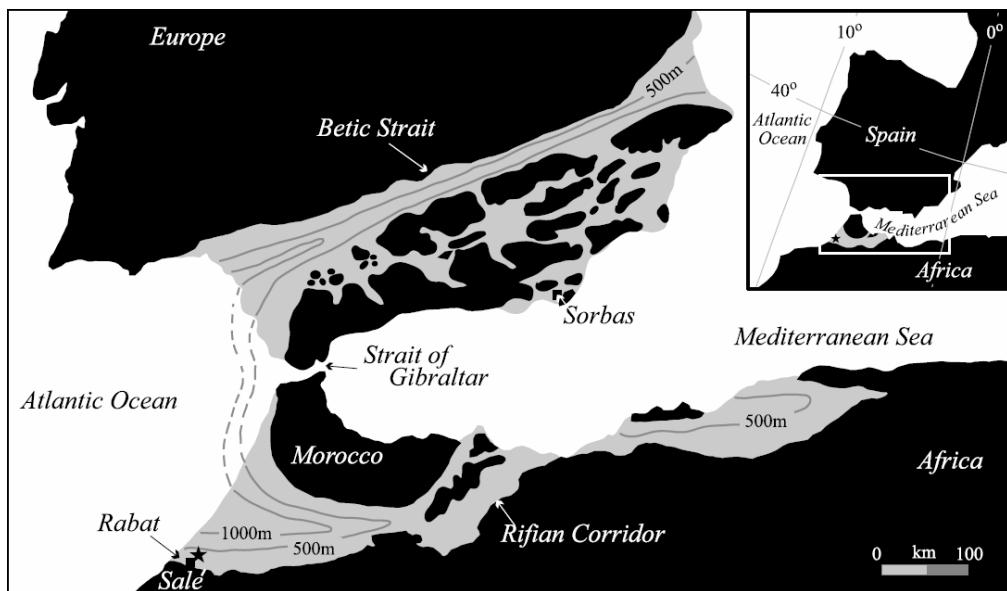


Figure 1-8: Relation entre l'océan Atlantique et la mer Méditerranée lors de la crise Messinienne (Warny *et al.*, 2003).

La combinaison de l'érosion régressive des cours d'eaux en provenance des chaînes Bétiques et Rifaines, autour de l'isthme de Gibraltar, couplée à une remontée du niveau d'eau océanique, permet la communication de l'océan Atlantique avec le bassin Méditerranéen desséché. Celle-ci provoque dès lors la remise en eau brutale de la Méditerranée. Ce phénomène se déroule vers -5,32 Ma, et retrouve l'équilibre avec le niveau d'eau de l'océan Atlantique en quelques dizaines d'années seulement (Blanc, 2002). Ce niveau d'eau est mesuré, selon la charte eustatique, à +80 m (Haq *et al.*, 1987).

La rapide baisse du niveau d'eau de la Méditerranée a pour conséquence l'arrêt de la mise en place du piedmont subalpin (Clauzon, 1990). Il s'y substitue, lors de la chute du niveau d'eau, une topographie de ravinement. Tous les réseaux hydrographiques présents avant le déclenchement de cette crise et qui étaient en relation directe avec le bassin Méditerranéen, ont donc creusé de véritables canyons pour équilibrer leurs profils avec le niveau de base du bassin. Les deux plus importants exemples montrant le processus classique d'érosion régressive, mais exceptionnelle par son amplitude, sont les canyons du Nil et du Rhône

(figure 1-9.A) (Clauzon, 1982; Clauzon, 1990; Beaudoin *et al.*, 1997; Clauzon, 1998; Gargani, 2004). L'analyse en détail du profil du canyon messinien du Rhône montre en fait deux phases d'érosions régressives ayant pour origine l'abaissement du niveau d'eau du bassin méditerranéen en deux étapes (Beaudoin *et al.*, 1997; Gargani, 2004).

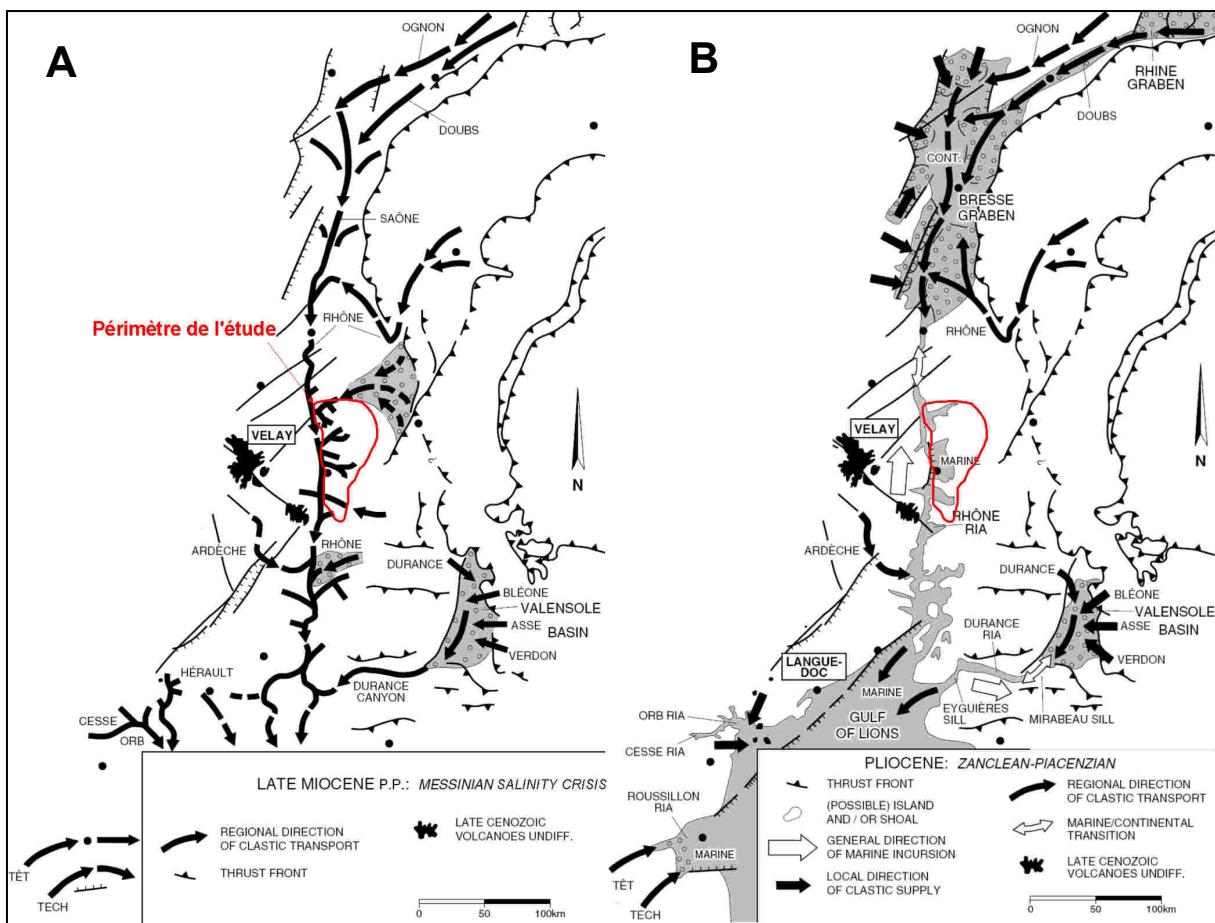


Figure 1-9: Paléogéographie du Sud-Est de la France lors du déclenchement de la crise messinienne et de la réinondation pliocène (d'après Sissingh, 2001 modifié).

Ensuite, la réinondation brutale du bassin méditerranéen (avec un niveau marin situé à +80 m) provoque la submersion des canyons, ce qui les transforme dès lors en rias (figure 1-9.B) (Clauzon, 1982; Clauzon, 1990; Beaudoin *et al.*, 1997; Clauzon, 1998; Gargani, 2004). Une accumulation de sédiments fins a, peu à peu, colmaté cet espace inusité selon un processus en progradation. Il s'agit d'un édifice sédimentaire de type "Gilbert delta" (figure 1-10), qui est tout à fait singulier de par son développement colossal (Clauzon *et al.*, 1996). Dans la ria du Rhône se déposent des argiles sableuses correspondant au prisme sous aquatique de haut niveau marin du cycle du 3^{ème} ordre TB 3.4 (Ballesio, 1972; Haq *et al.*, 1987; Clauzon, 1990).

Ce prisme sous aquatique laisse place, d'amont vers l'aval, à un prisme subaérien fluviatile (limite diachrone entre -5,32 et 2 Ma). Ce régime continental achève le Cénozoïque.

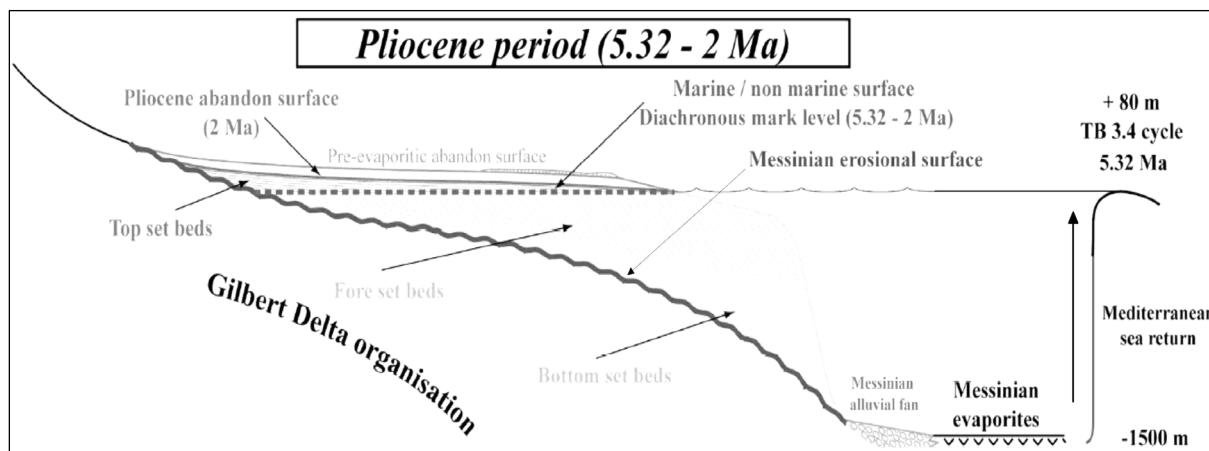


Figure 1-10: Organisation du prisme sédimentaire du Gilbert delta du Rhône (d'après Audra *et al.*, 2004 modifié).

Durant cet épisode qui a profondément marqué le Sud-Est de la France, la poussée compressive des Alpes s'est largement affaiblie mais les Alpes subissent un soulèvement d'ensemble (Mandier, 1988; Dèzes *et al.*, 2004). La vallée du Rhône a subi un réajustement différentiel dans un axe méridien (Mandier, 1988; Gargani, 2004). En effet, lors de cette phase d'érosion du Rhône, celle-ci, ayant évacué une masse considérable de matériaux, a provoqué un déséquilibre isostatique de la lithosphère (Clauzon, 1990; Gargani, 2004). Le Massif Central continue son rehaussement avec le développement d'une large activité volcanique, montrant ainsi l'augmentation du flux asthénosphérique sous forme d'une "plume" (Dèzes *et al.*, 2004).

- A l'échelle du secteur d'étude :

L'oscillation du plan d'eau méditerranéen a provoqué une puissante incision des terrains. Ces volumes libérés ont été, ensuite, comblés par les Gilbert deltas du Rhône et de ses affluents.

Le positionnement du prisme sédimentaire sous aquatique (fore set et bottom set beds) a été plus ou moins bien reconnu dans la moyenne vallée du Rhône. En effet, ce prisme constitué d'argiles ou de marnes sableuses de couleur grise à bleue affleure rarement dans la région car il est recouvert de matériaux quaternaires. Cependant, à partir des données de sondages ayant

recoupé ce niveau, des cartes de positionnement de ces argiles ont été proposées (BURGEAP, 1964; Ballesio, 1972; Clauzon, 1982; Debrand-Passard *et al.*, 1984; Jeannolin, 1985; Mandier, 1988). Ces cartes ont donc permis de situer approximativement le réseau hydrographique présent au moment du déclenchement de la crise de salinité messinienne. Nous donnons pour illustration les cartes des rias pliocènes proposées par Ballesio (1972) et Jeannolin (1985)⁵ (figures 1-11 et 1-12).

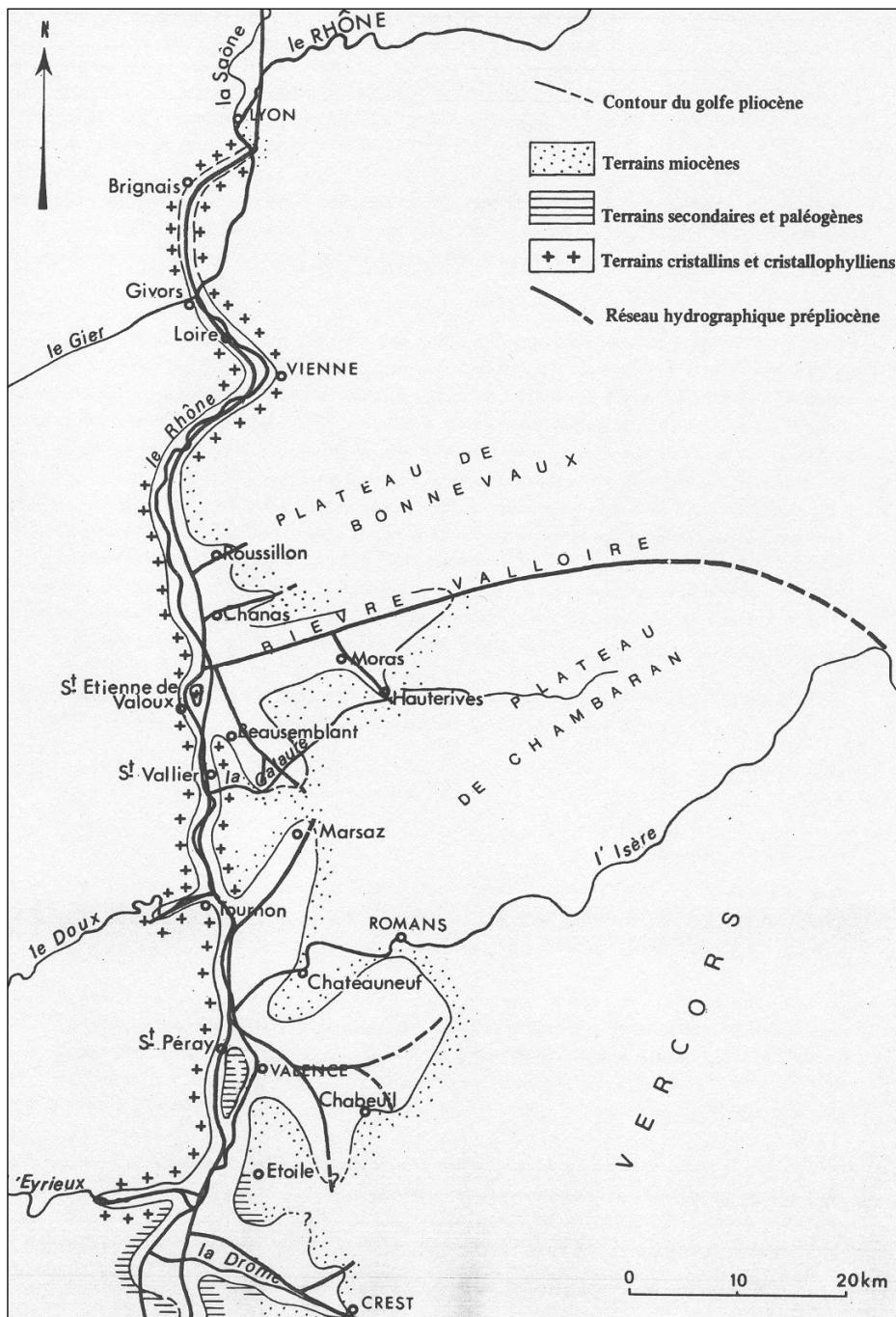


Figure 1-11: Carte de la ria pliocène entre Lyon et Crest (Ballésio, 1972).

⁵ Des améliorations sont apportées par notre étude dans le paragraphe 1.3.2.1.

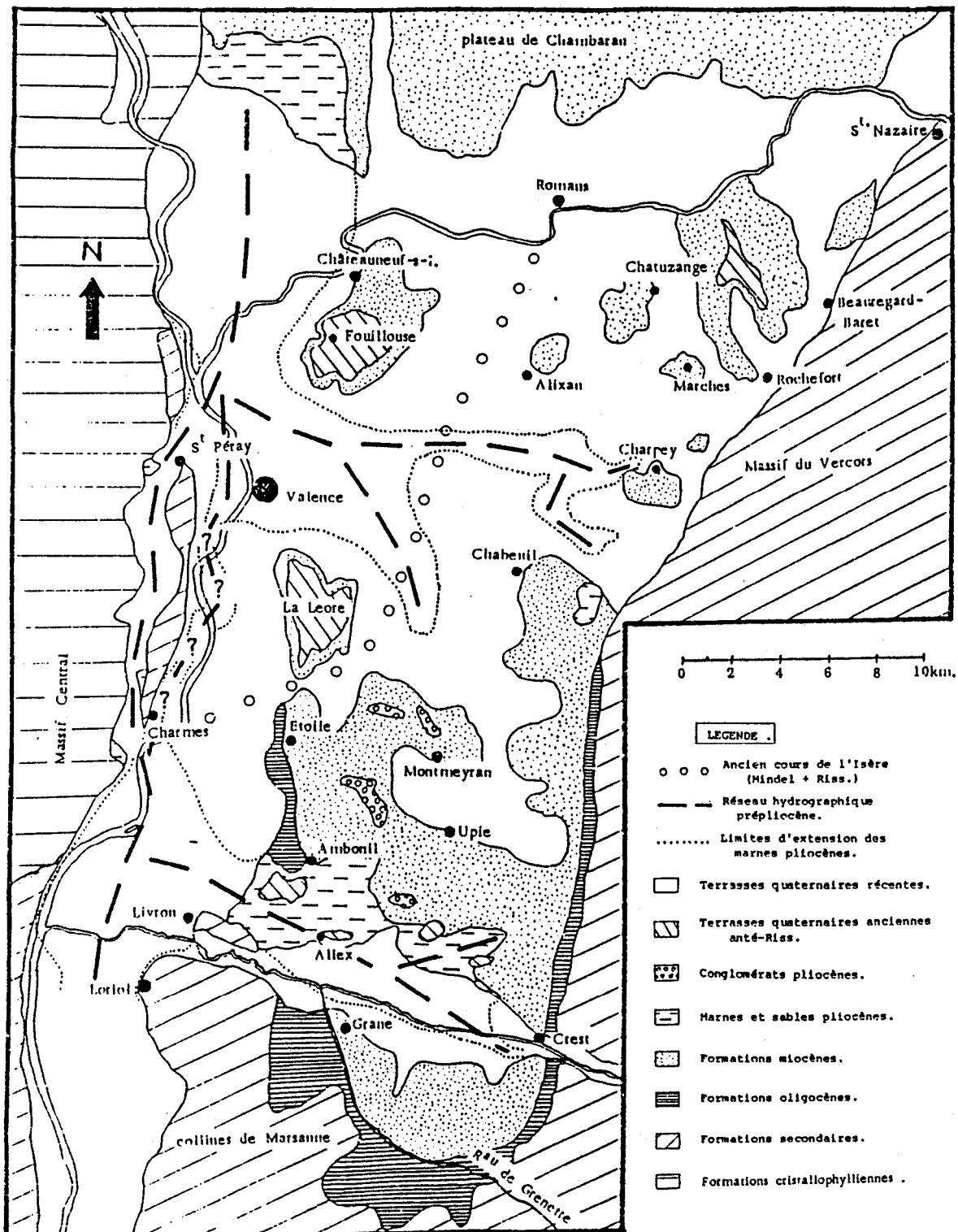


Figure 1-12: Ria pliocène au niveau de la plaine de Valence (Jeannolin, 1985).

A partir de toutes ces données, nous pouvons résumer les faits suivants:

- Le Rhône actuel, s'est surimposé sur son cours Messinien, entre le Péage de Roussillon et Loriol, sur une large partie de ce cette distance sauf pour le méandre de Saint-Désirat et le défilé de Crussol (Ballesio, 1972; Mandier, 1988; Clauzon, 1990).
- La position de l'Isère actuelle se situe beaucoup plus au Sud par rapport à l'Isère messinienne qui confluait avec le Rhône à l'Est de Saint-Désirat, donc au niveau de l'actuelle vallée de Bièvre-Valloire. De plus, deux petits affluents de cette paléo-Isère provenaient des secteurs de Fay-le-Clos et de Hauterives (Ballesio, 1972).
- De manière similaire, l'embouchure de la Drôme avec le Rhône ne se situe pas comme maintenant entre Livron et Loriol mais confluait au Messinien au Nord du massif crétacé de Livron en provenance du golfe de Eurre (Ballesio, 1972).
- Les affluents du Rhône au Messinien, au niveau de la plaine de Valence, sont difficiles à positionner. Les cartes des différents auteurs montrent à l'évidence l'existence d'un golfe entre les communes de Tain l'Hermitage/Chanos-Curson/Beaumont-Monteux/Pont d'Isère. Une ou plusieurs rivières devaient rejoindre ce golfe en provenance de Marsaz et de Larnage. Plus au Sud, deux affluents rejoignaient le paléo-Rhône près de Valence, en provenance de l'Est (Ballesio, 1972). Ceux-ci pourraient correspondre à la Véore et à l'Ecoutay de l'époque (Ferry, 1996).

Grâce à la charte eustatique et aux enregistrements sédimentaires repérés au méandre de St-Désirat, Clauzon (1990) a pu évaluer l'ajustement isostatique à un soulèvement de l'ordre de 70 m entre le déclenchement de la crise et la transition marin/continental du prisme sédimentaire.

Le prisme subaérien fluviatile termine le remplissage pliocène du bassin de Valence. Cet épisode conglomeratique, de faciès très proche de celui qui termine le cycle miocène, se retrouve au niveau de l'interfluve Valloire-Galaure (Mandier, 1988) mais aussi en couronnement des buttes molassiques de Montoison et de Montmeyran au niveau de la plaine de Valence (Ballesio, 1972). Clauzon (1990) a mis en évidence un soulèvement différentiel Est-Ouest (de l'ordre de 70 à 80 m pour une distance de 7 km entre St-Andéol et le socle), au cours de l'accumulation du Pliocène supérieur continental (entre -4,2 et -3 Ma). Ce soulèvement différentiel serait lié aux derniers soubresauts des contraintes alpines.

1.2.5 La dynamique glaciaire et le relief actuel

- A l'échelle globale :

L'élaboration progressive du paysage et du réseau hydrographique est sous la dépendance de la dynamique glaciaire qui caractérise le Quaternaire. L'apparition de périodes froides et glaciaires ne se situe pas seulement au Quaternaire mais existe dès la fin du Pliocène sous le terme de Plio-Quaternaire. Toutefois, les cycles glaciaires-interglaciaires s'individualisent remarquablement au Pléistocène.

En Europe, quatre périodes glaciaires se sont déroulées au Pléistocène, avec de la plus ancienne à la plus récente, Günz, Mindel, Riss et Würm. Dans le détail, pour chaque période, il existe de nombreuses poussées glaciaires séparées par des périodes interglaciaires. Ainsi la dynamique glaciaire se met bien en évidence par les systèmes de terrasses. En effet, tout l'alluvionnement quaternaire avec son complexe de terrasses étagées est sous la dépendance des extensions glaciaires proches ou lointaines, de même que tout ou partie des dépôts loessiques et limoneux. Une période froide (glaciation) correspond à un remblaiement caillouteux qu'une période interglaciaire va fortement éroder pour laisser des terrasses résiduelles.

La tectonique alpine s'atténue mais perdure encore aujourd'hui. Cependant, le Quaternaire se caractérise par un soulèvement quasi-général des Alpes et du Jura (Debrand-Passard *et al.*, 1984).

- A l'échelle du secteur d'étude :

Au Quaternaire, de -1,8 Ma jusqu'à aujourd'hui, des phases successives de creusement et d'alluvionnement du réseau hydrographique ont donné à la région son modèle actuel. Le Quaternaire se caractérise essentiellement par le creusement des vallées, puis par leur alluvionnement, sous contrôle glaciaire. L'importance des actions éoliennes (épandage des loess) et les phénomènes d'altération superficielle conduisent à la formation des sols.

Pendant les périodes glaciaires, les glaciers envahissent tout le Bas-Dauphiné, comme par exemple les glaciers de l'Isère en Bièvre-Valloire, à l'exception des plateaux de Bonnevaux et de Chambaran (Debrand-Passard *et al.*, 1984).

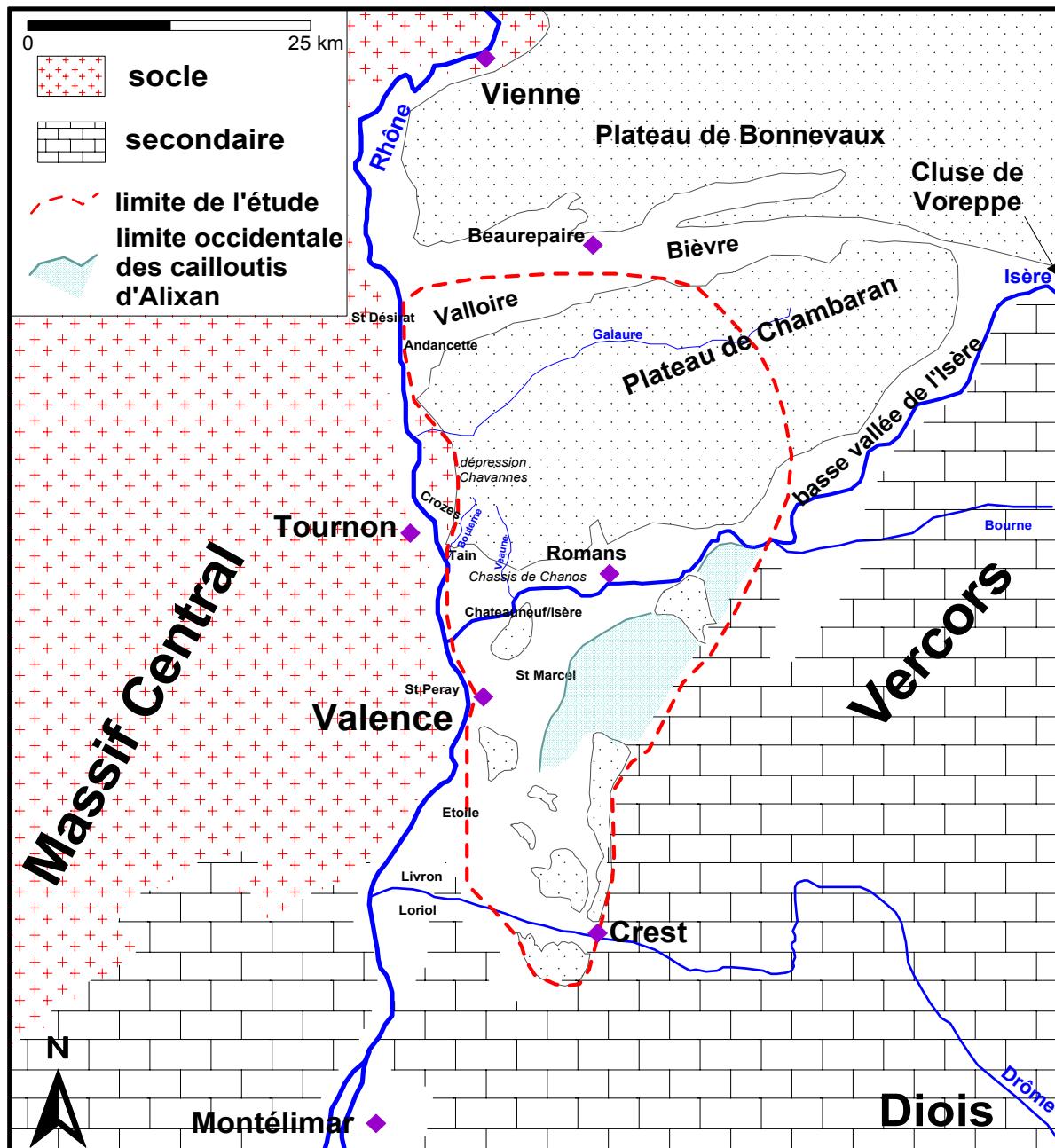


Figure 1-13: Plan de localisation des unités géographiques au cours du Quaternaire (voir texte)⁶.

La mise en place des cours d'eaux actuels est liée au contrôle glaciaire. Ainsi, en Bièvre-Valloire, le changement de cours de l'Isère se situe à la fin du Mindel récent qui va rejoindre

⁶ Note de l'auteur : il ne s'agit pas d'une carte du Quaternaire. Celle-ci présente les principaux lieux de changement du lit des fleuves au cours du Quaternaire mais aussi l'extension du cône de déjection du Vercors.

dès lors la Plaine de Valence (figure 1-13). Ce changement de cours serait dû à la diffluence du glacier isérois. En effet, celui-ci débouchait jusqu'au Mindel récent de la cluse de Voreppe dans la vallée de Bièvre puis ultérieurement dans l'actuelle vallée de basse Isère (Mandier, 1988).

C'est donc à partir du Riss, que l'Isère débouche au niveau de la Plaine de Valence. Cependant, son cours va subir quelques modifications avant de rejoindre sa position actuelle. En effet, ses fluctuations s'inscrivent entre deux grands passages situés de part et d'autre de la butte molassique de Chateauneuf sur Isère (plateau de Fouillouse). Le couloir de Saint-Marcel-les-Valence est abandonné définitivement à la fin du Riss ancien, quant à celui des Chassis de Chanos, il est abandonné à la fin du Riss récent. Il faut noter que l'Isère, au Riss récent puis au Würm, passait au Nord de Romans sur Isère (Mandier, 1988).

Les fluctuations du tracé rhodanien sont restées globalement proches de sa position actuelle. Cependant Mandier (1988) a montré successivement:

- l'abandon du méandre de Saint-Désirat au Pliocène supérieur;
- abandon du couloir de Saint-Peray à la fin du Günz;
- utilisation et abandon du couloir de Crozes de la fin du Pliocène au Mindel récent.

La Drôme, qui passait au Messinien au Nord du massif de Livron, entaille le massif crétacé entre Livron et Loriol à partir du Günz.

La mise en place des réseaux hydrographiques secondaires est plus difficile à retracer du fait que ces tributaires, avec un plus faible débit, ont laissé peu ou pas de terrasses fluvioglaciaires.

Au Nord de l'Isère actuelle, la morphologie de collines voit sa genèse apparaître dès la fin du Pliocène. D'après les travaux de Mandier (1988), la Galaure se serait mise en place dès la fin du Pliocène sans avoir subi de changement de cours. La dépression méridienne de Chavannes semble s'être creusée à partir de l'érosion régressive de la Bouterne et de la Veaune, dès le début du Quaternaire à la faveur du faciès tendre de la molasse Miocène, en bordure du Massif Central (Mandier, 1988). Par ailleurs, au niveau de la Plaine de Valence, il devait exister, à la fin du Günz, un réseau hydrographique constitué par des petites rivières locales et

au moins une rivière plus importante qui drainait le Nord du Vercors et le Sud du plateau de Chambaran. Celle-ci suivait une direction NE-SW, à l'emplacement approximatif de l'actuel couloir de Saint Marcel les Valence pour se jeter dans le Rhône à la hauteur d'Etoile (Mandier, 1988). Cette rivière devait aussi collecter les eaux de la Bourne, qui drainait le Vercors dès le Quaternaire ancien, voire même avant (Delannoy, 1997).

La raison essentielle de la différence morphologique entre la Drôme des Collines et la plaine de Valence provient de l'évidement, par érosion régressive, des cours d'eaux de la plaine par rapport à la Drôme des Collines (Mandier, 1988). En effet, au Quaternaire, le Rhône entre Andancette et Tain se surimpose à son ancien défilé messinien inscrit dans le socle dur du Massif Central. Il ne peut donc générer qu'une érosion régressive provenant uniquement de ses affluents comme l'Isère, en Bièvre-Valloire (jusqu'à la fin du Mindel récent) à l'action érosive importante générant la morphologie de cette vallée, et aussi de la Galaure, Bouterne et Veaune aux actions érosives limitées. Ce qui n'est pas le cas dans son cours plus en aval, entre Tain et Loriol, où ses fluctuations mineures ont provoqué des sapements latéraux, beaucoup plus efficaces dans les terrains tendres néogènes. Par ailleurs, ses affluents, comme la Drôme et l'Isère (à partir du Riss) avec des débits plus importants, ayant subi, eux aussi, des modifications de leurs cours ont provoqué un large creusement de la plaine. C'est pourquoi, il ne reste plus, au niveau de la plaine, que quelques buttes, témoins de l'épaisseur initiale des terrains miocènes (altitude de 418 m au Mont Lagat).

A l'Est de la plaine de Valence, de puissants cônes de déjections, issus des phénomènes de gélification du Vercors, recouvrent les terrains néogènes (cailloutis d'Alixan). Les épaisseurs des alluvions fluvioglaciaires, constituées de galets et graviers calcaires à ciment sablonno-argileux, correspondent aux divagations du réseau hydrographique au cours du Quaternaire. Ainsi, en vallée de Bièvre-Valloire, l'épaisseur peut atteindre une soixantaine de mètres tandis qu'au niveau de la plaine de Valence, l'épaisseur est d'une quarantaine de mètres dans le couloir de Saint Marcel (Mandier, 1988) mais elle peut atteindre exceptionnellement 70 m dans le couloir des Bayannins au Sud de Bourg de Péage.

D'un point de vue tectonique, notre secteur voit son rehaussement se généraliser pour atteindre les altitudes actuelles (Mandier, 1988; Clauzon, 1990). Un soulèvement différentiel, plus important en bordure du Vercors, est mis en évidence grâce à la cote du toit du niveau

marin du Pliocène qui atteint 310 m d'altitude au Sud-Est de Chabeuil et seulement 250 m près du Rhône au Nord-Ouest de la plaine (Mandier, 1988).

1.3 CONNAISSANCES NOUVELLES SUR LE BASSIN DE VALENCE

1.3.1 Base de données

Nous avons regroupé dans une base de données (développée sous logiciel Access) toutes les informations disponibles d'ordre géologique et hydrogéologique sur le bassin de Valence. Ces données proviennent de plusieurs sources d'informations telles que:

- les forages des irrigants répertoriés provenant de la base de données commune à la Chambre d'Agriculture et la D.D.A.F. de la Drôme;
 - les forages A.E.P.;
 - les forages profonds;
 - les données bibliographiques de forages;
 - les données des foreurs.

Ainsi, c'est plus de 1000 forages (de profondeur supérieure à 20 m) qui ont été reportés dont près de 500 forages disposant d'informations géologiques et/ou hydrogéologique acceptables.

Numé	nom commune	X/lambert2	Y/lambert2	Z/altit	profondeur	cote ba	miocène	coupe gé	eau/sq	position crête	longue	Qs de perm	trans	coefficie	débit	volume annuel pre
de	à	terrain						age								
122	manthes	809749	2038379	239	250	-11	Oui	non	<input checked="" type="checkbox"/>	4 62-31-3, 88-5-103-5; 127-247	144	4,2	0,80	1,3	90	
►	0	24 alluvions fluvo-glaciaires						quaternaire								
	24	71,5 molasse sup sableuse, moyenne à grossière, rousse à jaune						miocène								
	71,5	90 sable fin gris argileux, plaquettes mameuses														
	90	105 sable fin jaune roux														
	105	125 sable fin gris argileux														
	125	170 sable fin gris														
	170	185 sable moyen à gros blanc gris bleu														
	185	195 sable fin gris verdâtre														
	195	210 sable très fin très argileux dur														
	210	225 sable moy à gros gris bleu vert lits de marne marron														
	225	247 sable très argileux														
	247	250 sable fin						miocène								
*	0															
+	907 marches	818873	200162	328	150	178	oui	non	<input checked="" type="checkbox"/>	0 20-140	120				17	30600 dc
*	906 marches	819266	2002728	276	34	242	incon		<input type="checkbox"/>	14					25	10000 dc
+	909 marches	816673	2001335	243	120	123	proba	incor	<input type="checkbox"/>	45					45	63000 dc
+	1319 marches	820895	2001039	354	125	229	incon	oui	<input checked="" type="checkbox"/>							int
-	903 marches	818805	199986	328	200	128	oui	non	<input checked="" type="checkbox"/>	25					25	22500 dc
		terrain						age								
	0	14 graviers argileux secs						quaternaire								
	14	150 molasse jaune sableuse à lits indurés tous les 5m						miocène								
*	0	150 molasse jaune argileuse						miocène								
+	902 marches	819288	2001232	310	115	-115	incon		<input type="checkbox"/>	15					19	22800 dc
+	908 marches	817628	2001882	251	25	-25	incon		<input type="checkbox"/>	5					30	24000 dc
+	905 marches	819502	2000998	321	30	-30	incon		<input type="checkbox"/>	5					20	32000 dc
-	149 marges	811070	2018192	235	250	-15	Oui	non	<input checked="" type="checkbox"/>	-2,4 34-58; 64-94; 100-130; 160-184	150	12,5	2,40	8		
		terrain						age								
	0	14 alluvions sableuse/molasse remaniée						quaternaire								
	14	36 sable grossier, bancs gréseux indurés à graviers à la base						miocène								
	36	104 sable molassique fin peu consolidés gris beige à roux														

Figure 1-14: Exemple de coupes géologiques associées à la table 'FORAGE table principale'.

Cette base est organisée autour de deux tables, la première répertorie les forages d'eaux (table 'FORAGE table principale') et la seconde répertorie les forages d'intérêt géologique. Ces deux tables sont liées à une troisième table permettant de rentrer les données géologiques des forages (figure 1-14). La figure 1-15 situe les forages répertoriés dans cette base. Au cours de cette étude, toutes les données concernant les eaux souterraines ont été rentrées dans des tables connexes, comme les données géochimiques et isotopiques des prélèvements effectuées pour cette étude.

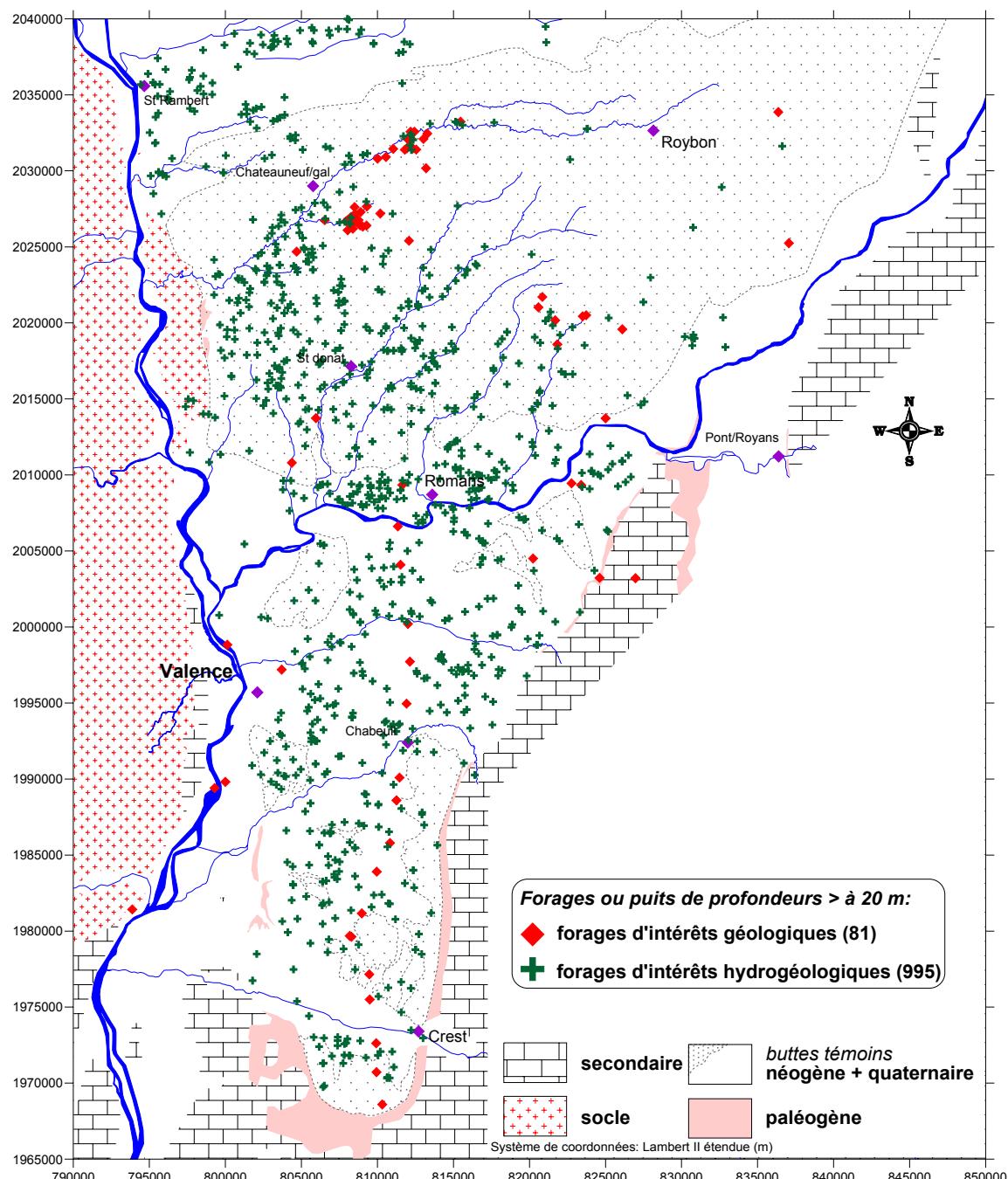


Figure 1-15: Carte des forages d'eau ou de reconnaissance géologique répertoriés sur le bassin de Valence de profondeur supérieure à 20 m.

1.3.2 Géométrie du bassin

1.3.2.1 La ria pliocène

Pour préciser la position du Pliocène marin dans le bassin de Valence, nous avons utilisé les données provenant de la bibliographie, de notre base de données et de la réinterprétation des deux profils sismiques (cf. annexe I). Toutes nos données ont été spatialisées et il s'avère que l'on dispose de beaucoup plus d'informations au niveau de la plaine de Valence. En effet, au droit de la vallée de Bièvre-Valloire, le surcreusement fluvio-glaciaire important (jusqu'à 60 m d'alluvions) ne favorise pas la reconnaissance du substratum à partir de forages d'eaux profonds. Inversement, la faible épaisseur alluviale au niveau de la plaine de Valence (0 à 40 m) a permis de reconnaître et de mieux situer la position du Rhône et de ses affluents au Messinien grâce au développement rapide de l'exploitation de la nappe de la molasse miocène. Nous avons schématisé sur la figure 1-16 le fond des talwegs messiniens (*traits pleins i.e. position ou existence probable et traits pointillés i.e. position ou existence plus hypothétique*). Ce travail a permis d'améliorer les connaissances géologiques à l'Est de Valence par rapport aux travaux précédents (cf. §1.2.4).

Au moins deux affluents en provenance de l'Est de la plaine de Valence rejoignaient le Rhône messinien. Curieusement, aucune argile marine pliocène n'a encore été reconnue en contact avec la retombée anticlinale de la bordure occidentale du Vercors. Il est pourtant établi que le Vercors existait déjà peu avant le déclenchement de la crise de salinité messinienne (Mandier, 1988). Il devait donc probablement exister un jeune réseau hydrographique rejoignant la plaine de Valence. Au Sud, une paléo-Drôme se jetait dans le Rhône messinien au Nord de Livron. Au Nord de la plaine de Valence, seulement quelques forages ont recoupé le Pliocène mais ceux-ci ne permettent pas de préciser la position des Gilbert deltas par rapport aux anciennes cartes. La carte présentée reste donc très schématique au Nord de l'Isère.

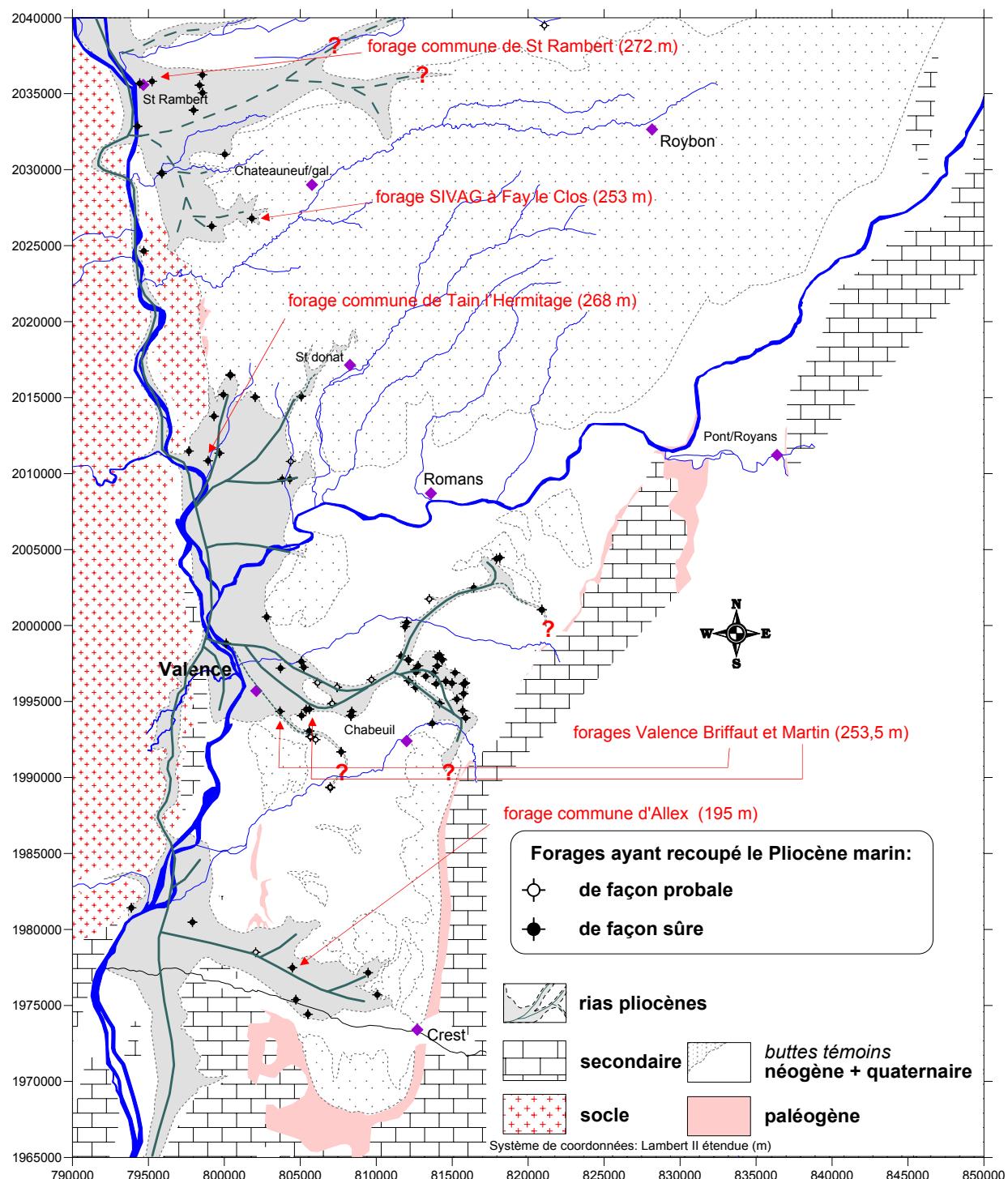


Figure 1-16: Carte du prisme marin des Gilbert deltas pliocènes dans la moyenne vallée du Rhône.

1.3.2.2 Coupes géologiques

Ce paragraphe résume sous forme de figures les données fournies par:

- les forages qui ont recoupé le substratum du Néogène (forages à but de reconnaissance géologique ou de recherche d'eaux);
- la réinterprétation des données anciennes obtenues par la sismique réflexion;
- la bibliographie (BRP, 1955; Germain *et al.*, 1958; Dasarathi, 1965; BRGM, 1977; Gillcrist *et al.*, 1987; Menard *et al.*, 1987; Mugnier *et al.*, 1987; Dumas, 1988; Mandier, 1988; Blès *et al.*, 1991; Mascle *et al.*, 1996; Philippe *et al.*, 1998).

Les coupes géologiques (profils Est-Ouest) de la figure 1-18 se situent à la hauteur des communes de Livron, Valence, Tournon et de Mureils (figure 1-17). Nous pouvons à partir de toutes ces données proposer une carte du substratum du Néogène et une géométrie du bassin de Valence.

Les coupes montrent la dissymétrie du bassin de Valence. Cette dissymétrie est conforme au mode de formation d'un bassin d'avant-pays avec un approfondissement du bassin du côté des chevauchements alpins et une remontée peu accentuée au niveau du flanc opposé (cf. Figure 1-7). L'incision messinienne a aussi bien entaillé les terrains tendres (molasse miocène ou marno-calcaire oligocène) que le socle dur sous forme de canyons plus ou moins encaissés selon la dureté des terrains. Les Gilbert deltas pliocènes ont donc colmaté ces canyons et ils se placent à l'ouest du bassin, dans la partie du bassin la moins profonde.

Le chevauchement alpin le plus occidental correspond à l'anticlinal de Saint-Lattier. Celui-ci est masqué par les terrains néogènes. Grâce à la sismique réflexion, cet anticlinal apparaît largement faillé et il est concevable que certaines failles puissent se prolonger dans la molasse miocène (coupes n° 2, 3 et 4). Plus à l'Est, les chevauchements alpins de plus fortes amplitudes ont affecté le miocène. Ainsi, au niveau de l'anticlinal de Poliénas, la molasse se trouve enfouie sous le Crétacé (coupe n° 1). A l'ouest du bassin, le socle disparaît rapidement sous la plaine de Valence. Le profil sismique Est-Ouest permet de situer le socle, au plus profond, à environ 6500 m sous le sol et il affleure seulement 8 km à l'ouest. De puissants

décrochements ont donc affecté toute la série sédimentaire et en particulier le tertiaire. Nous n'avons représenté sur la figure 1-17 que le faisceau de failles de la bordure occidentale du bassin de Valence. D'autres puissants décrochements du socle n'affectent pas le bassin molassique comme le faisceau de failles d'orientation NE-SW au Sud de Montoison (cf. annexe I) ou bien la faille orientée NNE-SSW située entre Claveyson et Tersanne (cf. Figure 1-4).

L'anticlinal de Saint-Lattier sépare le bassin molassique en deux sous-bassins. Le premier, situé entre l'anticlinal de la Raye et l'anticlinal de Saint-Lattier, a un recouvrement (Néogène + Quaternaire) maximal de l'ordre de 600 m d'épaisseur sous la plaine de Valence. Le deuxième situé à l'ouest de l'anticlinal de Saint-Lattier a un recouvrement, sous la plaine, de 500 m au maximum. Au niveau de la Drôme des Collines, compte tenu du relief, l'épaisseur maximale de molasse peut être proche de 800 m. L'anticlinal de Saint-Lattier s'atténue vers le Nord et disparaît déjà sous la commune de Roybon. Vers le Sud, l'anticlinal se raccorde à l'anticlinal de la Raye à la hauteur de la commune de Barcelonne. L'anticlinal de Varacieux constitue le prolongement de l'anticlinal de la Raye. Celui-ci est plus accentué que l'anticlinal de Saint-Lattier mais disparaît aussi en s'ennoyant sous la série tertiaire, vers le Nord.

Les coupes 1 à 4, les données de sondages ainsi que les cartes géologiques ont permis de représenter le substratum du Néogène du bassin de Valence (figure 1-19). Il faut noter que cette carte reste très schématique entre St Rambert d'Albon et l'anticlinal de Poliénas car nous avons très peu de données disponibles. Cette carte montre remarquablement le travail d'érosions différentes entre les terrains durs du socle au canyon étroit et les terrains tendre des marno-calcaires oligocènes et de la molasse miocène aux canyons plus étendus. A partir du modèle numérique du terrain et de la carte du substratum, on peut déduire le volume sédimentaire néogène et quaternaire à 625 km^3 environ. Ce volume rapporté à la superficie de l'étude de 1600 km^2 permet donc de déduire une épaisseur sédimentaire moyenne d'environ 390 m.

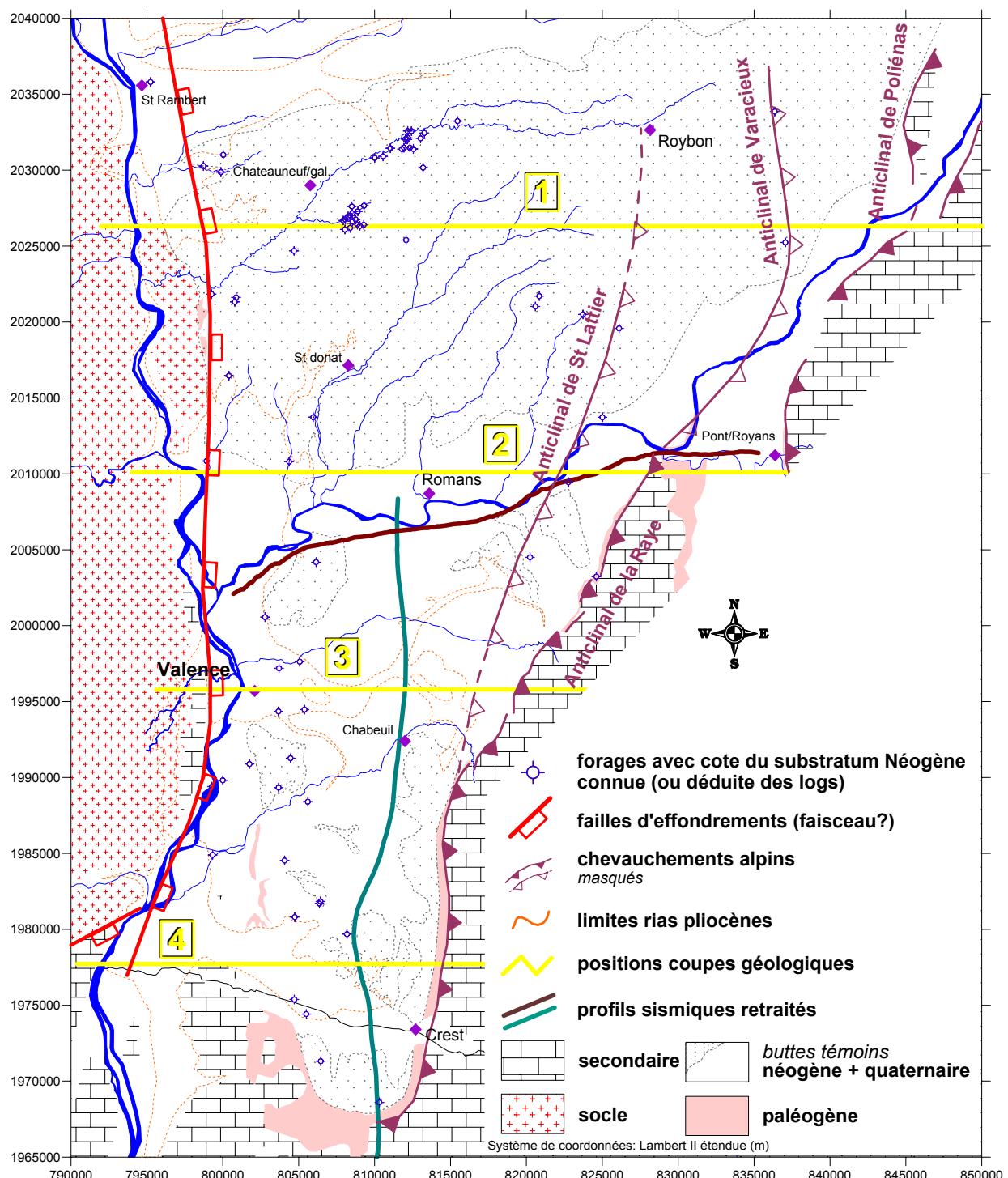


Figure 1-17: Carte morphostructurale du bassin de Valence. Plan de position des coupes géologiques.

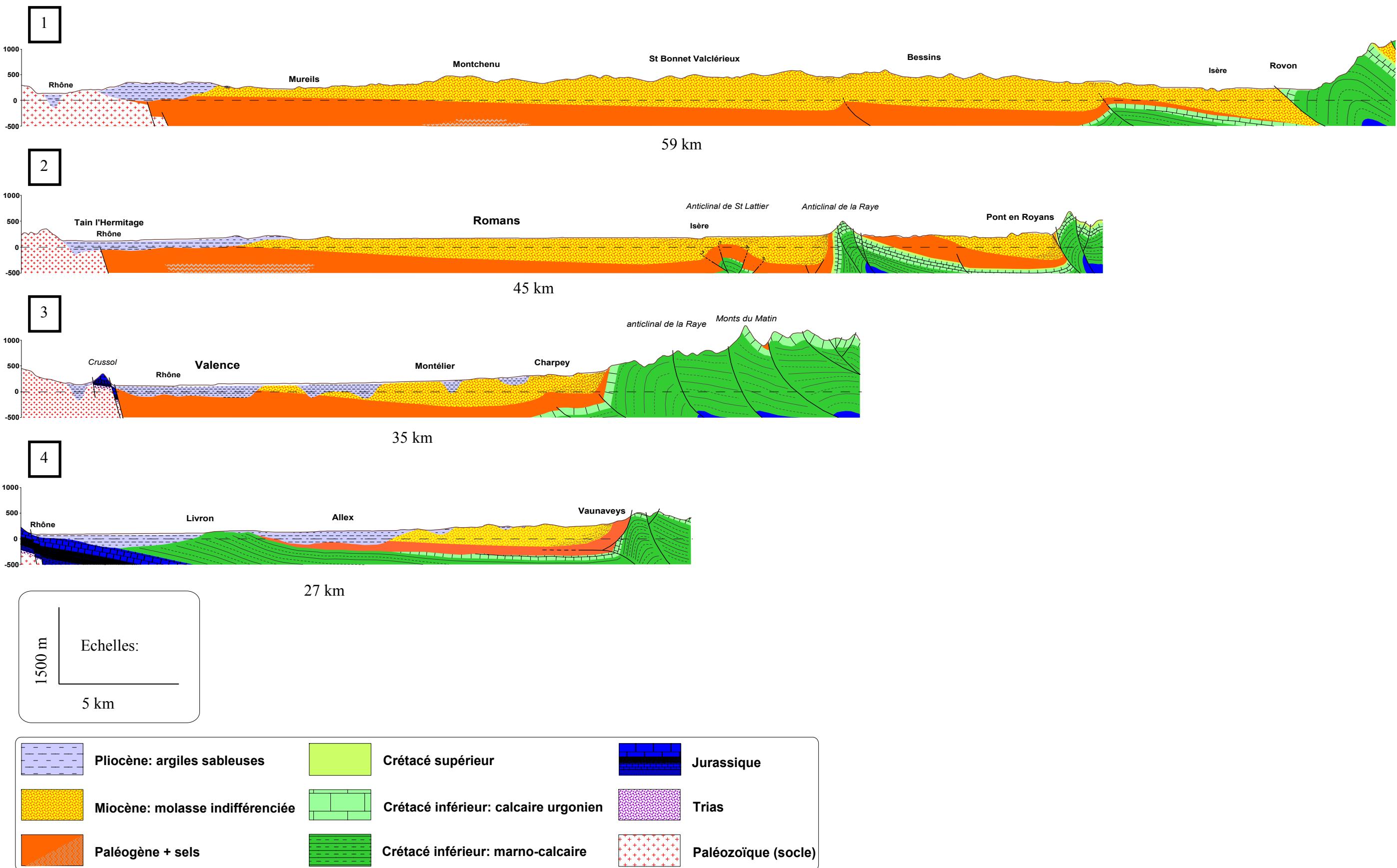


Figure 1-18: Coupes géologiques Est-Ouest du bassin molassique du Bas-Dauphiné.

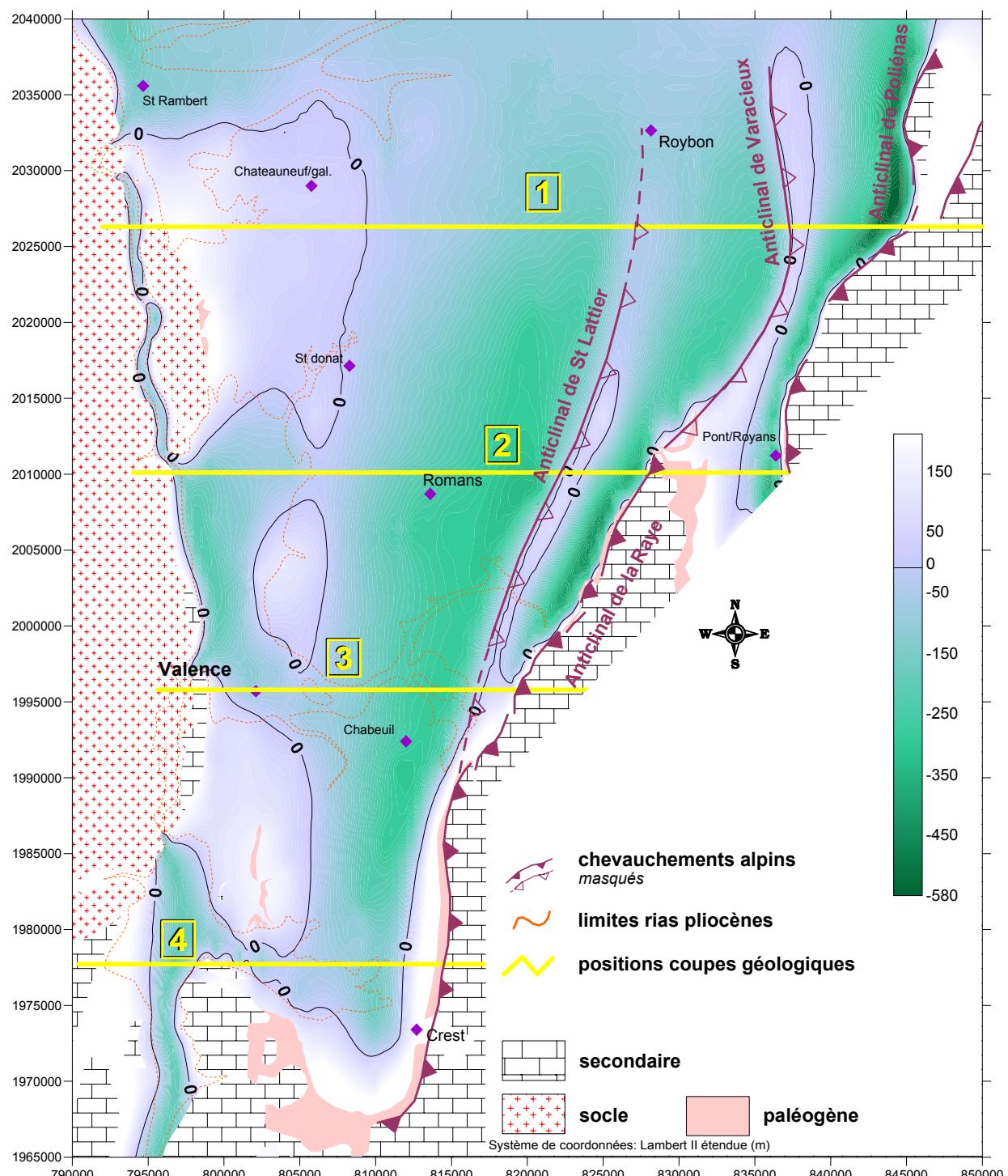


Figure 1-19: Carte du substratum du Néogène du bassin de Valence (mètre NGF).

1.4 SEDIMENTOLOGIE DU NEOGENE

1.4.1 La molasse miocène

A partir du Burdigalien supérieur, la transgression de la mer péri-alpine associée au rapprochement du front alpin va permettre le dépôt de la molasse miocène du bassin de Valence. Le terme de molasse peut être défini de la manière suivante (Latreille *et al.*, 1971). Il s'agit d'un grès, parfois feldspathique et argileux, à ciment calcaire. Ses caractéristiques sont:

- un degré de consolidation du grès très variable;
- une présence faible, voire rare d'éléments bioclastiques ou de débris de fossiles reconnaissables;
- une présence de galets liée aux dépôts torrentiels.

Toutefois, dans la terminologie la plus courante, le terme de molasse peut se définir comme une roche jaunâtre ou gris-verdâtre, homogène, formée par la consolidation, plus ou moins poussée suivant les bancs, d'un sable limoneux fin, calcaire, riche en micas (Jeannolin, 1985).

Ages	Etage	Lithostratigraphie	Bassin de Crest	Bas-Dauphiné
-10,2 Ma	tortonien			
-13,5 Ma	Serravallien			
-15,5 Ma	Langhien			
-17,5 Ma	burdigalien sup.			
			molasse de Chabrières molasse des Berthouins molasse d'Autichamp / sables de Moutier marnes de la Grenette molasse de Fort-les-Coquilles	sable de St Donat-Montchenu-Tersanne - continentaux St Barthélémy/Vals Crérieux congolomérats de Voreppe

Figure 1-20: Synthèse des formations du miocène inférieur et moyen (d'après Rubino *et al.*, 1990).

Le faciès sablo-gréseux n'affecte pas toute la série du Miocène du bassin de Valence. Il n'est qu'occasionnel dans le Burdigalien supérieur, fréquent au Langhien-Serravallien et partiel au Tortonien. En effet, le faciès de base correspond à une argile sableuse gris bleu, micacée, meuble. Le stratotype reconnu dans le bassin de Valence correspond aux marnes de la Grenette (Burdigalien supérieur) dans le bassin de Crest ou aux marnes de Saint-Lattier dans le Bas-Dauphiné (Burdigalien supérieur et Langhien) (figure 1-20). L'étendue de cette formation marneuse de base peut être appréhendée grâce aux données répertoriées dans la base. Ainsi, le témoin situé le plus au Nord-Ouest du bassin de Valence est le forage profond de Clérieux qui montre un niveau de 43 m d'argiles plastiques grises à passées sableuses, au dessus de l'Oligocène *sensu lato* (cf. §1.2.3).

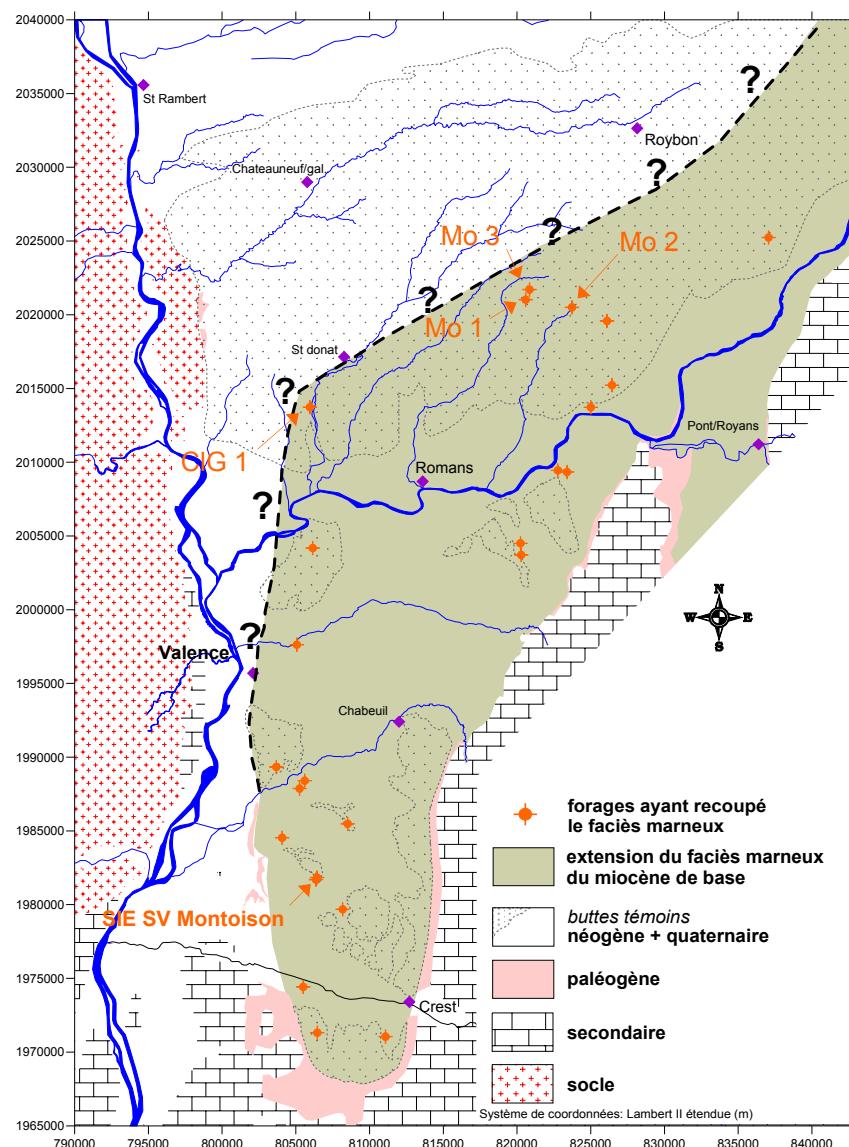


Figure 1-21: Extension du faciès marneux du Miocène de base.

Sur la figure 1-21 nous avons représenté l'étendue connue des faciès marneux dans le bassin de Valence. On connaît malheureusement assez mal ses épaisseurs au droit des deux profonds sillons du bassin (cf. Figure 1-19). Les quelques forages qui ont rencontré ce faciès dans le sillon occidental sont les forages profonds de Montmiral (Mo 1,2 et 3). Les épaisseurs sont de 23 m (Mo 3), 61 m (Mo 1) et de 102 m (Mo 2). Plus au Sud, l'épaisseur de ce faciès n'est que d'une dizaine de mètre à Montoison, au forage AEP du SIE Sud Valentinois.

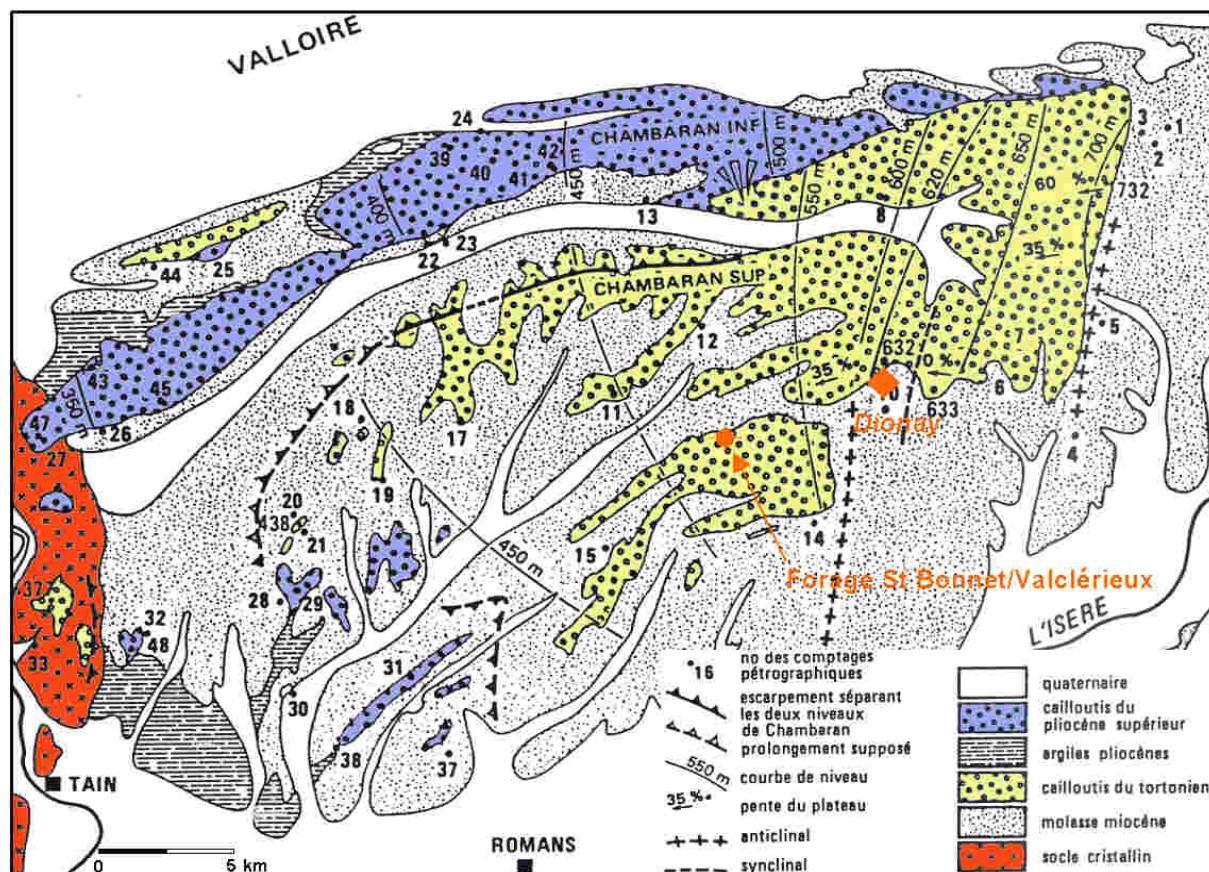


Figure 1-22: Extension des conglomérats de Voreppe (fini-miocène) et des cailloutis fluviatiles au niveau de la Drôme des Collines (fini-pliocène) (d'après Mandier, 1988 modifié).

La fin du cycle miocène s'achève sous un régime fluvio-lacustre à torrentiel avec la présence de sables marneux continentaux puis la généralisation des conglomérats de Voreppe sur tout le Bas-Dauphiné en liaison avec la "phase rhodanienne" (figure 1-22). Cette formation est constituée par un ensemble de galets polygéniques à matrice argilo-sableuse. Le forage de la commune de St Bonnet de Valclérieux montre une épaisseur de 44 m de cette formation. Au droit de Dionay, celle-ci a été estimée à une centaine de mètres (Clauzon, 1990). Au niveau de la plaine de Valence, l'érosion quaternaire n'a laissé en affleurement que les cailloutis au

dessus des sables marneux du Tortonien en couronnement des buttes du Mont Miéry et du Mont Lagat pour une épaisseur d'une soixantaine de mètres (Demarcq, 1970).

La qualité aquifère de la formation à la base du miocène n'a jamais été testée mais il semble *a priori* que celle-ci ne peut être considérée comme aquifère. La seconde formation peut être considérée comme semi-perméable puisqu'elle donne naissance à une nappe perchée (au-dessus des sables marneux continentaux) qui alimente toutes les sources des plateaux de Chambaran et de Thivolet (Duplouy, 1978).

En dehors de l'épisode argileux du Burdigalien supérieur et conglomeratique fini-miocène, il apparaît extrêmement difficile de différencier par ses faciès le reste du miocène. Cet ensemble sédimentaire a été décrit comme un ensemble multicouche. Pourtant, la répartition des sables, sables grésifiés et argiles est très hétérogène dans l'espace. En effet, les corrélations entre forages sont difficiles à établir du fait des changements de faciès fréquents et de l'absence d'horizon repère. Nous avons tenté à partir de notre base de données de réaliser des corrélations entre forages mais il nous est rapidement apparu que la qualité des données fournies par les foreurs était insuffisante. Par exemple, nous avons reporté sur la figure 1-23 à partir de notre base de données quelques coupes schématiques de forages dans la molasse selon une disposition ouest-est entre Chantemerle-les-Blés et Margès. Par ailleurs, un essai de corrélation a été effectué par C. Rigolet (géologue GDF) à partir des coupes et des logs diagraphiques des nombreux forages des sites de Gaz de France à Tersanne et Hauterives. Celui-ci n'a pas pu mettre en évidence de corrélation entre forages espacés de quelques centaines de mètres (Rigolet, *com. pers.*). Ainsi, la notion d'ensemble multicouche pour le faciès de molasse n'a donc pas de sens à l'échelle du bassin de Valence.

Par contre à cette échelle, il apparaît spatialement que la partie ouest du bassin est composée d'une molasse plus grossière et moins cimentée que sur la bordure orientale du bassin (Demarcq, 1970). Cette disparité tient à la nature minéralogique très différente des bordures (roche cristalline à l'Ouest et roches carbonatées à l'Est). Sur la figure 1-23, nous observons une disparition des horizons grossiers de l'Ouest vers l'Est correspondant à la diminution des apports de molasse grossière d'origine centralienne (sable granitique de Clérieux et de St Barthélémy de Vals).

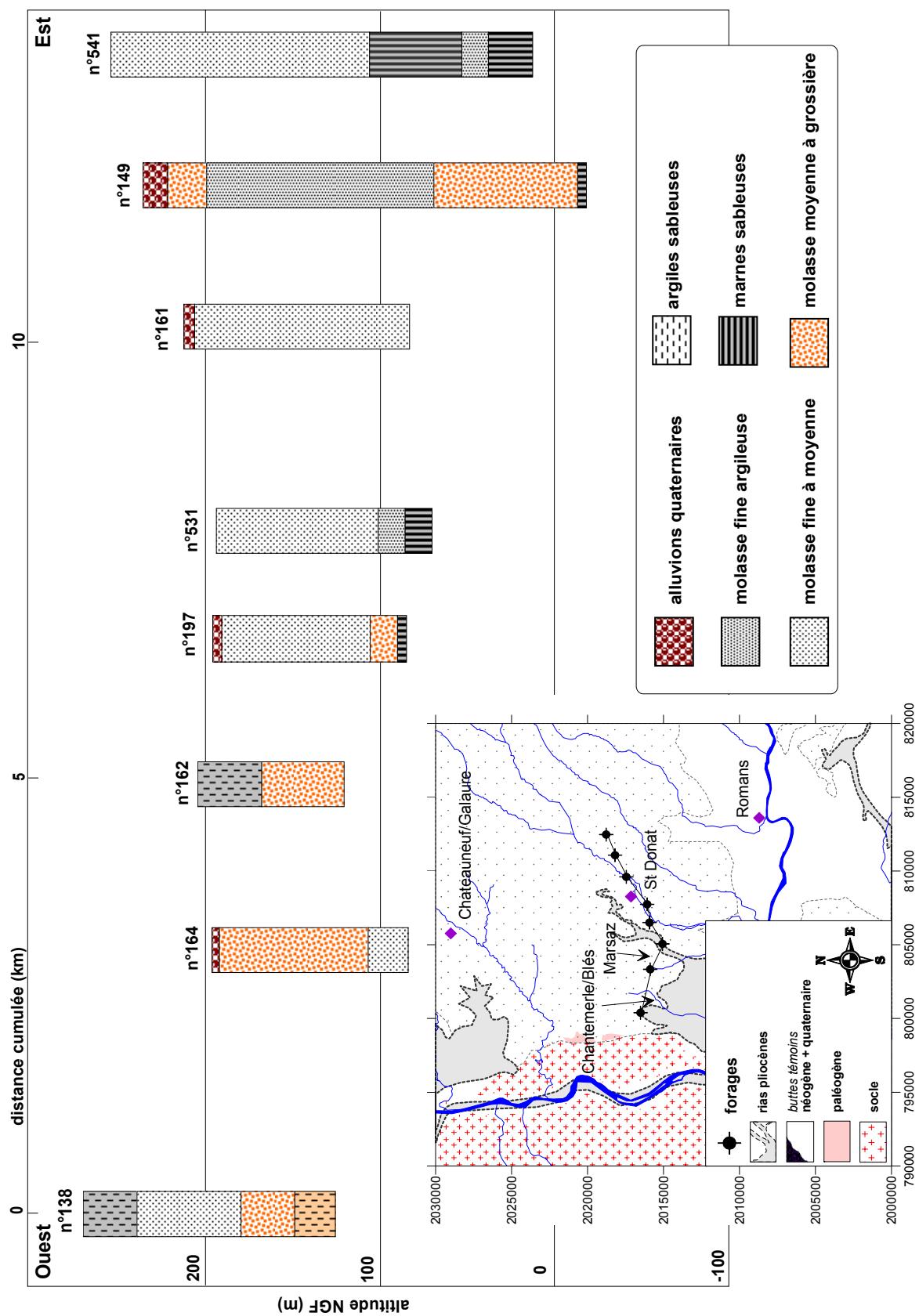


Figure 1-23: Coupes géologiques simplifiées de forages selon un axe Est-Ouest entre Chantemerle-les-Blés et Margès.

Cette répartition spatiale des sédiments miocènes a alors une conséquence directe sur les propriétés hydrodynamiques de l'aquifère. De plus, le degré de cimentation de la molasse va aussi jouer sur sa perméabilité. En effet, le degré de cimentation de la molasse est fonction de la nature minéralogique du matériel détritique. Latreille (1969) a relevé que la cimentation calcaire est quasiment inexistante dans la formation des sables granitiques et devient importante dans les sables de St Donat, Montchenu, Tersanne et des sables continentaux à dominante calcaire. Ainsi, les sables granitiques situés principalement sur la bordure occidentale du bassin de Valence auront les perméabilités les plus intéressantes. Nous y reviendrons au chapitre suivant.

1.4.2 Le remplissage des canyons messiniens

C'est au Messinien que se situe le puissant épisode de ravinement lié à l'abaissement plurikilométrique de la Méditerranée. L'incision correspondante est de l'ordre de 500 m au méandre de Saint-Désirat (Clauzon, 1990).

La stratigraphie du Pliocène rhodanien a été particulièrement bien étudiée par Ballésio (1972) et nous en reprendrons les résultats essentiels. Ainsi, le fond des canyons est tout d'abord constitué par des matériaux grossiers correspondant à la phase de démantèlement, qualifiés "d'Infra-Pliocène" sur la figure 1-24. Aucun des forages dans la moyenne vallée du Rhône n'a recoupé la série 1. Pourtant, deux forages profonds de 268 et 272 m ont traversé la série pliocène pour atteindre le socle granitique (cf. Figure 1-25). Ces deux forages, à but AEP des communes de Tain l'Hermitage et de St Rambert d'Albon, ne sont donc probablement pas situés au droit du secteur le plus profond du canyon messinien du Rhône. Par contre, les travaux réalisés pour la ligne TGV près de Eurre ont mis en évidence les éboulis et terrains glissés (série 2), constitués par les produits de démantèlement des terrains molassiques avec une nappe en charge sous les séries argileuses pliocènes (Bobillon, 2005). Cette série a été aussi mise en évidence au niveau de l'interfluve Valloire-Galaure (Ballesio, 1972) (voir aussi le forage SIVAG à Fay le Clos, figure 1-25).

Les séries suivantes correspondent aux prismes sédimentaires atypique d'un Gilbert delta (bottom, fore et top sets beds). En effet, la présence de nombreux tributaire provoque la formation de seuils. Ces seuils rendent complexes la modalité du remplissage du canyon du

Rhône (Ferry *et al.*, 1997). Le prisme sous aquatique (bottom et fore set beds) est constitué par des argiles sableuses bleutées, avec parfois des niveaux franchement sableux (séries 4 à 9 de la figure 1-24). L'épaisseur du prisme sous aquatique a été estimée à 350 m au maximum (Clauzon, 1990). Le prisme aérien (top set beds) correspond à des conglomérats que l'on retrouve au niveau de l'interfluve Valloire-Galaure mais aussi en couronnement des buttes molassiques de Montoison et de Montmeyran (série 14). L'épaisseur maximale du prisme aérien a été estimée à 150 m environ (Clauzon, 1990).

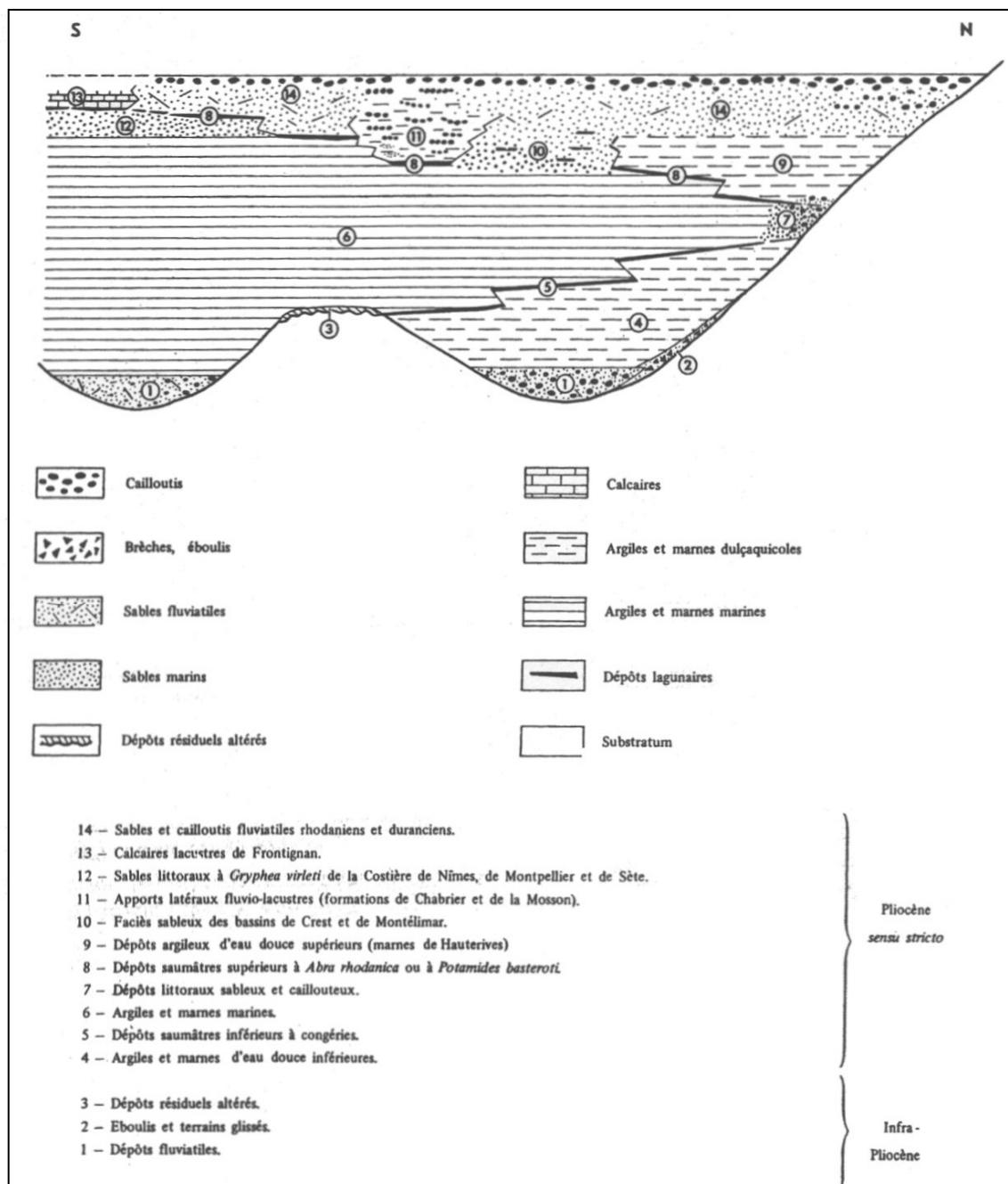


Figure 1-24: Diagramme de répartition latérale et verticale des principaux faciès du Pliocène de la vallée du Rhône (Ballésio, 1972).

Sur la figure 1-25, nous avons représenté quelques coupes géologiques représentatives du Pliocène dans le bassin de Valence. Il s'agit des forages des communes de Tain, de St Rambert, d'Allex et de Valence (Martins et Briffaut), du Syndicat d'Irrigation VAlloire-Galaure (SIVAG) à Fay le Clos. L'implantation de ces forages est positionnée sur la figure 1-16.

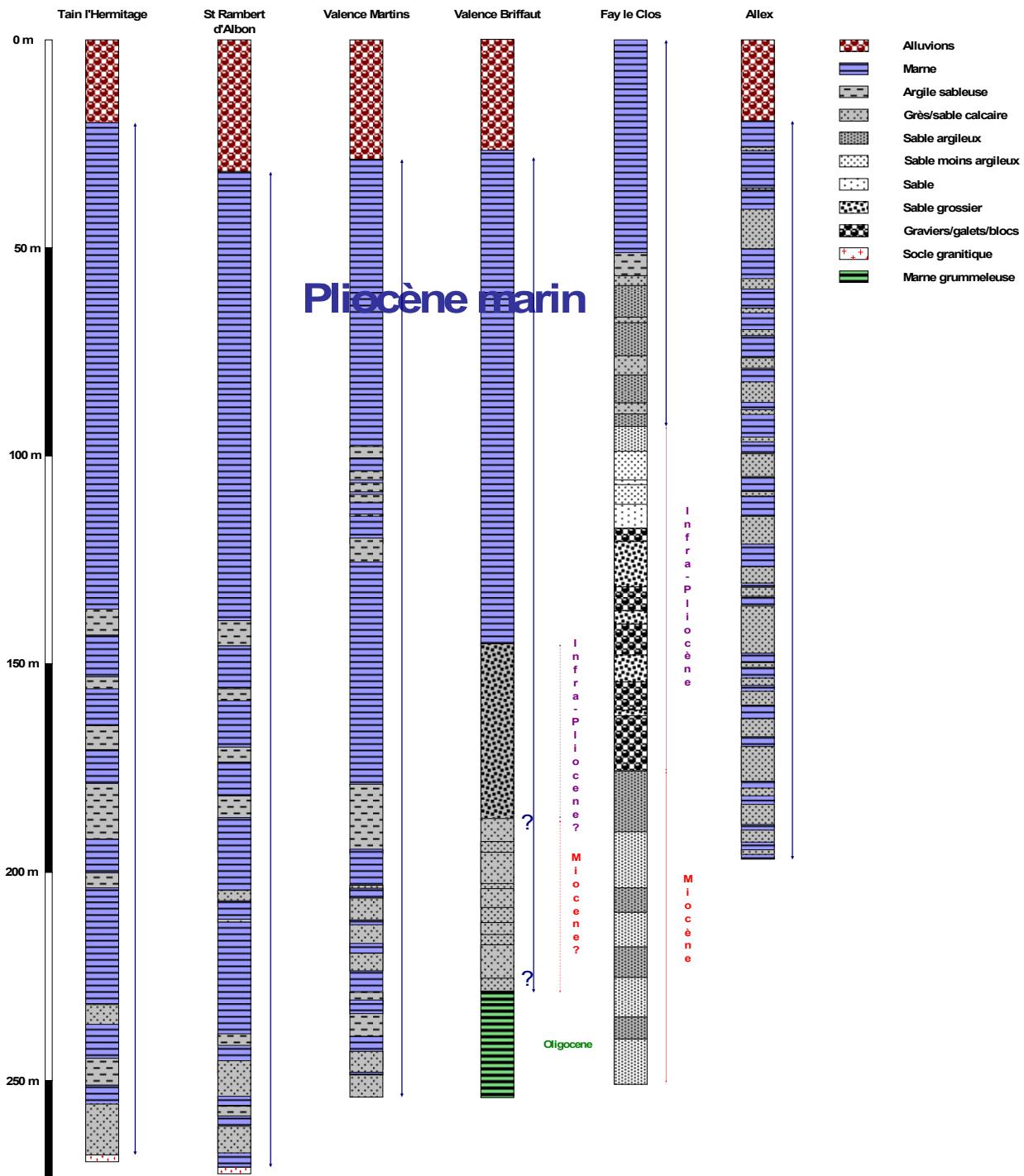


Figure 1-25: Coupes représentatives du Pliocène marin du bassin de Valence.

La qualité aquifère de cet ensemble est très médiocre car la plupart des forages d'eaux captant le Pliocène se révèle très peu productif mais la formation infra-pliocène et les niveaux franchement sableux du prisme sous aquatique pourraient avoir *a priori* de bonnes perméabilités (cf. 2.3.2).

1.5 SYNTHESE

L'épisode du rifting continental de l'ouest européen et le méga cycle sédimentaire miocène puis pliocène ont été les principales étapes de structuration du bassin de Valence. Le Massif Central et les Alpes naissantes, en particulier le Vercors, ont apporté les matériaux nécessaires au comblement de la fosse de Valence à partir de l'Eocène.

La mer pétroalpine a permis le dépôt de la molasse miocène. L'avancée vers l'Ouest des Alpes externes a permis l'accumulation de molasse d'une épaisseur maximale proche de 800 m au droit des sillons, avec une épaisseur moyenne de l'ordre de 400 m. Le paléo-Rhône et ses tributaires ont profondément incisé les terrains molassiques et cristallins au Messinien dans la partie ouest du bassin. Le fond du canyon se situe à -170 m NGF sous le Rhône actuel à la hauteur de Valence mais il n'est plus qu'à -120 m NGF au milieu de la plaine. La réinondation pliocène a permis le comblement de ces canyons par des matériaux argilo-sableux. Le Quaternaire, par ses phases glaciaires et interglaciaires, a provoqué de multiples divagations des cours d'eaux. Les épisodes d'érosion et d'alluvionnement ont donné le relief actuel avec un puissant évidemment de la plaine de Valence par rapport à la Drôme des Collines.

Le remplissage sédimentaire est composé aux deux tiers de sable plus ou moins consolidé *a priori* perméable. Le reste est composé de matériaux moins perméables tels que les argiles pliocènes, le faciès marneux du miocène de base et les cailloutis à matrice argileuse du miocène et pliocène terminal. Dans ce bassin, les ressources en eau sont importantes et mal connues pour celles qui circulent dans la molasse miocène et au niveau des rias pliocènes. Nous ferons au chapitre suivant un état des lieux des ressources en eaux souterraines et superficielles et des moyens mis en œuvre pour améliorer les connaissances dans la gestion de ces ressources.

Chapitre 2 Hydrogéologie

Ce chapitre présente les potentialités de ressources en eaux de cette partie du département de la Drôme. Nous présenterons, dans un premier temps, le climat de la région étudiée ainsi que le renouvellement annuel moyen en eau du bassin de Valence. Dans un deuxième temps, nous décrirons les ressources en eaux souterraines de ce secteur (caractéristiques et potentialités). Nous énoncerons brièvement, dans un troisième temps, l'hydrologie en liaison avec les eaux souterraines. Cet état des lieux soulève les limites de nos connaissances sur le fonctionnement hydrogéologique de ce vaste aquifère molassique et nous conduit à la seconde partie 'investigations'.

2.1 CLIMATOLOGIE ET PLUIE EFFICACE

2.1.1 Description régionale

La vallée du Rhône se situe, par son ouverture sur la Méditerranée et par la proximité des reliefs, entre deux influences climatiques principales. La région de Montélimar, à 150 km de la côte, marque la limite septentrionale de la zone climatique méditerranéenne (Bonté, 2006). Au Nord de Montélimar, notre zone d'étude subit, par le relais de l'Europe centrale, l'influence continentale venue de la masse eurasiatique. Les contrastes thermiques sont marqués avec des hivers froids à gelées tardives et des étés chauds parfois accompagnés d'orages.

La caractérisation de l'origine des précipitations sur le pourtour de la Méditerranée occidentale a été réalisée par Celle (2000). Ses travaux ont permis de caractériser trois principales origines des masses d'air affectant la partie française du pourtour méditerranéen. Les précipitations d'origine méditerranéenne (flux de Sud) sont majoritaires et surviennent surtout en automne (53 % des volumes précipités à Carpentras). Les précipitations d'origine Atlantique Nord (flux de Nord-Ouest) et d'origine mixte (flux d'ouest) sont respectivement de 23 et 24 % des volumes précipités à Carpentras.

Sur le tableau 2-1, nous présentons la pluviométrie et la température moyennes mensuelles pour trois stations de la moyenne vallée du Rhône. Nous constatons une baisse des précipitations entre les mois de Septembre et Décembre de Montélimar jusqu'à Lyon. Ce gradient traduit la diminution de l'influence méditerranéenne sur les précipitations. La station de Montélimar montre une pluviométrie réduite en période estivale caractéristique d'un climat méditerranéen. Pour les stations de Valence et de Lyon, les deux maxima observés sont en mai et septembre/octobre avec un hiver assez sec. Les températures montrent la baisse de l'influence méditerranéenne du Sud au Nord sans pour autant relever d'un climat continental.

		jan.	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	cumul pluie (mm)	température annuelle moyenne (°C)
lyon	P	54.1	54.5	62.9	67.8	86	76.6	60.6	76.7	75.2	79.5	71.4	59.2	824.5	
	T	2.6	4.5	7.2	10.3	14.3	17.9	20.7	20	17	12.5	2.2	3.1		11.0
valence	P	50.8	60.9	73.1	68.6	90.8	60.7	43.4	71.4	93.9	113	77.9	59.9	864.4	
	T	3.5	5.2	7.9	10.5	14.8	18.3	21.4	20.8	17.5	12.9	7.4	4.1		12.0
montélimar	P	67.4	74.7	71.4	73.3	88.7	56.3	35.3	69.6	108	122	79.9	67.1	913.7	
	T	4.5	6	8.6	11.6	15.5	19.3	22.5	21.7	18.6	13.9	8.3	4.8		12.9

Tableau 2-1: Pluviométries (P en mm) et températures (T en °C) moyennes pour 3 stations de la moyenne vallée du Rhône. Données météofrance (1961-1990).

2.1.2 Pluviométrie de la zone d'étude

A l'échelle de notre zone d'étude, il existe 22 stations météorologiques pour lesquelles nous disposons d'un suivi pluviométrique sur au moins une dizaine d'années. Les données proviennent directement de Météofrance ou bien indirectement grâce aux données des travaux de Gouguassis (1982) et de Jeannolin (1985). Nous avons reporté sur la figure 2-1, les isohyètes des précipitations annuelles calculés par krigeage sur ces 22 stations. Les précipitations moyennes annuelles augmentent globalement vers l'Est. Cela est particulièrement net au niveau de la plaine de Valence où les contreforts du Vercors favorisent l'ascendance des masses d'airs. Cette ascendance provoque des pluies dites "orographiques" liées à la détente adiabatique de la masse d'air lors de son passage au niveau de la barrière montagneuse. Cette détente conduit au refroidissement de la masse d'air ascendante, puis à sa condensation jusqu'à la formation de gouttes de pluie. Au niveau de la Drôme des Collines, les isohyètes sont légèrement moins resserrés car le relief est moins

accentué qu'au niveau du Vercors. A partir de cette carte, nous pouvons déterminer par planimétrie la lame d'eau moyenne tombée annuellement sur la surface étudiée qui est égale à 950 mm.

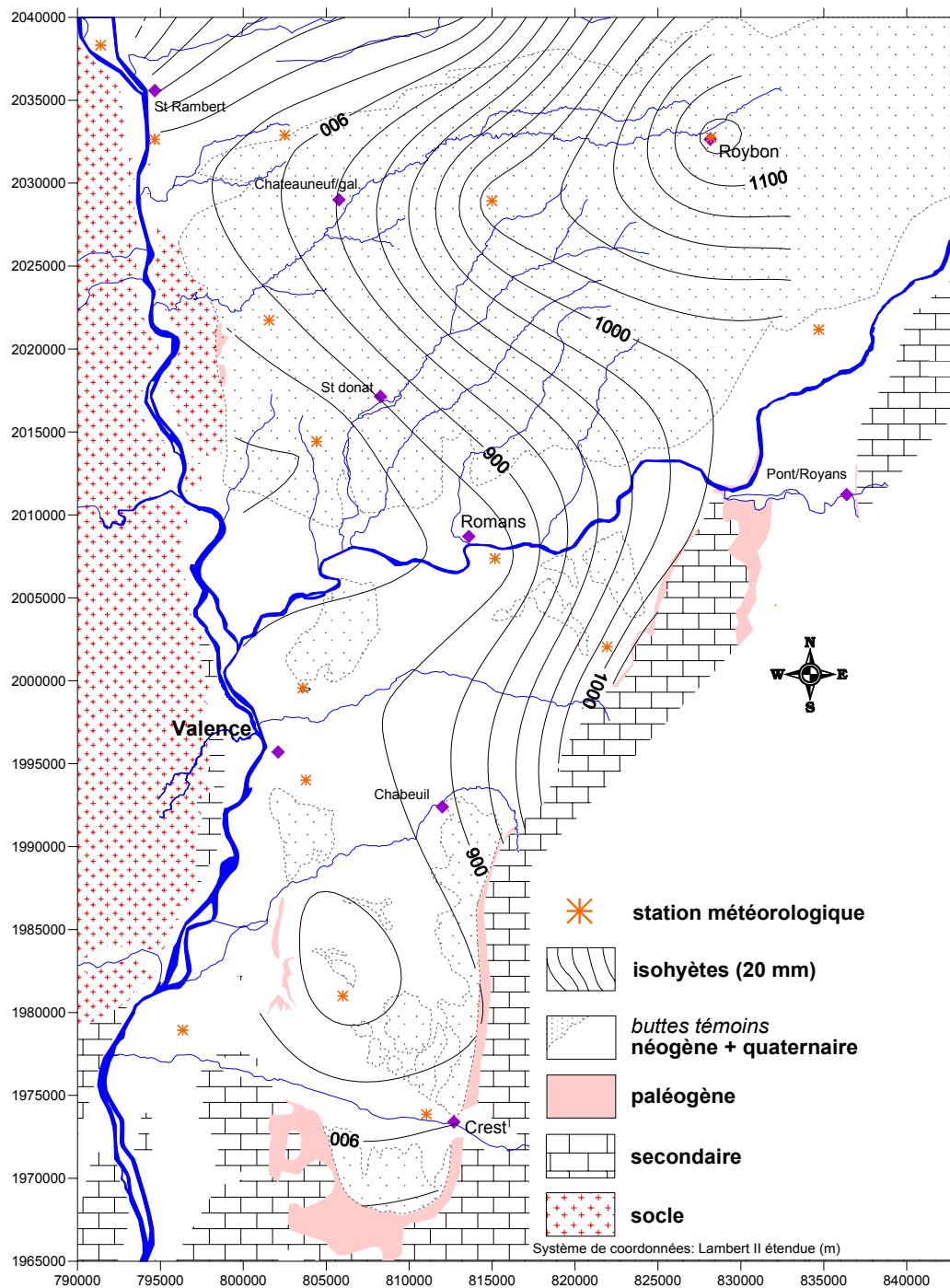


Figure 2-1: Carte des isohyètes normales (compilation de données).

2.1.3 Evapotranspiration

L'évapotranspiration potentielle (ETP) correspond à la valeur maximale du flux de vapeur d'eau provenant de la respiration des plantes et de l'évaporation des surfaces de contact plante-atmosphère et sol-atmosphère (Bonté, 2006). L'ETP est indépendante de la disponibilité réelle en eau. Plusieurs méthodes permettent d'estimer ou de mesurer l'évapotranspiration. La FAO⁷ recommande pour le calcul de l'ETP d'utiliser la formule Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998). Nous n'avons pas pu disposer des données nécessaires à ces calculs à un pas de temps journalier.

Les données disponibles sur notre secteur sont des ETP calculées par la formule de Penman, à un pas de temps décadaire. Sur notre secteur d'étude, l'évapotranspiration potentielle (ETP Penman) moyenne établie à la station météorologique de Saint Marcel les Valence sur une chronique de 1975-1996 est de 1020 mm par an. La station de Chabeuil donne une ETP moyenne annuelle de 1030 mm calculée pour une période de 5 ans. Ces valeurs sont tout à fait similaires. Le modèle Penman a tendance à surestimer les ETP de plus de 20 % dans des conditions de faible évaporation (Allen *et al.*, 1998). Nous avons donc appliqué une correction (C) aux données d'ETP décadiaries, de la manière suivante (tableau 2-2):

mois	janvier			février			mars			avril			mai			juin			juillet			août			septembre			octobre			novembre			décembre		
décades	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
P moy	14,9	13,8	19,7	19,8	17,6	15,3	17,9	23,9	26,3	25,7	15,3	33,1	32,4	27,7	29,6	28,0	28,1	19,3	19,3	18,1	14,8	20,0	14,9	31,3	26,4	37,5	40,1	32,9	39,5	30,6	28,2	21,6	21,9	21,6	16,0	18,8
ETP moy brute	5,2	6,2	6,9	7,7	9,8	12,1	17,8	19,9	23,7	25,9	33,5	34,5	36,9	39,0	47,0	46,9	54,4	56,0	58,6	65,1	69,7	56,7	54,7	50,0	41,0	31,3	25,8	20,3	14,8	11,2	8,6	7,2	6,5	5,1	5,3	4,6
C	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6
ETP moy corrigé	3,1	3,7	4,1	5,4	6,9	8,5	14,2	15,9	18,9	23,3	30,2	31,1	36,9	39,0	47,0	46,9	54,4	56,0	58,6	65,1	69,7	56,7	54,7	50,0	36,9	28,2	23,2	16,3	11,8	9,0	6,0	5,0	4,6	3,0	3,2	2,7

Tableau 2-2: Correction apportée aux ETP Penman (pas de temps décadaire) à la station de Saint Marcel les Valence.

Les décades des mois de Mai à Août sont considérées avec un coefficient C égal à 1 (pas de correction de l'ETP Penman). Ainsi, l'ETP moyenne annuelle passe de 1030 mm à 950 mm.

Les ETP calculées par Jeannolin (1985), selon d'autres modèles basés sur un pas de temps mensuel, donnent des ETP comprises entre 600 et 800 mm par an pour la même station. Ainsi, les précipitations utiles à la recharge de l'aquifère calculées par Jeannolin (1985) sont

⁷ Food and Agriculture Organisation: organisme dépendant de l'ONU créée en 1945 dont le but est d'améliorer l'état nutritionnel, le niveau de vie, la productivité agricole et le sort des populations rurales en général.

alors surestimées. Gouguassis (1982) a relevé que le calcul de l'ETP est d'autant plus précis que le "pas de temps" est plus court. Ainsi, une différence de 20 à 30 % s'observe entre des calculs d'ETP mensuelle et décadaire.

2.1.4 Calcul de la pluie utile

La pluie utile représente la part des précipitations disponibles pour le ruissellement et/ou pour l'infiltration vers l'aquifère. Seulement, pour estimer la pluie utile, il nous faut connaître l'évapotranspiration réelle (ETR). Celle-ci représente la lame d'eau évapotranspirée, *i.e.* la quantité d'eau retournant à l'atmosphère par simple évaporation ou bien par la transpiration des plantes.

Pour calculer l'ETR, nous utilisons la méthode du bilan de l'eau dans le sol de Thornthwaite (1948). Cet algorithme suppose que les excédents vont à la recharge de la nappe (pluie efficace Pe), sans considérer un éventuel ruissellement. La proportion d'eau ruisselée a été estimée, dans le Bas-Dauphiné, à 5 % des excédents (Rousselot *et al.*, 1978). Gouguassis (1982), à partir de l'analyse des débits classés de la rivière Herbasse, a évalué le volume total ruisselé sur ce bassin à 4 % du débit total de la rivière. Jeannolin (1985) a lui estimé que le ruissellement représente moins de 40 % à 70 % des excédents pour le faciès des sables de Chabrières et de la molasse argileuse, respectivement. Comme nous pouvons le constater, les écarts entre ces valeurs sont très importants traduisant la difficulté de l'estimation de ce ruissellement. C'est pourquoi, nous allons calculer l'ETR et la recharge maximale de l'aquifère ou pluie utile, selon la procédure du bilan hydrique qui consiste à satisfaire l'évapotranspiration potentielle si possible.

Notre démarche suppose que les conditions climatiques de la station de Saint Marcel les Valence sont uniformes sur tout le bassin de Valence. Or, Jeannolin (1985) et Gouguassis (1982) ont mis en évidence une nette variabilité du climat surtout dans la région du Bas-Dauphiné. Dès lors, notre démarche ne peut apparaître satisfaisante pour calculer la recharge maximale de l'aquifère. Nous avons reporté en annexe II, la démarche et les résultats sur l'ETR et la pluie utile. Dans cette démarche, nous avons pris en compte les 3 grandes catégories de sols existantes sur le bassin de Valence dont dépend la réserve utile (RU) nécessaire pour le calcul du bilan hydrique.

Sur notre zone d'étude, nous pouvons considérer qu'il existe 3 grandes catégories de sols nettement liées aux substratums géologiques (Bornand *et al.*, 1968).

On trouve:

- sur les formations molassiques, des sols caillouteux sableux, peu épais, très perméables, peu hydromorphes et pauvres en matières organiques;
- sur les cailloutis d'Alixan ou les formations du Miocène et Pliocène terminales, des sols limono-argileux, d'épaisseur et d'hydromorphie importante, de perméabilité très médiocre et riches en matières organiques;
- sur les alluvions, des sols sableux de caractéristiques intermédiaires entre les deux précédentes avec de bonnes perméabilités (Geng, 1988).

A chaque catégorie de sols est associée une réserve utile (RU). Ainsi pour les sols sur molasse, la RU est comprise entre 10 et 60 mm selon la profondeur du sol. Pour les sols sur cailloutis, elle se situe entre 84 et 168 mm et pour la dernière catégorie, entre 60 et 120 mm. Les moyennes des RU sont respectivement de 35, 126 et 90 mm.

Les ETR calculées par la méthode du bilan sont comprises entre 610 et 701 mm et la pluie efficace calculée est comprise entre 161 et 252 mm. Le pourcentage des pluies utiles représente 18 à 29 % des précipitations moyennes de la station de St Marcel. En prenant la lame d'eau moyenne annuelle précipitée de 950 mm sur notre surface d'étude, la pluie efficace maximale est comprise entre 171 et 276 mm, soit une moyenne de 222 mm.

2.1.5 Incertitudes sur la pluie utile

Gouguassis (1982) et Jeannolin (1985) ont estimé la recharge moyenne maximale à 278 et 333 mm respectivement pour la plaine de Valence et le Bas-Dauphiné. Notre valeur est bien inférieure et il nous faut donc comprendre l'origine de cette différence.

La première différence provient de la méthode de calcul de l'ETP et de l'ETR. La comparaison de nos valeurs selon les trois catégories de sol et la valeur moyenne proposée par Jeannolin (600 ± 60 mm) montre une légère surestimation de 10 %. Cette différence reste tout à fait compréhensible compte tenu des incertitudes dans le calcul de ces paramètres.

Par contre, la principale différence provient bien évidemment de l'extrapolation à partir d'une unique station sur tout le bassin de Valence de l'ETR et donc de la pluie efficace. En effet, Gouguassis a montré la nette variabilité spatiale des conditions évapotranspiratoires sur l'ensemble du Bas-Dauphiné (données obtenues à partir de plusieurs stations de mesure). Ainsi, entre la basse vallée de la Valloire et la commune de Roybon, il existe un écart de 326 mm/an de pluie efficace maximale. La Drôme des Collines montre donc une différence climatique marquée par rapport à la plaine de Valence où les écarts sont plus limités. Malgré une meilleure précision dans nos valeurs d'ETP, basées sur l'ETP Penman corrigée au pas de temps décadaire, notre estimation de la recharge maximale annuelle est donc probablement sous estimée pour la Drôme des Collines. C'est pourquoi, nous utiliserons au dernier chapitre les valeurs obtenues par ces deux auteurs pour le bilan hydrogéologique.

2.2 HYDROGEOLOGIE GENERALE

Les ressources en eaux souterraines de notre région ont été, depuis plus de 40 ans, l'objet de nombreux travaux. La première est sans doute l'étude des nappes alluviales de la Drôme par le bureau d'étude BURGEAP en 1964. Par la suite, des études plus localisées ont permis de préciser les capacités des différents réservoirs étudiés.

2.2.1 Les alluvions du Rhône, de l'Isère et de la Drôme

Les alluvions de l'Isère et de ses anciens cours sont formées d'éléments d'origine alpine: galets de toutes grosseurs, souvent altérés (les roches feldspathiques sont kaolinisées), avec remplissage interstitiel de sable altéré et assez argileux par endroits. Cette formation se retrouve au niveau de la Valloire (160 km²) et au niveau de la plaine de Valence (192 km²). La perméabilité de l'ensemble est assez élevée de l'ordre de 2.10⁻² m/s (BURGEAP, 1964; BURGEAP, 1969). L'épaisseur de cette formation est très variable, jusqu'à 70 m d'épaisseur pour les plus hautes terrasses.

Les alluvions du Rhône se situent à l'ouest de notre région, sur une superficie d'environ 80 km², toujours proche de son cours actuel. Ces alluvions sont, comme celles de l'Isère,

d'origine alpine et formées surtout de roches cristallophyliennes et métamorphiques mais peu altérées. La perméabilité de l'ensemble est légèrement plus faible que pour les alluvions de l'Isère, elle est de l'ordre de 5.10^{-3} m/s (BURGEAP, 1964; BURGEAP, 1969). L'épaisseur est aussi variable de 5 à 25 m.

Les alluvions de la Drôme se situent entre Crest et la confluence Drôme/Rhône et sont constituées de cailloutis calcaires plus ou moins roulés dans une matrice sableuse. Entre Crest et Livron, la superficie de ce secteur est d'environ 30 km² et ces alluvions ont une perméabilité de l'ordre de 1 à 3.10^{-3} m/s (DIREN, 2001). Cependant, les récents travaux sur le secteur des Freydières ont montré des débits spécifiques exceptionnels jusqu'à 450 m³/h par mètre de rabattement (Idées-Eaux, 2005). Entre Livron et la confluence Drôme/Rhône, la superficie du cône de déjection est d'environ 55 km², où les cailloutis ont une perméabilité d'environ 3.10^{-3} m/s. L'épaisseur de ces alluvions est de l'ordre de 10 m mais avec localement des chenaux plus profonds (25 m) où il existe des circulations préférentielles.

2.2.2 Les cailloutis d'Alixan

Ces cailloutis proviennent du démantèlement des assises crétacées du Vercors. Au pied du massif, il s'agit d'éboulis et de dépôts de pente plus ou moins remaniés par les eaux de ruissellement (cônes de déjections). En direction de l'Ouest, ces éboulis passent progressivement à des alluvions presque complètement formées de galets calcaires, souvent aplatis ou incomplètement roulés. La perméabilité de cette formation dépend de la nature du remplissage interstitiel des galets calcaires: nulle à faible lorsque ce remplissage est argileux (argile provenant des niveaux marneux du Crétacé), élevée à très élevée lorsque ce remplissage est grossier ou inexistant. La perméabilité moyenne se situe aux environs de 5.10^{-4} m/s (BURGEAP, 1964). L'épaisseur de ces cailloutis est aussi très variable de 0 à 15 m.

En dehors des cailloutis d'Alixan, les ressources des alluvions permettent des débits d'exploitation souvent très intéressants. Malheureusement, ces ressources sont très vulnérables aux pollutions anthropiques (diffuses ou accidentelles). De nombreux captages AEP situés dans ces alluvions montrent des teneurs en nitrate dépassant parfois la norme de potabilité de 50 mg/l. Certains de ces captages ont donc été arrêtés en attendant une baisse significative des teneurs en nitrate.

2.2.3 Les ressources karstiques

La ressource karstique principale provient des calcaires urgoniens sur la bordure occidentale du Vercors. Ceux-ci sont plus ou moins karstifiés et donnent naissance à quelques sources rarement bien identifiées. En effet, la plupart des sources sont masquées par les éboulis. Les sources identifiées comme karstiques sont les sources de la commune de Peyrus "les tuffs", de la Baume d'Hostun "le château". A l'extrême Nord de l'anticlinal de la Raye se trouve la résurgence de Saint Nazaire en Royans (grotte du Thaïs), qui possède un réseau karstique noyé et reconnu en plongé jusqu'à 715 m, avec un débit à l'étiage de 124 l/s (446 m³/h). Plusieurs forages ont été effectués dans ces calcaires et un seul a recoupé une cavité karstique exploitable. Il s'agit du forage de la carrière SIKA vers Beauregard-Baret. Le niveau statique de ce forage se situe à +176,5 m NGF soit seulement 14 m plus haut que le niveau de l'Isère à Saint Nazaire en Royans (rapport de fin de sondage). La recherche d'eau effectuée par BURGEAP dans le secteur de Peyrus et Combovin a montré que le bassin d'alimentation du réseau karstique de la source de Peyrus est d'étendue très limitée et correspond approximativement au bassin versant de l'anticlinal de la Raye (BURGEAP, 1994; BURGEAP, 2002). A Combovin, cette recherche n'a pas montré l'existence d'un réseau karstique bien que les calcaires soient très fortement fracturés.

L'autre ressource karstique est celle constituée par les calcaires récifaux du Jurassique supérieur (cf. Figure 1-2). Cependant, ceux-ci sont profondément enfouis sous la plaine de Valence et rendent l'utilisation de cette ressource trop aléatoire (Razin *et al.*, 1992). Le sondage profond de Montmiral 1 a recoupé une cavité d'au moins 70 m de hauteur à 1120 m de profondeur, raison pour laquelle le sondage n'a pas été poursuivi (rapport de fin de sondage). Des tests positifs de production d'eau ont été réalisés sur cet horizon (eau à 41 °C), ce qui avait amené la ville de Valence à envisager la possibilité d'utiliser de cette ressource en géothermie. Malheureusement, ce niveau productif n'a pas été retrouvé sur le forage géothermique de la ville de Valence (GVal).

2.2.4 La molasse miocène

L'aquifère miocène représente la plus importante ressource régionale en eau souterraine de qualité. Cet aquifère a été décrit comme un réservoir multicouche à cause de nombreuses passées argileuses ou bien grésifiées. Toutefois, nous avons vu au premier chapitre qu'en dehors du miocène basal et terminal, la structure multicouche n'est pas valable à l'échelle du bassin. Nous pouvons alors considérer, au sein de la "molasse" et à l'échelle du bassin, qu'il y a continuité des niveaux perméables.

Cet aquifère a fait l'objet de quelques études régionales (Rousselot *et al.*, 1978; Gougoussis, 1982; Gouisset *et al.*, 1985; Barrat *et al.*, 1988; Barrat *et al.*, 1988) ou bien de manière plus ciblée sur notre secteur d'étude (Steiner, 1974; de Bellegarde *et al.*, 1977; Duplouy, 1978; Nicolo, 1978? CPGF, 1980; de Bellegarde *et al.*, 1980; SRAE Rhône-alpes, 1981; CPGF, 1983; Jeannolin, 1985; SRAE Rhône-alpes, 1991).

Nous résumons dans la partie suivante les connaissances connues sur cet aquifère ainsi que les nouvelles données acquises sur cet aquifère.

2.3 HYDROGEOLOGIE DE L'AQUIFERE NEOGENE

2.3.1 Piézométrie

2.3.1.1 Données bibliographiques

Notre région d'étude peut se diviser en trois entités hydrogéologiques distinctes entre la Drôme des Collines au Nord de l'Isère, la plaine de Valence entre l'Isère et la Drôme et enfin, le bassin de Crest au Sud de la Drôme. Ces entités hydrogéologiques ont fait l'objet de deux campagnes de mesures du niveau d'eau de l'aquifère miocène. La première a été effectuée par le cabinet Duplouy (1978) sur la partie Nord de l'Isère (relevés de Juillet à Septembre 1977) (figure 2-2). La seconde a été effectuée par Jeannolin (1985) sur le bassin de Crest et la plaine de Valence (relevés de Août à Septembre 1983) (figure 2-3).

- la Drôme des Collines:

Il ressort de l'étude effectuée par le cabinet Duplouy que les vallées de la Valloire et de l'Isère sont les axes de drainage majeurs de la nappe de la Drôme des Collines. Toutes les vallées comme celles de l'Herbasse et de la Galaure drainent l'aquifère molassique, sauf la vallée du Chalon qui est une vallée sèche. L'alimentation principale provient des parties les plus hautes au niveau des plateaux de Chambaran et de Thivolet (secteur nord-est). Cependant, toutes les buttes molassiques induisent la présence de dômes piézométriques qui sont autant de zones d'alimentation de l'aquifère. Les gradients hydrauliques sont de l'ordre de 3 % à 5 % dans la partie Ouest, là où la molasse est plus grossière, et de 10 % à 15 % à l'Est et au Sud de la zone.

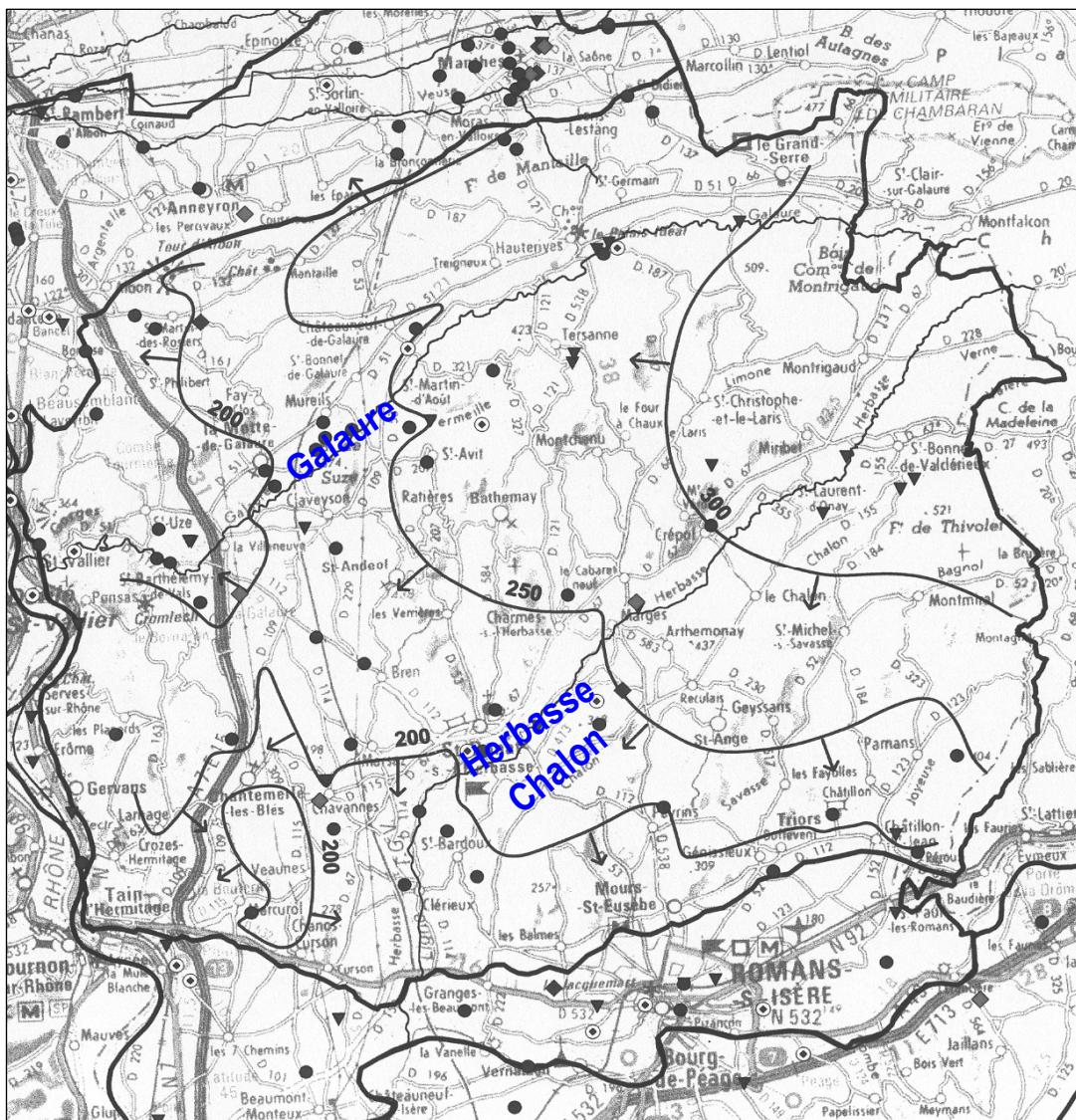


Figure 2-2: Carte piézométrique du Miocène Nord-Drôme tirée de l'étude Duplouy (DIREN, 2001).

- la plaine de Valence:

Au Sud de l'Isère, les vallées de l'Isère, du Rhône et de la Drôme constituent les exutoires de cet aquifère. Il est possible d'identifier trois zones de drainage majeur qui sont situées au niveau de Valence, du couloir de Beauvallon et de la vallée de la Drôme⁸. La nappe suit parfaitement la topographie avec une alimentation provenant des contreforts du Vercors à l'Est de la plaine, mais aussi des quelques buttes molassiques témoins (plateau de Fouillouse, Lautagne, buttes d'Upie).

- le bassin de Crest:

Ce bassin molassique possède comme unique exutoire, la Drôme.

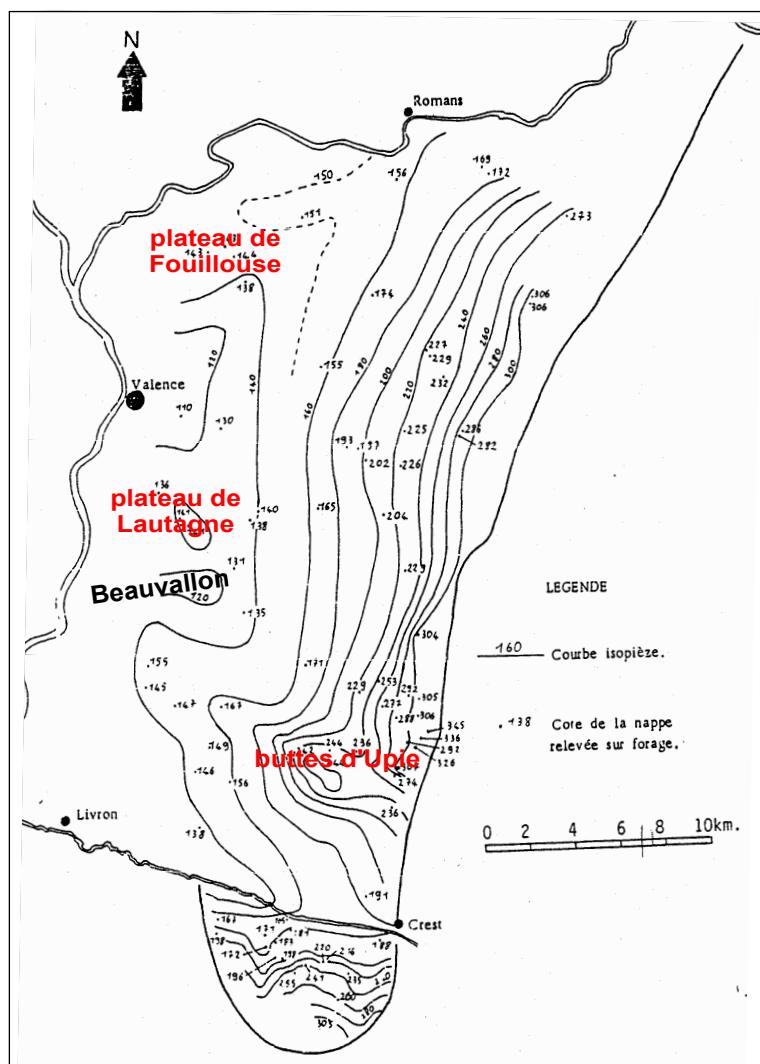


Figure 2-3: Carte piézométrique du Néogène de la plaine de Valence et du bassin de Crest (Jeannolin, 1985).

⁸ Deux de ces zones de drainage (Valence et Drôme) sont constituées d'argiles sableuses pliocènes, qui sont *a priori* moins perméables que la molasse (nous reviendrons au paragraphe 2.3.2 sur les propriétés hydrodynamiques des matériaux néogènes).

2.3.1.2 Stabilité interannuelle du niveau piézométrique

Nous avons cherché à comparer les niveaux d'eaux relevés dans les anciennes études avec ceux mesurés actuellement sur des forages qui existent encore aujourd'hui. Nos mesures montrent que les niveaux sont très similaires à ces anciennes données. De plus, grâce aux suivis des forages récents, réalisés au cours de ce travail, nous avons pu vérifier la précision satisfaisante de ces anciennes cartes piézométriques et vérifier surtout que la piézométrie de l'aquifère molassique n'a pas sensiblement varié depuis les 30 dernières années malgré la très forte augmentation des prélèvements sur cette ressource aquifère.

Par ailleurs, nous disposons sur le bassin de Valence de deux piézomètres (gérés par la DIREN Rhône-Alpes) situés dans des puits dans la molasse miocène. Les chroniques piézométriques montrent une fluctuation de la nappe en fonction des successions d'années sèches ou humides (figure 2-4). Ces suivis montrent de manière satisfaisante une bonne stabilité de l'aquifère à l'échelle pluriannuelle et que les étiages 2003-2004-2005 au cours desquels nous avons fait nos contrôles se situent en position moyenne.

Dans le but d'améliorer le réseau de suivi quantitatif de cet aquifère, nous avons équipé de centrales de mesure du niveau de la nappe trois forages abandonnés. Ces capteurs ont été installés fin 2003 et retirés en Septembre 2005, soit sur deux cycles hydrologiques. Deux de ces capteurs sont situés au niveau de la plaine de Valence sur les communes de Chabeuil et de Bourg de Péage. Le dernier est situé sur la commune de Claveyson dans la Drôme des Collines. Le BRGM a nouvellement intégré dans son réseau de surveillance le piézomètre de Claveyson ainsi qu'un nouveau forage mieux situé au niveau de la plaine de Valence (CET du Petit Pourcieux sur la commune de Chatuzange le Goubet).

Pour la nappe superficielle, l'étude du cabinet Idées Eaux sur la nappe de Romans (relevés de 2002) montre des niveaux tout à fait similaires par rapport à l'étude BURGEAP de 1964 (Idées-Eaux, 2000). De plus, d'autres piézomètres situés dans les alluvions suivis par la DIREN montrent aussi une bonne stabilité de cette nappe superficielle à l'échelle pluriannuelle.

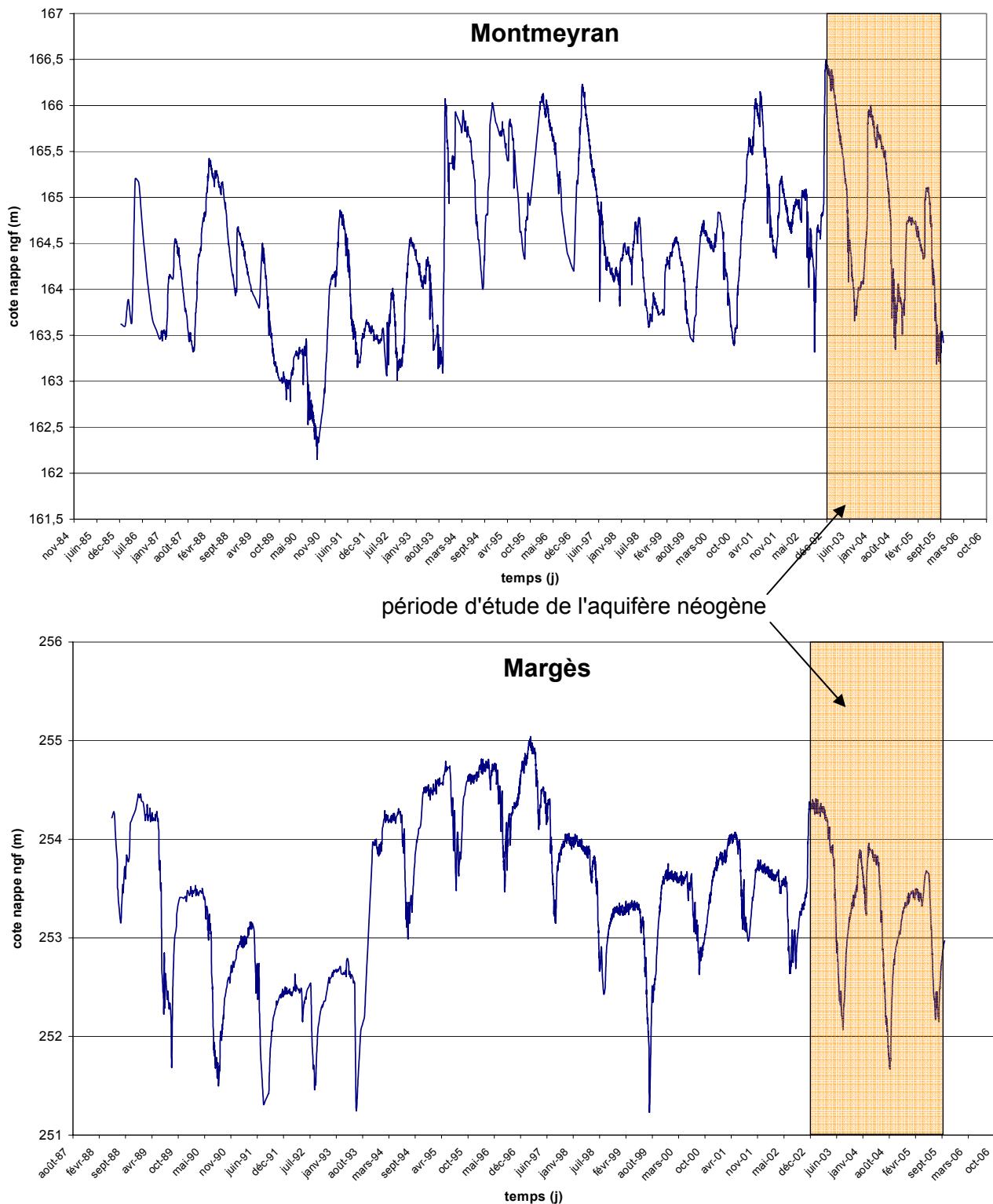


Figure 2-4: Suivis piézométriques de l'aquifère molassique (données DIREN Rhône-Alpes).

2.3.1.3 Carte piézométrique de synthèse

A cause de la difficulté à mesurer les niveaux d'eaux sur les forages profonds (forages fermés et non équipés en tube de mesure), il n'a pas été possible d'effectuer de campagne piézométrique générale sur l'aquifère molassique. Jeannolin (1985) a démontré la quasi unicité des niveaux statiques entre les nappes superficielles et la nappe profonde, en dehors de quelques secteurs particuliers (cf. § 2.5). Nous venons de montrer, par ailleurs, la stabilité des niveaux d'eaux depuis les premières mesures. Ainsi à partir de ce double constat, nous avons choisi de recalculer, à partir des données existantes (base de données et données bibliographiques), une piézométrie de l'ensemble aquifère (aquifère néogène et superficiel). Les origines diverses de ces données nous obligent à ne représenter que les grands secteurs de recharge et les axes d'écoulement de cet ensemble aquifère.

La réalisation de cette synthèse a nécessité plusieurs phases.

- Dans un premier temps, il a fallu réunir toutes les mesures disponibles et utilisables du niveau d'eau. Pour cela, nous avons utilisé les données bibliographiques (étude BURGEAP 1964 sur la nappe superficielle de la plaine de Valence, étude Géo+ sur la nappe de la Drôme) auxquelles nous avons confronté et ajouté les données provenant de notre base;
- Les mesures des niveaux d'eau sont de qualités variables et il a fallu faire un tri de ces données. En effet, notre base de données regroupe des informations d'origine différente (données des foreurs, des agriculteurs, etc.). Par exemple, concernant la base de données des irrigants, les agriculteurs donnent le niveau d'eau moyen de leurs ouvrages. Ces niveaux nous paraissent parfois totalement aberrants, sans rapport avec le contexte hydrogéologique. Alors, dans un second temps, un travail d'élimination des aberrations piézométriques et des forages où une différence de charge existe entre nappe profonde et nappe superficielle (cf. Figure 2-12), a été effectué avant de faire l'interpolation de ces données pour créer cette synthèse. Ainsi, 1111 points de référence ont été retenus pour les deux aquifères superposés (base de données + études hydrogéologiques de référence).
- Une dernière étape de lissage de l'information a été effectuée pour ne laisser ressortir que les grands axes d'écoulement de la nappe. Pour cela, nous avons choisi d'appliquer un modèle de variogramme linéaire, basé sur le variogramme expérimental. Ce choix

subjectif, nous permet de situer les grandes zones de drainage et d'alimentation de l'aquifère, ce qui était le but recherché.

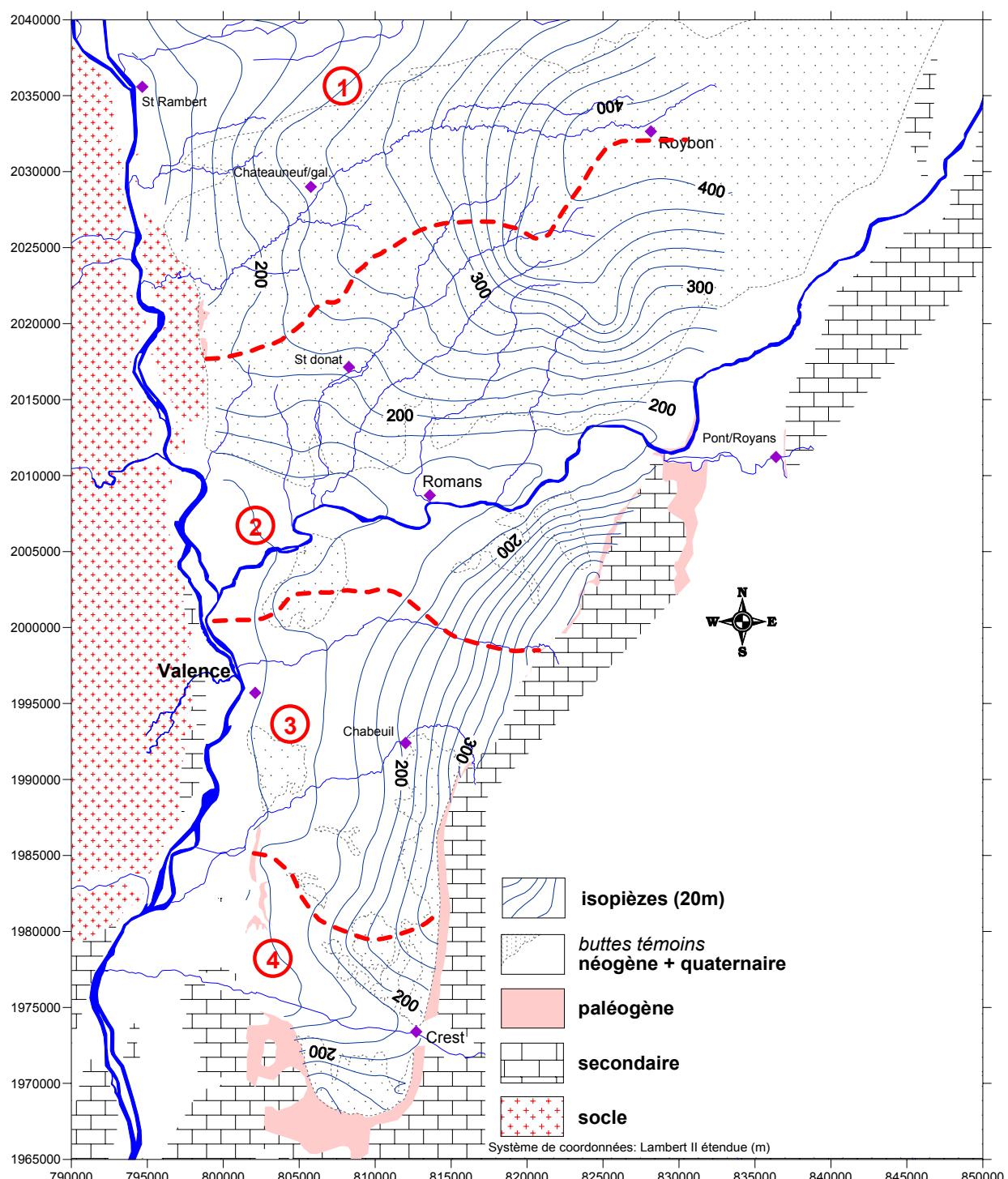


Figure 2-5: Carte piézométrique synthétique de l'ensemble aquifère néogène et quaternaire.

La figure 2-5 présente la piézométrie moyenne de la nappe de l'ensemble néogène et quaternaire du Bas-Dauphiné obtenue par krigeage. Il est bien évident que cette carte n'est intéressante qu'à l'échelle de l'étude car elle permet seulement de situer les grandes lignes d'écoulement de cet ensemble aquifère.

Sur cette carte, nous pouvons distinguer quatre grands bassins hydrogéologiques, qui ne communiquent vraisemblablement pas:

- une zone d'écoulement de l'Est vers l'Ouest vers les vallées de la Valloire et de la Galaure (1);
- une zone de convergence des écoulements vers l'Isère (2);
- une zone d'écoulement Est-Ouest vers le Rhône correspondant approximativement à la plaine de Valence (3). Cette nappe est quasiment cylindrique avec des gradients hydrauliques diminuant de l'amont vers l'aval;
- une zone de convergence vers la Drôme (4).

Nous utiliserons cette carte piézométrique pour la compréhension des phénomènes que nous mettrons en évidence dans les chapitres suivants puis dans l'élaboration du fonctionnement hydrogéologique global du système. Cette carte pourra être intégrée dans une modélisation future du système aquifère.

2.3.2 Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère néogène

2.3.2.1 Permeabilité et transmissivité

Les paramètres hydrogéologiques tels que perméabilité (K en m/s) et transmissivité (T en m^2/s) sont les paramètres de base pour évaluer les caractéristiques d'un aquifère. La mesure de ces paramètres nécessite la mise en place de pompages d'essais mais peu de ces pompages ont été effectués sur l'aquifère molassique. Grâce à la base de données qui regroupe toutes les informations sur les forages anciens et récents sur notre secteur de travail, seules 66 valeurs de perméabilité et 62 valeurs de transmissivité ont été répertoriées. Nous avons reporté, dans le tableau 2-3, les descriptions statistiques de ces paramètres et sur la figure 2-6, les données recensées sur le bassin de Valence.

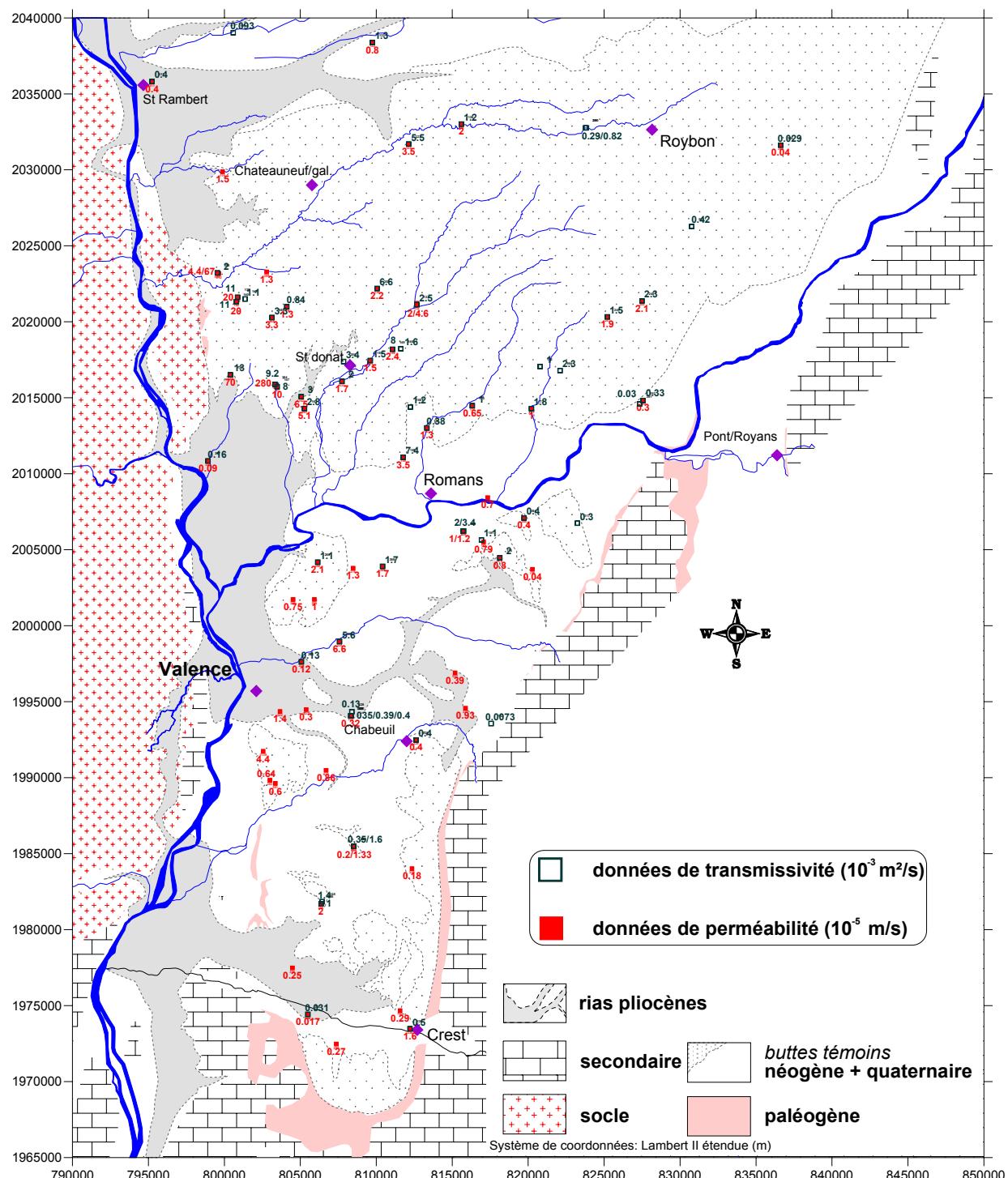


Figure 2-6: Carte des paramètres K et T recensés de l'aquifère néogène.

	K (10^{-5} m/s)			T (10^{-3} m 2 /s)		
	Néogène	Miocène	Pliocène	Néogène	Miocène	Pliocène
nombre de valeurs	66	60	6	62	58	4
moyenne	8,53	9,34	0,43	2,38	2,53	0,20
médiane	1,30	1,33	0,28	1,25	1,45	0,28
écart-type	35,99	37,68	0,49	3,02	3,07	0,49
minimal	0,01	0,01	0,09	0,01	0,01	0,13
maximal	280	280	1,40	13	13	0,40

Tableau 2-3: Description statistique des paramètres hydrodynamiques (K et T) de l'aquifère néogène.

Nous avons représenté les histogrammes des paramètres (K et T) sur la figure 2-7.

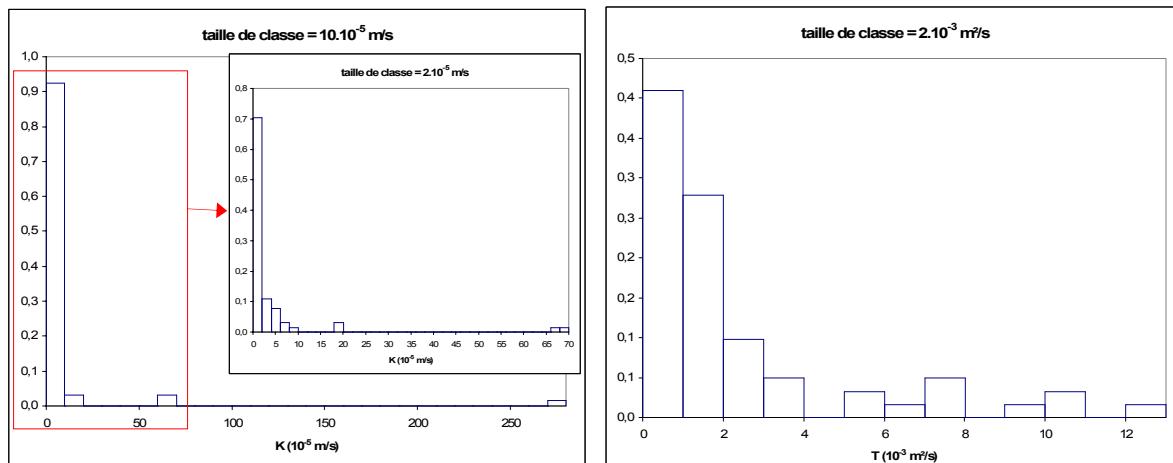


Figure 2-7: Histogrammes des perméabilités (K) et des transmissivités (T).

La distribution statistique est proche d'une loi log-normal et donc les médianes sont beaucoup plus représentatives que les moyennes dans la caractérisation des qualités hydrodynamiques de l'aquifère néogène. Nous pouvons séparer, dans cet aperçu statistique, les valeurs provenant de la molasse miocène, du Pliocène argilo-sableux. Ainsi, malgré le peu de forages captant les horizons du Pliocène, les médianes des perméabilités et transmissivités de ces horizons sont respectivement de $0,28 \cdot 10^{-5}$ m/s et de $0,28 \cdot 10^{-3}$ m 2 /s. Les médianes de ces paramètres passent, pour la molasse miocène, à $1,33 \cdot 10^{-5}$ m/s et à $1,45 \cdot 10^{-3}$ m 2 /s, respectivement. Il existe donc un rapport proche de 5 entre les caractéristiques hydrodynamiques (K, T) de la molasse miocène et celles du prisme marin des Gilbert deltas

pliocènes du Rhône et de ses affluents. Il n'y aurait donc pas de discontinuité forte dans la circulation de l'eau entre la matrice miocène et pliocène de cet aquifère.

Il faut toutefois remarquer que quelques forages (essentiellement agricoles) réalisés dans le Pliocène et dans la molasse miocène ont été abandonnés par suite de leurs très mauvaises productivités. Dans ce cas la mesure des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère n'a pas été effectuée si bien que les médianes de K et T devraient très certainement être corrigées. La correction a apporter à K et T pour le Pliocène est sans doute plus importante car l'on dispose d'un nombre de données connues beaucoup plus faible que celui correspondant à la molasse miocène. Ainsi le rapport proche de 5 entre les propriétés hydrodynamiques (K,T) de la molasse et du Pliocène est probablement sous-évalué.

Nous avons évoqué au chapitre précédent l'intérêt aquifère de l'horizon infra-pliocène constitué de matériaux grossiers issus de la phase de démantèlement lié à la crise messinienne. Les potentialités de cet horizon ont été démontrées lors des travaux de la ligne TGV près de Eurre. Ces travaux ont montré l'existence entre la molasse et l'argile pliocène d'un niveau de brèche plus perméable ($K = 10^{-5}$ m/s) que la molasse ($K = 10^{-7}$ m/s) avec une eau en charge (4 à 5 m au dessus du terrain naturel) (Bobillon, 2005). Par ailleurs, le pliocène marin est constitué de niveaux parfois nettement sableux (cf. Figure 1-24) surtout situés à la base de la série marine qui montre au forage de Valence Briffaut une perméabilité de $1,4 \cdot 10^{-5}$ m/s similaire à la perméabilité de la molasse⁹.

A partir de la piézométrie, Jeannolin (1985) avait évoqué le rôle joué par les rias pliocènes de la plaine de Valence comme un drain possible de l'aquifère miocène. Dans ce sens, l'étude des paramètres hydrodynamiques de l'infra-pliocène et des sables du pliocène marin montre une perméabilité similaire et même supérieure à la molasse miocène. Pour que ces horizons puissent jouer le rôle de drain, il faut aussi qu'il y ait continuité de ces niveaux perméables entre eux. La continuité des sables des Gilbert deltas marins n'a pas été démontrée dans le bassin de Valence mais celle-ci existe au niveau des sables de l'Astien dans la région de Béziers (Barbecot, 1999). L'horizon infra-pliocène est continu puisqu'il provient d'une même phase de démantèlement.

⁹ L'horizon sableux entre 187 et 228 m et l'horizon de sable grossier situé entre 145 et 187 m ne peuvent être rattachés de manière certaine au Pliocène.

2.3.2.2 Le coefficient d'emmagasinement (S)

Les coefficients d'emmagasinements calculés au sein de l'aquifère miocène sont au nombre de 12 et sont présentés dans le tableau 2-4. Le coefficient d'emmagasinement en nappe libre s'identifie à la porosité efficace de la molasse. La moyenne et la médiane sont faibles par rapport à la valeur de 8 % déterminée par Jeannolin (1985). Jeannolin a utilisé la résistivité de la roche saturée à partir de sondages électriques pour déterminer cette porosité utile (méthode d'Archie). Nos données reflètent la porosité efficace ponctuelle car déterminée par pompage d'essai. On peut s'interroger sur la représentativité du coefficient d'emmagasinement en nappe libre car tous les forages sauf un (forage de la commune de St Donat 'pendillon' situé sur une butte molassique) sont situés dans les vallées, qui sont des zones de drainage de l'aquifère (cf. Figure 2-12). Nous verrons, au chapitre 6, que ces zones de drainage montrent une légère captivité de l'aquifère molassique. Seul le coefficient d'emmagasinement du forage Pendillon est alors représentatif de la porosité efficace (valeur de 15 %). Dans le bassin molassique de Valréas, Huneau (2000) propose une valeur 10 % pour la porosité efficace dans un bassin moins perméable que celui de Valence. Nous utiliserons au chapitre 6 une valeur intermédiaire égale à 12 % pour la porosité efficace avec une incertitude de 3 % entre la valeur mesurée au forage Pendillon et celle utilisée par Jeannolin (1985).

nombre de valeurs	S 12	S libre? 6	S captif 6
moyenne	$1,91 \cdot 10^{-2}$	$3,75 \cdot 10^{-2}$	$7,95 \cdot 10^{-4}$
médiane	$6,50 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$	$3,75 \cdot 10^{-4}$
écart-type	$4,21 \cdot 10^{-2}$	$5,57 \cdot 10^{-2}$	$1,15 \cdot 10^{-3}$
minimal	$8,00 \cdot 10^{-6}$	$1,00 \cdot 10^{-2}$	$8,00 \cdot 10^{-6}$
maximal	$1,50 \cdot 10^{-1}$	$1,50 \cdot 10^{-1}$	$3,00 \cdot 10^{-3}$

Tableau 2-4: Coefficient d'emmagasinement de l'aquifère miocène.

Parmi les forages pour lesquels S correspond à une nappe captive, nous retrouvons le forage des Gonnards que l'on savait mis en charge sous les argiles pliocènes ainsi que les forages des Bayannins du SIE Rochefort-Samson. Les autres forages (Petits Eynards du SIE Plaine de Valence, du Pinet du SIE Rochefort-Samson et Vittels à St Barthelemy de Vals) témoignent aussi de la captivité de la nappe dans ces secteurs. Les coupes de ces forages montrent

toujours l'existence d'au moins un horizon argileux permettant d'expliquer la captivité de la nappe:

- forage du Pinet: 39 m d'argile bleue pliocène recouvrent la molasse;
- le forage des Petits Eynards montre sous les alluvions, 53 m de sables argileux molassiques;
- forages Vittels: alternance de sables grossiers et d'argiles sableuses molassiques.

Ces quelques données vont nous permettre de préciser un peu mieux les zones de captivité de l'aquifère molassique (cf. § 2.5).

2.3.2.3 Les débits spécifiques

L'essentiel des forages d'eaux sont des forages à usage domestique ou d'irrigation qui n'ont fait l'objet d'aucun rapport hydrogéologique. La seule donnée facilement disponible concernant les caractéristiques de l'aquifère est à la connaissance du rabattement de la nappe en fonction du débit extrait. Les données de débit spécifique (Q/s) recensées sont au nombre de 258 sur l'aquifère néogène et la distribution statistique est reportée dans le tableau 2-5.

Q/s en $m^3/h/m$	Néogène	Miocène	Pliocène
nombre de valeurs	258	251	7
moyenne	4,1	4,2	1,53
médiane	2,3	2,5	0,70
écart-type	5,35	5,41	1,72
minimal	0,02	0,02	0,35
maximal	40	40	5

Tableau 2-5: Valeurs des débits spécifiques pour les différentes matrices aquifères.

Sur la figures 2-8, nous avons représenté les histogrammes des débits spécifiques en 5 classes en fonction de la nature de l'encaissant. Le choix de ces classes est subjectif mais il permet de se représenter facilement les potentialités de l'aquifère:

- $Q/s < 1 m^3/h/m$: nulles à faibles ;
- $1 < Q/s < 3$: moyennes ;
- $3 < Q/s < 6$: bonnes ;

- $6 < Q/s < 10$: très bonnes ;
- $Q/s > 10 \text{ m}^3/\text{h/m}$: excellentes à exceptionnelles.

Ici aussi les médianes sont les plus représentatives de chaque partie de l'aquifère et les mêmes remarques peuvent être faites concernant la représentativité des données concernant le Pliocène puisqu'un certain nombre de forages n'a jamais été exploité.

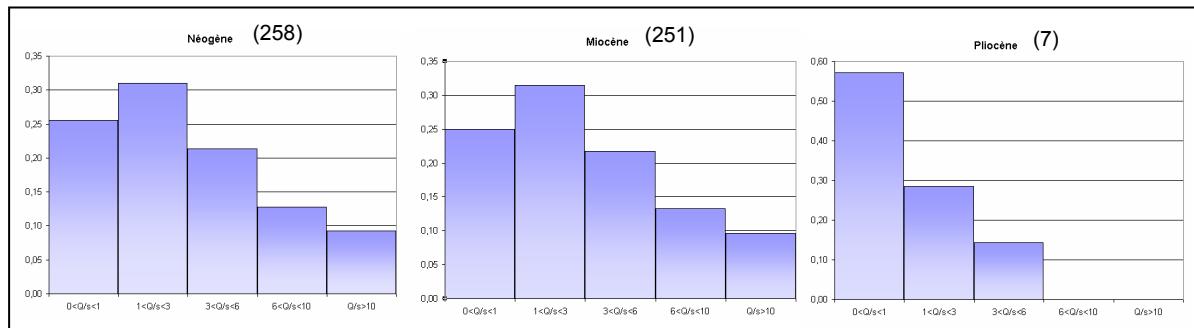


Figure 2-8: Histogramme des débits spécifiques en fonction de la nature de l'encaissant.

Les plus forts débits spécifiques de la molasse miocène se situent en bordure du socle cristallin. Dans ce secteur la molasse est très grossière, presque graveleuse. Pour le Pliocène, le débit spécifique le plus élevé correspond au forage de Valence Briffaut. Jeannolin (1985) évoque un Q/s de $5 \text{ m}^3/\text{h/m}$ pour le forage de la commune d'Allex¹⁰. Cependant, les données de l'ouvrage initial ne montrent qu'un Q/s de $0,7 \text{ m}^3/\text{h/m}$. Ce forage s'est sans doute par la suite développé. Ces résultats montrent bien les potentialités des niveaux sableux des rias pliocènes en particulier dans la vallée de la Drôme où Ballesio (1972) remarque l'existence de très nombreuses passées sableuses.

A partir des classes définies précédemment, nous proposons la carte de la distribution spatiale des débits spécifiques sur la figure 2-9. Bien que le débit spécifique représente à la fois les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère et du forage lui-même (diamètre, hauteur des crêtes), cette carte retranscrit bien les potentialités de l'aquifère pour l'épaisseur de la nappe prospectée. Cette carte de référence pourra être affinée au fur et à mesure des nouveaux forages qui seront effectués dans le bassin de Valence. Cette distribution des débits spécifiques montre une nette hétérogénéité Est-Ouest. En effet, les plus forts débits

¹⁰ Ce forage est abandonné du fait de la mauvaise qualité chimique de l'eau pour l'AEP (fer, manganèse, H_2S).

spécifiques se situent du côté ouest, là où la molasse est la plus grossière et la moins cimentée. A l'inverse la partie Est, surtout au niveau de la plaine de Valence, montre des débits spécifiques faibles ($Q/s < 1 \text{ m}^3/\text{h/m}$). Dans ce secteur la molasse est fine et très cimentée.

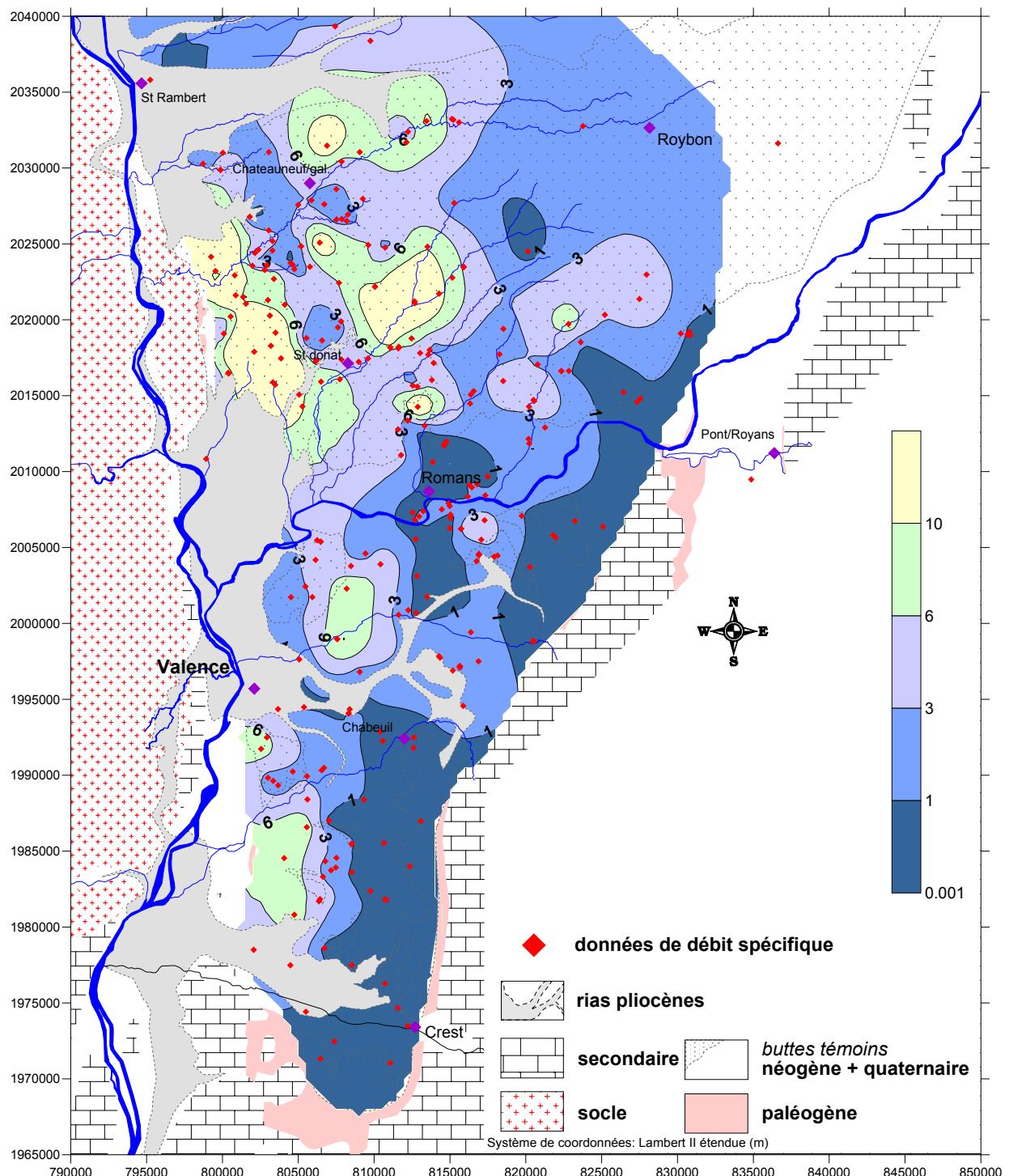


Figure 2-9: Carte des débits spécifiques de l'aquifère miocène (échelle exprimée en $\text{m}^3/\text{h/m}$).

2.4 RELATIONS AVEC LES EAUX DE SURFACE

Le réseau hydrographique est assez dense au Nord de l'Isère, plus faible au Sud. Les principales rivières sont, du Nord au Sud, le Bancel, la Galaure, l'Herbasse, le Chalon, la Savasse, la Joyeuse, la Veaune, la Bouterne, l'Isère, la Bourne, la Barberolle, la Véore et la Drôme (cf. Figure 1-1). Bien évidemment, le Rhône constitue le collecteur final de tous ces cours d'eau.

2.4.1 Comparaison module et pluie efficace estimée

La DIREN dispose de 3 stations de jaugeage des rivières Herbasse, Galaure et Véore avec des chroniques de plus de vingt ans. Ces chroniques permettent d'obtenir le module de chacune de ces rivières qui correspond au débit moyen annuel (tableau 2-6).

rivières	BV (km ²)	durée chronique (ans)	module (m ³ /s)	lame d'eau équivalente (mm/an)
Véore	192	28	1,22	200
Herbasse	187	26	1,53	258
Galaure	232	22	2,26	307

Tableau 2-6: Débits moyens des rivières Véore, Herbasse et Galaure (données DIREN).

Si on compare la lame d'eau équivalente de chaque rivière avec la lame d'eau calculée au paragraphe 2.1.4 égale à 222 mm, il apparaît que la pluie efficace est nettement insuffisante pour la Galaure et l'Herbasse puisque l'eau disponible au ruissellement et à l'infiltration doit être supérieure ou égale à la lame d'eau équivalente à l'exutoire du bassin versant. Ces bilans hydrologiques montrent très simplement les insuffisances de nos calculs pour estimer de manière fiable la pluie efficace. Cette sous-estimation de la pluie efficace est plus importante au niveau de la Drôme des Collines comme nous l'avons signalé précédemment.

2.4.2 Données bibliographiques

Dans le bassin de Crest et la plaine de Valence, la complexité du réseau hydrographique (présence de nombreux canaux et fossés) rend difficile la compréhension des échanges nappe-rivières. Seuls quelques jaugeages ponctuels effectués par le SRAE/DIREN Rhône-Alpes existent sur certaines rivières de la plaine. Parmi ces données, deux séries de jaugeage différentiel en Août et en Septembre 1998 permettent d'évaluer les échanges nappe-rivières (annexe III). Ces données sur la Véore montrent une très forte augmentation du débit à l'amont immédiat de Beauvallon liée à l'apport de l'aquifère molassique et aux apports des affluents Guimand, Ecoutay et Pétochin. Les apports molassiques seuls sont de l'ordre de 160 l/s et de 590 l/s en Août et Septembre 1998 respectivement. Cet apport souterrain se retrouve bien par la forme concave des isopièzes de la figure 2-5. Les résultats des jaugeages différentiels sur la Barberolle montrent la perte de celle-ci dès son débouché au niveau de la plaine par infiltration au niveau de la molasse miocène. Il en serait de même des ruisseaux Ourches et Ecoutay d'après Jeannolin (1985).

En revanche, dans le secteur Nord Drôme, des études nappe-rivières ont été effectuées par le passé (de Bellegarde *et al.*, 1977; Duplouy, 1978). Les rivières principales (Galaure, Herbasse) et leurs affluents possèdent un profil d'équilibre plus évolué par rapport aux rivières secondaires (Bancel, Savasse, Joyeuse et Chalon) (Duplouy, 1978). Toutes les rivières, sauf le Chalon, drainent la partie supérieure de l'aquifère molassique. La vallée du Chalon est sèche sur une large partie de son linéaire sauf en amont du village de Reculais. Des jaugeages différentiels effectués en avril 1977, Août et Octobre 1998 montrent que 75 à 80 % du déversement de l'aquifère molassique était drainé par les seules rivières Herbasse et Galaure, pour 70 % de la superficie totale du bassin versant. Le reste est drainé par les autres rivières et les émergences localisées. Les vallées de l'Herbasse et de la Galaure sont donc les drains majeurs de l'aquifère molassique de la Drôme des Collines. Ce drainage apparaît aussi nettement sur la carte piézométrique (cf. Figure 2-5) où les concavités des isopièzes par rapport aux autres vallées sont les plus accentuées. Le déversement de l'aquifère molassique vers ces deux vallées est équivalent mais peut varier de 10 % selon la période hydrologique.

Par exemple, en période de basses eaux, le QMNA₅¹¹ rapporté à la superficie des bassins versants *i.e.* le débit spécifique (cf. Figure 2-10) est supérieure pour l'Herbasse (2,3 l/s/km²) que pour la Galaure (2,2 l/s/km²). Le drainage de l'aquifère vers l'Herbasse est donc légèrement plus accentué pour des débits de fréquence quinquennale sèche.

Ces données permettront de sectoriser les principales zones de drainage de l'aquifère molassique dans le bassin de Valence (cf. § 2.5).

2.4.3 Jaugeages différentiels

Nous avons effectué des jaugeages différentiels des rivières Véore, Joyeuse, Savasse, Herbasse et Galaure entre Août et Octobre 2004, en période d'étiage (les résultats sont situés en annexe III). Nos mesures ont été validées par comparaison au débit de la station de jaugeage de Pont-sur-l'Herbasse (suivi DIREN Rhône-Alpes). Les jaugeages réalisés n'ont pas été réalisés dans des conditions d'étiage sévère. En effet, nous avons comparé les QMNA de fréquence biennale sèche et quinquennale sèche des rivières Véore, Galaure et Herbasse avec nos mesures et nos jaugeages se situent au dessus du QMNA de fréquence biennale sèche.

Sur la figure 2-11 (a-e) sont reportés les débits instantanés de chaque rivière (en l/s), ainsi que l'altitude des points jaugés en fonction de la distance dans le sens de l'écoulement depuis le premier point de mesure. Pour chaque rivière, nous avons distingué la nature du substratum dominant, par des rectangles de couleurs différentes. Les débits d'étiage de ces cours d'eaux sont soutenus par le seul écoulement des eaux souterraines¹². Ces jaugeages montrent une évolution complexe traduisant des zones de pertes et des zones d'alimentation entre la rivière et l'aquifère molassique. On peut aussi observer une baisse du débit des rivières par infiltration de l'eau vers la nappe superficielle à leur arrivée sur les alluvions.

¹¹ QMNA: débit mensuel minimal annuel, c'est le plus faible des débits des 12 débits mensuels d'une année civile. Le QMNA5 est le débit mensuel minimal annuel de fréquence quinquennale sèche (ayant une probabilité 1/5, chaque année, de ne pas être dépassé).

¹² Comme ces jaugeages ont été effectués en étiage, nous pouvons négliger le ruissellement dans les apports aux rivières. De plus, ces jaugeages ont été réalisés après la période intense d'irrigation, ce qui permet de négliger les prélèvements par pompage direct dans la rivière et dans la nappe d'accompagnement.

Nous avons aussi reporté dans le tableau 2-7, les variations du débit spécifique pour chaque tronçon de rivière jaugée.

tronçon	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11
galaure	3,2	1,5	-0,7	-13,5	0,9	2,7	4,2	-12,5	5,9	13,0
herbasse	-4,2	1,5	9,5	7,8	-3,2	-0,2				
savasse	-4,7	0,0	1,1	-0,7						
joyeuse	2,4	0,6	-19,4	-14,5						
véore	1,8	-21,2	-2,0	0,4	0,9	2,1	8,9	-6,3		

Tableau 2-7: Variations du débit spécifique pour chaque tronçon de rivière (l/s/km²).

Le débit spécifique est le rapport du débit (l/s) sur le bassin versant (km²) correspondant à la station de jaugeage (figure 2-10).

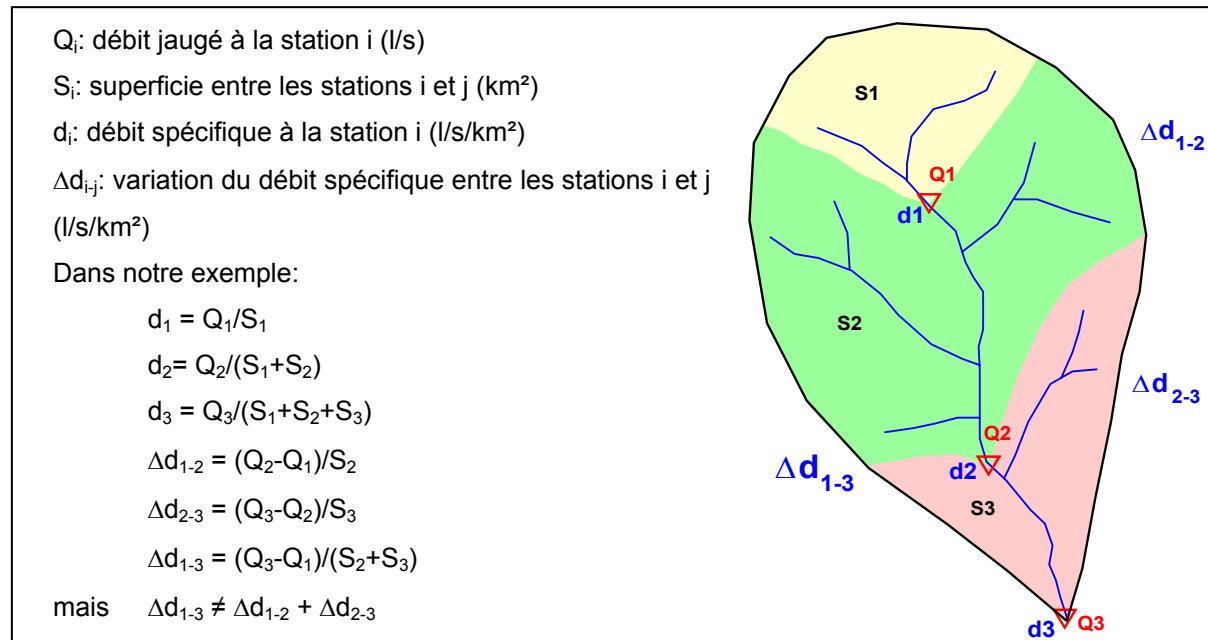


Figure 2-10: Schéma et définitions du débit spécifique et des variations du débit spécifique *i.e. production*.

En période d'étiage (période pour laquelle le ruissellement peut être négligé), lorsque Q_j>Q_i (j>i) le gain de débit par tronçon de rivière provient directement ou indirectement des apports souterrains. En effet, même si des affluents de la rivière principale n'ont pas été jaugés entre les stations i et j, le débit éventuel de ces affluents est lui-même soutenu par la nappe.

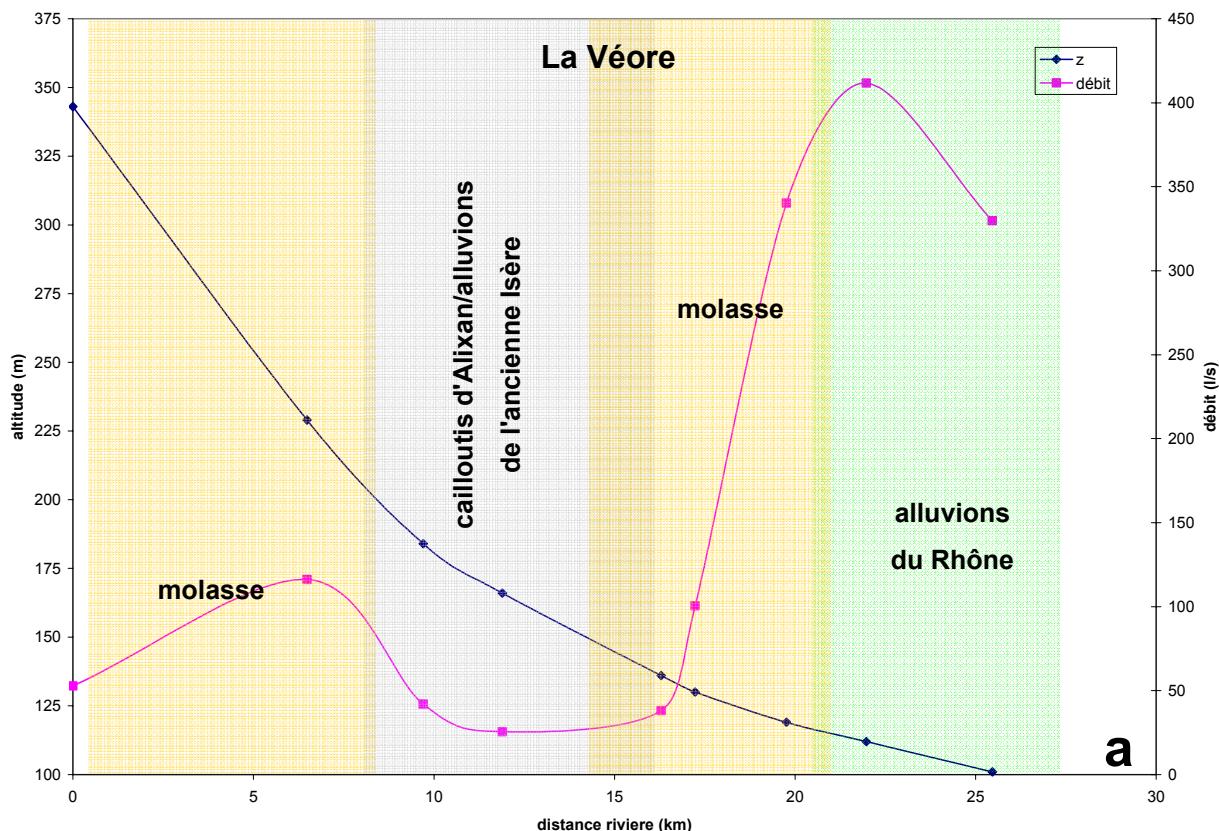
Le fonctionnement hydrologique de ces rivières, avant leurs débouchés dans les alluvions de l'Isère ou du Rhône, peut être détaillé¹³:

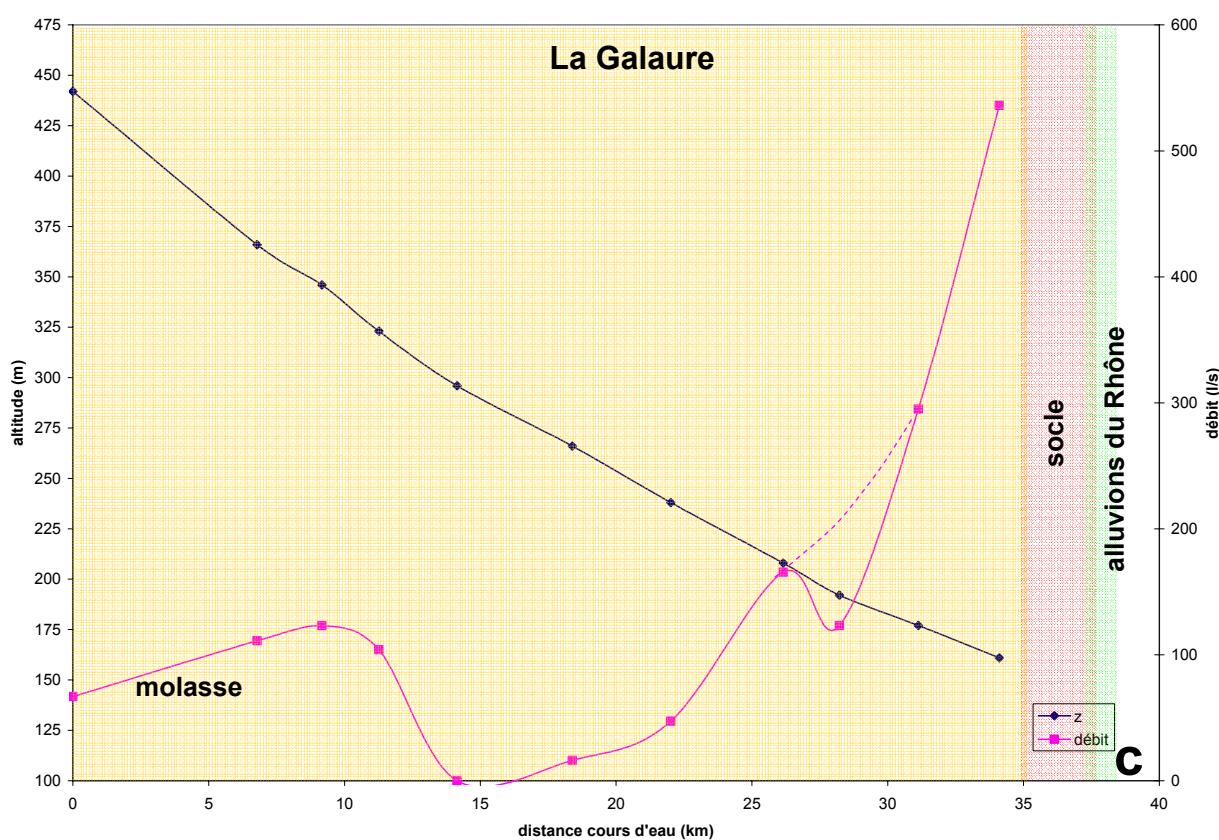
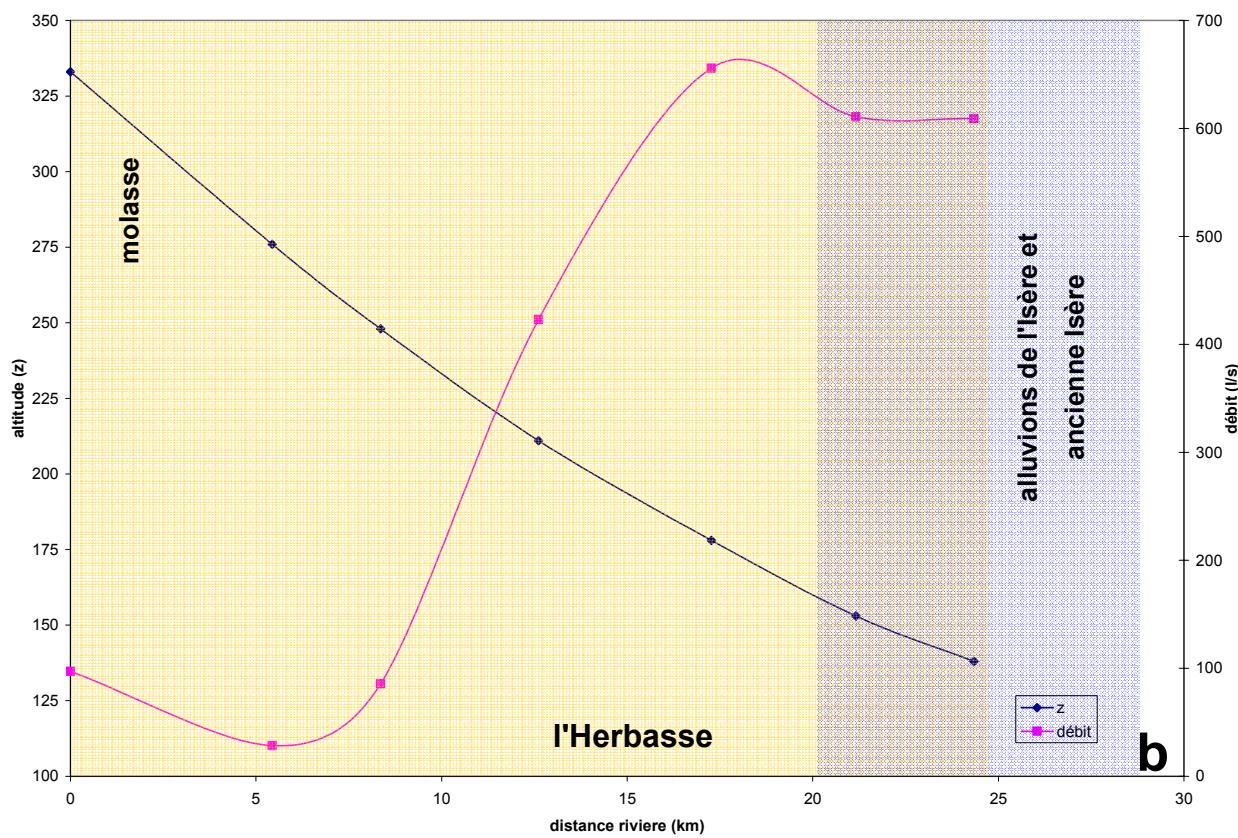
¹³ cf. carte des rivières figure 1-1 ou 2-12.

- fig. 2-11.a: La Véore entre les points jaugés (stations) 1 et 2 montre une augmentation du débit qui est liée aux apports directs de la nappe et/ou indirectement par les rivières (Chevillon, Marette et Lierne). Entre les stations 2 et 4, on observe une forte chute du débit, qui passe de 166 à 26 l/s, liée à des pertes dans le lit de la rivière. Enfin, entre les stations 5 et 8, on observe une nette augmentation du débit (jusqu'à 412 l/s) liée aux apports de l'aquifère, y compris par les affluents (Petite Véore, Guimand, Ecoutay 28 l/s et Pétochin). La variation du débit spécifique entre les stations 5 et 8 est de +1,9 l/s/km².
- fig. 2-11.b: L'Herbasse, entre les stations 1 et 2, montre une baisse du débit puis on observe une large augmentation du débit de la rivière entre les stations 2 et 5, qui passe de 28 à 656 l/s soit une variation du débit spécifique de +6,1 l/s/km². Dans ce tronçon, l'augmentation du débit provient de manière directe et unique des apports de la nappe molassique car le seul affluent important (la Limone) était à sec.
- fig. 2-11.c: La Galaure, entre les stations 1 et 3, montre une augmentation du débit (de 67 à 123 l/s/km²), liée uniquement aux apports souterrains. Entre les stations 3 et 5, on observe une infiltration de la rivière vers sa nappe malgré l'apport du Galavayson, affluent de la Galaure. La Galaure est à sec au niveau de la commune de Hauterives. Ensuite, entre les stations 5 et 11, le débit augmente fortement pour atteindre 536 l/s après St Uze. La variation du débit spécifique est de +4,9 l/s/km² entre les stations 5 et 11. La station 9 montre un débit plus faible qui est due à une dérivation de la Galaure (dérivation non jaugée). La plus forte production mesurée est de +13 l/s/km² entre les stations 10 et 11. Ce gain montre le large déversement direct de l'aquifère molassique dans le lit de la rivière et de manière indirecte par les ruisseaux (Vermeille, Bion et Emeil). A 1500 m à l'aval de cette station, l'aquifère molassique se déverse totalement dans la rivière à la traversée épigénique du socle cristallophyllien.
- fig. 2-11.d: La Joyeuse montre une augmentation du débit entre les stations 1 et 2 liée aux apports de la nappe. La variation du débit spécifique est de +2,4 l/s/km².
- fig. 2-11.e: La Savasse disparaît complètement entre les stations 2 et 3, puis réapparaît entre les stations 3 et 4. Le gain du débit spécifique est de +1,1 l/s/km² entre ces stations.

Nous pouvons retenir que les apports au niveau du lit des rivières par l'aquifère molassique sont très importants en particulier pour la moyenne vallée de l'Herbasse entre l'aval de Crépol

et l'aval de St-Donat, la basse vallée de la Galaure à l'aval de Chateauneuf de Galaure et la basse vallée de la Véore. Le fonctionnement hydrologique des vallées de la Joyeuse et de la Savasse est plus complexe mais avec des apports conséquents de l'aquifère molassique dans leurs parties avals (secteur molasse). Des pertes importantes au niveau des alluvions de l'Isère ou du Rhône sont systématiques.





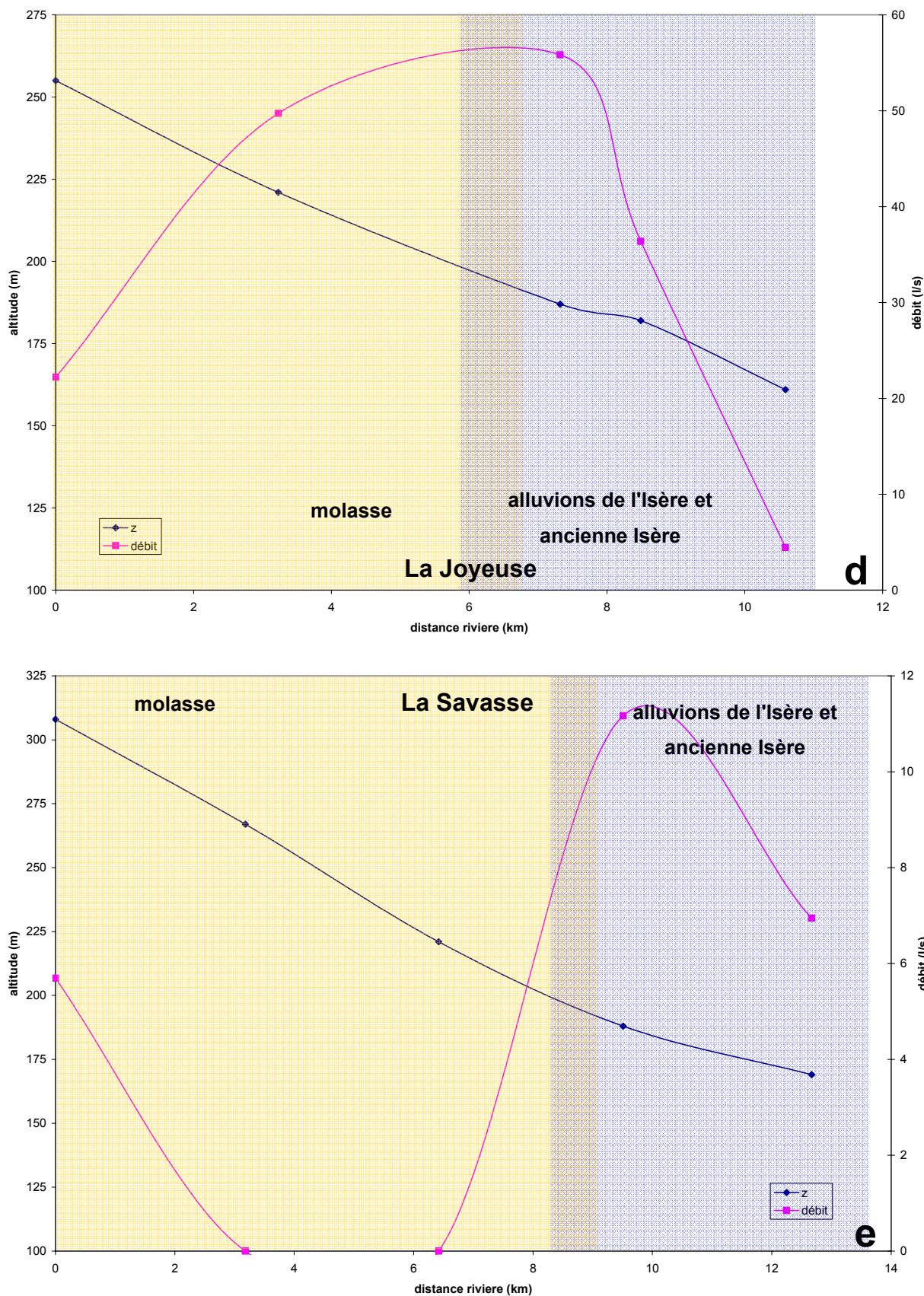


Figure 2-11: Profils et débits des rivières jaugées en fonction de la distance cumulée par rapport au premier point de jaugeage. a: Véore, b: Herbasse, c: Galaure, d: Joyeuse et e: Savasse.

2.5 EQUILIBRE EAUX SOUTERRAINES, NAPPE SUPERFICIELLE ET ECOULEMENTS DE SURFACE

Jeannolin (1985) a mis en évidence qu'il n'y avait quasiment pas de différence de niveau statique entre l'aquifère quaternaire et l'aquifère molassique au niveau de la plaine. Pour lui, les phénomènes de mise en charge de l'aquifère molassique ne se produisent que lorsque la nappe se trouve sous les argiles pliocènes ou lorsqu'il existe une passée indurée ou argileuse au sein de la molasse. A cela se rajoute le fait que les principales rivières du bassin sont toutes alimentées par l'aquifère molassique.

Nous avons donc reporté sur la figure 2-12 les forages pour lesquels il existe une différence de niveau statique notable entre la nappe profonde et la nappe superficielle, à partir de notre base de données. De plus, grâce aux résultats des échanges nappe-rivières, nous avons aussi reporté les zones de drainage de l'aquifère molassique et de la nappe superficielle par les écoulements de surface.

Nous constatons que, sur l'ensemble du bassin, les phénomènes de mise en charge de la nappe profonde sont assez localisés et ne remettent pas en cause la validité de la carte piézométrique de synthèse (cf. Figure 2-5). La mise en charge de la nappe profonde se rencontre fréquemment lorsque la nappe de la molasse se retrouve sous le Pliocène argileux. Les passées indurées ou argileuses de la molasse provoquent aussi la mise en charge de celle-ci. Les forages du SIE de l'Herbasse (sites de Cabaret-Neuf, des Aygalas et des Guilhomonts) sont des exemples de la mise en charge de la nappe sous des passées indurées. Dans le bassin de Crest, ce sont les faciès marneux de la molasse qui permettent la mise en charge de la nappe profonde. Dans ce secteur, il n'y a donc pas ou peu d'échanges vers la nappe quaternaire et la Drôme (Jeannolin, 1985).

Les zones d'émergences diffuses ou ponctuelles de l'aquifère molassique se situent au niveau des principales vallées (vallée de l'Herbasse, de l'Isère) mais aussi en relation avec le substratum des alluvions quaternaires. En effet, une zone de sources, située au milieu de la plaine de Valence, se superpose assez bien au tracé de la ria pliocène. La tranche d'eau la plus superficielle de l'aquifère molassique se trouve bloquée par les argiles pliocènes. Celle-ci se déverse alors dans la nappe quaternaire engendrant cette ligne de sources.

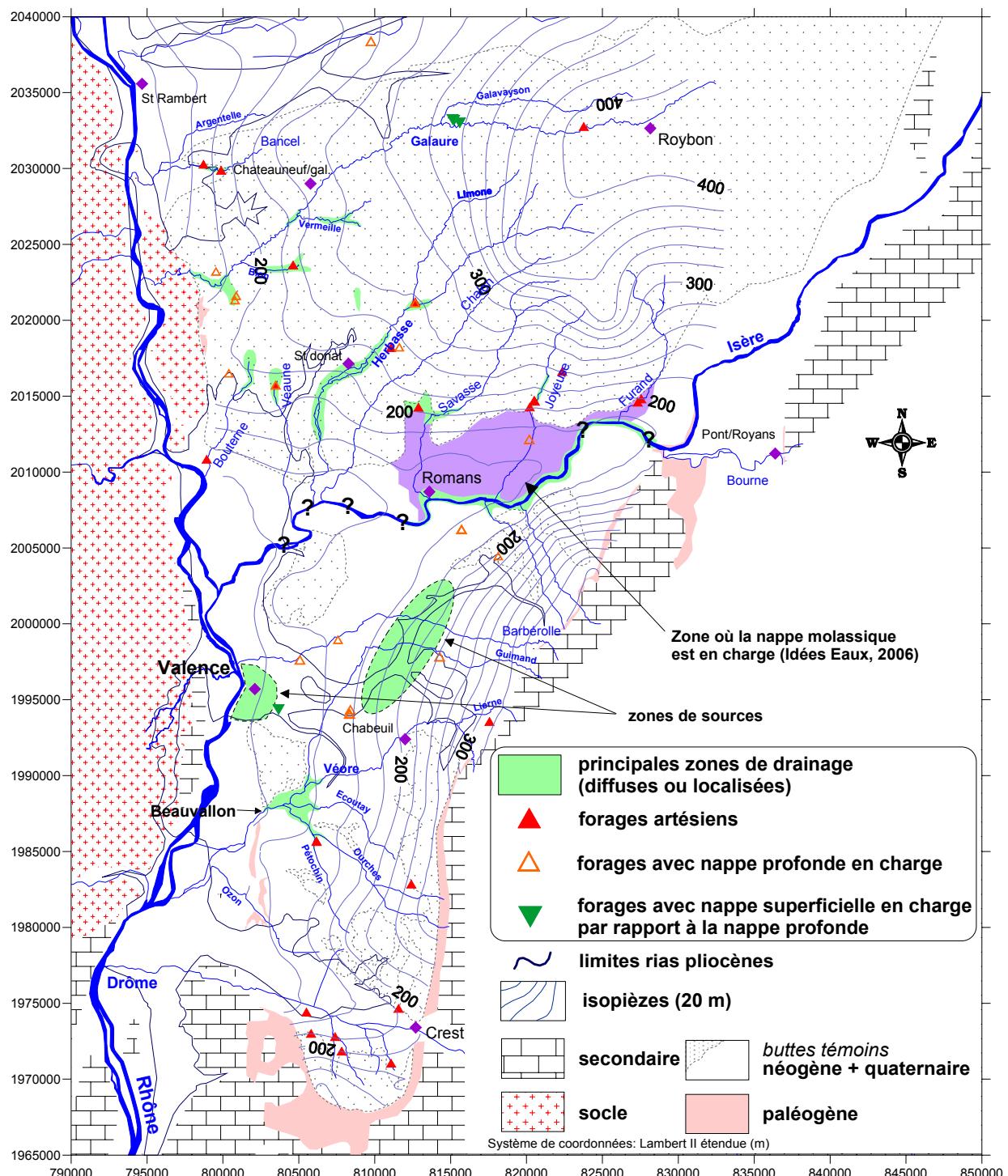


Figure 2-12: Sectorisation des échanges entre nappe profonde, nappe superficielle et écoulements de surface (synthèse de données).

La zone des sources de la ville de Valence est sans rapport avec la nappe profonde puisque un épais écran argileux (117 m de marne imperméable au forage de Valence Briffaut) isole la nappe superficielle, de la nappe profonde. Ces sources n'existent que grâce au relief en terrasses des alluvions de l'ancienne Isère, permettant l'affleurement de la nappe superficielle.

Il est remarquable de constater que les premières citées gallo-romaines du bassin de Valence ont été bâties sur ces zones de résurgences (Valence, Romans).

Quelques forages montrent un niveau statique de la nappe profonde inférieur à la nappe superficielle (forage de Valence Briffaut et forages dans le secteur de la commune du Grand Serre). Dans le secteur du Grand Serre, la nappe de la Galaure est perchée par rapport à la nappe de la molasse. Sous Valence, la nappe quaternaire se trouve perchée sur les argiles pliocènes.

2.6 CONCLUSIONS

La pluie utile est difficile à calculer car les conditions évapotranspiratoires sont variables entre l'Ouest et l'Est et entre le Sud et le Nord du bassin de Valence. La pluie efficace sur la bordure ouest du bassin ne semble pas dépasser 200 mm/an tandis qu'elle dépasse probablement 300 mm/an en bordure du Vercors et 350 mm/an sur les secteurs hauts de la Drôme des Collines.

L'analyse des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère néogène a permis de montrer une variation spatiale de ces paramètres. Par exemple, les débits spécifiques sont exceptionnels à l'ouest du bassin en bordure du socle, tandis qu'en bordure du Vercors, ceux-ci sont médiocres. La comparaison des paramètres hydrodynamiques entre les terrains miocènes et pliocènes semble montrer des caractéristiques hydrodynamiques équivalentes voire supérieures pour le Pliocène de base et l'infra-Pliocène que pour la molasse miocène. Dans ce sens, la piézométrie confirme le drainage de l'aquifère molassique par la ria de la paléo-Drôme et celle située sous Valence. L'étude des coefficients d'emmagasinement montre que seul le coefficient d'emmagasinement du forage Pendillon de la commune de St Donat est représentatif de la porosité efficace. Nous avons choisi une porosité efficace de l'ordre de $12 \pm 3\%$, intermédiaire entre celle proposée par Jeannolin (1985) et celle mesurée sur ce forage.

Les données ponctuelles de mise en charge de la nappe profonde sur les forages combinées à l'étude des eaux superficielles permettent de localiser des secteurs où la nappe profonde se déverse dans la nappe superficielle ou dans le réseau hydrographique. L'étude piézométrique conduite sur la nappe de Romans montre que celle-ci est largement alimentée par la nappe

molassique (étude en cours, Idées-Eaux). Toutefois, il apparaît prématûr de vouloir globaliser à l'ensemble des vallées ce constat à partir de quelques données ponctuelles de forages.

2.7 SYNTHESE 'CADRE DE L'ETUDE'

La première partie de ce travail a permis de présenter la géologie et l'hydrogéologie du bassin de Valence. Un vaste aquifère circule dans cet ensemble sédimentaire néogène et quaternaire épais de 400 m en moyenne. La piézométrie montre l'importance du relief dans les zones d'alimentation et de vidanges de cet aquifère. Nous avons montré la stabilité interannuelle de l'aquifère du bassin de Valence mais des signes de dégradation de sa qualité montrent l'urgence de caractériser son fonctionnement. Les éléments présentés dans cette première partie ne permettent pas de préciser l'état qualitatif de cette nappe et comprendre son mode fonctionnement. Nous avons donc développé une approche qualitative basée sur les outils géochimiques (éléments majeurs) et isotopiques (isotopes de la molécule d'eau, isotopes du carbone). Cette approche a nécessité l'acquisition de nouvelles données et donc l'échantillonnage de nombreux points d'accès à l'eau souterraine (forages, puits et sources) et à l'eau superficielle. La deuxième partie de ce travail est consacrée aux investigations et aux résultats obtenus par cette approche.

Partie II INVESTIGATIONS

Préambule à la partie investigations

Les échantillonnages des eaux souterraines ont été réalisés de manière à obtenir un maillage le plus régulier possible, compte tenu de la présence et de l'autorisation des propriétaires. Malgré nos investigations de terrain, certains secteurs n'ont pu donner lieu à des prélèvements car sur ces zones il n'y a pas de forages (molasse peu perméable ou argile pliocène) ou que les forages sont inaccessibles. La relative homogénéité des points prélevés permet par simple interpolation spatiale (krigeage) d'avoir une image acceptable de la qualité physico-chimique des eaux des aquifères.

Organisation des campagnes de prélèvements

Plusieurs campagnes de prélèvements se sont succédées au cours de ces 3 années de travail.

- Une première campagne de prélèvements des eaux de l'aquifère Néogène a permis d'apprécier le contexte géochimique et isotopique des eaux du bassin de Valence (163 prélèvements dans la nappe profonde). Pour cela nous avons mesuré *in situ* (pH, conductivité, température, bicarbonate) et prélevé les échantillons pour analyses chimiques (majeurs) et isotopiques (oxygène 18, deutérium et tritium).
- Les résultats des ions majeurs avec quelques valeurs de tritium nous ont permis de sélectionner 40 forages pour la datation de l'eau à l'aide du carbone 14. Cette campagne s'est déroulée entre Juin et Juillet 2004.
- Au cours de l'année 2004, nous avons réalisé un échantillonnage des eaux superficielles, sources de la bordure occidentale du Vercors, puits et sources au niveau de la plaine de Valence, vallée du Rhône, vallée de la Valloire (34 sources et 99 puits échantillonnés).
- En Juin et Juillet 2005, une dernière campagne d'échantillonnage des pesticides sur l'aquifère molassique et superficiel (95 prélèvements dont 83 forages captant l'aquifère molassique) a été effectuée.
- Des prélèvements de roche du réservoir aquifère ont été réalisés pour l'analyse du carbone 13.

Prélèvements méthodologie

Les mesures et prélèvements ont été faits, dans la mesure du possible, sur des ouvrages en fonctionnement, lors de la période d'irrigation estivale. Un renouvellement suffisant de la colonne d'eau du forage a été respecté. A chaque point, nous avons prélevé:

- 2 flacons polyéthylène de 125 ml d'eau, préalablement rincés et filtrés sur une membrane de 0,45 µm. Un des flacons permet le dosage des anions et de la silice et l'autre, par ajout de 3 gouttes de HNO₃ concentré, permet le dosage des cations;
- 2 piluliers en verre de 20 ml pour le dosage de l'oxygène 18 et du deutérium;
- 1 flacon de polyéthylène de 500 ml pour le dosage du tritium.

Les paramètres physico-chimiques ont été mesurés sur le terrain à l'aide d'un conductimètre/pH-mètre WTW 340i/SET qui donne une précision de 0,05 unité pH, 1 µS/cm (valeur corrigée à 25°C) et 0,1 °C. L'erreur de reproductibilité dans le dosage des bicarbonates est de ± 5 digits, soit ± 6 mg/l.

Les prélèvements pour le dosage du carbone 14 ont nécessité un volume de 60 l d'eau, compte tenu de la teneur en bicarbonates. L'eau est rendue alcaline par ajout de NaOH afin de convertir le carbone minéral dissous en CO₃²⁻. Par ajout de BaCl₂, celui-ci va précipiter. C'est ce précipité qui est ensuite analysé en laboratoire.

Les prélèvements pour les pesticides ont nécessité un flacon parfaitement propre de 1 l en verre. Une feuille d'aluminium est ajoutée entre le flacon et le bouchon pour éviter une éventuelle adsorption des molécules sur le bouchon. Des glacières ont été utilisées pour la conservation des échantillons. Un délai de 48 h au maximum a été respecté entre le prélèvement et l'extraction sur charbon actif. Lors de ces prélèvements, des échantillons (filtrés) pour l'analyse des anions et du Carbone Organique Dissous (DOC) ont été aussi prélevés¹⁴. Le DOC nécessite des piluliers en verre de 30 ml, préalablement nettoyés à l'acide nitrique N/10 et rincés trois fois à l'eau distillée avant d'être grillés à 550°C pendant 6 heures.

¹⁴ Les résultats de ces analyses DOC ne sont pas interprétés. Le DOC a été analysé pour l'identification d'indicateur(s) de pollution phytosanitaire dans le cadre d'une thèse "Contamination de l'eau souterraine par les produits phytosanitaires: recherche d'indicateurs physico-chimiques et modélisation numérique" (C. Doukouré) (cf § 7.2.2).

Analyses

Les ions majeurs et la silice ont été dosés au laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon. L'analyse des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) est effectuée par absorption atomique de flamme avec un spectromètre VARIAN type 640. L'analyse des anions (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , F^- , Br^-) a été faite par chromatographie ionique en phase liquide sur un appareil DIONEX relié à un intégrateur électronique. Les erreurs systématiques liées à la sensibilité des appareils et à la reproductibilité donnent une précision de 4 % et 3 %, respectivement (Simler, *com. pers.*). Le DOC a été mesuré à l'aide du TOC Analyser Model 700 de BIORITECH. La précision des mesures est de $\pm 0,5 \text{ mg/l}$. La silice dosée provient des flacons anions et a été dosée par analyse d'un complexe silico-molybdique, à l'aide d'un spectrocolorimètre CECIL de type CE295. Les erreurs systématiques liées à la sensibilité de l'appareil et la reproductibilité donnent une précision de 3,5 % (Simler, *com. pers.*).

Les échantillons pour analyses des isotopes stables de la molécule d'eau ont été analysés en Pologne, au laboratoire AGH. L'incertitude sur les analyses est égale à $\pm 0,1 \text{ \%}$ et $\pm 1 \text{ \%}$ pour l'oxygène 18 et le deutérium. Les teneurs en carbone 13 des carbonates solides et des eaux ont été analysées au Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon sur un spectromètre de masse FINNIGAN MAT type DELTA S avec une incertitude de $\pm 0,2 \text{ \%}$.

Les échantillons pour analyse des isotopes radioactifs ont été analysés au Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon-les-Bains (Université Paris VI) pour le tritium et le carbone 14. L'incertitude sur le tritium est de 15 % et le seuil analytique pour le carbone 14 est de $2,29 \text{ ppcm}^{15}$ (Babic *et al.*, 1999).

Les pesticides ont été analysés au laboratoire Hydriad à Nîmes. La méthode du dosage des pesticides est reportée en annexe IV.

¹⁵ Pourcentage de Carbone Moderne (cf. 0)

Pour avoir des détails sur les méthodes de prélèvements, d'extractions et d'analyses, nous invitons le lecteur à consulter les références (Mudry, 1987; Marc, 1994; Babic *et al.*, 1999; Huneau, 2000; Batiot, 2002).

Chapitre 3 Géochimie des eaux souterraines

Ce premier volet des investigations est consacré à l'étude de la géochimie des eaux des différents réservoirs. Nous étudierons tout d'abord les familles d'eau et les corrélations existantes entre éléments majeurs des nappes superficielle et profonde et des sources du Vercors. De là, nous présenterons les principaux mécanismes géochimiques impliqués dans l'évolution de l'eau de l'aquifère molassique. Enfin, nous décrirons la répartition spatiale des éléments en relation avec les mécanismes mis en évidence précédemment.

Pour cette étude, nous avons effectué près de 400 analyses d'eaux. Ces analyses regroupent plusieurs campagnes de prélèvements sur les différents aquifères. Ces résultats représentent l'état qualitatif des aquifères en fonction des objectifs retenus pour chaque campagne de terrain (nappe profonde, superficielle et campagne de datation des eaux). Dans ce chapitre géochimie, nous avons retenu 358 analyses d'eau pour lesquelles les balances chimiques sont acceptables (*i.e.* balances comprises entre $\pm 5\%$). Parmi cet ensemble d'analyses, 296 analyses concernent les puits, sources et forages échantillonnés, le reste provient des données concernant la datation des eaux (cf. 0) et de forages captant uniquement l'aquifère pliocène. Tous les résultats de nos prélèvements figurent en annexe V.

3.1 FAMILLES D'EAU

3.1.1 Les aquifères superficiels

La superficie de la zone étudiée, nous a conduit à restreindre nos investigations principalement à la nappe superficielle de la plaine de Valence. En effet, cette nappe constitue l'aquifère quaternaire le plus important du Nord du département de la Drôme. Enfin, la dénomination "d'aquifère superficiel" peut, selon la localisation, correspondre à l'aquifère molassique mais dans la majorité des cas l'aquifère capté correspond à la nappe circulant dans les terrains quaternaires (alluvions de l'ancienne Isère, cailloutis d'Alixan et alluvions du Rhône).

Sur la carte de la figure 3-1 nous avons figuré les puits et sources échantillonnés entre 2003 et 2004. Nous avons inclus les quelques sources principales de bordure du Vercors. Nous distinguerons, dans l'étude des paramètres physico-chimiques des eaux celles prélevées dans les puits de celles issues des sources.

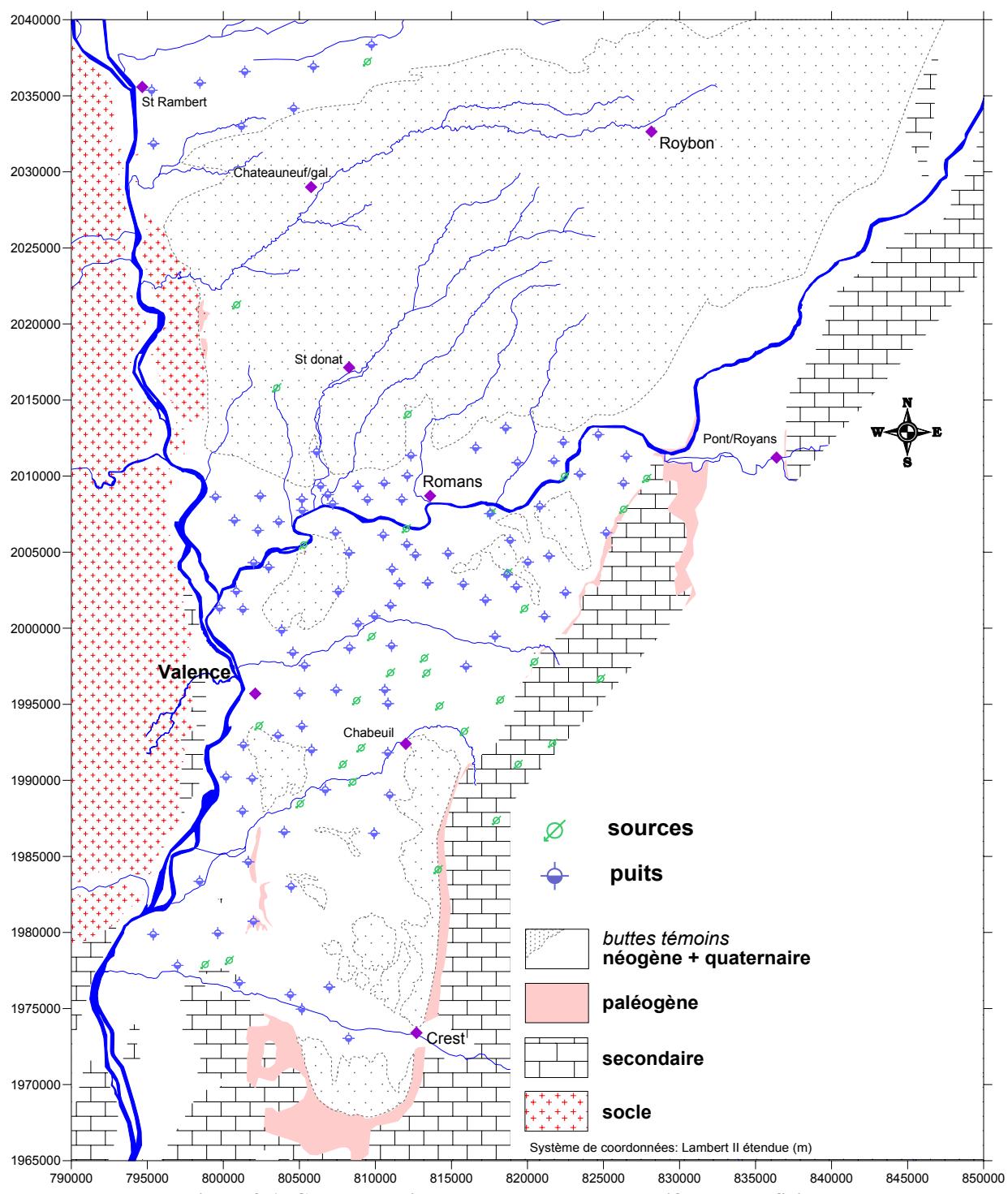


Figure 3-1: Carte des points de prélèvement des aquifères superficiels.

3.1.1.1 Les eaux des puits

Nous avons résumé, dans le tableau 3-1, les données de terrain concernant l'eau prélevée dans les puits et des quelques forages de faible profondeur.

	Température (°C)	pH	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm à } 25^\circ\text{C}$)
moyenne	15,6	6,93	660
médiane	14,9	6,91	645
écart-type	2,7	0,19	106
Minimum	12,6	6,55	359
Maximum	28,7	7,49	991

Tableau 3-1: Paramètres physico-chimiques mesurés sur le terrain pour les puits des nappes superficielles.

La moyenne des températures mesurée est perturbée par le fait que certains prélèvements n'ont pu être réalisés qu'après le passage de l'eau dans un ballon. Le renouvellement de l'eau du ballon n'a pas toujours été suffisant, de plus les prélèvements ont été effectués en été. La médiane est plus représentative de la température de la nappe superficielle. Les pH sont très proches de la neutralité, quoique légèrement acides. Les conductivités mesurées présentent une large amplitude de variation et les valeurs les plus élevées correspondent à des pollutions locales ou diffuses de la nappe.

Le tableau 3-2 présente un aperçu statistique de la composition chimique des eaux de la nappe superficielle¹⁶.

¹⁶ les teneurs en Bromure, Fluorure, Nitrite et Phosphate sont très faibles. Compte tenu du seuil analytique (0,1 mg/l) de l'appareil DIONEX les quelques variations observées de ces éléments sont difficilement interprétables ; c'est pourquoi, ils ne seront pas étudiés.

mg/l	HCO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-
moyenne	318	126,3	7,2	6,9	2,9	14,7	30,9	41,0
médiane	320	125,3	6,5	5,8	1,2	13,4	27,5	39,6
écart-type	49	23,1	3,9	3,7	8,7	9,5	19,9	28,2
Minimum	179	59,6	0,6	1,7	0,4	1,6	5,1	0,0
Maximum	477	188,4	18,0	22,0	76,8	83,0	102,6	165,3

Tableau 3-2: Concentrations moyennes en éléments majeurs mesurées sur les eaux des aquifères superficiels.

Les ions dominants sont les ions bicarbonates et calcium alors que les concentrations en sodium, potassium, chlorure, sulfate et nitrate sont très variables. Les teneurs moyennes en sulfate et nitrate sont assez élevées. La teneur moyenne en nitrate est proche de la norme actuelle de potabilité de 50 mg/l. La présence de ces éléments, à savoir principalement nitrate, sulfate et chlorure mais aussi sodium et potassium, est la conséquence des activités anthropiques, que ce soit engrais, épandages, défauts de stations d'épurations collectives, fosses septiques ou puits perdus mais aussi protection des cultures (bouillie Bordelaise).

3.1.1.2 Les eaux des sources

Nous avons prélevé l'eau de 34 sources réparties sur le bassin mais aussi au niveau de la bordure occidentale du Vercors (cf. Figure 3-1). En dehors, des sources issues des massifs Crétacé (Vercors, massif de Livron), les autres sont issues d'eaux de la nappe superficielle.

Les paramètres physico-chimiques de ces sources sont résumés dans le tableau 3-3.

	Température (°C)	pH	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm à } 25^\circ\text{C}$)
moyenne	13,3	7,09	592
médiane	13,3	7,05	591
écart-type	2,7	0,27	97
Minimum	8,3	6,66	400
Maximum	19,2	7,66	756

Tableau 3-3: Paramètres physico-chimiques des sources mesurés sur le terrain.

Les périodes de prélèvements se sont déroulées de l'hiver à l'été 2004 comme cela se remarque sur les valeurs extrêmes de température. Les pH sont un peu plus élevés que pour les eaux prélevées dans les puits et les conductivités sont moins variables. Les sources ont un bassin d'alimentation beaucoup plus étendu par rapport à l'eau captée par les puits dont le cône de rabattement est d'une étendue plus limitée. C'est pourquoi, le lissage des perturbations anthropiques est plus important au niveau des sources, les écarts-types sont plus faibles (tableau 3-4).

mg/l	HCO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-
moyenne	299	113,1	4,6	4,6	2,0	9,0	24,5	28,6
médiane	304	116,9	3,5	4,0	1,2	9,1	22,1	26,6
écart-type	40	19,0	3,2	3,3	3,9	5,9	18,1	23,8
Minimum	149	80,0	0,4	0,7	0,2	0,0	4,8	0,0
Maximum	354	138,9	13,2	18,0	23,0	25,0	101,8	79,4

Tableau 3-4: Concentrations moyennes en éléments majeurs des eaux des sources.

3.1.1.3 Le faciès des eaux superficielles

A partir des tableaux 3-2 et 3-4, nous avons représenté sur un diagramme de Piper les résultats des analyses d'eaux (figure 3-2). Le faciès principal est de type *bicarbonaté calcique*. Cependant, quelques échantillons se dispersent vers le pôle *bicarbonaté calcique et magnésien* et le pôle *chloruré et sulfaté calcique et magnésien*. Cette dispersion provient des pollutions de surface comme nous allons le voir. Les eaux provenant des massifs Crétacé sont toutes de type bicarbonaté calcique sauf pour une (source du Lavoir à Livron contaminée par des pollutions de surface).

Diagramme de Piper

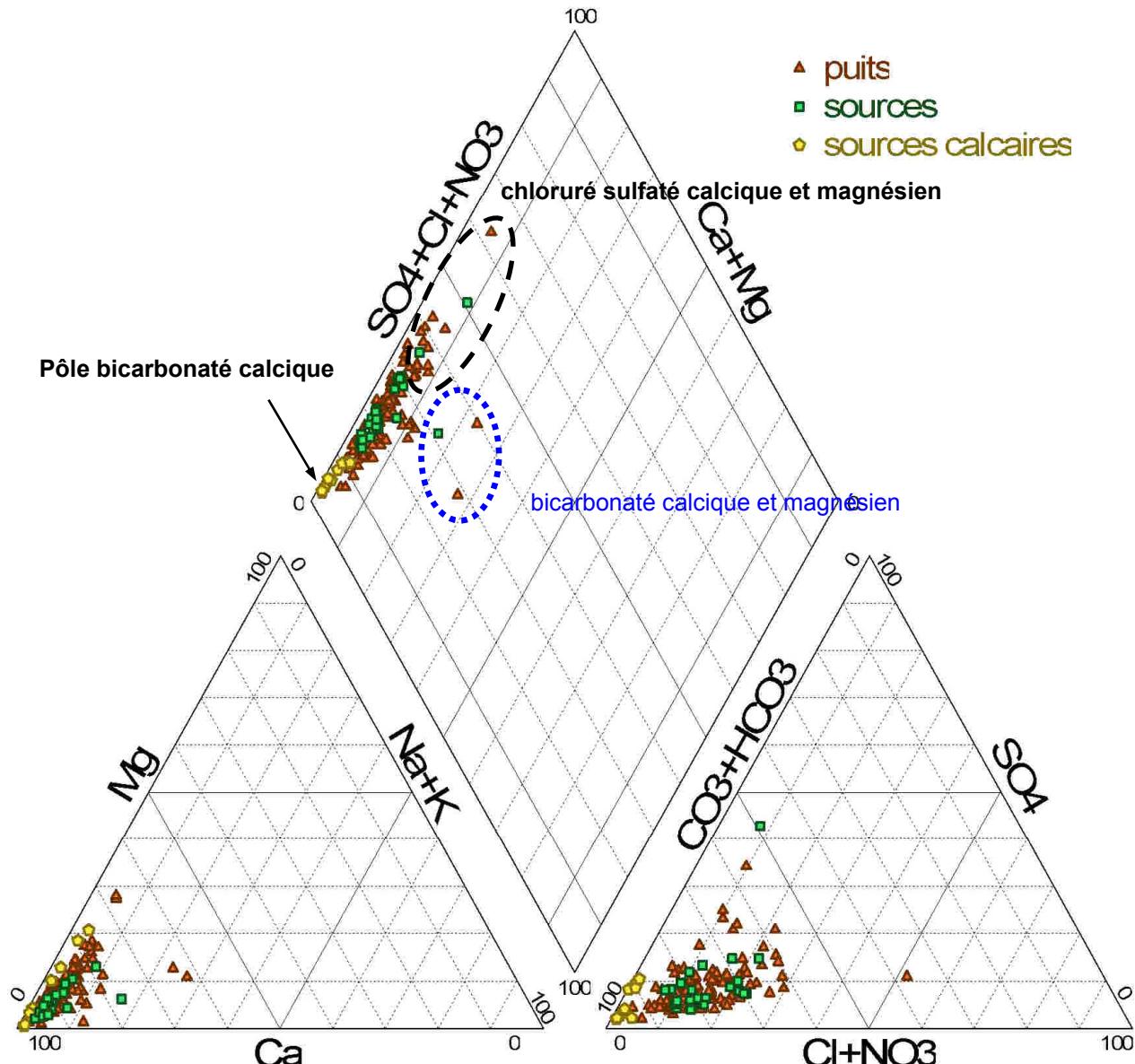


Figure 3-2: Faciès des eaux superficielles

3.1.1.4 Corrélations

Dans le tableau 3-5, nous avons reporté la matrice de corrélation appliquée aux eaux superficielles en excluant les eaux des sources des massifs Crétacé (elles n'appartiennent pas au bassin de Valence *s.s.*).

	pH	X ¹⁷	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	log pCO ₂
pH	1,00										
X	-0,33	1,00									
HCO ₃ ⁻	-0,28	0,56	1,00								
Ca ²⁺	-0,32	0,85	0,59	1,00							
Mg ²⁺	-0,01	0,09	0,23	-0,18	1,00						
Na ⁺	-0,12	0,39	0,10	0,09	0,32	1,00					
K ⁺	-0,04	0,37	0,17	0,03	0,28	0,37	1,00				
Cl ⁻	-0,08	0,57	-0,04	0,49	-0,02	0,41	0,06	1,00			
SO ₄ ²⁻	-0,21	0,55	0,01	0,46	0,18	0,42	0,20	0,47	1,00		
NO ₃ ⁻	-0,07	0,70	0,11	0,64	-0,15	0,16	0,32	0,58	0,30	1,00	
log pCO ₂	-0,96	0,44	0,52	0,44	0,07	0,12	0,08	0,05	0,18	0,08	1,00

Tableau 3-5: Matrice de corrélation de l'eau des nappes superficielles.

Au regard de ce tableau, on peut faire plusieurs remarques:

- le pH est anti-corrélé à la pression partielle de CO₂ (pCO₂);
- la conductivité est assez bien corrélée avec calcium, nitrate, chlorure, bicarbonate et sulfate;
- les bicarbonates sont corrélés avec le calcium et la pCO₂;
- le calcium est bien relié aux nitrates et de manière plus discrète aux chlorures, sulfates et la pCO₂;
- le magnésium apparaît très peu corrélé aux autres paramètres.

Pour visualiser les similitudes précédentes, nous avons effectué une Analyse en Composantes Principales (ACP), avec les 12 paramètres précédents (figure 3-3). L'intérêt de cette technique

¹⁷ X correspond à la conductivité.

exploratoire est qu'elle permet de réduire à quelques plans factoriels la majeure partie de la variance exprimée par les individus ($n = 122$). Les trois premiers axes permettent d'expliquer 70 % de la variance totale, ce qui est significatif.

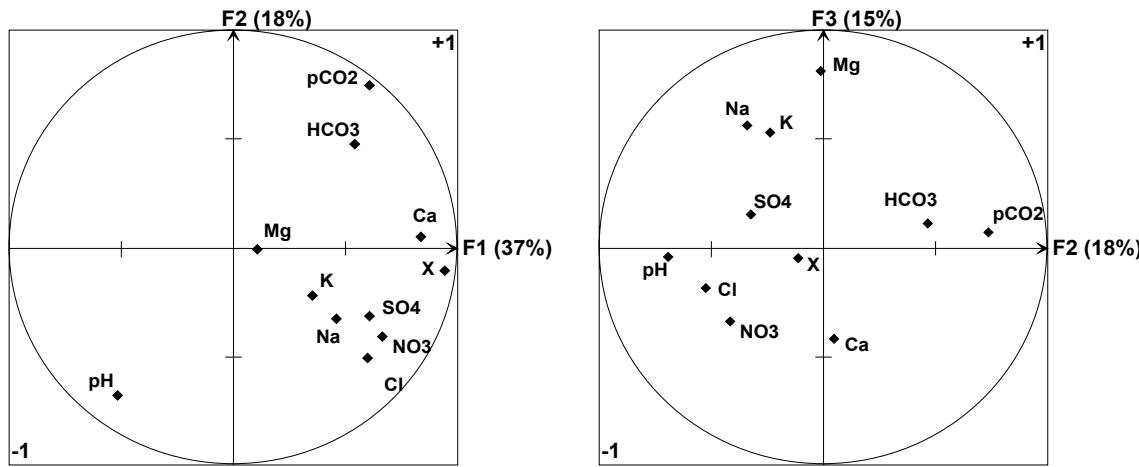


Figure 3-3: ACP des eaux superficielles.

L'axe F_1 (37 %) correspond à la minéralisation de l'eau car la conductivité, le calcium, la $p\text{CO}_2$ et les bicarbonates, nitrates, sulfates et chlorures, sodium et potassium sont regroupés. Cet axe ne représente que 37 % de la variance ce qui est un indicateur de l'hétérogénéité géochimique dans l'acquisition de la minéralisation (Vallès, *com. pers.*). En effet, dans ce regroupement, l'association des ions chlorures, sodium, potassium, sulfates et nitrates correspond au pôle d'origine anthropique de la minéralisation de l'eau. Le reste (calcium, bicarbonates et $p\text{CO}_2$) est un indicateur du milieu carbonaté. L'axe F_2 (18 %) oppose le pH, les nitrates et chlorures avec la $p\text{CO}_2$ et les bicarbonates. Cette opposition traduit la part de l'infiltration dans l'acquisition de la minéralisation en milieu carbonaté via les équilibres calco-carboniques entre le sol et la zone saturée de l'aquifère (Lastennet, 1994). Enfin, l'axe F_3 (15 %) oppose le magnésium, le sodium et le potassium avec le calcium et les nitrates. Cet axe correspond aux interactions eau-encaissant car il oppose des eaux "jeunes" (nitrate, calcium) à des eaux plus "agées" qui ont interagi avec l'encaissant (magnésium, sodium et potassium). Nous avons effectué une seconde ACP en tenant compte des quelques données de silice sur les eaux des puits ($n = 36$). La silice apparaît toujours regroupée avec le magnésium. Ces deux éléments varient généralement dans le même sens et l'augmentation de leur concentrations indique un accroissement du temps de séjour de l'eau dans l'aquifère (Batiot, 2002).

3.1.2 La nappe profonde

Cet aquifère comprend les eaux circulant dans la molasse miocène mais aussi dans le Pliocène argilo-sableux. Cependant, très peu de forages recoupent et captent l'eau provenant de la nappe circulant dans le Pliocène. La plupart de ces forages ont été abandonnés du fait de leur faible productivité. Je n'ai pu échantillonner que deux forages captant sans ambiguïté l'eau circulant dans le Pliocène.

Pour la période 2003-2004, 163 analyses d'eaux (ions majeurs) ont été effectuées sur la nappe profonde. Nous avons reporté sur la figure 3-4 les forages prélevés. Le choix des points de prélèvements dépendait surtout de la disponibilité des personnes et de l'existence de forages prélevables. Nous avons choisi une densité de points suffisante, avec un maillage le plus régulier possible, pour que les données soient représentatives de l'aquifère profond mais aussi pour minimiser les problèmes d'interpolation des données. Comme nous pouvons le constater sur la figure 3-4, l'Ouest de la plaine de Valence et la confluence Isère/Rhône sont presque totalement dénués de prélèvements. Cette absence de forages correspond à la localisation des argiles pliocènes là où le réseau des canyons messiniens est le plus profond et étendu. Dans ce secteur, les agriculteurs utilisent exclusivement la nappe superficielle des alluvions du Rhône et de l'Isère, qui possède une excellente perméabilité (cf. § 2.2.1). Au niveau de la Valloire, le surcreusement quaternaire est ici très important et seuls deux forages, l'un AEP et l'autre agricole, ont recoupé le substratum molassique. Parfois la molasse elle-même est très peu productive. Ainsi, la recherche de nouvelles ressources en eau potable pour la commune de Vaunaveys la Rochette (1) a été infructueuse. D'autres secteurs sont aussi peu productifs comme au niveau de la plaine entre Montoison et Chabeuil (2) où il n'y a pas de forages agricoles exploités. Au niveau de la Drôme des Collines, les forages sont concentrés dans les vallées. Enfin, la présence d'un réseau d'irrigation implique parfois l'abandon de forages ou leur l'absence. C'est ce que l'on observe au niveau de la plaine de Valence où le réseau du SII du Canal de la Bourne a conduit à l'abandon de forages agricoles (secteur de Chateauneuf sur Isère (3)) ou leur quasi absence comme au niveau d'Alixan (4), ou Montélier (5).

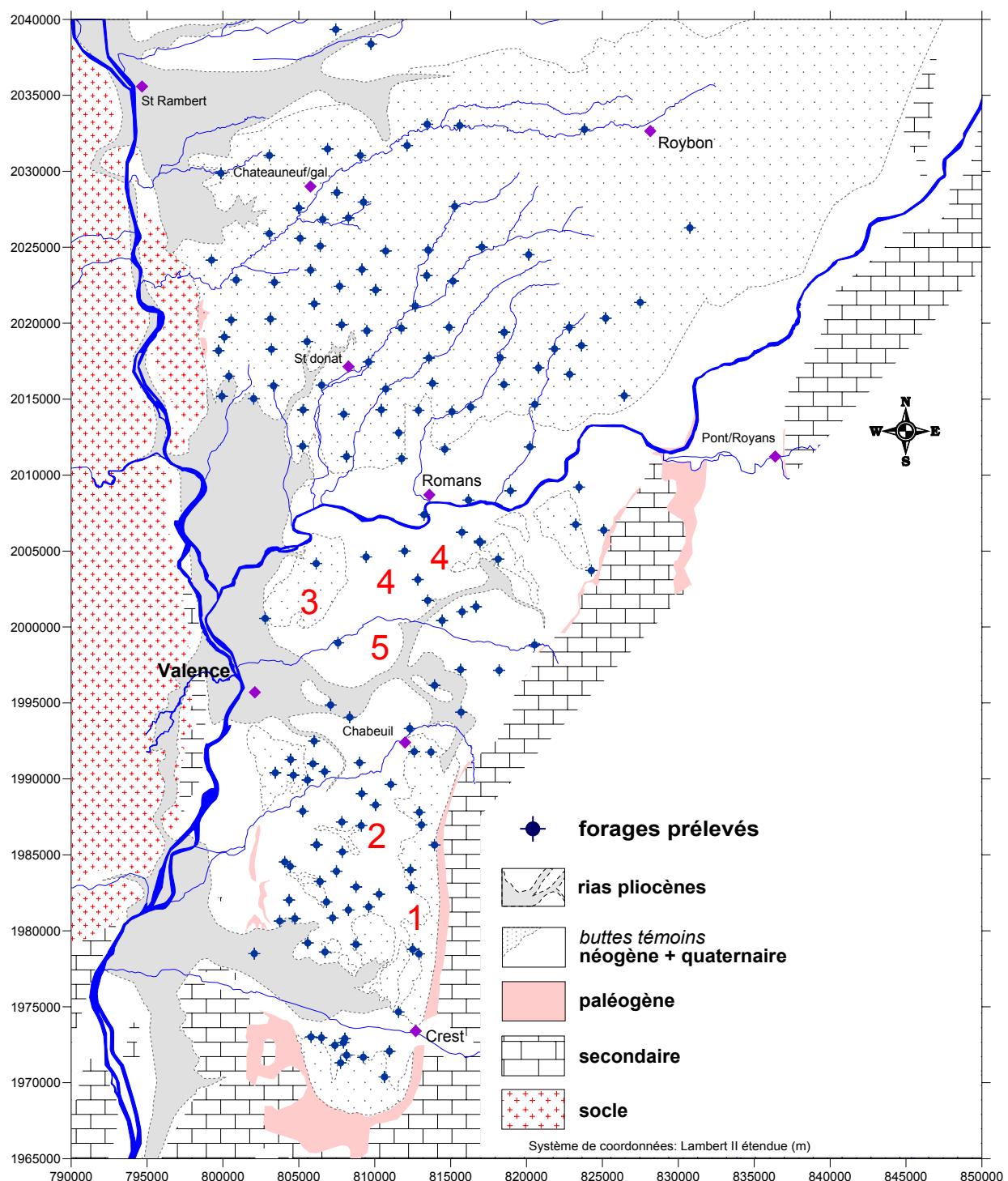


Figure 3-4: Carte des forages prélevés au niveau de l'aquifère profond.

Les caractéristiques physico-chimiques de ces prélèvements sont résumés dans les tableaux 3-6 et 3-7.

	Température (°C)	pH	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C)
moyenne	14,9	7,07	563
médiane	14,5	7,04	551
écart-type	2,4	0,23	125
Minimum	11,1	6,55	323
Maximum	30,4	7,69	1059

Tableau 3-6: Paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe profonde.

Les températures, pH et conductivités sont assez variables. Nous pouvons faire les mêmes remarques que pour les données concernant les puits (cf. § 3.1.1.1).

mg/l	HCO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-
moyenne	313	96,4	14,2	6,8	1,13	10,3	15,9	22,9
médiane	311	97,0	9,2	5,2	0,92	6,3	11,4	14,8
écart-type	62	32,5	11,8	6,6	0,93	18,3	13,9	24,4
Minimum	174	34,8	1,1	0,9	0,28	1,2	0,0	0,0
Maximum	460	188,0	47,5	62,8	9,31	209,1	70,6	120,0

Tableau 3-7: Concentrations moyennes en éléments majeurs mesurées sur les eaux profondes.

Les eaux sont principalement *bicarbonatées et calciques*. Les autres éléments sont, par ordre d'importance décroissante, les nitrates, sulfates, magnésium, chlorures, sodium. Les teneurs en nitrate, jusqu'à 120 mg/l, montrent que la nappe profonde est soumise aux pressions de surface.

3.1.2.1 Les faciès d'eaux de la nappe profonde

La figure 3-5 présente la répartition des analyses d'eaux dans un diagramme de Piper. Sur cette figure, nous avons ajouté, dans un souci de comparaison, les données provenant des analyses des forages situés dans le Pliocène. Certaines ont été effectuées par nos soins et les autres sont issues d'anciennes analyses. Ces anciennes analyses proviennent des forages

abandonnés des communes d'Allex, Valence (Martins, Briffaut et Gonnards F3) mais aussi un dernier forage récent, celui de la commune de Saint Rambert d'Albon où des analyses isotopiques ont été effectuées. Nous avons enfin rajouté les données obtenues à partir des analyses effectuées pour les datations des eaux.

Diagramme de Piper

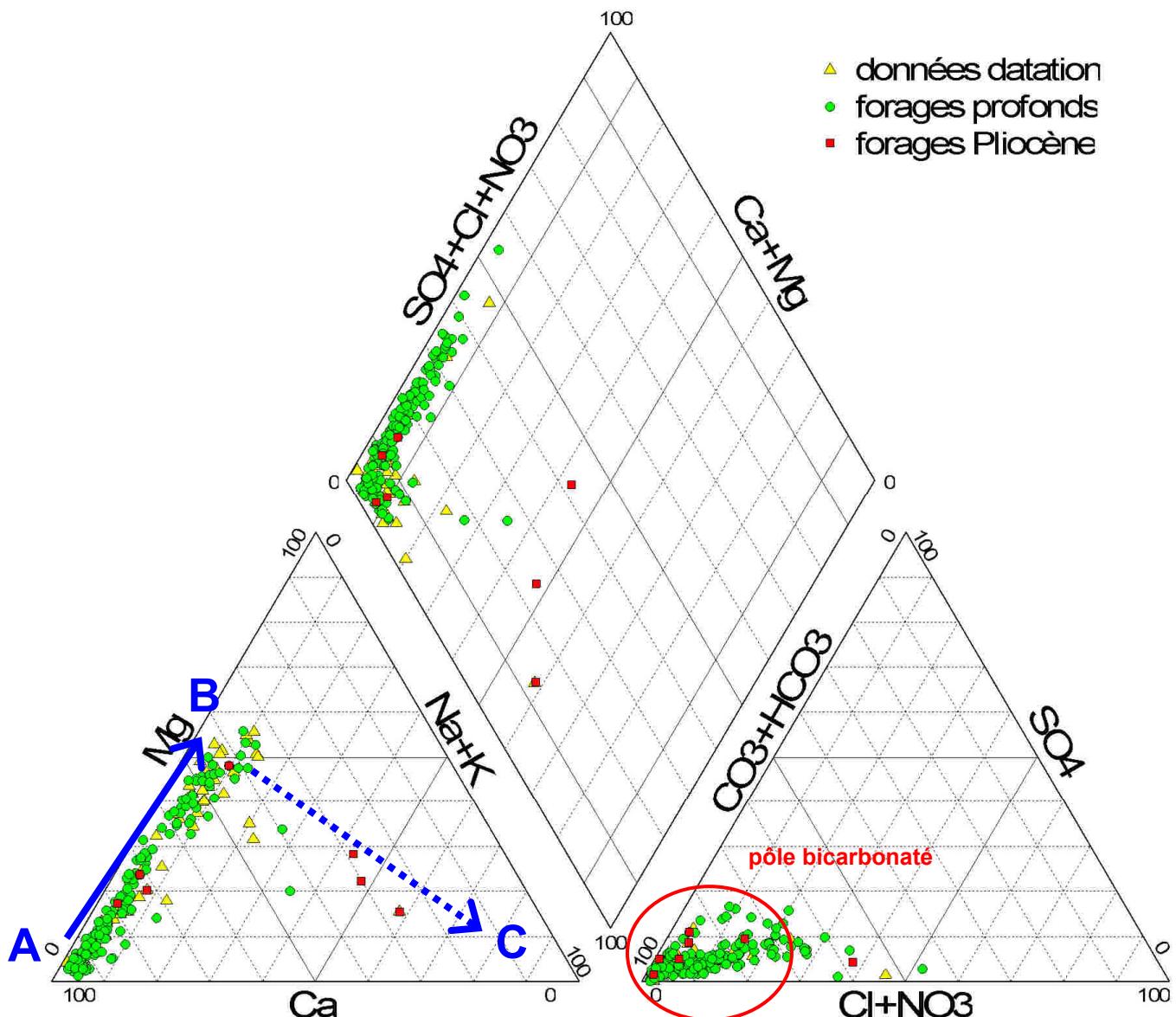


Figure 3-5: Faciès des eaux de la nappe profonde.

Nous voyons sur ce diagramme deux faciès typiques et une phase de transition vers un dernier faciès d'eau. Le premier faciès, de type *bicarbonaté calcique*, correspond à la zone symbolisée par la lettre A. Le deuxième faciès (B) est de type *bicarbonaté calcique et magnésien*. Nous remarquons que la très grande majorité de nos analyses se situent entre ces deux faciès (flèche pleine). Enfin, le dernier faciès (C) est de type *bicarbonaté sodique*. Seuls les points qui se situent dans les argiles pliocènes approchent ce dernier type de faciès.

3.1.2.2 Corrélations

Dans le tableau 3-8, nous avons reporté la matrice de corrélation appliquée aux données de la nappe profonde. Nous avons exclu les données anciennes provenant des forages situés dans le pliocène ainsi que les données de la datation des eaux car pour celles-ci nous ne disposons pas de tous les paramètres utilisés aux paragraphes 3.1.1.4.

	pH	X	HCO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	$\log \text{pCO}_2$
pH	1,00										
X	-0,41	1,00									
HCO_3^-	-0,21	0,68	1,00								
Ca^{2+}	-0,53	0,79	0,38	1,00							
Mg^{2+}	0,32	0,01	0,44	-0,52	1,00						
Na^+	0,14	0,23	0,34	-0,17	0,40	1,00					
K^+	0,05	0,26	0,38	-0,02	0,32	0,56	1,00				
Cl^-	-0,14	0,54	0,03	0,47	-0,12	0,04	0,04	1,00			
SO_4^{2-}	-0,34	0,68	0,36	0,62	-0,15	0,36	0,27	0,25	1,00		
NO_3^-	-0,30	0,55	0,02	0,67	-0,40	-0,13	0,01	0,29	0,51	1,00	
$\log \text{pCO}_2$	-0,94	0,59	0,51	0,59	-0,13	-0,01	0,08	0,13	0,41	0,27	1,00

Tableau 3-8: Matrice de corrélation des eaux de la nappe profonde.

Nous remarquons que:

- le pH est anti-corrélé avec la pCO₂ comme dans le tableau 3-5 et avec le calcium;
- la conductivité est reliée au calcium, bicarbonates, sulfates, chlorures, nitrates et la pCO₂;
- les bicarbonates sont reliés à la pCO₂, au calcium et au magnésium;

- le calcium est corrélé avec les nitrates, les chlorures, les sulfates, la pCO₂ mais on observe une anti-corrélation avec le magnésium;
- le sodium et le potassium sont bien reliés;

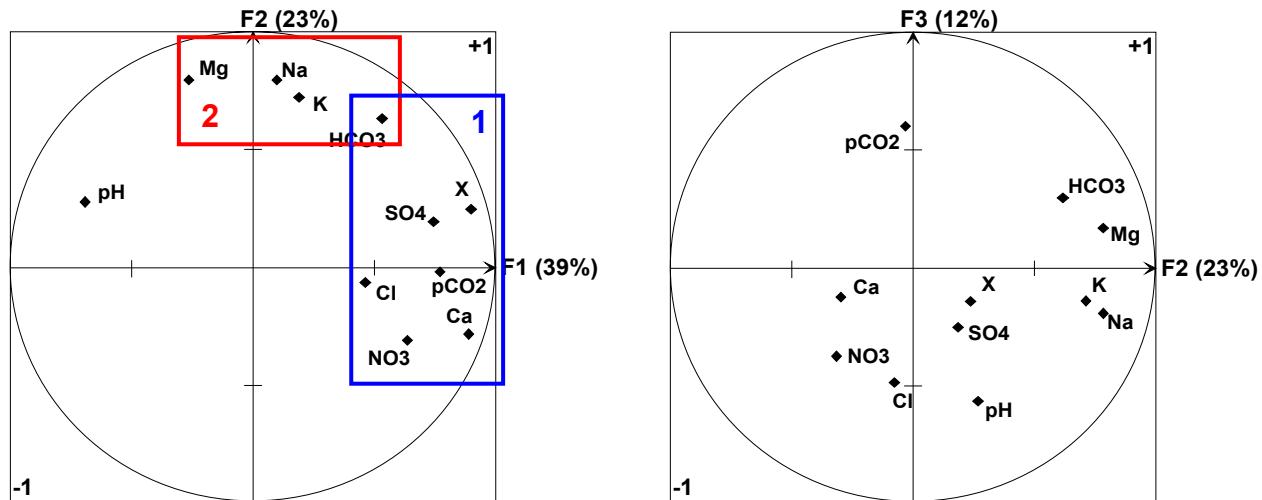


Figure 3-6: ACP des eaux de la nappe profonde ($F_1+F_2+F_3 = 74\%$ de la variance).

L'analyse en composantes principales (figure 3-6) réalisée sur nos seules données obtenues dans la nappe profonde montre, en prenant toujours les mêmes paramètres, que l'axe F₁ (39 %) est lié à la minéralisation de l'eau entre le sol et la zone saturée de l'aquifère et aux pressions de surface. En effet, la conductivité, le calcium, la pCO₂, les bicarbonates, les chlorures, nitrates et sulfates sont regroupés (groupe 1), en opposition avec le pH. Cet axe correspond aux eaux récentes soumises à un mécanisme d'acquisition rapide de la minéralisation (pollution anthropique, équilibre calco-carbonique dans les aquifères carbonatés). Ici aussi le premier axe ne représente que 39 % de la variance ce qui montre une certaine hétérogénéité dans l'évolution géochimique de l'eau. La signification de l'axe F₁ est très similaire à celui de l'axe F₁ de l'ACP des eaux superficielles. Par contre, on observe une inversion des axes F₂ et F₃ entre les eaux de la nappe profonde et les eaux superficielles. En effet, l'axe F₂ (23 %) montre lui une bonne corrélation entre bicarbonates, sodium, potassium et le magnésium (groupe 2). La signification de l'axe F₂ est donc identique à celle de l'axe F₃ de l'ACP des eaux superficielles et *vice versa*. L'inversion de ces deux axes témoigne de la prépondérance des interactions eau-encaissant dans l'aquifère profond. Ces interactions sont, en première approximation, proportionnelles au temps de résidence des eaux dans le réservoir néogène car cet axe oppose les indicateurs de long temps de séjour (magnésium, sodium et potassium) aux eaux récentes (nitrate et calcium). Nous avons effectué une seconde ACP en

tenant compte des quelques données de silice sur les eaux des forages ($n = 36$) et la silice apparaît encore regroupée avec le magnésium. Enfin, il est intéressant de constater que les bicarbonates sont à cheval sur les deux groupes 1 & 2. Les bicarbonates semblent donc impliqués dans deux mécanismes de minéralisation de l'eau à cinétiques très différentes.

3.1.3 Commentaires

A la vue des faciès des eaux souterraines (nappes superficielles et nappe profonde), il apparaît que l'acquisition de la minéralisation de l'eau se déroule en deux étapes principales. La première étape se déroule rapidement avec l'acquisition du *faciès bicarbonaté calcique*. A ce faciès peut se rajouter ou non des pollutions d'origine anthropique. Ce faciès permet donc de caractériser des eaux « jeunes ». La seconde étape fait évoluer l'eau vers le faciès *bicarbonaté calcique et magnésien* voire jusqu'au faciès *bicarbonaté sodique*. Cette seconde étape voit la disparition des pollutions d'origine anthropique. Plus lente que la première, elle permet alors d'associer, à un faciès d'eau, un degré d'interaction de l'eau avec la matrice aquifère.

3.2 ACQUISITION DE LA MINERALISATION

Nous allons, dans cette partie, tenter de distinguer les divers phénomènes géochimiques pouvant avoir lieu au sein de l'aquifère conduisant aux différents faciès d'eaux mis en évidence. Nous utiliserons, dans un but de comparaison, toutes les données disponibles évoquées en début de chapitre.

3.2.1 Le rôle des carbonates

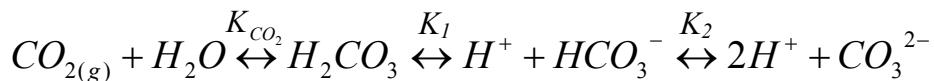
Le remplissage sédimentaire du bassin de Valence est essentiellement constitué de matériaux carbonatés d'origine alpine. C'est donc la chimie des carbonates qui va gouverner l'essentiel de la minéralisation de l'eau pendant son infiltration et lors de son transit souterrain.

3.2.1.1 Equilibres CO_2 - CaCO_3 - $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

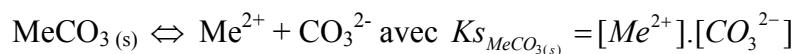
L'incorporation du CO_2 gazeux dans l'eau nécessite plusieurs étapes avec la formation de quatre composés. Ces étapes sont régies par le système d'équations suivantes:

- diffusion du CO_2 dans l'eau: $\text{CO}_2 \text{ (g)} \rightleftharpoons \text{CO}_2 \text{ (aq)}$
- hydratation du $\text{CO}_2 \text{ (aq)}$: $\text{CO}_2 \text{ (aq)} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$
- première dissociation de l'acide carbonique: $\text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$
- deuxième dissociation de l'acide carbonique: $\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$

La distribution de ces espèces dépend du pH et est contrôlée par les constantes d'équilibres¹⁸ K_{CO_2} , K_1 , K_2 selon l'enchaînement suivant:



Dans les systèmes carbonatés, il faut considérer la dissolution de la calcite ou de tout autre composé susceptible d'apporter des carbonates à la solution. Dans le cas d'un cation bivalent Me^{2+} , l'équation de dissociation est la suivante:

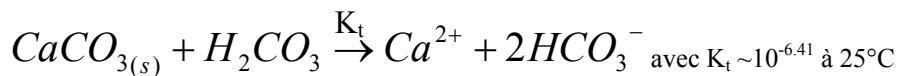


Cet apport de carbonate supplémentaire à la solution agit comme un tampon par consommation d'ions H^+ . Cependant, la constante de solubilité est faible ($\sim 10^{-8.48}$ à 25°C) et ne peut expliquer à elle seule la teneur en bicarbonates des eaux souterraines.

Pour expliquer les teneurs en bicarbonates et en calcium des eaux souterraines, il faut alors considérer la réaction globale de dissolution de la calcite mettant en jeu le $\text{CO}_{2(g)}$ du sol:

¹⁸ Ces constantes se définissent à l'équilibre par: $K_{\text{CO}_2} = \frac{[\text{H}_2\text{CO}_3]}{P_{\text{CO}_2} \cdot [\text{H}_2\text{O}]}$ $K_1 = \frac{[\text{H}^+] \cdot [\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]}$ $K_2 = \frac{[\text{H}^+] \cdot [\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]}$ avec $[\text{X}^+]$

représente l'activité de l'ion a_X . L'activité est plus faible que la concentration car dépendante des interférences électrostatiques de la solution. La relation reliant l'activité a_X à la concentration m_X s'écrit: $\text{a}_X = m_X \cdot \gamma_X$ avec γ_X appelé coefficient d'activité (compris entre 0 et 1). Ce coefficient d'activité est fonction des interférences électrostatiques de la solution et se calcule à partir de la force ionique de la solution. Ainsi, pour des eaux peu minéralisées, γ_X est proche de 1. Dans ce cas, activité et concentration sont confondus.



Réaction 3-1

La dissolution des carbonates de la matrice fait intervenir les ions bicarbonates de l'eau et nous avons vu que deux processus semblent lier les bicarbonates au calcium et au magnésium. Or les seuls carbonates riches en magnésium sont la dolomite et la calcite magnésienne. La molasse miocène contient en large proportion de la calcite et en proportion moindre de la dolomite (Huneau, 2000). On ne connaît malheureusement pas les teneurs en calcite magnésienne.

Les réactions de dissolution de dolomite s'écrivent (Edmunds *et al.*, 1982):

- dissolution congruente:



- dissolution incongruente¹⁹:



3.2.1.2 Relations HCO_3^- - Ca^{2+} - Mg^{2+}

Sur la figure 3-7, nous avons représenté les variations des teneurs en magnésium en fonction des teneurs en calcium des eaux souterraines (nappes superficielles et profonde). Nous observons une évolution en deux étapes (AB et BC), étapes déjà suggérées sur la figure 3-5. La première correspond à une augmentation des teneurs en magnésium associée à une baisse des teneurs en calcium (flèche AB). Toutes les données, sauf celles correspondantes aux aquifères superficiels, suivent cette tendance. Ensuite pour les faibles teneurs, cette figure suggère une diminution simultanée du magnésium et du calcium (flèche BC). Nous reviendrons dans le prochain paragraphe sur cette seconde étape.

¹⁹ dissolution incongruente signifie que l'ensemble des éléments de la phase solide initiale ne se retrouve pas en totalité sous forme dissoute après dissolution. Une partie des éléments de la phase solide initiale reste ou recristallise sous forme minérale. A l'inverse, si un minéral réagit avec une phase aqueuse et que la phase dissoute a la même composition que la phase initiale, alors il s'agit d'une dissolution congruente (Garrels *et al.*, 1971).

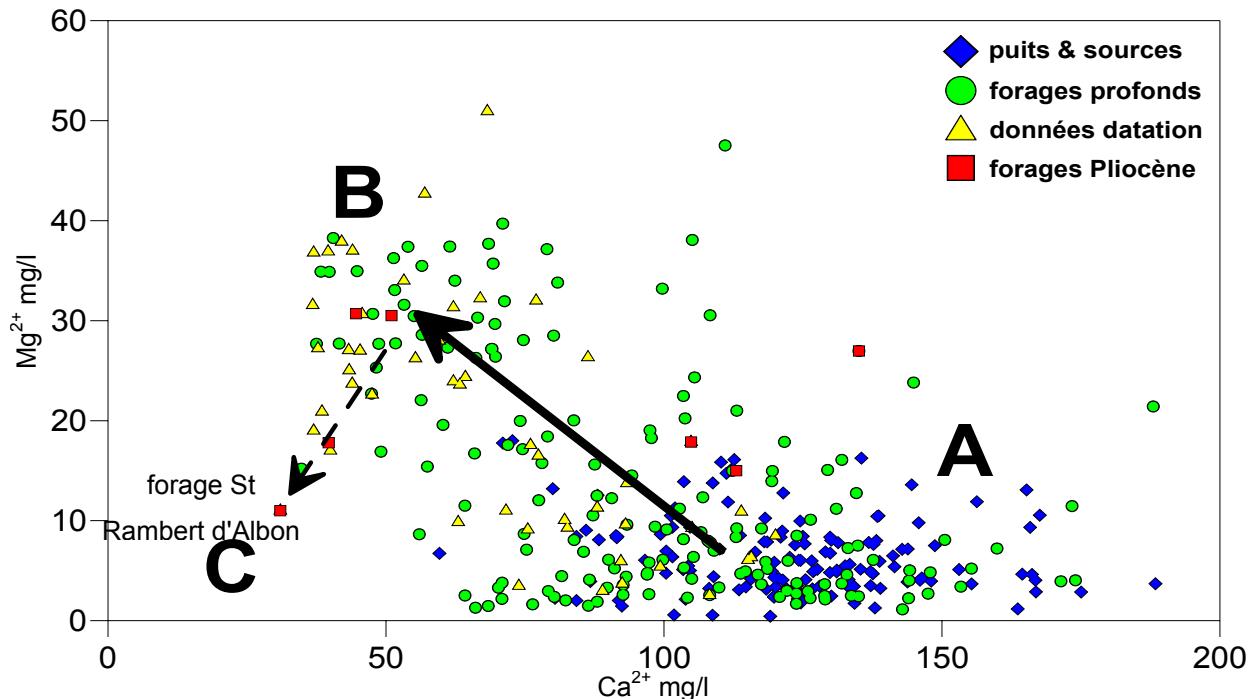


Figure 3-7: Evolution des teneurs en Mg en fonction des teneurs en Ca des eaux souterraines.

A partir des réactions 3-1 à 3-3, cette première étape peut alors s'expliquer suivant deux mécanismes²⁰:

- des échanges $\text{Ca}^{2+} \leftrightarrow \text{Mg}^{2+}$ lors des réactions de précipitation ou de recristallisation de calcite à partir de calcite magnésienne (Edmunds *et al.*, 1987);
- la dissolution incongruente de la dolomite, réaction équivalente à la précipitation de calcite associée à la dissolution congruente de dolomite.

A partir des réactions 3-1 à 3-3 et pour des pH proches de la neutralité, nous pouvons tirer des relations simples reliant les ions calcium, magnésium aux bicarbonates (Edmunds *et al.*, 1982; Edmunds *et al.*, 1987; Appelo *et al.*, 1996; Brouste, 1996; Kilchmann *et al.*, 2004). Ainsi, à partir de la dissolution de la calcite, la relation liant les ions calcium aux bicarbonates s'écrit:

$2.m_{\text{Ca}^{2+}} \approx m_{\text{HCO}_3^-}$ (en mol/l). En milliéquivalent par litre, la relation devient

$m_{\text{meq Ca}^{2+}} \approx m_{\text{meq HCO}_3^-}$ (**Équation 3-1**). Cette relation est d'autant plus intéressante car, pour des

²⁰ Des substitutions isomorphiques au niveau des argiles peuvent être aussi évoquées (cf. paragraphe suivant).

pH inférieurs à 9, celle-ci est indépendante du degré d'ouverture du système. Nous reviendrons au chapitre 5 sur la notion d'ouverture du système vis-à-vis du CO₂.

De la même manière, pour la dissolution congruente de dolomite, nous pouvons écrire, en prenant $m_{Ca^{2+}} = m_{Mg^{2+}}$, la relation $4.m_{Ca^{2+}} \approx m_{HCO_3^-}$ (en mol/l). En milliéquivalent par litre, la relation devient $2.m_{meq Ca^{2+}} \approx m_{meq HCO_3^-}$ (**Équation 3-2**) et exprimé avec le calcium et le magnésium, la relation précédente devient $m_{meq Ca^{2+}} + m_{meq Mg^{2+}} \approx m_{meq HCO_3^-}$ (**Équation 3-3**).

Pour la dissolution incongruente de dolomite, nous obtenons avec $m_{Ca^{2+}} = 0$ et $2.m_{Mg^{2+}} \approx m_{HCO_3^-}$ (en mol/l), la relation $m_{meq_{Mg^{2+}}} \approx m_{meq_{HCO_3^-}}$ (**Équation 3-4**) (en meq/l).

Sur la figure 3-8, nous avons reporté les teneurs en calcium par rapport aux teneurs en bicarbonates des eaux des aquifères. Nous observons une répartition tout à fait conforme aux équations 3-1 et 3-2. Les eaux des puits et des sources ne sont pratiquement soumises qu'à la réaction de dissolution/précipitation de la calcite (droite d'équilibre dissolution/précipitation de pente 1), tandis que les autres échantillons se répartissent entre la droite d'équilibre de la calcite et la droite d'équilibre de la dolomite (zone en grisée). Le domaine situé entre les deux droites, est un domaine à la fois affecté par la dissolution/précipitation de la dolomite et de la calcite. Cet intervalle traduit plus probablement la dissolution/précipitation plus ou moins aboutie de dolomite ou bien de celle de la calcite magnésienne. On peut remarquer que certains points se situent en dessous de la droite de pente $\frac{1}{2}$. Le point le plus en dessous de cette droite est situé dans le Pliocène argilo sableux (forage de St Rambert d'Albon). D'autres points, en particulier le forage SIVAG à St Martin d'Août, se situent à l'inverse bien au-dessus de la droite de pente 1. D'autre(s) mécanisme(s) géochimique(s) de minéralisation de l'eau doivent alors exister.

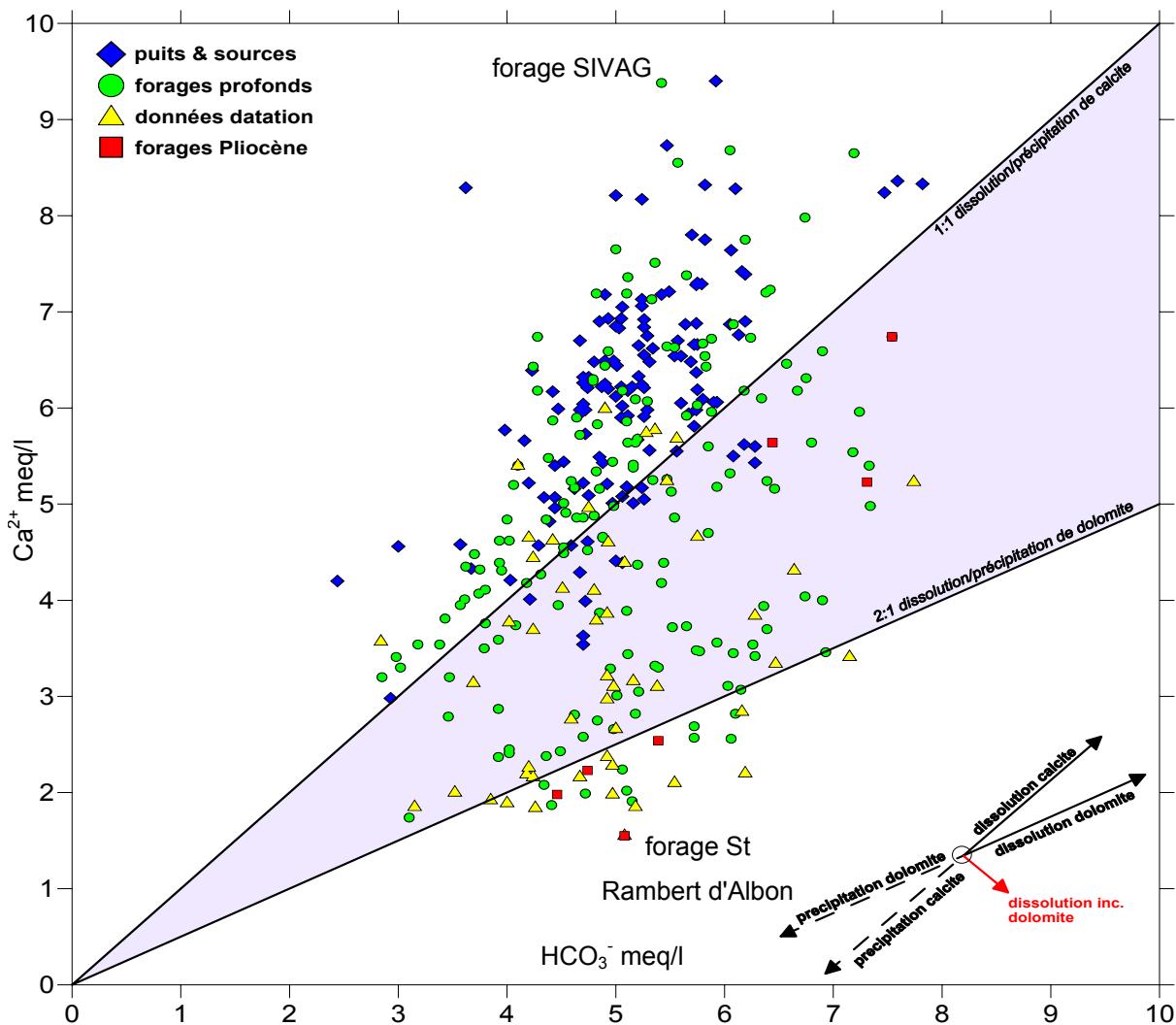


Figure 3-8: Relation entre les teneurs en Ca en fonction des teneurs en HCO₃ des eaux souterraines

Le sens d'évolution de ces réactions dépend de l'état d'équilibre des phases minérales par rapport à l'eau. Cet état d'équilibre est donné par l'indice de saturation vis-à-vis de la calcite et de la dolomite (Is calcite et Is dolomite). A partir des données (cf. annexe V), le calcul des indices de saturations vis-à-vis de la calcite et de la dolomite montre que:

- la plupart des eaux sont sursaturées ou quelquefois en équilibre et plus rarement sous-saturées vis-à-vis de la calcite;
- la plupart des eaux sont sous-saturées ou rarement à l'équilibre avec la dolomite.

L'hypothèse d'un gain de magnésium par dissolution de dolomite (ou de calcite magnésienne) et d'une perte de calcium par précipitation de calcite nécessite que l'eau soit à la fois sursaturée vis-à-vis de la calcite et sous-saturée vis-à-vis de la dolomite. Les conditions

d'équilibres dans les eaux profondes sont donc remplies pour expliquer l'augmentation du magnésium et la baisse du calcium.

3.2.2 Le rôle des argiles

La transition du faciès *bicarbonaté calcique et magnésien* vers le faciès *bicarbonaté sodique* ne peut être expliquée par la chimie des carbonates. Il faut alors tenir compte de la fraction argileuse présente au sein de la molasse miocène mais aussi sein des argiles sableuses pliocènes. En effet, les argiles sont des matériaux à fortes capacités d'échanges cationiques (Atteia, 2005).

3.2.2.1 La fraction argileuse

Les matériaux argileux présents au sein de la molasse miocène ont été décrits par Jeannolin (1985) et nous résumons les types d'argile et leurs proportions rencontrés. Les minéraux argileux prépondérants dans la molasse miocène sont la montmorillonite et l'interstratifié illite-montmorillonite (30 à 60 %) puis vient l'illite (30 à 50 %), puis la chlorite (10 à 30 %). La kaolinite est sous forme de trace. Huneau (2000) a montré que, dans le bassin de Valréas, les compositions minéralogiques des argiles des sédiments pliocènes et miocènes sont proches. Il y a tout lieu de croire qu'au niveau du bassin de Valence, la composition minéralogique des argiles pliocènes soit aussi proche de celle de la molasse miocène.

3.2.2.2 Les échanges de bases

Les échanges de cations se déroulent selon l'équation globale du bilan de masse suivante (Drever, 1997):



avec A^{p+} et B^{q+} cations échangés.

Il s'avère que les substitutions isomorphiques entre calcium et magnésium ne sont pas les substitutions privilégiées au sein des argiles, car il y a préférentiellement substitution d'un ion alcalino-terreux avec un ion alcalin (Appelo *et al.*, 1996). En effet, la séquence dans laquelle les ions sont préférentiellement échangés dépend d'une part de la sélectivité de surface du minéral et d'autre part de la valence des ions échangés. Ainsi, la sélectivité de la phase argileuse peut être exprimée, de la plus faible à la plus forte affinité, selon la séquence suivante: $\text{Na}^+ < \text{Li}^+ < \text{K}^+ < \text{Rb}^+ < \text{Cs}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Ba}^{2+} < \text{Cu}^{2+} < \text{Al}^{3+} < \text{Fe}^{3+} < \text{Th}^{4+}$. En d'autres termes, les ions de forte valence remplacent les ions dont la valence est plus faible et les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} ont quasiment la même affinité avec la phase argileuse (Edmunds *et al.*, 1987; Barbécot, 1999). Par ailleurs, il faut tenir compte de la capacité d'échange cationique²¹ des phyllosilicates. Elle se range selon la séquence suivante (par ordre décroissant): la montmorillonite (80-150), l'illite (10-40), la kaolinite (1-10) puis la chlorite (<10) (Drever, 1997). Ainsi, nous voyons bien qu'au sein de la matrice aquifère les échanges de bases sont possibles.

3.2.2.3 Relations Ca^{2+} - Mg^{2+} - Na^+

En reprenant la figure 3-7, nous observons après l'étape (AB) décrit précédemment, une baisse simultanée des teneurs en magnésium et calcium (flèche BC).

Il est intéressant de remarquer que cette étape (BC) n'implique que quelques rares points de l'aquifère profond et les forages situés dans le Pliocène, notamment le forage de la commune de St Rambert d'Albon. Cette diminution des alcalino-terreux ne peut se faire qu'au profit des alcalins grâce aux échanges de bases avec les argiles de la matrice. En effet, la figure 3-9 montre l'évolution des teneurs en sodium en fonction des teneurs en calcium. Nous observons que au-dessus de 80 mg/l de calcium, les teneurs en sodium restent dans une gamme stable de variation sauf quelques points qui montrent de fortes teneurs en sodium (rectangle). Leurs positions montrent sans aucun doute une origine complexe du calcium et du sodium (trace de gypse dans l'Oligocène au Sud de la Drôme). Entre 80 et 60 mg/l, les teneurs en sodium ont tendance à augmenter, puis en dessous, seuls les forages situés dans le Pliocène montrent une

²¹ exprimé en meq/100g de phyllosilicates.

nette augmentation en sodium. Les autres échantillons ne montrent pas une telle augmentation de ces teneurs.

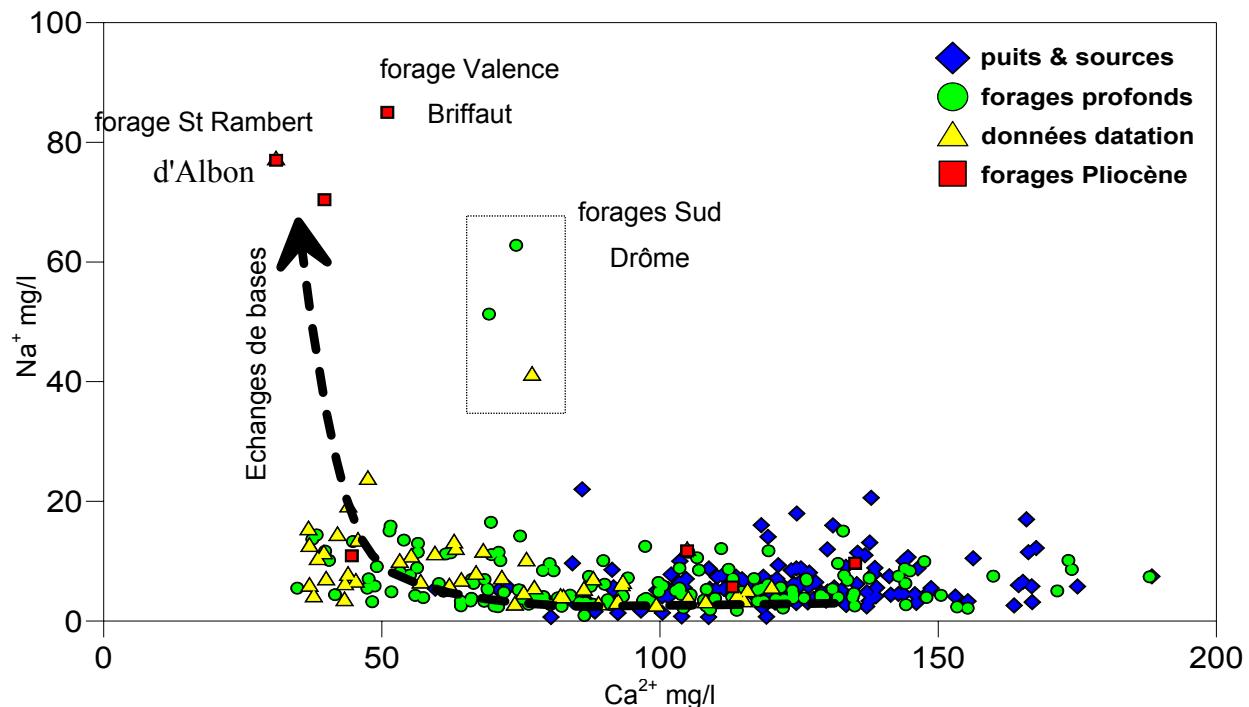


Figure 3-9: Evolution des teneurs en sodium en fonction des teneurs en calcium des eaux souterraines.

Les figures 3-7 et 3-9 montrent sans ambiguïté que les ions alcalino-terreux sont échangés au profit des ions alcalins. Toutefois, les échanges de bases restent discrets au niveau de la molasse miocène mais deviennent très importants pour une partie des forages situés dans le Pliocène. L'eau du forage de la commune de St Rambert d'Albon est le plus affecté par ces échanges de bases. Cette discrimination s'explique sans doute par une proportion d'argile différente présente dans la matrice aquifère miocène et pliocène mais aussi par le temps de contact entre l'eau et les argiles de la matrice.

3.2.2.4 L'eau de rétention

En dehors du rôle des argiles dans les échanges de bases, Jeannolin (1985) a soupçonné une participation notable des eaux piégées dans les argiles pliocènes pour expliquer certaines teneurs en sodium, chlorure et sulfate.

Sur la figure 3-10, nous avons représenté les teneurs en chlorure en fonction des teneurs en sodium. Si des ions chlorures et sodium avaient pour origine l'eau de mer ou la mise en solution de halite (NaCl), le rapport d'ions Cl^-/Na^+ (rapport ionique en mg/l sur mg/l) doit être identique à l'eau de mer, donc proche de 1,8. Un seul échantillon d'eau montre effectivement des teneurs compatibles (forage Valence Briffaut). Toutes les autres données montrent surtout des perturbations liées à des pollutions anthropiques (cf. § 3.2.4) et, dans une moindre mesure, aux échanges de bases.

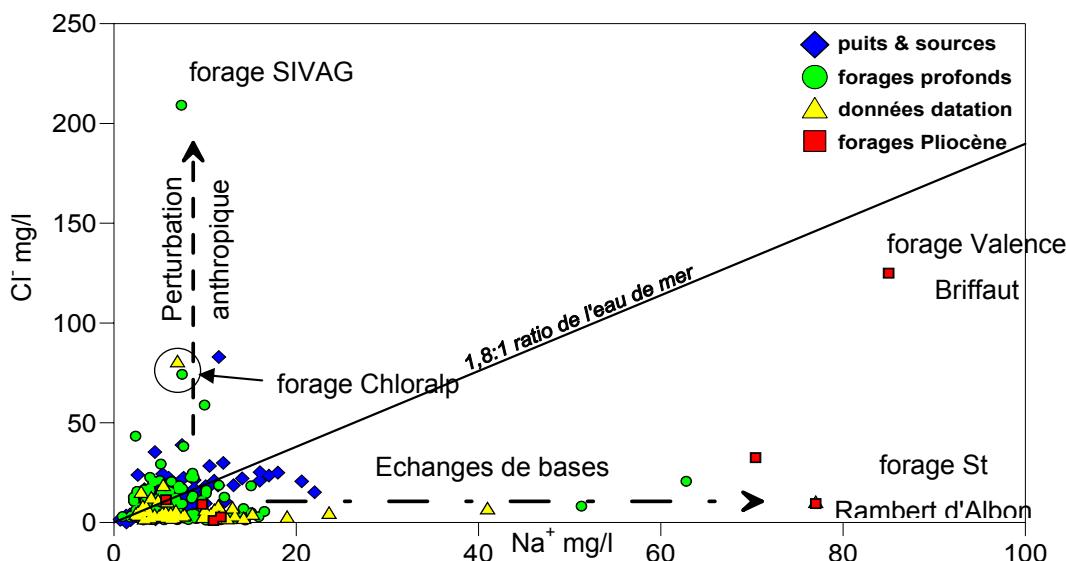


Figure 3-10: Evolution des teneurs en chlorure en fonction des teneurs en sodium des eaux souterraines

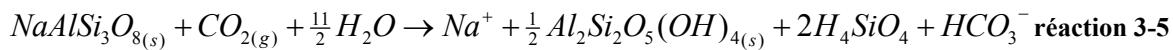
3.2.3 Les minéraux silicatés

L'augmentation des teneurs en magnésium, sodium et potassium s'accompagne aussi d'une augmentation des teneurs en silice. Seule l'hydrolyse des minéraux silicatés permet la libération de silice dissoute.

3.2.3.1 Hydrolyse des silicates

L'hydrolyse des silicates est le phénomène majeur d'altération des minéraux primaires des roches. A partir d'une roche mère au contact avec l'atmosphère, ce processus aboutit à la formation des sols (formation de minéraux secondaires) mais c'est un processus lent. Au niveau des sols, la pression partielle de CO_2 est importante et elle est nécessaire dans les

phénomènes d'hydrolyse. Dans les eaux souterraines, la pression partielle de CO₂ est le principal facteur limitant l'hydrolyse des silicates. Par exemple l'albite (plagioclase du pôle sodique) produit de la kaolinite et libère du sodium et de la silice, selon la réaction:



Latreille (1969) a décrit la fraction détritique de la molasse du Bas-Dauphiné (minéraux primaires). La fraction détritique silicatée légère est composée de quartz (40 à 80 %), feldspaths (5 à 20 %) et micas (jusqu'à 3 %). Les feldspaths sont variés avec orthose, microcline (feldspaths potassiques) et plagioclases (feldspaths calco-sodique). Dans la famille des micas, la muscovite domine mais est accompagnée par la chlorite et la biotite. La fraction argileuse (minéraux secondaires ou néoformés) ont été décrit dans le paragraphe 3.2.2.1.

3.2.3.2 Diagramme de stabilité

A partir des teneurs en silice²² des eaux souterraines, nous pouvons étudier les équilibres d'eaux par rapport aux différents minéraux silicatés primaires ou néoformés (figure 3-11). La répartition des eaux en fonction du type d'aquifère rencontré montre une évolution des eaux depuis un milieu d'exportation (nappe superficielle avec des eaux peu minéralisées) vers un milieu fermé (nappe profonde avec des eaux plus minéralisées). Les minéraux peu solubles tels que la kaolinite et les feldspaths potassiques sont très rapidement à l'équilibre avec des eaux qui sont peu minéralisées (pas de phénomène d'hydrolyse). *A fortiori*, ces minéraux peu solubles sont donc aussi en équilibre avec des eaux plus minéralisées. Sur la figure 3-11, nous observons que les eaux appartiennent presque toute au domaine de stabilité de la kaolinite. Par contre, les eaux peu minéralisées ne sont pas en équilibre avec les minéraux plus solubles tels que les montmorillonites et les feldspaths calco-sodique. Dans ce cas, le phénomène d'hydrolyse de ces minéraux enrichi les solutions en silice dissoute et cations alcalins et alcalinoterreux rapprochant les solutions de l'équilibre avec ces minéraux tout en restant dans

²² les teneurs en silice proviennent des échantillonnages correspondant à:

- la datation des eaux par le carbone 14;
- la nappe superficielle;
- quelques forages de la nappe profonde (domaine molassique ou pliocène).

le domaine de stabilité de la kaolinite. Ce processus conduit à l'équilibre avec les montmorillonites (flèches sur la figure 3-11).

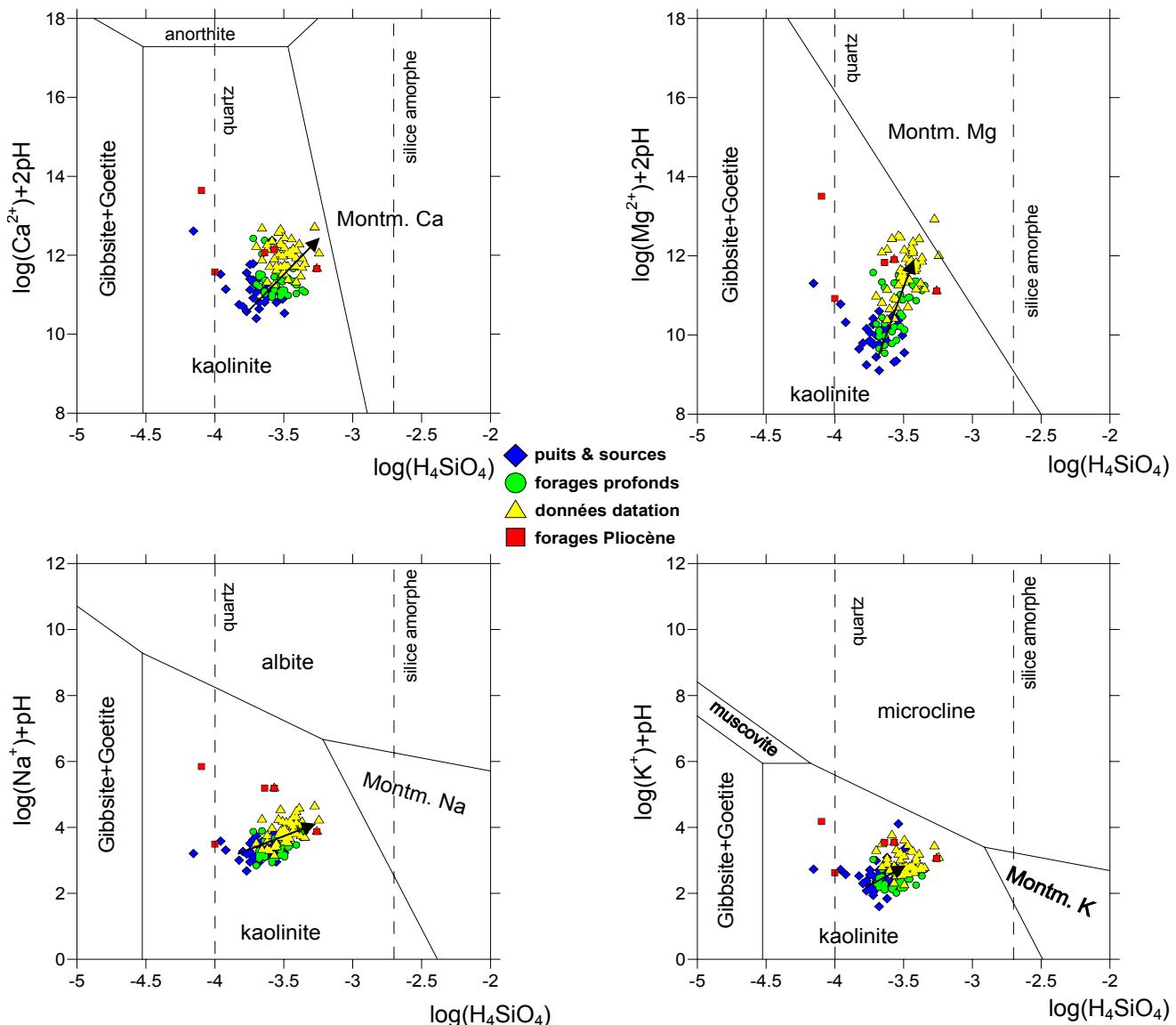


Figure 3-11: Diagrammes de stabilité des minéraux silicatés (données traitées avec le logiciel Aqua).

L'augmentation des teneurs en silice provient donc partiellement de l'altération des plagioclases et s'accompagne de l'augmentation des teneurs en sodium et/ou calcium. En comparaison des autres phénomènes géochimiques vus précédemment, la contribution de l'hydrolyse des silicates aux variations des teneurs en cations est faible car les autres minéraux impliqués (calcite, dolomite,.. sont plus solubles que ces silicates).

Par ailleurs, la distribution des eaux dans ces diagrammes d'équilibres montre une relative dispersion des nuages de points. Cette dispersion montre qu'il existe une forte hétérogénéité

hydrochimique dans la l'acquisition de la minéralisation de l'eau. Le bassin molassique de Valence possède une composition minéralogique plutôt homogène à l'échelle du bassin et l'hétérogénéité hydrochimique ne peut donc provenir que du fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère (mélanges d'eaux d'origines différentes).

3.2.4 Les apports anthropiques

Les apports d'origines anthropiques constituent le dernier facteur d'acquisition de la minéralisation de l'eau.

3.2.4.1 Pollutions diffuses

Le développement de l'agriculture, par la fertilisation et la protection des cultures, a introduit depuis ces 30 dernières années divers éléments dissous dans les eaux souterraines dépassant parfois largement les normes actuelles de potabilité. Les nitrates, sulfates, chlorures et, dans une moindre mesure, sodium et potassium font partie du cortège d'éléments permettant d'identifier une pollution diffuse d'origine agricole. Les ACP effectuées sur les eaux superficielles et profondes (cf. figures 3-3 et 3-6) montrent clairement que ce cortège est associé aux eaux récentes.

Les nitrates étant le meilleur indicateur de pollution anthropique des eaux souterraines, nous avons cherché à comparer les teneurs en sulfates, chlorures et sodium + potassium en fonction de cet indicateur (figures 3-12 à 3-14) et en déduire leurs origines (naturelles ou anthropiques).

Nous remarquons sur la figure 3-12 que les sulfates et les nitrates sont bien reliés. Nous retrouvons les forages situés au Sud de la Drôme avec des teneurs en sulfates assez élevées pour des teneurs en nitrate comprises entre 8 et 25 mg/l. L'origine des sulfates n'est pas clairement identifiable mais des traces de gypse ont été reconnues dans les marno-calcaires sous-jacents. Les teneurs en sulfate supérieures à 70 mg/l et en nitrate inférieures à 50 mg/l des eaux des puits sont probablement dues aux apports anthropiques. Ces puits se situent à la confluence Isère-Rhône et le long de la vallée du Rhône où l'arboriculture domine largement.

Or les sulfates sont les composés les plus fréquemment utilisés sur ces cultures fruitières pour la protection (lutte contre l'oïdium) ou avec les engrains (les sulfates d'ammoniaque 21% de N et 60 % de SO₄ et sulfates de potassium 50 % de K₂O et 45 % de SO₄, soit une utilisation d'environ 100 kg de SO₄/ha/an en moyenne sur vergers) (Dubocs C.A. 26, *com. pers.*).

Sur la figure 3-13, nous observons une très bonne relation entre les ions chlorures et nitrates mise à part les forages SIVAG et Chloralp. Le coefficient de corrélation entre les ions chlorures et nitrates des eaux de la nappe profonde qui est seulement de 0,29 passe à 0,73 en enlevant ces deux individus. L'association chlorures-nitrate indique que l'origine de ces deux éléments provient de l'élevage, des amendements et/ou des eaux usées. Les deux teneurs anormalement élevées en chlorure sont liées à une pollution ponctuelle comme nous allons le voir au prochain paragraphe.

Enfin, sur la figure 3-14, le sodium et le potassium d'origine anthropique se retrouvent plus facilement dans la nappe superficielle que dans la nappe profonde. Dans la nappe profonde, l'évolution du sodium et potassium est surtout reliée aux échanges de bases et à l'hydrolyse des silicates.

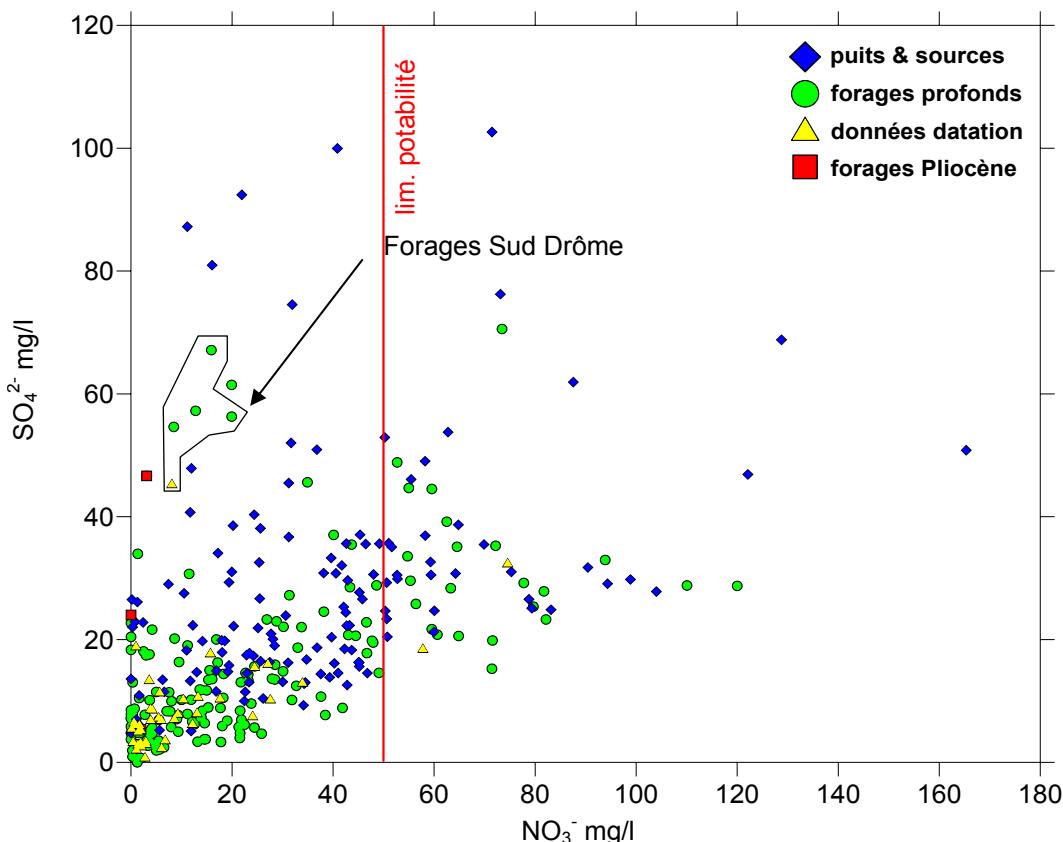


Figure 3-12: Relation entre sulfate et nitrate des eaux souterraines (mg/l).

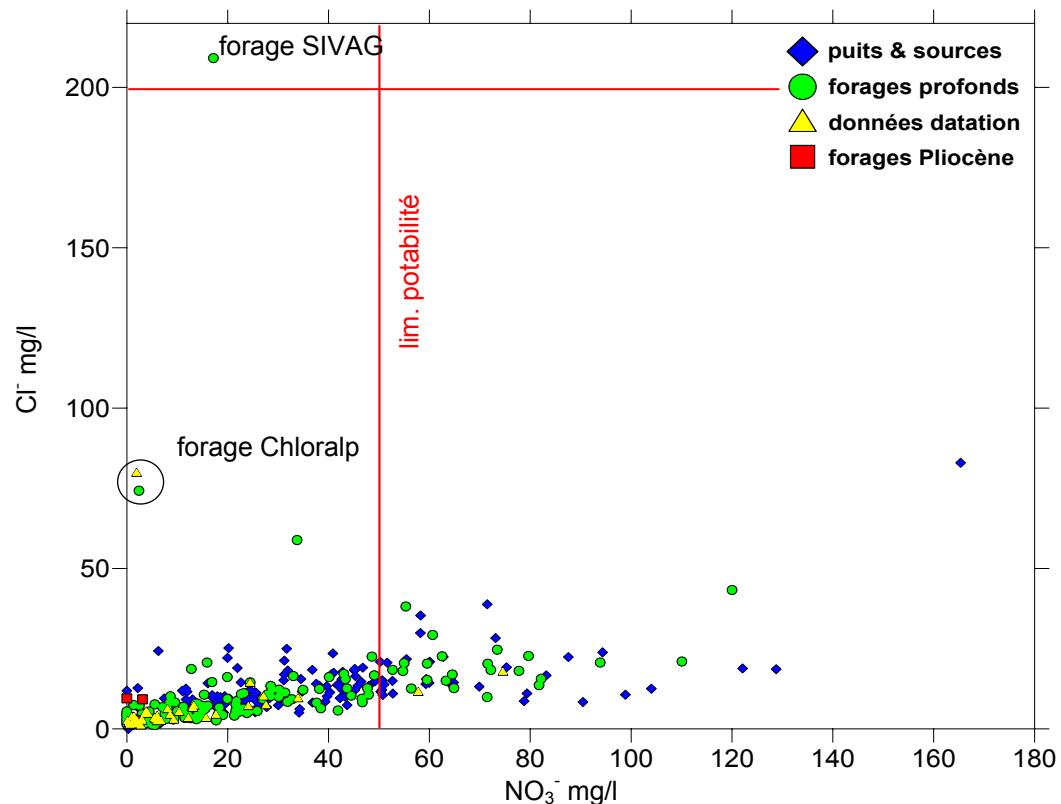


Figure 3-13: Relation entre chlorure et nitrate des eaux souterraines (mg/l).

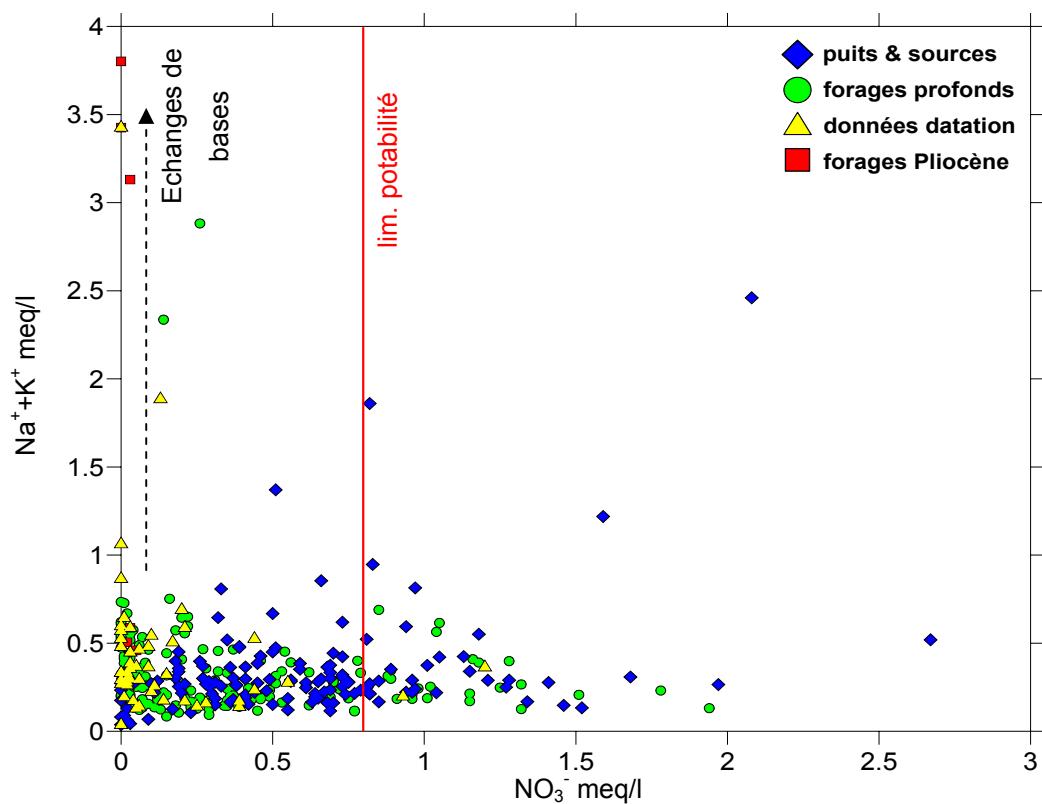


Figure 3-14: Relation Na+K vs nitrate des eaux souterraines (meq/l).

3.2.4.2 Pollutions ponctuelles

Pour les eaux de la nappe profonde, des pollutions ponctuelles dégradent aussi la qualité intrinsèque de cet aquifère. En effet, nous avons vu, sur la figure 3-10, que le forage SIVAG situé à Saint Martin d'Août et le forage de l'entreprise Chloralp à Hauterives ont des eaux avec des teneurs anormales en ions chlorures.

Ces deux forages se situent tous les deux à proximité des sites d'exactions de saumure de Tersanne (GDF) et de Hauterives (Chloralp et GDF)²³.

Les analyses d'eaux de ces deux forages révèlent, de plus, de faibles teneurs en sodium et en sulfates mais de fortes teneurs en calcium. Il y a un rapport de un à deux entre les ions calcium et les ions chlorures. L'ion chlorure est un élément conservatif dans les eaux souterraines à l'inverse du sodium. On peut expliquer la teneur importante en calcium et la faible teneur en sodium de ces eaux par les échanges de bases avec les argiles de la matrice aquifère (principalement illite-montmorillonite). En effet, en présence d'eau très minéralisée, comme les saumures, se sont les cations monovalents qui vont se fixer préférentiellement sur les argiles pour relarguer des cations divalents (Atteia, 2005).

Dans les années 1970, un fuite minime d'un saumauduc reliant Tersanne à Hauterives avait été détectée conduisant GDF à l'indemnisation de paysans dont les cultures avaient été rendues improches à l'exploitation du tabac. Or la fuite de ce saumauduc se situe à quelques centaines de mètres du forage SIVAG. Il est probable que la teneur en chlorures mesurée n'est autre que la trace du panache de cette pollution localisée. En 2005, la teneur en chlorures a largement diminué et est de 63 mg/l.

²³ L'extraction de saumures par lessivage des sels de l'Oligocène pour le stockage de gaz par GDF sur le site de Tersanne a été importante entre les années 1960-1990. Au niveau de Hauterives - le Grand-Serre, de nouvelles cavités permettent aussi de stocker du gaz pour GDF. Par ailleurs, la société Chloralp exploite aussi les sels qui sont envoyés par saumauducs à Pont-de-Claix en Isère.

3.2.5 Commentaires

Nous avons pu identifier les phénomènes géochimiques majeurs se déroulant au sein de l'aquifère mais la masse de données géochimiques acquise sur ce bassin ne permet pas facilement de discriminer ces phénomènes géochimiques. Nous avons, à partir d'un bilan réactionnel, essayé de quantifier la part des mécanismes (chimie des carbonates et/ou échanges de bases) ayant lieu dans l'aquifère.

A partir des réactions 3-1 à 3-4, nous avons reporté dans le tableau 3-9 la perte ou le gain des ions calcium, magnésium, bicarbonates, calcium+magnésium et le rapport Ca/Mg en fonction des réactions considérées²⁴. Nous supposons qu'avec les échanges de bases, il existe deux possibilités de substitutions, d'une part l'absorption d'une mole de calcium sur la phase argileuse avec la désorption de deux moles de sodium et d'autre part, l'absorption d'une mole de magnésium avec désorption de deux moles de sodium.

<i>- perte, + gain, 0 pas ou peu d'effets</i>	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	$\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
précipitation calcite	-	0	-	-
dissolution calcite	+	0	+	+
dissolution dolomite	+	+	+	+
précipitation dolomite	-	-	-	-
dissolution incongruente dolomite	0	+	+	+
échanges de bases Ca^{2+}	-	0	0	-
échanges de bases Mg^{2+}	0	-	0	-
hydrolyse silicates	~ 0	0	$\sim +$	~ 0

Tableau 3-9: Bilan réactionnel entre chimie des carbonates, hydrolyse des silicates et échanges de bases.

Sur le tableau précédent, nous remarquons que se sont principalement les échanges de bases qui induisent une différence de comportement entre les ions bicarbonates et la somme des

²⁴ Nous n'avons pas tenu compte de la dissolution de gypse dans le bilan réactionnel car c'est un phénomène géochimique mineur dans le bassin de Valence.

ions calcium et magnésium (zone en grisée). L'hydrolyse des silicates conduit à une légère augmentation des bicarbonates.

Sur la figure 3-15, nous avons reporté la somme des ions calcium et magnésium (en meq/l) par rapport aux teneurs en ions bicarbonates. La droite de pente 1 correspond à la chimie des carbonates (cf. équations 3-1 à 3-4, § 3.2.1.2). Quelques points se situent bien en dessous de cette droite dont le forage de la commune de St Rambert d'Albon. A l'inverse, nous remarquons que le forage SIVAG de St Martin d'Août se situe à l'opposé de la droite. Or nous avons vu que ces deux forages sont les plus affectés par les échanges de bases (échanges de sens opposés).

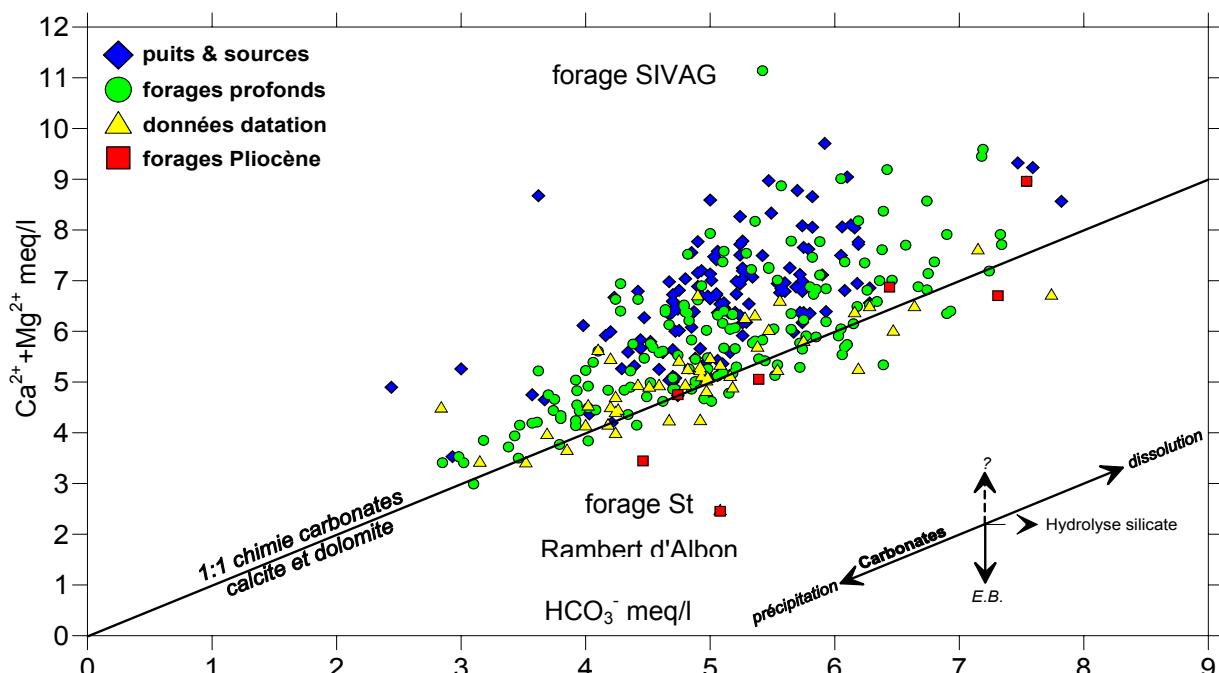


Figure 3-15: Evolution des teneurs en calcium et magnésium en fonction des teneurs en bicarbonates des eaux souterraines.

Ainsi, il est alors possible de différencier la chimie des carbonates et les échanges de bases²⁵. Nous pouvons formaliser cette différence par le calcul d'un paramètre $D = (Ca^{2+}) + (Mg^{2+}) - (HCO_3^-)$ en meq/l qui représente simplement la distance par rapport à la droite d'équation $y = 1.x$. L'interprétation de D est alors:

²⁵ Dans le diagramme précédent, l'hydrolyse des silicates est peu discernable en comparaison des autres phénomènes.

- Si $D = 0$, la chimie des carbonates est le mode d'acquisition majeur de la minéralisation de l'eau;
- Si $D < 0$, les échanges de bases (perte de Ca^{2+} et/ou Mg^{2+}) sont le phénomène dominant (exemple du forage St Rambert d'Albon);
- Enfin pour $D > 0$, l'acquisition de la minéralisation de l'eau est perturbée par plusieurs phénomènes, tels que les échanges de bases en présence de saumure, les pollutions diffuses, la présence de gypse au Sud de la Drôme, qui peuvent modifier les teneurs des ions calcium, magnésium et bicarbonates.

L'acquisition de la minéralisation de l'eau est, en premier, dépendante de la chimie des carbonates. Les échanges de bases et l'hydrolyse des silicates sont des phénomènes secondaires fonction de la teneur en argile et des minéraux silicatés présents au sein de la matrice aquifère. L'évolution du faciès de l'eau doit dépendre étroitement de la nature de la matrice aquifère et de la disponibilité en CO_2 dissous. Cette évolution de la minéralisation ne peut être prise en compte qu'en étudiant la distribution spatiale des éléments majeurs au sein des aquifères superficiels et de l'aquifère profond.

3.3 REPARTITION GEOGRAPHIQUE

Dans cette partie, nous décrivons dans un premier temps l'évolution géochimique des eaux suivant des lignes d'écoulements. Dans un second temps, des cartes de distributions spatiales des éléments sont présentées.

3.3.1 Lignes d'écoulements

Nous avons pu mettre en évidence les processus géochimiques de manière globale. A partir des forages prélevés et de la piézométrie nous pouvons suivre l'évolution du profil chimique des eaux selon trois lignes d'écoulement choisies pour leur représentativité (figure 3-16). La première ligne d'écoulement, située au niveau de la plaine de Valence, va de la Baume Cornillane jusqu'à l'Est de Beauvallon sur près de 11 km (L.1). Au nord de l'Isère, la seconde part du plateau de Thivolet, au niveau de la commune de Saint Bonnet de Valclérieux, et se dirige vers la plaine de l'Isère en suivant l'Herbasse, sur près de 21 km (L.2). La troisième se

situe dans la vallée de la Joyeuse entre Montmiral et Saint Paul les Romans sur 9 km environ (L.3).

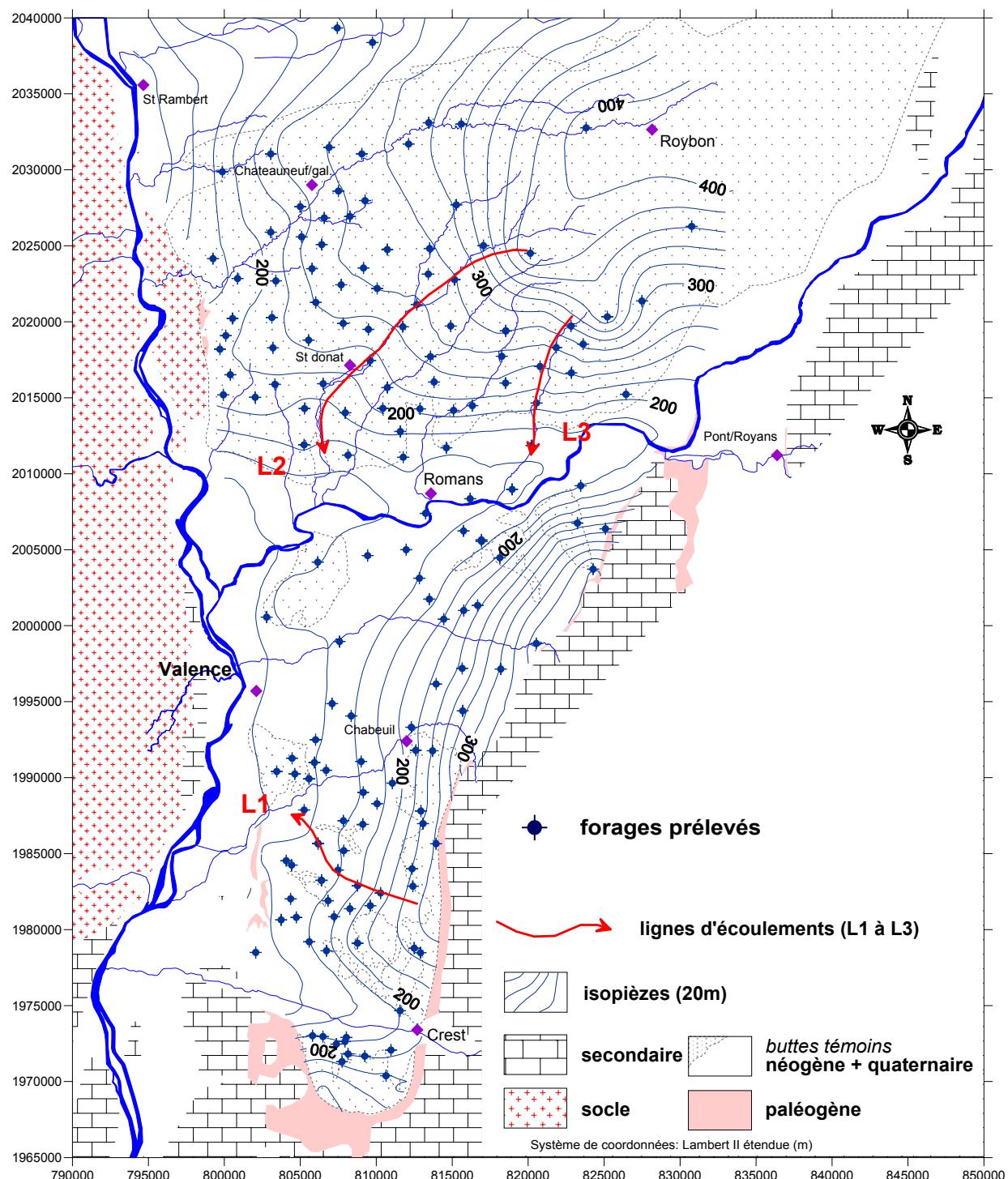


Figure 3-16: Lignes d'écoulements représentatives de l'évolution géochimique des eaux.

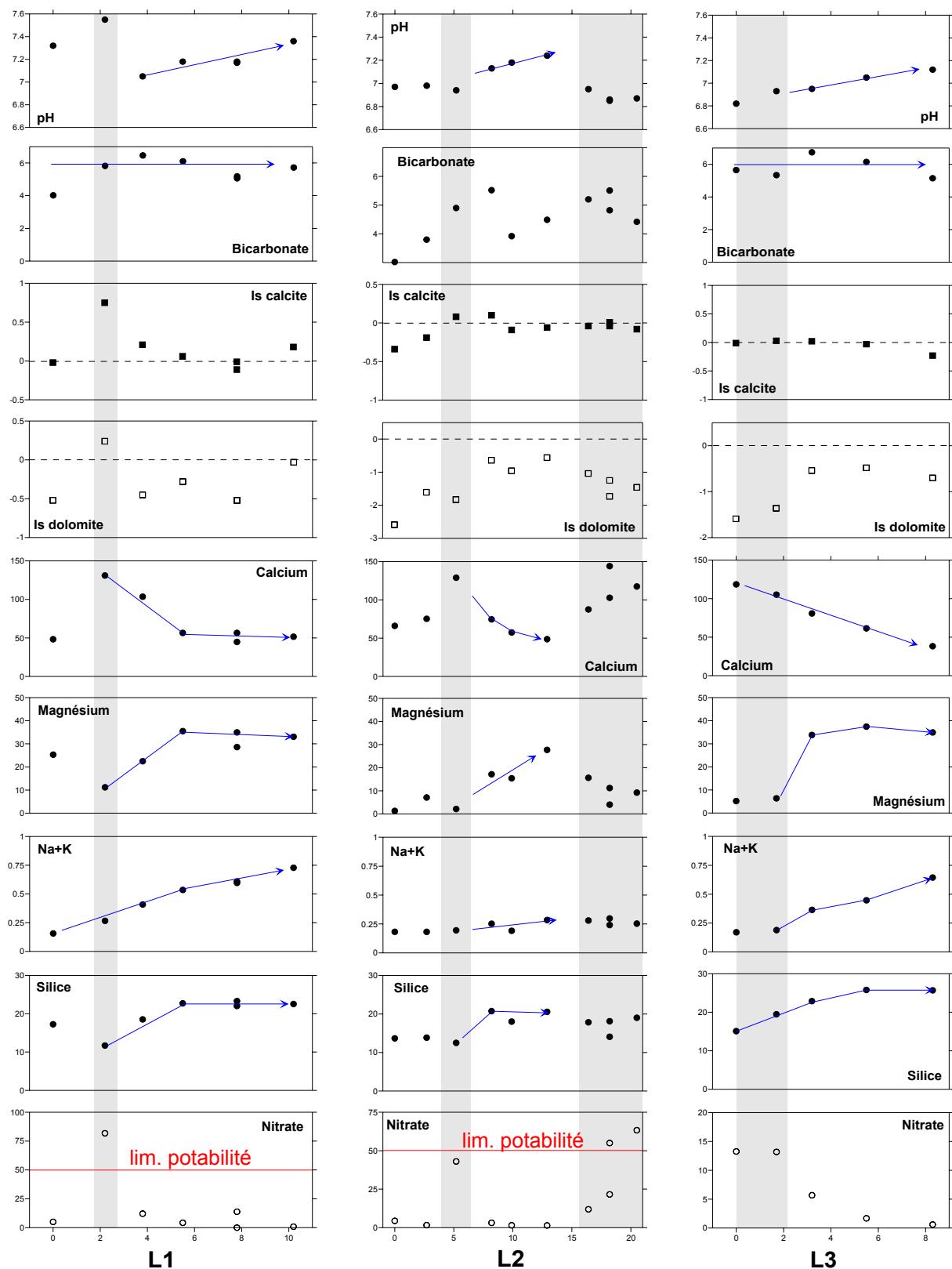


Figure 3-17: Evolutions chimiques des eaux souterraines selon 3 lignes d'écoulements. Paramètres exprimés en mg/l pour nitrate, silice, calcium et magnésium et en meq/l pour bicarbonates et Na+K.

Nous avons représenté les variations des paramètres pH, bicarbonates, indice de saturation (calcite et dolomite), calcium, magnésium, sodium + potassium, silice et nitrates en fonction de la distance piézométrique sur la figure 3-17. Sur cette figure, les 3 lignes d'écoulements apparaissent perturbées par des eaux récentes polluées par des nitrates (zones en grisé). Ces perturbations rendent l'interprétation de l'évolution géochimique plus complexe, notamment sur la ligne L2. Ces perturbations dans l'évolution chimique de l'eau rejoignent l'hétérogénéité du système hydrochimique démontré par la dispersion du nuage de point dans les diagrammes de stabilités des minéraux silicatés (cf. § 3.2.3.2) et celle évoquée à partir de l'ACP (cf. § 3.1.2.2). Les mélanges d'eaux par des infiltrations d'eaux récentes (nitrate) ou bien par la convergence de lignes de flux sont la cause de cette hétérogénéité observée.

L'infiltration d'eau récente conduit à deux types d'eaux, avec soit une eau sous-saturée vis-à-vis de la calcite avec un pH bas, capable de dissoudre la calcite (cf. L2), soit une eau largement sursaturée vis-à-vis de la calcite et avec un pH élevé et qui a déjà, au cours de son infiltration, dissous de la calcite (cf. L1). Nous observons des variations plus ou moins franches des cations majeurs et de la silice (marquées sur L1 et L3). La précipitation de calcite et la dissolution congruente de dolomite et l'hydrolyse des silicates sont les phénomènes prépondérants. A l'aval des lignes L1 et L3, nous observons une rupture de pente dans l'évolution des cations (surtout pour Ca et Mg) et de la silice. La légère baisse des teneurs en calcium et magnésium (L1) montre que les échanges de bases deviennent prépondérants. La stabilisation des teneurs en silice implique un fort ralentissement de l'hydrolyse des silicates du fait de la diminution de la pression partielle de CO₂.

L'évolution en détail des teneurs en bicarbonates est complexe car ces ions interviennent plus ou moins directement dans plusieurs réactions géochimiques. Il faut donc raisonner de manière globale et dans ce cas le bilan des bicarbonates apparaît assez stable. L'évolution en détail du pH apparaît aussi assez complexe mais on observe une augmentation du pH le long des lignes de flux.

Globalement, l'évolution des cations majeurs apparaît très nette le long de ces 3 lignes de flux. Le magnésium, la silice et le sodium apparaissent comme de très bons indicateurs de l'évolution géochimique de l'eau le long des lignes d'écoulements. Il convient néanmoins de faire quelques remarques sur l'aquifère et les points échantillonnés car les tendances mises en évidence précédemment se trouvent perturbées par des infiltrations d'eaux récentes.

Premièrement, la position des forages échantillonnés ne se trouve pas toujours le long d'une ligne de flux. Par exemple, la ligne L2 montre une nette participation d'eau récente à l'aval de cette ligne. Les points incriminés ne se situent pas exactement dans la vallée de l'Herbasse mais sur les coteaux²⁶ (cf. Figure 3-16). Nous avons déjà identifié le rôle des buttes molassiques comme autant de dômes piézométriques, *i.e.* zones d'infiltrations. Deuxièmement, les forages échantillonnés n'ont pas les mêmes profondeurs et/ou ils n'ont pas les mêmes niveaux crépinés. Or, dans ce type d'aquifère sédimentaire et en particulier dans celui-ci, des mesures de micromoulinet ont montré que les circulations d'eaux se situaient en général sur quelques dizaines de mètres par rapport à la hauteur totale crépinée (cf. Partie III). Troisièmement, l'aquifère étudié est en grande partie libre, ce qui accentue la difficulté dans l'interprétation de l'évolution géochimique des eaux. Ces conditions restrictives à cette approche limitent alors son intérêt. Ainsi, pour suivre l'évolution géochimique de l'eau il est préférable de s'intéresser à la distribution spatiale des éléments chimiques des eaux des forages échantillonnés

3.3.2 Distribution spatiale des éléments

Nous présentons des cartes de distributions spatiales des éléments. Les traits marquants de chaque carte sont détaillés et les similitudes et différences entre cartes sont soulignées. Ces cartes de qualité de l'eau de chaque aquifère ont pour objectif de servir de référence pour les différents utilisateurs de la ressource.

²⁶ Au droit de la vallée de l'Herbasse, nous n'avons pas trouvé de forage susceptible d'être échantillonné.

3.3.2.1 La nappe superficielle de la plaine de Valence

Pour caractériser l'influence des pressions de surface sur la nappe superficielle, nous avons choisi de ne représenter que les cartes des teneurs en nitrate et en sulfate de la nappe superficielle au niveau de la plaine de Valence²⁷.

3.3.2.1.1 Les nitrates

La carte des teneurs en nitrate est présentée sur la figure 3-18.

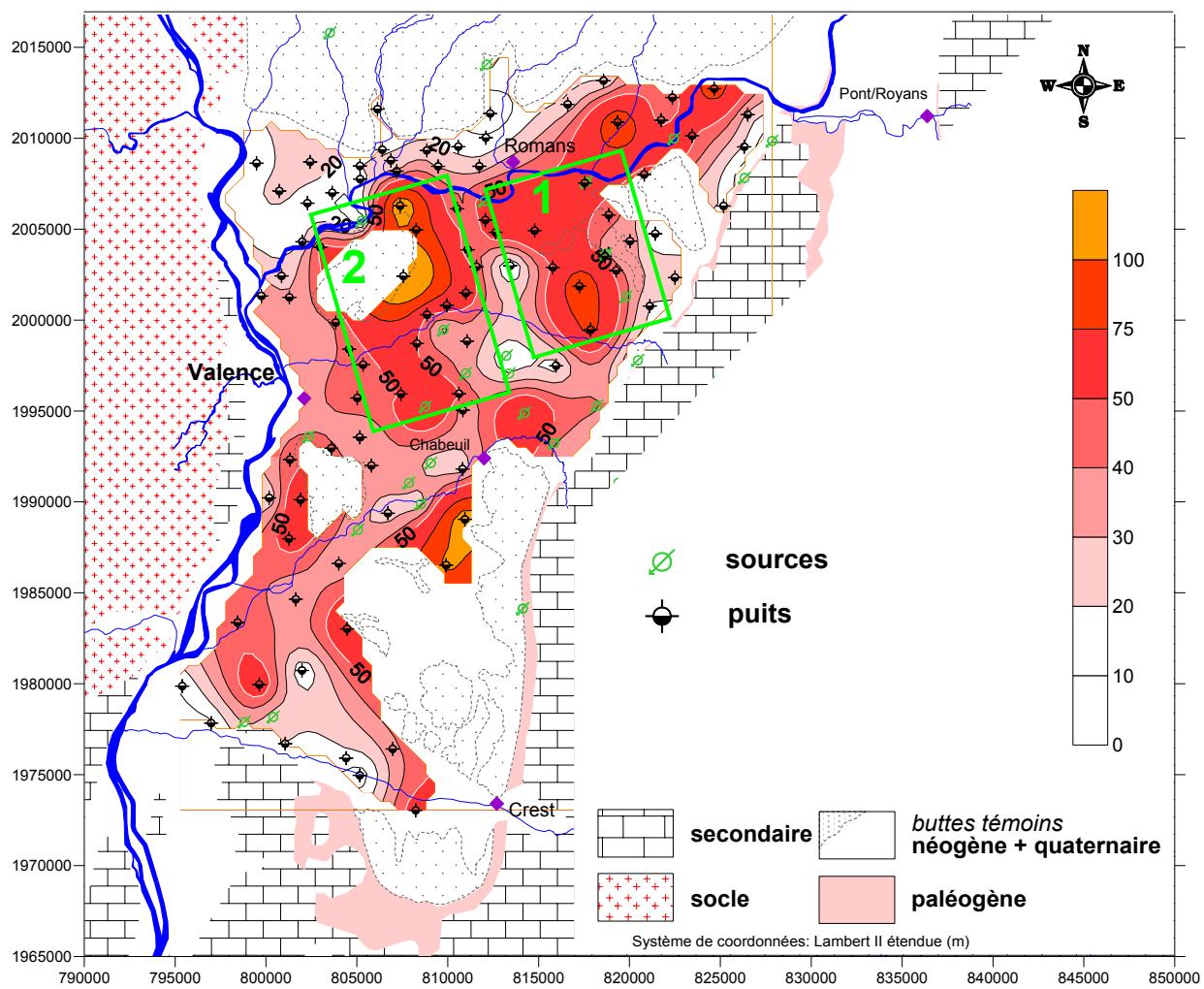


Figure 3-18: Carte des teneurs en nitrate de la nappe superficielle de la plaine de Valence (mg/l).

²⁷ Au niveau de la vallée de la Valloire, le nombre de points échantillonnés (9) n'est pas suffisant pour tracer des cartes d'iso-teneurs en nitrate et sulfate. Dans ce secteur, la teneur moyenne est d'environ 38 mg/l en nitrate mais aucun prélèvement ne dépasse la norme de potabilité.

Cette carte est la synthèse des analyses prélevées entre 2003 et 2004. Nous constatons un mauvais état général de l'aquifère. Ce mauvais état est, toutefois, influencé par 13 prélèvements dépassant 75 mg/l. Nous retrouvons quelques secteurs qui sont depuis plus d'une vingtaine d'années largement en excédent de nitrates, comme le canton de Bourg de Péage (1)²⁸ ou le secteur de Châteauneuf-sur-Isère/Saint-Marcel les Valence (2) (CPGF, 1982; SRAE Rhône-alpes, 1983; SRAE Rhône-alpes, 1985; Bombart, 1990; Sardou *et al.*, 1992; Mazué, 1998).

Ces études ont montré le rôle de l'agriculture intensive sur le mauvais état général de cet aquifère mais aussi le rôle joué par les élevages "hors-sol" qui produisent des effluents très chargés en azote. Ainsi, les bilans d'azote de nombreux cantons de la plaine de Valence se retrouvent en excédent par rapport aux surfaces épandables.

3.3.2.1.2 Les sulfates

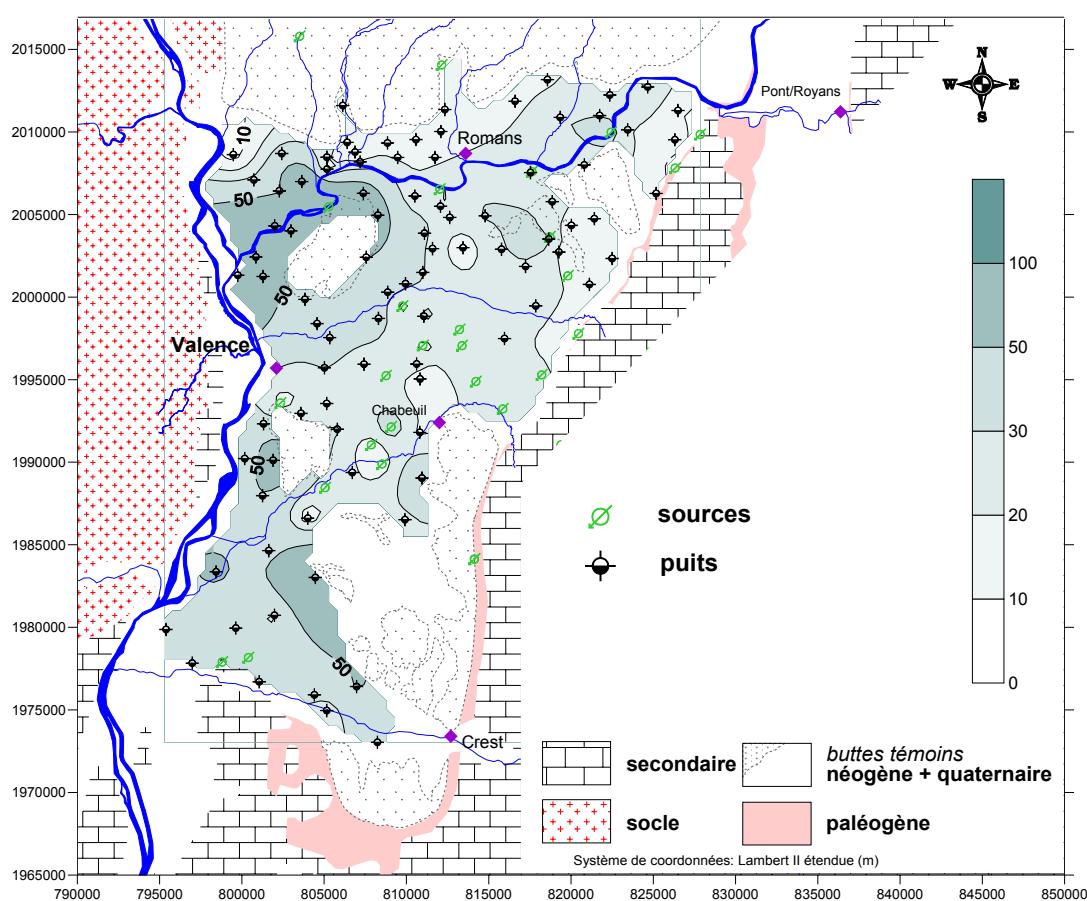


Figure 3-19: Carte des teneurs en sulfate des eaux de la nappe superficielle de la plaine de Valence (mg/l).

²⁸ Les chiffres ou lettres servent à localiser les zones ou communes sur les différentes cartes proposées.

Cette carte des teneurs en sulfate diffère de celle des teneurs en nitrates (figure 3-19). Les teneurs plus importantes vers l'ouest de la plaine de Valence montrent l'impact du type de culture sur les eaux souterraines (forte arboriculture le long de la vallée du Rhône).

3.3.2.1.3 Le magnésium

Nous avons vu précédemment que le magnésium peut être considéré comme un indicateur de l'évolution géochimique de l'eau dans l'aquifère. Sur la figure 3-20, nous présentons la distribution de cet élément au niveau de la plaine de Valence.

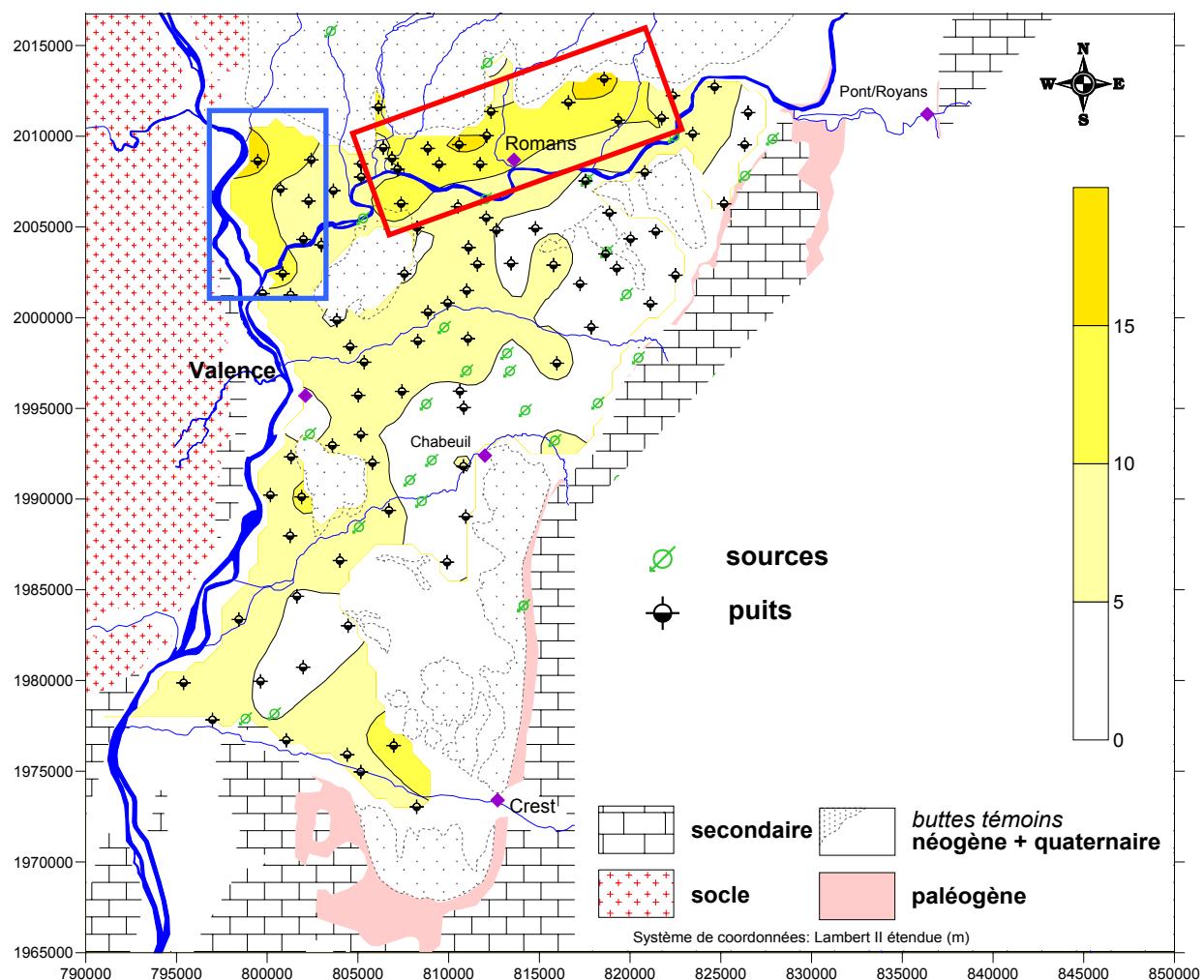


Figure 3-20: Carte des teneurs en magnésium des eaux de la nappe superficielle de la plaine de Valence (mg/l).

La distribution du magnésium dans la nappe superficielle est nettement marquée au niveau de la plaine de Valence *s. s.* et au niveau de la plaine de l'Isère:

- la plaine de Valence montre une différence dans les teneurs moyennes en magnésium entre l'Est et l'Ouest de la plaine mais ces teneurs ne dépassent qu'exceptionnellement 10 mg/l;
- la plaine de l'Isère montre des teneurs en magnésium singulièrement plus forte, supérieure à 10 mg/l.

En se référant à la carte piézométrique de l'ensemble aquifère néogène et quaternaire (cf. Figure 2-5), les teneurs dépassant 5 mg/l en magnésium se situent en aval hydraulique de cet ensemble aquifère.

Nous avons vu au chapitre 2 que la plaine de l'Isère est largement alimenté par l'aquifère molassique sous-jacent. Les travaux du cabinet Idées-Eaux sur la nappe de Romans ont montré une différence de charge importante entre la nappe superficielle et l'aquifère molassique. Cette alimentation se trouve donc confirmée par des teneurs en magnésium supérieures à 10 mg/l, qui montrent bien une alimentation par des eaux plus ou moins évoluées (rectangle rouge). Au niveau de la confluence Isère/Rhône à l'extrême ouest de la plaine de l'Isère (rectangle bleu), le substratum est composé d'argiles pliocènes imperméables (cf. coupe du forage de Tain l'Hermitage Figure 1-25). Les teneurs élevées en magnésium ne peuvent pas venir d'une alimentation par le Pliocène sous jacent. Par contre, il peut s'agir d'une alimentation d'eau évoluée par la molasse miocène située plus en amont hydraulique ou bien d'une alimentation par le toit de la nappe est aussi envisageable. En effet, un réseau d'irrigation alimente à partir du Rhône et de l'Isère ce secteur de viticulture et d'arboriculture. Les agriculteurs, du fait de la forte perméabilité des alluvions, appliquent des doses d'irrigations importantes (Flachaire, *com. pers.*). Les teneurs en sulfates (Figure 3-19) de la nappe montrent d'ailleurs bien un lessivage important des engrains.

L'alimentation de l'aquifère molassique vers la nappe quaternaire apparaît beaucoup plus discrète au niveau de la plaine de Valence *s. s.*. Ce constat pose le problème des exutoires de l'aquifère profond de la plaine de Valence.

3.3.2.2 La nappe profonde

3.3.2.2.1 Les nitrates

La distribution des teneurs en nitrates (figure 3-21) montre quelques secteurs contaminés, principalement au niveau de la plaine de Valence. Ainsi, les secteurs d'Alixan (3), d'Etoile sur Rhône (4), des buttes molassiques de Chabeuil à Crest (5), de Chateauneuf sur Isère (6), du plateau de Lautagne (7) sont fortement touchés. Au Nord de l'Isère, le secteur sud de la commune de Marsaz (8) est notamment touché. Par ailleurs on dénote quelques atteintes plus localisée où il est difficile de faire la part entre pollution ponctuelle et pollution diffuse. Les forages agricoles ou domestiques ne sont pas toujours réalisés dans les règles de l'art, et ils peuvent être eux-mêmes une source de contamination de la nappe profonde.

Au niveau de la plaine de Valence, il est intéressant de comparer les distributions des teneurs de la nappe superficielle (cf. Figure 3-18) à celles de la nappe profonde. Bien que les teneurs soient globalement plus faibles pour la nappe profonde, on retrouve quelques similitudes. Notamment, autour de la commune de Montvendre (A) où des teneurs importantes dans la molasse et des teneurs importantes un peu en aval hydraulique dans la nappe superficielle se distinguent. Sous le plateau de Lautagne (B), les teneurs sont fortes dans la molasse et aussi élevées dans les alluvions en aval hydraulique. En plus des pollutions localisées au droit de ces alluvions, on peut supposer un apport d'eaux polluées provenant des buttes molassiques.

L'alimentation de la nappe superficielle vers la nappe profonde est plus difficile à mettre en évidence du fait des différences de perméabilité. Les eaux circulent plus rapidement au sein des alluvions et il est normal qu'il y ait une relative indépendance entre nappe superficielle et nappe profonde. Ainsi, les teneurs actuelles en nitrates de la nappe profonde sont la résultante de l'infiltration de ceux-ci au cours des années précédentes. Par exemple, malgré les fortes teneurs de la nappe superficielle dans le secteur Chatuzange/Bourg de Péage (secteur n°1 figure 3-18), les teneurs relevées dans la nappe sous-jacente ne sont pas les plus élevées. Cela signifie qu'une partie des nitrates se sont infiltrées vers la nappe profonde, l'autre partie a été évacuée vers l'aval.

La figure 3-21 montre, aussi, des secteurs peu touchés par les nitrates. Il s'agit principalement au niveau de la Drôme des Collines, du secteur amont de la vallée de la Galaure (9) mais aussi d'un secteur central, allant de Peyrins (10) jusqu'à Tersanne (11) et de Saint Donat jusqu'à Marges (12) et enfin la vallée de la Joyeuse (13). Au niveau de la plaine de Valence, on observe une zone allongée Nord-Sud dénuée de nitrates (14), de Montoison à St Marcel les Valence ainsi qu'au Sud de la Drôme (15). Ce secteur est situé en aval piézométrique de la nappe profonde au niveau de la plaine. Cette zone est encore naturellement protégée soit par le fait d'un long cheminement de l'eau dans l'aquifère, *i.e.* eau ancienne non polluée, soit qu'il existe une dénitrification en milieu confiné.

3.3.2.2 Les sulfates

Les teneurs en sulfates sont assez variables mais la médiane (plutôt que la moyenne) proche de 10 mg/l représente plus fidèlement la teneur naturelle de l'aquifère profond en grande partie héritée des précipitations. La répartition spatiale des sulfates (figure 3-22) suit assez bien la répartition spatiale des nitrates (coefficient de corrélation de 0,51 cf. Tableau 3-8 et Figure 3-12). Cependant, les teneurs en sulfate vers l'ouest du bassin (8) sont relativement plus importantes à cause d'arboriculture comme cela a déjà été constaté sur les eaux de la nappe superficielle. Le secteur (14) de la carte des nitrates se distingue aussi (réduction des sulfates?). Les plus fortes teneurs se situent au sud de la Drôme (15), là où l'Oligocène avec des traces de gypse est à faible profondeur.

3.3.2.3 Les chlorures

Les teneurs en chlorures sont moins variables et l'on peut considérer que les teneurs naturelles des eaux de l'aquifère profond sont proches de la médiane (6 mg/l). Au-dessus de 20 mg/l, les eaux de l'aquifère subissent une perturbation d'origine anthropique comme le montre la bonne corrélation avec les nitrates (cf. Figure 3-13). Sur la carte des teneurs en chlorures, nous situons les forages pour lesquelles nous avons retrouvé des teneurs anormalement élevées (209 mg/l en 2003 et seulement 63 mg/l en 2005 au forage d'irrigation du SIVAG à Saint Martin d'Août). L'ouest du bassin de Valence apparaît un peu plus contaminé par les

chlorures. Ici aussi ces teneurs peuvent probablement être reliées à l'occupation du sol (coefficient de corrélation²⁹ de 0,62 avec les sulfates).

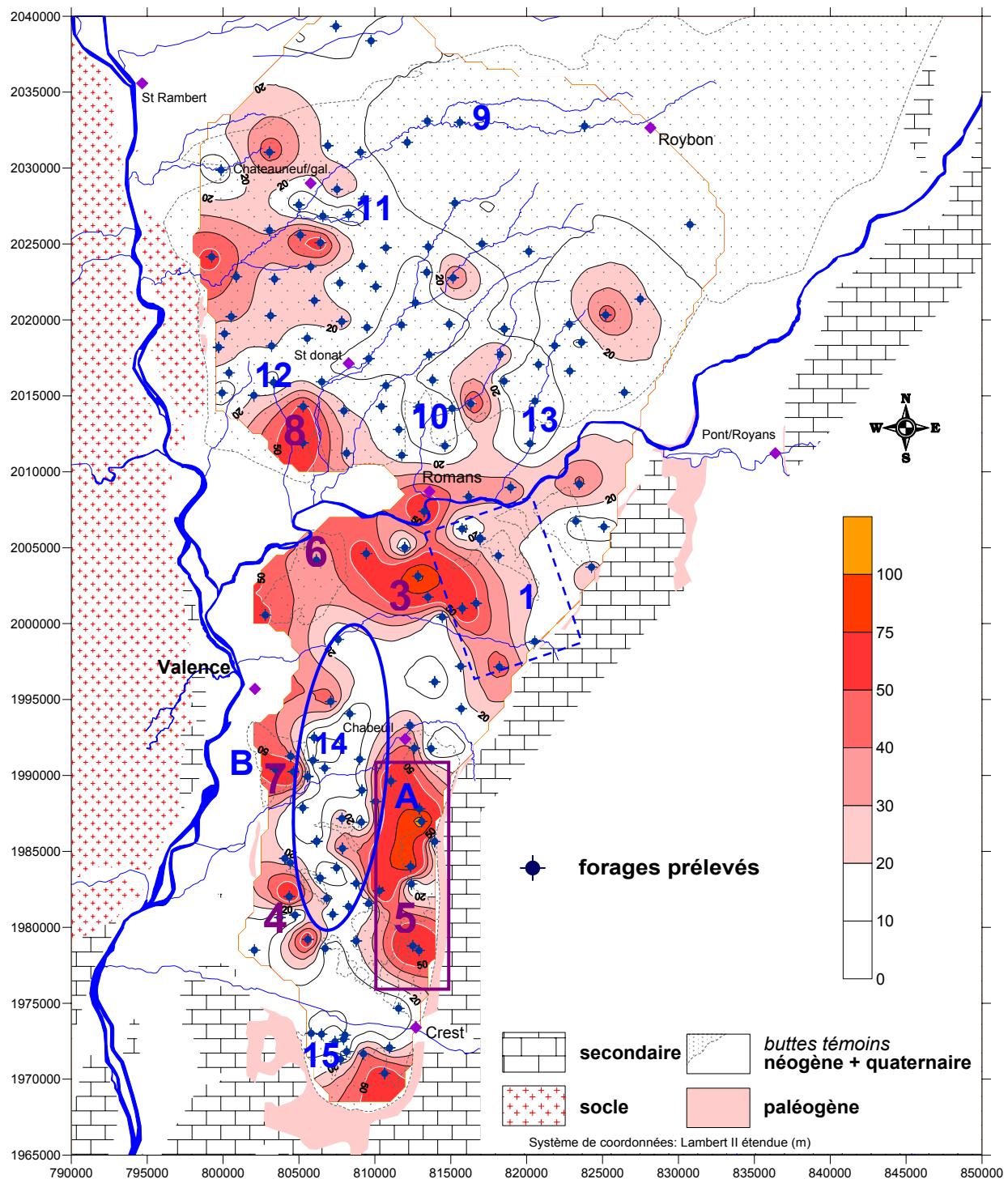


Figure 3-21: Carte des nitrates des eaux de la nappe profonde (mg/l).

²⁹ coefficient recalculé sans tenir compte des deux forages à fortes teneurs en chlorures.

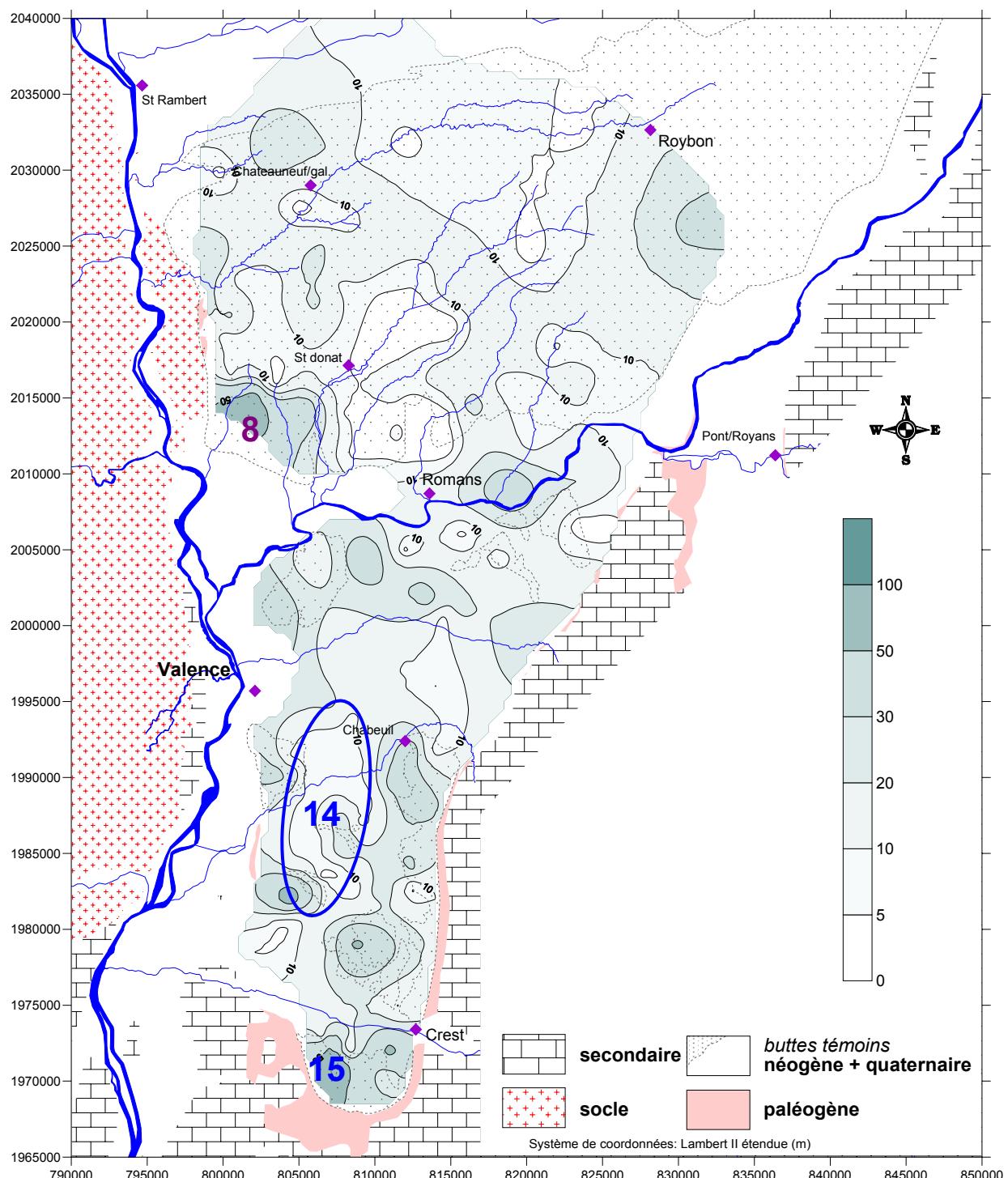


Figure 3-22: Carte des sulfates des eaux de la nappe profonde (mg/l).

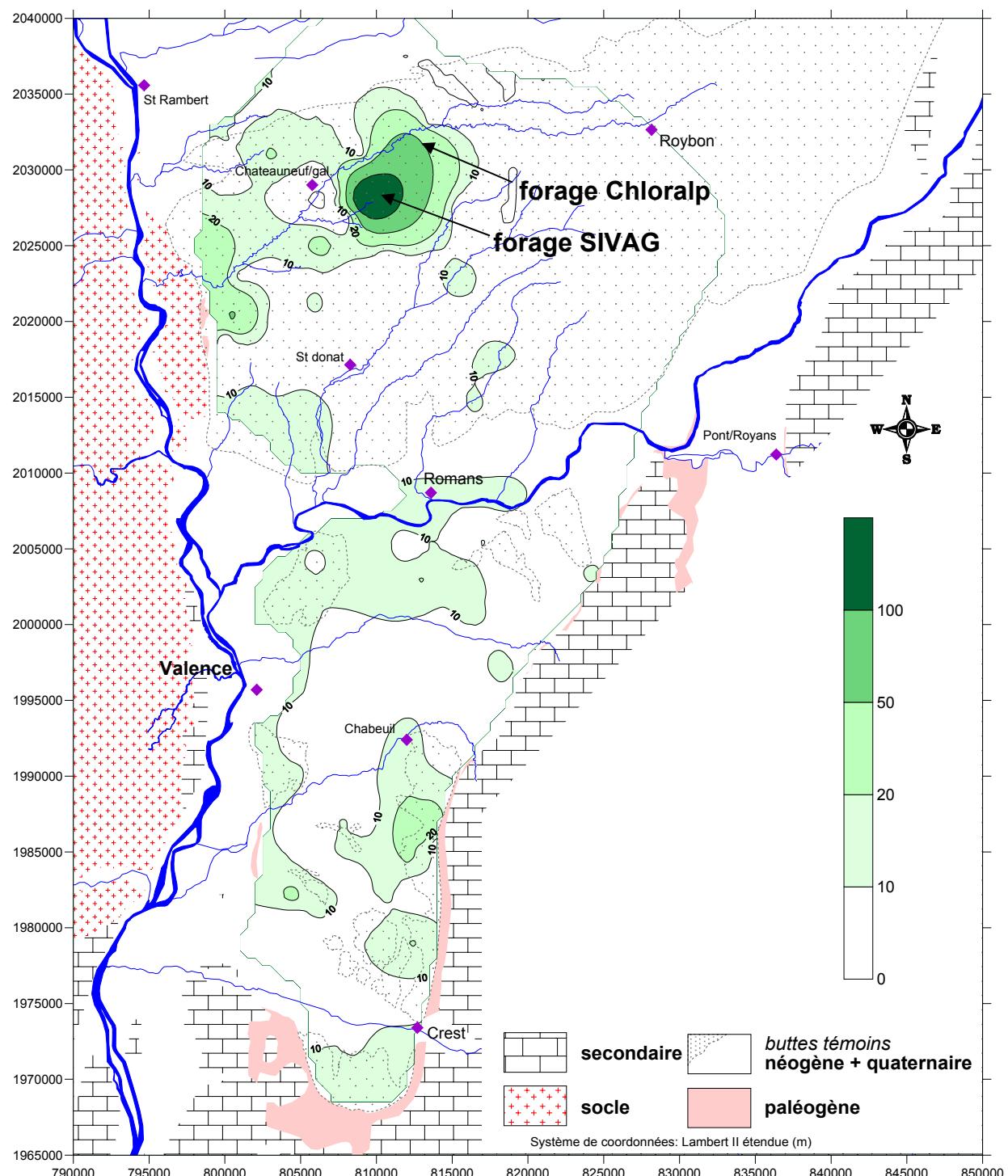


Figure 3-23: Carte des chlorures des eaux de la nappe profonde (mg/l).

3.3.2.2.4 Le magnésium

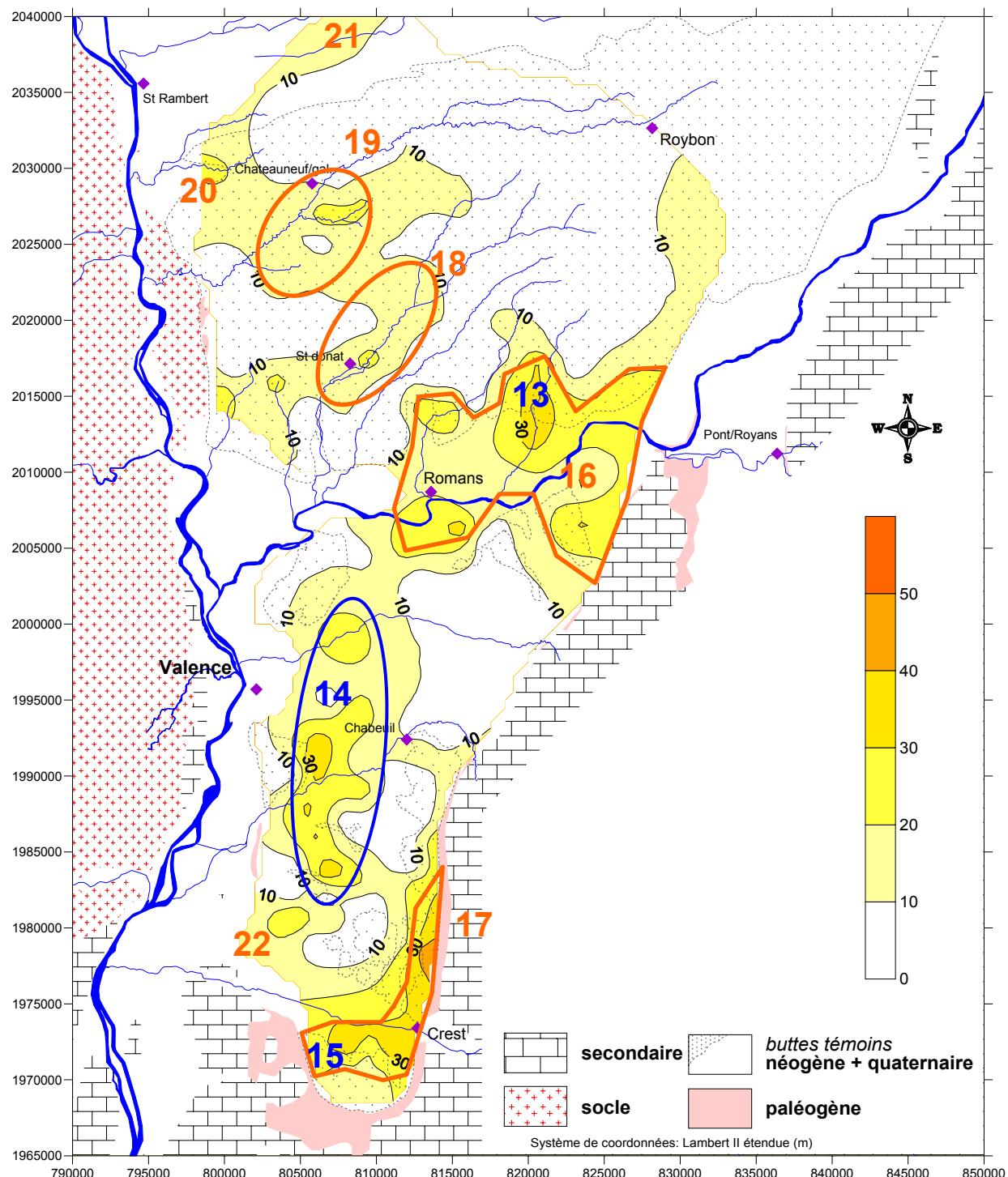


Figure 3-24: Carte des teneurs en magnésium des eaux de la nappe profonde.

Sur cette carte (figure 3-24) les zones les plus sombres correspondent aux zones où l'évolution de l'eau est la plus poussée. Nous retrouvons les secteurs (13, 14 et 15) mais d'autres secteurs

apparaissent comme l'Est de la plaine de l'Isère (16), le pourtour du bassin de Crest (17), la moyenne vallée de l'Herbasse (18) et de la Galaure (19), la vallée du Bancel (20). Le forage de Manthes, dans la vallée de la Valloire (21) et le secteur (22) à l'extrême Sud-Ouest du bassin montrent aussi une évolution géochimique de l'eau.

Nous pouvons remarquer que ces secteurs sont situés aussi bien en amont, qu'en aval piézométrique (bordure du Vercors). Nous avions montré qu'il y avait une évolution géochimique de l'eau en fonction de son chemin parcouru dans l'aquifère (cf. § 3.3.1). Il apparaît ici une apparente contradiction car il existe bien des eaux "évoluées" en amont piézométrique. En bordure du Vercors dans la partie sud, la molasse très cimentée (forages très peu productif dans ce secteur) favoriserait les interactions eau-encaissant (carbonates). De plus, il est probable que les teneurs en calcite magnésienne et dolomite soient légèrement plus importantes à proximité des marno-calcaires Oligocène et du front alpin, origines des matériaux molassiques. Au Nord, entre St Lattier et Rochefort-Samson, les échanges de bases et la chimie des carbonates pourraient expliquer la teneur plus importante en magnésium (présence des marnes de St Lattier). La présence d'argile dans la matrice aquifère semble jouer un rôle important au Sud de la Drôme. Dans ce secteur, la molasse miocène est moins épaisse (proximité des marno-calcaires de l'Oligocène avec des traces de gypse), plus argileuse (faciès des marnes de la Grenette) et ce sont alors probablement les échanges de bases qui sont le phénomène d'interaction prépondérant.

Les autres secteurs suivraient une évolution plus "classique" des interactions, *i.e.* en fonction de la longueur/durée du cheminement de l'eau dans l'aquifère.

Les secteurs 14 et 16 ont des teneurs moyennes en magnésium supérieures à 20 mg/l. Nous avons montré que les teneurs en magnésium de la nappe superficielle au niveau de la nappe de Romans (rectangle rouge Figure 3-20) sont plus importantes qu'ailleurs et qu'au contraire, au droit du secteur 14, la nappe superficielle ne montre pas de teneur importante en magnésium.

3.3.2.2.5 Paramètre D = Ca+Mg-HCO₃

Nous reprenons le paramètre D établi au paragraphe 3.2.5 qui permet de distinguer la chimie des carbonates des échanges de bases. La figure 3-25 représente la distribution spatiale de ce paramètre D.

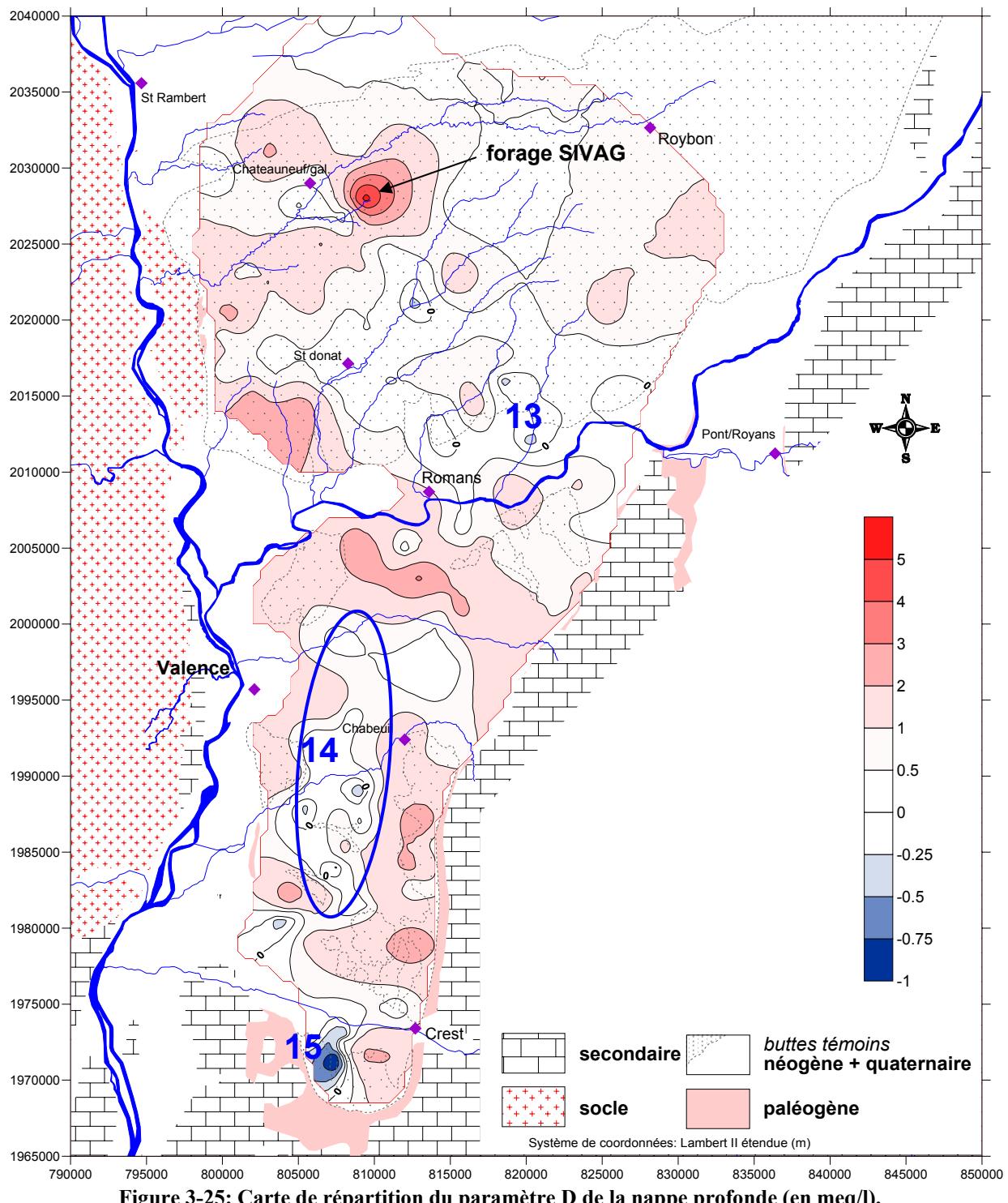


Figure 3-25: Carte de répartition du paramètre D de la nappe profonde (en meq/l).

Cette carte montre que les secteurs où les échanges de bases sont mis en évidence ($D < 0$) sont assez restreints. En effet, seul le secteur (15) montre nettement des échanges de bases tandis que les secteurs (13) et (14) y sont relativement moins soumis (cf. lignes L1 et L3 § Figure 3-17). Les secteurs où D est proche de 0, *i.e.* là où la chimie des carbonates domine, se situent sur une large partie de la Drôme des Collines et sur une transversale Nord-Sud au niveau de la plaine de Valence (secteur n°14). Les secteurs où D est positif dominent sur le reste du bassin. La chimie de l'eau (les équilibres calco-carboniques) est fortement influencée par les pollutions anthropiques. Le coefficient de corrélation entre D et les nitrates (0,84) est très significatif.

3.3.2.2.6 Na+K

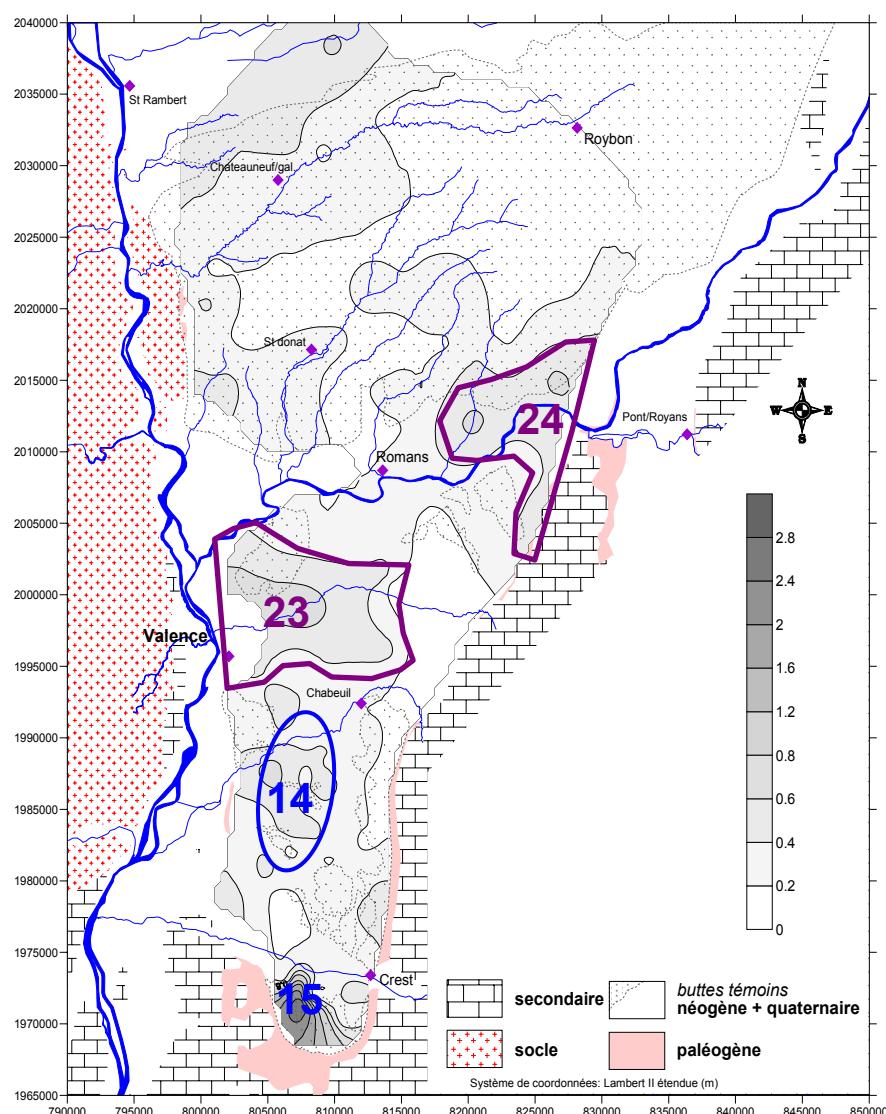


Figure 3-26: Carte des teneurs en sodium et potassium des eaux de la nappe profonde (meq/l).

Nous avons représenté sur la figure 3-26 la somme des teneurs en sodium et potassium puisque ces deux éléments ont une évolution très similaire dans les eaux souterraines (coefficient de corrélation de 0,56 cf. Tableau 3-8).

Seul le secteur (15) au Sud de la Drôme montre des teneurs élevées en sodium et potassium. La partie ouest de la plaine de Valence et de la vallée de l'Isère (23), la partie orientale de la vallée de l'Isère (24) se démarquent aussi par des teneurs un peu plus élevées. Les teneurs plus élevées des secteurs (14), (15), (24) peuvent être attribuées aux échanges de bases puisque ces secteurs se retrouvent sur les cartes du magnésium et du paramètre D. Le secteur (23) semble correspondre plutôt à des pollutions diffuses (arboriculture).

3.4 CONCLUSIONS

La géochimie des eaux a mis en évidence la sensibilité des eaux du réservoir profond aux pressions de surface, la carte des teneurs en nitrate en étant le signe le plus révélateur (Figure 3-21). Les teneurs particulièrement élevées, au niveau des buttes molassiques de la plaine de Valence, montrent que ces affleurements sont particulièrement vulnérables à l'infiltration des pollutions. Cette infiltration est d'autant plus efficace que les prélèvements favorisent la drainance descendante de ces éléments. A cela s'ajoute le problème des forages mal exécutés (pas de cimentation) ou en mauvais état qui sont des points de contamination de l'aquifère.

Nous avons mis en évidence que les interactions eaux-roche sont responsables de l'évolution du faciès chimique des eaux. Le principal phénomène intervenant dans l'aquifère profond est la dissolution des carbonates, en particulier magnésien (dolomite) associée à une précipitation de calcite, plus ou moins importante. Au niveau de l'aquifère profond, l'hydrolyse des silicates se déroule de manière parallèle au phénomène précédent mais celle-ci se limite rapidement en fonction de la baisse de la pression partielle de CO₂. Enfin, les échanges de bases (avec substitution des ions alcalino-terreux au profit des ions alcalins), phénomène plus discret que les deux premiers, interviennent. Ces échanges sont particulièrement nets au niveau des argiles pliocènes (forage de St Rambert d'Albon) et au niveau des marnes de la Grenette au Sud de la Drôme. Les indicateurs de temps de séjour les plus intéressants à utiliser dans le contexte géologique du bassin de Valence sont donc le magnésium, la silice et le sodium.

Le suivi de l'évolution géochimique de l'eau suivant des lignes d'écoulements s'avère difficile. Nous constatons une forte hétérogénéité chimique qui est due à des venues d'eaux superficielles et peut être aussi profondes. La complexité des écoulements (dômes piézométriques) et de l'échantillonnage (profondeur des forages, position des niveaux crépinés) rend cette approche peu pertinente.

L'étude des distributions spatiales des éléments dissous montre que des secteurs se démarquent systématiquement (secteurs 13, 14 et 15) et la carte des teneurs en magnésium de la nappe profonde permet de situer au mieux le degré d'évolution géochimique. En dehors des secteurs situés en amont piézométrique, le degré d'évolution géochimique devrait être proportionnel au temps de séjour de l'eau dans l'aquifère. Dans ce cas, les plus fortes teneurs en magnésium devraient correspondre à des eaux à "long temps" de séjour dans l'aquifère profond. De plus, la comparaison de la distribution du magnésium entre les nappes superficielle et profonde montre que la nappe de Romans est largement alimentée par des eaux à "long temps" de séjour de l'aquifère molassique sous jacent. Compte tenu de la piézométrie, cette alimentation ne peut venir que de l'aquifère molassique de la Drôme des Collines. Au contraire, la nappe superficielle de la plaine de Valence ne montrerait qu'une alimentation limitée ou diffuse par l'aquifère molassique. La nappe profonde montre pourtant des eaux à "long temps" de séjour à l'aval de la plaine de Valence (sillon Nord-Sud Montoison-St Marcel les Valence, secteur n°14) et à l'extrême Sud-Ouest de la plaine (secteur n°22). Le manque d'informations au niveau de la vallée de la Valloire, au Nord du bassin, ne permet pas de montrer l'alimentation de la nappe quaternaire par des eaux à "long temps" de séjour.

Chapitre 4 Les isotopes de la molécule d'eau

Les isotopes de la molécule d'eau (oxygène 18, deutérium et tritium) sont utilisés couramment en hydrologie et en hydrogéologie. Ils sont par définition des traceurs intrinsèques de l'écoulement de l'eau souterraine et, contrairement à d'autres isotopes, ils sont peu soumis aux échanges isotopiques avec l'encaissant. Nous présenterons dans un premier temps le tritium, isotope radioactif de l'hydrogène. Il permet de repérer la présence d'eau récente dans les échantillons. Suite aux quantités importantes de tritium libérées dans l'atmosphère par les essais nucléaires aériens à partir des années 1950, il était particulièrement intéressant à suivre dans les eaux souterraines pour déterminer des temps de transit de l'eau dans les aquifères. Dans un second temps, nous utiliserons les isotopes stables de la molécule d'eau (oxygène et deutérium) pour déterminer l'origine des eaux ou leurs conditions d'infiltration du fait de leurs relations de thermodépendance.

4.1 LE TRITIUM

4.1.1 Principe

Le tritium (^3H ou T), isotope radioactif de l'hydrogène, a une période ou demi-vie de $12,32 \pm 0,02$ ans (Lucas *et al.*, 2000). Sa teneur s'exprime en Unité Tritium (UT) ou en Tritium Ratio (TR). Une unité tritium correspond à 1 atome de ^3H pour 10^{18} atomes d'hydrogène. Le tritium est produit naturellement par la composante neutronique du rayonnement cosmique sur l'azote atmosphérique. La teneur dans les précipitations, sous les latitudes moyennes de l'hémisphère Nord est de l'ordre de 5 UT (Clark *et al.*, 1997). Suite aux essais thermonucléaires aériens, qui ont débuté le 31 octobre 1952 et qui se sont poursuivis jusqu'en 1963, les teneurs des précipitations ont atteint quelques milliers d'UT (pic de 1963) (figure 4-1). Depuis 1980, aucun essai nucléaire aérien n'a eu lieu mais la teneur en UT se maintient depuis cette époque entre 30 et 5 UT (influence des centrales nucléaires civiles). La teneur actuelle des eaux de surface est plutôt comprise entre 5 et 10 UT pour la France continentale (Blavoux, *com. pers.*).

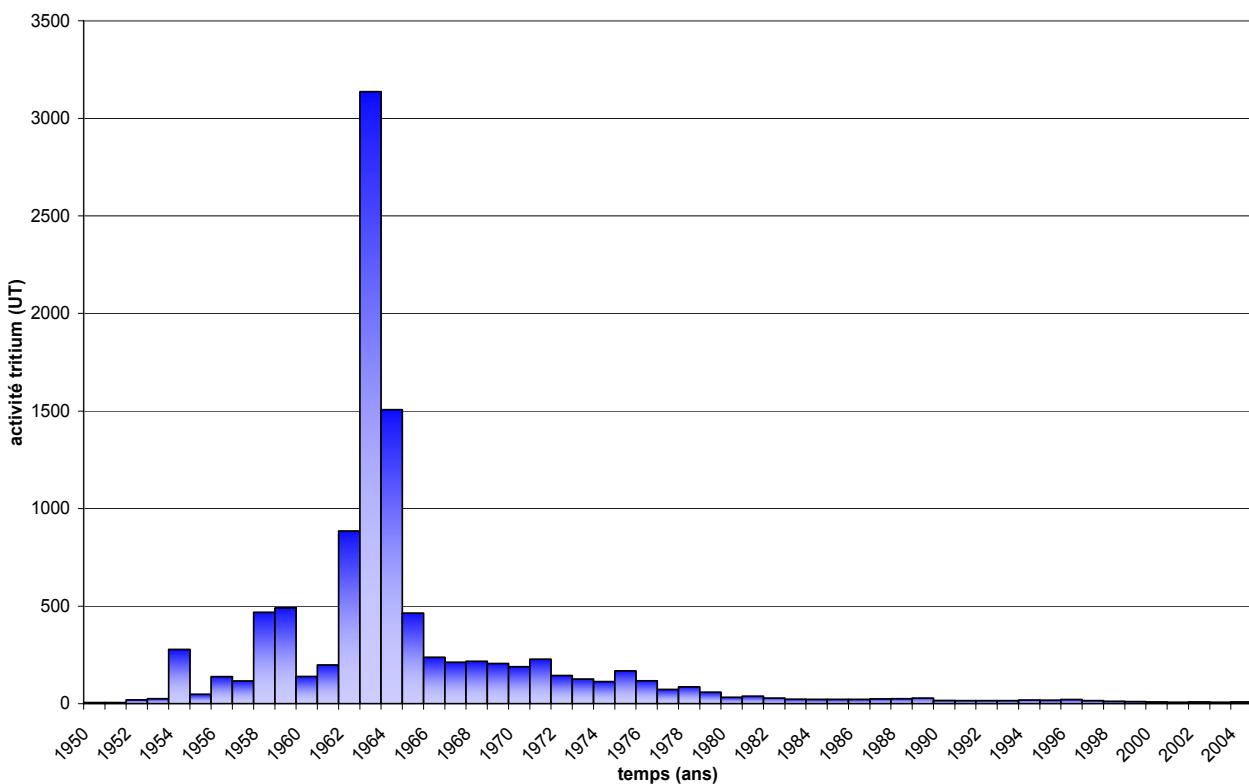


Figure 4-1: Teneurs moyennes annuelles pondérées en tritium (UT) des précipitations à Thonon (données extrapolées avant 1963 à partir de la station d'Ottawa).

Le tritium est mesuré par comptage par scintillation liquide après enrichissement par électrolyse. Cette mesure dépend du bruit de fond du à la radioactivité naturelle présente lors du comptage. C'est pourquoi, les résultats exprimés dépendent du seuil de mesure qui est lui-même variable. Tous nos échantillons ont été envoyés au Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon pour analyse. Le seuil analytique du laboratoire varie de 0 à 2,7 UT. En dessous du seuil, il n'est donc pas possible de repérer la présence de tritium.

De manière générale, Clark et Fritz (1997) ont défini à partir des teneurs en tritium des eaux souterraines de l'hémisphère nord des familles d'eaux:

- inférieures à 0,8 UT: il s'agit d'une eau qui s'est infiltrée avant les premiers essais atmosphériques.
- 0,8 à 4 UT environ: il peut s'agir d'un mélange entre une eau "anté-nucléaire" et une eau actuelle.
- 5 à 15 UT: il s'agit d'une eau récente, de temps de séjour de l'ordre de 5 à 10 ans.
- 15 à 30 UT: il s'agit d'une eau qui possède une part importante d'eau infiltrée dans les années 1960.

- Au-delà, l'aquifère est affecté par une pollution anthropique (industries nucléaires, industries utilisant des produits thermoluminescents et décharges).

Ce classement général n'est pas directement applicable en l'état puisque plus d'une demi-vie sépare nos mesures de ce classement et que la technique analytique et donc le seuil analytique qui en résulte n'est pas le même.

4.1.2 Données tritium

Avant de débuter cette étude, 22 résultats de teneurs en tritium étaient disponibles sur les eaux de la molasse miocène de notre secteur à la suite d'une étude du bureau CPGF de 1979 à 1982 et de quelques analyses ponctuelles postérieures sur des forages AEP. Pour notre étude, nous avons analysé 81 échantillons d'eaux et disposons ainsi de 103 résultats (tableau 4-1). Tous les résultats sont situés en annexe VI.

	notre étude	étude CPGF	autres
eaux profondes	74	13	4
eaux de puits	3	1	-
eaux de sources	3	4	-
eaux superficielles	1	-	-
Totaux	81	18	4

Tableau 4-1: Tableau récapitulatif des analyses tritium effectuées.

4.1.2.1 Teneurs des eaux souterraines et superficielles

L'activité moyenne des eaux des sources et des puits est de 7,8 UT, et celle du canal de la Bourne est de 7 UT. Par comparaison avec la chronique des teneurs en tritium des précipitations à la station de Thonon (figure 4-1), la teneur de 8 UT peut se définir comme actuelle. En revanche, pour les eaux profondes, les teneurs sont très variables. En ne tenant compte que des échantillons prélevés entre 2000 et 2005 (soit 77 échantillons), les activités vont de 1 à 16 UT. Les données retenues restent comparables entre elles car la durée maximale entre les prélèvements est inférieure à la moitié de la demi-vie du tritium.

Compte tenu du seuil variable de nos mesures (entre 0 et 2,7 UT), nous devons adapter l'échelle de répartition définie par Clark et Fritz (1997) à nos données. Sous le bruit de fond, il n'y a pas de tritium détectable mais cela dépend de la valeur de ce bruit de fond. Ces eaux se sont donc infiltrées avant les premiers essais thermonucléaires aériens (Blavoux *et al.*, 1995). Au-dessus de ce bruit de fond et jusqu'à 12 UT, des mélanges d'eaux à différents temps de séjours sont envisageables entre:

- des eaux anciennes dénuées de tritium et des eaux actuelles;
- des eaux anciennes et des eaux subactuelles (reliquat du pic de 1963);
- des eaux actuelles et des eaux subactuelles.

Au dessus de 12 UT, ces eaux témoignent d'une participation d'eau infiltrée durant les années 1960-1970. Ces eaux ont donc un âge moyen de quelques dizaines d'années dans l'aquifère.

Sur la figure 4-2, nous avons reporté l'histogramme des fréquences des eaux de l'aquifère molassique regroupées par classes de 3 UT, sauf pour les échantillons dont les activités sont inférieures au seuil de comptage.

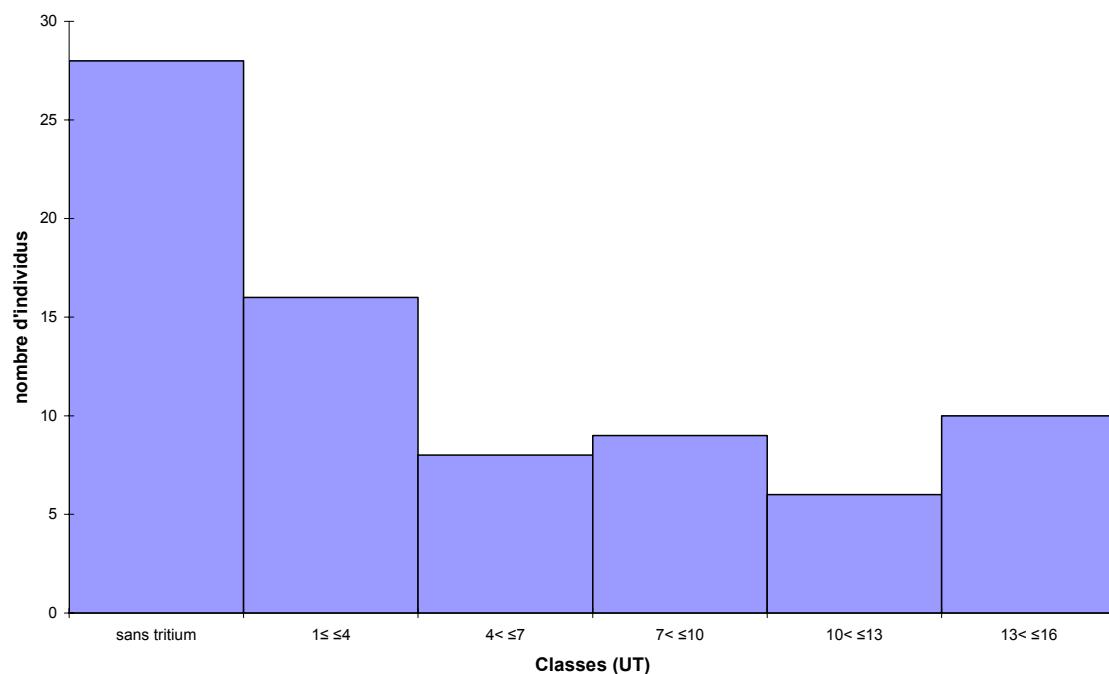


Figure 4-2: Histogramme des fréquences des teneurs en tritium de l'aquifère molassique (données 2000-2005).

Cette distribution montre que 63 % des échantillons de l'aquifère ont des teneurs supérieures au bruit de fond, *i.e.* que ce sont des eaux principalement influencées par des mélanges d'eaux d'âges différents. Les 37 % restants montrent que ce sont des eaux anciennes sans mélange ou avec un mélange limité avec des eaux récentes.

4.1.2.2 Corrélations tritium et éléments dissous

Pour chaque teneur en tritium, nous disposons des teneurs en éléments dissous correspondantes. Le tableau 4-2 retranscrit la matrice de corrélation limitée au tritium.

coefficient corrélation	HCO ₃	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	NO ₃	Log pCO ₂
tritium	-0,2	0,5	-0,6	-0,3	-0,1	0,2	0,3	0,4	0,2

Tableau 4-2: Corrélations entre activité tritium et la chimie de la nappe profonde.

Ce tableau montre une anti-corrélation significative entre tritium et magnésium et une corrélation moins évidente pour le calcium et les nitrates. Nous avons vu au chapitre précédent que le calcium et les nitrates caractérisent des eaux jeunes, quant au magnésium nous avons montré qu'il était un indicateur d'évolution géochimique de l'eau dans l'aquifère.

Sur la figure 4-3 nous avons reporté la répartition des teneurs en magnésium en fonction de l'activité tritium des eaux de l'aquifère néogène. Ce diagramme ne montre pas de relation linéaire entre activité tritium et teneur en magnésium. En dehors de 3 points particuliers (rectangle), nous remarquons que les teneurs en magnésium ne dépassent pas 10 mg/l pour des activités tritium supérieures à 5 UT. Pour des activités tritium inférieures à 5 UT, une nette augmentation des teneurs en magnésium s'observe jusqu'à atteindre 47 mg/l (flèche). L'augmentation des teneurs en magnésium associée à la baisse des activités tritium montrerait alors la relation entre augmentation du temps de séjour de l'eau dans l'aquifère et évolution géochimique de l'eau.

Parmi les trois points qui se démarquent sur le diagramme précédent (rectangle), deux de ces points sont situés en bordure des préalpes, ainsi que le forage Vaunaveys. Nous avons vu au chapitre précédent que les eaux de la molasse en bordure du Vercors sont plus riches en

magnésium du fait d'une molasse très cimentée, probablement plus riche en dolomite et en calcite magnésienne. L'autre point correspond au forage SIVAG à St Martin d'Août pour lequel des échanges de bases (fixation des alcalins et libération des alcalino-terreux en présence de saumures) sont probables. En dehors du secteur situé en bordure du Vercors, la relation âge et évolution géochimique de l'eau dans l'aquifère reste valable.

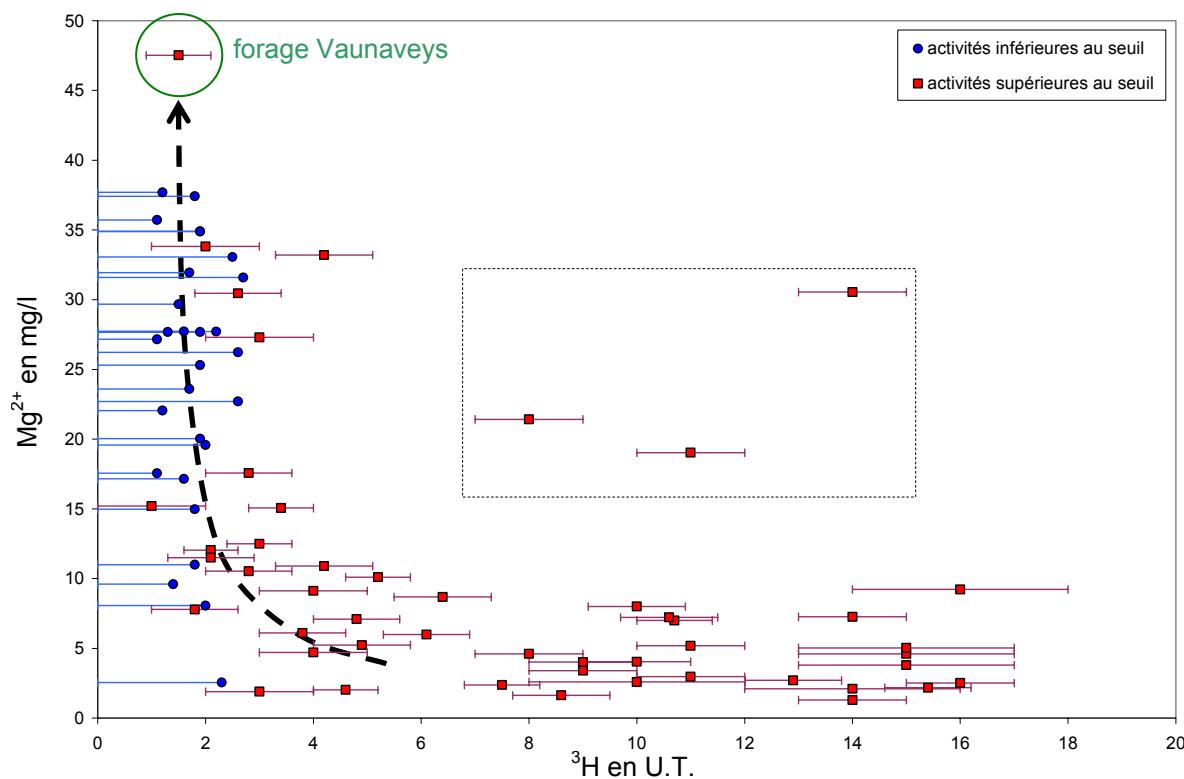


Figure 4-3: Activités tritium vs teneurs en magnésium de la nappe profonde.

La figure 4-4 représente les teneurs en nitrate en fonction de l'activité tritium. La répartition des teneurs isotopiques est globalement conforme. Des fortes teneurs en nitrates correspondent à des activités tritium variant de 4 à 16 UT. Il est bien évident que, selon les pressions agricoles, de fortes activités tritium ne correspondent pas toujours à des teneurs en nitrate importantes car les teneurs naturelles des nappes libres sont inférieures à 10 mg/ l environ. Les plus faibles activités tritium correspondent aux faibles teneurs en nitrate. Le seul problème se situe pour les échantillons avec peu ou pas de tritium (inférieures à 3 UT) mais avec des concentrations en nitrate élevées (rectangle), dont le forage de Vaunaveys. Ceci pourrait s'expliquer par la participation d'eau actuelle, très chargée en nitrate mais peu chargée en tritium.

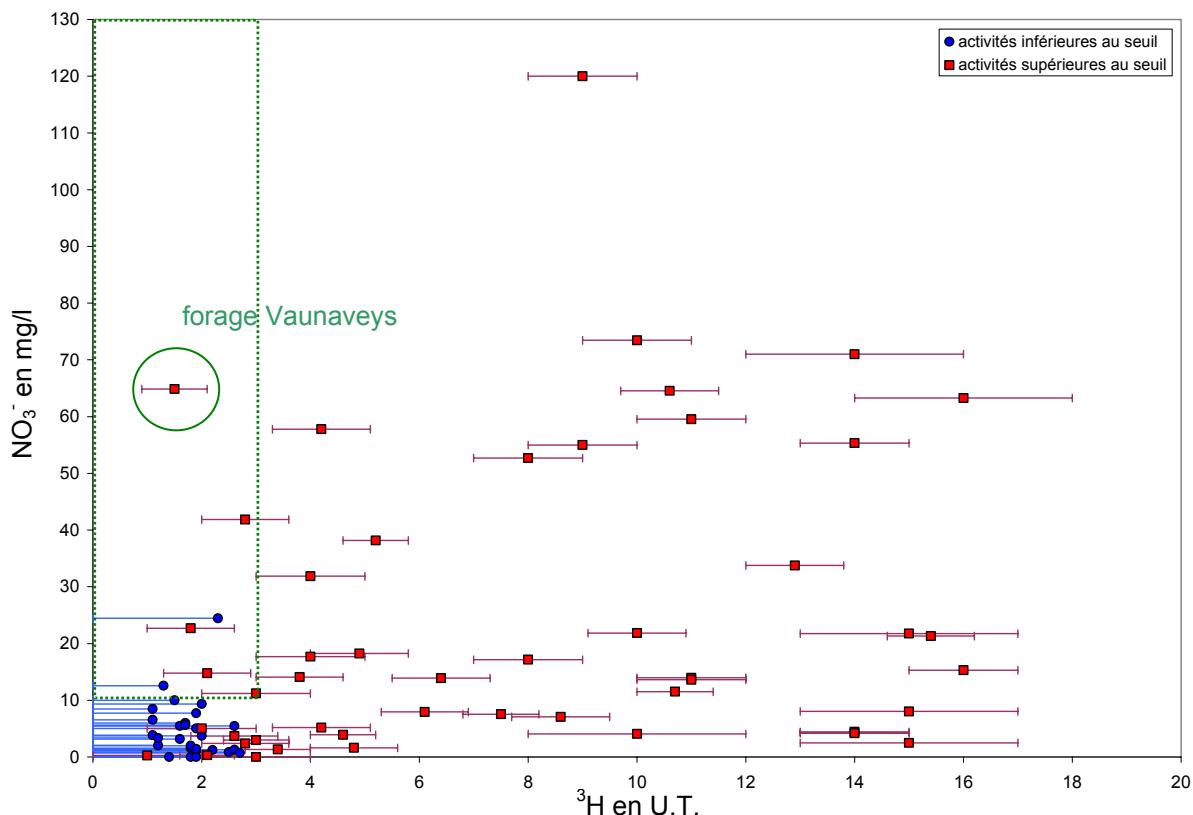


Figure 4-4: Activités tritium vs teneurs en nitrate de la nappe profonde.

Nous constatons que les teneurs en nitrate plutôt que les teneurs en magnésium mettent le mieux en évidence des mélanges d'eaux. C'est pourquoi, nous pouvons séparer nos échantillons tritium en deux familles d'eaux. La première comprend les eaux avec des activités tritium faibles (inférieures ou égales à 3 UT) mais dont les teneurs en nitrate ne dépassent pas 10 mg/l (famille A) et la seconde (famille B) comprend tous les autres échantillons avec une participation plus ou moins importante d'eau actuelle.

4.1.3 Répartition spatiale des activités tritium de l'aquifère néogène

4.1.3.1 Distribution des activités tritium dans le bassin de Valence

A partir de l'histogramme de la figure 4-2, nous avons figuré la répartition spatiale des teneurs en tritium de l'aquifère néogène (figure 4-5). Les secteurs pour lesquels les teneurs en tritium sont inférieures à 3-4 UT correspondent assez bien aux secteurs avec de fortes teneurs en

magnésium (cf. Figure 3-24) notamment les secteurs 13, 14, 15, 16, 18, 20 et 22. Ces secteurs correspondent aussi aux secteurs avec des teneurs en nitrate plutôt faibles.

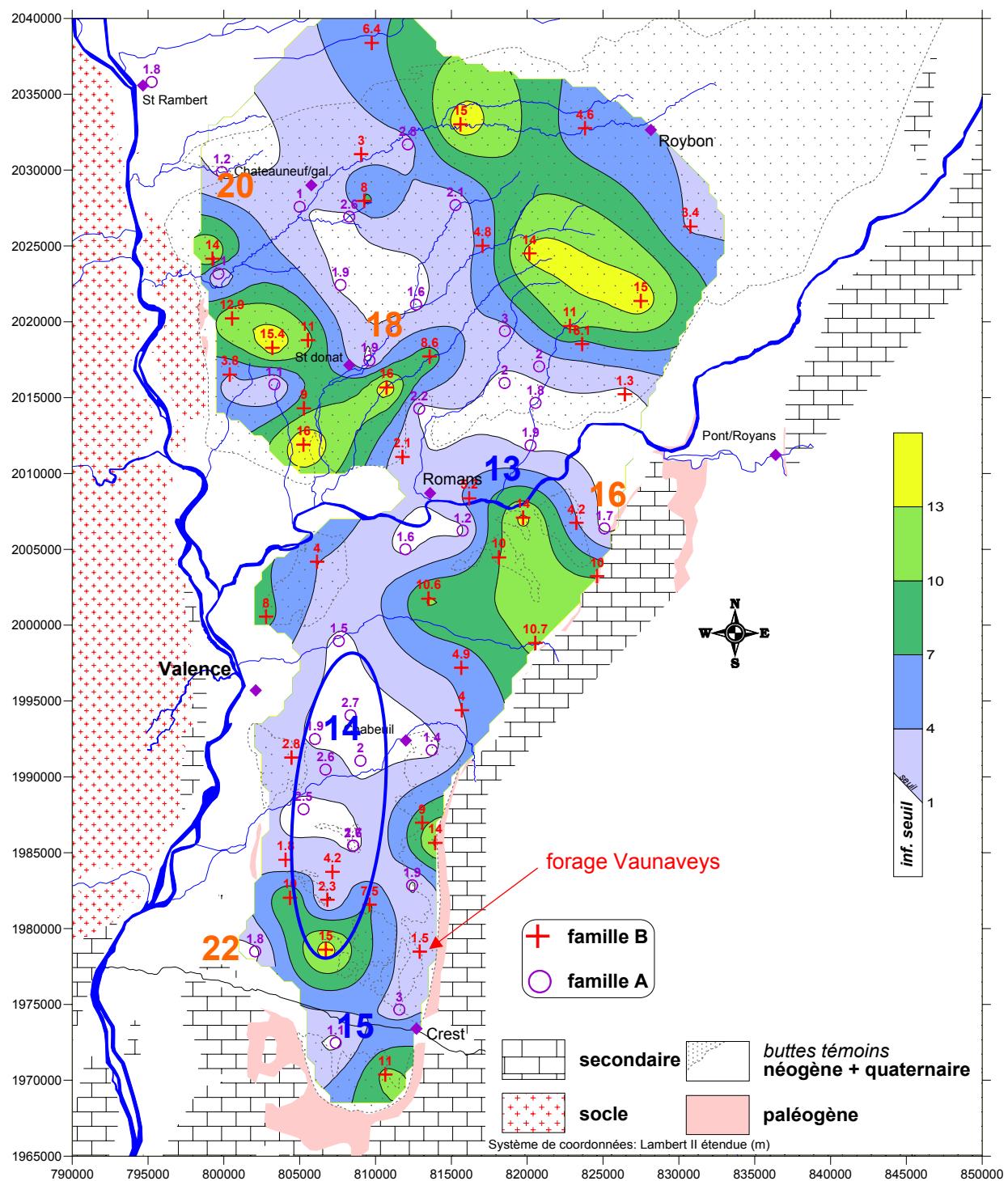


Figure 4-5: Carte de répartition des teneurs en tritium de l'aquifère néogène (données 2000-2005) exprimée en UT.

L'eau de ces secteurs peut être qualifiée d'ancienne, infiltrée avant les premiers essais thermonucléaires aériens (famille A). Les autres secteurs correspondent donc à des mélanges d'eaux entre des eaux actuelles, subactuelles et anciennes (famille B). Ces secteurs sont aussi bien répartis en amont qu'en aval de l'aquifère néogène. Cette carte corrobore tout à fait les données piézométriques qui montraient que les collines molassiques et les buttes témoins sont autant de zones d'infiltration vers l'aquifère.

4.1.3.2 Distribution des activités tritium en profondeur

Grâce aux coupes techniques des forages, nous avons reporté sur la figure 4-6 la distribution des activités tritium en fonction de la profondeur des forages échantillonnés. Il n'y a pas de corrélation entre les activités tritium et la profondeur des ouvrages. Nous observons tout de même une baisse des activités tritium pour les forages les plus profonds. Cependant, le forage "Pinet" du SIE Rochefort-Samson avec une activité tritium de 10 UT pour une profondeur de 275 m montre que ce n'est pas uniquement la profondeur des forages qui permet d'expliquer la répartition des activités tritium au sein de l'aquifère.

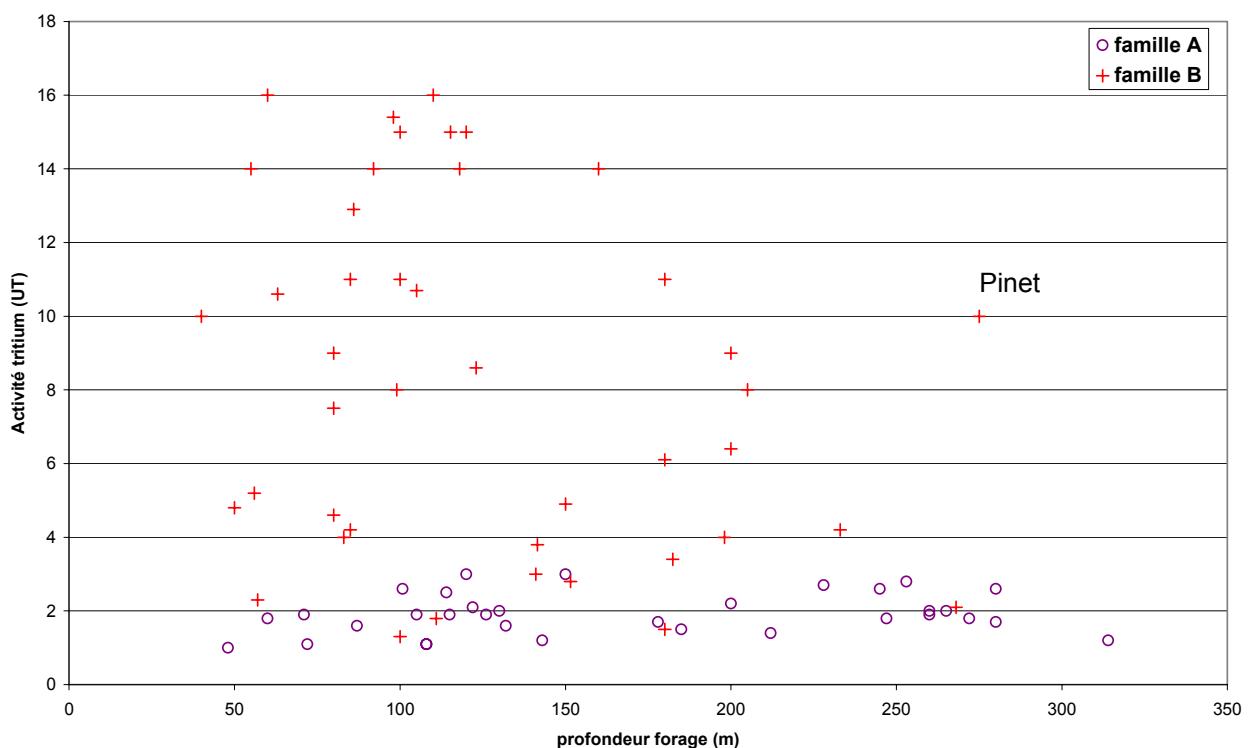


Figure 4-6: Activité tritium en fonction de la profondeur des ouvrages.

Puisque la recharge de l'aquifère provient uniquement de la surface, c'est donc surtout l'épaisseur mouillée au dessus des premiers niveaux crépinés (figure 4-7)³⁰ qui va contrôler les activités tritium dans l'aquifère.

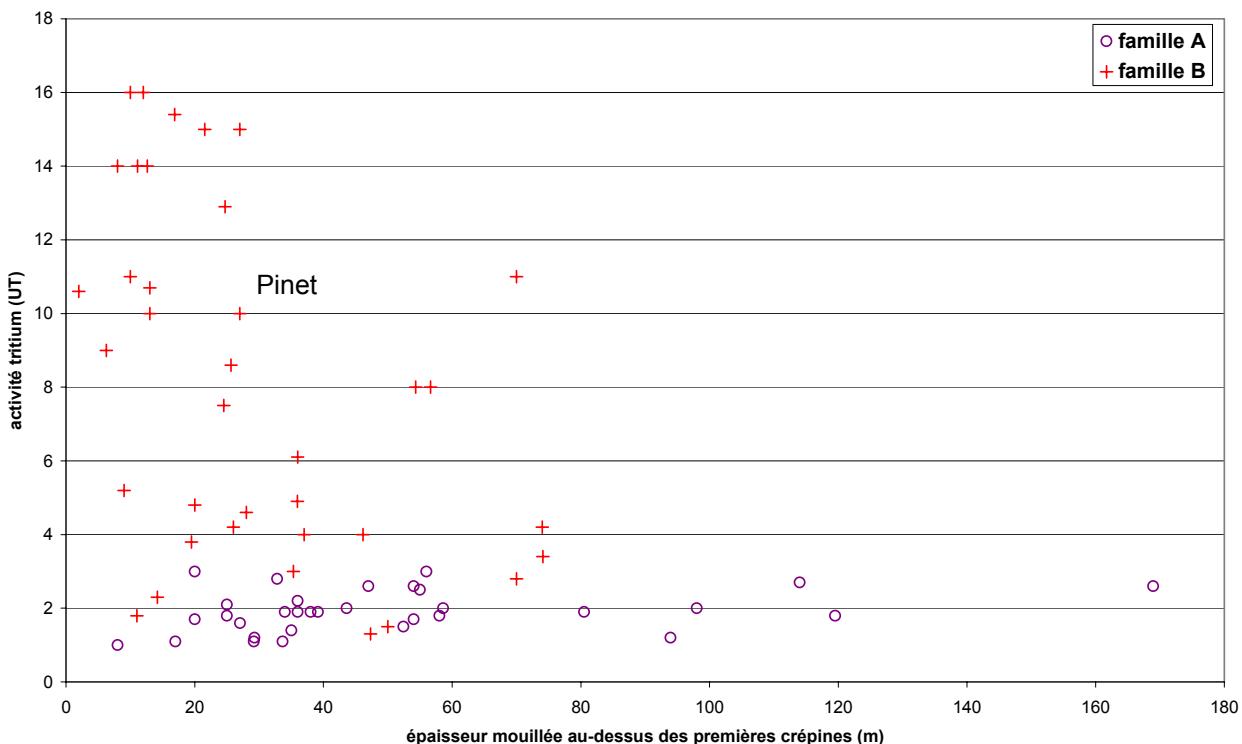


Figure 4-7: Activité tritium vs épaisseur mouillée par rapport aux premières crêpines.

La distribution des points montre que les plus fortes activités tritium se situent dans les quarante premiers mètres de l'aquifère. Ainsi pour le groupe de points de la famille B ce sont des processus locaux d'alimentation de l'aquifère par la pluie efficace qui dominent. Par exemple, le forage Pinet montre que la hauteur d'eau au dessus des premières crêpines permet le mieux d'expliquer l'activité de 10 UT, par rapport à la profondeur du forage.

Pour l'autre groupe (famille A), l'indépendance entre activités tritium, profondeur du forage et épaisseur mouillée montre au contraire que ces eaux ont suivi un cheminement beaucoup plus long dans l'aquifère.

³⁰ Toutes les coupes techniques des forages ne sont pas connues. Pour une partie des forages, nous avons choisi une profondeur probable des premiers niveaux crépinés en fonction de la géologie, du niveau statique et des habitudes des foreurs.

4.1.4 Evolution dans le temps sur quelques forages

Cinq forages que nous avons échantillonnés avaient déjà été analysés, les résultats sont résumés dans le tableau suivant.

nom forage	Teneur en UT ancienne	Teneur en UT actuelle	durée (dt) entre échantillonnages en années
le grand serre (n°126)	39±1	15±2	23 (1980-2003)
St Antoine (n°248)	17±2	15±2	23,8 (1979-2003)
Les Cordeliers (n°1002)	78±2	16±1	23,8 (1979-2003)
petits eynards (n°226)	≤0,8	≤1,5	10 (1995-2005)
Ladevaux F2 (n°234)	≤1,7	≤2,6	4,9 (2000-2005)

Figure 4-8: Comparaison des activités tritium pour des forages échantillonnés deux fois.

Les activités mesurées pour les forages des "Petits Eynards" et "Ladevaux" restent sous le seuil de comptage de la mesure par scintillation et confirment l'absence de tritium détectable dans ces forages. Par contre, pour les autres forages nous voyons qu'une activité de 15-16 UT aujourd'hui correspondait à 3 activités différentes 23 ans auparavant. Il était intéressant de voir comment ces évolutions pouvaient indiquer des âges de l'eau en utilisant des modèles.

4.1.4.1 Les modèles empiriques

Les différentes activités mesurées en 1979 et 1980 proviennent du transfert du signal d'entrée tritium des précipitations dans la zone non saturée et dans l'aquifère. L'utilisation des modèles empiriques en hydrogéologie a pour but de simuler un signal de sortie de l'aquifère à partir d'un signal d'entrée pour différentes fonctions de transfert du système. Ces fonctions de transfert englobent toutes les propriétés du système hydrogéologique et leurs variations

(Etcheverry, 2002). La réponse du système hydrogéologique au signal d'entrée permet alors d'estimer la durée du trajet moyen de l'eau dans le système (d_m). Cette durée ou âge³¹ correspond au rapport du volume sollicité sur le renouvellement (Ozyurt *et al.*, 2003). Pour un pas de temps annuel, l'inverse de l'âge s'identifie alors à la fraction du réservoir renouvelée annuellement.

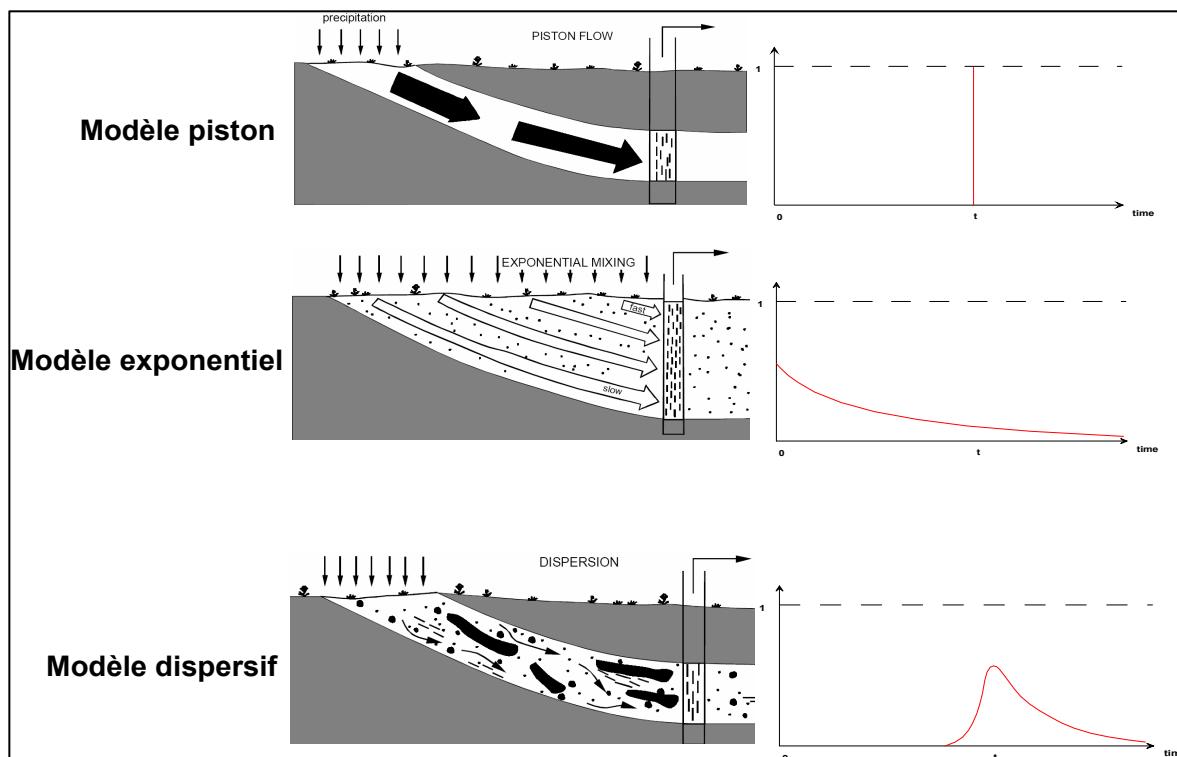


Figure 4-9: Principaux modèles de fonctionnement d'un aquifère et réponse à une impulsion (d'après Mook et de Vries, 2000 modifié).

Il existe deux grands modèles empiriques:

- le premier modèle est le modèle piston où la pluie efficace traverse l'aquifère à vitesse constante. Ce modèle suppose que toutes les molécules d'eau parcourront la même distance à la même vitesse, ce qui n'est valable en première approximation que dans des cas très particuliers d'aquifères (milieu homogène, lignes de courant de même longueur dans un aquifère captif);

³¹ Il ne faut pas confondre âge et temps de séjour. Le temps de séjour peut se définir comme la durée totale du trajet de l'eau entre son entrée et l'exutoire naturel du système (source ou résurgence). Lorsque le prélèvement se fait par un forage, il s'agit d'un âge ou durée du trajet entre l'entrée et le forage.

- le deuxième modèle est le modèle de mélange parfait ou exponentiel. La pluie efficace se mélange complètement à l'eau de l'aquifère. L'eau récente est plus fréquente que l'eau ancienne. Il s'agit typiquement du fonctionnement d'un aquifère homogène, d'épaisseur faible, pour lequel la recharge se fait sur toute la surface (cas des aquifères à nappe libre).

Le modèle dispersif se situe à l'intermédiaire de ces deux cas limites, compte tenu de l'hétérogénéité du milieu entraînant des vitesses différentes entre les pores et entre plusieurs couches de l'aquifère. Nous avons schématisé les trois principaux modèles possibles de fonctionnement d'un aquifère, ainsi que les réponses de ces modèles à une impulsion de type Dirac (figure 4-9).

Ces modèles classiques ne représentent dans la plupart des cas que des approximations de la complexité des systèmes hydrogéologiques. Il existe aussi d'autres modèles plus complexes (par exemple court-circuit, linéaire) ou la combinaison linéaire de plusieurs modèles. Pour le détail des fonctions de transfert, nous invitons le lecteur à lire les références (Mook *et al.*, 2000; Etcheverry, 2002; Ozyurt *et al.*, 2003).

4.1.4.2 Durée du trajet moyen d_m

Grâce à la chronique des teneurs isotopiques tritium pondérées des précipitations de Thonon, nous avons utilisé le logiciel LUMPED développé par Ozuyrt (2003) qui permet de déterminer d_m par comparaison des signaux de sorties des différents modèles avec les 3 groupes d'activités tritium mesurées dans les eaux souterraines (St Antoine, Grand Serre et Cordelier). Ce logiciel calcule par un processus d'itération les dix meilleurs ajustements obtenus pour un modèle donné. Par exemple, sur la figure 4-10 nous avons figuré les signaux de sorties obtenus pour un modèle dispersif (site de St Antoine) en prenant d_m comprise entre 20 et 25 ans et un coefficient apparent de dispersion (nombre de Peclet Pe^{32}) compris entre 0,05 et 200:

³² Le nombre de Peclet Pe est un nombre sans dimension qui est égale à $u*l/D$, où u est la vitesse moyenne de écoulement ($L \cdot T^{-1}$), l la distance entre le point d'infiltration et le point de mesure (L) et D le coefficient de dispersion longitudinal ($L^2 \cdot T^{-1}$). Plus Pe est grand, plus le modèle dispersif se rapproche du modèle piston.

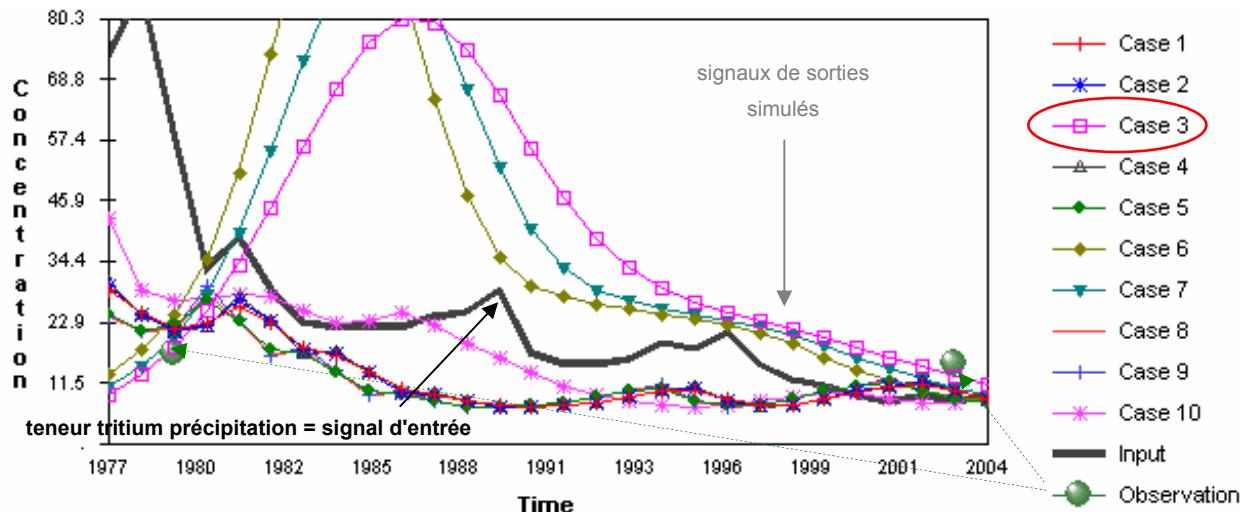


Figure 4-10: Exemple d'un modèle dispersif sur le site de St Antoine (données traitées avec LUMPED).

Sur cette figure, le signal de sortie qui correspond le mieux aux deux valeurs mesurées est la courbe 'case 3' (ellipse). L'âge moyen de résidence est égal à 23 ans et le nombre de Peclet est de 100. Ce nombre de Peclet montre qu'il y a un faible effet dispersif.

Dans le tableau 4-3, nous avons reporté les valeurs des meilleurs ajustements obtenus pour les 3 sites et selon les 3 principaux modèles (piston, exponentiel et dispersif)³³:

modèles	St Antoine		Grand Serre		Cordeliers	
exponentiel	pas d'ajustement		pas d'ajustement		$40 < t_m < 42$ ans	
piston	$d_m = 24$ ans		$d_m = 24$ ans		pas d'ajustement	
Dispersif	d_m	Pe	d_m	Pe	d_m	Pe
	17-18	1	22	30	-	-
	23-24	60-100	-	-	-	-

Tableau 4-3: Calculs du t_m à partir des 3 modèles classiques empiriques de transit de l'eau dans l'aquifère.

Sur ces 3 sites, le site Cordeliers montre lui un bon ajustement avec un modèle de mélange parfait mais pour d_m de l'ordre de 41 ans. Ce type de modèle correspond à la recharge d'un aquifère libre ce qui correspond parfaitement au site de la vallée du Chalon (vallée sèche perchée correspondant à une zone d'alimentation de l'aquifère). Pour les deux autres sites, ils

³³ LUMPED a la possibilité de simuler le signal de sortie pour des modèles plus complexes (voir Ozyurt *et al.*, 2003) mais il s'avère que seuls les 3 modèles classiques (piston, exponentiel ou dispersif) donnent les meilleurs ajustements.

montrent une d_m de l'ordre de 24 à 25 ans avec un modèle piston ou un modèle peu dispersif avec d_m de l'ordre de 22-24 ans. Enfin pour St Antoine, un modèle très dispersif de d_m égale à 17-18 ans s'ajuste aussi. Il apparaît difficile à partir de seulement deux mesures espacées dans le temps de valider un modèle de fonctionnement de l'aquifère pour chaque site. Néanmoins, on a pu montrer que la durée du trajet moyen de l'eau pour ces 3 sites est compris entre 20 et 40 ans.

4.2 LES ISOTOPES STABLES: OXYGENE 18 (^{18}O) ET DEUTERIUM (^2H ou D)

4.2.1 Principes du marquage naturel

Nous résumons dans ce paragraphe les principes physiques qui gouvernent la distribution des isotopes stables de la molécule d'eau dans le cycle de l'eau (Fontes, 1976; Blavoux, 1978; Clark *et al.*, 1997; Olive, 1997; Celle, 2000; Mook *et al.*, 2000).

Une molécule d'eau est composée d'atomes d'hydrogène et d'oxygène. Cette molécule peut être d'un poids légèrement variable selon les isotopes qui la composent. Cette différence de masse a un effet plus ou moins important sur leurs vitesses de réaction car chaque molécule est affectée d'un mouvement de vibration dont la fréquence est fonction inverse de sa masse. Ainsi les molécules les plus légères réagissent plus vite que les molécules plus lourdes, c'est "l'effet isotopique". C'est pourquoi les molécules H_2^{16}O et H_2^{18}O présentent des tensions de vapeur et des vitesses de diffusion dans l'air différentes car la vitesse de la réaction de la molécule H_2^{16}O est 1 % plus rapide que celle de la molécule H_2^{18}O . On conçoit facilement que les molécules lourdes soient moins volatiles que les molécules légères. Ainsi un plan d'eau soumis à l'évaporation se retrouve plus riche en isotopes lourds, *a contrario* de la phase vapeur. C'est le principe du fractionnement isotopique en hydrologie.

Le fractionnement entre phase liquide et vapeur est défini par $\alpha_{(L-V)} = \frac{R_L}{R_V}$ avec R rapport d'abondance de chaque phase. Cette relation s'exprime en fonction de la notion de δ par:

$$\alpha_{(L-V)} = \frac{1000 + \delta_L}{1000 + \delta_V}. \text{ Celle-ci s'exprime aussi } \alpha_{(L-V)} - 1 \approx \ln \alpha_{(L-V)}.$$

On peut alors définir un facteur d'enrichissement $\varepsilon_{(L-V)}$ (en %) de la phase liquide par rapport à la phase vapeur:

$$\varepsilon_{(L-V)} = (\alpha_{(L-V)} - 1) \times 1000 \approx 1000 \cdot \ln \alpha_{(L-V)} \approx \delta_L - \delta_V$$

Le fractionnement est un phénomène thermodynamique qui décroît généralement avec la température. La relation est de la forme $1000 \cdot \ln \alpha_{(L-V)} = a \cdot T^2 + b \cdot T^{-1} + c$ avec a, b, c constantes dépendant de l'isotope et de sa phase et T la température en degré Kelvin.

En hydrologie, puisque le degré de condensation de la masse nuageuse et le taux de fractionnement isotopique dépendent tous deux de la température, une relation existe entre la teneur isotopique de la pluie et la température de condensation. On peut généralement et surtout à l'échelle des moyennes, établir une relation de simple proportionnalité entre la température de condensation à la base du nuage et la température au sol. Cette double dépendance est le fondement du traçage avec l'oxygène 18 et le deutérium, car elle permet de relier la composition isotopique de la pluie à la température au sol. Il y a donc un marquage naturel des précipitations

Dans le cycle de l'eau, l'eau de pluie prend naissance au niveau de l'océan par évaporation. Ensuite, cette molécule d'eau subit une multitude de phases de condensation et d'évaporation avant de retrouver l'océan pour subir un nouveau cycle. A partir d'une même masse de vapeur, les précipitations successives seront de moins en moins riches en isotopes lourds. En d'autres termes, au cours de la progression de la masse nuageuse océanique au-dessus d'un continent, cette masse subit plusieurs stades de refroidissement donc de condensation. Il s'agit de "l'effet continentalité". Les précipitations sont donc plus pauvres en ^{18}O et en ^2H au fur et à mesure de la progression de la masse nuageuse à l'intérieur des terres. Par ailleurs, au passage des barrières montagneuses, la masse nuageuse subit une ascendance. Celle-ci provoque une détente adiabatique occasionnant un refroidissement et une condensation de la vapeur. Des

précipitations dites "orographiques" apparaissent qui sont de plus en plus appauvries en fonction de l'altitude. Il s'agit de « l'effet d'altitude ».

Deux autres effets existent. L'effet latitudinal est dû d'une part, aux basses températures à l'approche des pôles et d'autre part, à l'éloignement des océans tropicaux qui sont la source de 65 % de la vapeur atmosphérique. L'effet de saisonnalité est simplement lié aux variations saisonnières de température. On peut rajouter un dernier effet de mémoire paléoclimatique qui est aussi lié à la température. Il s'agit de l'enregistrement des conditions climatiques passées, différentes de l'Actuel, dans des réservoirs du cycle hydrologique. Cela a été mis en évidence dans les carottes de glace ou dans les grands aquifères profonds où des teneurs plus appauvries en oxygène 18 et deutérium ont été conservées.

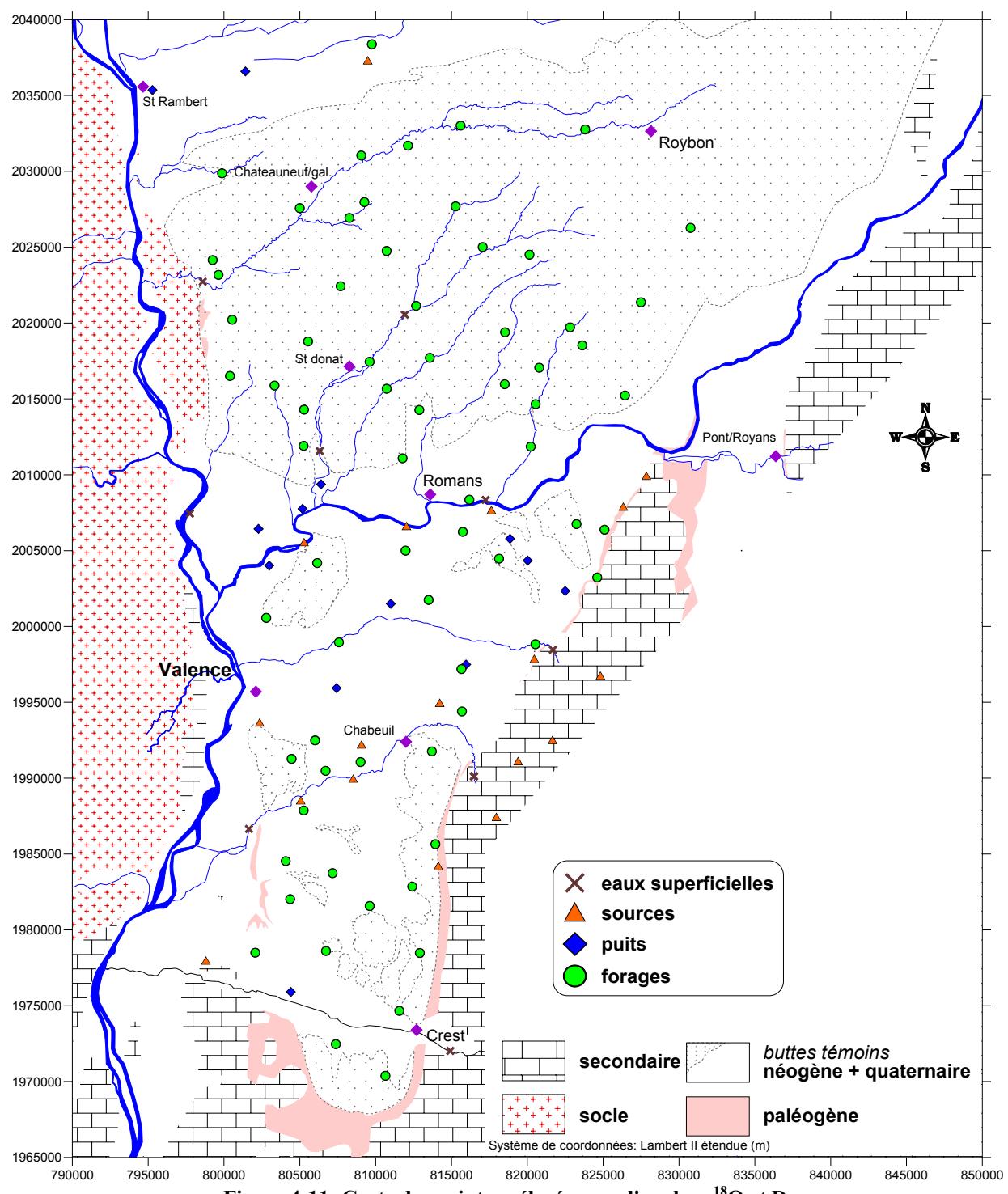
4.2.2 Données

	oxygène 18				deutérium			
	forages	puits	sources	eaux sup.	forages	puits	sources	eaux sup.
nombre échantillons	72	14	19	11	70	14	19	11
moyenne	-8,4	-8,4	-8,8	-8,7	-56,3	-56,9	-58,6	-58,2
écart-type	0,4	0,5	1	0,9	3,3	3,7	7,11	6,7
minimum	-9,5	-9,6	-12,1	-11,2	-63,6	-67,6	-84,1	-76,7
maximum	-7,4	-7,8	-7,5	-7,9	-49,6	-53,7	-49,2	-51,9
médiane	-8,4	-8,2	-8,5	-8,4	-56,5	-55,6	-57	-57,1

Tableau 4-4: Ensemble des résultats en isotopes stables obtenus au cours de cette étude (exprimés en ‰ vs SMOW).

Au cours de notre étude, nous avons échantillonné les eaux souterraines (sources, puits et forages) et les eaux superficielles (rivières et fleuves). Le tableau 4-4 récapitule les distributions statistiques des teneurs isotopiques des eaux de notre zone d'investigation. Les analyses en oxygène 18 et deutérium ont été effectuées en Pologne au laboratoire AGH de Cracovie. L'incertitude sur les analyses est égale à $\pm 0,1 \text{ ‰}$ et $\pm 1 \text{ ‰}$, respectivement. Tous les

résultats sont reportés en annexe VI, et les points échantillonnés sont positionnés sur la carte de la figure 4-11.



En dehors de ces nouveaux résultats, il existait quelques données ponctuelles en oxygène 18. L'étude du cabinet CPGF avait échantillonné 18 forages, 1 puits et 4 sources entre 1979 et

1980. Jeannolin (1985) a échantillonné 2 eaux de pluies, 2 eaux d'un forage en hiver et en été 1983. Enfin, trois forages AEP ont été aussi analysés.

4.2.3 Marquage isotopique: les droites météoriques

Toute étude isotopique d'eaux souterraines, à l'aide des isotopes stables de la molécule d'eau, nécessite de connaître le signal d'entrée isotopique de l'aquifère. Le signal d'entrée correspond aux eaux météoriques s'infiltrant à la surface de notre zone d'étude. Au niveau du Sud-Est de la France, il existe plusieurs études qui ont spécifiquement étudié les teneurs isotopiques des précipitations. Nous pouvons citer entre autre les travaux de Celle (2000), dans la région d'Avignon et du pourtour Méditerranéen; les travaux de Triganon (2002) au niveau de Thonon et de Gal (2005) dans le département de la Loire. Les résultats de ces travaux ont permis de déterminer les droites météoritiques locales. Chaque droite météorique locale rend compte des influences climatiques complexes du Sud-Est de la France. On peut schématiquement décrire le climat du Sud-Est par deux grandes influences:

- l'influence océanique de flux Nord-Ouest d'origine Atlantique;
- l'influence Méditerranéenne de flux de Sud (Celle, 2000).

Les droites météoriques locales s'écrivent:

❖ pour Thonon: $\delta D = 7,6(\pm 0,1).\delta^{18}O + 3,9(\pm 1,1)$ **Équation 4-1** (Triganon, 2002)

❖ pour la Loire: $\delta D = 7,82(\pm 0,25).\delta^{18}O + 6,9(\pm 2,3)$ **Équation 4-2** (Gal, 2005)

❖ pour la Méditerranée occidentale: $\delta D = 7,44.\delta^{18}O + 8,09$ **Équation 4-3** (Celle, 2000)

D'une manière générale, les pentes des équations sont proches de 8. Cette pente de 8 provient du fractionnement à l'équilibre entre l'oxygène 18 et le deutérium (Craig, 1961). De plus, cet auteur a calculé, à partir des coefficients de fractionnement, la droite météorique théorique obtenue dans les conditions d'équilibre:

$$\delta D = 8.\delta^{18}O + 10 \text{ (Craig, 1961)}$$

Cette relation a été par la suite confirmée par Rozanski *et al.* (1993) à partir des moyennes annuelles pondérées des teneurs isotopiques des précipitations du réseau mondial des stations de l'AIEA:

$$\delta D = 8,13 \cdot \delta^{18}O + 10,8 \text{ (Rozanski } et al., 1993)$$

Nous pouvons remarquer que la pente la plus faible correspond à celle définie pour la Méditerranée occidentale. La faible pente peut être expliquée par l'évaporation des gouttes de pluie pendant les événements pluvieux estivaux (Celle, 2000; Huneau, 2000; Celle-Jeanton *et al.*, 2004).

4.2.3.1 Excès en deutérium

Le concept d'excès en deutérium (d) a été défini par Dansgaard en 1964 par la relation:

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

Cette relation se base sur la pente de la droite météorique théorique défini par Craig en 1961. L'excès en deutérium augmente avec $(1-h)$, h étant l'humidité relative de l'air. Pour une humidité relative de 85 % correspond un excès de 10 ‰ (Clark *et al.*, 1997). Cette valeur de 10 ‰ est la valeur la plus fréquemment observée aux stations soumises aux influences océaniques directes. C'est cette valeur qui a été retenue par Craig pour définir l'ordonnée à l'origine de la World Meteoric Water Line (Craig, 1961).

La valeur de d varie lorsque la condensation est générée à partir de masses de vapeur d'origines différentes (évaporation continentale, mer fermée, évapotranspiration etc.). L'exemple le plus connu est celui de la Méditerranée orientale avec $d = 22$ ‰ (Gat *et al.*, 1970). Au niveau de la Méditerranée occidentale, Celle (2000) a déterminé un excès en deutérium de 13,7 ‰.

Par ailleurs, on observe des variations saisonnières de l'excès en deutérium qui prend une valeur plus forte en hiver qu'en été. Ce phénomène provient des modifications d'humidité atmosphérique dans les régions océaniques d'où proviennent les masses d'airs (Jouzel *et al.*, 1997 in Celle (2000)). Sous des latitudes comprises entre 30° et 60°, Gonfiantini (2001)

montre que l'ordonnée à l'origine des droites météoriques calculées est plus élevée en hiver qu'en été dans l'hémisphère Nord, et inversement dans l'hémisphère Sud.

4.2.3.2 Gradients altimétriques dans le Sud-Est de la France

A partir de plusieurs stations situées à différentes altitudes, il est possible de déterminer un gradient altitudinal des teneurs isotopiques des précipitations. Nous avons reporté, dans le tableau 4-5, les gradients altitudinaux connus dans le Sud-Est de la France et dans les Alpes suisses et italiennes.

Site	Gradients (‰ pour 100m)		Références
	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	
Alpes suisses	-0,34	-	(Pearson <i>et al.</i> , 1990)*
Chablais	-0,33	-	(Blavoux, 1978)
Alpes du Sud	-0,23	-	(Maréchal <i>et al.</i> , 2003)
Alpes du Nord	-0,29	-	(Lemeille <i>et al.</i> , 1983)
Piémont Italien	-0,31	-2,5	(Bortolami, 1979)*
Vallée d'Aoste	-0,18	-	(Novel <i>et al.</i> , 1999)
Mont Ventoux	-0,14 à -0,25	-	(Lastennet, 1994)
Plaine du Comtat	-0,28	-	(Blavoux <i>et al.</i> , 1990; Celle, 2000)
Valréas	-0,3	-1,96	(Huneau, 2000)
Loire	-0,12 à -0,31	-0,15 à -1,9	(Gal, 2005)

Tableau 4-5: Gradients isotopiques altitudinaux des précipitations connus dans le Sud-Est de la France et dans les Alpes italiennes et suisses.

*in Clark et Fritz (1997).

A partir de ces données, on peut supposer que les gradients isotopiques pour notre zone d'étude doivent être proches de -0,3 ‰ et -2 à -2,2 ‰ pour l'oxygène 18 et le deutérium respectivement.

4.2.4 Interprétation des teneurs isotopiques

4.2.4.1 Répartition spatiale des teneurs isotopiques

Sur les figures 4-12 et 4-13 sont présentées, respectivement, les répartitions spatiales des teneurs en oxygène 18 et deutérium des eaux de l'aquifère néogène. Les répartitions isotopiques de ces deux figures sont très semblables avec naturellement des amplitudes plus marquées pour le deutérium.

Nous remarquons globalement que le secteur qui a des teneurs les plus appauvries se situe au niveau du quart Nord-Est de la Drôme des Collines (A). Nous retrouvons approximativement sur ces deux cartes les secteurs mis en évidence au chapitre géochimie, la vallée de la Valloire (21), la partie aval de la vallée de la Joyeuse (13), le sillon Nord-Sud entre St Marcel les Valence et Beaumont les Valence (14) et le secteur (15) dans le bassin de Crest. Pour la plaine de Valence, un nouveau secteur se distingue à l'extrême Est de la plaine entre Peyrus et Barbières (B).

Les secteurs (13), (14) et (15) avaient déjà été remarqués sur la carte des activités en tritium (cf. Figure 4-5). En dehors de ces secteurs, les eaux dont les teneurs isotopiques sont les plus appauvries concordent assez bien à des zones dont le relief est le plus marqué, sauf au niveau de la Valloire (secteur 21). **Il s'agit ici de l'effet d'altitude.** Il est intéressant de constater que les valeurs les plus appauvries des eaux de l'aquifère ne se situent pas en bordure du flanc occidental du Vercors dont l'altitude dans cette partie dépasse pourtant 1000 m mais au niveau de la vallée de la Valloire et de la Drôme des Collines alors que son altitude ne dépasse pas 650 m.

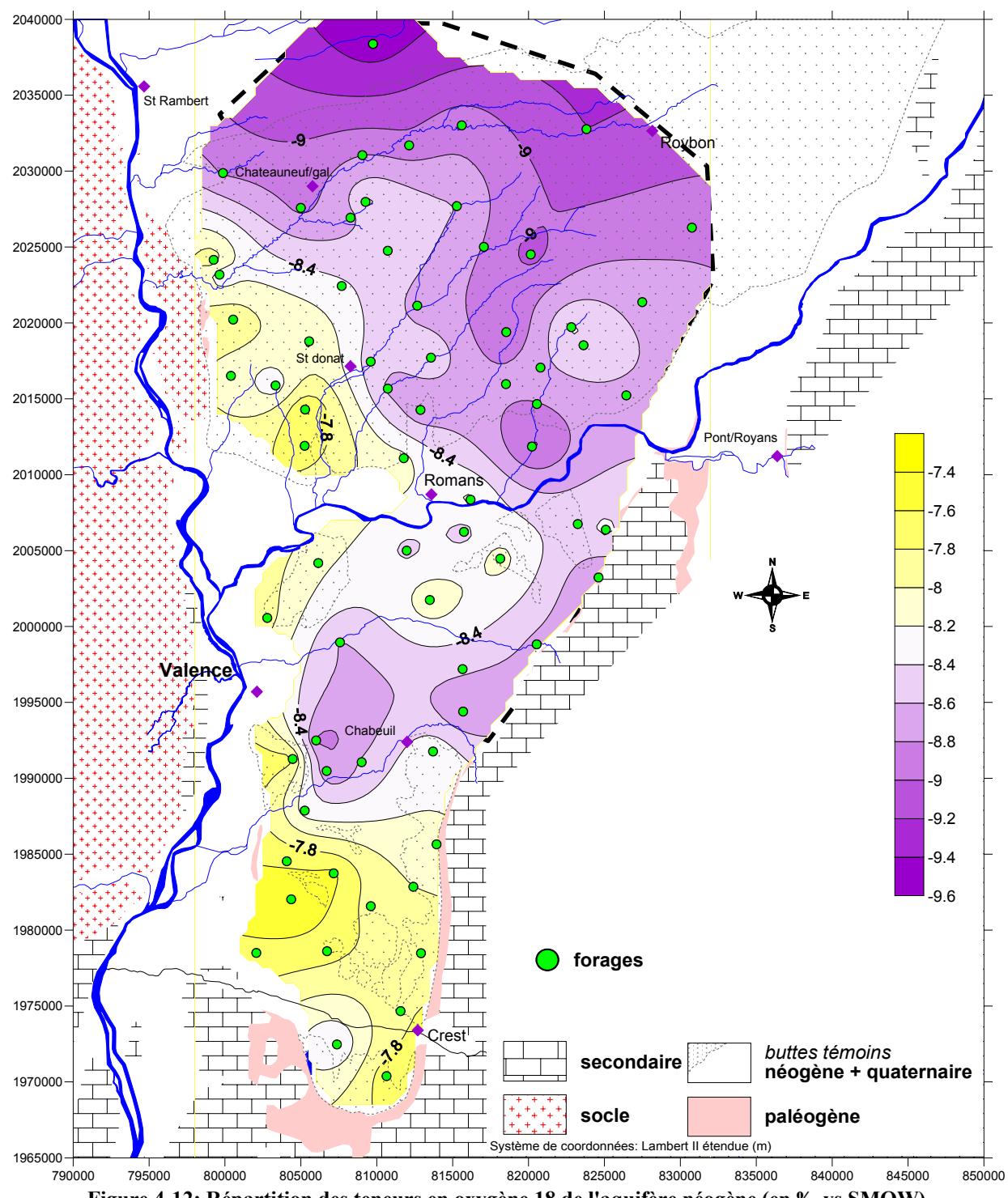


Figure 4-12: Répartition des teneurs en oxygène 18 de l'aquifère néogène (en ‰ vs SMOW).

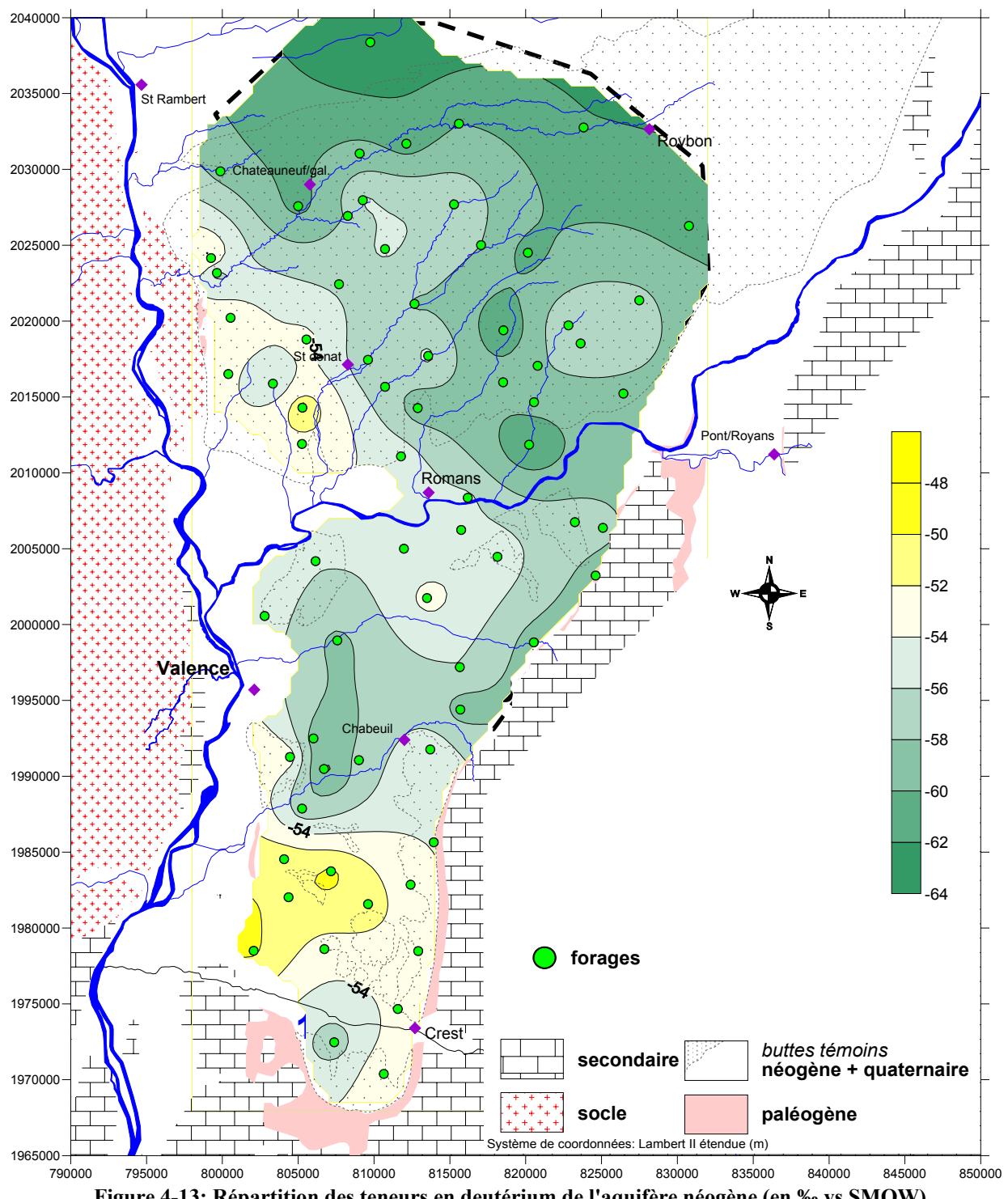


Figure 4-13: Répartition des teneurs en deutérium de l'aquifère néogène (en ‰ vs SMOW).

4.2.4.2 Relation hydrogéologique entre Vercors et la plaine de Valence

La morphologie et la géologie du Vercors sont telles que la très grande partie des précipitations se trouve largement drainée vers le Nord (Bourne et Isère) et vers le Sud (Drôme) (flèches grises épaisses figure 4-14). Aucune résurgence majeure, ni d'importantes rivières ne s'écoulent de la partie occidentale de ce massif. En observant de manière plus détaillée le flanc occidental du Vercors (figures 4-14 et 4-15), nous remarquons que ce bassin versant est divisé en trois sous-bassins:

- d'abord nous voyons une première barrière ne dépassant pas 700-800 m d'altitude. Ce premier bassin versant est peu étendu et il est composé de calcaire urgonien plongeant sous la plaine de Valence, correspondant à l'extrémité ouest de l'anticlinal (flanc ouest);
- ensuite, il apparaît une zone encaissée et érodée en une multitude de combes servant de collecteurs au ruissellement. Les assises de ses terrains sont composées de marnes calcaires imperméables du Crétacé inférieur composant le cœur de l'anticlinal;
- enfin, une deuxième barrière, correspondant à l'extrémité est de l'anticlinal est composée de calcaire urgonien, et culmine à 1330 m (flanc est).

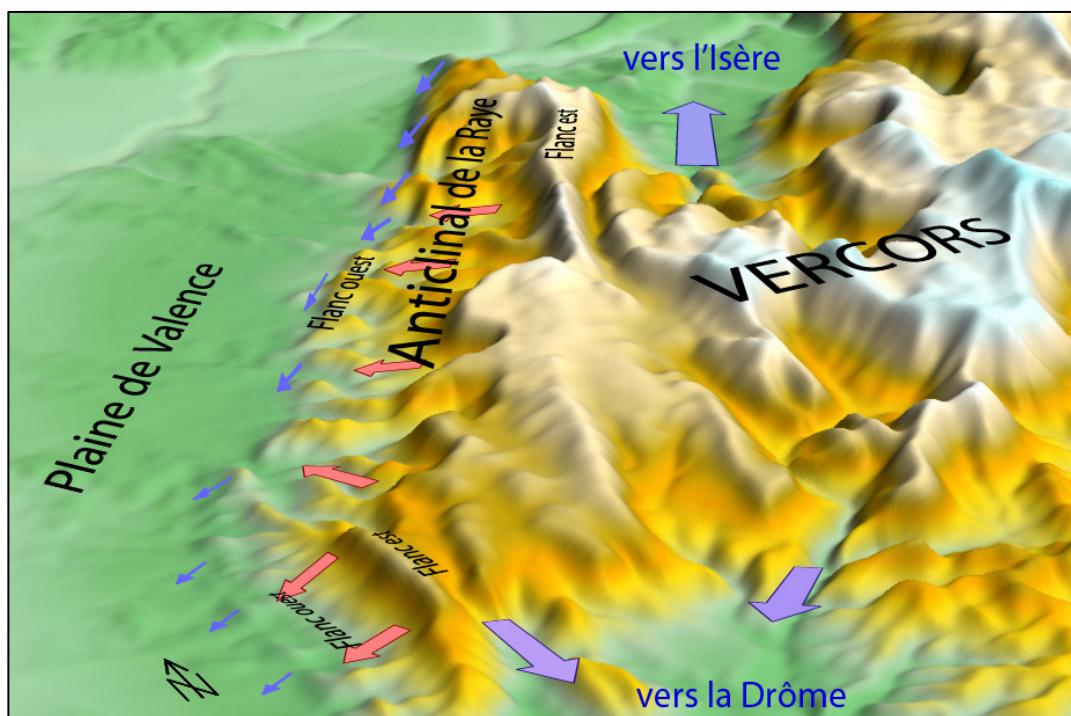


Figure 4-14: Vue en perspective de la bordure occidentale du Vercors et hydrologie du secteur (MNT* maille 100 m).

*MNT: Modèle Numérique de Terrain

Cette division, en sous bassins versants du flanc occidental du Vercors est valable de Barcelonne à Beauregard-Baret. Au Sud, le flanc ouest des calcaires urgoniens s'estompe mais une autre barrière, composée par les marnes et calcaires oligocènes et éocènes, ne modifie pas cette division en sous bassins versants. Au Nord, de Beauregard-Baret à la Baume d'Hostun, le cœur de l'anticlinal n'existe plus. Le flanc ouest constitue ici un unique bassin versant. Nous avons donc deux possibilités d'apports d'eaux par ruissellement au niveau de la plaine:

- d'une part, les cours d'eaux du Vercors comme la Véore, la Barberolle, le Guimand, la Lierne qui proviennent uniquement du bassin versant du cœur et de la partie Est de l'anticlinal de la Raye. La superficie de ce bassin versant est donc, par définition, plus étendue puisqu'il donne naissance à de multiples rivières rejoignant la plaine (flèches rouges fig. 4-14);
- d'autre part, le ruissellement issu du flanc ouest de l'anticlinal de la Raye, avec un bassin versant peu étendu et peu élevé (flèches bleues fig. 4-14).

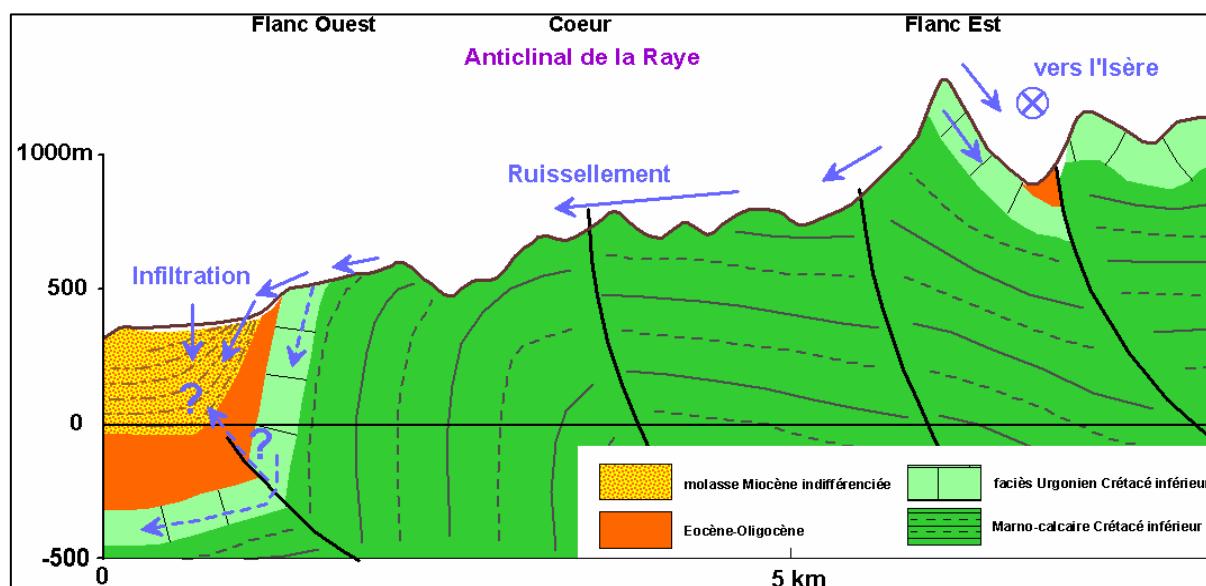


Figure 4-15: Coupe Est-Ouest de la limite plaine de Valence et bordure occidentale du Vercors à la latitude de Charpey. Relation hydrogéologique entre Vercors et plaine.

Les précipitations au niveau de l'anticlinal de la Raye sont isotopiquement plus appauvries ruissèlent et sont collectées par les rivières (Barberolle, Guimand, Lierne, Véore, etc) et rejoignent la plaine de Valence. En dehors de deux échantillons qui présentent des teneurs légèrement plus négatives, la teneur moyenne en isotopes stables montre que les pertes par infiltration à partir de ces rivières sont faibles par rapport au volume infiltré directement par

les précipitations. Ces deux échantillons se situent non loin des rivières Barberolle et de la Lierne, ce qui montre que les pertes par ces rivières existent.

Une éventuelle relation hydrogéologique entre le bassin molassique et des circulations karstiques au niveau de la retombée occidentale des calcaires urgoniens est possible, mais n'a pas été démontrée à partir de nos résultats. En effet, il n'existe pas de forage suffisamment profond dans cette partie Est de la plaine. Cependant, les terrains imperméables de l'Oligocène et de l'Eocène ne favorisent pas cette hypothèse. Enfin, même si des circulations peuvent exister à la faveur de failles, les volumes impliqués doivent être faibles au regard de la superficie du bassin d'alimentation de ces calcaires (figure 4-15).

S'il n'y a pas ou peu d'arrivées d'eau en provenance du Vercors, l'explication des teneurs plus négatives dans le quart Nord-Est de la Drôme des Collines (A) par rapport à l'Est de la plaine de Valence (B) est due à la différence d'altitude des zones d'infiltration directe des précipitations de l'ordre de 510-550 m pour les plateaux de Chambaran et de Thivolet et de seulement 350-400 m pour la bordure orientale de la plaine.

4.2.5 Relation $^{18}\text{O}-^2\text{H}$

Nous avons reporté nos résultats sur un diagramme deutérium *versus* oxygène 18 (figure 4-16). Dans ce diagramme, nous avons positionné les droites météoriques (D.M.) locales de Méditerranée occidentale et de la Loire et la droite météorique mondiale définie par Craig (World Meteoric Water Line). Les deux droites météoriques locales se situent de part et d'autre de nos données et cela confirme que notre secteur d'étude se situe bien entre les influences climatiques de méditerranée occidentale et du flux d'Atlantique Nord-Ouest. La pente de la droite de régression provenant de toutes nos données est de 7,2. Cette pente est plus faible que celle déterminée pour la Méditerranée occidentale. Cette pente semblerait donc montrer un léger phénomène d'évaporation.

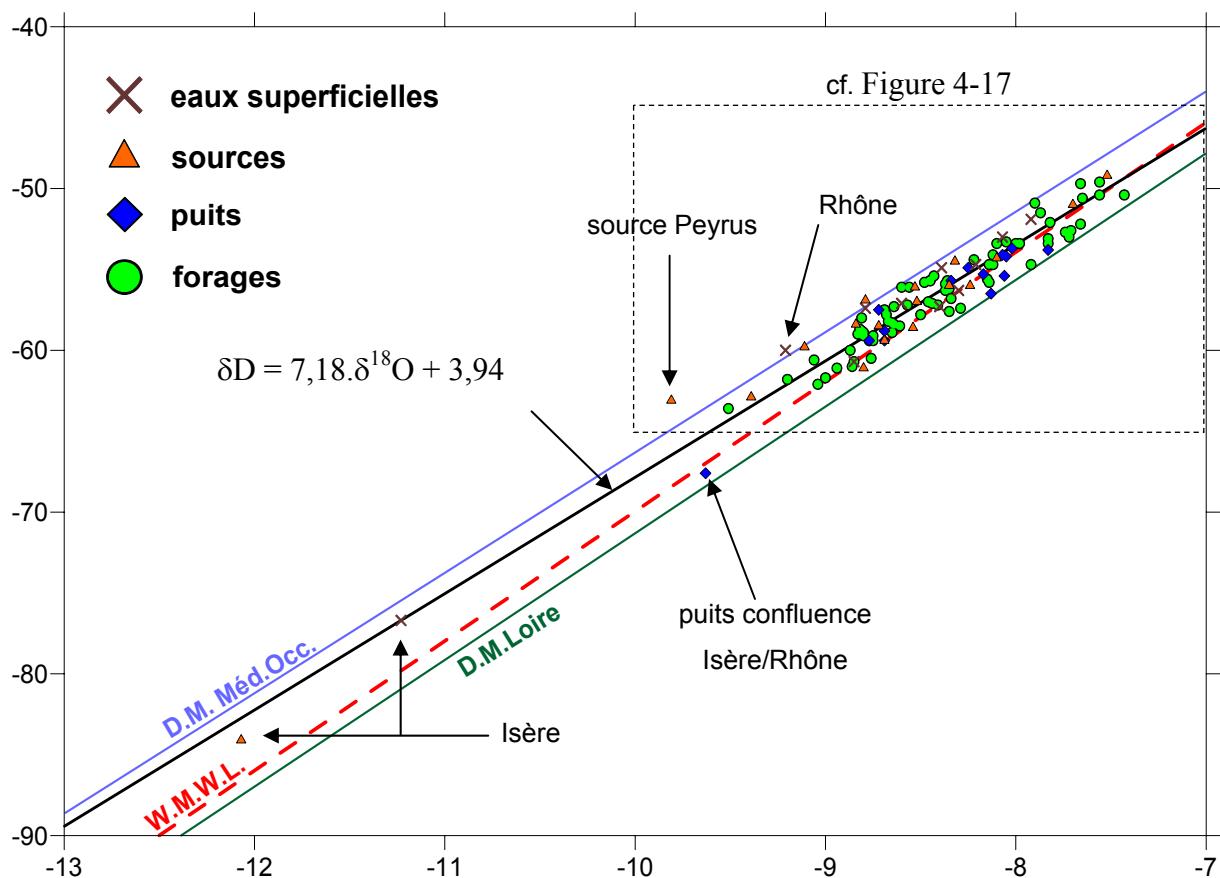


Figure 4-16: Diagramme D vs ^{18}O des eaux superficielles et souterraines de la zone d'étude (en ‰ vs SMOW).

4.2.5.1 Quelques points particuliers en liaison avec les eaux de surface

Nous observons deux points particulièrement appauvris. Il s'agit de l'eau de l'Isère et d'une source tirant son alimentation de l'eau de l'Isère. En effet, la source échantillonnée se trouve sous le niveau du canal de dérivation de l'Isère, au barrage EDF de Beaumont-Monteux, au contact de la molasse miocène. Cette puissante source a été échantillonnée car selon les riverains cette source existait bien avant la construction du barrage. Il est clair à la vue des teneurs très appauvries en oxygène 18 et deutérium, que l'eau provient de fuite(s) à la base du canal de dérivation. Les différences des teneurs isotopiques entre la source et le fleuve proviennent de la période d'échantillonnage qui n'a pas été simultanée, respectivement 08/2004 et 10/2003.

On remarque que les teneurs isotopiques d'un puits se distinguent nettement. Il s'agit d'un puits situé au niveau de la confluence Isère/Rhône. Ces teneurs appauvries se situent entre

celle correspondant à l'Isère et celle du Rhône. Les alluvions de ce secteur sont très perméables et quelques agriculteurs irriguent parfois de manière excessive leurs arbres fruitiers. Cet excès d'irrigation peut conduire à la réalimentation de l'aquifère. Or, le réseau d'irrigation de ce secteur pompe à la fois l'eau du Rhône et de l'Isère. On aurait donc pour ce puits un mélange d'eaux du Rhône et de l'Isère et de la nappe. Cette hypothèse rejoint le constat tiré de l'étude géochimique (cf. § 3.2.4) qui montre de fortes teneurs en sulfate liée à un fort apport anthropique (protection des cultures).

4.2.5.2 Les sources du Vercors

Quelques sources se trouvent décalées dans le sens d'un excès en deutérium supérieur à 10 ‰ pouvant aller jusqu'à 15,4 ‰ pour la source Peyrus. La position décalée de ces quelques points influence la pente de la droite de régression qui n'est que de 6,3 pour ces seules sources au lieu de 7,2. Ceci semble indiquer un effet d'évaporation que l'on expliquerait par l'infiltration d'eaux de fonte des neiges.

En effet, les sources du Vercors, échantillonnées au mois d'avril 2004, sont influencées par l'infiltration d'eaux issues de la fonte des neiges dont les teneurs isotopiques sont marquées par deux phénomènes:

- la sublimation et les échanges avec la phase vapeur du manteau neigeux;
- les échanges entre la neige et l'eau de fonte quant elle s'infiltre de la surface du manteau vers la base (Clark *et al.*, 1997).

Le premier phénomène induit une pente plus faible que 8. Le deuxième provoque un enrichissement de la neige et l'eau d'infiltration constitue donc un mélange des teneurs isotopiques de la neige initiale et de la neige enrichie.

4.2.5.3 Puits et forages

Les forages ont été échantillonnés d'Août à Octobre 2003. La pente générale de la droite, qui est égale à 6,9, révèle un léger phénomène d'évaporation. Nous avons représenté sur la figure 4-17, les relations oxygène 18-deutérium par familles de forages établies à partir de leurs

activités tritium (cf. § 4.1.2.2). La première famille représente le groupe d'eaux dénuées de tritium avec peu ou pas de nitrate (famille A). La deuxième famille représente les eaux qui sont donc plus ou moins mélangées avec des eaux actuelles (famille B).

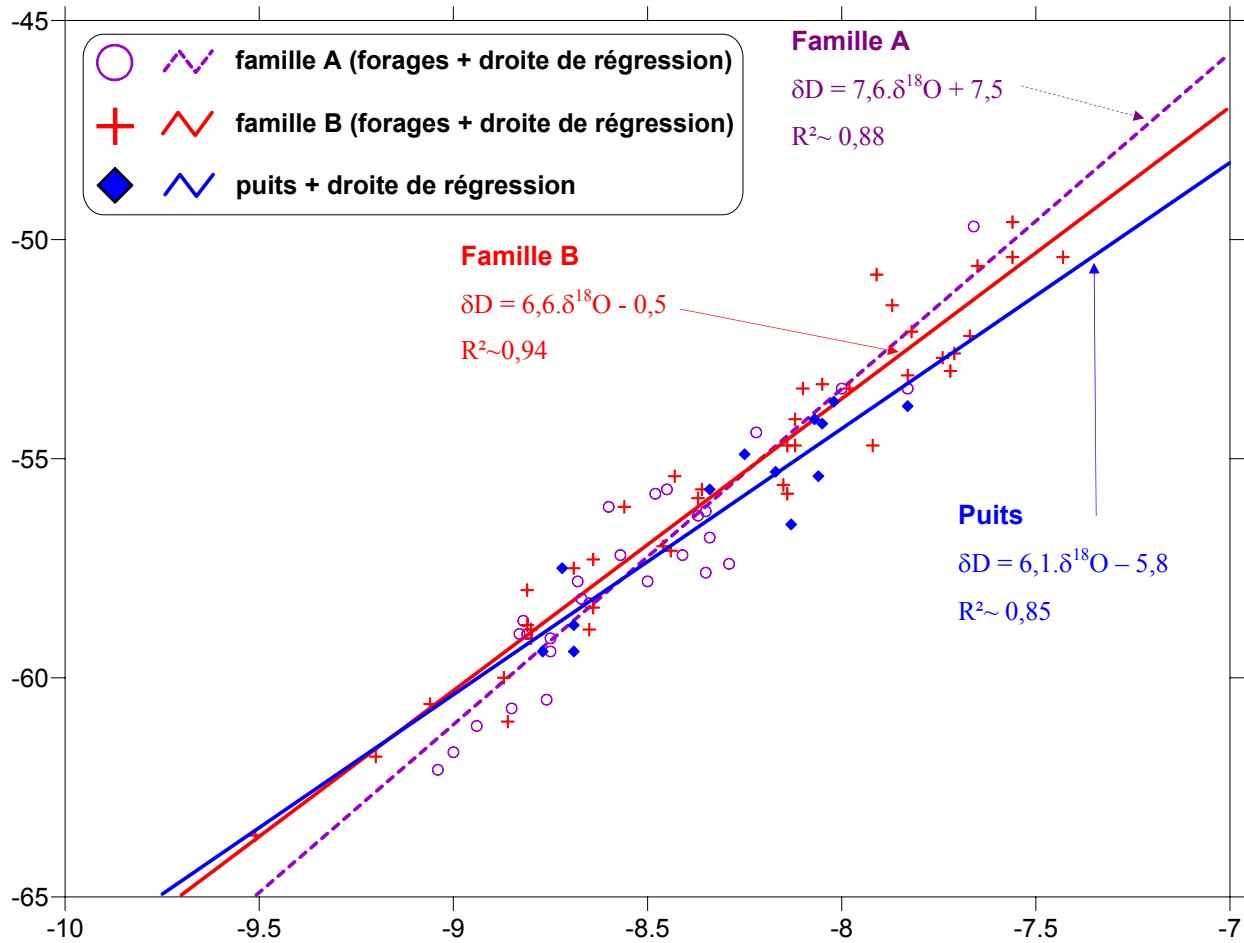


Figure 4-17: Diagramme D vs ^{18}O pour les eaux des forages (en ‰ vs SMOW).

Nous constatons que les pentes des droites de régression sont différentes pour chacune des familles:

- la famille A possède une équation de droite se situant à l'intermédiaire des droites météoriques locales de Méditerranée occidentale (7,4) et de la Loire (7,8). On peut penser que cette droite, définie pour des eaux à long temps de séjour non perturbées par des pollutions anthropiques, représente la droite météorique locale (D.M.L.);
- la famille B possède une pente nettement plus faible de 6,6. Cela signifie que les eaux de mélange sont des eaux légèrement évaporées contrairement aux précédentes;

- les eaux des puits montre une pente encore plus faible (6,1) que la famille B³⁴. Cette droite dénote un phénomène d'évaporation encore plus important que pour la droite de la famille B. Toutefois, cette pente de 6,1 est moins sûre puisque le nombre de mesures est plus faible et se situe dans une gamme d'amplitude plus restreinte que pour les forages.

Il nous faut donc expliquer l'origine de cette évaporation mise en évidence pour l'eau des puits et des forages contaminés par du tritium. La France est, en effet, soumise à un climat tempéré et les phénomènes d'évaporation sont surtout mis en évidence dans les régions arides ou semi-arides. La région du Sud-Est de la France a été chaud et sec mais il n'existe pas de données montrant un marquage significatif par l'évaporation de l'eau infiltrée. La contribution des eaux de pluies d'été évaporées n'est pas suffisante pour marquer l'eau des puits et les eaux des forages de la famille B. Par contre, l'irrigation permettrait d'expliquer ce phénomène d'évaporation (Clark *et al.*, 1997; Boronina *et al.*, 2005).

En effet, l'eau d'irrigation n'est probablement pas totalement reprise par l'évapotranspiration des végétaux et elle se trouve alors stockée dans la zone non saturée. L'irrigation par aspersion est importante au niveau de la plaine de Valence et de la Drôme des Collines au moment où l'évaporation est maximale. Ainsi de l'eau plus ou moins évaporée, stockée dans la zone non saturée, rejoint la nappe superficielle lors de la recharge principale (en automne). C'est pourquoi, l'aquifère néogène superficiel est plus marqué que sa partie profonde.

Le développement de l'irrigation à partir de forages captant l'aquifère miocène ayant commencé à partir des années 1960-1970, les eaux de nos échantillons de la famille B sont donc plus ou moins mélangées à des eaux infiltrées au cours de ces 30 dernières années. Cette droite d'évaporation permet alors de caractériser des eaux récentes et devient un indicateur du temps de séjour de l'eau dans l'aquifère.

³⁴ Nous n'avons pas tenu compte du puits situé près de la confluence Isère/Rhône car l'eau d'infiltration s'infiltre trop rapidement avant de subir une évaporation.

4.2.6 Altitude des bassins d'alimentations

Les variations isotopiques traduisent des différences de températures. Ces différences de températures proviennent soit du gradient d'altitude, soit de la conservation du signal d'entrée climatique saisonnier ou paléoclimatique dans l'aquifère. Or, la conservation des variations du signal d'entrée saisonnier dans les aquifères superficiels de nappe libre est connue, mais le plus souvent très largement atténuée (Clark *et al.*, 1997). Par contre, dans les aquifères profonds des variations saisonnières sont exclues, sauf dans le cas de forages aux tubages défectueux. La mise en évidence d'une mémoire paléoclimatique des dernières glaciations est très fréquente dans les grands aquifères profonds. Ce phénomène est mis aussi en évidence pour des aquifères plus restreints comme l'aquifère molassique de Valréas (Huneau, 2000). Les différences obtenues ont donc pour origine, soit le gradient d'altitude, soit une mémoire paléoclimatique.

Dans l'hypothèse d'un phénomène altimétrique, nous avons reporté sur un diagramme les teneurs isotopiques en deutérium³⁵ en fonction de l'altitude des points de prélèvements des eaux des familles A et B des forages (figure 4-18). Sur ce diagramme, nous remarquons que les échantillons dont les teneurs en deutérium sont les plus élevées s'alignent plus ou moins. Cet alignement signifie qu'il y a alors équivalence entre altitudes des forages et altitudes des bassins d'alimentations. Sur ce diagramme nous avons testé plusieurs gradients isotopiques supposés représenter le gradient isotopique du bassin de Valence (entre -1,8 à -2,2 δD/100 m) et seul le gradient de -2,2 ‰ δD/100 m s'ajuste le mieux à la famille A. L'ajustement de cette droite sur la famille A a été choisi car cette famille n'est pas perturbée par des mélanges avec des eaux récentes évaporées. Cette droite a pour équation: $\delta D = -0,022 * Z - 47,16$ avec Z cote NGF des points prélevés (m).

La distance $\Delta\delta D$ représente alors la différence d'altitude entre le bassin d'alimentation et le point de prélèvement (exprimée en ‰ vs SMOW). Cette distance se traduit aisément en une différence d'altitude ΔH par la formule $\Delta H = (100 * \Delta\delta D) / (-2,2)$. L'altitude moyenne des bassins d'alimentations (H) s'obtient par $H = Z + \Delta H$. Nous avons appliqué cette méthode à

³⁵ Le choix du deutérium provient du fait que celui-ci est moins affecté par les phénomènes d'évaporation que l'oxygène 18.

tous nos échantillons et les résultats sont situés en annexe VI. L'incertitude sur le gradient est de 0,1 ‰ $\delta D/100m$, celle sur l'ordonnée à l'origine est de 0,5 ‰ δD et celle de l'analyse est de 1 ‰ δD ce qui correspond à une incertitude totale de 90 m.

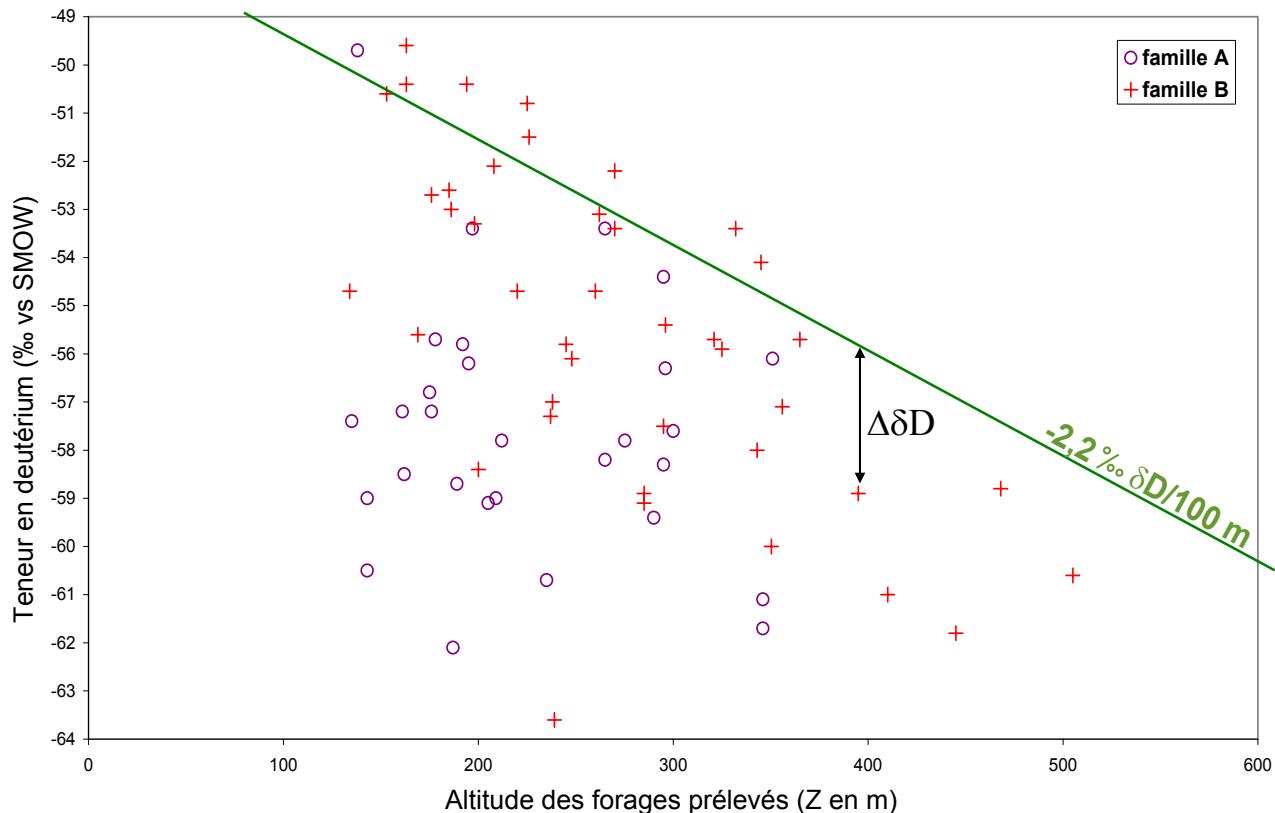


Figure 4-18: Relation teneur en deutérium et altitude des forages prélevés.

Nous avons représenté sur le diagramme suivant (figure 4-19) les altitudes moyennes des bassins d'alimentation (H) en fonction des altitudes des points de prélèvements (Z). Sur cette figure, nous n'avons pas représenté le point correspondant à l'Isère et le puits situé au niveau de la confluence Isère/Rhône car les H sont supérieures à 800 m d'altitude. Le Rhône et la Drôme ont une altitude moyenne d'alimentation de l'ordre de 600 m. Les trois puits entourés de l'ellipse se situent tous les trois au niveau de la vallée de la Valloire, comme la source de Manthes et le forage du SIE Valloire à Manthes. Les aquifères molassique et superficiel au niveau de la vallée de la Valloire ont donc des bassins d'alimentation compris entre 500 et 700 m d'altitudes. Le groupe de puits (2^{ème} ellipse) situés dans la plaine de l'Isère (à l'aval de la vallée de l'Herbasse) ainsi que le puits situé dans la vallée de la Drôme montrent des ΔH de l'ordre de 250 m. La teneur isotopique du puits situé dans les alluvions de la Drôme est une eau de mélange avec une partie provenant des eaux de la Drôme, via des circulations préférentielles dans des paléochenaux. Enfin une seule source (Chateaudouble) en bordure du

Vercors montre un ΔH négatif accentué pouvant laisser supposer à un phénomène d'évaporation lié au manteau neigeux. Cependant, la source Peyrus pour laquelle l'excès en deutérium est le plus important ne se situe pas sous la droite de pente 1.

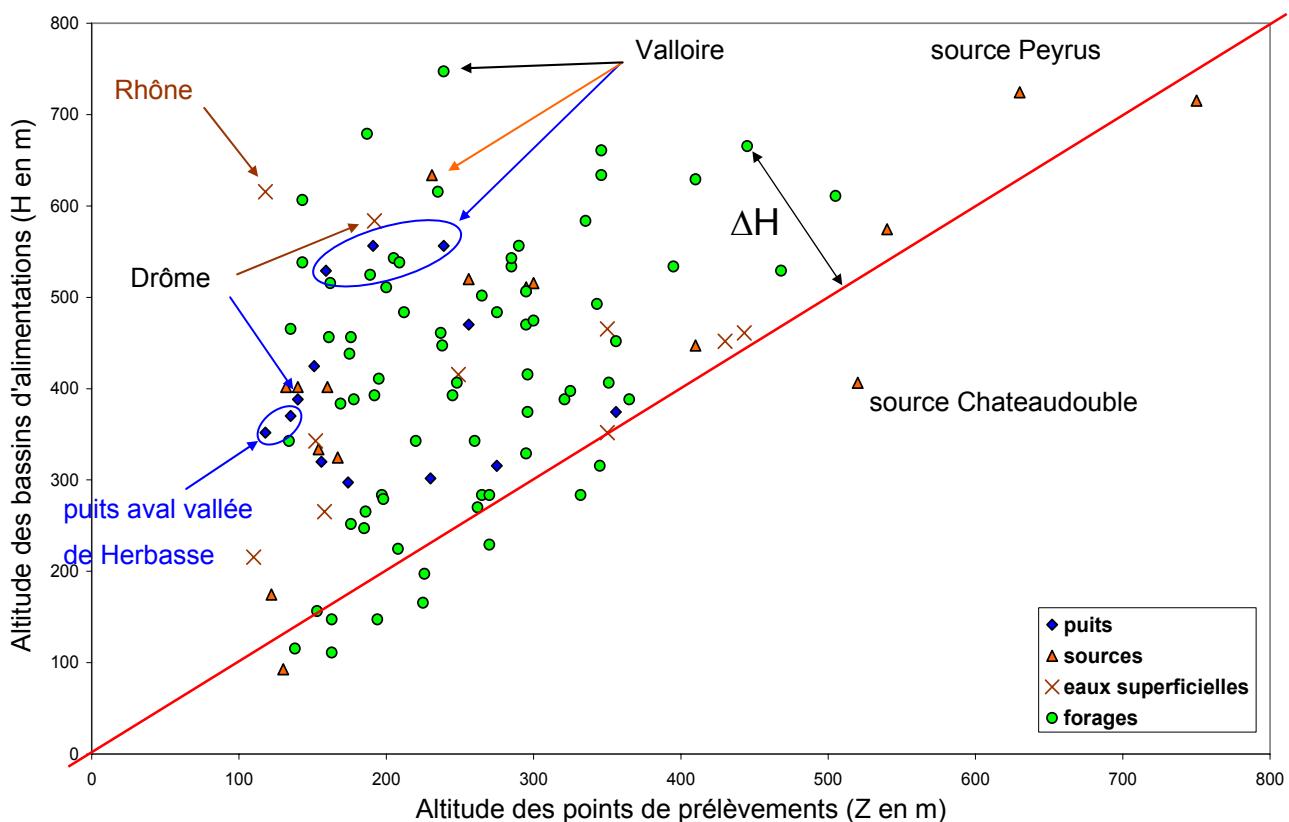


Figure 4-19: Comparaison des altitudes entre les bassins d'alimentations calculées par le deutérium et les points prélevés.

Sur la figure 4-20, nous avons reporté la distribution spatiale de ΔH pour l'aquifère néogène par classe de 100 m. Nous retrouvons pour la nappe profonde les secteurs 13, 14, 15, 16³⁶, 18, 19, 20 et 21 avec des différences d'altitudes très marquées. En dehors de ces secteurs, nous remarquons une bonne adéquation entre les altitudes des bassins d'alimentations et des points prélevés. L'eau de ces zones a une origine locale. Les secteurs pour lesquels ΔH est compris entre -100 et 0 m se situent au Sud de la plaine de Valence et à l'Ouest de la Drôme des Collines. L'incertitude de 90 m dans le calcul de ΔH implique qu'il peut s'agir aussi bien de l'adéquation entre H et Z, que de la sectorisation de zones avec un stockage d'eau évaporée

³⁶ Ce secteur englobe la rive droite et gauche de l'Isère.

dans la zone non saturée. Il faut noter que ces secteurs correspondent assez bien à des zones de fortes irrigations à partir de captages prélevant dans l'aquifère néogène.

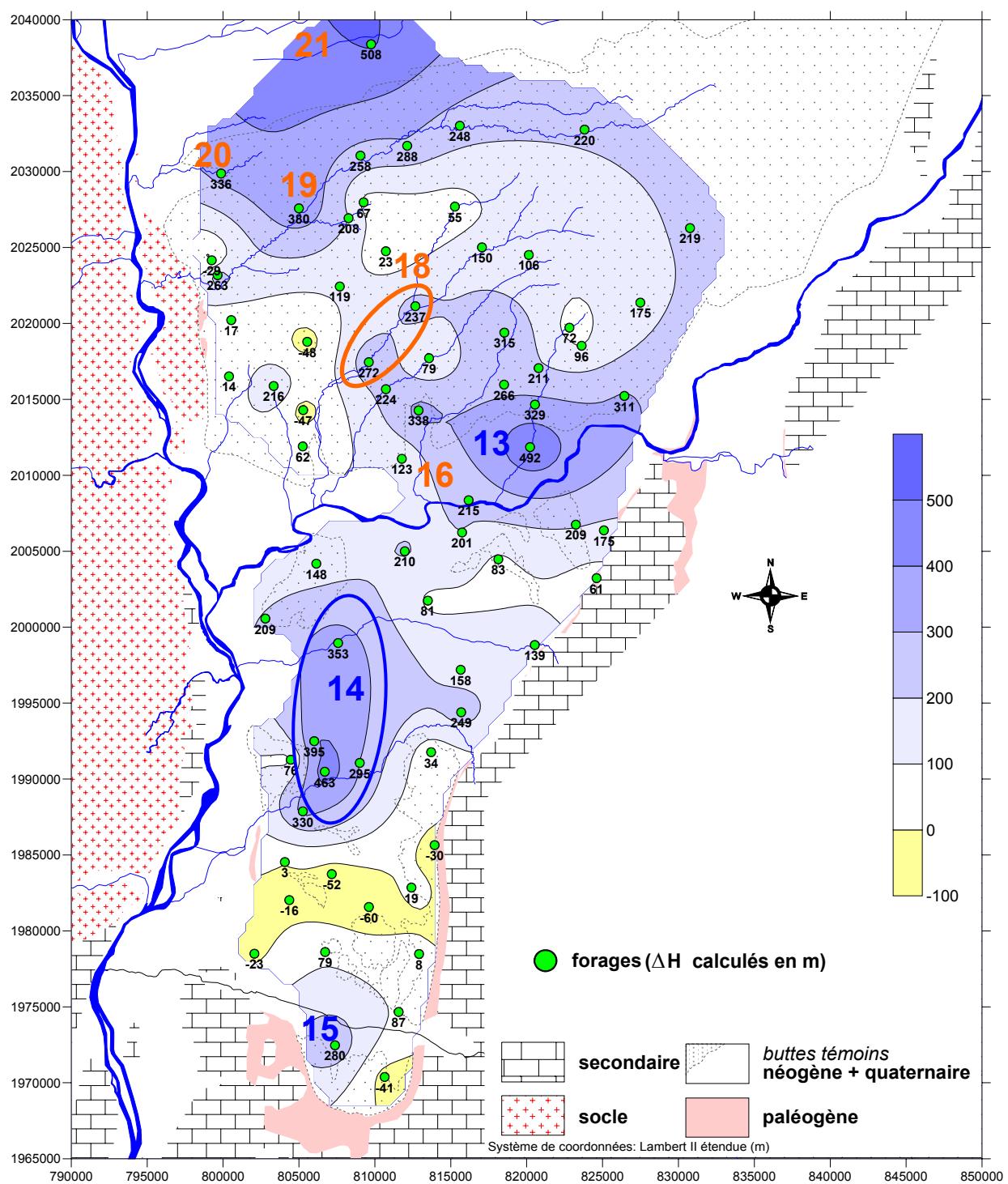


Figure 4-20: Carte des ΔH calculés pour l'aquifère néogène (incertitude ± 90 m).

4.3 CONCLUSIONS

L'étude du tritium a permis de mettre en évidence que plus de la moitié de nos échantillons est affectée par des mélanges d'eaux plus ou moins actuelles (âgées de quelques dizaines d'années tout au plus). La répartition du tritium en fonction de l'épaisseur mouillée au dessus des premières crêpines montre des origines plus ou moins proches de la recharge (famille A et B). Les modalités du transit de l'eau de la surface vers l'aquifère sont complexes entre un modèle piston et exponentiel avec des âges moyens de l'eau dans l'aquifère mesurés pour trois forages compris entre 20 et 40 ans. Par ailleurs, le tritium couplé avec les isotopes stables montre clairement l'impact de l'irrigation dans la réalimentation de l'aquifère via un stockage d'eau partiellement évaporée dans la zone non saturée.

L'utilisation des isotopes de la molécule d'eau permet de déterminer l'altitude approximative du bassin d'alimentation. Ainsi, pour les eaux actuelles ou subactuelles, l'alimentation de l'aquifère se situe à une altitude proche de celle des forages échantillonnés. L'alimentation de l'aquifère molassique de la plaine de Valence par un réseau karstique de la retombée anticlinale du Vercors est négligeable mais des pertes de rivières issues de ce massif ont été mises en évidence à leurs débouchés sur les terrains tertiaires. Les isotopes de la molécule d'eau ont mis en évidence quelques secteurs dont la particularité a déjà été soulignée par la géochimie. Ainsi, les secteurs 13 et 14, dénués de tritium, montrent soit une alimentation en altitude, soit une eau infiltrée lors de la dernière glaciation *i.e.* avant 15000 ans BP. Pour lever cette ambiguïté, nous avons échantilloné et analysé les eaux de l'aquifère néogène à l'aide du radiocarbone. Dans le chapitre suivant, nous exposons les résultats de la datation de l'eau par cet isotope.

Chapitre 5 Datation des eaux

L'utilisation des isotopes du carbone est devenue un outil classique dans toute étude hydrogéologique dont l'objectif est d'estimer le renouvellement de la ressource en eau. Cet outil se base essentiellement sur la décroissance radioactive du carbone 14 dissous dans l'eau. Cette technique de datation des eaux souterraines par le carbone 14 a été utilisée avec succès pour la première fois par Münnich en 1957 in Geyh (2000) ; Mook *et al.*, (2000). Et, depuis plus de quarante ans, cette technique s'est considérablement développée et améliorée.

Nous présenterons tout d'abord les principes de la datation des eaux par le radiocarbone. La signature isotopique des pôles de mélange et les teneurs en isotopes du carbone minéral total dissous (CMTD) seront décrites. Nous appliquerons les modèles de corrections de l'âge de l'eau et discuterons de leurs cohérences par rapport aux indicateurs de temps de séjour définis au cours des chapitres précédents et de la délicate utilisation des modèles basés sur le carbone 13. Nous proposerons un nouveau modèle géochimique tenant compte de la dissolution de la dolomite et de la précipitation de la calcite.

5.1 PRINCIPES

Cet outil repose sur l'incorporation du carbone 14 atmosphérique dans l'eau percolant vers la nappe. Lors du transfert de l'eau au travers de la zone non saturée, la teneur en carbone 14 dissous se trouve largement influencée par le CO₂ du sol et par la dissolution des carbonates provenant de la matrice. L'influence de la matrice carbonatée continuera de jouer sur la teneur isotopique lors du transit de l'eau au niveau de la zone saturée. Il apparaît que, lors de son transit entre la surface et le point de prélèvement, la teneur isotopique de l'eau est grandement perturbée par divers phénomènes d'échanges isotopiques et chimiques avec le sol puis la matrice aquifère. Ces échanges conduisent le plus souvent à une dilution des teneurs isotopiques en carbone, qu'il convient d'identifier et de quantifier, dans la mesure du possible. Cette dilution conduit à un vieillissement artificiel des eaux mais, en tenant compte de ces perturbations, il est possible de dater des eaux jusqu'à 25 à 30000 ans (Fontes, 1985).

5.1.1 Le carbone 13

Le carbone 13 est la deuxième forme stable du carbone. Son abondance naturelle est de 1,1 % alors que celle du carbone 12 est de 98,9 %³⁷. Comme tous les isotopes stables, la mesure du carbone 13 se réfère à un standard international PDB (Pee Dee Belemnite). Il s'agit de carbonate marin du Crétacé de la formation Pee Dee d'Amérique du Nord. La teneur en carbone 13 s'exprime donc toujours sous cette forme: $\delta^{13}\text{C}$ par rapport au standard (avec $\delta^{13}\text{C} = \left[\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right]_{\text{échantillon}} / \left[\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right]_{\text{PDB}} - 1$). Comme les variations naturelles des teneurs isotopiques sont faibles, les $\delta^{13}\text{C}$ se donnent en pour mille (‰).

Les principaux réservoirs du cycle de l'eau ont des abondances naturelles en carbone 13 différents.

Le **CO₂ atmosphérique** a des teneurs actuelles en $\delta^{13}\text{C}$ d'environ -8 ‰ (Clark *et al.*, 1997).

Le **CO₂ biogénique**, résultant de la respiration racinaire et de l'oxydation de la matière organique par les bactéries, va être marqué différemment selon le type de cycle photosynthétique des plantes. On distingue ainsi trois cycles principaux:

- le cycle de Calvin ou cycle C₃. Il concerne 85 % des espèces végétales et la quasi-totalité des plantes occupant les régions tempérées. Les teneurs en $\delta^{13}\text{C}$ sont comprises entre -24 et -30 ‰ avec une moyenne proche de -27 ‰ (Vogel, 1993);
- le cycle de Hatch-Slack ou cycle C₄. Les espèces fonctionnant avec ce cycle ne représente que 5 % des espèces végétales, mais dominent largement dans les écosystèmes chauds et humides tels que les prairies tropicales. Cependant, quelques espèces comme le maïs et le sorgho sont largement exploitées en agriculture sous climat tempéré. Les teneurs en $\delta^{13}\text{C}$ sont comprises entre -10 et -16 ‰ avec une moyenne proche de -12.5 ‰ (Vogel, 1993);

³⁷ Un résidu ε correspond à l'abondance du carbone 14.

- le cycle mixte ou CAM (Crassulacean Acid Metabolism). Il est utilisé par 10 % des plantes en écosystème désertique, cactées par exemple. Les teneurs en $\delta^{13}\text{C}$ sont intermédiaires entre les deux familles précédentes, proches de -17 ‰.

La **matière organique fossile**, comme le lignite, possède une teneur isotopique en $\delta^{13}\text{C}$ proche de -27 ‰. Les processus d'évolution de la matière organique fossile peuvent faire considérablement varier leur teneur en $\delta^{13}\text{C}$, notamment lors de la production de gaz naturels très appauvris comme le méthane (Mook *et al.*, 2000).

Enfin, les **carbonates d'origine marine** ont leurs teneurs autour de 0 ± 2 ‰ (Clark *et al.*, 1997). Les teneurs naturelles en carbone 13 des principaux réservoirs faisant partie du cycle de l'eau sont résumées sur le schéma suivant:

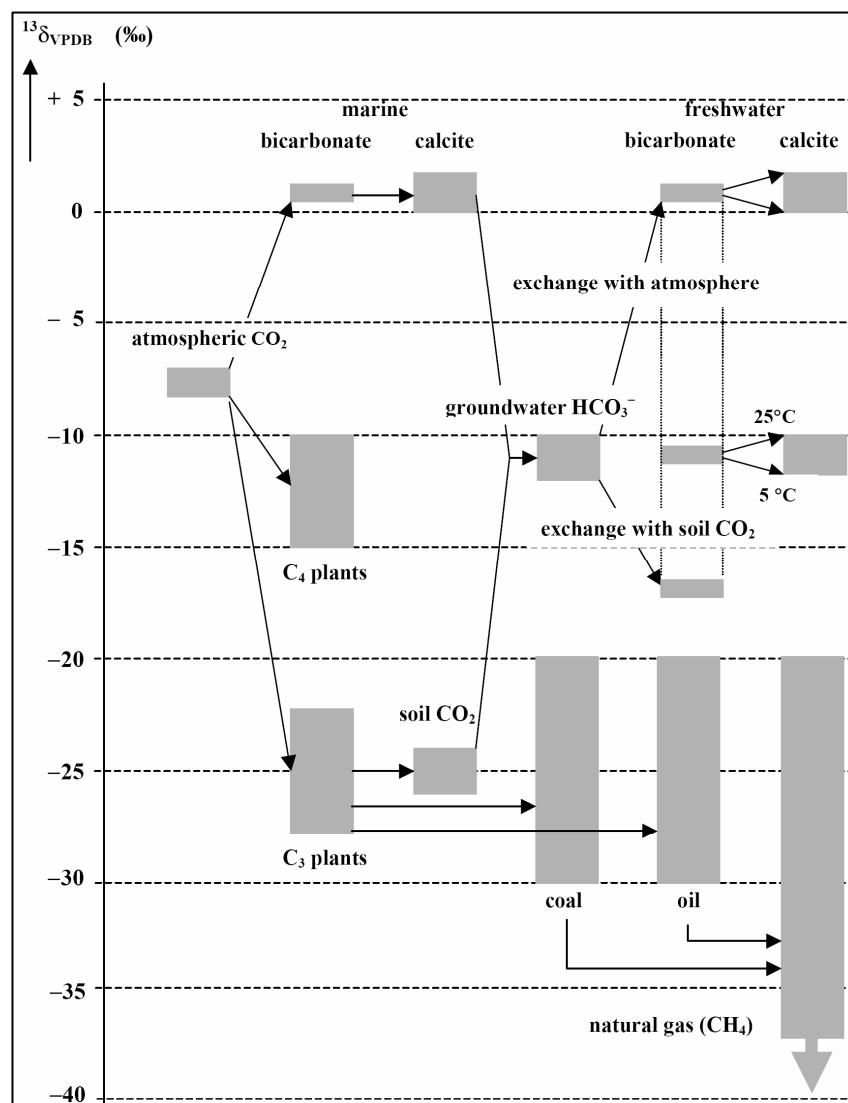


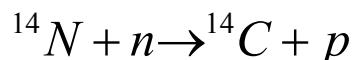
Figure 5-1: Schéma des variations naturelles en carbone 13 dans le cycle hydrologique (Mook *et al.*, 2000).

5.1.2 Le carbone 14

Le carbone 14 (^{14}C) ou radiocarbone est la troisième forme de carbone existant. Celui-ci est radioactif et son abondance naturelle représente seulement $10^{-10}\%$ de la masse totale de carbone.

5.1.2.1 Origine du carbone 14

La très grande majorité du carbone 14 est produite naturellement dans l'atmosphère. Celui-ci provient de l'interaction entre l'azote gazeux atmosphérique et le rayonnement cosmique dans la zone située entre la stratosphère et troposphère vers 12km d'altitude (Mook *et al.*, 2000).



Cette réaction nécessite un neutron thermique qui provient de la collision du rayonnement cosmique de haute énergie et des molécules présentes dans la haute atmosphère. Le radiocarbone ainsi formé est rapidement oxydé en $^{14}\text{CO}_2$ où il est mélangé avec les formes stables du dioxyde de carbone. En dehors de l'origine atmosphérique du radiocarbone, il existe deux autres origines qui proviennent:

- des essais thermonucléaires atmosphériques des années 50-60 (origine anthropique);
- production radiogénique liée à l'activation de l'azote 14 via la fission *in situ* d'uranium ou d'autres éléments. Dans les eaux souterraines, ce dernier type de production est souvent négligeable.

5.1.2.2 Décroissance radioactive

La désintégration du radiocarbone (atome père) produit de l'azote stable (atome fils) et un rayonnement β^- , selon la réaction $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} + \beta^-$. C'est ce rayonnement β^- , détecté par comptage, qui permet de quantifier la teneur en isotope père.

Il est donc soumis à la loi statistique de la décroissance radioactive suivant l'abondance de l'atome père par rapport à l'atome fils. Cette loi s'écrit, sous sa forme exponentielle, $N = N^0 \cdot e^{-\lambda t}$ avec N étant le nombre de radionucléides pères à l'instant t , N^0 étant le nombre de radionucléides pères à l'instant initial et λ est le taux de décroissance du radionucléide par unité de temps.

En pratique, on utilise la notion de demi-vie à la place du taux de décroissance λ . Cette demi-vie se définit comme la durée pour laquelle la quantité de radionucléides a baissé de moitié:

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}. \text{ Dans le cas du radiocarbone, la demi-vie est égale à } 5730 \pm 40 \text{ ans (Godwin, 1962)}$$

in Mook *et al.*, (2000)). De même, on utilise le terme d'activité A à la place de N , avec la relation $A = \lambda \cdot N$.

Les teneurs en radiocarbone s'expriment ainsi en terme d'activité sous la forme d'un pourcentage de carbone moderne (pcm). Ce pourcentage se rapporte donc à un standard qui est le "carbone moderne". Son activité se définit comme étant égale à 95% de l'activité de l'acide oxalique pour l'année 1950. Ce standard est détenu par le "National Bureau of Standards" américain.

5.1.2.3 Utilisation en hydrogéologie

L'intérêt de ce radioisotope, pour les eaux souterraines, provient d'une part de son incorporation via les équilibres calco-carboniques dans les eaux d'infiltration et d'autre part de sa demi-vie. Le radiocarbone permet donc de dater des eaux jusqu'à 30000 ans à partir de l'équation suivante:

$$t = \frac{5730}{\ln 2} \cdot \ln\left(\frac{A_0}{A_t}\right) \quad \text{Équation 5-1}$$

avec:

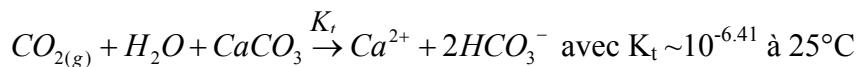
- A_0 : activité initiale en ^{14}C du carbone minéral total dissous lors de l'infiltration vers l'aquifère;
- A_t : activité résiduelle en ^{14}C du carbone minéral total dissous au moment du prélèvement.

Cette limite de 30000 ans dans les aquifères carbonatés, a pour cause les perturbations de l'activité initiale A_0 lors de son cheminement (Fontes, 1985). En effet, de nombreuses réactions géochimiques (dissolution de la calcite ou de la dolomite) ou les échanges isotopiques avec la matrice aquifère peuvent aboutir à un vieillissement artificiel des eaux par dilution du carbone 14.

5.1.3 Principe du traçage isotopique du Carbone Minéral Total Dissous (C.M.T.D.)

Pour permettre la datation de l'eau grâce à la mesure de la teneur en radiocarbone des eaux souterraines, il faut connaître l'incorporation du $^{14}CO_{2(g)}$ dans le cycle de l'eau. Nous avons vu que le $^{14}CO_{2(g)}$ se retrouve largement dilué dans l'atmosphère par ses formes stables. Quelque soit sa forme, une partie du dioxyde de carbone va se retrouver dissous dans l'océan, l'autre partie va être assimilée par la biosphère terrestre et être incorporée à la matière organique. Cette dernière sera minéralisée dans le sol et se retrouvera finalement sous forme de dioxyde de carbone qui sera incorporé aux eaux souterraines lors de l'infiltration des eaux de pluie vers la zone saturée de l'aquifère (cf. Figure 5-4).

L'infiltration des eaux de pluie dans le sol, encore peu chargé en CO_2 , se retrouve soumise à une pression partielle de CO_2 du sol de 10 à 300 fois supérieurs à celle de l'atmosphère. Celle-ci provient de l'activité biogénique du sol via la dégradation de la matière organique par les bactéries et aussi de la respiration racinaire. Nous avons vu au chapitre géochimie que ce sont les équilibres calco-carboniques qui permettent l'incorporation du $CO_{2(g)}$ selon la réaction principale de dissolution de la calcite:



Selon cette dernière réaction, la dissolution des carbonates est donc fonction de la pression partielle de $CO_{2(g)}$. L'évolution du système calco-carbonique qui en découle dans les eaux souterraines, dépend du degré d'ouverture de la solution vis-à-vis du $CO_{2(g)}$ du sol.

5.1.3.1 Degré d'ouverture de la solution et marquage isotopique

Dans le cas d'un système ouvert sur le $CO_{2(g)}$ du sol, la dissolution de la calcite se produit avec un apport constant de $CO_{2(g)}$. Le sol est alors considéré comme un réservoir infini où il se passe un échange continu entre le $CO_{2(g)}$ du sol et le Carbone Minéral Total Dissous (CMTD). Les teneurs en CMTD seront élevées et la signature isotopique de la solution sera donc imposée par la phase gazeuse, qui a une composition isotopique constante. Ce cas idéal se passe généralement dans la zone non saturée de l'aquifère où il y a coexistence des phases gazeuse et liquide.

Dans un système fermé sur le $CO_{2(g)}$ du sol, les eaux qui ont traversé le sol atteignent la zone saturée avant que théoriquement les phénomènes de dissolution ne commencent. Les équilibres calco-carboniques sont conditionnés par la teneur en CO_2 acquise lors de l'infiltration. Les teneurs en CMTD sont alors constantes quelque soit le pH de la solution. La signature isotopique de l'eau est liée d'une part à la phase gazeuse du sol, lors de l'infiltration, et d'autre part à la dissolution de l'encaissant.

Les systèmes fermé et ouvert sont des modèles théoriques idéaux. Les eaux souterraines évoluent dans des conditions intermédiaires. En général, la dissolution des carbonates débute en système ouvert, dans la zone non saturée, puis se poursuit, dans la zone saturée, en système fermé.

5.1.3.2 Le fractionnement isotopique

Lors de l'incorporation du CO_2 gazeux dans l'eau et lors de la dissolution de la calcite, des changements de phases gaz-liquide ou solide-liquide interviennent et aussi des phénomènes de dissociation au sein de la phase liquide. Ainsi pour tout changement de phase et réaction, pour une température donnée, chaque équilibre s'accompagne d'un fractionnement isotopique

$\varepsilon_{(1/2)}$ entre les teneurs isotopiques d'une phase 1 vers une phase 2 lié à R_1 et R_2 , rapports d'abondance isotopique de chaque phase, par la relation³⁸ $\varepsilon_{12} = R_1 - R_2$.

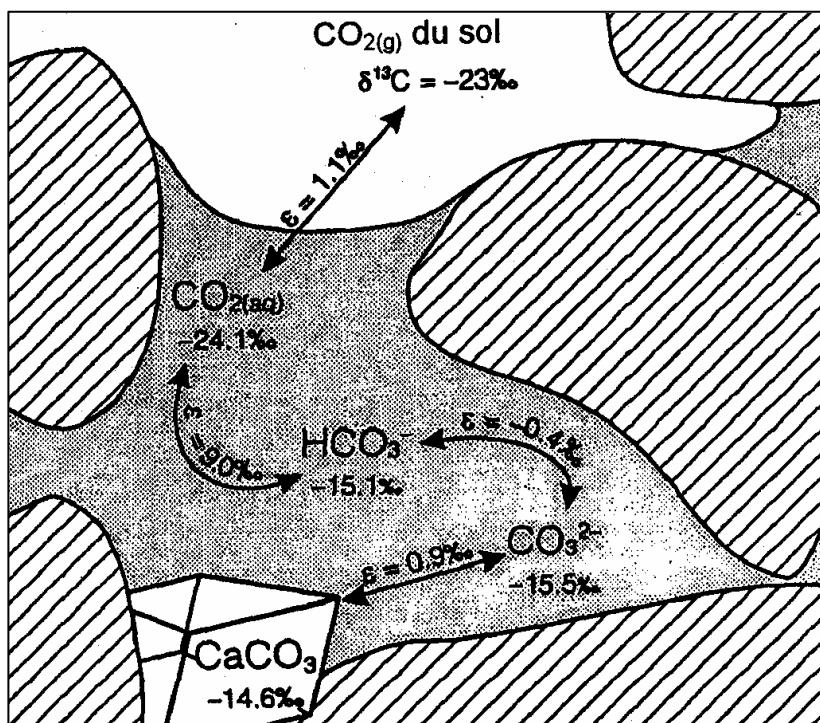


Figure 5-2: Fractionnement isotopique à l'équilibre du carbone 13 à 25°C (Clark *et al.*, 1997).

Ce fractionnement isotopique est particulièrement marqué pour le carbone 13 entre le $\text{CO}_{2(g)}$ du sol et le CMTD (figure 5-2). Ce fractionnement isotopique ε (exprimé en ‰) est deux fois plus important pour le carbone 14 que pour le carbone 13 mais exprimé en % ce coefficient est de 0,2 (Olive, 1998). Lors du passage du $\text{CO}_{2(g)}$ biogénique à la dissociation en bicarbonates et carbonates, les fractionnements isotopiques interviennent surtout sur le carbone 13. Comme on a vu précédemment, la répartition entre les différentes espèces carbonatées dans l'eau dépend du pH. Ainsi, le pH contrôlera la teneur isotopique du CMTD.

Par ailleurs, ces fractionnements sont thermodépendants et ont été déterminés expérimentalement (figure 5-3).

³⁸ $\varepsilon_{12} = -\varepsilon_{21}$

t (°C)	${}^{13}\varepsilon_{g/b}$ ¹⁾ (‰)	${}^{13}\varepsilon_{a/g}$ ²⁾ (‰)	${}^{13}\varepsilon_{a/b}$ ³⁾ (‰)	${}^{13}\varepsilon_{c/b}$ ⁴⁾ (‰)	${}^{13}\varepsilon_{s/b}$ ⁵⁾ (‰)	${}^{13}\varepsilon_{s/g}$ ⁶⁾ (‰)
0	-10.83	-1.18	-12.00	-0.65	-0.39	+10.55
5	-10.20	-1.16	-11.35	-0.60	-0.11	+10.19
10	-9.60	-1.13	-10.72	-0.54	+0.15	+9.85
15	-9.02	-1.11	-10.12	-0.49	+0.41	+9.52
20	-8.46	-1.09	-9.54	-0.44	+0.66	+9.20
25	-7.92	-1.06	-8.97	-0.39	+0.91	+8.86
30	-7.39	-1.04	-8.42	-0.34	+1.14	+8.60
35	-6.88	-1.02	-7.90	-0.29	+1.37	+8.31
40	-6.39	-1.00	-7.39	-0.25	+1.59	+8.03

Figure 5-3: Fractionnement à l'équilibre du carbone du système $\text{CO}_2\text{-HCO}_3\text{-CO}_3\text{-CaCO}_3$. La valeur de $\epsilon_{y/x}$ représente le fractionnement de l'espèce y par rapport à l'espèce x. Dans les équations, T est donné en ° Kelvin et g= $\text{CO}_{2(g)}$; a= CO_2 dissous ou H_2CO_3 ; b= HCO_3^- ; c= CO_3^{2-} et s= $\text{CaCO}_3(s)$ (Mook et al., 2000 modifié).

5.1.3.3 Marquage et fractionnement isotopique selon le degré d'ouverture du système

La signature isotopique du CMTD est liée aux équilibres calco-carboniques qui dépendent de la température et du pH. Ainsi, une relation existe permettant par un bilan de masse isotopique de relier toutes les espèces carbonatées. Cette relation est différente selon le degré d'ouverture du système et elle est pondérée par des facteurs de fractionnement.

- ❖ Dans le cas d'un **système ouvert**, il y a un équilibre isotopique avec le $CO_{2(g)}$ du sol.

➤ Le bilan en carbone 13 est:

$$\delta^{13}C_{CMTD} = \frac{(H_2CO_3)}{(CMTD)} \delta^{13}C_{H_2CO_3} + \frac{(HCO_3^-)}{(CMTD)} \delta^{13}C_{HCO_3^-} + \frac{(CO_3^{2-})}{(CMTD)} \delta^{13}C_{CO_3^{2-}}$$

Équation 5-2

En prenant, $a = (H_2CO_3)$; $b = (HCO_3^-)$; $c = (CO_3^{2-})$, $g = CO_{2(g)}$ et $a+b+c = (CMTD)$

$$\delta^{13}C_{H_2CO_3} = \varepsilon_{ag} + \delta^{13}C_{CO_{2(g)}}$$

$$\delta^{13}C_{HCO_3^-} = \delta^{13}C_{CO_{2(g)}} - \varepsilon_{gb}$$

$$\delta^{13}C_{CO_3^{2-}} = \varepsilon_{cg} + \delta^{13}C_{CO_{2(g)}} \quad \text{avec } \varepsilon_{cg} = \varepsilon_{cb} - \varepsilon_{gb} = 8616/T - 21,37 \text{ \%}^{39}$$

L'équation précédente s'écrit:

$$\delta^{13}C_{CMTD} = \delta^{13}C_{CO_{2(g)}} + \frac{1}{(CMTD)} [a \cdot \varepsilon_{ag} - b \cdot \varepsilon_{gb} + c \cdot \varepsilon_{cg}]$$

Équation 5-3

➤ De la même manière le bilan en carbone 14 est:

$$A^{14}C_{CMTD} = A^{14}C_{CO_{2(g)}} + \frac{0,2}{(CMTD)} [a \cdot \varepsilon_{ag} - b \cdot \varepsilon_{gb} + c \cdot \varepsilon_{cg}]$$

Équation 5-4

- ❖ En **système fermé**, il ne se produit aucun échange de matière entre le CMTD et le $CO_{2(g)}$ du sol.

³⁹ cf. figure 5-3

Seul un mélange chimique entre le $CO_{2(g)}$ du sol et les carbonates de la matrice, où les fractionnements isotopiques sont négligeables, intervient (Olive, 1998). En effet, la mise en solution des espèces carbonatées suppose deux étapes. Dans un premier temps, il y a mise en solution du $CO_{2(g)}$ du sol lors de l'infiltration, puis après fermeture, il y a mise en solution des carbonates de la matrice (Emblanch, 1997). La mise en solution des carbonates de la matrice suit la réaction: $H_2CO_{3(sol)} + CaCO_{3(s)} \rightleftharpoons 2.HCO_3^- + Ca^{2+}$. Suivant cette réaction à l'équilibre, le bilan de masse aboutit à un mélange 1:1 entre un carbone issu du sol et l'autre issu de la matrice (Clark *et al.*, 1997).

En reprenant les notations précédentes:

- **a**: $H_2CO_{3(sol)}$ a pour marquage isotopique le $CO_{2(g)}$ du sol;
- **c** : CO_3^{2-} a pour marquage isotopique la matrice carbonatée, ici la calcite;
- **b** : HCO_3^- est donc composé d'un mélange 1:1 de ces deux pôles distincts.

Le bilan en carbone 13 s'écrit donc:

$$\delta^{13}C_{CMTD} = \frac{1}{2.(CMTD)} [(b + 2a) \cdot \delta^{13}C_{CO_{2(g)}} + (b + 2c) \cdot \delta^{13}C_{CaCO_{3(s)}}]$$

Équation 5-5

Le bilan en carbone 14 s'écrit de la même manière:

$$A^{14}C_{CMTD} = \frac{1}{2.(CMTD)} [(b + 2a) \cdot A^{14}C_{CO_{2(g)}} + (b + 2c) \cdot A^{14}C_{CaCO_{3(s)}}]$$

Équation 5-6

Dans les équations 5-5 et 5-6, le dernier terme peut être négligé dans la plupart des cas. En effet, l'activité carbone 14 des carbonates de la matrice est morte et les teneurs en carbone 13 de la matrice carbonatée sont très proches de 0 %. Si la teneur en carbone 13 est significativement différente de 0 alors le dernier terme de l'équation 5-5 ne peut plus être négligé.

L'évolution des isotopes du carbone entre l'atmosphère et les eaux souterraines a été résumée de manière simplifiée dans le cas d'un aquifère carbonaté sur la figure 5-4. Celle-ci montre comment le carbone 14 se retrouve incorporé dans la matière organique puis dans les eaux souterraines. Pour le carbone 13, les différents réservoirs apparaissent ainsi que le fractionnement isotopique marqué entre le $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_{2(g)}\text{sol}}$ et le $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$. Enfin, les différences théoriques entre un système ouvert idéal et un système fermé y sont signalées.

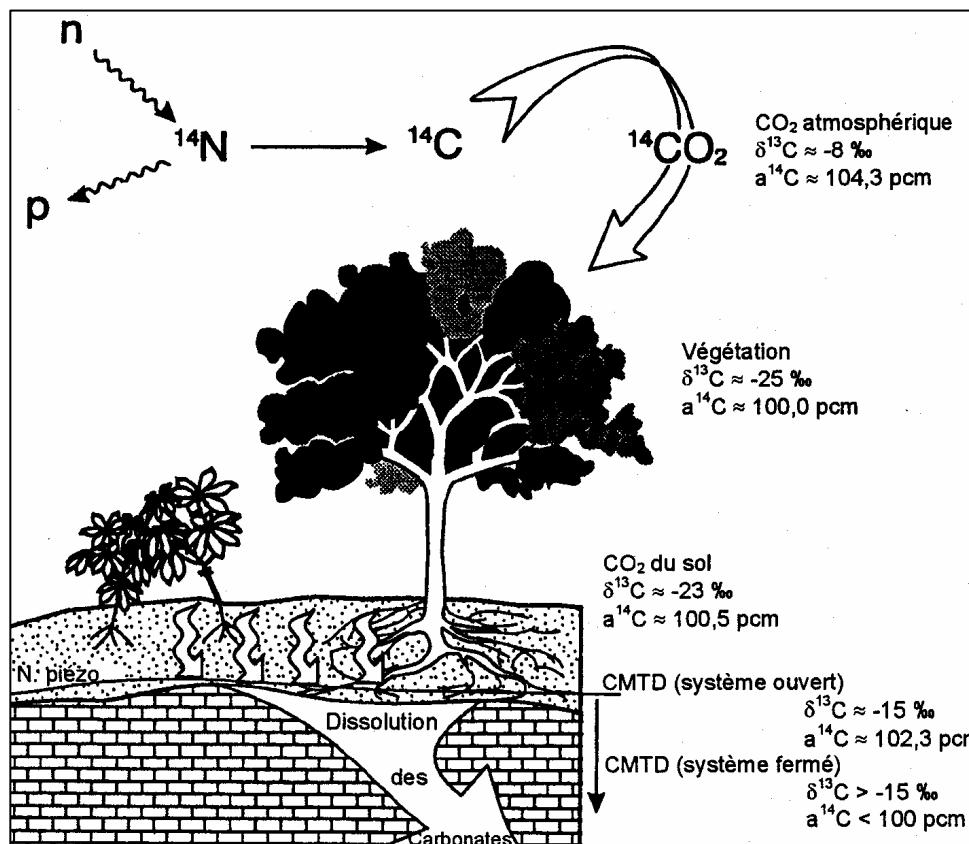


Figure 5-4: Teneurs et cheminement du carbone 13&14 depuis l'atmosphère jusqu'aux eaux souterraines (Clark *et al.*, 1997 modifié).

5.2 LES EAUX DE L'AQUIFERE NEOGENE

5.2.1 Signatures isotopiques des eaux et réservoirs

Les deux pôles de mélanges sont le CO_2 du sol et la matrice carbonatée.

5.2.1.1 Le CO₂ biogénique du sol

Nous n'avons pas procédé à la mesure de la teneur isotopique du CO₂ du sol sur la zone d'étude mais utilisé les résultats de travaux réalisés dans le Sud-Est de la France.

Carbone 13

Nous avons vu que le CO₂ biogénique du sol dépend du type de couvert végétal. Le climat de la région étant tempéré, les végétaux ont donc un cycle photosynthétique de type C₃. Les teneurs naturelles devraient être proches de -27 ‰. Toutefois, de nombreux travaux ont montré que ce CO₂ biogénique présentait toujours des teneurs enrichies de +3 à +5 ‰ par rapport au CO₂ des végétaux (Cerling *et al.*, 1991; Cerling *et al.*, 1993). Les études dans la région de Montélimar (Bonté, 2006), les monts de Vaucluse (Emblanch, 1997; Batiot, 2002) et dans la région du Léman (Olive *et al.*, 2005) montrent des teneurs proches de -21 à -22 ‰. Pour notre étude, nous prendrons une valeur du δ¹³C du sol égale à -21,5 ‰.

Carbone 14

Nous prendrons par convention une activité carbone 14 du CO₂ atmosphérique de 100 pcm. Cette convention a l'avantage de nous affranchir des variations historiques de l'activité radiocarbone de l'atmosphère (Huneau, 2000). En effet, les teneurs atmosphériques en radiocarbone ont largement fluctué par le passé. Les causes sont d'une part, les fluctuations du flux cosmolégerique de haute énergie qui baigne la Terre et du champ magnétique terrestre et d'autre part, l'activité humaine qui a relargué une grande quantité de carbone "mort" dans l'atmosphère à partir du milieu du 19^{ème} siècle. Les essais thermonucléaires de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle ont, au contraire, injecté dans l'atmosphère jusqu'à 200 pcm d'activité radiocarbone en 1963 (Kalin, 1999). Pour les eaux actuelles, nous verrons que cette dernière influence est très significative.

Ainsi, en adoptant cette simplification, on parlera d'âge radiocarbone et non d'âge calendaire. Pour déterminer l'âge calendaire de l'eau, il faudra prendre en considération les fluctuations passées des teneurs atmosphériques en radiocarbone. Ainsi, il existe de nombreux travaux

proposant des courbes de calibration du radiocarbone basées sur l'étude des coraux et de la dendrochronologie (figure 5-5).

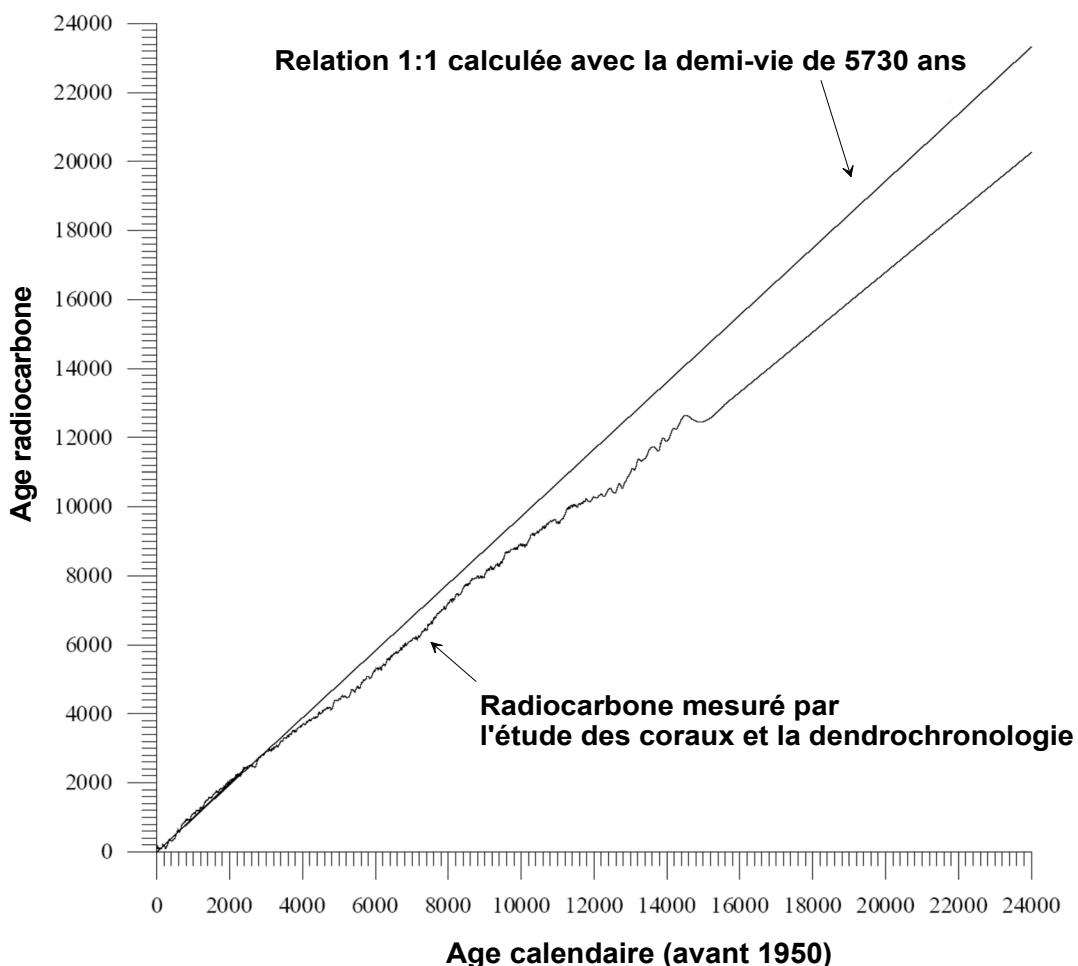


Figure 5-5: Variation atmosphérique du radiocarbone jusqu'à 24000 ans BP (Stuiver *et al.*, 1998 modifié).

5.2.1.2 La matrice carbonatée de l'aquifère

Carbone 13

Les teneurs fréquemment rencontrées dans les sédiments carbonatés marins sont en général comprises entre -2 et +2 ‰ (Clark *et al.*, 1997). Néanmoins, pour connaître la gamme de variation des teneurs en carbone 13 de la matrice, nous avons procédé à quelques analyses d'échantillons de cutting de forages et d'affleurements (tableau 5-1).

n°	Localisation	X en m (lambert 2 étendu)	Y en m (lambert 2 étendu)	Type échantillon	Description	Niveau ou âge	Profondeur (m)	$\delta^{13}\text{C}$ vs PDB
1	Perroux	821270	2012900	C	Molasse fine	Langhien-Serravalien	56-62	-4,37
2	Bourg-de-Péage	815030	2006935	C	Molasse fine	Langhien-Serravalien	45-51	-2,35
3	Chantemerle-les-Blés	799945	2017695	C	Molasse moyenne à graveleuse	Langhien-Serravalien	30-66	-5,13
4	Montchenu	811450	2022160	A	Molasse fine à moyenne	Langhien-Serravalien		-4,15
5	La Baume Cornillane	815320	1986430	A	Molasse grossière + débris coquillier	Burdigalien?		-2,07
6	La Baume Cornillane	815070	1981750	A	Bloc de calcaire Urgonien	Oligocène ⁴⁰	0,58	
7	St Barthelemy de Vals	799255	2021860	C	Sable marneux	Oligocène	10-15	-3,55
8	Barbières	821595	1998610	A	Calcaire Urgonien	Barrémio-Bédoulien		-1,24

A: affleurement C: cutting

Tableau 5-1: Teneurs en carbone 13 d'échantillons représentatifs de la matrice aquifère.

Les analyses présentées dans ce tableau indiquent une valeur moyenne de -2,8 ‰. Cependant, comme les eaux de l'aquifère étudié circulent exclusivement, en dehors de quelques points particuliers, dans la molasse miocène, la teneur moyenne des échantillons "molasse" est de -3,6 ‰ vs PDB (moyenne échantillon 1 à 5).

Cette valeur est légèrement plus négative que celle rencontrée habituellement dans les sédiments carbonatés marins. Le milieu de dépôt ayant été largement marin lors de la sédimentation sauf pour le Burdigalien et le Tortonien supérieur (Demarcq, 1970; Jeannolin, 1985; Lesueur *et al.*, 1990; Rubino *et al.*, 1990), la cause de ces teneurs plus appauvries

⁴⁰ Il s'agit de blocs de calcaire d'âges urgoniens, éboulés lors de la mise en place de la fosse de Valence (cf. Chapitre 1).

pourrait être une double origine des carbonates. Il se peut que le sédiment primaire d'origine alpine et centralienne, déposé en milieu marin, soit proche de 0 ‰ en $\delta^{13}\text{C}$ et qu'il existe une cimentation secondaire calcaire provenant de la précipitation de calcite de l'eau. Au chapitre 3, nous avons mis en évidence pour la plupart des prélèvements de l'aquifère molassique une sursaturation vis-à-vis de la calcite. Cette cimentation secondaire aurait une teneur en carbone 13 variable comprise entre les teneurs en carbone 13 du CMTD de l'eau voisines de -12,7 ‰ enrichies de +0,5 ‰ (soit -12,2 ‰) et 0 ‰ (Edmunds *et al.*, 2000; Mook *et al.*, 2000; Aeschbach-Hertig *et al.*, 2002). La cimentation de la molasse est particulièrement importante localement (cf. Figure 2-9 où les débits spécifiques sont beaucoup plus faibles en bordure du Vercors). Il faudrait aussi tenir compte de la présence de matière organique fossile mise en évidence dans les sédiments miocènes et pliocènes (Latreille, 1969; Demarcq, 1970; Ballesio, 1972). Ce pôle isotopique secondaire et la présence de lignite peuvent avoir une influence sur les calculs de l'âge de l'eau (cf. § 5.3.3). Toutefois, nous utiliserons pour les calculs la valeur moyenne en carbone 13 de la molasse miocène car la variation des teneurs isotopiques de la molasse reste restreinte.

Carbone 14

Pour ce qui concerne l'activité en radiocarbone de la matrice, celle-ci est considérée comme nulle car les sédiments tertiaires sont supposés être composés de carbone "mort".

Un tableau récapitulatif résume les deux pôles isotopiques à l'origine du CMTD des eaux de l'aquifère (tableau 5-2).

	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} \text{‰ mesuré ou estimé}$	$A^{14}\text{C} \text{pcm estimée}$
CO ₂ biogénique du sol	-21,5	100
Matrice carbonatée	-3,6	0

Tableau 5-2: Valeurs isotopiques des pôles de mélange.

5.2.2 Teneurs en isotopes du CMTD des eaux

Sur notre zone d'étude, une campagne spécifique de prélèvements pour la datation des eaux a été effectuée par nos soins durant l'été 2004 comprenant 37 échantillons dont une source

karstique du Vercors (source Peyrus notée A). Il existait avant la mise en place de cette étude, quelques analyses isotopiques d'eaux de forages recouvrant l'aquifère néogène. On peut citer l'étude spécifique carbone 14 par le bureau d'étude CPGF de 1983 (échantillonnage en 1979) sur 6 forages des eaux de la molasse, situés au Nord de l'Isère (CPGF, 1983). Par la suite, quelques analyses ponctuelles sur des forages à but A.E.P. se sont rajoutées à l'ensemble des données isotopiques. Enfin, dans l'objectif de mettre en évidence une possible évolution de l'eau en fonction de l'exploitation de l'aquifère, une dernière campagne d'échantillonnage de 4 forages AEP anciennement échantillonnés, forages des "Petits Eynards", des "Gonnards", "Juppe" (prélèvements entre packers sur deux zones crépinées) et de "Ladevaux", a été effectuée. Sur ce vaste aquifère, 54 analyses de carbone 14 sont disponibles. Les points de prélèvements ont été reportés sur la figure 5-6 avec les activités radiocarbone correspondantes.

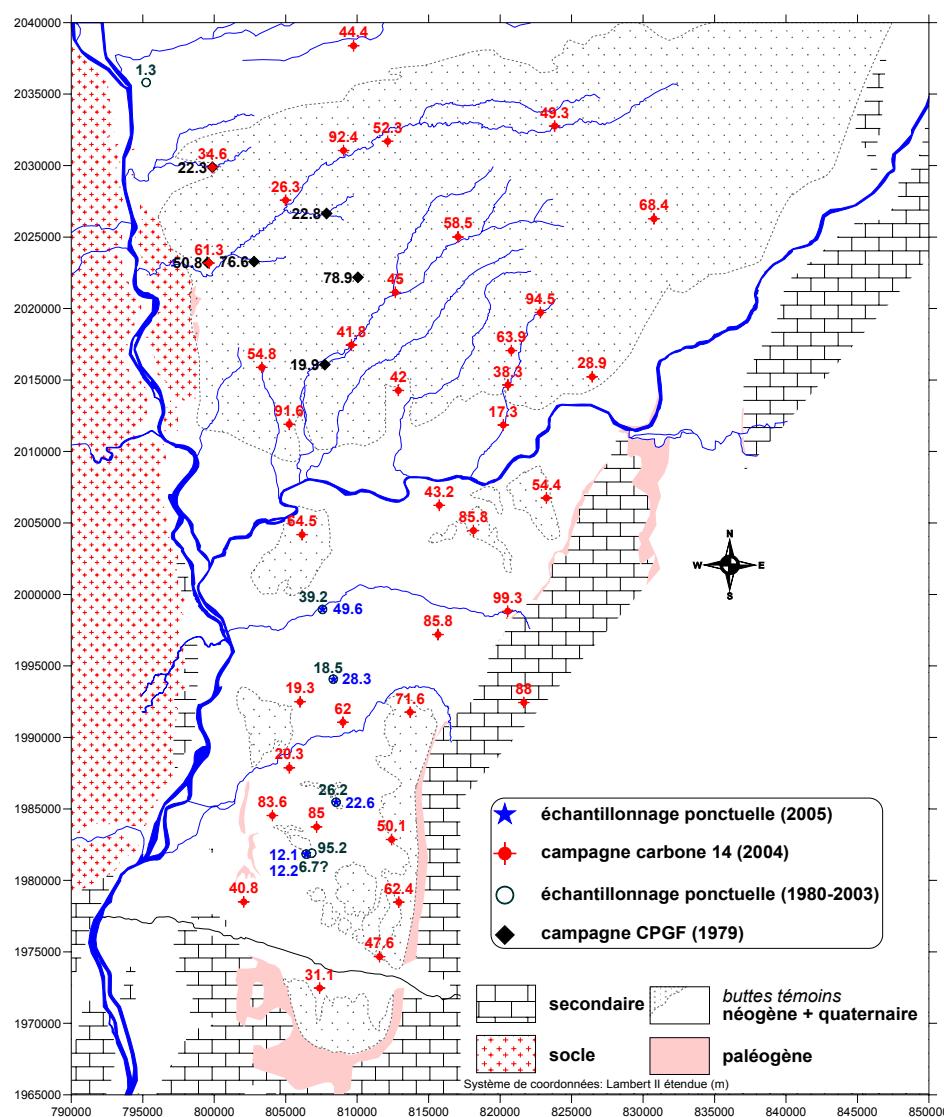


Figure 5-6: Carte des activités carbone 14 mesurées dans le bassin de Valence (pcm).

5.3 CALCULS DE L'AGE DE L'EAU

5.3.1 Définition d'un indice de temps de séjour

L'objet de ces prélèvements est de donner un âge à l'eau prélevée à partir de la mesure de son activité radiocarbone. Il existe pour cela, différents modèles de correction des âges qui ont été proposés dans la littérature, tenant compte des multiples perturbations que peut subir l'eau durant son trajet entre le sol et son point de prélèvement. Pour pouvoir comparer les différents modèles, il nous faut d'abord définir un critère de temps de séjour de l'eau dans l'aquifère. Grâce aux résultats des chapitres précédents, nous pouvons calculer un indice (i) d'âge de l'eau à partir des teneurs en magnésium, sodium, nitrate, silice et tritium. Ce calcul se base par la proposition de deux seuils de teneurs pour chaque indicateur de temps de séjour (tableau 5-3).

note	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	³ H (UT)
1	>20	>30	≤5	>25	≤2 et sous le seuil
5	10 < ≤20	10 < ≤30	5 < ≤13	20 < ≤25	1 < ≤4
10	10 ≤	≤10	>13	≤20	>4

Tableau 5-3: Formalisation des indicateurs de temps de séjour à l'aide de seuils.

Pour chaque indicateur, les deux seuils définissent trois classes pour lesquels on attribue une note: (10) pour les eaux peu ou pas évoluées, (1) pour les eaux très évoluées et (5) pour les eaux intermédiaires. L'indice (i) est égal à la somme des notes attribuées à chaque indicateur et est compris entre 5 (eaux très évoluées et âgées) et 50 (eaux actuelles). Le tableau 5-4 présente le résultat du calcul de i. La distribution de l'indice i permet de proposer le regroupement suivant:

- de 5 à 20 les eaux sont probablement anciennes (supérieures à la centaine d'années);
- de 35 à 50 les eaux sont actuelles (quelques dizaines d'années tout au plus);
- le reste correspond à des mélanges, d'âges intermédiaires entre les deux groupes précédents.

<i>n°forage</i>	<i>A</i> ¹⁴ C	$\delta^{13}\text{C}$	<i>Mg</i>	<i>Na</i>	<i>NO</i> ₃	<i>silice</i>	³ H	\pm	<i>i</i>	âges
	pcm	%o vs PDB			mg/l					
778	91.6	-13.8	8.5	5.4	74.6	14.5	16	2	50	Actuel
268	64.5	-12.1	9.6	5.9	34.0	17.7	4	1	50	Actuel
951	94.5	-13.3	6.1	3.2	13.3	15.1	11	1	50	Actuel
176	85.8	-13.5	9.3	3.5	24.1	16.2	10	0.9	50	Actuel
291	85.8	-12.4	5.9	2.8	17.7	16.3	4.9	0.9	50	Actuel
405	99.3	-13.4	5.4	2.4	15.7	13.5	10.7	0.7	50	Actuel
407	95.2	-12.2	2.6	3.0	24.5	-	2.3		45*	Actuel
1252	85.0	-12.4	10.9	4.1	57.8	17.8	4.2	0.9	45	Actuel
1288	44.4	-10.6	9.9	13.0	13.1	18.8	6.4	0.9	45	Actuel
1291	83.6	-13.0	6.3	4.9	27.1	16.6	1.8	0.8	45	Actuel
783	58.5	-12.4	9.3	3.8	3.6	16.7	4.8	0.8	41	Actuel
A	88.0	-12.7	2.2	0.7		4.3	7	0.7	41	Actuel
380	49.3	-13.1	3.5	2.6	3.0	14.6	4.6	0.6	41	Actuel
297	92.4	-13.5	3.0	2.6	8.6	12.1	3	1	40	Actuel
317	54.4	-12.4	26.3	5.1	6.8	19.0	4.2	0.9	36	Actuel
688	62.0	-9.1	9.1	4.5	9.3	19.0	2		36	Actuel
135	78.9	-10.7	3.7	3.0	3.9	18.3	2		32	Intermédiaire
736	26.3	-6.7	19.0	5.8	0.4	17.3	1	1	31	Intermédiaire
123	52.3	-8.8	11.0	7.0	1.9	13.5	2.8	0.8	31	Intermédiaire
240	62.4	-9.8	50.9	11.5	27.6	18.9	1.5	0.6	31	Intermédiaire
793	47.6	-9.7	31.3	5.7		19.6	3	1	27	Intermédiaire
164	54.8	-9.8	23.9	5.0	6.1	19.3	1.1		27	Intermédiaire
312	61.3	-12.3	17.6	10.0	3.9	19.1	1.1		27	Intermédiaire
1003	42.0	-8.9	27.2	4.0	1.1	15.9	2.2		27	Intermédiaire
172	63.9	-11.9	32.2	7.7	5.7	22.9	2	1	26	Intermédiaire
117	34.6	-8.4	23.7	7.6	3.0	18.3	1.2		23	Intermédiaire
226	39.2	-7.9	23.0	8.0	4.2	19.1	0.8		23	Intermédiaire
1232	50.1	-7.9	27.1	3.3	2.8	14.5	1.9		23	Intermédiaire
383	68.4	-13.3	13.7	6.2	1.0	27.2	3.4	0.6	22	Intermédiaire
226	49.6	-9.8	28.0	11.0	10.4	19.7	1.5		22	Intermédiaire
253	28.9	-8.9	31.6	15.2	12.2	17.9	1.3		22	Intermédiaire
399	76.6	-12.5	11.3	6.8		20.3	1.9		22	Intermédiaire
498	50.8	-9.4	16.5	5.3	1.4	23.4	1.7		22	Intermédiaire
1243	71.6	-11.9	10.1	3.9	0.9	20.8	1.4		22	Intermédiaire
227	28.3	-6.5	27.0	6.4		22.4	-		18*	Ancien
132	45.0	-9.9	24.4	6.6	1.4	21.4	1.6		18	Ancien
161	41.8	-9.0	25.0	6.0	1.9	20.5	1.9		18	Ancien
178	43.2	-10.5	42.7	6.3	2.0	22.5	1.2		18	Ancien
311	1.3	-8.1	11.0	77.0		16.3	1.8		18	Ancien
394	22.8	-7.6	17.0	6.8		25.4	1.9		18	Ancien
234	22.6	-7.6	26.2	10.6	5.5	21.5	-		17*	Ancien
234	26.2	-7.3	23.6	11.9	6.0	21.0	1.7		17	Ancien
370	20.3	-7.4	30.7	13.3	0.1	23.6	2.5		17	Ancien
315	38.3	-11.1	34.0	9.8	1.7	25.8	1.8		14	Ancien
1245	6.7	-8.1	37.0	19.0		24.8	-		13*	Ancien
1338	18.5	-5.0	36.8	12.4		31.6	1.7	0.4	13	Ancien
116	22.3	-8.8	22.6	23.6		23.4	1.7		13	Ancien
280	31.1	-9.7	32.0	41.0	8.1	23.3	1.1		13	Ancien
893	40.8	-13.2	17.9	11.7	2.0	33.1	1.8		13	Ancien
899	19.3	-5.8	36.9	11.2		22.4	1.9		13	Ancien
1245h	12.1	-7.7	40.0	13.7		-	-		9*	Ancien
1245b	12.2	-7.8	42.0	14.0		-	-		9*	Ancien
150	17.3	-9.3	37.9	14.2	0.6	25.7	1.9		9	Ancien
531	19.9	-7.5	20.9	10.2		34.5	1.7		9	Ancien

Tableau 5-4: Indice de l'âge de l'eau à partir de la géochimie et du tritium.

*i est supposé égal aux valeurs indiquées

5.3.2 Application des modèles de correction

Nous présentons brièvement les deux familles de modèles existants pour la correction de l'activité initiale A_0 . Il existe dans la littérature sept modèles basés sur deux approches différentes dans la dilution de l'activité initiale depuis la fermeture du système.

Les sept modèles⁴¹ proposés dans la littérature sont:

- le modèle de Tamers (1967);
- le modèle de Ingerson et Pearson (1964) ou appelé "modèle Pearson";
- les modèles de Fontes et Garnier (1979) "modèle F&G" et "modèle F&G eq.";
- le modèle de Evans *et al.* (1979);
- le modèle de Salem *et al.* (1980) ou appelé "modèle AIEA";
- le modèle de Eichinger (1983);
- le modèle d'Olive (1998);

La première grande famille de modèles se base sur la dilution chimique (modèles Tamers et Olive) ou isotopique (modèle Pearson) du CMTD entre deux sources (le $CO_{2(g)}$ du sol et les carbonates de la matrice aquifère). La deuxième grande famille de modèles se base sur le phénomène d'échanges isotopiques avec ou sans fractionnements isotopiques entre le CMTD, la phase gazeuse et la matrice carbonatée (modèles AIEA, F&G (+eq.), Evans et Eichinger). Nous ne rentrerons pas dans le détail de ces modèles mais une critique exhaustive de leurs avantages peut être consultée dans Fontes (1985, 1992), Clark et Fritz (1997), Olive (1998), Kalin (1999) et Geyh (2000).

Le tableau 5-5 présente les âges calculés par les différents modèles, les paramètres nécessaires à ces calculs et la typologie des groupes d'âges définie au paragraphe précédent. Il apparaît que les âges calculés sont très différents selon les modèles, mais il se distingue trois groupes de modèles pour lesquels les âges calculés sont relativement semblables. Les modèles de F&G eq. et AIEA donnent des âges très élevés proches du calcul de l'âge brut. Les modèles de

⁴¹ Nous avons situé en annexe VII les équations de ces modèles mises à notre disposition.

Tamers et Olive donnent des âges plus récents et les modèles de Pearson, F&G, Evans et Eichinger donnent des âges très jeunes à la plupart des échantillons.

n° forage	A ¹⁴ C pcm ‰ vs PDB	δ ¹³ C ‰ vs PDB	âge brut	Tamers	Pearson	F & G âges radiocarbone (ans)	F & G eq. âges radiocarbone (ans)	AIAA	Evans	Eichinger	Olive	Âges probables
778	91.6	-13.8	725	actuel	actuel	6411	2003	actuel	actuel	actuel	actuel	Actuel
268	64.5	-12.1	3625	actuel	actuel	5925	3307	actuel	actuel	actuel	actuel	Actuel
951	94.5	-13.3	468	actuel	actuel	4955	1549	actuel	actuel	actuel	actuel	Actuel
176	85.8	-13.5	1266	actuel	actuel	6529	2043	actuel	actuel	actuel	actuel	Actuel
291	85.8	-12.4	1266	actuel	actuel	4258	1378	actuel	actuel	actuel	actuel	Actuel
405	99.3	-13.4	58	actuel	actuel	3908	1087	actuel	actuel	actuel	actuel	Actuel
407	95.2	-12.2	407	actuel	actuel	5351	257	actuel	actuel	actuel	actuel	Actuel
1252	85.0	-12.4	1344	actuel	actuel	3449	1253	actuel	actuel	actuel	actuel	Actuel
1288	44.4	-10.6	6712	1646	actuel	7600	4793	actuel	actuel	actuel	2425	Actuel
1291	83.6	-13.0	1481	actuel	actuel	5316	1946	actuel	actuel	actuel	actuel	Actuel
783	58.5	-12.4	4432	actuel	actuel	8180	4595	actuel	actuel	actuel	566	Actuel
A	88.0	-12.7	1057	actuel	actuel	3284	1856	actuel	actuel	actuel	actuel	Actuel
380	49.3	-13.1	5847	657	601	600	8385	6613	471	57	1435	Actuel
297	92.4	-13.5	653	actuel	actuel	3597	1670	actuel	actuel	actuel	actuel	Actuel
317	54.4	-12.4	5033	actuel	actuel	6573	4950	actuel	actuel	actuel	535	Actuel
688	62.0	-9.1	3952	actuel	actuel	3047	17	actuel	actuel	actuel	actuel	Actuel
135	78.9	-10.7	1959	actuel	actuel	1950	247	actuel	actuel	actuel	actuel	Intermédiaire
736	26.3	-6.7	11041	5589	actuel	5105	2229	actuel	actuel	actuel	4696	Intermédiaire
123	52.3	-8.8	5358	actuel	actuel	3093	1105	actuel	actuel	actuel	actuel	Intermédiaire
240	62.4	-9.8	3899	actuel	actuel	5532	1025	actuel	actuel	actuel	actuel	Intermédiaire
793	47.6	-9.7	6137	1250	actuel	6924	3025	actuel	actuel	actuel	372	Intermédiaire
164	54.8	-9.8	4972	244	actuel	6445	1957	actuel	actuel	actuel	actuel	Intermédiaire
312	61.3	-12.3	4046	actuel	actuel	6843	3821	actuel	actuel	actuel	actuel	Intermédiaire
1003	42.0	-8.9	7172	1796	actuel	4965	2983	actuel	actuel	actuel	907	Intermédiaire
172	63.9	-11.9	3702	actuel	actuel	5930	2935	actuel	actuel	actuel	actuel	Intermédiaire
117	34.6	-8.4	8774	3764	actuel	7605	3460	actuel	actuel	actuel	2884	Intermédiaire
226	39.2	-7.9	7734	2555	actuel	5261	1642	actuel	actuel	actuel	1674	Intermédiaire
1232	50.1	-7.9	5714	461	actuel	2935	actuel	actuel	actuel	actuel	actuel	Intermédiaire
383	68.4	-13.3	3140	actuel	actuel	6973	4030	actuel	actuel	actuel	actuel	Intermédiaire
226	49.6	-9.8	5797	666	actuel	5696	2843	actuel	actuel	actuel	actuel	Intermédiaire
253	28.9	-8.9	10262	4893	184	29	7997	5959	actuel	actuel	4006	Intermédiaire
399	76.6	-12.5	2204	actuel	actuel	6705	2393	actuel	actuel	actuel	actuel	Intermédiaire
498	50.8	-9.4	5599	480	actuel	5087	1996	actuel	actuel	actuel	actuel	Intermédiaire
1243	71.6	-11.9	2762	actuel	actuel	4671	2228	actuel	actuel	actuel	actuel	Intermédiaire
227	28.3	-6.5	10436	5162	actuel	5101	886	actuel	actuel	actuel	4278	Ancien
132	45.0	-9.9	6601	1290	actuel	5809	3793	actuel	actuel	actuel	406	Ancien
161	41.8	-9.0	7211	2214	actuel	6909	3094	actuel	actuel	actuel	1337	Ancien
178	43.2	-10.5	6939	1783	actuel	7076	4557	actuel	actuel	actuel	903	Ancien
311	1.3	-8.1	35902	30540	24468	24128	32238	29807	23500	22756	29653	Ancien
394	22.8	-7.6	12222	7402	actuel	actuel	11301	5515	actuel	actuel	6526	Ancien
234	26.2	-7.3	11073	5930	actuel	7963	3702	actuel	actuel	actuel	5049	Ancien
234	22.6	-7.6	12295	7152	actuel	9497	5442	actuel	actuel	actuel	6271	Ancien
370	20.3	-7.4	13182	8172	390	33	11001	6060	actuel	actuel	7293	Ancien
315	38.3	-11.1	7934	2803	743	659	8575	6128	326	actuel	1923	Ancien
1245	6.7	-8.1	22346	17002	10932	10671	19056	16550	10193	9217	16115	Ancien
1338	18.5	-5.0	13959	8447	actuel	5506	actuel	actuel	actuel	actuel	7547	Ancien
116	22.3	-8.8	12405	7262	2106	1888	10958	7672	1464	475	6381	Ancien
280	31.1	-9.7	9656	5198	756	602	11970	6467	328	actuel	4323	Ancien
893	40.8	-13.2	7411	2741	2277	2265	11247	7937	2080	1590	1866	Ancien
899	19.3	-5.8	13600	8298	actuel	7496	1911	actuel	actuel	7414	7414	Ancien
1245b	12.2	-7.8	17392	12118	5306	4997	14064	10925	4482	3202	11235	Ancien
1245h	12.1	-7.7	17460	12148	5335	5025	13872	10953	4506	3470	11264	Ancien
150	17.3	-9.3	14504	9451	4970	4750	13791	10318	4285	3211	8572	Ancien
531	19.9	-7.5	13347	8114	750	457	10068	6524	actuel	actuel	7231	Ancien

Tableau 5-5: Comparaison des âges calculés par les modèles avec les classes d'âges définies par i.

La comparaison des âges des modèles F&G eq. et AIEA avec les eaux "Actuel" montrent de larges différences. Par exemple, ces modèles donnent un âge de plus de 1000 ans à la source karstique de Peyrus (A). Ces modèles supposent un équilibre avec la phase gazeuse du sol *i.e.* système ouvert. Le fait qu'ils ne soient pas applicables dans le bassin de Valence nous laisse penser que les eaux évolueraient à partir d'un système fermé. A l'inverse, les modèles de Pearson, F&G, Evans et Eichinger donnent des âges actuels pour des eaux du groupe "Ancien" comme par exemple le forage n° 899. La correction apportée sur A_0 semble excessive pour ces modèles. Seuls les modèles de Tamers et Olive montrent une relativement bonne adéquation entre les âges calculés et ceux estimés à partir des indicateurs de temps de séjour. Cependant, il apparaît encore des contradictions pour le groupe d'eaux actuelles et les âges calculés par ces deux modèles. Les modèles Tamers et Olive surestiment aussi probablement les âges réels.

5.3.3 Relation activité carbone 14 et teneur en carbone 13

Nous avons reporté sur la figure 5-7, les activités carbone 14 du CMTD en fonction des teneurs en carbone 13 en distinguant les groupes d'âges probables de l'eau.

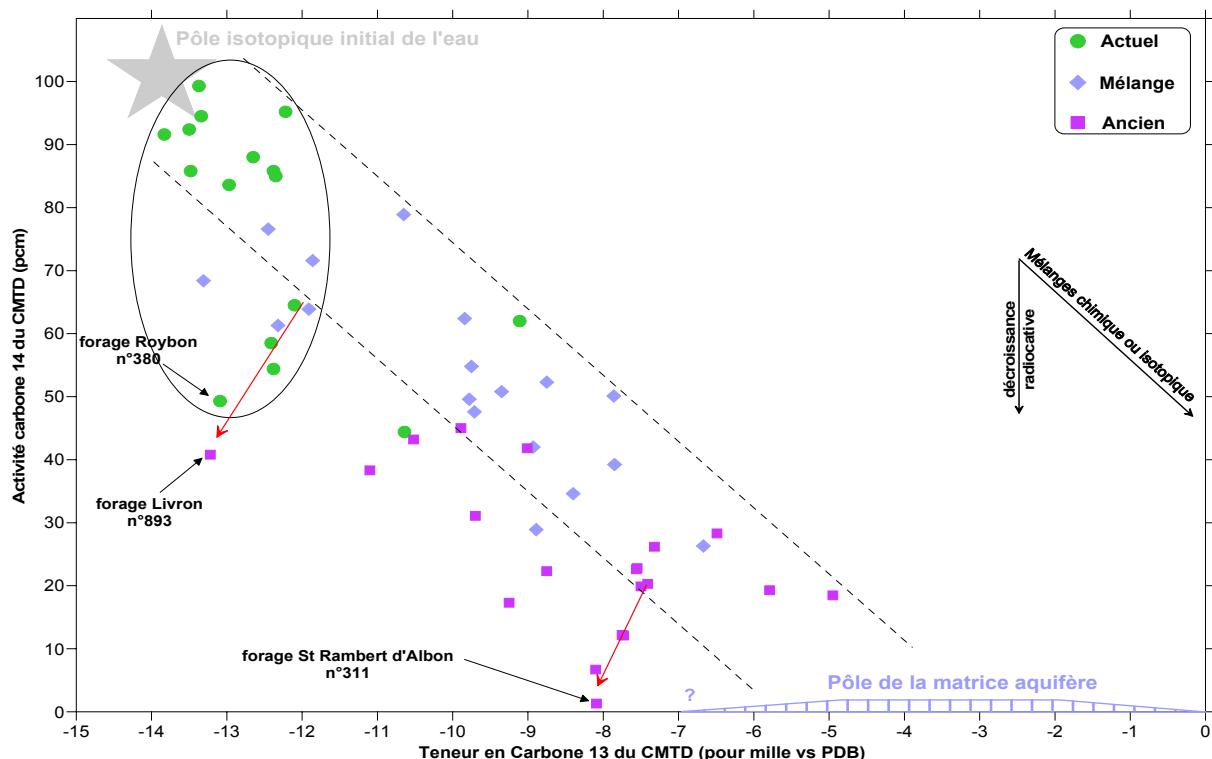


Figure 5-7: Relation $A^{14}\text{C}$ vs $\delta^{13}\text{C}$ du CMTD des eaux de l'aquifère néogène.

5.3.3.1 Ouverture du système

Sur la figure 5-7, les points entourés de l'ellipse montrent que les teneurs en carbone 13 sont constantes avec une valeur moyenne de -12,7 ‰ vs PDB, pour des activités carbone 14 situées entre 99 et 49 pcm. Cette teneur en carbone 13 est proche du pôle initial de l'eau lors de son infiltration dans la zone non saturée. Ce groupe d'eaux serait en équilibre isotopique avec le CO₂ biogénique du sol et aurait donc évolué en système ouvert. Dans ce cas, aucun modèle de correction n'est à apporter à A₀ et il suffit d'appliquer l'équation 5-1 avec A₀ = 100 pcm pour calculer les âges correspondants. Les âges obtenus vont de 60 à 6000 ans. Or dans ce groupe de points, les eaux sont actuelles ou correspondent à des mélanges. Il y a donc une forte contradiction entre les âges calculés et les âges estimés. Le forage Livron est susceptible d'avoir évolué en système ouvert et dans ce cas, l'âge de l'eau serait de 7400 ans.

Ce constat implique que les eaux échantillonnées ne sont pas en équilibre isotopique avec le CO₂ biogénique mais que la signature isotopique du CMTD provient d'un mélange entre la signature isotopique du sol et celle de la matrice carbonatée *i.e.* système fermé ou du moins intermédiaire.

Dans le cas d'un système fermé, l'activité carbone 14 du CMTD est habituellement proche de la moitié de l'activité initiale A₀, avec A₀ supposé égale à 100 pcm (cf. Figure 5-4). Nous avons calculé à partir des équations 5-3 et 5-5, le δ¹³C_{eq.} et A¹⁴C_{eq.} du sol ou équilibrant. Les équations 5-3 et 5-5 se réécrivent:

$$\delta^{13}C_{CO_{2(g)}} \equiv \delta^{13}C_{eq.} = \frac{2.(CMTD).\delta^{13}C_{CMTD} - (b + 2c).\delta^{13}C_{CaCO_{3(s)}}}{b + 2a} \quad \text{Équation 5-7}$$

$$A^{14}C_{CO_{2(g)}} \equiv A^{14}C_{eq.} = \frac{2.(CMTD).A^{14}C_{CMTD} - (b + 2c).A^{14}C_{CaCO_{3(s)}}}{b + 2a} = \frac{2.(CMTD).A^{14}C_{CMTD}}{b + 2a} \quad \text{Équation 5-8}$$

Les valeurs calculées du δ¹³C du CO₂ équilibrant (tableau 5-6) sont conformes à la teneur attendue pour le CO₂ du sol, sauf pour 3 échantillons dont les teneurs sont supérieures à -18 ‰ vs PDB. Le δ¹³C_{eq.} du sol pourrait être marqué par la végétation de type C₄ (maïs et

sorgho). Plus vraisemblablement, le $\delta^{13}\text{C}$ du CMTD serait composé d'un mélange d'eaux actuelles et anciennes, la composante actuelle pouvant être ou non marquée par le type de végétation. Le forage n°1288 (Manthes) est situé au niveau de la vallée de la Valloire et les forages n°407 et 688 sont situés au milieu de la plaine de Valence. Ces deux zones sont intensivement utilisées pour les grandes cultures telles que maïs et sorgho. L'activité carbone 14 équilibrante apparaît globalement assez différente de celle que nous avons supposée. Les activités carbone 14 équilibrantes sont bien supérieures à 100 pcm et montreraient la minéralisation de matière organique récente marquée par le pic de 1963 des essais thermonucléaires aériens (Clark *et al.*, 1997; Olive, 1998; Kalin, 1999). L'activité carbone 14 équilibrante correspondant au forage n° 1288 est certainement due à un mélange d'une eau récente et d'une eau ancienne car elle n'est pas du tout marquée par le pic de 1963.

	$\delta^{13}\text{C}$ équilibrant	$\delta^{13}\text{C}$ supposé	A ¹⁴ C équilibrant	A ¹⁴ C supposé
176	-20.0	-21.5	143	100
268	-19.2	-21.5	118	100
291	-19.5	-21.5	155	100
297	-22.0	-21.5	172	100
317	-20.2	-21.5	103	100
380	-21.4	-21.5	92	100
405	-21.1	-21.5	178	100
407	-17.8	-21.5	157	100
688	-13.9	-21.5	116	100
778	-20.5	-21.5	152	100
783	-19.1	-21.5	103	100
951	-20.6	-21.5	165	100
1252	-19.8	-21.5	158	100
1288	-16.6	-21.5	82	100
1291	-20.1	-21.5	147	100
A	-20.8	-21.5	168	100

Tableau 5-6: Calculs du $\delta^{13}\text{C}$ (%o vs PDB) et A¹⁴C (pcm) équilibrants.

5.3.3.2 Un pôle carbonaté?

La répartition des échantillons sur le diagramme activité ^{14}C versus ^{13}C (figure 5-7) met en évidence une assez bonne linéarité des échantillons entre le pôle isotopique initial de l'eau et le pôle de la matrice. L'évolution isotopique serait liée à un mélange chimique et isotopique entre la teneur initiale du CMTD de l'eau et la matrice, plutôt qu'à une évolution dépendante de la seule décroissance radioactive. Sur ce diagramme, nous ne retrouvons pas la relation semi-logarithmique habituellement rencontrée dans les aquifères carbonatés (Kloppman *et al.*,

1998; Barbecot, 1999; Gonfiantini *et al.*, 2003). Nous remarquons que l'axe entre le pôle isotopique initial de l'eau et celui de la matrice est recoupé perpendiculairement par des séries de points qui s'alignent quasiment (flèches). Les deux flèches matérialisées sur la figure 5-7 aboutissent sur deux échantillons situés tous les deux dans le Pliocène (forages Livron et St Rambert d'Albon). Or la présence de lignite dans les sédiments pliocènes est avérée par Ballesio (1972). Dans le secteur proche du forage n°380 vers Roybon, Demarcq (1970) note la présence dans les sables et marnes fluvio-lacustres du Tortonien supérieur de nombreuses passées ligniteuses. Il semble que des échanges isotopiques particuliers avec de la matière organique fossile puissent expliquer cette translation des échantillons vers un pôle beaucoup plus appauvri. L'âge calculé précédemment pour le forage de Livron est donc certainement excessif.

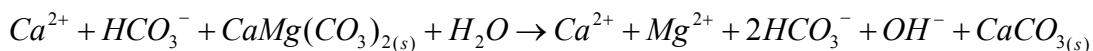
De plus, la présence de calcite secondaire dans la matrice carbonatée implique que l'utilisation des modèles de correction basés sur les teneurs isotopiques des pôles de mélanges apparaît peu fiable. Par exemple, pour les forages de Livron et de St Rambert d'Albon, quelles teneurs en carbone 13 peut-on donner à la matrice aquifère dans les modèles de correction?

5.3.3.3 Choix du A_0

Nous avons démontré que l'activité radiocarbone du CMTD est affectée par la dissolution de la calcite en système fermé. Cette dilution de l'activité du CMTD correspond à celle définie par le modèle de Tamers. Le A_0 calculé par ce modèle est donc le point de départ de l'évolution isotopique des eaux du bassin de Valence et est compris entre 51 et 61 pcm. Les eaux dont les activités du CMTD sont supérieures à A_0 Tamers seront alors considérées comme actuelles. Les autres sont affectées par la décroissance radioactive et par des phénomènes de mélanges non pris en compte par le modèle simple de dissolution de la calcite en système fermé. Ces phénomènes de dilution du carbone 13 et du carbone 14 proviennent de la dissolution incongruente de dolomite mise en évidence dans le chapitre géochimie.

5.3.4 Effet de la dissolution de dolomite et de la précipitation de la calcite

Dans le chapitre géochimie, nous avons vu que les phénomènes d'échanges de bases étaient minimes et ne se mettaient en évidence qu'au niveau des argiles pliocènes. Par ailleurs, les phénomènes d'échanges de bases aboutissent préférentiellement à la perte de l'ion calcium et par le gain de l'ion sodium ou potassium dans l'eau (Appelo *et al.*, 1996). Ainsi, dans ce qui suit, nous faisons l'hypothèse que 100 % du magnésium provient de la dissolution incongruente de dolomite selon la réaction suivante:



réaction 6

Selon cette réaction, il y aura dilution de l'activité initiale A_0 par du carbone "mort", issue de la matrice. Autrement dit, à chaque gain d'une mole de Mg^{2+} , il y a deux moles de bicarbonate, constitué de carbone mort, qui s'ajoutent à la solution. Il apparaît donc un coefficient de dilution q_{dol} qui abaisse l'activité A_0 de la manière suivante: $A_{0dol} = q_{dol} \cdot A_{0Tamers}$ où q_{dol} s'écrit (Clark *et al.*, 1997):

$$q_{dol} = \frac{m_{CMTD}}{m_{CMTD} + 2 \cdot \Delta m_{Mg^{2+}}} \quad \text{Équation 5-9}$$

L'excès de magnésium ($\Delta m_{Mg^{2+}}$) par rapport au stade initial d'évolution de l'eau s'écrit $\Delta m_{Mg^{2+}} = m_{Mg^{2+} \text{ mesuré}} - m_{Mg^{2+} \text{ initial}}$.

Dans l'équation 5-9, q_{dol} ne tient pas compte de la précipitation de calcite associée à la dissolution de dolomite. L'équation précédente peut être généralisée sous la forme suivante

$$q_\Delta = \frac{m_{CMTD}}{m_{CMTD} + \Delta m_{CMTD}} \quad \text{Équation 5-10}$$

en considérant la variation du stock $\Delta CMTD$ entre le pôle initial de l'eau à la fermeture du système et le CMTD mesuré. Cette variation du CMTD tient alors compte de la dissolution de la dolomite, de la précipitation de calcite corrigé par l'apport de Ca^{2+} lié à la dissolution de

gypse et par la perte de Ca^{2+} lié aux échanges de bases (Fontes *et al.*, 1979; Clark *et al.*, 1997).

$$\Delta m_{CMTD} = m_{CMTD\text{mesuré}} - m_{CMTD\text{initiale}} = 2\Delta m_{\text{Mg}^{2+}} - \Delta m_{\text{Ca}^{2+}} - \Delta m_{\text{SO}_4^{2-}} + 0,5 * (\Delta m_{\text{Na}^+} + \Delta m_{\text{K}^+} - \Delta m_{\text{Cl}^-})$$

Équation 5-11

L'équation 5-9 présuppose que la dissolution de la calcite en système fermé est déjà acquise et constitue le pôle initial d'évolution de l'eau (modèle Tamers). A partir de ce pôle, la dissolution de dolomite contribue à l'augmentation des teneurs en magnésium. Cette dissolution de dolomite provoque la sursaturation de la calcite qui dès lors précipite. Nous avons aussi tenu compte de l'apport de calcium à la solution par dissolution de gypse (même s'il s'agit d'un phénomène mineur dans le bassin de Valence) et la perte de calcium par échange de base car ces deux processus modifient les équilibres calco-carboniques.

Nous avons pris pour la minéralisation initiale les teneurs suivantes (tableau 5-7):

mmol/l	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	SO_4^{2-}	Cl^-
Teneur initiale	2,4	0,12	0,5	0,02	0,3	0,28

Tableau 5-7: Teneur de la minéralisation initiale de l'eau (après fermeture du système).

La teneur initiale en calcium est égale à la moitié de l'alcalinité mesurée pour les échantillons où l'activité carbone 14 est supérieure à 90 pcm (Fontes *et al.*, 1979). Les teneurs initiales en sodium, potassium, sulfates et chlorures sont élevées car elles représentent des valeurs seuil au-delà desquelles les échanges de bases et la dissolution de gypse influencent les équilibres calco-carboniques. En effet, les échanges de bases sont un phénomène secondaire par rapport à la chimie des carbonates sauf au niveau du Pliocène et la dissolution de gypse n'existe que dans le bassin de Crest. Le terme $\Delta m_{\text{Ca}^{2+}}$ est toujours négatif puisqu'il y a disparition du calcium par précipitation de calcite. Les autres termes $(\Delta m_{\text{SO}_4^{2-}}, \Delta m_{\text{Na}^+}, \Delta m_{\text{K}^+}, \Delta m_{\text{Cl}^-})$ sont toujours positifs ou nuls (lorsque les teneurs mesurées sont inférieures aux valeurs seuils définies dans le tableau 5-7).

Le tableau 5-8 récapitule les âges calculés par les modèles Tamers et Olive et ceux calculés en tenant compte de la dissolution de dolomite et de la dissolution incongruente de dolomite (dol. et Δ .), ainsi que la moyenne des âges calculés par ces deux derniers modèles. Les bornes d'incertitudes sur l'âge moyen sont représentées par les âges calculés par les deux modèles.

n° forage	$A^{14}C$ pcm	$\delta^{13}C$ ‰ vs PDB	q_{dol}	q_A	A_0 Tamers pcm	$A_0 dol$ pcm	$A_0 A$	Tamers	$dol.$	$A.$	\pm	moy.	Olive	Âges
														probables
778	91.6	-13.8	0.93	1.00	60.4	56.3	60.4	actuel	actuel	actuel	45	actuel	actuel	Actuel
268	64.5	-12.1	0.90	0.89	54.6	49.2	48.7	actuel	actuel	actuel	77	actuel	actuel	Actuel
951	94.5	-13.3	0.96	1.00	57.3	55.0	57.3	actuel	actuel	actuel	87	actuel	actuel	Actuel
176	85.8	-13.5	0.93	0.96	60.2	55.9	57.5	actuel	actuel	actuel	48	actuel	actuel	Actuel
291	85.8	-12.4	0.95	0.94	55.4	52.9	51.9	actuel	actuel	actuel	58	actuel	actuel	Actuel
405	99.3	-13.4	0.97	0.98	55.8	53.9	54.6	actuel	actuel	actuel	50	actuel	actuel	Actuel
407	95.2	-12.2	1.00	1.00	60.6	60.6	60.6	actuel	actuel	actuel	69	actuel	actuel	Actuel
1252	85.0	-12.4	0.90	0.97	53.9	48.4	52.3	actuel	actuel	actuel	49	actuel	actuel	Actuel
1288	44.4	-10.6	0.88	0.75	54.2	47.8	40.5	1646	605	actuel	112	actuel	2425	Actuel
1291	83.6	-13.0	0.95	1.00	56.8	54.2	56.8	actuel	actuel	actuel	40	actuel	actuel	Actuel
783	58.5	-12.4	0.91	0.85	57.0	51.7	48.5	actuel	actuel	actuel	71	actuel	566	Actuel
A	88.0	-12.7	1.00	0.92	52.6	52.6	48.2	actuel	actuel	actuel	122	actuel	actuel	Actuel
380	49.3	-13.1	0.99	0.88	53.4	52.9	46.8	657	585	actuel	134	78	1435	Actuel
297	92.4	-13.5	1.00	0.96	53.8	53.7	51.5	actuel	actuel	actuel	45	actuel	actuel	Actuel
317	54.4	-12.4	0.78	0.76	52.8	41.4	40.2	actuel	actuel	actuel	46	actuel	535	Actuel
688	62.0	-9.1	0.90	0.81	53.6	48.3	43.6	actuel	actuel	actuel	80	actuel	actuel	Actuel
135	78.9	-10.7	0.98	0.96	52.4	51.6	50.5	actuel	actuel	actuel	52	actuel	actuel	Intermédiaire
736	26.3	-6.7	0.73	0.56	51.7	37.6	28.8	5589	2945	756	189	1850	4696	Intermédiaire
123	52.3	-8.8	0.80	0.90	52.1	41.9	46.8	actuel	actuel	actuel	411	actuel	actuel	Intermédiaire
240	62.4	-9.8	0.68	0.64	56.6	38.2	36.1	actuel	actuel	actuel	53	actuel	actuel	Intermédiaire
793	47.6	-9.7	0.72	0.66	55.4	40.0	36.3	1250	actuel	actuel	69	actuel	372	Intermédiaire
164	54.8	-9.8	0.77	0.69	56.4	43.3	38.9	244	actuel	actuel	60	actuel	actuel	Intermédiaire
312	61.3	-12.3	0.83	0.77	55.6	46.0	42.8	actuel	actuel	actuel	54	actuel	actuel	Intermédiaire
1003	42.0	-8.9	0.67	0.54	52.2	35.2	28.3	1796	actuel	actuel	98	actuel	907	Intermédiaire
172	63.9	-11.9	0.74	0.69	55.3	40.9	38.0	actuel	actuel	actuel	52	actuel	actuel	Intermédiaire
117	34.6	-8.4	0.73	0.60	54.6	39.8	32.9	3764	1154	actuel	96	370	2884	Intermédiaire
226	39.2	-7.9	0.78	0.73	53.5	41.8	38.8	2555	527	actuel	76	221	1674	Intermédiaire
1232	50.1	-7.9	0.69	0.58	53.0	36.8	30.6	461	actuel	actuel	83	actuel	actuel	Intermédiaire
383	68.4	-13.3	0.88	0.87	56.1	49.4	49.0	actuel	actuel	actuel	48	actuel	actuel	Intermédiaire
226	49.6	-9.8	0.72	0.64	53.8	38.6	34.4	666	actuel	actuel	50	actuel	actuel	Intermédiaire
253	28.9	-8.9	0.67	0.55	52.2	34.9	28.7	4893	1563	actuel	114	747	4006	Intermédiaire
399	76.6	-12.5	0.90	0.87	58.8	52.9	51.3	actuel	actuel	actuel	54	actuel	actuel	Intermédiaire
498	50.8	-9.4	0.83	0.77	53.8	44.6	41.6	480	actuel	actuel	81	actuel	actuel	Intermédiaire
1243	71.6	-11.9	0.90	0.85	54.2	48.7	45.9	actuel	actuel	actuel	69	actuel	actuel	Intermédiaire
227	28.3	-6.5	0.70	0.59	52.8	37.1	31.1	5162	2232	785	117	1508	4278	Ancien
132	45.0	-9.9	0.75	0.67	52.6	39.5	35.5	1290	actuel	actuel	92	actuel	406	Ancien
161	41.8	-9.0	0.74	0.62	54.6	40.4	33.8	2214	actuel	actuel	79	actuel	1337	Ancien
178	43.2	-10.5	0.67	0.61	53.6	35.9	32.7	1783	actuel	actuel	77	actuel	903	Ancien
311	1.3	-8.1	0.89	0.59	52.3	46.5	30.7	30540	29571	26140	1943	27855	29653	Ancien
394	22.8	-7.6	0.77	0.61	55.8	43.2	34.0	7402	5293	3293	218	4293	6526	Ancien
234	26.2	-7.3	0.77	0.69	53.7	41.3	37.0	5930	3754	2857	126	3306	5049	Ancien
234	22.6	-7.6	0.74	0.65	53.7	39.7	34.8	7152	4656	3566	110	4111	6271	Ancien
370	20.3	-7.4	0.71	0.60	54.6	38.5	33.0	8172	5293	4009	122	4651	7293	Ancien
315	38.3	-11.1	0.70	0.62	53.8	37.5	33.3	2803	actuel	actuel	65	actuel	1923	Ancien
1245	6.7	-8.1	0.69	0.59	52.4	36.2	31.1	17002	13946	12695	2144	13321	16115	Ancien
1338	18.5	-5.0	0.66	0.55	51.3	33.6	28.4	8447	4954	3538	116	4246	7547	Ancien
116	22.3	-8.8	0.77	0.63	53.7	41.1	33.9	7262	5060	3465	222	4262	6381	Ancien
280	31.1	-9.7	0.77	0.71	58.3	45.1	41.2	5198	3073	2320	80	2696	4323	Ancien
893	40.8	-13.2	0.87	0.89	56.8	49.6	50.5	2741	1606	1767	81	1687	1866	Ancien
899	19.3	-5.8	0.66	0.56	52.7	34.9	29.7	8298	4888	3570	129	4229	7414	Ancien
1245b	12.2	-7.8	0.64	0.57	52.8	33.8	30.0	12118	8419	7450	203	7934	11235	Ancien
1245h	12.1	-7.7	0.67	0.60	52.6	35.3	31.5	12148	8856	7900	205	8378	11264	Ancien
150	17.3	-9.3	0.68	0.59	54.3	36.9	31.8	9451	6264	5044	143	5654	8572	Ancien
531	19.9	-7.5	0.73	0.58	53.1	39.0	30.9	8114	5556	3650	249	4603	7231	Ancien

Tableau 5-8: Activité A_0 et âges calculés pour les nouveaux modèles.

Nous remarquons une bonne correspondance de la moyenne des âges calculés par les deux nouveaux modèles par rapport à l'indice de temps de séjour, sauf pour les échantillons des lignes surlignées. Pour ces quatre échantillons, les nouveaux modèles donnent des âges actuels pour des eaux très évoluées. Il apparaît très difficile de déterminer les âges réels de ces

aux. Nous ferons donc le choix arbitraire de proposer des âges compris entre l'âge moyen calculé par les nouveaux modèles et l'âge calculé par le modèle Olive. Ainsi, les eaux des forages n° 132, 161 et 178 ont des âges proches de 200-600 ans, tandis que l'eau du forage n° 315 a un âge de l'ordre de 600-1000 ans. Nous avons situé les âges moyens calculés sur la figure 5-8.

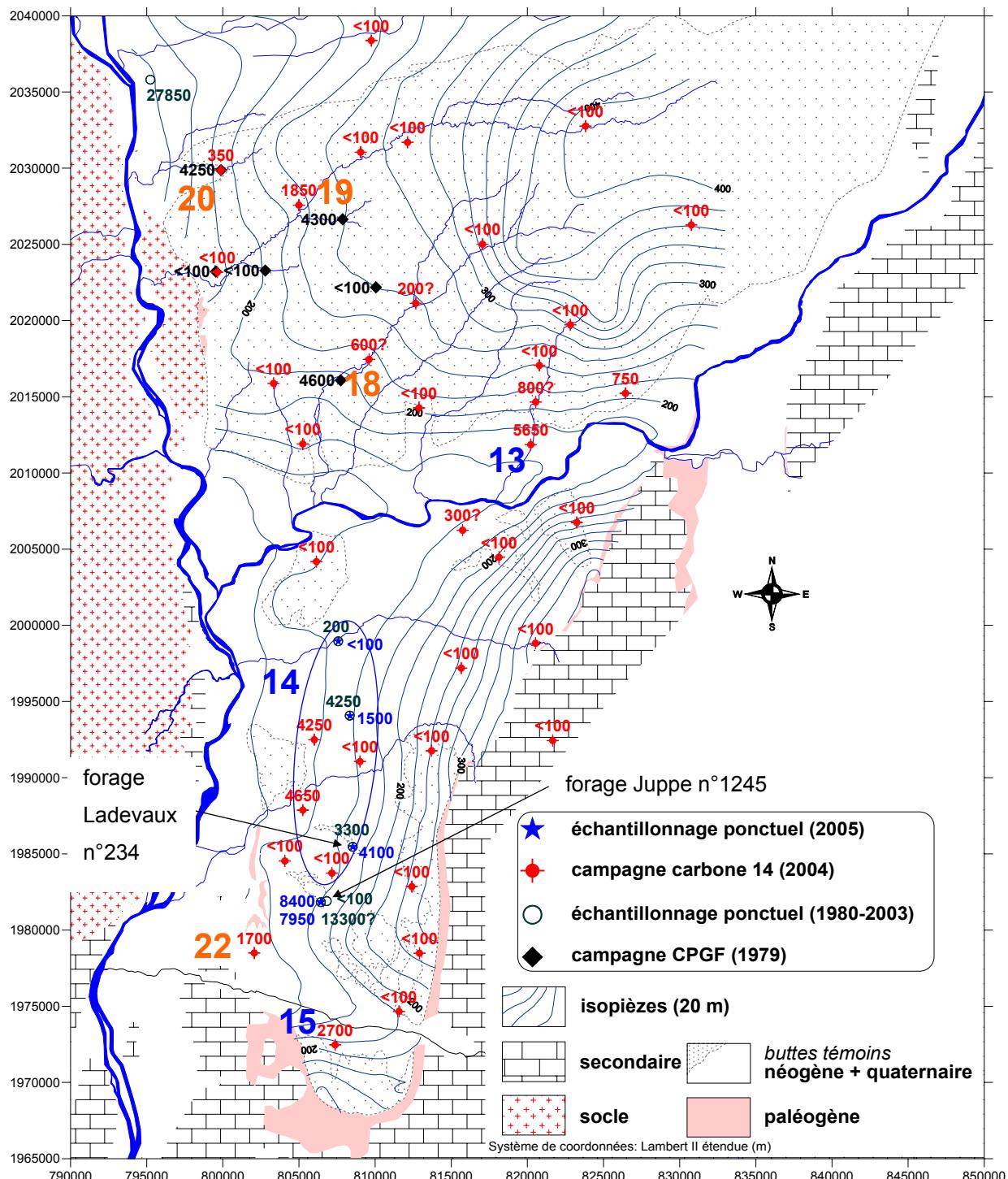


Figure 5-8: Carte des âges moyens de l'eau dans l'aquifère néogène (âge arrondi en année).

5.3.4.1 Commentaires

Il apparaît que presque les deux tiers des échantillons sont des eaux d'âge moyen inférieur à la centaine d'année et 28 % des échantillons ont des âges compris entre 1000 et 10 000 ans. Nous retrouvons sensiblement les mêmes secteurs mis en évidence au cours des chapitres précédents (n° 13, 14, 15, 18, 19, 20 et 22) pour lesquels les âges moyens se comptent en centaines ou en milliers d'années. En dehors de ces secteurs, les eaux situées en amont piézométrique ont un âge moyen inférieur à la centaine d'années. Cependant, nous observons à l'aval piézométrique des eaux actuelles, ce qui montre une certaine complexité des circulations de l'eau dans l'aquifère. L'eau du forage de St Rambert d'Albon a un âge de l'ordre de 27 000 ans. Ce forage est situé à l'extrémité aval de la vallée de la Valloire dans l'ancienne ria pliocène de l'Isère. Les forages AEP du SIE Sud Valentinois (Juppe n° 1245 et Ladevaux n° 234) situés au milieu de la plaine de Valence montrent des eaux plus âgées que des forages situés en aval hydraulique.

Ces deux forages AEP sont des forages de 300 m de profondeur. Lors des travaux de foration du forage Juppe à Montoison (n°1245)⁴², une première datation des eaux donnait un âge de plus de 13000 ans (prélèvement lors du pompage d'essai de longue durée). A proximité de ce forage profond, l'eau d'un forage agricole de 57 m a aussi été datée, pour donner un âge inférieur à 50 ans. Cette large différence montre une stratification des âges de l'eau dans l'aquifère. Cependant, au bout de quelques mois d'exploitation du forage Juppe, des teneurs en fer et manganèse de plus en plus élevées ont été constatées. Un protocole d'échantillonnage entre packers des deux parties crépinées a été mis en place. Un horizon argileux de 42 m d'épaisseur isole deux compartiments de l'aquifère molassique. La première partie crépinée (zone **haute**) se situe entre 150 et 183 m et la seconde (zone **basse**) se situe entre 231 et 294 m de profondeur. Des prélèvements pour la datation des eaux sur ces deux parties de l'aquifère (n° 1245**h** et 1245**b**) montrent d'une part une homogénéité des âges autour de 8000 ans (cf. Tableau 5-8) et d'autre part un fort rajeunissement de l'âge de l'eau depuis la première datation (à 20 mois d'intervalles). L'explication de cette homogénéité verticale de l'aquifère pourrait être liée à la faible étendue de cette lentille argileuse. La sollicitation du pompage aurait été

⁴² Ce forage recoupe la totalité du Miocène car il atteint les marnes versicolores oligocènes à -63 m NGF.

suffisante pour évacuer une eau probablement très ancienne piégée à la base du réservoir molassique.

5.3.4.2 Résultats concernant les forages rééchantillonnés

En dehors du forage de Montoison, nous avons échantillonné des forages qui avaient déjà fait l'objet d'une datation par le radiocarbone. Une première campagne CPGF de 1979 avait échantillonné 6 forages, deux forages situés à proximité immédiate et similaires (tableau 5-9) ont été échantillonnés car ces deux anciens forages ont été abandonnés depuis. Les forages de la ville de Valence n'ont pu être échantillonnés à l'identique car le forage n°1338 a été rebouché après quelques mois d'exploitation. Un autre forage, un peu moins profond, a été foré à quelques mètres de l'ancien.

n°	site	prof. forage (m)	position crête (m)	date	$A^{14}C$ (pcm)	$\delta^{13}C$ ‰	âges corrigés (ans)	± (ans)
116	st martin des rosiers	151	26-104; 122-128; 133-139	11/1979	22,3	-8,75	4651	797
117		143	32-140	27/07/2004	34,6	-8,4	370	784
498		59	17-35; 38-56	11/1979	50,8	-9,35	actuel -1365	288
312	st uze	72	20-72	16/06/2004	61,3	-12,32	actuel -2670	297
234	Ladevaux	280	137.2-186.4; 198.6- 216.2; 222.2-274.8	20/04/2000 02/02/2005	26,2 22,6	-7,32 -7,56	3306 4111	449 545
1338		252	146-176; 181-217; 217-247	02/1995	18,48	-4,95	4246	708
227	gonnards	228	136-220	02/02/2005	28,3	-6,49	1508	724
226	petits eynards	185	75-185	02/1995 01/02/2005	39,24 49,6	-7,85 -9,78	221 actuel -2551	306 486

Tableau 5-9: Comparaison des teneurs isotopiques des forages.

Nous observons pour les sites de "St Martin des Rosiers" et "Ladevaux" que les variations isotopiques sont difficilement interprétables (baisse de la teneur en carbone 13 pour St Martin des Rosiers et baisse de l'activité carbone 14 pour Ladevaux). Cependant les âges calculés⁴³ par la géochimie montrent un net rajeunissement de l'eau pour le site St Martin des Rosiers contrairement au forage Ladevaux où les âges sont similaires à l'incertitude près. Pour les autres forages, on observe une augmentation des activités et une baisse des teneurs en carbone 13. Cette variation des teneurs isotopiques s'apparente donc à un rajeunissement lié à la sollicitation de l'aquifère par les pompages. Toutefois sur les sites de St Uze et des Gonnards, l'interprétation de ces variations isotopiques peut être simplement due aux caractéristiques différentes des forages échantillonnés. Par exemple sur le site des Gonnards, le deuxième forage ne recoupe pas l'horizon très productif profond reconnu à la base de l'ancien forage. Seulement 27 m d'écart de profondeur différencie ces deux forages mais la température moyenne de l'eau a baissé de 19 à 17,6 °C. Cette différence de température montre la part importante de l'eau provenant de la base de l'ancien forage. Le forage des petits eynards du SIE de la plaine de Valence montre une nette variation des teneurs isotopiques qui vont dans le sens d'un rajeunissement de l'âge de l'eau mais les âges calculés restent similaires compte tenu de l'incertitude.

5.4 CONCLUSIONS

L'étude des isotopes du carbone a montré de fortes interactions géochimiques et isotopiques entre l'eau et la matrice carbonatée. En effet, les échantillons suivent sur le diagramme de la figure 5-7 une relation quasi-linéaire qui n'est pas habituellement constatée dans les aquifères carbonatés. De plus, des échantillons semblent s'aligner perpendiculairement à l'axe principal reliant le pôle isotopique initial de l'eau et celui de la matrice. Un mélange isotopique vers un pôle beaucoup plus appauvri de la matrice aquifère pourrait être à l'origine de ce processus. Quoi qu'il en soit, ces interactions (précipitation secondaire de calcite, lignite) masquent la décroissance radioactive. L'utilisation des modèles de correction basés sur le carbone 13 devient impossible car le carbone 13 de la matrice est lui-même marqué par les échanges isotopiques avec le CMTD. Les autres modèles Tamers et Olive (n'utilisant pas le carbone 13) ne sont pas pleinement en accord avec notre indice de temps séjour défini à partir des résultats

⁴³ La méthode de calcul de l'âge corrigé (moyenne de dol. et Δ) a été appliquée à ces deux campagnes.

des chapitres précédents car ces deux modèles ne prennent pas en compte les processus géochimiques établis au chapitre 3. Nous avons donc développé une approche basée sur une balance chimique qui tient compte de la dissolution de dolomite et de la précipitation de la calcite. Les âges calculés sont tout à fait cohérents avec l'indice de temps de séjour. Il apparaît que les deux tiers des eaux datées ont des âges inférieurs à la centaine d'années. Les reéchantillonages montrent pour deux sites (St Martin des Rosiers et Montoison) un large rajeunissement, uniquement lié à l'exploitation de l'aquifère par les pompes. De plus, l'étude du secteur de Montoison a montré une augmentation de l'âge de l'eau dans l'aquifère en fonction de la profondeur des forages.

5.5 SYNTHESE 'INVESTIGATIONS'

Les investigations géochimiques et isotopiques présentées dans cette partie montrent quelques secteurs particuliers (n°13, 14, 15, 16, 18, 19 et 20) qui ont des caractéristiques communes (eaux géochimiquement évoluées, sans tritium, appauvries en oxygène 18 et deutérium et plus ou moins anciennes). A l'inverse, le reste du bassin de Valence montre des eaux en général peu évoluées (signes de pollutions d'origine anthropique), récentes et infiltrées à proximité des points de prélèvements. Existe-t-il un fonctionnement global de l'aquifère permettant d'expliquer ces évolutions différentes de l'eau par secteur? Dans la dernière partie de ce mémoire, nous allons donc mettre en perspective tous ces nouveaux résultats et ceux présentés dans la partie 'cadre de l'étude'.

Partie III SYNTHESE

Chapitre 6 Fonctionnement de l'aquifère

Ce chapitre met en perspective l'ensemble des résultats des chapitres précédents dans un ensemble parfaitement cohérent. L'étude des vitesses d'écoulements de l'eau dans l'aquifère permettra de proposer un schéma de fonctionnement de l'aquifère suivant des circulations préférentielles. La vallée de la Joyeuse illustrera ce schéma conceptuel de circulation des eaux souterraines où le relief apparaît comme le moteur des flux superficiels, intermédiaires et profonds. Ce mode de fonctionnement sera alors généralisé à l'ensemble du bassin de Valence et nous en déduirons des vitesses moyennes de circulation de l'eau souterraine. Nous proposerons alors des schémas synthétiques d'écoulements de l'eau basés sur les résultats des parties I et II.

6.1 CIRCULATION DE L'EAU SOUTERRAINE

6.1.1 Hydrodynamique et hydrocinétique souterraine

L'écoulement des eaux souterraines se définit comme le déplacement de particules d'eau, dans l'espace et dans le temps, le long de lignes de flux ou de courant (Castany, 1998). Il existe deux conceptions de l'écoulement de l'eau dans l'aquifère. La première est basée sur l'hydrodynamisme où l'écoulement de l'eau suit la loi de Darcy. La vitesse hydraulique s'obtient par la formule suivante:

$$V_H = \frac{K}{n_e} * \frac{\Delta H}{l} \quad \text{Équation 6-1}$$

où K est la perméabilité en m/s, n_e la porosité efficace ou cinématique et ΔH/l le gradient hydraulique entre deux forages situés sur une même ligne d'écoulement. Ce calcul de vitesse suppose que l'écoulement soit "horizontal" (figure 6-1).

La seconde approche se fonde sur l'hydrocinétique et considère le déplacement réel des molécules d'eau au travers le milieu poreux. Celle-ci nécessite donc l'identification d'un traceur de l'eau dans l'aquifère. Le radiocarbone s'utilise comme traceur du cheminement de

l'eau dans l'aquifère pour des longs temps de séjour et nous parlerons alors de vitesse isotopique V_i . Cette vitesse se calcule de la manière suivante:

$$V_i = \frac{l}{\Delta t} \quad \text{Équation 6-2}$$

$\Delta t = t_b - t_a$ est la durée du trajet de l'eau entre deux forages A et B situés sur une même ligne d'écoulement et séparés d'une distance horizontale l (figure 6-1). Nous considérons ici l'approche classique qui suppose que la circulation du traceur se fait sans dispersion cinétique et/ou diffusion moléculaire (Castro *et al.*, 2005). Le traceur suit un mouvement convectif et l'écoulement souterrain est donc de type piston (Blavoux, 2001).

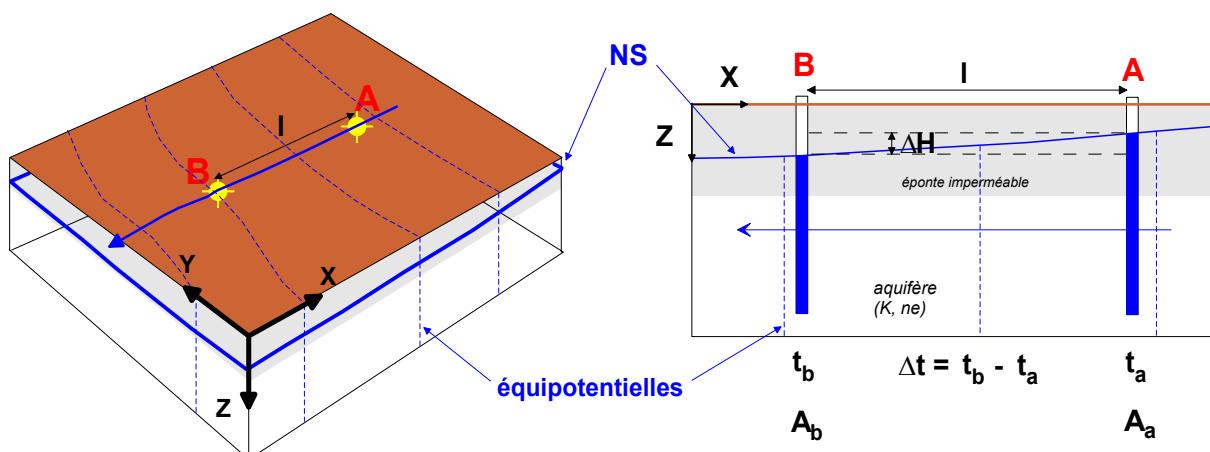


Figure 6-1: Application de la loi de Darcy pour le calcul des vitesses hydrauliques.

La vitesse isotopique obtenue par la datation des eaux au carbone 14 est égale à la vitesse hydraulique si et seulement si l'eau qui circule entre deux forages A et B ne subit pas d'apport ou de perte en bicarbonates. Dans ce cas idéal, le temps de séjour de l'eau Δt entre deux forages correspond à la différence d'activité mesurée entre le forage amont (A) et aval (B) suivant l'équation suivante:

$$t_b - t_a = \Delta t = 8267 * \ln\left(\frac{A_a}{A_b}\right) \quad \text{Équation 6-3}$$

En réalité, ce cas idéal n'est pour la plupart du temps pas respecté car l'eau évolue géochimiquement durant son parcours et l'on doit alors tenir compte des apports et pertes en bicarbonate de la solution. Alors, l'équation 6-3 doit être remplacée par l'équation suivante:

$$t_b - t_a = \Delta t = 8267 * \ln\left(\frac{q_b \cdot A_a}{q_a \cdot A_b}\right) \quad \text{Équation 6-4}$$

où q_a et q_b sont les coefficients de corrections de l'activité initiale A_0 (cf. § 5.3).

Par ailleurs, les apports ou pertes en bicarbonate peuvent provenir de venues d'eaux récentes ou anciennes entre les forages A et B (Mazor *et al.*, 1992) ou bien par diffusion moléculaire en provenance de zones de moindres perméabilités et/ou par dispersion cinématique (Bethke *et al.*, 2002). Alors, les vitesses isotopiques et hydrauliques sont nécessairement différentes. La réflexion proposée par Mazor (1992) sur les vitesses de circulation des eaux souterraines peut être précisée car l'étude des différences des vitesses isotopiques et hydrauliques est riche d'enseignements sur le fonctionnement d'un aquifère.

6.1.2 Comparaison des vitesses hydrauliques et des vitesses isotopiques réelles (V_{ir})

La comparaison de la vitesse hydraulique avec la vitesse isotopique réelle (V_i corrigée de l'évolution géochimique) renseigne sur la conservation du flux entre le forage amont et le forage aval. Nous ne tenons pas compte ici des phénomènes de dispersion et de diffusion.

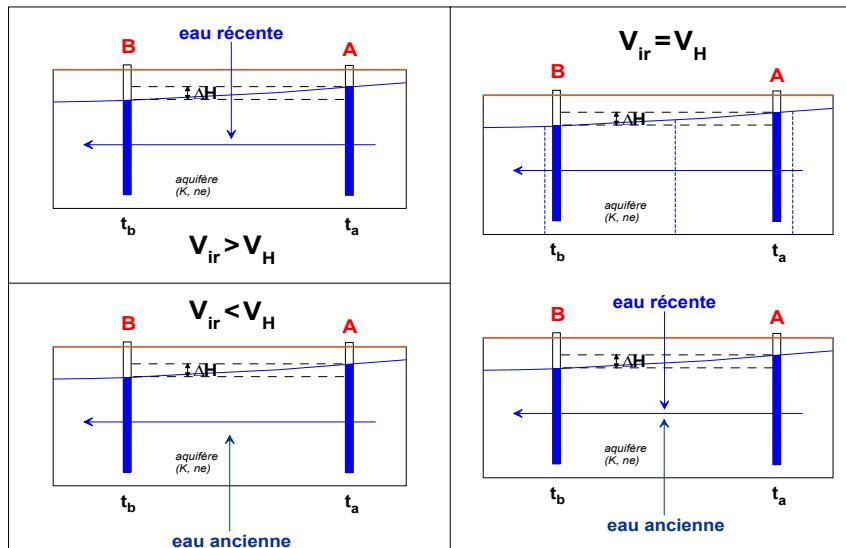


Figure 6-2: Interprétation des vitesses isotopiques réelles avec les vitesses hydrauliques.

En effet, trois cas peuvent se présenter (figure 6-2):

- Si la vitesse hydraulique est plus petite que la vitesse isotopique réelle, alors la durée de l'écoulement réel est plus courte que celle théorique défini par la loi de Darcy. Dans ce cas, de l'eau récente s'est donc mélangée à la ligne de flux entre les forages A et B;

- Si la vitesse hydraulique est plus grande que la vitesse isotopique réelle, la durée du trajet réel de la particule d'eau est plus longue que la durée du trajet théorique. De l'eau ancienne s'est mélangée à la ligne de flux entre les forages A et B;
- Enfin, si les vitesses sont identiques cela signifie, soit que l'écoulement est de type piston et horizontal, soit qu'il y a eu apport d'eau jeune et d'eau ancienne en proportion équivalente (cas peu probable).

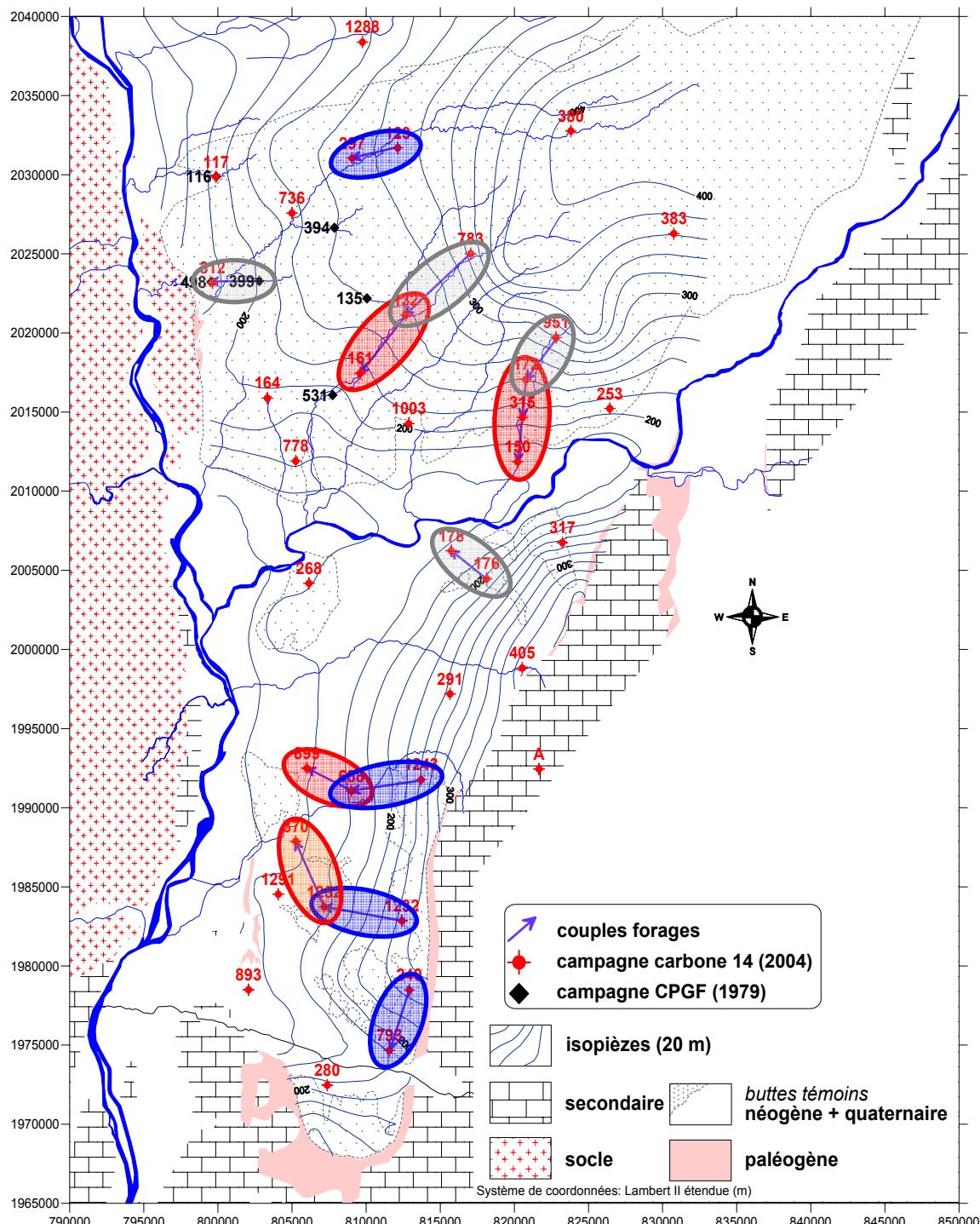


Figure 6-3: Plan de situation des forages choisis pour la comparaison des vitesses.

Nous avons sélectionné des couples de forages situés sur une même ligne d'écoulement et échantillonnes pendant des campagnes identiques pour comparer la vitesse théorique à la vitesse réelle (figure 6-3).

Pour la vitesse hydraulique, nous donnons un intervalle de confiance qui tient compte d'une incertitude de 50 % sur la perméabilité et d'une porosité efficace comprise entre 9 et 15 %. Les valeurs de perméabilités sont celles répertoriées dans la base de données qui sont les plus proches des forages. Pour les vitesses isotopiques réelles, la durée Δt est l'intervalle de temps entre le forage aval et amont calculé à partir des modèles de corrections utilisés au chapitre précédent. Compte tenu de l'incertitude sur le calcul des âges, nous avons aussi donné pour le calcul de ces vitesses un intervalle de confiance. Les résultats sont regroupés dans le tableau 6-1.

	n° forage amont	n° forage aval	ΔH (m)	L (m)	i (%)	$K \cdot 10^{-5}$ (m/s)	V_H (m/an)	V_{ir} (m/an)
1	176	178	28	2900	9.7	0.8	8	41
2	951	172	70	3520	19.9	1	21	105
3	783	132	63	5780	10.9	2	23	115
4	399	498	31.5	3190	9.9	5	52	260
5	132	161	56	4860	11.5	2	24	121
6	688	899	36.6	3320	11.0	0.8	9	46
7	172	315	19	2380	8.0	1	8	42
8	315	150	44	2880	15.3	1	16	80
9	1252	370	29	4800	6.0	1	6	32
10	240	793	54	3920	13.8	0.3	4	22
11	1232	1252	107	5590	19.1	0.3	6	30
12	1243	688	70.4	4700	15.0	0.4	6	32
13	123	297	14.9	3080	4.8	3.5	18	89
							196	3920*
							n.c.	n.c.
							94	4700*
							308	3080*

Tableau 6-1: Comparaison des vitesses hydrauliques et isotopiques.

* ces écarts importants sont dus à la difficulté de distinguer l'âge des eaux de 1 ou 10 ans. Une incertitude de 10 ans sur l'âge de l'eau conduit à un rapport 1 à 10 sur la vitesse isotopique.

Dans ce tableau, apparaissent tous les cas de figures décrits précédemment. Les lignes 1 à 4 montrent une bonne correspondance des vitesses. Les lignes 5⁴⁴, 6 à 9 montrent des venues d'eaux anciennes dans la ligne de flux. Ces forages se situent dans les parties aval de la piézométrie (vallée de la Joyeuse secteur 13, secteur 14 à l'ouest de la plaine de Valence et

⁴⁴ cette ligne montre probablement aussi des venues d'eaux récentes.

moyenne vallée de l'Herbasse secteur 18). Enfin, les lignes 10 à 13 montrent des vitesses réelles largement supérieures aux vitesses théoriques. Des venues d'eaux récentes se sont additionnées à la ligne de flux. Il faut remarquer que ces forages se situent tous en amont piézométrique.

La comparaison de ces vitesses montre clairement l'importance des échanges verticaux au sein de l'aquifère avec soit des venues superficielles, soit des venues profondes. Il existe donc des circulations tridimensionnelles des écoulements qui doivent alors dépendre étroitement des zones de recharges et de vidanges de l'aquifère et de la géologie.

6.1.3 Modèle conceptuel de l'écoulement de l'eau souterraine

Hubbert, en 1940, a pour la première fois conceptualisé le fonctionnement des aquifères libres où seule l'énergie potentielle gouverne les écoulements souterrains entre les zones de recharge et de vidange de l'aquifère (Fetter, 1994). La figure 6-4 montre le cheminement souterrain de l'eau guidé par la forme des équipotentielles et par la différence de charge entre celles-ci. Les lignes équipotentielles sont horizontales au-dessus de l'aquifère représentant l'élévation de la charge avec l'altitude tandis que dans l'aquifère celles-ci sont curvilignes représentant la somme de l'altitude et de la charge hydraulique.

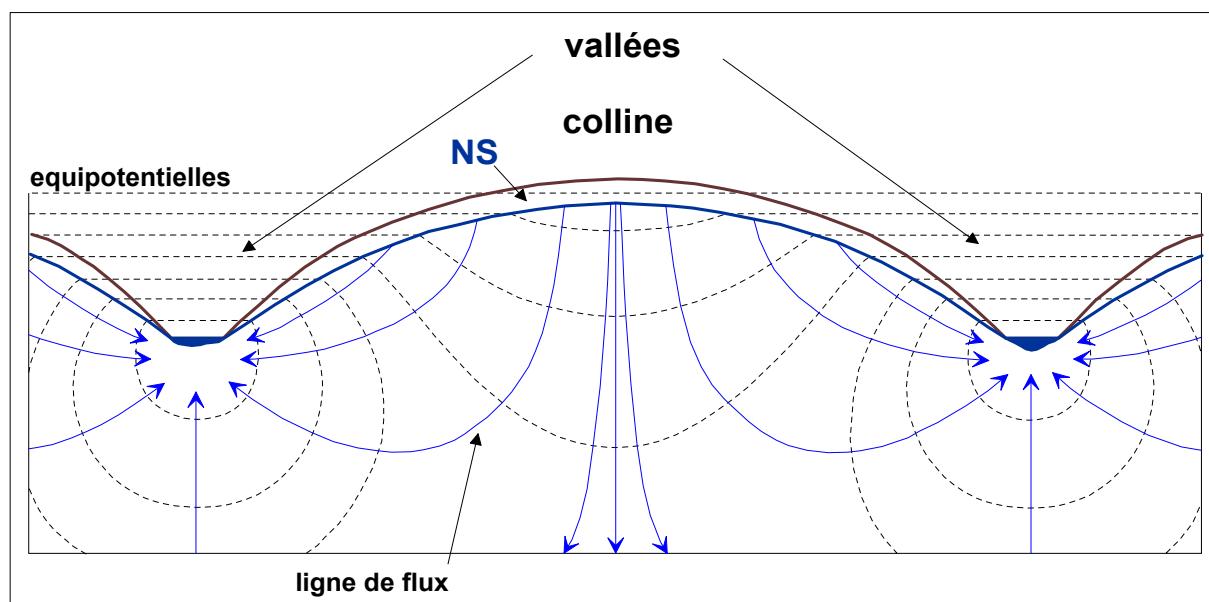


Figure 6-4: Schéma conceptuel des écoulements dans un aquifère libre, homogène et isotrope (d'après Hubbert, 1940 modifié).

D'après cette figure, au niveau des collines la charge diminue avec la profondeur, les flux d'eau sont descendants tandis qu'au niveau des vallées la charge augmente avec la profondeur, les flux d'eaux sont ascendants.

Tóth (1963) et Freeze & Witherspoon (1967) ont formalisé les écoulements de l'eau souterraine en nappe libre et nappe captive (Fetter, 1994). Grâce à ces travaux, il est possible de distinguer trois grandes zones de systèmes de flux dans un bassin hydrogéologique (figure 6-5) (Tóth, 1995).

- zone des aquifères de subsurface à systèmes de flux locaux courts. Les vitesses effectives sont de l'ordre du kilomètre par an pour les nappes libres et de la centaine de mètres par an pour les nappes captives. Ils sont imposés par la topographie locale, le réseau hydrographique et les surfaces d'eau libre;
- zone des aquifères intermédiaires à systèmes de flux régionaux, longs. Les aquifères sont à nappe captive. Les vitesses effectives sont de l'ordre de la dizaine de mètres par an et la profondeur des écoulements atteint 200 à 300 m en fonction de la topographie régionale, les grands axes hydrographiques et de la géologie;
- zone des aquifères profonds à systèmes de flux globaux très longs où le rôle de la géologie est prépondérant. Les vitesses sont de l'ordre du mètre par an.

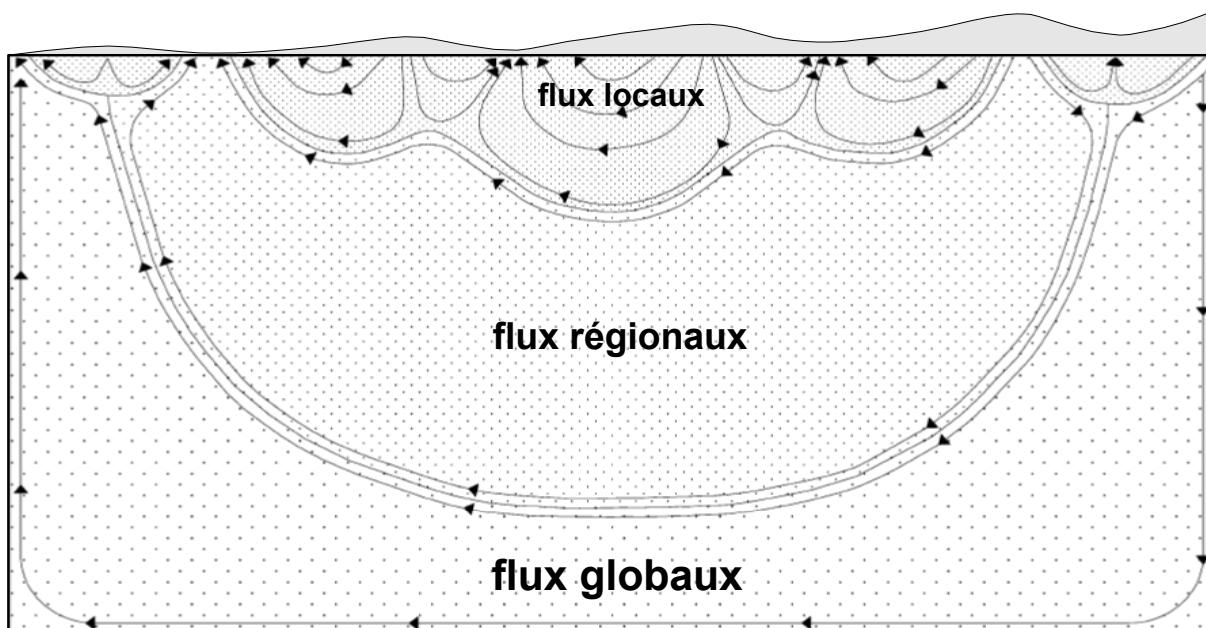


Figure 6-5: Fonctionnement global d'un aquifère homogène. Typologie des écoulements (d'après Tóth, 1995 modifié).

6.1.4 Circulations préférentielles

Au cours des chapitres précédents, nous avons mis en évidence des secteurs qui ont des caractéristiques géochimiques et isotopiques d'eaux évoluées et infiltrées à des altitudes bien différentes des points de prélèvements. Les âges de l'eau dans l'aquifère sont inférieurs à la dernière transition climatique et les teneurs en isotopes stables de la molécule d'eau montrent la préservation de la signature isotopique des altitudes des bassins d'alimentation au sein de l'aquifère. Il existe alors dans l'aquifère molassique des lignes d'écoulement préférentiel de l'eau.

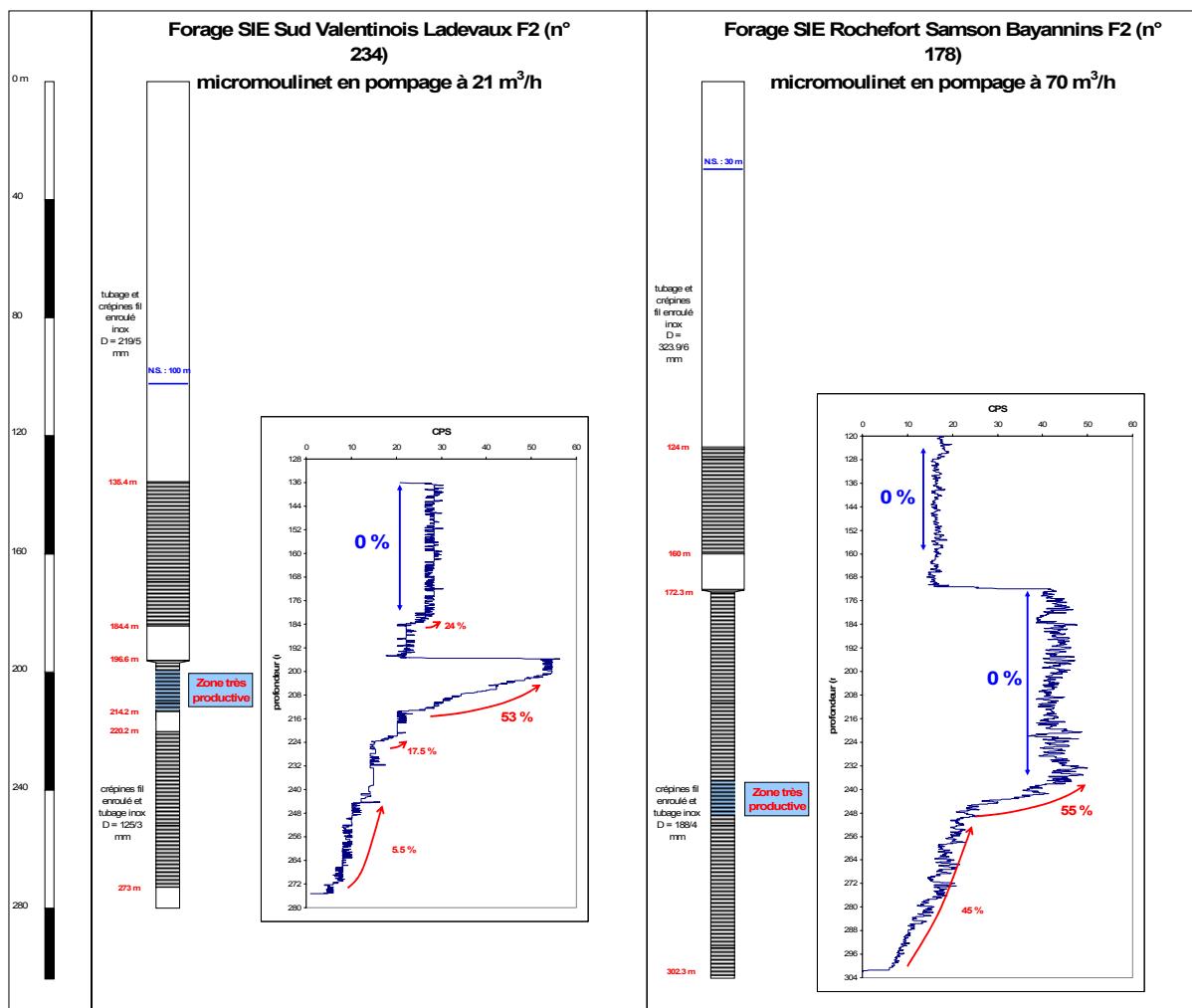


Figure 6-6: Circulations préférentielles mises en évidence par diagraphie micromoulinet sur deux forages dans l'aquifère molassique (données Idées Eaux).

Des mesures de micromoulinet effectuées sur quelques forages du bassin de Valence confirment ce mode de circulation. La figure 6-6 présente deux diagraphies effectuées sur des

forages AEP (forage Ladevaux n° 234 du SIE Sud Valentinois et Bayannins n° 178 du SIE Rochefort-Samson). Ces deux courbes montrent une nette augmentation du débit de l'ouvrage sur seulement une dizaine de mètres. Plus de la moitié du débit prélevé (55 % pour Bayannins et 53 % pour Ladevaux) provient d'un seul horizon et le reste des parties crépinées est peu ou pas du tout productif. Ce fonctionnement stratifié de l'aquifère explique alors la difficulté de retranscrire, l'évolution géochimique de l'eau selon des lignes d'écoulements, constatée au chapitre 3 (cf. § 3.3.1).

6.2 VITESSES D'ECOULEMENTS DE L'EAU DANS L'AQUIFERE

La mise en évidence de circulation préférentielle au sein de l'aquifère molassique entre une zone d'alimentation et une zone de vidange du système nous conduit à réinterpréter le calcul des vitesses évoqué au paragraphe précédent. Nous prendrons d'abord exemple sur la vallée de la Joyeuse.

6.2.1 Exemple de la vallée de la Joyeuse

6.2.1.1 Mise en évidence des cheminements souterrains

Nous disposons au niveau de la vallée de la Joyeuse de quatre forages disposés selon une même ligne de courant⁴⁵. La comparaison des vitesses (cf. Tableau 6-1) montre une évolution d'un écoulement horizontal (forages 951 et 172) à des venues d'eaux profondes de plus en plus anciennes vers l'aval (forages 172, 315 et 150). Les eaux de ces forages présentent des âges bien inférieurs à la dernière transition paléoclimatique située autour de 15000 ans BP. Les teneurs en deutérium permettent de retrouver facilement l'altitude du bassin d'alimentation de chaque forage. Il n'y a donc pas ou peu de mélanges d'eaux au cours de son transit⁴⁶ et il est possible de situer approximativement les zones d'alimentation de chaque forage à partir de la piézométrie (figure 6-7).

⁴⁵ Il s'agit de la ligne L.3 décrite au chapitre géochimie (cf. Figure 3-16).

⁴⁶ Ce résultat montre qu'il y a peu ou pas de dispersion cinématique (cf. Tableau 4-3) et de diffusion moléculaire car le signal d'entrée isotopique se trouve conservé dans l'aquifère.

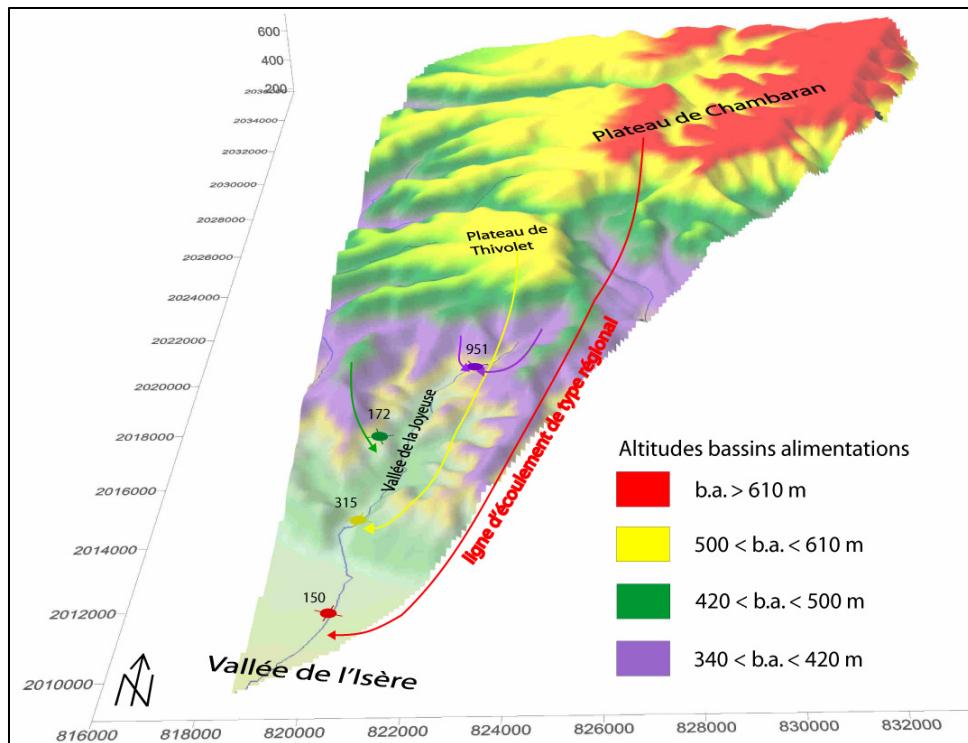


Figure 6-7: MNT de la vallée de la Joyeuse, sectorisation des bassins d'alimentations et des écoulements souterrains.

De cette figure nous pouvons déduire que l'eau du forage de la commune de Saint Paul les Romans (n°150) a son bassin d'alimentation situé au Sud-Est de Roybon (foret domaniale de Chambaran), tandis que le forage du SIE Herbasse les Aygalas (n°315) a son bassin d'alimentation situé au niveau du plateau de Thivolet. Ce groupe de forages met remarquablement en évidence un fonctionnement stratifié de l'aquifère. La vallée de l'Isère constitue l'axe de drainage majeur de cette partie de l'aquifère de la Drôme des Collines.

6.2.1.2 Calcul des vitesses d'écoulement de l'eau

Pour des circulations préférentielles, les vitesses isotopiques corrigées et les vitesses hydrauliques ne peuvent pas être différentes mais le schéma permettant de calculer la différence de charge, la longueur et la durée du trajet n'est plus celui présenté sur la figure 6-1.

Ici, la différence de charge est celle prise entre la zone d'alimentation et le forage. La durée du trajet est celle évaluée par la datation des eaux *i.e.* l'âge de l'eau (cf. § 4.1.4.1). La première difficulté réside dans l'estimation du niveau statique des zones de recharge de chaque forage. Malheureusement, les secteurs des plateaux de Thivolet et de Chambaran sont des secteurs où il n'y a pas de forage permettant de connaître précisément le niveau statique de la nappe. Nous nous sommes aidés de la carte piézométrique Duplouy (1978) et de celle de Rousselot (1978) pour estimer une altitude probable de ce niveau statique. L'incertitude sur la différence de charge est de l'ordre de 20 %. Le tableau 6-2 résume les données concernant les forages étudiés de cette vallée.

n° forage	Altitude forage (m)	NS forage (m)	T (°C)	δD (%) vs SMOW	Altitude B.A. (m) à ± 90 m	NS recharge (m)	ΔH (m)	± 20 % (m)	Age (ans)	\pm (ans)
150	187	167	19,4	-62,1	680	500	333	66	5600	600
315	209	211	19	-59	540	460	249	50	800	200
172	295	230	17,1	-58,3	500	290	60	12	48*	10
951	325	300	12,1	-55,9	400	350	50	10	9*	4

Tableau 6-2: Données hydrogéologiques concernant les forages de la vallée de la Joyeuse.

* âge déduit des valeurs de tritium avec le logiciel Lumped (cf. § 4.1.4.2)

La vitesse moyenne V_m pour chaque ligne de flux correspond au rapport de la distance parcourue entre la zone d'infiltration et les forages (d) sur la durée de ce trajet (t) (figure 6-8).

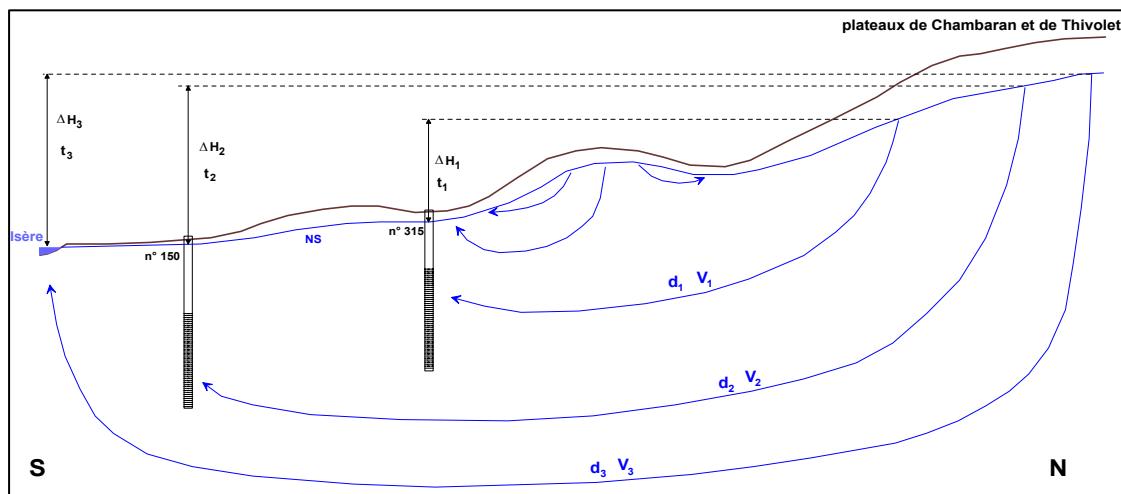


Figure 6-8: Vue schématique des circulations au niveau de la vallée de la Joyeuse (sans échelles).

L'évaluation de la distance du trajet (d) entre zone d'alimentation et forage constitue la seconde difficulté. La loi de Darcy (équation 6-1) est appliquée à ce système d'écoulement où le gradient hydraulique correspond à la différence de charge ΔH entre le bassin d'alimentation et le point de prélèvement sur la distance entre équipotentielles. Cette distance entre équipotentielles est égale à la distance réelle parcourue par l'eau dans l'aquifère. Ainsi, de ces deux équations, nous pouvons tirer la distance d par:

$$d = \left(\frac{K}{n_e} * \Delta H * t \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Équation 6-5}$$

L'incertitude sur d s'écrit $\frac{\Delta d}{d} = \frac{1}{2} * \left(\frac{\Delta K}{K} + \frac{\Delta n_e}{n_e} + \frac{\Delta H}{H} + \frac{\Delta t}{t} \right)$ et en prenant une incertitude sur K de 50 %, sur n_e de 25 %, sur H de 20 % et sur t de 10 %, $\Delta d/d$ est égale à 52,5 %. V_m se calcule indifféremment par les équations 6-1 ou 6-2. L'incertitude sur la vitesse est donc de 62,5 %. Les résultats sont reportés dans le tableau 6-3 en prenant K égale à 1.10^{-5} m/s (valeur évaluée par pompage d'essai et que l'on supposera homogène et isotrope) et n_e égale 0,12.

n° forage	ΔH (m)	Age (ans)	d (km)	$\pm 52,5\%$ (km)	V_m (m/an)	$\pm 62,5\%$ (m/an)	$V_{i \min.}$ (m/an)
951	50	9*	1,09	0,57	121	75	89
172	60	48*	2,75	1,44	57	36	62
315	249	800	22,8	12	28,6	17,9	12,5
150	333	5600	70	38	12,5	7,8	3,9

Tableau 6-3: Vitesse de circulation de l'eau dans l'aquifère au niveau de la vallée de la Joyeuse.

La distance moyenne calculée de 70 km est surprenante au regard de la distance séparant le plateau de Chambaran du forage de St Paul les Romans (une vingtaine de kilomètres environ). Notre erreur provient sans doute d'avoir supposé que la perméabilité est homogène et isotrope. Au niveau de la zone d'alimentation, la molasse est constituée de cailloutis à matrice argileuse où la perméabilité est de l'ordre de 10^{-6} m/s (cf. Figure 2-6); la percolation de l'eau dans la zone non saturée doit être lente. Dans le tableau précédent, nous avons donc indiqué la vitesse isotopique minimale $V_{i \min.}$ entre la zone d'infiltration et le forage, en supposant un écoulement horizontal calculée pour une distance à "vol d'oiseau" séparant les zones d'alimentation, des forages. La vitesse moyenne calculée dans le tableau 6-3 ne peut être inférieure à la vitesse minimale. Au niveau de la vallée de la Joyeuse, il existe deux classes de vitesses, la première est de l'ordre de la dizaine de mètres par an et l'autre est de l'ordre de la centaine de mètres par an.

Les ordres de grandeurs des vitesses moyennes sont en parfait accord avec le schéma conceptuel des écoulements souterrains développés par Hubbert (1940) et Tóth (1963, 1995). Ce schéma de fonctionnement permet d'expliquer les températures de l'eau dépassant 19°C pour les deux forages en aval où les circulations les plus longues sont aussi les plus profondes et donc les plus chaudes (tableau 6-2). Ce schéma permet aussi d'expliquer la mise en charge de l'aquifère molassique dans la basse vallée de la Joyeuse et de celle de l'Isère (cf. Figure 2-12).

6.2.2 Vitesses moyennes

L'interprétation des résultats de la vallée de la Joyeuse peut être généralisée à l'ensemble du bassin car la datation des eaux a montré que les âges sont inférieurs à la dernière transition paléoclimatique. A partir de la piézométrie (cf. Figure 2-5), des altitudes des bassins d'alimentation déterminées à partir du deutérium (cf. Figure 4-19) et de l'âge des eaux, nous pouvons évaluer la différence de charge entre la zone d'alimentation et le forage puis déterminer la vitesse moyenne de transit de l'eau. Cependant, à l'échelle du bassin, les calculs des vitesses moyennes de l'eau dans

l'aquifère sont délicats car les perméabilités varient assez nettement entre l'Est et l'Ouest du bassin (cf. Figure 2-6). Une erreur d'un ordre de grandeur sur la perméabilité conduit à une erreur d'un ordre de grandeur sur la vitesse. Nous donnons, à titre indicatif, dans le tableau 6-4 les vitesses calculées en supposant une perméabilité isotrope, homogène et égale à $1,3 \cdot 10^{-5}$ m/s (valeur de la médiane cf. Tableau 2-3) et une porosité efficace moyenne de 12 %.

n°forage	ΔH (m)	V_m (m/an)	ΔV_m ($\pm 62,5\%$ en m/an)
117	264	49	31
123	180	248	155
132	133	48	30
161	159	30	19
164	46	40	25
176	70	155	97
178	168	44	27
226	200	83	52
240	8	52	33
253	253	34	21
268	132	212	133
291	66	123	77
297	144	181	113
312	78	58	36
317	88	142	89
370	170	11	7
380	25	33	20
405	24	74	46
688	170	76	48
736	219	20	13
778	3	20	13
783	100	185	116
793	17	80	50
893	25	7	4
899	202	13	8
1003	189	80	50
1232	4	12	7
1243	35	35	22
1252	6	64	40
1288	245	289	181
1291	4	52	33

Tableau 6-4: Estimation des vitesses moyennes d'écoulements de l'eau dans l'aquifère.

Il convient de faire deux remarques sur le calcul des vitesses moyennes dans l'aquifère du bassin de Valence.

La première concerne les perméabilités. Le calcul des perméabilités à partir des pompages d'essais retranscrit la perméabilité moyenne de la colonne d'eau prospectée. Or la mise en évidence d'horizons sableux particulièrement productifs par les micromoulinets implique que ceux-ci sont plus perméables.

La seconde remarque concerne le phénomène de diffusion moléculaire qui a été négligé. L'existence de niveaux moins perméables au sein de l'aquifère néogène nécessiterait d'évaluer l'impact de ce phénomène. En effet, Bethke *et al.* (2002a) ont montré l'importance des flux de masse entre les parties aquifères et imperméables d'un système hydrogéologique. Ainsi la contribution des niveaux moins perméables sur l'âge de l'eau situé dans l'aquifère dépend simplement du rapport du volume d'eau contenu dans les niveaux moins perméables sur celui contenu dans les niveaux perméables⁴⁷. Il y a alors un vieillissement apparent de l'eau contenue dans l'aquifère en provenance d'eau contenue dans les horizons moins perméables.

Ces deux remarques vont dans le sens d'une circulation sans doute plus rapide au niveau des niveaux productifs par rapport aux calculs des vitesses moyennes. Le manque de données diagraphiques sur le bassin de Valence ne permet pas de caractériser suffisamment les perméabilités réelles des niveaux productifs ainsi que l'estimation du rapport volumique entre niveaux aquifères et *moins* aquifères. Alors en première approximation, nous considérerons comme valable les vitesses moyennes calculées par advection.

6.2.3 Mélanges d'eaux

Dans le tableau précédent, deux cas particuliers doivent être soulignés. Il s'agit du forage de Chateauneuf sur Isère (n°268) du SIE Plaine de Valence situé sur le plateau de Fouillouse et le forage de Manthes du SIE Valloire (n°1288), situé dans la vallée de la Valloire. Les âges calculés par le carbone 14 de ces deux forages sont actuels, résultats compatibles avec les

⁴⁷ On peut d'ailleurs s'interroger sur la limite entre niveaux perméables/moins perméables.

teneurs en tritium de 4 et de 6,4 UT, ainsi qu'avec les teneurs en nitrates (34 et 13 mg/l). Cependant, les teneurs en deutérium donnent respectivement une altitude moyenne du bassin d'alimentation proche de 400 m et de 770 m, à \pm 90 m près. Ces bassins d'alimentation ne se situent pas à proximité de ces forages. Ce constat implique soit des circulations profondes et rapides, soit un mélange d'eaux. La première hypothèse est difficilement envisageable car incompatible avec le modèle de fonctionnement proposé par Tóth (1995). L'hypothèse d'un mélange d'eau permet le mieux d'expliquer les résultats:

- L'eau du forage n°268 semble être constituée d'un mélange d'eau provenant d'un flux local, lié à la situation topographique particulière (butte molassique), chargé en nitrate et tritium et d'un flux profond d'eau ancienne dont la teneur isotopique correspond aux contreforts du Vercors.
- Au niveau de la vallée de la Valloire, un phénomène de drainance de la nappe superficielle (chargée en nitrate, en tritium et des teneurs en isotopes stables assez basses) vers la nappe molassique est très probable. Les résultats des travaux de foration du forage de reconnaissance (exécuté en 1985 de profondeur 250 m) et du forage d'exploitation n°1288 (exécuté en 1997 de profondeur 200 m) ont montré lors du premier forage que la nappe molassique n'était pas contaminée par les nitrates. Les premiers travaux ont aussi montré que la nappe profonde était en charge par rapport à la nappe superficielle (voir aussi figure 2-12). Au bout de 12 ans, le second forage a montré que l'aquifère molassique était contaminé dans les 55 premiers mètres (36 mg/l en nitrate). Tout porte à croire que l'aquifère molassique situé au niveau de la vallée de la Valloire est une zone de vidange de l'aquifère de la Drôme des Collines. Un flux profond à long temps de séjour doit certainement rejoindre la nappe superficielle⁴⁸. Malheureusement le pompage dans la nappe profonde efface la différence de charge initialement présente et conduit à la dégradation de la nappe profonde.

Les vitesses calculées pour ces deux forages sont la combinaison des vitesses des deux composantes.

⁴⁸ Cette hypothèse est conforme à l'analyse du carbone 13 et de l'activité carbone 14 équilibrante (cf. § 5.3.3.1).

6.3 FONCTIONNEMENT DE L'AQUIFERE PAR SECTIONS D'ECOULEMENTS

Le bassin de Valence montre un relief particulièrement varié où les zones d'altitudes les plus élevées (plateaux de Chambaran et de Thivolet et bordure orientale de la plaine de Valence) sont donc les secteurs principaux de naissance de flux locaux et régionaux. En dehors de ces zones, le bassin de Valence présente de nombreuses collines molassiques. Nous avons montré au cours des chapitres précédents la présence de dômes piézométriques sous ces buttes de molasse comme le plateau de Lautagne ou de la Fouillouse pour la plaine de Valence qui sont donc le siège de flux locaux. Alors la piézométrie du bassin de Valence est certainement plus complexe que celle présentée au chapitre 2. Il doit exister des divergences fortes d'orientation des écoulements entre les flux locaux et les flux régionaux. Les écoulements souterrains sont donc impossibles à retranscrire dans le détail sur l'ensemble du bassin mais la synthèse piézométrique (cf. Figure 2-5) retranscrit sans doute le mieux les flux intermédiaires et régionaux.

Les secteurs mis en évidence tout le long des chapitres précédents ont des caractères communs et permettent de proposer des schémas-types de circulation de l'eau dans l'aquifère suivant des sections d'écoulements. Ces sections suivent des lignes d'écoulements régionales (figure 6-9) et elles sont une interprétation du fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère néogène et quaternaire construite à partir des résultats présentés au cours des chapitres précédents. Les teneurs en nitrate de la nappe superficielle (cf. Figure 3-18) montrent toujours des infiltrations par la surface (flux locaux) malgré la dilution liée à l'apport de la nappe profonde (flux intermédiaires et régionaux). La nappe quaternaire constitue donc un réservoir tampon où les échanges sont difficiles à détailler. C'est pourquoi, nous n'avons pas différencié la nappe superficielle, de la nappe profonde sur les sections 1 à 6.

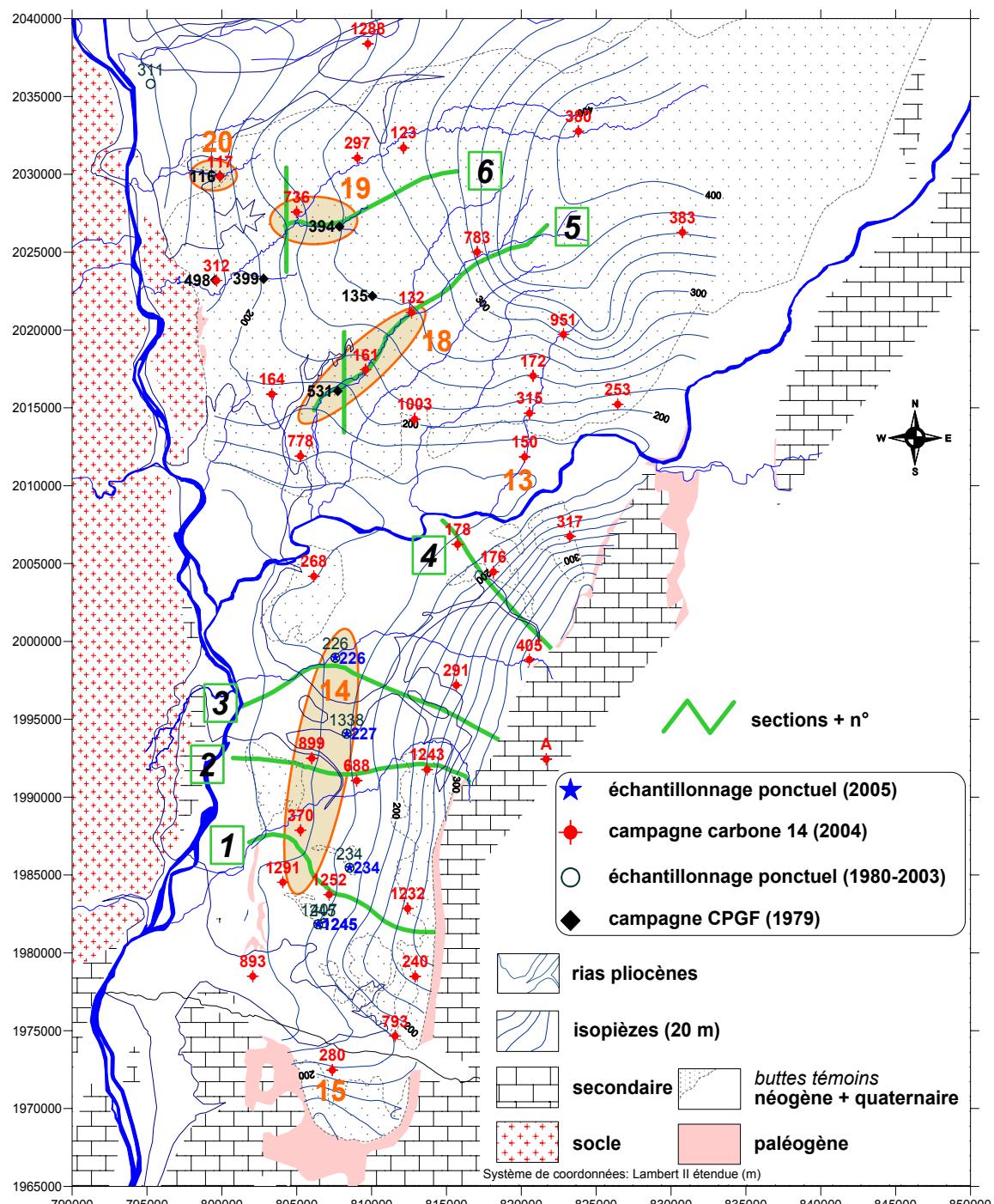


Figure 6-9: Carte des sections d'écoulements choisies et position des forages avec datation de l'eau.

6.3.1 Plaine de Valence

Les résultats du deutérium montrent que l'altitude du bassin d'alimentation du secteur 14 correspond à l'altitude de la bordure orientale de la plaine de Valence, en contact avec la retombée de l'anticlinal du Vercors. Les contreforts du Vercors constituent la seule zone

d'alimentation des circulations profondes pour la plaine. L'eau de ruissellement du bassin versant de l'anticlinal de la Raye s'infiltra aussi en partie en arrivant au contact du bassin tertiaire (cf. § 4.2.4.2).

Pour la plaine, nous présentons trois sections d'écoulements de l'eau en liaison avec le secteur 14 et une quatrième section située entre Barbières et Bourg de Péage. La légende de ces sections est présentée sur la figure 6-10.

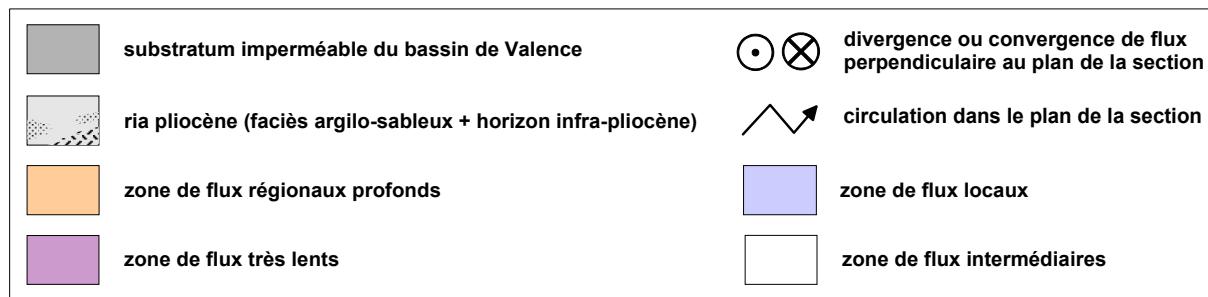


Figure 6-10: Légende des différentes sections présentées.

Section 1 entre Ourches et Beauvallon (figure 6-11):

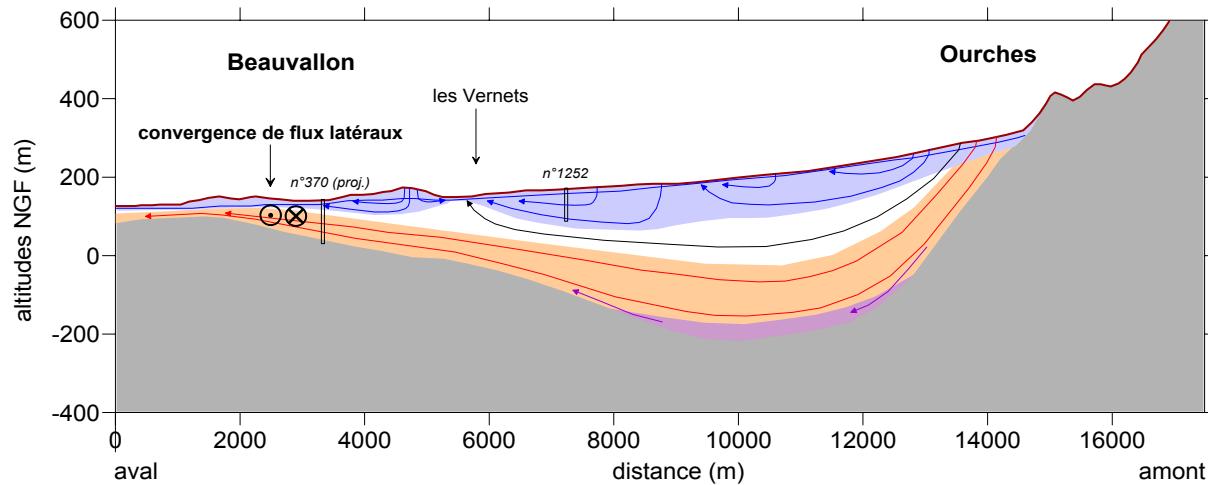


Figure 6-11: Section n°1 (Ourches-Beauvallon).

En amont du bassin se situe une vaste zone d'infiltration de l'eau dans l'aquifère. Cette zone donne naissance à des flux locaux, intermédiaires et régionaux. Les flux locaux émergent pour rejoindre les rus et ruisseaux pérennes (Ourches, Ecoutay, etc) ou la nappe superficielle. D'autres systèmes de flux locaux sont mis en évidence le long de cette section grâce aux nitrates (forage n°1252). Une zone de flux profond avec des vitesses très lentes doit

probablement exister au fond du bassin. Ces flux lents ont été mis en évidence lors de la première datation effectuée au forage de Montoison du SIE Sud Valentinois (forage n°1245 cf. § 5.3.4.1). Ces flux quasi stagnants sont liés à la forme de cuvette du bassin et par des niveaux beaucoup plus marneux à la base du remplissage molassique (marnes de St Lattier cf. Figure 1-21). Une remontée d'eau évoluée est relevée au niveau du hameau des Vernets (absence de nitrate). Celle-ci est due à la présence probable d'une barrière hydraulique liée à la butte molassique de Montéléger/Beaumont les Valence. Cette eau rejoint alors le Pétochin. Enfin, la présence d'eaux évoluées et âgées dans le forage n° 370 se fait à la faveur de la remontée du substratum à l'Est de la commune de Beauvallon. L'eau profonde rejoint ici la Véore. Cette interprétation est tout à fait en accord avec les jaugeages différentiels (cf. § 2.4.3) et la carte des différences de niveau statique (cf. Figure 2-12).

Section 2 entre Combovin et le plateau de Lautagne (figure 6-12):

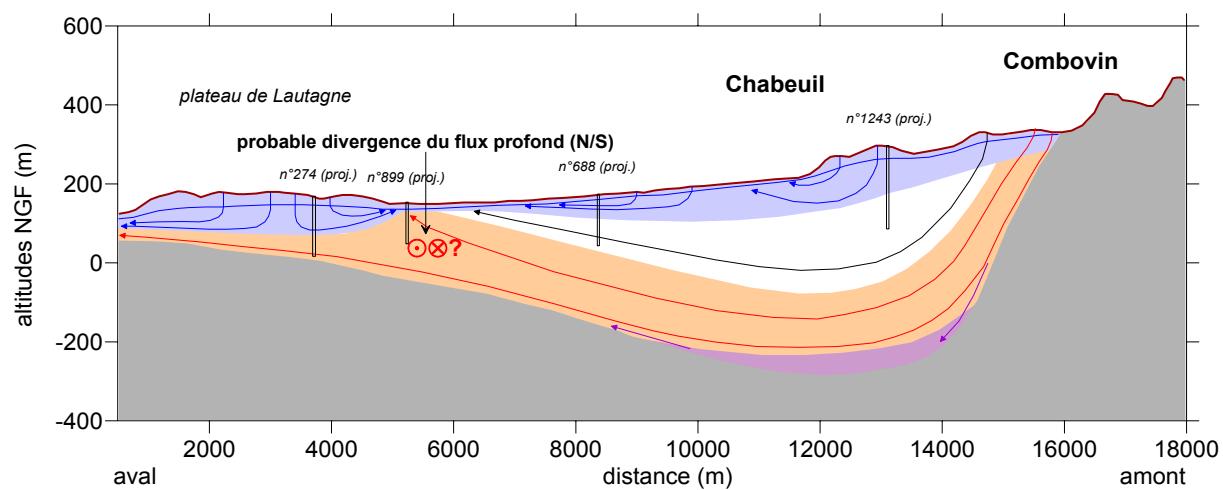


Figure 6-12: Section n°2 (Combovin-Lautagne).

Une zone d'infiltration majeure de l'aquifère se situe en bordure du Vercors. La teneur en deutérium de l'eau du forage n°1243 montre une origine très localisée. L'eau du forage n°688 s'est infiltrée en bordure du Vercors mais la teneur en nitrate montre une légère contamination par des flux plus courts. Le forage n°899 est situé dans une zone de remontée des circulations profondes régionales. Cette remontée est favorisée par la proximité du substratum et par la présence du dôme piézométrique de la butte molassique de Lautagne qui forme une barrière hydraulique. En effet, sous le plateau de Lautagne des flux locaux sont mis en évidence par la présence de nitrate et de tritium (forage n°274). Une partie des écoulements rejoint alors la

nappe superficielle et/ou le Guimand et une partie doit probablement diverger pour rejoindre le secteur de Beauvallon au Sud et/ou la ria pliocène au Nord.

Section 3 entre Peyrus et Valence (figure 6-13):

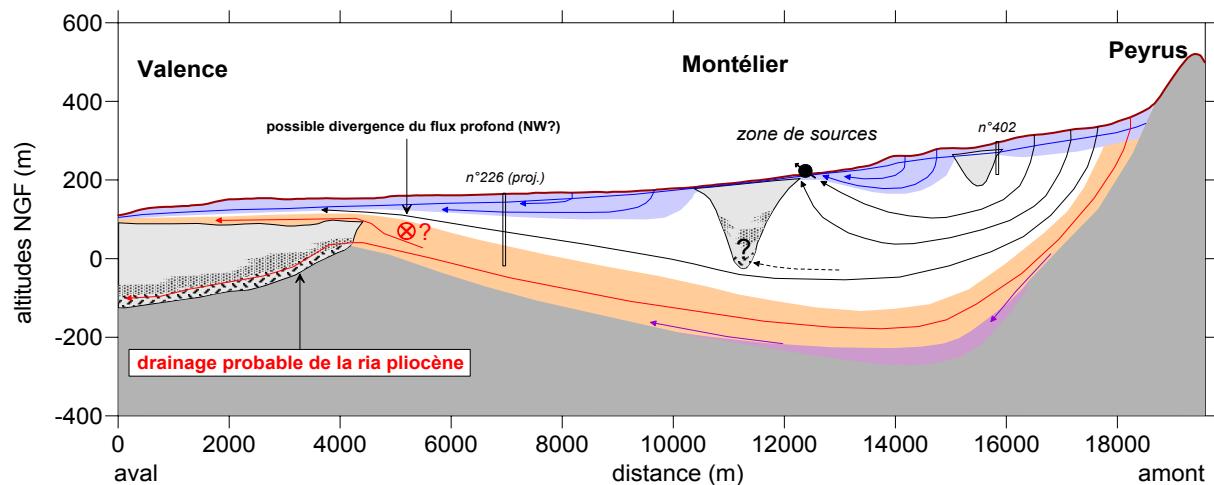


Figure 6-13: Section n°3 (Peyrus-Valence).

La ria pliocène vient ici modifier les écoulements de l'eau souterraine. Les circulations superficielles et intermédiaires sont influencées par la ria pliocène située au milieu de cette section à la hauteur de la commune de Montélier. Une zone de sources se superpose assez bien à la position de cette ria (cf. Figure 2-12). Plus à l'Ouest, le forage n°226 montre une eau infiltrée en bordure du Vercors mais l'âge de l'eau est de l'ordre de 100 à 300 ans seulement. Cela suggère une circulation moins profonde que celles des sections 1 et 2, *i.e.* intermédiaire. Cependant, ce forage montre une tendance à la hausse de ses teneurs en nitrate. Il est alors probable que l'eau de ce forage est la résultante d'un mélange constitué en grande partie d'un flux plus profond et de quelques pourcents d'un flux local contaminé par des nitrates. La partie aval de cette section est plus problématique car colmatée par les argiles et sables pliocènes. Une partie seulement de la nappe profonde se déverse dans la nappe superficielle car la carte des teneurs en magnésium de la nappe superficielle ne montre pas de fortes concentrations (cf. § 3.3.2.1.3). Cela suggère qu'au moins une partie de l'aquifère molassique rejoint la ria pliocène du Rhône à la faveur de niveau plus sableux et/ou par l'horizon 'infra-Pliocène' plus perméable (de La Vaissière *et al.*, 2006). Une possible divergence du flux profond en direction du Nord-Ouest ne peut pas être exclue.

Section 4 entre Barbières et Bourg de Péage (figure 6-14):

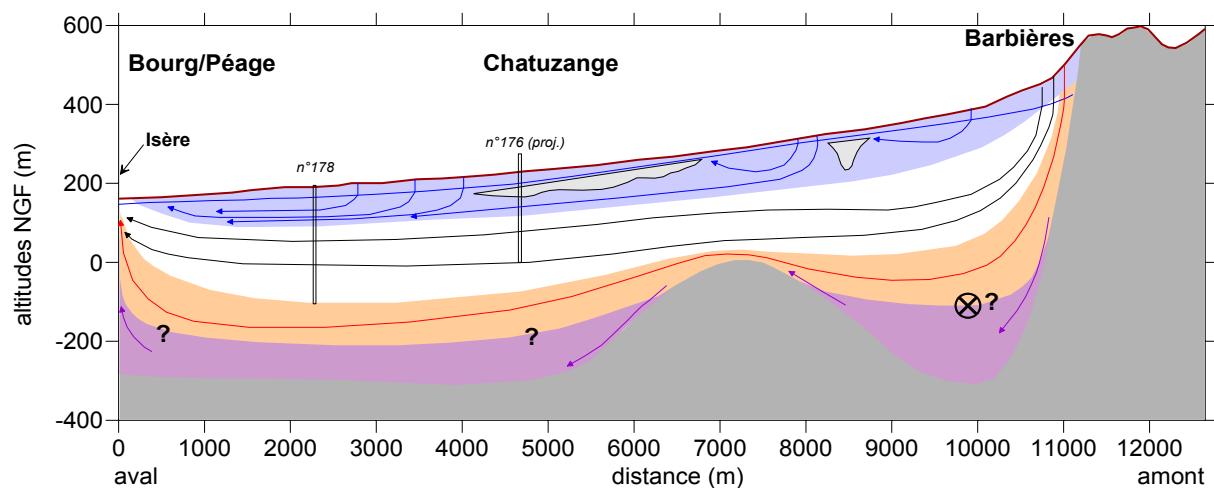


Figure 6-14: Section n°4 (Barbières-Bourg de Péage).

Cette section recoupe l'anticlinal de St-Lattier qui sépare le bassin de Valence en deux sous bassins (cf. Figure 1-19). Ce premier sous bassin se prolonge le long du Vercors au Nord au-delà de l'Isère. Le rôle hydrogéologique de cet anticlinal demeure inconnu, cependant celui-ci sépare probablement les écoulements profonds dont une partie rejoindrait l'Isère guidé par l'orientation nord-est de cette barrière. Au fond de ce bassin, de l'eau très mal renouvelée existerait à la faveur de cette cuvette et à la présence des marnes de St-Lattier. La datation du forage n°178 situé le plus en aval hydraulique montre des eaux de quelques centaines d'années et infiltrées en bordure du Vercors. La diagraphie au micromoulinet (cf. Figure 6-6) montre des venues d'eaux localisées à partir de 235 m de profondeur. Vu l'âge de l'eau, le forage capte sans nul doute un flux intermédiaire. Le forage n°176 capte à la fois des flux locaux (augmentation chronique des teneurs en nitrate, teneur de 10 UT) et un flux intermédiaire.

6.3.2 Bassin de Crest

Ce bassin forme une cuvette synclinale entre Grane-Autichamp-Crest, ouverte en un demi-cercle sur la vallée de la Drôme et limitée à son pourtour par les calcaires marneux de l'Oligocène. Jeannolin (1985) a souligné qu'il n'y avait pas ou peu d'échanges entre l'aquifère molassique et la nappe de la Drôme. Le bassin de Crest a la particularité d'être en partie colmaté à l'ouest par la ria pliocène de la Drôme. Au chapitre 2, nous avons montré les

potentialités aquifères des niveaux sableux pliocènes de la vallée de la Drôme. Il existe donc probablement un drainage de l'aquifère molassique par la ria pliocène mais la circulation de l'eau dans ces niveaux sableux est lente. En effet, l'âge de l'eau du forage n°893 (situé au niveau de Livron) est de l'ordre de 1700 ans pour une eau infiltrée à proximité.

Au niveau de la commune de Chabrillan, le secteur 15 montre des eaux évoluées, âgées et infiltrées en altitude. L'altitude du bassin d'alimentation du forage n°280 correspondrait au massif de Marsanne situé au Sud-Ouest en dehors du bassin molassique.

- La première hypothèse suppose l'existence de circulation d'eau au travers les nombreuses failles d'orientations méridiennes ou subméridiennes qui ont fracturé les roches crétacés, oligocènes et miocènes (Mandier, 1988). Les forages de la commune de Chabrillan au lieu-dit Jacamons montrent un net décrochement de l'Oligocène⁴⁹. L'eau de pluie s'infiltrerait dans l'Oligocène (calcaire marneux fissuré), remonterait à la faveur de failles et rejoindrait la ria pliocène de la Drôme. Ce schéma d'alimentation permet aussi d'expliquer les teneurs plus élevées en sulfate reconnues dans ce secteur (cf. § 3.3.2.2.2).
- La seconde hypothèse suppose seulement un mélange d'eaux en provenance de l'Oligocène sous-jacent par diffusion moléculaire d'une eau beaucoup plus ancienne infiltrée lors de la dernière période glaciaire (la présence des failles pouvant aider cette diffusion). L'âge de l'eau calculé pour ce forage serait alors plus jeune que l'âge réel du mélange (Bethke *et al.*, 2002b). Ce schéma permet lui aussi d'expliquer les teneurs plus élevées en sulfates.

6.3.3 Drôme des Collines

Les résultats géochimiques et isotopiques des eaux des secteurs 18 et 19 prouvent l'existence de deux flux régionaux issus des zones situées en altitude à l'Est. Cependant, les très nombreuses collines génèrent des flux locaux complexes qu'il faudrait représenter en trois dimensions. Pour simplifier, nous avons choisi de représenter deux sections principales d'orientation Est-Ouest et deux sections transverses qui recoupent les secteurs 18 et 19 (figure 6-9).

⁴⁹ rapport hydrogéologue agréé.

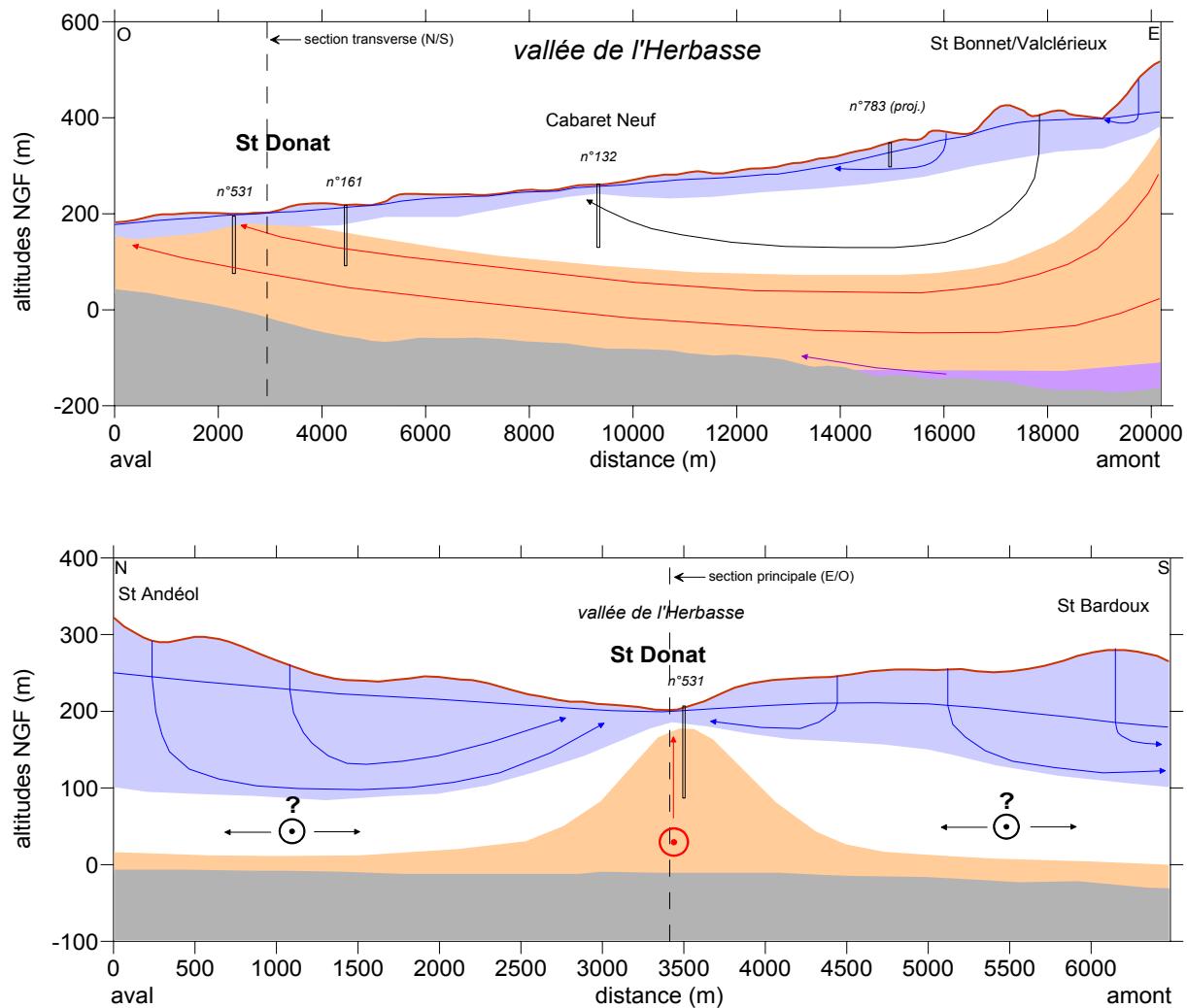
Section 5 de la moyenne vallée de l'Herbasse (figure 6-15 a et b):


Figure 6-15: Sections n°5 (moyenne vallée Herbasse).

La section principale suit la vallée de l'Herbasse depuis St Bonnet de Valcléieux jusqu'à l'aval de St Donat. Nous avons vu au chapitre 2 que cette vallée constitue un axe de drainage majeur de la Drôme des Collines (piézométrie et jaugeages différentiels). La datation des eaux montre une augmentation de l'âge de l'eau entre le forage du SIE Herbasse (n°132) situé au lieu-dit Cabaret Neuf jusqu'au forage d'irrigation du SMARD à l'aval de la commune de St-Donat (n°531). Le bassin d'alimentation de ces forages correspond au château d'eau formé par les reliefs en direction de l'Est vers le plateau de Thivolet. Le flux régional profond alimente l'Herbasse et sa nappe d'accompagnement au niveau de St Donat. La fermeture du bassin à l'Ouest par la remontée du substratum et la présence des argiles pliocènes expliquent cette localisation.

La section transverse permet de représenter la convergence de flux locaux à partir des collines molassiques situées au Nord et Sud de la vallée de l'Herbasse. Ces venues d'eau récente ont été mises en évidence par comparaison des vitesses hydrauliques et isotopiques réelles (cf. Tableau 6-1 ligne 11 entre les forages n°132 et 161). Sous les buttes molassiques, l'orientation des flux intermédiaires est difficile à déterminer.

Section 6 de la moyenne vallée de la Galaure (figure 6-16 a et b):

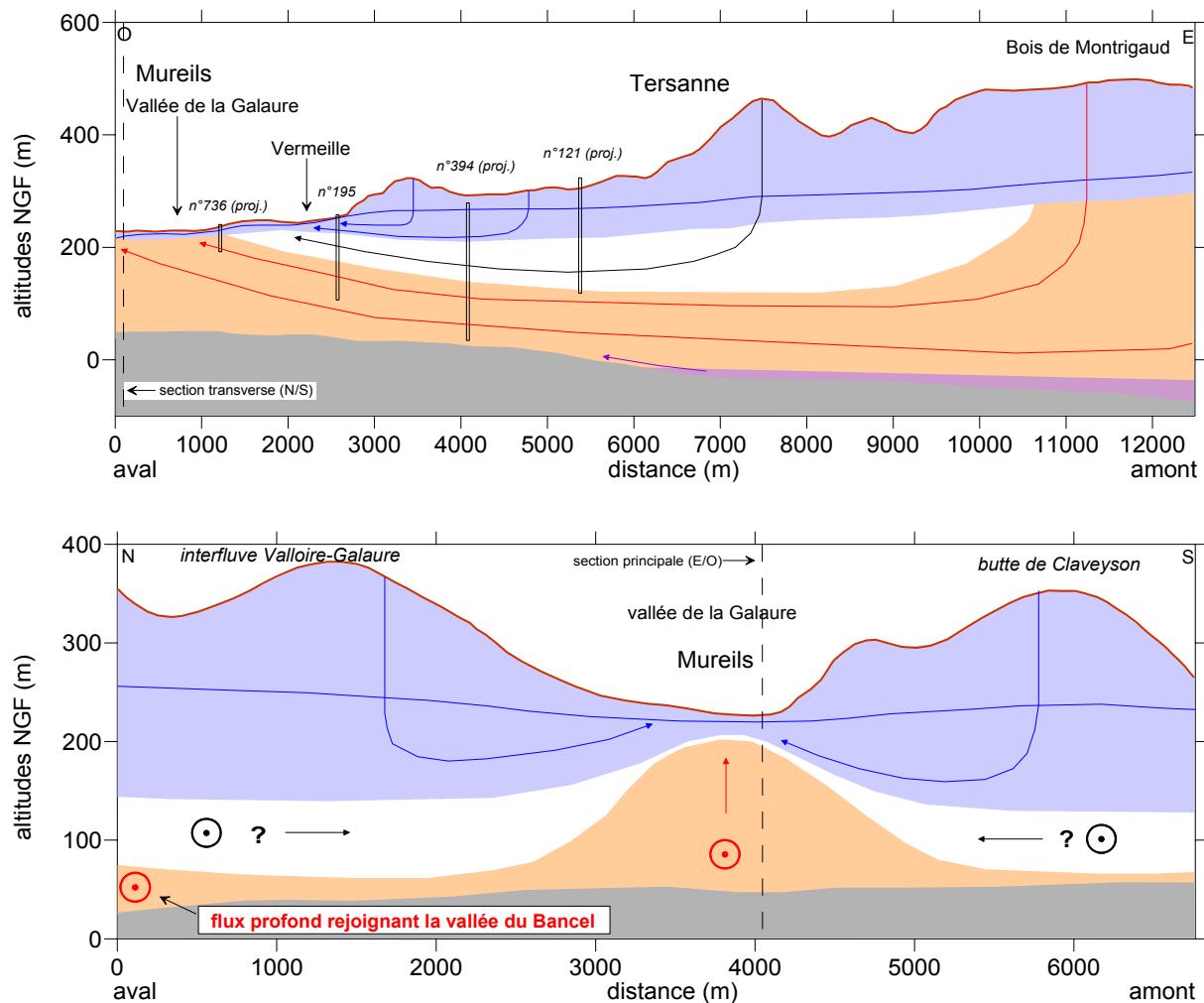


Figure 6-16: Sections n°6 (moyenne vallée de la Galaure).

La section principale Est-Ouest suit le flux régional profond qui est alimenté par les zones les plus élevées (Bois de Montrigaud, plateau de Chambaran). La convergence d'écoulements à long temps de séjour est probablement due à la présence d'une barrière hydraulique créée par la colline située au Sud de la commune de Mureils (butte de Claveyson) et à une épaisseur de molasse épaisse seulement de 200 m environ (section transverse). En effet, à l'ouest de cette

butte, la datation du forage de Claveyson (n° 399) montre des eaux actuelles. Les écoulements profonds sont alors contraints de converger vers la vallée de la Galaure. L'âge de l'eau du forage n°736, situé dans cette vallée, est de l'ordre de 1800 ans pour une profondeur de seulement 48 m. Cela montre donc la remontée de circulations profondes. Les débits de la Galaure augmentent fortement à partir de l'amont de Mureils (cf. Figure 2-11.c). La section transverse montre aussi un autre flux profond qui va rejoindre la vallée du Bancel (secteur 20).

6.4 CONCLUSIONS

Nous avons démontré que le fonctionnement de l'aquifère du bassin de Valence dépend étroitement de la topographie et de la structure géologique du bassin. Nous avons mis en évidence une stratification de l'aquifère néogène du bassin de Valence où les circulations les plus profondes dépendent du relief régional et les circulations les plus superficielles ne dépendent que de la topographie locale. Cet aquifère est un bel exemple du modèle théorique des circulations de l'eau souterraine développé par Hubbert (1940) et Tóth (1963). La mise en charge de l'aquifère molassique dans les zones de vallées explique alors les faibles coefficients d'emmagasinement relevés (cf. Tableau 2-4).

Des schémas de circulation de l'eau souterraine suivant des grandes sections d'écoulement de l'eau ont été proposés. Les vitesses de circulation de l'eau varient de quelques mètres par an pour les plus profondes ou bien pour celles situées dans les rias pliocènes, jusqu'à 200 à 300 mètres par an pour les circulations les plus superficielles et dans les zones les plus perméables. Ces nouveaux éléments sont d'une importance déterminante pour la gestion et la protection de cette ressource.

Chapitre 7 Etat de la ressource

La compréhension du fonctionnement hydrogéologique du bassin de Valence était nécessaire pour aborder le bilan de la ressource. Ce dernier chapitre dresse un état qualitatif et quantitatif de la ressource. Nous présenterons d'abord un bilan quantitatif basé sur les résultats des anciennes études et sur les nouveaux résultats apportés (conditions aux limites). Nous décrirons le volume, les entrées et les sorties naturelles et artificielles de la nappe. Puis un diagnostic des atteintes de la ressource sera proposé. Nous intégrerons les résultats de la campagne pesticide de 2005 sur les eaux souterraines. Le caractère vulnérable de cette ressource patrimoniale sera démontré.

7.1 BILAN QUANTITATIF DE L'AQUIFERE MOLASSIQUE

Le bilan d'une nappe est un des points clés de toute étude hydrogéologique. Nous avons démontré la complexité du fonctionnement hydrogéologique global du système aquifère du bassin de Valence. Un travail complémentaire s'avère nécessaire pour évaluer les volumes échangés entre les différents réservoirs. Toutefois, l'approche géochimique et isotopique a permis de préciser certaines conditions aux limites.

7.1.1 Volume aquifère

Le volume sédimentaire du bassin de Valence est de l'ordre de 625 km³ pour les terrains néogènes et quaternaires (cf. Chapitre 1). La carte piézométrique permet de déduire le volume de sédiment mouillé qui est de l'ordre de 533 km³. Seul les deux tiers sont qualifiés de perméable ce qui donne un volume de 352 km³. Le volume aquifère est donc de l'ordre de 42 milliard de m³ pour une porosité efficace de 12 %, dont 13,5 milliards de m³ pour la partie sud de l'Isère et 28,5 milliards de m³ pour la partie nord. Si on estime à seulement 1 % le volume facilement exploitable, ce volume est alors de 420 millions de m³.

7.1.2 Entrées dans le système

Dans ce paragraphe, nous reprenons les valeurs déterminées par Gouguassis (1982) et Jeannolin (1985) sur la pluie utile mais en tenant compte des conditions aux limites mises en évidence au cours de cette étude (vallées, Vercors).

Le système hydrogéologique du bassin de Valence pour lequel nous proposons un essai de bilan correspond à deux entités: la Drôme des Collines et la plaine de Valence + le bassin de Crest. Dans la partie Drôme des Collines, notre bilan hydrogéologique exclut les superficies de la plaine de l'Isère au Sud, de la vallée de la Valloire au Nord et de l'affleurement du socle centralien à l'Ouest. Au Sud de l'Isère, le bilan hydrogéologique exclut la superficie de la plaine de la Drôme et celle située à l'Ouest des buttes molassiques de Chateauneuf sur Isère et de Lautagne.

7.1.2.1 Drôme des Collines

7.1.2.1.1 Recharge par les précipitations

La limite hydrogéologique de ce secteur a été définie à partir de la piézométrie. Le vaste dôme piézométrique situé au niveau de la partie la plus élevée (plateaux de Chambaran et de Thivolet) permet en effet de circonscrire une limite d'alimentation de ce secteur. Par planimétrage, la superficie disponible pour l'infiltration⁵⁰ est de l'ordre de 530 km². La pluie utile disponible pour le ruissellement et l'infiltration est de 333 mm/an (Gouguassis, 1982). Gouguassis a aussi montré que le ruissellement ne dépasse pas 5 % des pluies utiles. Le volume rejoignant annuellement l'aquifère est donc de l'ordre de 168 millions de m³.

7.1.2.1.2 Apport de l'irrigation

Nous avons démontré de manière qualitative au chapitre 4 la réinfiltration de l'eau d'irrigation stockée dans la zone non saturée. Malheureusement, ce volume d'eau remobilisé est

impossible à évaluer. Nous considérerons dans la suite du bilan que les prélèvements dans la molasse par l'irrigation sont perdus pour l'aquifère.

Les syndicats d'irrigation de ce secteur utilisent en majorité l'aquifère molassique. Cependant, des prélèvements par pompage dans le Rhône et l'Isère existent. Seuls les secteurs les plus proches de ces cours d'eaux sont alimentés par cette ressource (réseau des syndicats SIPIRR, Larnage). Nous considérons que ces volumes supplémentaires sont faibles et totalement repris par évapotranspiration (pas de signature isotopique des eaux du Rhône et de l'Isère dans l'aquifère molassique).

7.1.2.2 Plaine de Valence et bassin de Crest

7.1.2.2.1 Alimentation aux limites

On a pu montrer au cours de ce travail que le karst de la bordure du Vercors alimente de manière négligeable le bassin molassique. Par contre, les résultats des isotopes stables de la molécule d'eau et les jaugeages différentiels montrent une alimentation en bordure du bassin par de l'eau qui ruisselle puis s'infiltra en arrivant au niveau des terrains molassiques. Les pertes par infiltration dans le lit des rivières sont estimées à partir de celles mesurées sur la Barbérolle. Sur une distance de 2250 m, les pertes sont de l'ordre de 12 à 16 l/s, en étage (jaugeages DIREN année 1998). En supposant des pertes similaires pour toutes les autres rivières ou ruisseaux en provenance du Vercors, nous pouvons estimer l'infiltration totale comprise entre 3 et 5 millions de m³ par an (pour 19 km de linéaire cumulé). La superficie du bassin versant de la bordure occidentale du Vercors qui donne naissance à des écoulements diffus est d'environ 12 km². Pour une lame d'eau moyenne annuelle tombée de 1 m (cf. Figure 2-1) et en supposant que seulement un quart s'infiltra vers l'aquifère, le volume infiltré est de l'ordre de 3 millions de m³ par an. Le volume total infiltré en bordure du bassin serait de l'ordre de 6 à 8 millions de m³ par an.

⁵⁰ Les vallées ont été exclues de cette surface car elles sont autant de zone de drainage de la nappe.

Dans le bassin de Crest, des venues d'eaux en provenance du massif de Marsanne ont été démontrées. L'estimation des volumes supplémentaires est difficile et mériterait d'être évaluée. Pour le bilan, nous considérons ce volume compris entre 1 et 2 millions de m³ par an.

7.1.2.2.2 Recharge par les précipitations

Le système hydrogéologique de cette partie du bassin de Valence est composé de deux sous-systèmes avec l'aquifère molassique et la nappe des alluvions quaternaires. La superficie d'alimentation de la nappe profonde de cette partie sud de l'Isère est d'environ 235 km² (superficie obtenue à partir de la piézométrie, de la géologie). Ces zones d'infiltration se localisent principalement à l'Est de la plaine et au niveau des buttes molassiques. La pluie utile pour le ruissellement et l'infiltration est de 278 mm/an (Jeannolin, 1985). Le volume moyen ruisselé ou infiltré en année moyenne est de l'ordre de 65 millions de m³. Les faciès indurés de la molasse à l'Est de la plaine doivent favoriser un peu plus le ruissellement par rapport à celui évalué par Gouguassis (1982) dans la vallée de l'Herbasse. Nous faisons l'hypothèse d'un volume ruisselé de l'ordre de 10 %. Le volume infiltré vers l'aquifère molassique par les précipitations est de l'ordre de 59 millions de m³.

Le volume annuel total apporté à l'aquifère molassique situé au Sud de l'Isère par les écoulements aux limites et les précipitations est donc de l'ordre de 66 à 69 millions de m³.

La superficie pour l'infiltration de la nappe superficielle est d'environ 315 km². L'apport annuel à la nappe superficielle serait de l'ordre de 83 millions de m³, en supposant un ruissellement de 5 % (alluvions plus perméables).

7.1.2.2.3 Apport de l'irrigation

Comme précédemment le volume retourné à la nappe profonde par les excédents de l'irrigation provenant de cette nappe est inconnu et il sera négligé. Par contre, la nappe superficielle est alimentée par de l'eau d'irrigation extérieure. Le principal réseau d'irrigation est celui du syndicat intercommunal des eaux du canal de la Bourne. Le SI du canal de la Bourne apporte 26 millions de m³ par an à la plaine de Valence, dont 18 millions de m³

proviennent directement de la Bourne, 7 millions de m³ de l'Isère et 1 millions de m³ du Rhône grâce à des stations de pompage. La majeure partie de cette eau est reprise par évapotranspiration.

Ce réseau est constitué de canaux d'irrigations qui ont été étanchés au cours des 40 dernières années et de conduites sous pression. L'étude BURGEAP (1964) avait montré des pertes par infiltration le long des colatures. A l'heure actuelle, l'eau arrivant au bout des colatures, constitué par des puits d'infiltration, est seule susceptible de s'infiltrer vers la nappe. Il existe 3 principaux puits d'infiltrations qui sont situés au lieu-dit « Bergeron » sur la commune d'Alixan, « Riviers » sur la commune de Valence et « au Guimand » sur la commune de Malissard, dans la partie ouest de la plaine. Les pertes sont seulement de 10 à 20 % des intrants en haute-saison d'irrigation mais peuvent monter, en basse-saison, à 100 %. On ne peut qu'estimer la perte annuelle comprise entre 7 et 9 millions de m³, qui rejoint la nappe superficielle. Des interconnexions existent avec d'autres syndicats d'irrigations, notamment au niveau de la Drôme. D'autres syndicats d'irrigation exploitent les eaux de surface (Rhône, Isère et Drôme).

7.1.3 Les prélevements

7.1.3.1 Les prélevements connus

Les principaux usages en eau sont d'une part, l'eau potable et d'autre part, l'eau d'irrigation et d'alimentation des élevages. A partir des volumes annuels fournis par les agriculteurs (volumes déclarés par point de prélèvement pour l'année 2002), nous pouvons donner une première estimation des volumes annuels prélevés, dans l'aquifère néogène qui est de l'ordre de 12,4 10⁶ m³ pour 388 forages d'irrigations répertoriés (de La Vaissière, 2003). A cela il faut ajouter les forages de particuliers (seulement 67 forages répertoriés dans la base de données), qui prélèvent environ 0,04 10⁶ m³, en prenant par forage une consommation de 500 m³ par an (Faure, *com. pers.*). Pour l'alimentation en eau potable, grâce aux données de l'Agence de l'Eau de l'année 2002, avec 42 points de prélèvement dans la molasse, cela nous donne un volume de 8,5 10⁶ m³. De manière identique, les prélevements industriels, avec 9 forages connus, sont de l'ordre de 1,6 10⁶ m³. Au total pour l'aquifère molassique, les prélevements sont de 22,5 10⁶ m³ pour l'année 2002 (tableau 7-1) dont 15,9 millions de m³ au

Nord de l'Isère et 6,6 millions de m³ au niveau de la plaine de Valence et dans le bassin de Crest.

Type de prélèvement	Particulier	Irrigation	Industriel	AEP	Total
Nombre de forages utilisé pour l'évaluation des prélèvements	67	388	9	42	506
Volume annuel (millions de m ³)	0,04	12,4	1,6	8,5	22,54

Tableau 7-1: Prélèvements par forage dans l'aquifère molassique pour l'année 2002.

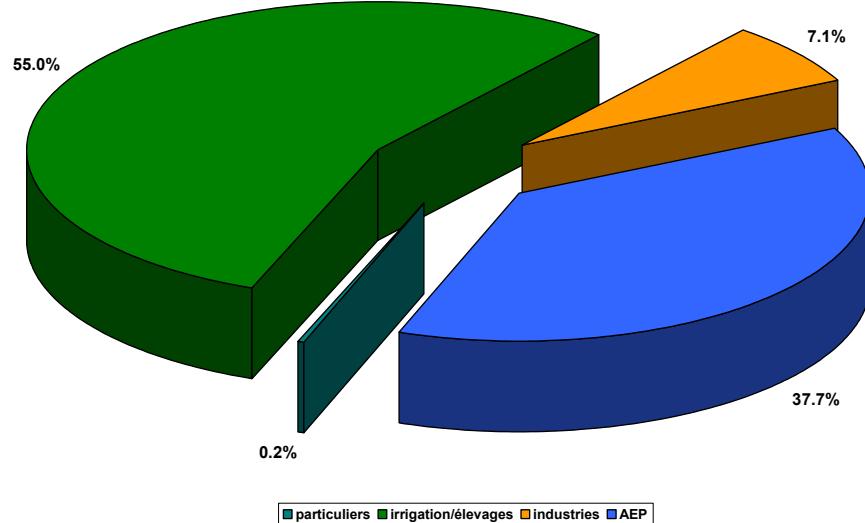


Figure 7-1: Répartition des usages de l'eau de l'aquifère néogène (année 2002).

Les usages sont répartis pour 55 % à l'irrigation/élevage, 37,7 % pour l'AEP, 7,1 % pour l'industrie et 0,2 % pour les particuliers (figure 7-1).

Les bureaux d'études SOGREAH et GEO+ ont donné une évaluation des prélèvements au niveau de l'aquifère molassique à partir des surfaces irriguées, tous usages confondus, qui est de l'ordre de 20 millions de m³ par an, dont 12 millions de m³ pour la Drôme des Collines et 8 millions pour la plaine de Valence s.s. (Geo+, 2004; SOGREAH, 2004). Mr Lafosse (DIREN Rhône-Alpes, échelon de Valence), a estimé, pour sa part, les prélèvements à 27 millions de m³ pour l'année 1998 (*note interne*). Même si les ordres de grandeurs sont respectés, la fourchette d'estimation des volumes prélevés reste large.

7.1.3.2 Estimation des prélevements réels

Au cours de mes investigations de terrains, j'ai pu me rendre compte que le nombre de forages domestiques est très largement sous-estimé et que, par contre, peu d'agriculteurs n'ont pas déclaré leur forage. Par ailleurs, les forages d'eaux des PME sont aussi pour la plupart non référencés. Nous avons tenté d'estimer les volumes réels prélevés dans l'aquifère néogène en considérant que 30 % des forages industriels ou des PME et 90 % des forages des agriculteurs sont connus. Le nombre de forage particulier situé dans la molasse ne peut qu'être estimé à partir de l'activité des foreurs travaillant essentiellement dans la région (une vingtaine de foreur). En comptant 25 forages par an et par foreur depuis vingt ans, cela donne un nombre de forage de l'ordre de 10 000 et une consommation de $5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ par an. Les volumes annuels réellement prélevés dans l'aquifère molassique seraient de l'ordre de 32 Mm^3 dont $9,4 \text{ Mm}^3/\text{an}$ au Sud de l'Isère et $22,6 \text{ Mm}^3/\text{an}$ pour la Drôme des Collines.

7.1.4 Comparaison prélevements/entrées

La comparaison des prélevements par rapport aux apports est faite pour montrer une éventuelle surexploitation de la ressource. Nous l'avons effectué en utilisant les prélevements réels supposés pour la partie nord et sud de l'Isère.

Pour la Drôme des Collines, les prélevements annuels ne représentent que 13 % des apports. Pour la plaine de Valence et le bassin de Crest, les prélevements ne représentent que 14 % des apports. Cette estimation montre qu'il n'y a pas de surexploitation de l'aquifère molassique en année moyenne. Les suivis piézométriques (cf. Figure 2-4) confirment la bonne stabilité de l'aquifère néogène. Toutefois, ces suivis montrent une baisse notable du niveau piézométrique lorsque une ou plusieurs années sèches se succèdent (par exemple les années 1989 à 1991 ou 2003 (de La Vaissière, 2004).

7.1.5 Les sorties naturelles de la nappe

Une partie des écoulements souterrains rejoint les cours d'eaux superficiels du bassin de Valence et l'autre partie reste souterraine en rejoignant les nappes superficielles (alluvions de

la Valloire, de l'Isère, du Rhône et de la Drôme) et la ria pliocène du Rhône. Nous reprenons les résultats des données hydrologiques de la DIREN. Ici aussi un travail complémentaire sera nécessaire pour affiner les résultats.

7.1.5.1 Ecoulements de surface

Une première approche consiste à utiliser les modules des rivières Véore, Herbasse et Galaure présenté au chapitre 2 (cf. Tableau 2-6) puis d'extrapoler aux superficies de la Drôme des Collines et de la plaine de Valence et du bassin de Crest. Pour la Drôme des Collines, la moyenne du module spécifique est de 8,9 l/s/km², ce qui donne des fuites superficielles de 149 millions de m³ par an. Au Sud de l'Isère, le module spécifique de la Véore est de 6,35 l/s/km², ce qui donne des fuites superficielles de 110 millions de m³ par an. Les stations de jaugeages situées en aval de ces trois rivières ne sont pas représentatives de l'écoulement moyen de surface du bassin. En particulier, la nappe de la molasse se déverse totalement dans la Galaure au contact du socle centralien à l'endroit où se situe la station de jaugeage. La Véore a une configuration quasi similaire où la remontée du substratum provoque un fort déversement de la nappe molassique vers la rivière. Ces remarques impliquent que ces flux superficiels calculés à partir du module de ces trois rivières sont sans doute excessifs.

Dans le secteur de la Drôme des Collines, à partir des jaugeages différentiels d'Avril 1977 (moyennes eaux), le débit spécifique de trop-plein de l'aquifère a été estimé à environ 6,8 l/s/km² (de Bellegarde *et al.*, 1977). Nous pensons que ce flux est plus représentatif des écoulements réels superficiels. Dans ce cas, la surestimation à partir des modules spécifiques correspond à 1,3 fois le flux réel ($C = 8,9/6,8$). Grâce à ce coefficient de correction, la seconde approche consiste à estimer le flux réel superficiel sortant au niveau de la plaine de Valence et du bassin de Crest, en divisant les fuites connues à partir du module spécifique de la Véore par C. Cela donne un flux réel superficiel de 84 millions de m³ par an (soit 4,8 l/s/km²).

Ce drainage superficiel ne tient pas compte des sorties qui se font directement dans le lit de l'Isère ou de la Drôme. Il n'a pas été possible de mesurer les débits instantanés de l'Isère sur différentes sections car c'est une rivière au débit très variable, fonction des nombreux barrages

présents sur son cours. Ces sorties occultes bien que superficielles seront donc comptabilisées comme sorties souterraines dans notre bilan.

7.1.5.2 Ecoulements souterrains

Dans un bilan hydrogéologique, les entrées et les sorties s'équilibrivent ($E = S$). Les sorties souterraines sont alors données par l'équation-bilan suivante: $S_{\text{souterraine}} = E_{\text{Vol. infil. précipitation}} + E_{\text{irrigation}} - S_{\text{prélèvements}} - S_{\text{drainage}}$. Le tableau 7-2 récapitule les entrées et sorties estimées entre le Nord et le Sud de l'Isère et donne le volume annuel moyen des sorties souterraines.

millions de m ³ par an	$E_{\text{Vol. infil. précipitation}}$	$E_{\text{irrigation}}$	$S_{\text{prélèvements}}$	S_{drainage}	$S_{\text{souterraine}}$
Drôme des Collines	168	0?	23*	114	31
Plaine de Valence + bassin de Crest	83 + 67	0?+8**	10*+15***	84	49

Tableau 7-2: Bilan des écoulements dans le bassin de Valence.

* volume réel prélevé dans l'aquifère molassique (arrondi)

** volume qui rejoint la nappe superficielle

*** volume extrapolé à partir du bilan de la nappe superficielle de la plaine de Valence (Geo+, 2004)

Pour la Drôme des Collines, à partir de la superficie des bassins hydrogéologiques définis au chapitre 2 (cf. § 2.3.1.3), 60 % (soit 19 millions de m³ par an) des écoulements souterrains vont rejoindre la nappe de la plaine de l'Isère ou l'Isère directement et 40 % (soit 12 millions de m³ par an) alimentent la nappe de la Valloire.

Pour la plaine de Valence, en raisonnant de manière similaire, 31 % (soit 15 millions de m³ par an) vont rejoindre l'Isère et sa nappe d'accompagnement, 52 % (soit 25 millions de m³ par an) sont drainés par la nappe d'accompagnement du Rhône et une faible part par la ria pliocène du Rhône et enfin 17 % (soit 9 millions de m³ par an) sont drainés par la Drôme, par sa nappe d'accompagnement et une dernière part suivant l'axe de la ria pliocène de la Drôme.

7.2 ATTEINTES QUALITATIVES A L'AQUIFERE MOLASSIQUE

7.2.1 Les nitrates

L'impact de l'agriculture sur la qualité des eaux souterraines a été constaté par les nitrates depuis le début des années 1980 sur la nappe superficielle. La fertilisation des cultures par les engrains azotés et le lisier des élevages sont les deux principaux apports en nitrate des eaux souterraines (CPGF, 1982). Le bassin de Valence est une région essentiellement agricole avec une Surface Agricole Utilisée de 56 %. Les cultures dominantes sont les céréales (45 %) avec principalement maïs, sorgho et blés puis les fourrages (21 %) et vergers (17 %). Les élevages sont nombreux dans le bassin avec principalement l'aviculture qui représentent 70 % des élevages (données RGA 2000).

Des efforts (opérations Just'Azote, FertiMieux, définition de Zones Vulnérables aux nitrates) ont été conduits par les autorités locales pour réduire les apports en nitrates d'origine agricole.

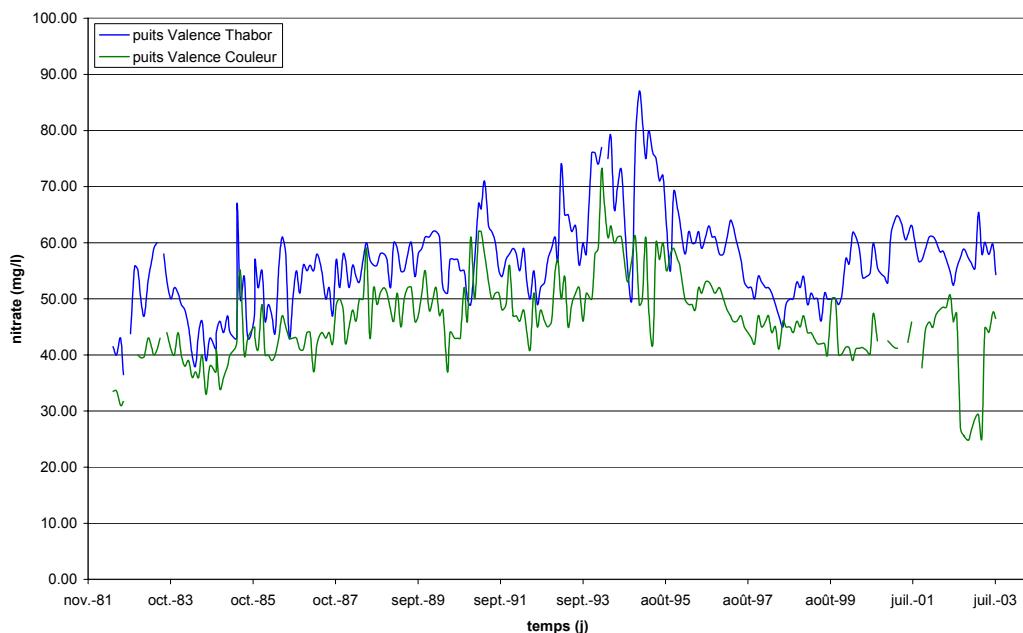


Figure 7-2: Evolution des nitrates dans la nappe superficielle (données DDASS).

Les efforts du monde agricole donnent des résultats encourageants avec une tendance à la stabilité, voire à la diminution des teneurs en nitrate dans la nappe superficielle (figure 7-2). Cependant, l'aquifère molassique montre des teneurs irrégulières mais globalement

croissantes sur quelques forages AEP de la plaine de Valence depuis une vingtaine d'années (figure 7-3).

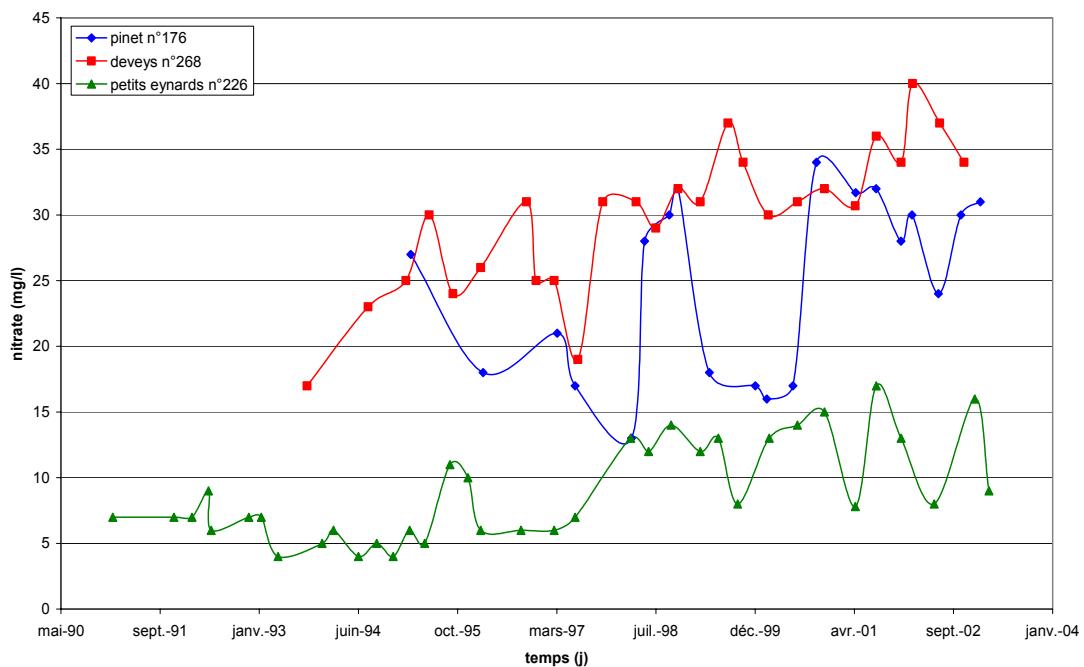


Figure 7-3: Evolution des teneurs en nitrate sur trois forages AEP de la plaine de Valence (données DDASS).

Ces teneurs de plus en plus préoccupantes ont été confirmées par la campagne d'échantillonnage de l'aquifère molassique effectuée en 2003 (cf. Figure 3-21). En 2003, 14 % des prélèvements dépassaient la norme de potabilité (par exemple secteurs n°3, 5 et 8 de la figure 3-21). Nous avons pu au cours de cette étude reéchantillonner quelques forages dont les teneurs étaient particulièrement élevées et les analyses ultérieures ont confirmé ces premières teneurs. Pour quelques forages nous avons pu identifier un défaut de conception du forage et/ou bien l'existence d'élevages à proximité. Les nitrates ne sont pas les seuls traceurs des pollutions d'origines agricoles et sont souvent accompagnés par les phytosanitaires. Pour préciser cet aspect nous avons effectué une campagne d'échantillonnage des pesticides⁵¹ (Juin-Juillet 2005).

⁵¹ Les résultats seront présentés brièvement. Une thèse en cours en cotutelle avec le L.H.A. et l'université du Québec permettra l'identification d'indicateur(s) de pollution phytosanitaire: "Contamination de l'eau souterraine par les produits phytosanitaires: recherche d'indicateurs physico-chimiques et modélisation numérique" (C. Doukouré).

7.2.2 Campagne pesticides

En fonction du budget, nous avons ciblé les molécules susceptibles d'être présentes au sein de l'aquifère pour nous permettre de faire un état des lieux 'pesticides' des eaux souterraines (95 prélèvements). Le choix des molécules analysées s'est basé sur les analyses DDASS des captages AEP de la nappe superficielle et profonde, des informations de la Chambre d'Agriculture et de l'agence de l'Eau RMC. Les molécules retenues pour cette campagne sont de la famille des triazines (dont Atrazine et son principal métabolite le Déséthylatrazine, Simazine, Terbutylazine et son principal métabolite le Déséthylterbutylazine), Oxadixyl et Diuron⁵². L'ensemble des résultats est reporté en annexe 5.

7.2.2.1 Choix des points de prélèvements

Nous avons échantillonné 95 points d'eau souterraine dont 83 forages captant l'aquifère molassique et 12 puits captant l'eau dans les niveaux quaternaires ou molassiques (figure 7-4).

La plupart des points échantillonnés avaient déjà été échantillonnés au cours des campagnes précédentes. La carte des teneurs en nitrate (cf. Figure 3-21) montre une dégradation significative de l'aquifère molassique de la plaine de Valence et notre échantillonnage a donc privilégié cette partie du bassin. Quelques zones plus localisées ont été échantillonnées au niveau de la Drôme des Collines comme la vallée de la Galaure, la haute vallée de l'Herbasse et la vallée sèche du Chalon. Enfin sur quelques sites, nous avons eu l'opportunité de prélever des forages de profondeurs différentes, ainsi que des forages situés sur la butte molassique du plateau de Lautagne.

⁵² Les triazines et le diuron sont des herbicides et l'oxadixyl est un fongicide.

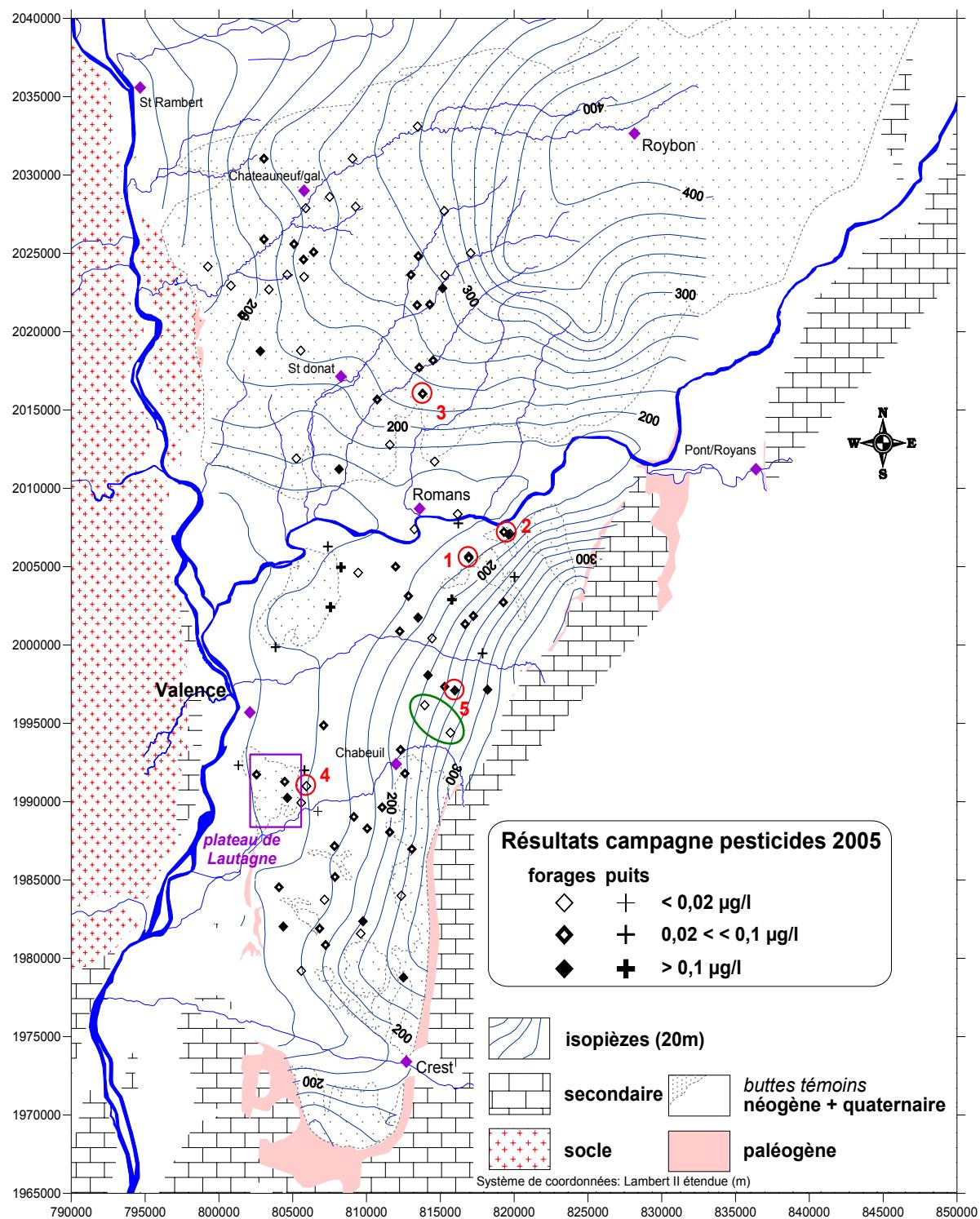


Figure 7-4: Situation des points prélevés pesticides.

7.2.2.2 Bilan général

L'échantillonnage des forages montre que seuls 33 prélèvements (soit 40 %) ne sont pas touchés par ces molécules. Sur les 50 restants, 11 dépassent le seuil de potabilité pour un traitement classique de l'eau (seuil de 0,1 µg/l) par substance (soit 13 %). Parmi ces 11 échantillons, 3 dépassent la norme de 0,5 µg/l pour la somme des concentrations des molécules analysées.

Les résultats des puits échantillonnés montrent que seul 3 prélèvements sont exempts de pesticide (soit 25 %). Sur le reste, 3 dépassent le seuil de 0,1 µg/l dont 2 dépassent 0,5 µg/l pour la somme des concentrations.

Nous avons reporté sur le tableau 7-3 le nombre d'analyses dépassant le seuil analytique de 0,02 µg/l par substance analysée.

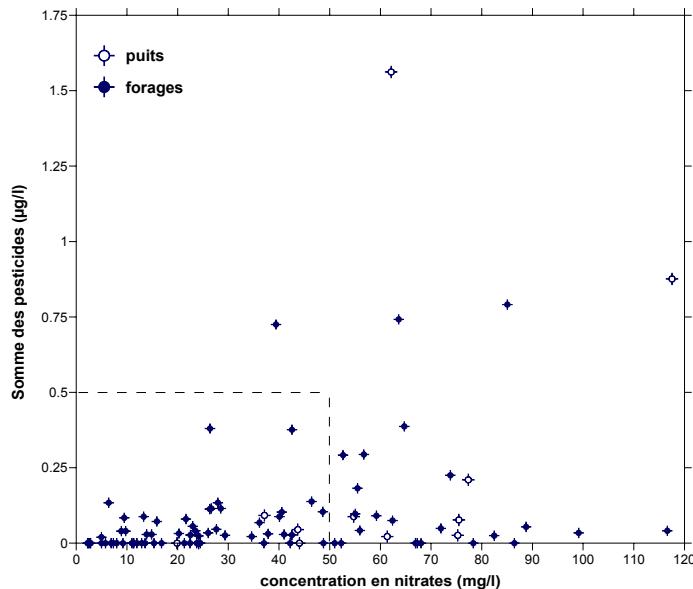
	déséthyl atrazine	simazine	déséthyl terbutylazine	atrazine	diuron	oxadixyl	terbutylazine
puits	7	2	0	6	1	1	0
forages	36	3	2	34	4	0	2
totaux	43	5	2	40	5	1	2

Tableau 7-3: Nombre d'analyse dépassant le seuil analytique de 0,02 µg/l par substance analysée (95 échantillons).

Il apparaît que l'atrazine et son principal métabolite la déséthylatrazine sont les substances les plus fréquemment retrouvées dans les eaux souterraines superficielles et profondes. Ces résultats concordent parfaitement avec les pressions de surface. En effet, le principal désherbant à avoir été utilisé pour le maïs et les cultures fruitières est l'atrazine. En plus des pesticides, nous avons mesuré les teneurs en nitrate des échantillons (figure 7-5).

Pour ces deux paramètres, un tiers des échantillons dépasse les normes de potabilité. Nous n'observons pas de franche corrélation entre nitrate et pesticide. Toutefois, nous constatons que pour des concentrations inférieures à 25 mg/l en nitrate, il y a peu ou pas de pesticides.

Au-delà, les concentrations en pesticides sont très variables. De fortes concentrations en nitrate ($> 50 \text{ mg/l}$) s'accompagnent rarement de teneurs élevées en pesticides. Cela tend à montrer qu'une majeure partie des nitrates des eaux souterraines proviendrait de l'élevage. Ce constat rejoint la remarque tirée de la relation nitrate-chlorures (cf. §3.2.4.1).



- Le premier site (1) est constitué de deux forages de profondeurs 50 et 153 m captant l'aquifère molassique. Seul le forage superficiel est pollué par du déséthylterbutylazine.
- Le deuxième site (2) est constitué de 3 piézomètres de contrôles d'un C.E.T. avec deux forages situés en amont hydraulique, de profondeurs 130 et 160 m. Le dernier forage se situe à l'aval du site avec 62 m de profondeur. Tous captent l'aquifère molassique. Seul le forage le plus profond est dénué de pesticides et le forage de 130 m est plus chargé ($\Sigma = 0,387 \mu\text{g/l}$) que le forage de 62 m ($\Sigma = 0,08 \mu\text{g/l}$). Les deux molécules retrouvées sont l'atrazine et le déséthylatrazine. Les teneurs en nitrate sont plus fortes pour les forages les plus profonds.
- Le troisième site (3) est constitué de deux forages de profondeurs 40 et 80 m captant l'aquifère molassique. Seul le forage superficiel est pollué par de la simazine et du déséthylatrazine.
- Le quatrième site (4) est constitué de deux forages de profondeurs de 37 et 70 m captant l'aquifère molassique. Aucun des forages n'est pollué par des pesticides.
- Le dernier site (5) est constitué d'un puits captant la nappe circulant dans les cailloutis d'Alixan (cône de déjection du Vercors) et d'un forage de 92 m captant la nappe molassique sous-jacente. Seul le forage est pollué par du déséthylatrazine. La meilleure perméabilité des cailloutis d'Alixan a permis une évacuation vers l'aval plus rapide des micropolluants alors que ces molécules sont toujours stockées dans l'aquifère molassique moins perméable.

Ces sites montrent que les forages les plus profonds ne sont pas encore touchés par l'infiltration des pesticides mais ils le sont pour certains par les nitrates. Ce comportement différent traduit soit une modalité de transit différente entre pesticides et nitrate entre le sol et l'aquifère, soit une origine différente (élevages) ou bien, soit un apport plus récent des pesticides. Sur le plateau de Lautagne, les eaux des trois forages échantillonnes ont des pesticides et des nitrates. Ces résultats sont en accord avec le mode de fonctionnement de l'aquifère et les schémas proposés au chapitre précédent. En particulier, le plateau de Lautagne et le site n°4 immédiatement à l'Est montrent des concentrations en pesticides et nitrate très différentes qui s'expliquent parfaitement selon le modèle décrit par la section n°2 (Figure 6-12).

Enfin, les argiles marines pliocènes constituent une barrière efficace à la pénétration des polluants vers l'aquifère molassique. En effet, sur la figure 7-4 deux forages échantillonnés sont dénués de nitrate et pesticides (ellipse). La molasse miocène est recouverte de 25 m et 150 m d'argile bleue. Toutefois, des forages mal exécutés peuvent permettre le passage de ces polluants au travers de cette barrière comme par exemple le forage du SIE de la Plaine de Valence Bayardières. Par ailleurs, les circulations de l'eau dans l'aquifère conduisent tôt ou tard à l'envahissement de ces polluants sous les zones protégées (exemple du forage Pinet n° 176 sur la section n°4 Figure 6-14).

7.3 EVALUATION DES ECHANGES: EXEMPLE DE LA NAPPE DE ROMANS

Ce dernier volet vient clore cette partie synthèse car elle montre comment les outils géochimiques et isotopiques peuvent aboutir à l'estimation des flux entre réservoirs.

Le bilan quantitatif de l'aquifère de la Drôme des Collines s'arrête à la limite des alluvions quaternaires de l'Isère. Nous avons montré que c'est un flux d'environ 19 millions de m³ par an qui rejoint l'Isère ou sa nappe d'accompagnement.

A partir du bilan quantitatif présenté en début de chapitre et des teneurs en magnésium de la nappe superficielle et de la nappe profonde, nous pouvons estimer le flux d'alimentation se déversant dans la nappe superficielle à partir de la nappe profonde. En effet, dans ce secteur les seuls apports d'eaux proviennent de la recharge par les précipitations sur une surface de 50 km² et de l'aquifère molassique sous-jacent. A partir des teneurs moyennes en magnésium de la nappe superficielle et de la nappe molassique profonde, nous pouvons par une simple équation de mélange estimer le volume d'apport de la nappe profonde.

L'équation de mélange s'écrit:

$$C_r \cdot Q_r + C_m \cdot Q_m = C_{ns} \cdot Q_{ns} \quad \text{Équation 7-1}$$

où C_i et Q_i sont la concentration en magnésium et le flux moyen annuel du réservoir i (Q_i identique à un volume). Les indices r , m et ns correspondent respectivement à la recharge, à la molasse et à la nappe superficielle. La conservation du flux implique aussi que:

$$Q_{ns} = Q_r + Q_m \quad \text{Équation 7-2}$$

De ces deux équations 7-1 et 7-2, nous en déduisons le volume d'apport de la nappe profonde Q_m par:

$$Q_m = \frac{(C_r \cdot Q_r - C_{ns} \cdot Q_r)}{C_{ns} - C_m} \quad \text{Équation 7-3}$$

Nous avons pris pour les concentrations les valeurs moyennes de la nappe superficielle ($C_{ns} = 12 \text{ mg/l}$) et pour la nappe profonde une teneur de 35 mg/l (valeur maximale au forage n°150). Nous avons pris C_r égale à 4 mg/l qui correspond au gain en magnésium au travers du sol et de la zone non saturée⁵³ et $Q_r = 0,278 * 50 = 13,9$ millions de m^3 par an. Le déversement de la nappe profonde est de l'ordre de 5 millions de m^3 par an mais l'incertitude est importante.

C'est pourquoi, à partir des teneurs isotopiques en deutérium des eaux de la nappe profonde et superficielle, nous allons recalculer la teneur isotopique de l'eau de la recharge par les précipitations. A partir de l'équation 7-3, nous pouvons écrire:

$$\delta D_r = \frac{(Q_r + Q_m) \cdot \delta D_{ns} - Q_m \cdot \delta D_m}{Q_r} \quad \text{Équation 7-4}$$

où δD_{ns} et δD_m sont les teneurs en deutérium de la nappe superficielle et de la nappe profonde. Les teneurs sont pour δD_{ns} et δD_m de -55 ‰ et -62,1 ‰ respectivement. En reprenant, les valeurs des flux calculés Q_r et Q_m , δD_r est égale à -52,4 ‰. Grâce aux résultats du chapitre 4 (§ 4.2.6), la teneur en deutérium de la recharge doit être proche de -51 ‰. Le résultat est relativement proche mais le meilleur ajustement pour obtenir la valeur supposée de δD_r se situe pour une valeur de Q_m proche de 8 millions de m^3 par an. Malgré les incertitudes importantes sur ces deux calculs, le flux d'alimentation de la nappe profonde vers la nappe superficielle doit être de l'ordre de 5 et 8 millions de m^3 par an, soit 26 à 42 % des sorties souterraines (coté Isère).

Au niveau de cette nappe quaternaire de Romans, un suivi qualitatif des eaux (nitrate, pesticides) est en cours. Les teneurs en nitrates sont élevées, elles oscillent entre 30 et 40 mg/l en moyenne et des pesticides sont aussi retrouvés. Des pesticides sont aussi retrouvés dans la

⁵³ Teneur fréquemment observée après passage dans le sol (Blavoux, *com. pers.*).

nappe molassique qui affleure en rive droite de l'Isère. Ce constat montre que malgré l'alimentation de la nappe molassique profonde, des mélanges se produisent dans la zone superficielle de l'aquifère molassique par des eaux polluées de surface. La zone la plus profonde est dénuée de pollution de surface comme le prouve l'absence de nitrate et pesticides au forage de la commune de St Paul les Romans (n°150). Ces mélanges d'eaux peuvent être accentués par les pompages qui augmentent la drainance descendante des eaux polluées. Ce cas a été démontré au niveau de la vallée de la Valloire avec les forages du SIE Valloire (cf. § 6.2.3). Les forages mal exécutés (sans cimentation) favorisent les communications entre aquifère.

7.4 CONCLUSIONS

Les résultats des chapitres précédents ont permis de préciser les conditions aux limites du système aquifère du bassin de Valence. Les prélèvements réels sont encore nettement inférieurs au renouvellement annuel moyen (13 % des entrées pour le secteur de la Drôme des Collines et 14 % des entrées pour le bassin de Crest et la plaine de Valence). Cependant les baisses observées sur les suivis piézométriques selon les successions de périodes sèches ou humides et lors des périodes d'irrigations rappellent l'équilibre fragile entre les eaux de surface et la nappe. En effet, en étiage les rivières sont soutenues par le trop plein de l'aquifère. Des prélèvements excessifs sur l'aquifère peuvent donc avoir des conséquences sur les débits de ces rivières et leur pérennité. Des investigations complémentaires sont nécessaires pour cerner ces équilibres et les flux entre réservoirs.

Ce travail a montré que la qualité intrinsèque de l'aquifère molassique est nettement dégradée au niveau de certaines zones de recharges de l'aquifère et au niveau des zones d'affleurements molassiques (principalement au niveau de la plaine de Valence). Les zones de vidange de cet aquifère (secteur de la Valloire, plaine de l'Isère) sont aussi touchées par les pollutions de surface. L'aquifère molassique est donc très vulnérable et il est seulement protégé au niveau des secteurs où les argiles marine pliocènes surmontent la molasse. Cette vulnérabilité est, de plus, accentuée par les pompages dans l'aquifère molassique qui provoquent une drainance *per descendum* des eaux de subsurface, de mauvaise qualité. L'origine des pollutions est principalement agricole, avec une part importante due aux nombreux élevages présents dans le bassin de Valence. La présence des pesticides en profondeur semble encore limitée.

Compte tenu des vitesses de circulation de l'eau dans l'aquifère (quelques mètres par an pour les plus profondes), ces micropolluants constituent un problème majeur vis-à-vis de la Directive Cadre européenne sur l'Eau qui fixe un bon état des masses d'eaux en 2015 (Cadilhac *et al.*, 2005).

Conclusions générales

Cette étude visait à améliorer les connaissances sur l'aquifère néogène du bassin de Valence. Nous présentons successivement les résultats essentiels acquis lors de ce travail, des éléments de réflexions sur la gestion de cette ressource puis des perspectives.

Résultats de l'étude

- Géologie

La forme dissymétrique du bassin mis en évidence grâce à la sismique réflexion a permis de préciser les limites du substratum du bassin néogène. Lors de la flexuration du bassin d'avant-pays liée à la poussée des Alpes externes au cours du Miocène, il s'est accumulé du sable molassique plus ou moins argileux sur une épaisseur moyenne d'environ 400 m et pouvant atteindre près de 800 m au droit des sillons. La réinondation pliocène qui a suivi le bref épisode messinien a conduit au colmatage de la partie ouest du bassin par des argiles et des sables. Les périodes d'érosion et d'alluvionnement du Quaternaire ont donné le relief actuel au bassin de Valence. Nous n'avons pas pu mettre en évidence de corrélation stratigraphique entre forages proches car les variations latérales de faciès sont fréquentes. Comme les sables molassiques sont présents sur toute l'étendue du bassin, nous avons considéré un ensemble sédimentaire homogène à cette échelle de travail.

- Hydrogéologie

Les médianes des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère néogène sont de l'ordre de $1,3 \cdot 10^{-5}$ m/s pour la perméabilité et $1,25 \cdot 10^{-3}$ m²/s pour la transmissivité. La carte des débits spécifiques montre une franche variation entre l'Est et l'Ouest du bassin, avec des débits spécifiques médiocres en bordure du Vercors et au contraire exceptionnels à l'approche du socle. Cette variation spatiale des Q/s est due à la granulométrie grossière de la molasse en provenance du Massif Central et celle d'origine alpine qui est fine et fortement cimentée. Les paramètres hydrodynamiques des terrains miocènes et pliocènes sont parfois du même ordre de grandeur, ce qui peut laisser envisager un drainage de l'aquifère molassique par les formations 'infra-pliocènes' et pliocènes qui ont comblé les

canyons messiniens de la vallée du Rhône. La synthèse piézométrique montre l'importance du relief dans les zones d'alimentation et de drainage de la nappe. Les jaugeages différentiels et l'analyse des coefficients d'emmagasinements montrent que la plupart des vallées drainent cette nappe avec la présence d'une certaine captivité de l'aquifère.

- Hydrochimie

La géochimie des eaux a montré la vulnérabilité de l'aquifère molassique vis-à-vis des pollutions de surface. Les campagnes d'échantillonnages ont confirmé le rôle de l'agriculture dans la dégradation de la qualité de l'aquifère avec une part importante due aux élevages. En dehors des pollutions anthropiques, les eaux de l'aquifère molassique vont d'un faciès bicarbonaté calcique à un faciès bicarbonaté calcique et magnésien. L'évolution de ce faciès est due à la chimie des carbonates : dissolution de la calcite lors de l'entrée de l'eau dans l'aquifère; puis dissolution de dolomite accompagnée de la précipitation de la calcite au sein de l'aquifère. Les meilleurs indicateurs de temps de séjour sont le magnésium, le sodium et la silice. Le suivi de l'évolution géochimique de l'eau selon des lignes d'écoulements est difficile. Nous avons constaté une forte hétérogénéité chimique qui est due à des venues d'eaux entre forages échantillonnés. La répartition spatiale des éléments chimiques indique la présence de nombreux secteurs où les eaux sont évoluées.

- Isotopes

L'utilisation du tritium a montré que plus de la moitié des eaux échantillonnées sont des eaux récentes et infiltrées à proximité des points de prélèvements. Cette proximité de la recharge est renforcée par l'étude de l'Oxygène 18 et du Deutérium qui a permis de situer les altitudes des bassins d'alimentation de ces eaux récentes. Les isotopes de la molécule d'eau ont aussi montré l'impact de l'irrigation dans la réalimentation de l'aquifère avec une pénétration d'eau partiellement évaporée dans la zone non saturée. La répartition spatiale des teneurs isotopiques (pas ou peu de tritium et eaux appauvries) confirme la présence des secteurs déjà mis en évidence par la géochimie.

L'utilisation du carbone 13 dans les modèles de corrections de l'âge de l'eau s'avère impossible car le carbone 13 de la matrice carbonatée est marqué par les échanges avec le

CMTD lors de la précipitation de la calcite et par la présence de lignite dans la matrice aquifère. A l'aide d'un indice de temps de séjour basé sur la géochimie et le tritium, nous avons appliqué une balance chimique pour tenir compte des réactions géochimiques modifiant le CMTD et donc l'activité A_0 . Ce modèle basé sur celui de Tamers donne une très bonne adéquation avec l'indice de temps de séjour. Ainsi, deux tiers des eaux datées (sur 54 échantillons) sont des eaux actuelles à subactuelles *i.e.* inférieures à la centaine d'années. Le reste des échantillons (sauf pour un) montre des eaux plus ou moins âgées mais infiltrées après la dernière transition paléoclimatique Holocène-Pléistocène. Nous avons aussi montré à l'aide du radiocarbone une stratification de l'aquifère.

- Modèle de fonctionnement

La conservation dans l'aquifère de la signature isotopique des altitudes des bassins d'alimentation et la mise en évidence, par les diagraphies au micromoulinet sur forage, de venues d'eau localisées dans l'aquifère impliquent l'existence de circulations préférentielles. Tous ces résultats nous ont conduit à proposer un mode de circulation de l'eau "en pelure d'oignon", entre des circulations souterraines peu profondes d'échelles locales et des circulations profondes d'échelles régionales. Ces circulations sont guidées par le relief et la forme du substratum de l'aquifère ou par la position des horizons de moindre perméabilité (argile pliocène). Ce modèle conceptuel des écoulements est conforme à celui proposé par Hubbert (1940) et Tóth (1963). Dans ce cadre, la synthèse piézométrique est alors seulement représentative des écoulements régionaux et intermédiaires. Les vitesses de circulations de l'eau dans l'aquifère vont de quelques mètres par an pour les circulations les plus profondes ou bien celles circulant dans la ria pliocène, jusqu'à 200 à 300 mètres par an pour les circulations les plus superficielles et dans les zones les plus perméables.

- Ressource

Les potentialités de l'aquifère néogène sont importantes avec près des deux tiers du remplissage sédimentaire qualifiés de perméable. A partir de la porosité efficace qui est proche de 12 %, nous estimons que le volume d'eau est de l'ordre de 42 milliards de m^3 dont 28,5 milliards de m^3 situés dans la Drôme des Collines et 13,5 milliards de m^3 situés au Sud de l'Isère. Les apports annuels, bien que toujours mal connus, représentent 6 % et 11 % des réserves pour la partie nord et sud de l'Isère respectivement. Les temps de séjour

moyen⁵⁴ de l'eau dans l'aquifère sont donc de l'ordre de 170 et 90 ans, au Nord et au Sud de l'Isère. Les prélèvements dans l'aquifère molassique représentent 13 à 14 % des apports pour la partie nord et sud de l'Isère. Enfin, nous avons pu évaluer les sorties souterraines proches de 31 Mm³/an au Nord de l'Isère et de 49 Mm³/an au Sud de l'Isère.

Gestion de la ressource

La dégradation de la qualité de l'eau sur certaines zones de recharge de l'aquifère a été démontrée. Compte tenu des temps de séjour moyen de l'eau dans l'aquifère et du schéma de fonctionnement de l'aquifère, il est urgent d'appliquer des règles de gestion pour préserver cette vaste ressource patrimoniale. Ainsi, les principales zones d'alimentation de l'aquifère sont les secteurs à protéger de manière durable vis-à-vis des activités anthropiques (agricoles et industrielles). Ces zones se situent sur la bordure orientale de la plaine de Valence et sur une large partie nord-est de la Drôme des Collines. Au niveau de ces secteurs, le recensement complet, le diagnostic et la cimentation des forages défectueux doivent être envisagés. Par ailleurs, une modification profonde des pratiques agricoles est nécessaire et l'on peut d'ores et déjà prévoir des actions inspirées de l'étude en cours sur la nappe de Romans. Pour la problématique nitrate, il faut réduire les surfertilisations et prendre en compte les effluents d'élevages (étancher les zones de stockage et exporter les excédents). Pour la problématique phytosanitaire, il faut réduire les risques de pollution ponctuelle liés au poste phytosanitaire et de pollution diffuse liés au matériel de pulvérisation. D'une manière plus générale, la réduction de l'utilisation des pesticides sera développée par:

- la modification des assolements et des rotations pour perturber les cycles des mauvaises herbes et limiter les maladies (couper la monoculture du maïs par exemple);
- la diffusion des principes des bonnes pratiques d'implantation et de récolte pour limiter les infestations de mauvaises herbes et des techniques alternatives au désherbage;

Par ailleurs, un volet s'attachera à la protection des points de prélèvements AEP.

Ces plans d'actions seront détaillés dans le document présenté aux collectivités territoriales à l'aide de fiches techniques pour les différents sous bassins hydrogéologiques.

⁵⁴ Le temps de séjour moyen est égal à l'inverse du renouvellement annuel de l'aquifère (cf. § 4.1.4.1).

Perspectives

Les échanges entre nappe profonde et nappe superficielle sont conditionnés par la répartition des charges dans l'aquifère profond. Le modèle conceptuel montre que les zones de vallées sont des zones naturellement protégées des pollutions de surface. Cependant, les pompages dans l'aquifère molassique conduisent à réduire la différence de pression entre nappe superficielle et nappe profonde et provoquer la dégradation de celle-ci. Une modélisation des écoulements est dès lors nécessaire pour évaluer l'impact de l'exploitation des forages dans la dégradation de la ressource. Ce modèle sera bâti à partir du schéma conceptuel de fonctionnement de l'aquifère et des sections descriptives des circulations de l'eau souterraine.

Nous avons développé des outils d'investigations des eaux souterraines à l'échelle de ce vaste aquifère. Ces méthodes géochimiques et isotopiques pourront être adaptées à la problématique des relations entre rivière et eau souterraine sur des échelles plus localisées (bassin versant) et permettront d'évaluer l'impact des prélèvements sur le débit des rivières. Les précipitations efficaces pourront être affinées à partir de données sur plusieurs stations météorologique et en tenant compte des catégories de sol. Un approfondissement des connaissances permettra d'améliorer la compréhension globale du système hydrologique et hydrogéologique du bassin de Valence. A moyen terme, la mise en place d'un contrat de nappe devrait permettre la gestion de cette ressource patrimoniale

Cette étude hydrogéologique a montré l'existence de circulations préférentielles au sein de la molasse. Ces circulations impliquent obligatoirement une continuité des niveaux sédimentaires de la molasse, continuité qui n'avait pas pu être mise en évidence à partir des corrélations de faciès. L'utilisation des diagraphies (micromoulinet et gamma ray) permettrait d'améliorer les connaissances sur le cheminement de l'eau dans l'aquifère et de déterminer de manière plus précise la distribution des perméabilités et donc des vitesses de circulation de l'eau. Ces diagraphies serviraient aussi à construire une modélisation géologique séquentielle du bassin.

Enfin, les caractéristiques hydrogéologiques des formations les plus profondes sont très mal connues. Les quelques ouvrages qui ont recoupé ces horizons n'avaient pas comme objectif l'utilisation de l'aquifère. Il serait souhaitable dans le futur de pouvoir acquérir des données

sur ces niveaux profonds validant ainsi nos hypothèses et permettant d'accéder à une ressource avec des temps de résidence plus importants.

BIBLIOGRAPHIE

- Aeschbach-Hertig, W., M. Stute, J. F. Clark, R. F. Reuter et P. Schlosser (2002).** *A paleotemperature record derived from dissolved noble gases in groundwater of the Aquia Aquifer (Maryland, USA)*. Geochimica et Cosmochimica Acta 66 (5) p. 797-817.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes et M. Smith (1998).** Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. I. a. drainage, FAO: 56.
- Appelo, C. A. J. et D. Postma (1996).** *Geochemistry, groundwater and pollution*. A. A. Balkema. Rotterdam. 536 p.
- Atteia, O. (2005).** *Chimie et pollution des eaux souterraines*. Lavoisier. Paris. 398 p.
- Babic, M., M.-C. Lechapt, P. Olive et S. Ravailleau (1999).** 3H et ^{14}C : incertitudes et seuils de mesure. CRG 9 p.
- Ballesio, R. (1972).** *Etude stratigraphique du Pliocène rhodanien*. Thèse de doctorat Lyon I 315 p.
- Barbescot, F. (1999).** *Approche géochimique des mécanismes de salinisation des aquifères cotiers - Chronologies ^{14}C - ^{226}Ra* Thèse de doctorat Paris XI 261 p.
- Barrat, A. et Y. Gouisset (1988).** *Etude hydrogéologique de la molasse miocène Bresse-Dombes-Bas-Dauphiné, évaluation de l'alimentation de la nappe*. BRGM 14 p.
- Barrat, A. et Y. Gouisset (1988).** *Etude hydrogéologique de la molasse miocène Bresse-Dombes-Bas-Dauphiné, Synthèse finale orientations pour l'exploitation*. BRGM 46 p.
- Batiot, C. (2002).** *Etude expérimentale du cycle du carbone en régions karstiques. Apport du carbone organique et du carbone minéral à la connaissance hydrogéologique des systèmes*. Thèse de doctorat Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse 247 p.
- Beaudoin, B., H. Accarie, E. Berger, J. Brulhet, I. Cojan, D. Haccard, D. Mercier et B. Mouroux (1997).** *Caractérisation de la "crise messinienne" et de la reinondation pliocène*. Géologie CG.10 p. 27-28.
- Bethke, M. C. et T. M. Johnson (2002a)** *Paradox of groundwater age*. Geology 30 (2) p. 107-110.
- Bethke, C. M. et T. M. Johnson (2002b).** *Ground Water Age*. Ground Water 40 (4) p. 337-339.
- Blanc, P.-L. (2002).** *The opening of the Plio-Quaternary Gibraltar Strait: assessing the size of a cataclysm*. Geodinamica Acta 15 p. 303-317.
- Blavoux, B. (1978).** *Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée*. Thèse de doctorat Pierre et Marie Curie 316 p.

- Blavoux, B. (2001).** *Comparaison entre vitesses hydrauliques et radiométriques dans les réservoirs profonds: compréhension des fonctionnements et intérêt pour la gestion prévisionnelle.* Les eaux souterraines en France. Nouvelles connaissances pour une meilleure gestion. (coll./conf.), Paris, Agence de l'Eau Seine-Normandie, p. 59-62.
- Blavoux, B. et R. Letolle (1995).** *Apports des techniques isotopiques à la connaissance des eaux souterraines.* Géochronique 54 p. 12-15.
- Blavoux, B. et J. Mudry (1990).** *Les teneurs en Oxygène 18 en fonction de l'altitude des impluviums des réservoirs karstiques du Jura et du Vaucluse.* Mémoires du 22^{ème} Congrès AIH (coll./conf.), Lausanne, AIH, p. 331-338.
- Blès, J. L. et Y. Gros (1991).** *Stress field changes in the Rhone Valley from the Miocene to the present.* Tectonophysics 194 (3) p. 265-277.
- Bobillon, G. (2005).** *Passage de la cotière d'Eurre par la ligne TGV.* Journées Association des Hydrogéologues du Service Public (coll./conf.), Valence, Agence de l'Eau RMC, p. 6.
- Bombart, H. (1990).** *Lutte contre la pollution par les nitrates - canton de Bourg-de-Péage (Drôme). Diagnostic des pratiques agricoles.* Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes 65 p. (*rapport*).
- Bonté, S. (2006).** *Caractérisation des climats et des environnements rhodaniens postglaciaires par l'analyse des isotopes stables ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$) des carbonates secondaires.* Thèse de doctorat Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse 305 p.
- Bornand, M. et J. P. Legros (1968).** *Etude pédologique dans la vallée du Rhône. Confluent Rhône-Isère, Plaine de Valence, Romans (Drôme).* INRA 211 p.
- Boronina, A., W. Balderer, P. Renard et W. Stichler (2005).** *Study of stable isotopes in the Kouris catchment (Cyprus) for the description of the regional groundwater flow.* Journal of Hydrology 308 p. 214-226.
- BRGM (1977).** *Recherches sur la géologie profonde - Fosse de Valence (26).* Ministère de l'Industrie et de la Recherche 58 p.
- Brouste, L. (1996).** *Hydrochimie et géochimie isotopique de la nappe phréatique de la Comarca Lagunera (Nord-Mexique).* Thèse de doctorat Paris XI Orsay 229 p.
- BRP (1955).** *Préreconnaissance du bassin de Valence.* IFP 68 p. (*rapport*).
- BURGEAP (1964).** *Etude hydrogéologique préliminaire des nappes alluviales de la Drôme.* SRAE 73 p. (*rapport*).
- BURGEAP (1969).** *Etude complémentaire des nappes alluviales de la Drôme.* SRAE 121 p. (*rapport*).

- BURGEAP (1994).** *Renforcement de la ressource en eau - bordure occidentale du Vercors.* SIE Sud Valentinois p. (*rappor*).
- BURGEAP (2002).** *Projet d'ouverture d'une nouvelle carrière - étude hydrogéologique.* SIKA 15 p. (*rappor*).
- Cadilhac, L., V. Réthoré, R. de La Vaissière, B. Blavoux et G. Faure (2005).** *Contamination des eaux souterraines par les pesticides sur le bassin du Rhône et des cours d'eau côtiers méditerranéens. Perspectives dans le nouveau cadre imposé par la Directive Cadre européenne sur l'Eau. L'eau souterraine et les produits phytosanitaires.* (coll./conf.), Orléans, CFH-AIH, p. 9.
- Castany, G. (1998).** *Hydrogéologie: principes et méthodes.* Dunod. Paris. 238 p.
- Castro, M. C. et P. Goblet (2005).** *Calculation of Ground Water Age - A Comparative Analysis.* Ground Water 43 (3) p. 368-380.
- Celle-Jeanton, H., R. Gonfiantini, Y. Travi et B. Sol (2004).** *Oxygen-18 variations of rainwater during precipitation: application of the Rayleigh model to selected rainfalls in Southern France.* Journal of Hydrology 289 p. 165-177.
- Celle, H. (2000).** *Caractérisation des précipitations sur le pourtour de la Méditerranée Occidentale. Approche isotopique et chimique.* Thèse de doctorat Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse 222 p.
- Cerling, T. E. et J. Quade (1993).** *Stable Carbon and Oxygen Isotopes in soil Carbonates. Climate Change in Continental Isotopic Records.* Geophysical Monograph 78 p. 217-231.
- Cerling, T. E., D. K. Solomon, J. Quade et J. R. Bowman (1991).** *On the isotopic composition of carbon in soil carbon dioxide.* Geochimica et Cosmochimica Acta 55 p. 3403-3405.
- Clark, I. et P. Fritz (1997).** *Environmental isotopes in hydrogeology.* Lewis Publishers, New-York. 328 p.
- Clauzon, G. (1982).** *Le canyon messinien du Rhône: une preuve décisive du "desiccated deep-basin model" [Hsü, Cita et Ryan, 1973].* Bulletin de la Société Géologique de France 7 (24) p. 597-610.
- Clauzon, G. (1990).** *Genèse et évolution du piémont néogène subalpin du Bas-Dauphiné. Valence-Vienne-Voreppe, 24-25 Septembre 1990. Livret-guide de l'excursion préforum du 3^{ème} forum national de géomorphologie.* Géomorphologie (coll./conf.), Aix-en-Provence, J. Vaudour, p. 71.

- Clauzon, G. (1998).** *L'impact des variations eustatiques du bassin de Méditerranée occidentale sur l'orogène alpin depuis 20 Ma.* La montagne méditerranéenne (coll./conf.), Aix-en-Provence, Et. Géogr. Phys., p. 33-44.
- Clauzon, G. et J.-L. Rubino (1996).** *Utilisation des marqueurs morphologiques et stratigraphiques messiniens et pliocènes pour la restitution des 7 derniers Ma: l'exemple du Var (Alpes-Maritimes, France).* Quantification de la tectonique et de l'eustatisme (coll./conf.), Rennes, p. 3.
- Clauzon, G., J.-P. Suc, F. Gautier, A. Berger et M.-F. Loutre (1996).** *Alternate interpretation of the Messinian salinity crisis: Controversy resolved?* Geology 24 (4) p. 363-366.
- CPGF (1980).** *Etude géochimique de la nappe du Miocène du Bas-Dauphiné - 1ère phase.* SRAE 9 p. (*rapport*).
- CPGF (1982).** *Etude des concentrations en nitrates dans la plaine de Valence (Drôme) 1ère partie.* SRAE, DDAF 27 p. (*rapport*).
- CPGF (1983).** *Etude géochimique des eaux de la molasse du Bas-Dauphiné - activité en carbone 14 - Note Technique.* SRAE 8 p. (*rapport*).
- Craig, H. (1961).** *Isotopic variations in meteoric waters.* Science 133 p. 1702-1793.
- Dansgaard, W. (1964).** *Stable isotopes in precipitations.* Tellus 16 p. 436-468.
- Dasarathi, N. (1965).** *Etude géologique de la bordure occidentale du Vercors.* Thèse de doctorat Université de Grenoble 85 p.
- de Bellegarde, B. et J. Lafosse (1977).** *La nappe du miocène Nord-Drôme.* Les eaux souterraines et l'approvisionnement en eau de la France. (coll./conf.), Nice, DDA de la Drôme, p. 16.
- de Bellegarde, B. et J. Lafosse (1980).** *La nappe du Miocène du Nord de la Drôme.* SRAE Rhône-alpes, Valence 13 p.
- de La Vaissière, R. (2003).** *Hydrogéologie de l'aquifère molassique du Bas-Dauphiné. Bilan année 1.* SIE Plaine de Valence 45 p. (*rapport*).
- de La Vaissière, R. (2004).** *Hydrogéologie de l'aquifère molassique du Bas-Dauphiné. Bilan année 2.* SIE Plaine de Valence 63 p. (*rapport*).
- de La Vaissière, R., G. Faure, G. Clauzon et B. Blavoux (2006).** *Impact of the Messinian salinity crisis on the hydrogeology of the Valence plain.* Duran, J.J., Andreo, B. y Carraco, F. Karst, cambio climatico y aguas subterraneas. Publicaciones del IGME. Hidrogeología y Aguas Subterraneas. (coll./conf.), Madrid, N°18. p. 385-393.

- Debrand-Passard, S. et S. Courbouleix (1984).** *Synthèse géologique du Sud-Est de la France - Atlas.* BRGM, Orléans.
- Debrand-Passard, S., S. Courbouleix et M.-J. Lienhardt (1984).** *Synthèse géologique du Sud-Est de la France - Stratigraphie et paléogéographie.* BRGM, Orléans. 615 p.
- Delannoy, J.-J. (1997).** *Recherches géomorphologiques sur les massifs du Vercors et de la transversale de Ronda (Andalousie). Les apports morphogénétiques du karst.* Thèse de doctorat Grenoble I 678 p.
- Demarcq, G. (1970).** *Etude stratigraphique du Miocène rhodanien.* Thèse de doctorat faculté des sciences de Paris 257 p.
- Dercourt, J. (1997).** *Géologie et géodynamique de la France.* Dunod. Paris. 320 p.
- Dèzes, P., S. M. Schmid et P. A. Ziegler (2004).** *Evolution of the European Cenozoic Rift System: interaction of the Alpine and Pyrenean orogens with their foreland lithosphere.* Tectonophysics 389 p. 1-33.
- DIREN (2001).** *Département de la Drôme - bilan hydrogéologique départemental.* DIREN Rhône-alpes 121 p. (*rapport*).
- Drever, J. I. (1997).** *The geochemistry of natural waters. Surface and groundwater environments.* London. 436 p.
- Dumas, D. (1988).** *Le paléogène salifère du bassin de Valence. Géométrie et sédimentologie des dépôts. Synthèse de bassin.* Thèse de doctorat Lyon 1 - Claude Bernard 293 p.
- Duplouy, R. (1978).** *Etude du Miocène du Nord de la Drôme.* SRAE-DDAF, Valence 27 p (*rapport*).
- Edmunds, W. M., A. H. Bath et D. L. Miles (1982).** *Hydrochemical evolution of the East Midlands Triassic sandstone aquifer, England.* Geochimica et Cosmochimica Acta 46 p. 2069-2081.
- Edmunds, W. M., J. M. Cook, W. G. Darling, D. G. Kinniburgh, A. H. Bath, M. Morgan-Jones et J. N. Andrews (1987).** *Baseline geochemical conditions in the Chalk aquifer, Berkshire, UK: a basis for groundwater quality management.* Applied Geochemistry 2 p. 251-274.
- Edmunds, W. M. et P. L. Smedley (2000).** *Residence time indicators in groundwater: the East Midlands Triassic sandstone aquifer.* Applied Geochemistry 15 p. 737-752.
- Emblanch, C. (1997).** *Les équilibres chimiques et isotopiques du carbone dans les aquifères karstiques: étude en région méditerranéenne de montagne.* Thèse de doctorat Université d'Avignon et des pays de Vaucluse 198 p.

- Etcheverry, D. (2002).** *Valorisation des méthodes isotopiques pour les questions pratiques liées aux eaux souterraines. Isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène.* OFEG 71 p.
- Ferry, S. (1996).** *Note sur l'extension du Pliocène sous la plaine de Valence et la basse Drôme.* Université Claude Bernard. 4 p. (*non publiée*).
- Ferry, S., R. Ballesio et P. Monier (1997).** *Modalités du remplissage sédimentaire de la ria Pliocène du Rhône - problèmes en suspens après les premiers travaux ANDRA.* Géologie CG.10 p. 29.
- Fetter, C. W. (1994).** *Applied hydrogeology.* M. C. P. Company. New York. 691 p.
- Fontes, J.-C. (1976).** *Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles: quelques aspects.* Thèse de doctorat Université Paris VI 208 p.
- Fontes, J.-C. (1985).** *Some considerations on groundwater dating using environmental isotopes.* Hydrogeology in the service of man (coll./conf.), Cambridge, IAH, p. 118-154.
- Fontes, J.-C. (1992).** *Chemical and isotopic constraints on ^{14}C dating of groundwater.* Radiocarbon after four decades: an interdisciplinary perspective. R. E. Taylor, A. Long et R. S. Kra. New-York, Springer-Verlag: p. 242-261.
- Fontes, J. C. et J. M. Garnier (1979).** *Determination of the initial ^{14}C activity of total dissolved carbon: a review of the existing models and a new approach.* Water resources research 15 (2) p. 399-413.
- Freeze, R. A. et P. A. Witherspoon (1967).** *Theoretical analysis of regional groundwater flow. 2. Effect of water-table configuration and subsurface permeability variation.* Water resources research 3 p. 623-634.
- Gal, F. (2005).** *Etude géochimique et isotopique des eaux de surface du bassin versant du Furan et des eaux minérales du Graben du Forez, Est du Massif Central Français.* Thèse de doctorat Université Jean Monnet, St-Etienne. 198 p.
- Gargani, J. (2004).** *Modelling of the erosion in the Rhone valley during the Messinian crisis (France).* Quaternary International 121 p. 13-22.
- Garrels, R. M. et F. T. Mackenzie (1971).** *Evolution of sedimentary rocks.* N. Company. New York. 397 p.
- Gat, J. R. et I. Carmi (1970).** *Evolution of the isotopic composition of the atmospheric waters in the Mediterranean Sea area.* Journal of Geophysical Research 75 p. 3039-3048.
- Geng, G. Z. (1988).** *Modélisation conjointe du cycle de l'eau et du transfert des nitrates dans un système hydrologique.* Thèse de doctorat Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris 226 p.

- Geo+ (2004).** *Recherche et mise en place d'une gestion concertée des prélèvements d'eau à usage agricole. Secteur Véore, Barbérolle, Royans et Vercors. Document d'incidence.* Chambre d'Agriculture, DDAF, Agence de l'Eau et département 132 p. (*rappor*t).
- Germain, C. et G. Demaison (1958).** *Contribution à l'histoire géologique du Bassin de Valence.* Travaux du laboratoire de Grenoble 34 p. 49-81.
- Geyh, M. A. (2000).** *An overview of ^{14}C analysis in the study of groundwater.* Radiocarbon 42 p. 99-114.
- Gillcrist, R., M. Coward et J.-L. Mugnier (1987).** *Structural inversion and its controls: examples from the Alpine foreland and the French Alpes.* Geodinamica Acta 1 (1) p. 5-34.
- Gonfiantini, R., M.-A. Roche, J.-C. Olivry, J.-C. Fontes et G. M. Zuppi (2001).** *The altitude effect on the isotopic composition of tropical rains.* Chemical Geology 181 p. 147-167.
- Gonfiantini, R. et G. M. Zuppi (2003).** *Carbon isotope exchange rate of DIC in karst groundwater.* Chemical Geology 197 p. 319-336.
- Gouguassis, E. (1982).** *Contribution à l'étude hydrologique et hydrogéologique des molasses du Bas-Dauphiné.* Thèse de doctorat Institut National Polytechnique de Lorraine 124 p.
- Gouisset, Y. et A. Graillat (1985).** *Synthèse hydrogéologique de la molasse miocène Bresse-Dombes-Bas-Dauphiné, rapport d'étude 1985.* BRGM 206 p.
- Haq, B. V., J. Hardenbol et P. R. Vail (1987).** *Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic.* Science 235 p. 1136-1167.
- Hubbert, M. K. (1940).** *The Theory of Ground-Water Motion.* Journal of Geology 48 (8) p. 795-944.
- Huneau, F. (2000).** *Fonctionnement hydrogéologique et archives paléoclimatiques d'un aquifère profond méditerranéen.* Thèse de doctorat Avignon et des Pays de Vaucluse 192 p.
- Idées-Eaux (2000).** *Carte piézométrique de la nappe superficielle de Romans.* Ville de Romans 25 p. (*rappor*t).
- Idées-Eaux (2005).** *Etude hydrogéologique du fonctionnement de la nappe alluviale (secteur d'Allex).* 33 p. (*rappor*t).
- Jeannolin, F. (1985).** *Sédimentologie et hydrogéologie du Néogène de l'Est Valentinois et du bassin de Crest (Drôme-France).* Thèse de doctorat Grenoble (université scientifique et médicale) 253 p.
- Kalin, R. M. (1999).** *Radiocarbon dating of groundwater systems.* Environmental tracers in subsurface hydrology. C. P. et H. A. L. Boston, Kluwer Academic Publisher: p. 111-144.

- Kilchmann, S., H. N. Waber, A. Parriaux et M. Bensimon (2004).** *Natural tracers in recent groundwaters from different Alpine aquifers.* Hydrogeology Journal 12 p. 643-661.
- Kloppman, W., L. Dever et W. M. Edmunds (1998).** *Residence time of Chalk groundwaters in the Paris Basin and the North German Basin: a geochemical approach.* Applied Geochemistry 13 p. 593-606.
- Lastennet, R. (1994).** *Rôle de la zone non saturée dans le fonctionnement des aquifères karstiques. Approche par l'étude physico-chimique et isotopique du signal d'entrée et des exutoires du massif du Ventoux (Vaucluse).* Thèse de doctorat Université d'Avignon et des pays de Vaucluse 239 p.
- Latreille, G. (1969).** *La sédimentation détritique au Tertiaire dans le Bas-Dauphiné et les régions limitrophes.* Thèse de doctorat Université de Lyon, faculté des sciences 254 p.
- Latreille, G. et G. Demarcq (1971).** *Formes et figures de sédimentation dans la "molasse" miocène de la vallée du Rhône.* Vème congrès du Néogène Méditerranéen (coll./conf.), Lyon, p. 171-190.
- Lemeille, E., R. Letolle et F. Merliere (1983).** *Isotope and other physical-chemical parameters of palaeolake carbonates. Tools for climatic reconstruction.* Palaeoclimates and paleowaters: a collection of environmental isotopes studies. (coll./conf.), Vienna, IAEA, p. 135-150.
- Lesueur, J.-L., J.-L. Rubino et M. Giraudmaillet (1990).** *Organisation et structures des dépôts tidaux du Miocène rhodanien.* Bulletin de la Société Géologique de France 8 (6) p. 49-65.
- Lucas, L. L. et M. P. Unterweger (2000).** *Comprehensive Review and Critical Evaluation of the Half-Life of Tritium.* Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology 105 (4) p. 541-549.
- Mandier, P. (1988).** *Le relief de la moyenne vallée du Rhône au tertiaire et au quaternaire - essai de synthèse paléogéographique.* Thèse de doctorat Lyon I 3 tomes, 654 p.
- Marc, V. (1994).** *Etude des relations pluie-débit sur bassin versant en climat méditerranéen par le traçage chimique et isotopique naturel de l'eau (Réal Collobrier, massif des Maures, Var).* Thèse de doctorat Université de Montpellier II 293 p.
- Maréchal, J. C. et D. Etcheverry (2003).** *The use of 3H and ^{18}O tracers to characterize water inflows in Alpine tunnels.* Applied Geochemistry 18 p. 339-351.
- Mascle, A., R. Vially, E. Deville, B. Biju-Duval et J. P. Roy (1996).** *The petroleum evaluation of a tectonically complex area: The western margin of the Southeast Basin (France).* Marine and Petroleum Geology 13 (8) p. 941-961.

- Mazor, E. et R. Nativ (1992).** *Hydraulic calculation of groundwater flow velocity and age: examination of the basic premises.* Journal of Hydrology 138 p. 211-222.
- Mazué, V. (1998).** *Etude des nitrates dans la plaine à l'Est de Valence (Drôme).* DESS Grenoble 49 p. (*rappor*).
- Menard, G. et F. Thouvenot (1987).** *Coupes équilibrées crustales: méthodologie et application aux Alpes occidentales.* Geodinamica Acta 1 (1) p. 35-45.
- Mook, W. G. et J. J. de Vries (2000).** *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle - Principles and Applications.* Technical Documents in Hydrology, vol. 1-6, UNESCO/IAEA, Paris.
- Mudry, J. (1987).** *Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinétique des aquifères carbonatés.* Thèse de doctorat Université de Besançon 381 p.
- Mugnier, J.-L., R. Arpin et F. Thouvenot (1987).** *Coupes équilibrées à travers le massif subalpin de la Chartreuse.* Geodinamica Acta 1 (2) p. 125-137.
- Nicolo, H. (1978?).** *La nappe du miocène Nord Drôme - carte piézométrique - notice explicative.* SRAE 7 p. (*rappor*).
- Novel, J. P., M. Dray, A. Ferhi, C. Jusserand, G. Nicoud, P. Olive, J. M. Puig et G. M. Zuppi (1999).** *Homogénéisation des signaux isotopiques, ^{18}O et ^3H , dans un système hydrologique de haute montagne: la Vallée d'Aoste (Italie).* Revue des Sciences de l'Eau 12 (1) p. 3-21.
- Olive, P. (1997).** *Introduction à l'hydrologie isotopique.* Paris 6 Pierre et Marie Curie 62 p.
- Olive, P. (1998).** *La datation des eaux souterraines par le radiocarbone revisitée.* Université Paris VI - centre recherches géodynamiques 34 p.
- Olive, P., B. Blavoux et R. Létolle (2005).** *40 years chronicle of isotope data on aquifers of the fluvioglacial sediments of Evian and Thonon (France).* 17 p. (*soumis à Hydrogeology Journal*).
- Ozyurt, N. N. et C. S. Bayari (2003).** *LUMPED: a Visual Basic code of lumped-parameter models for mean residence time analyses of groundwater systems.* Computers & Geosciences 29 p. 79-90.
- Philippe, Y., E. Deville et A. Masclé (1998).** *Thin-skinned inversion tectonics at oblique basin margins: example of the western Vercors and Chartreuse subalpine massifs (SE France).* Cenozoic Foreland Basins of Western Europe. A. Masclé, Puigdefàbregas, C., Luterbacher, H.P., Fernandez, M. London, Geological Society. 134: p. 239-262.

- Razin, P. et P. Crochet (1992).** *Approche de la structure des aquifères carbonatés profonds de la moyenne vallée de la Drôme.* BRGM 13 p.
- Rousselot, D., H. Gudefin et J. Putallaz (1978).** *Etude hydrogéologique de la molasse du Bas-Dauphiné entre le Rhône et l'Isère.* BRGM 44 p.
- Rozanski, K., L. Araguas-araguas et R. Gonfiantini (1993).** *Isotopic pattern in modern global precipitation.* In Continental Isotope Indicators of Climate, American Geophysical Union Monograph.
- Rubino, J.-L., J.-L. Lesueur, L. Guy et G. Clauzon (1990).** *Le Miocène inférieur et moyen du bassin rhodanien - Stratigraphie séquentielle - sédimentologie.* Association des Sédimentologistes Français. 73 p. (*non publié*).
- Ryan, W. B. F. (1976).** *Quantitative evaluation of the depth of the Western Mediterranean before, during and after the Late Miocene salinity crisis.* Sedimentology 23 p. 791-813.
- Sardou, N. et J.-B. Simian (1992).** *Pratiques agricoles et pollution nitrique de l'eau dans la plaine de Valence (Drôme). Diagnostic et proposition d'action concernant les effluents d'élevage.* Institut Supérieur d'Agriculture Rhône-Alpes 76 p. (*rapport*).
- Sissingsh, W. (2001).** *Tectonostratigraphy of the West Alpine Foreland: correlation of Tertiary sedimentary sequences, changes in eustatic sea-level and stress regimes.* Tectonophysics 333 p. 361-400.
- SOGREAH (2004).** *Gestion concertée des prélèvements agricoles. Document d'incidence. Secteur Drôme des Collines et vallée de la Valloire.* Chambre d'Agriculture 63 p. (*rapport*).
- SRAE Rhône-alpes (1983).** *Le point sur la pollution par les nitrates dans le département de la Drôme.* SRAE 8 p. (*rapport*).
- SRAE Rhône-alpes (1985).** *Etude des nitrates de la Plaine de Valence - Bilan et Perspectives - Rapport d'Etude.* SRAE 14 p. (*rapport*).
- SRAE Rhône-alpes (1991).** *Note relative aux résultats de la recherche en eau dans la molasse miocène située à l'Est de Valence.* SIE Plaine de Valence 7 p. (*rapport*).
- SRAE Rhône-alpes, D. D. (1981).** *Contribution des services extérieurs du ministère de l'agriculture à la connaissance des ressources en eaux souterraines.* ministère de l'agriculture 154 p. (*rapport*).
- Steiner, P. (1974).** *Géologie, hydrogéologie, potentialité aquifère du Miocène Nord-Drôme.* SRAE 51 p. (*rapport*).
- Stuiver, M., Paula J. Reimer, E. Bard, J. W. Beck, G. S. Burr, K. A. Hughen, B. Kromer, G. McCormac, J. v. d. Plicht et M. Spurk (1998).** *INTCAL98 Radiocarbon Age Calibration, 24,000-0 cal BP.* Radiocarbon 40 (3) p. 1041-1084.

- Thornthwaite, C. W. (1948).** *An approach toward a rational classification of climate.* Geographical Review 38 p. 55-94.
- Tóth, J. (1963).** *A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins.* Journal of Geophysical Research 68 (10) p. 4795-4812.
- Tóth, J. (1995).** *Hydraulic continuity in large sedimentary basins.* Hydrogeology Journal 3 (4) p. 4-16.
- Triganon, A. (2002).** *Géométrie et fonctionnement d'un aquifère quaternaire du bassin Lémanique. Etude géologique et application de nouvelles méthodes isotopiques sur le système hydrominéral d'Evian (France).* Thèse de doctorat Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse 308 p.
- Vogel, J. C. (1993).** *Variability of carbon isotope fractionation during photosynthesis.* Water Relations 29-38 p.
- Warny, S. A., P. J. Bart et J.-P. Suc (2003).** *Timing and progression of climatic, tectonic and glacioeustatic influences on the Messinian Salinity Crisis.* Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 202 p. 59-66.

Annexes

Table des annexes

Annexe I	Profils sismiques	293
Annexe II	Calcul de l'ETR	299
Annexe III	Données de jaugeages différentiels	303
Annexe IV	Dosage des phytosanitaires	307
Annexe V	Résultats des analyses physico-chimiques	309
Annexe V.1	Résultats des analyses physico-chimiques des eaux des forages	309
Annexe V.2	Résultats des analyses physico-chimiques des eaux des puits et des sources	313
Annexe V.3	Résultats des analyses d'eaux correspondant à la datation des eaux	317
Annexe V.4	Résultats des analyses des eaux des forages situés dans le Pliocène	319
Annexe V.5	Résultats des analyses pesticides sur les eaux des puits et forages	320
Annexe VI	Résultats des analyses isotopiques	325
Annexe VI.1	Résultats isotopiques des eaux prélevées sur les forages	325
Annexe VI.2	Résultats isotopiques des eaux prélevées sur les puits	327
Annexe VI.3	Résultats isotopiques des eaux prélevées sur les eaux de surface	327
Annexe VI.4	Résultats isotopiques des eaux prélevées sur les eaux de sources	328
Annexe VII	Equations des modèles de correction de A₀	329

Annexe I PROFILS SISMIQUES

Notre objectif était de préciser, à l'aide de deux profils sismiques, la structure du bassin molassique de Valence et ses limites.

Pour ce travail, nous avons pu profiter du programme du BRGM sur la valorisation des données du sous-sol (responsable Mr Hanot). Il s'agit d'un vaste programme qui vise à modéliser en trois dimensions les structures géologiques des trois grands bassins sédimentaires Français (bassin parisien, aquitain et du Sud-Est). Le BRGM a procédé au retraitement des données brutes sur deux anciens profils sismiques situés au niveau du bassin de Valence. Le profil Est-Ouest 82SE01 date des années 1960 et le profil Nord-Sud 81SE4A a été effectué en 1981 sous la direction technique de l'IFP. Le profil 82SE01 suit approximativement l'Isère et va de Pont en Royans à l'Est jusqu'au niveau de l'autoroute A7 le long du Rhône. Le profil 81SE4A de 72 km va de Romans sur Isère jusqu'aux environs de Valréas. Une amélioration significative du rapport signal/bruit a permis la visualisation des structures profondes qui n'avaient jusque là pas toujours été signalées (IFP, 1983).

A l'aide de Monsieur Serrano (BRGM Orléans), j'ai procédé à un nouveau pointage des réflecteurs sismiques. Nous n'avons pas procédé à la réinterprétation de la totalité des profils. Nous nous sommes limités pour le profil 81SE4A à la remontée de l'Oligocène au Sud du bassin de Crest au niveau du CMP n° 1680, pour le profil 82 SE01 au front occidental du Vercors au niveau du CMP n° 1625. Compte tenu de la limite du bassin étudié et de notre intérêt pour la partie la plus superficielle du bassin de Valence, je n'ai pas procédé à une analyse poussée de ces deux lignes sismiques. Il s'avère néanmoins que l'agencement des différents réflecteurs montre des séquences de dépôts qu'il conviendrait d'étudier spécifiquement en particulier lors de l'épisode de rifting de l'ouest européen.

Nous présentons sur les planches A et B, les deux profils Nord-Sud 81SE4A et Est-Ouest 82SE01 sous trois formes. Le premier profil est le profil brut; sur le second nous avons situé les réflecteurs correspondant à un étage géologique bien identifié et le troisième correspond au profil interprété. En abscisse, l'échelle correspond aux numéros des géophones (CMP) et en ordonnée l'échelle est en temps double (ms) (temps d'aller-retour des ondes P).

Les niveaux de références des enregistrements sismiques des deux profils ne sont pas identiques (Datum Plane) et un calage des réflecteurs a été effectué au croisement des deux profils. A partir des chronogrammes des forages BMt 1 et SL 1, et des carottages sismiques récupérés le long du profil 81SE4A, les lois de vitesses établies pour les différents horizons permettent d'estimer la profondeur des réflecteurs repérés sur les profils 82SE01 et 81SE4A. Dans les tableaux I.1 et I.2, nous donnons pour différents CMP, la correspondance temps-double/profondeur NGF en mètres.

X CMP	X L2é	Y L2é	sol (ms)	sol NGF (m)	coordonnées des réflecteurs en temps double (ms)						coordonnées des réflecteurs en cote NGF (m)						
					socle	trias	lias	jurassique sup.	crétacé	oligocène	base plioçène	socle	trias	lias	jurassique sup.	crétacé	oligocène
100	811447	2007325	158	155	2709.2	2689.2	2593.9	2025.6	1334.1	548.9	-5261	-5187	-4968	-3491	-2223	-212	
120	811492	2006299	159	182	2717.8	2680.6	2605.2	2041.0	1329.1	553.5	-5254	-5186	-4946	-3499	-2184	-188	
140	811448	2004707	157	178	2715.0	2677.7	2605.2	2041.0	1320.9	557.6	-5253	-5171	-4976	-3501	-2160	-201	
160	811562	2003301	160	177	2715.0	2680.6	2602.4	2041.0	1302.8	563.8	-5246	-5158	-4966	-3491	-2110	-216	
180	811617	2002838	165	177	2720.7	2672.0	2599.6	2041.0	1284.9	579.0	-5246	-5150	-4942	-3473	-2060	-206	
200	811657	2002599	160	177	2709.2	2660.5	2577.0	2028.5	1280.6	572.1	-5227	-5139	-4941	-3449	-2042	-210	
220	811706	2002248	161	177	2697.8	2643.3	2551.5	2010.6	1271.8	569.1	-5197	-5110	-4881	-3401	-2014	-209	
240	811729	2002003	163	178	2692.0	2600.3	2514.8	1995.3	1244.0	566.9	-5175	-5060	-4808	-3354	-1940	-218	
260	811775	2001601	163	178	2669.1	2574.5	2486.6	1983.8	1214.4	577.0	-5117	-4952	-4713	-3320	-1864	-223	
280	811845	2001031	162	181	2637.5	2551.5	2469.6	1972.3	1187.8	580.5	-5037	-4887	-4638	-3287	-1800	-218	
300	811893	2000519	159	177	2617.8	2534.3	2449.8	1957.6	1172.6	576.3	-4998	-4841	-4604	-3259	-1768	-236	
320	811938	2000008	159	188	2585.9	2497.1	2415.9	1945.0	1162.0	585.0	-4909	-4787	-4540	-3213	-1711	-229	
340	811979	1995451	156	184	2540.1	2462.6	2376.4	1932.7	1142.0	587.6	-4806	-4705	-4465	-3190	-1690	-247	
360	812015	1999103	157	187	2511.4	2434.0	2336.8	1916.4	1109.6	597.2	-4729	-4614	-4359	-3141	-1618	-248	
380	812043	1998679	158	188	2474.1	2399.6	2302.9	1895.0	1081.4	599.9	-482.2	-4633	-4540	-3266	-3083	-1557	-242
400	812058	1998102	159	192	2431.1	2365.2	2277.5	1888.1	1057.9	593.7	-480.0	-4520	-4448	-3163	-3056	-1503	-242
420	812057	1997669	158	194	2396.7	2339.4	2266.2	1869.0	1043.1	596.5	-462.9	-4435	-4363	-3098	-3007	-1467	-247
440	812054	1997168	161	196	2365.2	2319.3	2243.6	1872.0	1031.9	600.4	-4347	-4289	-4057	-3000	-1439	-234	
460	812042	1996844	162	198	2342.2	2283.8	2223.8	1881.6	1027.6	590.0	-4285	-4234	-3994	-3013	-1423	-241	
480	812024	1996115	160	202	2325.0	2232.3	2189.7	1043.5	598.5	-4243	-3943	-3047	-1444	-249	-249		
500	811990	1995566	158	206	2327.9	2273.4	2223.8	1908.0	1075.1	606.2	-4251	-3961	-3068	-1494	-260	-260	
520	811949	1995165	155	208	2359.4	2284.9	2232.3	1916.0	1105.9	616.4	-4331	-4126	-3941	-3088	-1544	-262	
540	811949	1994724	152	212	2402.4	2327.9	2277.5	1920.0	1082.7	615.4	-4438	-4158	-3962	-3095	-1491	-263	
560	811847	1994273	149	213	2436.8	2362.3	2314.2	1933.0	1056.0	614.2	-4527	-4267	-4072	-3126	-1435	-261	
580	811782	1993743	148	214	2479.8	2411.0	2373.5	1944.8	1059.5	608.1	-4632	-4352	-4158	-3150	-1435	-257	
600	811735	1993276	147	214	2517.1	2454.0	2418.8	1970.8	1101.7	602.0	-4724	-4472	-4299	-3207	-1508	-253	
620	811685	1992777	148	209	2554.4	2488.5	2449.8	1998.6	1104.9	595.0	-4816	-4578	-4405	-3269	-1514	-254	
640	811630	1992242	153	206	2585.9	2514.3	2475.3	2031.5	1129.2	590.0	-4881	-4651	-4465	-3331	-1556	-254	
660	811577	1991706	154	197	2620.3	2522.9	2489.4	2060.7	1143.1	590.1	-4971	-4720	-4529	-3400	-1585	-282	
680	811514	1991158	155	192	2640.4	2517.1	2483.7	2074.0	1161.4	606.6	-5021	-4743	-4561	-3429	-1618	-302	
700	811443	1990616	155	183	2643.3	2505.7	2464.0	2085.0	1159.9	618.8	-5034	-4735	-4550	-3456	-1618	-306	
720	810365	1990075	154	185	2634.7	2488.5	2452.7	2088.5	1173.6	612.7	-5012	-4706	-4499	-3459	-1636	-304	
740	811321	1989556	150	189	2608.9	2465.5	2430.1	2076.8	1151.7	609.3	-4954	-4670	-4475	-3434	-1586	-292	
760	810285	1989116	151	192	2583.1	2436.8	2401.8	2058.7	1130.8	595.0	-4884	-4606	-4410	-3381	-1540	-288	
780	811244	1988634	154	190	2537.2	2388.1	2348.1	2039.6	1080.6	593.5	-4765	-4530	-4334	-3328	-1447	-291	
800	812022	1988249	154	201	2494.2	2336.5	2302.9	2010.4	1043.8	595.0	-4649	-4399	-4191	-3246	-1365	-280	
820	811133	1987770	153	194	2445.4	2393.5	2257.7	1973.0	1038.7	592.1	-4539	-4283	-4090	-3165	-1358	-282	
840	810140	1987314	153	196	2405.3	2276.3	2246.4	1926.0	972.1	584.6	-4438	-4175	-3977	-3052	-1233	-282	
860	810946	1986884	153	199	2388.1	2239.0	2209.7	1892.7	918.4	583.5	-4392	-4129	-3943	-2969	-1130	-290	
880	810794	1986369	153.0	197.0	2350.8	2224.7	2184.3	1861.0	954.9	591.5	-4302	-4039	-3854	-2894	-1193	-291	
900	810655	1985904	153.0	195.0	2316.4	2181.9	2181.4	1861.0	934.2	587.8	-4219	-4005	-3792	-2892	-1154	-293	
920	810558	1985491	153.0	193.0	2304.9	2216.1	2175.8	1864.6	901.4	585.3	-4192	-3992	-3784	-2898	-1094	-288	
940	810409	1984999	153.0	196.0	2293.5	2224.7	2164.5	1861.0	880.8	577.4	-4160	-3981	-3764	-2882	-1017	-277	
960	810289	1984630	153.0	198.0	2284.9	2224.7	2164.5	1861.0	827.6	567.6	-4136	-3999	-3732	-2876	-953	-261	
980	810111	1984116	153.0	205.0	2284.9	2181.9	2156.0	1850.5	792.8	553.1	-4128	-3991	-3721	-2841	-882	-239	
1000	809880	1983580	153.0	193.0	2279.1	2110.3	2150.4	1828.9	771.0	538.0	-4125	-3988	-3709	-2800	-853	-241	
1020	809604	1983021	153.0	193.0	2253.3	2021.0	2130.6	1799.3	707.8	526.9	-4061	-3966	-3692	-2730	-740	-229	
1040	809379	1982527	151.6	196.0	2266.2	2181.7	2113.6	1778.5	675.2	514.6	-4067	-3944	-3643	-2679	-678	-237	
1060	809151	1982008	149.9	196.0	2247.6	2164.4	2082.6	1740.7	636.9	520.5	-4049	-3899	-3603	-2595	-610	-214	
1080	808949	1981498	148.0	207.0	2216.1	2147.2	2054.3	1692.9	593.7	497.0	-3965	-3850	-3520	-2477	-522	-198	
1100	808911	1981013	146.0	210.0	2190.3	2034.5	1961.0	1643.5	542.3	489.0	-3882	-3788	-3432	-2660	-408	-138	
1120	808729	1980513	145.7	268.0	2178.8	2101.4	1980.9	1809.7	543.6	455.2	-3817	-3709	-3346	-2228	-372	-83	
1140	808641	1979915	142.2	263.0	2141.5	2067.0	1898.9	1575.4	529.3	437.8	-3739	-3652	-3230	-2161	-350	-96	
1160	808588	1979476	139.3	250.0	2121.4	2072.7	1859.4	1514.6	497.6	439.5	-3709	-3636	-3055	-2042	-308	-100	
1180	808015	1978900	142.5	250.0	2132.9	2075.6	1884.8	1493.9	472.7	430.8	-3731	-3595	-2958	-1915	-267	-86	
1200	808754	1978634	145.7	245.0	2164.4	2076.6	1910.2	1495.7	409.7	424.0	-3805	-3600	-3018	-1918	-313	-87	
1220	808842	1978146	148.8	237.0	2089.6	1935.7	1452.0	404.0	425.8	425.8	-3877	-3601	-3081	-1904	-262	-96	
1240	8089741	1973797	144.3	172.0	2142.2	2053.0	1701.6	1447.6	447.7	426.5	-3820	-3594	-3155	-1911	-293	-121	
1260	809036	1972350	145.4	172.0	2130.7	2048.5	1986.5	1398.0	409.0	443.6	-3827	-3584	-3170	-1938	-282	-120	
1280	809195	1976717	148.9	241													

X CMP	X L26	Y L26	sol (ms)	sol NGF (m)	coordonnées des réflecteurs en temps double (ms)						coordonnées des réflecteurs en cote NGF (m)							
					socle	trias	lias	jurassique sup.	crétacé	oligocène	base plioène	socle	trias	lias	jurassique	crétacé	oligocène	base plioène
105	800888	2002116	307	123	2464.1			2253.9	2034.1		595.8	-4383			-4049	-3476	-155	
140	801307	2002383	316	122	2540.2			2308.7	2066.2		572.8	-4569			-4178	-3542	-125	
176	801934	2002869	316	123	2598.1			2339.2	2085.6		451.6	-4727			-4261	-3593	-3	
211	802504	2003372	314	120	2750.4			2369.6	2081.4		325.5	-5144			-4352	-3586	105	
246	803076	2003824	314	115	2863.1			2387.9	2065.3	327.1		-5455			-4406	-3544	95	
282	803662	2004087	309	132	2866.1			2400.1	2057.7	325.5		-5466			-4435	-3517	107	
317	804268	2004504	309	146				2403.1	2068.7	330.4					-4428	-3531	114	
352	804900	2004855	296	170	3149.4	3030.6	2418.4	2050.1	341.8		-6231			-5936	-4481	-3489	101	
388	805559	2005165	286	185	3207.3	3192.1	3039.8	2403.1	1988.5	361.5	-6404	-6354	-5978	-4449	-3326	73		
423	806241	2005304	255	199	3204.3	3182.9	3042.8	2369.6	1937.9	358.2	-6473	-6407	-6062	-4427	-3255	46		
458	806921	2005446	250	163	3161.6	3137.2	3012.4	2314.8	1857.7	373.0	-6416	-6342	-6036	-4323	-3078	-17		
494	807621	2005556	253	173	3109.8	3085.5	2972.8	2247.8	1791.1	410.6	-6266	-6193	-5917	-4115	-2869	-56		
529	808308	2005720	255	176	3036.7	3006.3	2887.5	2208.2	1753.1	445.0	-6071	-5981	-5687	-3996	-2753	-98		
565	808999	2005847	253	176	2960.6	2936.2	2814.4	2180.8	1708.4	471.3	-5878	-5805	-5501	-3923	-2631	-136		
600	809709	2005927	258	178	2881.4	2866.1	2765.6	2150.3	1660.2	499.1	-5657	-5609	-5360	-3821	-2479	-164		
635	810400	2006042	255	181	2820.5			2726.0	2116.8	1603.7	525.3	-5506	-5265	-5733	-2344	-199		
671	811090	2006187	257	159	2762.6	2744.3	2665.1	2065.0	1559.0	546.6	-5374	-5319	-5123	-3605	-2280	-246		
691	811504	2006240	263	182	2729.1	2705.5	2610.3	2037.6	1507.5	561.0	-5250	-5181	-4940	-3487	-2151	-230		
706	811800	2006272	263	182	2701.7	2679.6	2573.7	2007.1	1471.2	569.5	-5182	-5117	-4846	-3401	-2083	-238		
741	812493	2006332	262	182	2634.6	2607.6	2515.8	1952.3	1374.2	605.6	-5012	-4934	-4699	-3252	-1910	-286		
776	813187	2006422	258	182	2552.4	2513.5	2421.4	1879.2	1292.3	599.0	-4804	-4695	-4457	-3057	-1766	-278		
812	813902	2006484	265	187	2454.9	2413.9	2345.3	1787.8	1181.8	605.6	-4523	-4408	-4232	-2780	-1549	-269		
847	814597	2006572	250	180	2327.0	2295.8	2193.0	1733.0	1156.4	615.4	-4228	-4140	-3870	-2675	-1536	-304		
882	815293	2006672	248	170	2250.8	2227.5	2119.8	1675.1	1145.5	603.9	-4041	-3975	-3690	-2528	-1528	-297		
918	816008	2006786	250	172	2186.9	2159.4	2034.6	1623.3	999.5	608.9	-3866	-3788	-3455	-2377	-1127	-295		
953	816690	2006880	257	176	2092.4	2071.1	1961.4	1531.9	939.6	626.9	-3591	-3531	-3237	-2192	-933	-302		
988	817381	2007094	262	174				1912.7	1474.1	951.4	638.4		-3097	-3080	-954	-308		
1024	818051	2007303	262	174	1873.1	1854.7	1787.8	1458.8	938.7	653.1	-2990	-2938	-2759	-2052	-917	-322		
1059	818695	2007585	263	166	1812.2	1795.7	1666.0	1431.4	986.0	648.2	-2831	-2785	-2432	-2007	-1054	-317		
1095	819331	2007905	273	148	1790.9	1736.0	1556.3	1407.1	1126.9	666.2	-2767	-2616	-2208	-1963	-1442	-341		
1130	819930	2008261	281	150	1720.8	1693.4	1498.4	1362.2	1074.6	681.3	-2554	-2478	-2091	-1848	-1268	-318		
1165	820523	2008636	278	173	1778.7	1699.5	1425.3	1312.6	1068.5	677.7	-2702	-2484	-1946	-1759	-1208	-315		
1201	821142	2009010	273	176	1681.2	1638.6	1425.3	1260.8	1007.1	662.9	-2448	-2333	-1954	-1672	-1072	-295		
1236	821607	2009232	268	198	1517.5	1513.7	1391.8	1230.4	883.3	489.3	-2204	-2101	-1883	-1603	-586	-67		
1271	822471	2009460	255	198	1504.5	1468.0	1373.5	773.5	575.8	384.4	-2111	-2045	-1876	-614	-178	45		
1307	823160	2009621	232	200	1535.0	1474.1	1364.4	934.9	762.3	373.0	-2207	-2098	-1901	-1132	-471	35		
1342	823840	2009838	222	203				1571.5	1376.6	1028.2	902.1	433.6		-2321	-1939	-1420	-889	-44
1377	824506	2009970	227	204	1845.7	1678.2	1483.2	904.4	527.0		-3010	-2548	-2120	-1550	-870	-147		
1413	825175	2010318	229	199	1870.1	1754.3	1565.4	1202.4	927.0	561.4	-3077	-2758	-2269	-1621	-945	-190		
1448	825825	2010578	226	196	1860.9	1766.5	1611.1	1212.4	885.5	605.6	-3064	-2804	-2376	-1647	-840	-249		
1483	826475	2010904	227	197	1940.1	1772.6	1608.1	1214.0	912.0	653.1	-3277	-2815	-2362	-1646	-909	-301		
1519	827143	2010973	235	198	1885.3	1763.0	1656.8	1225.7	935.3	674.4	-3102	-2691	-2473	-1651	-951	-316		
1554	827819	2011182	237.0	200.0	1921.8	1775.6	1702.5	1242.3		682.6	-3196	-2794	-2592	-1676				
1589	828512	2011349	237.0	200.0	1906.6	1833.5	1781.7				-3154		-2810					
1625	829226	2011389	245.0	185.0	1860.9			1772.6			-3022		-2776					

Tableau I.2: Correspondance temps-double et profondeur des réflecteurs (profil 82SE01).

A partir des cotes NGF des différents réflecteurs positionnés sur les deux tableaux précédents, nous présentons sur la planche C une vue en perspective de la structure du bassin de Valence.

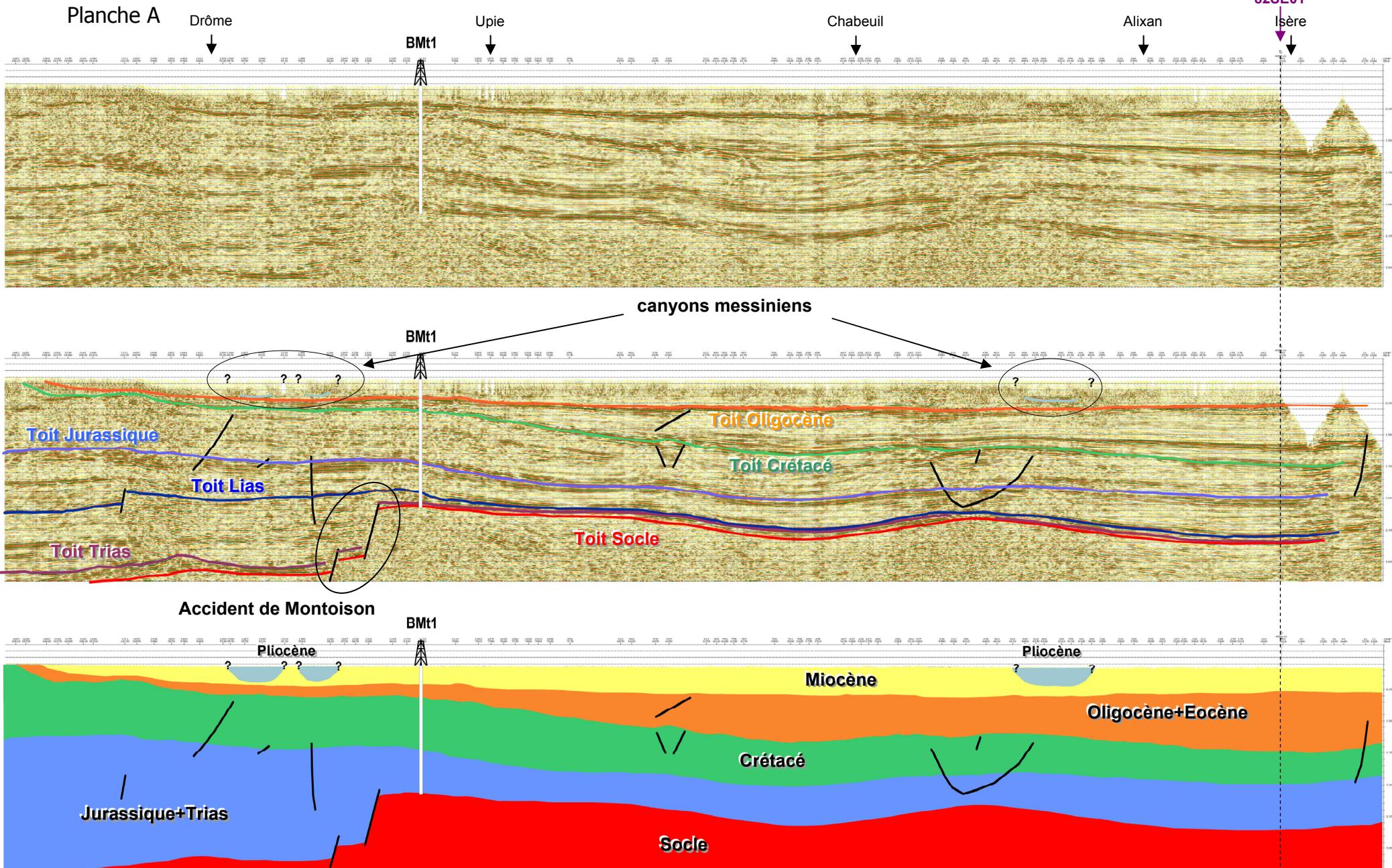
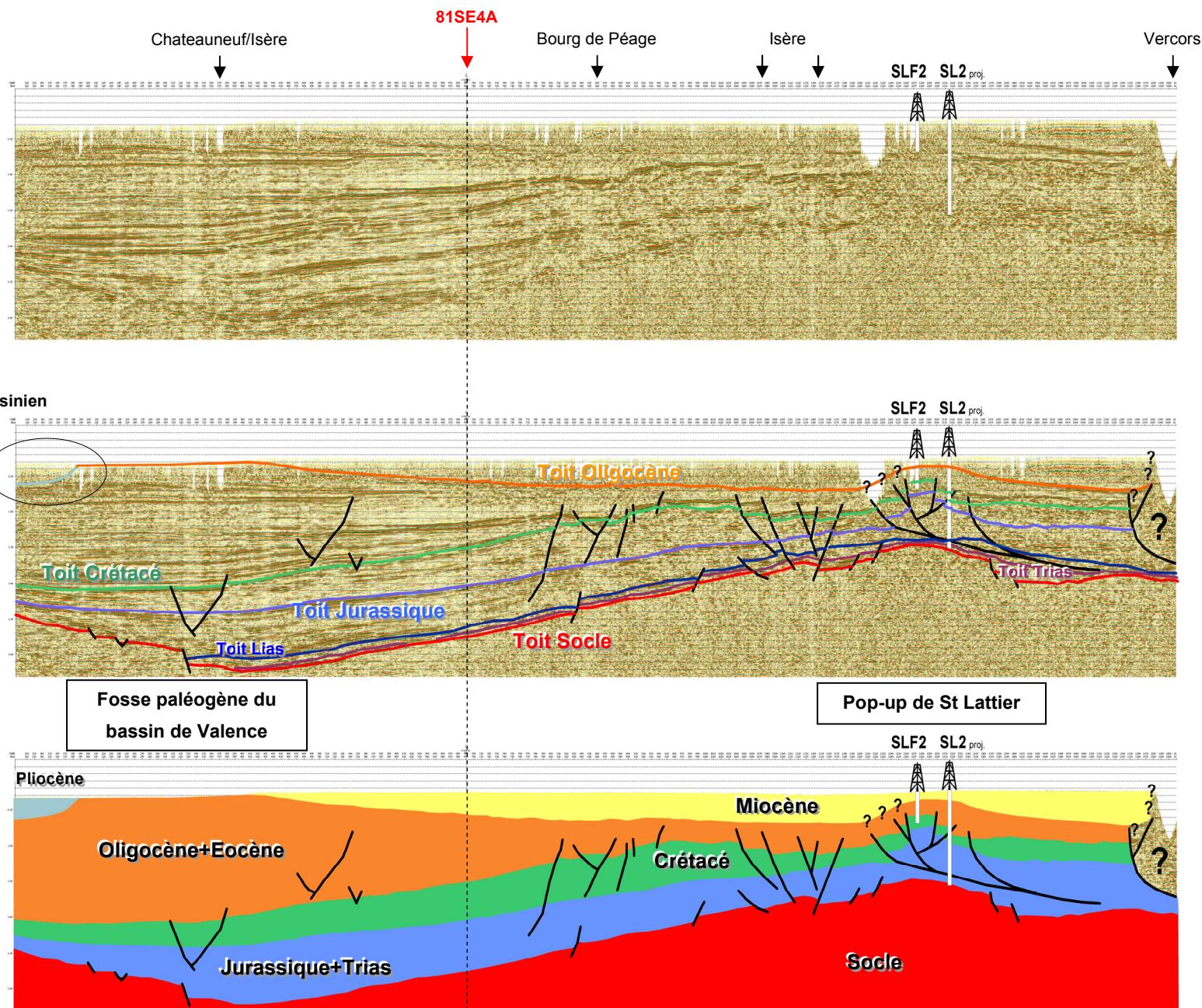
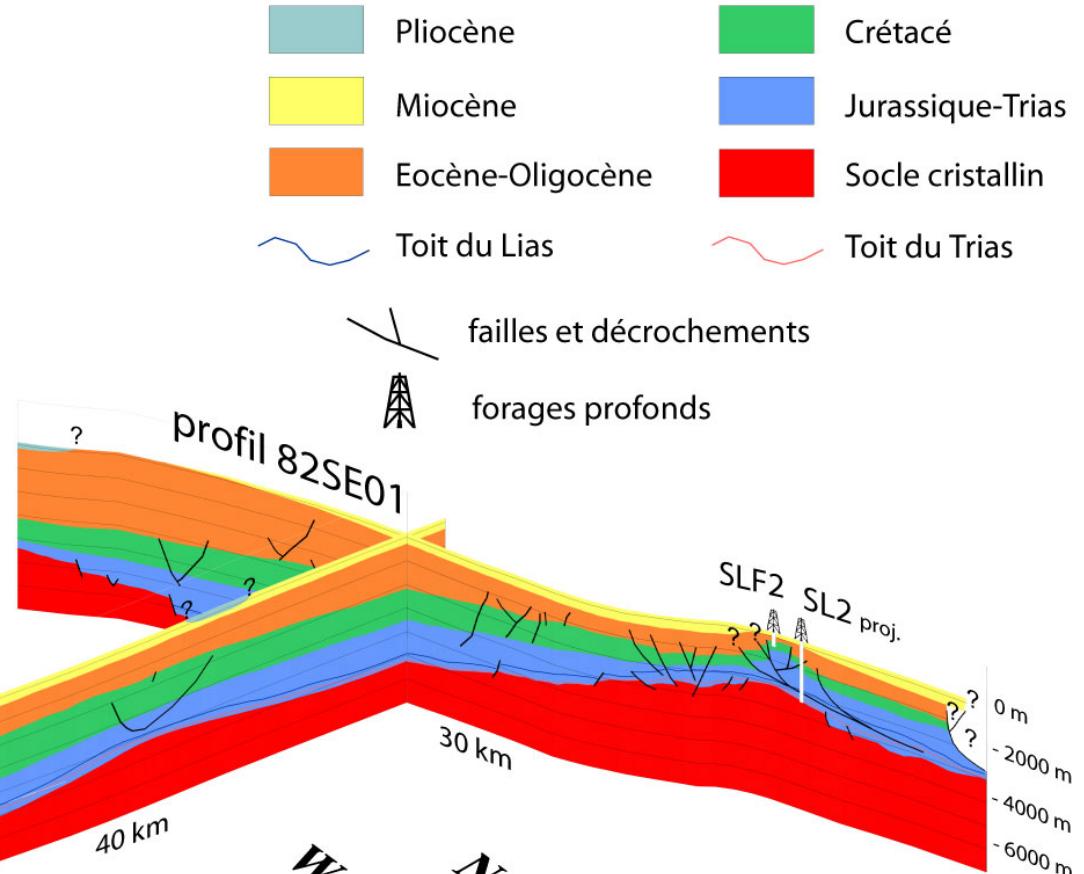
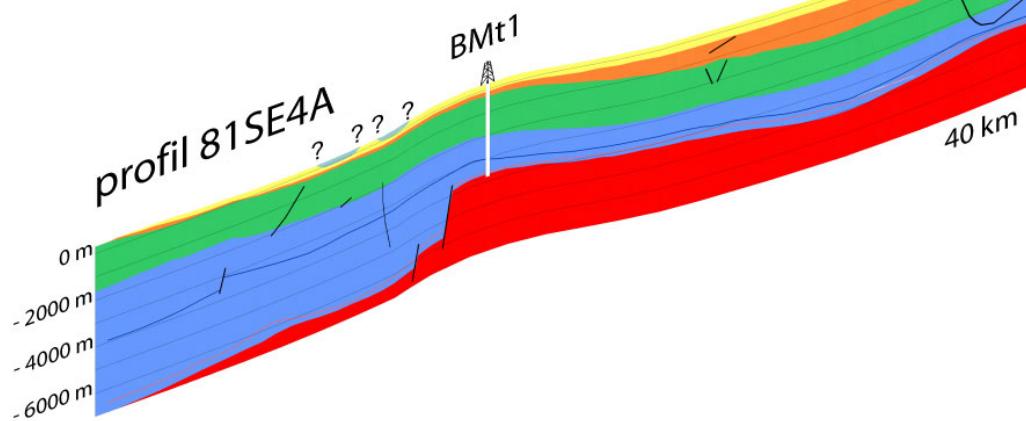
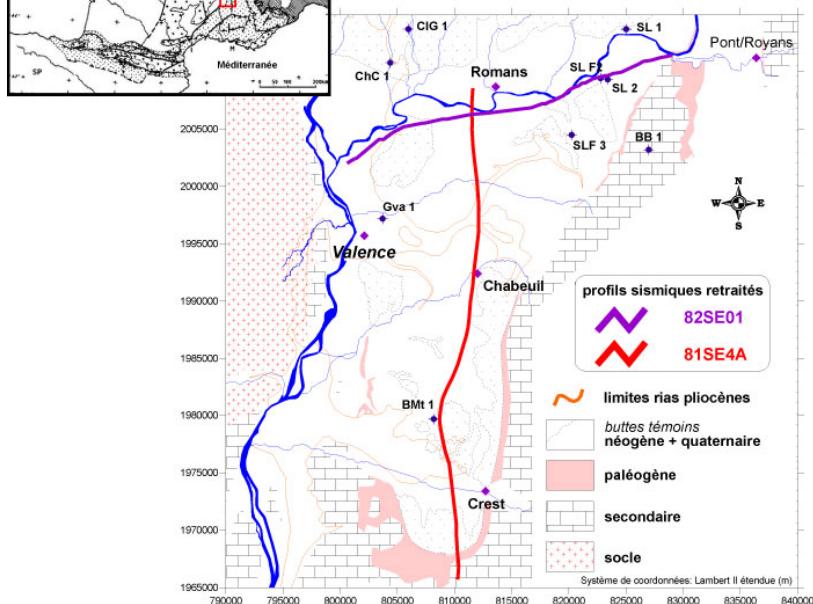
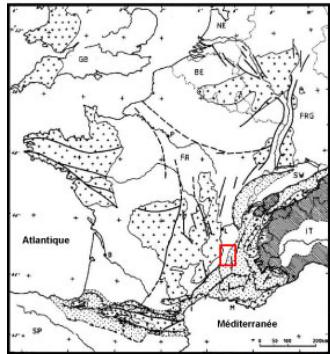


Planche B

croisement profil



Interprétation géologique des deux profils sismiques Plaine de Valence (Drôme): correspondance profondeur (m)



Annexe II CALCUL DE L'ETR

Cette méthode suppose que les excédents vont à la recharge de la nappe (pluie efficace Pe), sans considérer un éventuel ruissellement.

Pour cela, on prélève chaque fois une lame d'eau équivalente à l'ETP, soit des précipitations (P) et de la réserve utile (RU), soit de la réserve utile seulement. Deux cas peuvent se présenter:

- le bilan est positif $(P - ETP) > 0$, alors l'excédent des précipitations constitue les pluies utiles et l'évapotranspiration réelle (ETR) est égale à l'ETP;
- le bilan est négatif, alors il n'y a pas de pluies utiles. Pour satisfaire l'ETP, on fait appel à la réserve utile (RU) et nous avons deux possibilités:
 - $P + RU - ETP > 0$, alors $ETP = ETR$ et $RU > 0$;
 - $P + RU - ETP < 0$, alors $ETR = P + RU$.

Lorsque les précipitations redeviennent excédentaires par rapport à l'ETP, la RU se reconstitue jusqu'à atteindre la RUmax. Tant que la RUmax n'est pas reconstituée, il n'y a pas de pluie utile.

Sur notre zone d'étude, nous avons considéré qu'il existe 3 grandes catégories de sols:

- sur les formations molassiques, des sols caillouteux sableux, peu épais, très perméables, peu hydromorphes et pauvres en matières organiques;
- sur les cailloutis d'Alixan ou les formations du Miocène et Pliocène terminales, des sols limono-argileux, d'épaisseur et d'hydromorphie importante, de perméabilité très médiocre et riches en matières organiques;
- sur les alluvions, des sols sableux de caractéristiques intermédiaires entre les deux précédentes avec de bonnes perméabilités.

A chaque catégorie de sols est associée une réserve utile (RU). Ainsi pour les sols sur molasse, la RU est comprise entre 10 et 60 mm selon la profondeur du sol. Pour les sols sur cailloutis, elle se situe entre 84 et 168 mm et pour la dernière catégorie, entre 60 et 120 mm.

Les moyennes des RU sont respectivement de 35, 126 et 90 mm.

Nous avons calculé par l'algorithme précédent avec un pas de temps décadaire, les ETR et la pluie efficace maximale (P_e), pour une année moyenne à la station de Saint Marcel les Valence, en fonction des trois catégories de sol (tableau II.3).

Tableau II.3: ETR et pluie efficace maximale calculés pour les 3 grandes catégories de sols sur une année moyenne à la station de St Marcel les Valence (en mm).

Les ETR calculées par la méthode du bilan sont égales respectivement à 610, 665 et 701 mm et la pluie efficace calculée est égale à 252, 197 et 161 mm. Le pourcentage des pluies utiles représente 18, 22 et 29 % des précipitations moyennes de la station de St Marcel, pour chaque catégorie de sol considérée. En prenant la lame d'eau moyenne annuelle précipitée de 950 mm sur notre surface d'étude, la pluie efficace maximale est comprise entre 171 et 276 mm, pour une année moyenne.

A partir de la base de données des sols fournie par la Chambre d'Agriculture de la Drôme, nous connaissons les superficies des 3 grandes catégories de sols définies précédemment. Ainsi, les sols sur molasse, cailloutis et alluvions représentent respectivement 33 %, 32 % et

35 % de la surface du bassin de Valence (environ 1600 km²). Il suffit alors de pondérer la lame d'eau tombée avec le pourcentage des pluies utiles de chaque catégorie de sol en fonction de la contribution de chacune des surfaces pour préciser la pluie efficace maximale : Pe = 950 mm * [0,29*0,33+0,18*0,32+0,23*0,35] soit 222 mm/an.

Annexe IIIDONNEES DE JAUGEAGES DIFFERENTIELS

Nous présentons sur la figure III.1, le plan de situation de nos points jaugés et ceux de la DIREN Rhône-Alpes. Les tableaux III.4 à III.9 récapitulent les résultats des jaugeages différentiels.

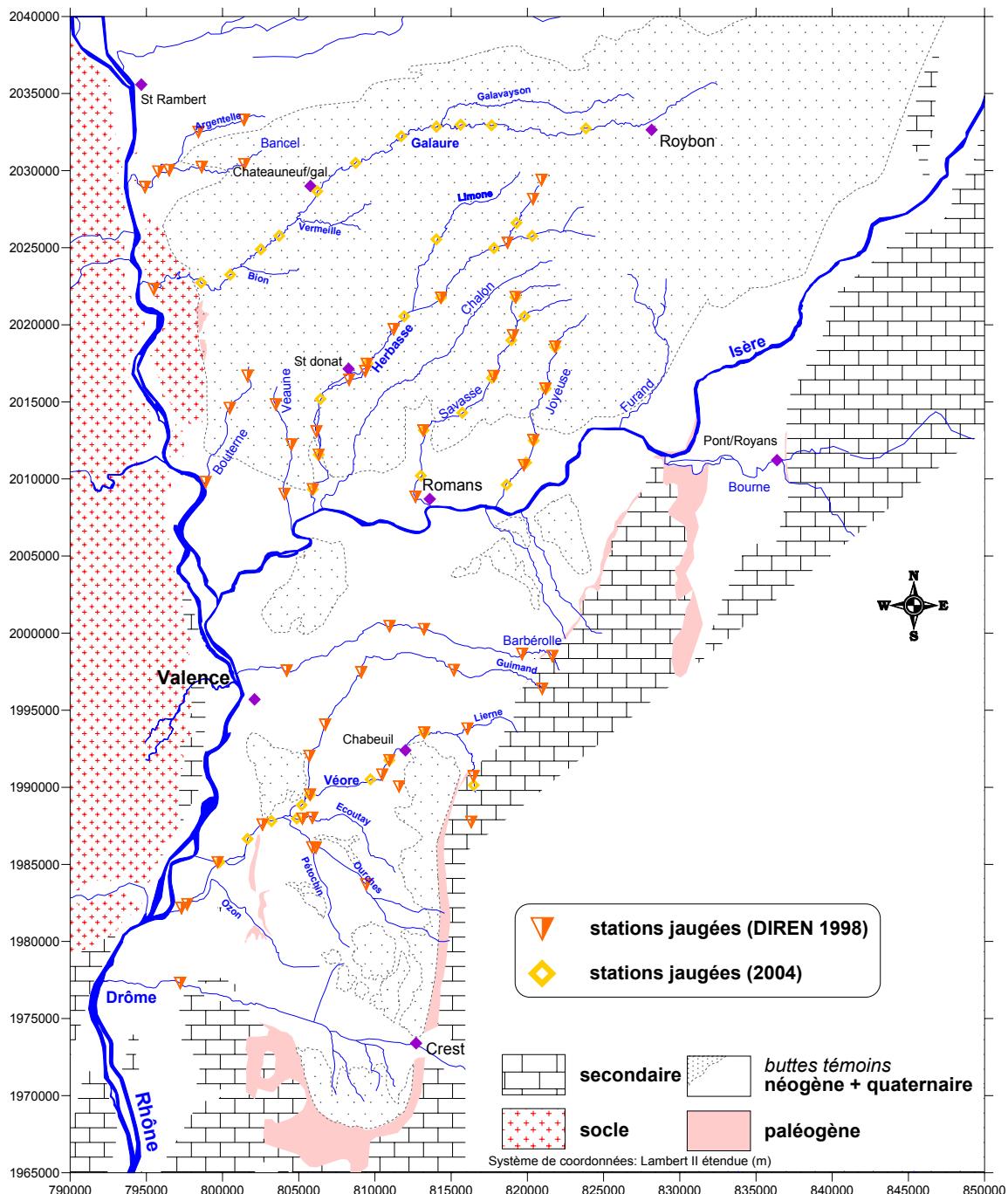


Figure III.1: Carte des stations de jaugeages différentiels (DIREN 1998 et notre étude 2004).

Rivières	nom	localisation précise	n° point jaugé (code DIREN)	X Lé (km)	Y Lé (km)	Z NGF (m)	BV (km²)	date	Q (m³/s)
Argentelle	Pont du lieu-dit "les Blains"		1121	801.41	2033.286	208	5.96	06/08/1998	0.006
Argentelle	Anneyron. Lieu-dit "Fondeville"		1122	798.425	2032.512	176	25.30	06/08/1998	0.052
Argentelle	Pont de la RD 122a		1123	795.784	2029.93	152	33.40	06/08/1998	0.047
Argentelle	Pont du lieu-dit "les Blains"		1121	801.41	2033.286	208	5.96	16/10/1998	0.013
Argentelle	Anneyron. Lieu-dit "Fondeville"		1122	798.425	2032.512	176	25.30	16/10/1998	0.066
Argentelle	Pont de la RD 122a		1123	795.784	2029.93	152	33.40	16/10/1998	0.058
Bancel	Lieu-dit "Bois Rotis", RD 132		1117	801.429	2030.411	220	20.68	06/08/1998	0.003
Bancel	St Martin des Rosiers, lieu-dit "Tantaron"		1118	798.635	2030.226	177	29.33	06/08/1998	0.044
Bancel	Aval de l'Autoroute A7 (Point situé au niveau de l'exutoire du bassin de Bancel avant la confluence avec l'Argentelle)		1119	796.496	2030.029	159	36.40	06/08/1998	0.072
Bancel	Pont de la RN7		1120	794.91	2028.93	146	80.05	06/08/1998	0.098
Bancel	Lieu-dit "Bois Rotis", RD 132		1117	801.429	2030.411	220	20.68	16/10/1998	0.006
Bancel	St Martin des Rosiers, lieu-dit "Tantaron"		1118	798.635	2030.226	177	29.33	16/10/1998	0.074
Bancel	Aval de l'Autoroute A7 (Point situé au niveau de l'exutoire du bassin de Bancel avant la confluence avec l'Argentelle)		1119	796.496	2030.029	159	36.40	16/10/1998	0.054
Bancel	Pont de la RN7		1120	794.91	2028.93	146	80.05	16/10/1998	0.129
Bouterme	Lieu-dit "La ferme Perrier"		1136	801.64	2016.684	202	11.05	06/08/1998	0.020
Bouterme	Lieu-dit "Prés-Bedoux"		1137	800.477	2014.589	178	19.59	06/08/1998	0.078
Bouterme	Lieu-dit "Pont Neuf"		1138	798.886	2009.784	118	35.60	06/08/1998	0.015
Bouterme	Lieu-dit "La ferme Perrier"		1136	801.64	2016.684	202	11.05	16/10/1998	0.025
Bouterme	Lieu-dit "Prés-Bedoux"		1137	800.477	2014.589	178	19.59	16/10/1998	0.092
Bouterme	Lieu-dit "Pont Neuf"		1138	798.886	2009.784	118	35.60	16/10/1998	0.070
drome, la (rivière) LVRON	Lvron		2619	797.219	1977.302	108	1641.33	11/08/1998	1.360
drome, la (rivière) LVRON	Lvron		2619	797.219	1977.302	108	1641.33	16/09/1998	7.990
drome, la (rivière) LVRON	Lvron		2619	797.219	1977.302	108	1641.33	14/10/1998	10.100
galaura, la (rivière) Saint-Valier (Galaure)	Amont Saint-Valier		321	795.49	2022.305	147	231.90	16/09/1998	1.000
galaura, la (rivière) Saint-Valier (Galaure)	Amont Saint-Valier		321	795.49	2022.305	147	231.90	14/10/1998	1.090
Herbasse	Amont St-Donat sur Herbasse		607	809.365	2016.995	215	145.10	06/08/1998	0.594
Herbasse	En aval du Quartier de l'Herbasse, au droit du point coté 428 m sur la RD 67		3149	820.93	2029.388	427	9.87	06/08/1998	0.020
Herbasse	Au pont de la RD 228 le lieu-dit la Reila		3150	820.37	2028.156	399	13.86	06/08/1998	0.034
Herbasse	Au droit du lieu-dit Châreadière, en aval de la confluence avec le ruisseau du Valéré		3151	818.698	2025.317	348	49.40	06/08/1998	0.088
Herbasse	Au pont de Clamot (ruines)		3152	814.333	2021.745	279	66.77	06/08/1998	0.096
Herbasse	Au pont de la RD 121		3153	811.226	2019.704	238	117.21	06/08/1998	0.218
Herbasse	Au pont de Chabrais		3154	809.465	2017.458	218	140.14	06/08/1998	0.381
Herbasse	Au pont de la RD 574		3155	808.305	2016.421	199	163.23	06/08/1998	0.312
Herbasse	En amont du hameau des Foulonges		3156	808.164	2013.673	167	178.63	06/08/1998	0.593
Herbasse	Au stade de football		3157	808.309	2011.568	155	184.06	06/08/1998	0.591
Herbasse	Au pont amont du lieu-dit Pont de l'Herbasse		3158	805.922	2009.321	148	190.14	06/08/1998	0.594
Herbasse	Amont St-Donat sur Herbasse		607	809.365	2016.995	215	145.10	16/10/1998	0.824
Herbasse	En aval du Quartier de l'Herbasse, au droit du point coté 428 m sur la RD 67		3149	820.93	2029.388	427	9.87	16/10/1998	0.030
Herbasse	Au pont de la RD 228 le lieu-dit la Reila		3150	820.37	2028.156	399	13.86	16/10/1998	0.046
Herbasse	Au droit du lieu-dit Châreadière, en aval de la confluence avec le ruisseau du Valéré		3151	818.698	2025.317	348	49.40	16/10/1998	0.143
Herbasse	Au pont de Clamot (ruines)		3152	814.333	2021.745	279	66.77	16/10/1998	0.156
Herbasse	Au pont de la RD 121		3153	811.226	2019.704	239	117.21	16/10/1998	0.291
Herbasse	Au pont de Chabrais		3154	809.465	2017.458	218	140.14	16/10/1998	0.497
Herbasse	En amont du hameau des Foulonges		3156	806.164	2013.073	167	178.63	16/10/1998	0.893
Herbasse	Au pont amont du lieu-dit Pont de l'Herbasse		3158	805.922	2009.321	148	190.14	16/10/1998	0.824
Joyeuse	Lieu-dit "Le Sabot"		1129	821.827	2018.58	268	13.60	06/08/1998	0.003
Joyeuse	Paranais		1130	821.187	2015.857	228	23.30	06/08/1998	0.003
Joyeuse	Châtillon St-Jean		1131	820.388	2012.513	196	37.80	06/08/1998	0.126
Joyeuse	St-Paul les Romans		1132	819.774	2010.891	185	39.00	06/08/1998	0.057
Joyeuse	Lieu-dit "Le Sabot"		1129	821.827	2018.58	266	13.60	16/10/1998	0.008
Joyeuse	Paranais		1130	821.187	2015.857	228	23.30	16/10/1998	0.008
Joyeuse	Châtillon St-Jean		1131	820.388	2012.513	196	37.80	16/10/1998	0.115
Joyeuse	St-Paul les Romans		1132	819.774	2010.891	185	39.00	16/10/1998	0.071
La Barberolle	Barberolle - RN532	à 100 m à l'avant du pont de la RN532	698	804.211	1997.562	135	13.00	12/08/1998	0.014
La Barberolle	Alixan-1	à l'avant du village, au pont du chemin reliant la D171 à la ferme Maucunes	699	810.96	2000.44	177	177	12/08/1998	0.012
La Barberolle	Alixan-2	amont Alixan au lieu-dit le Battor, (aval rejets Besayes)	700	813.215	2000.257	199	177	12/08/1998	0.000
La Barberolle	Besayes	amont Besayes, à 500 m. à l'avant du pont de la RD119a	701	819.66	1998.644	374	14.00	12/08/1998	0.000
La Barberolle	Barbières	amont du village	702	821.643	1998.504	447	12.40	12/08/1998	0.012
La Barberolle	Barberolle - RN532	à 100 m à l'avant du pont de la RN532	699	804.211	1997.562	135	13.00	24/09/1998	0.001
La Barberolle	Alixan-1	à l'avant du village, au pont du chemin reliant la D171 à la ferme Maucunes	699	810.96	2000.44	177	177	24/09/1998	0.017
La Barberolle	Alixan-2	amont Alixan au lieu-dit le Battor, (aval rejets Besayes)	700	813.215	2000.257	199	177	24/09/1998	0.001
La Barberolle	Besayes	amont Besayes, à 500 m. à l'avant du pont de la RD119a	701	819.66	1998.644	374	14.00	24/09/1998	0.000
La Barberolle	Barbières	amont du village	702	821.643	1998.504	447	12.40	24/09/1998	0.016
La Boisse	Commanderie	à 50 m en amont du hameau des Grisoux	723	820.971	1996.386	446	2.94	10/08/1998	0.017
La Boisse	Commanderie	à 50 m en amont du hameau des Grisoux	723	820.971	1996.386	446	2.94	22/09/1998	0.019
La Véore	Etoile-1	à 750 m du confluent de la Véore au Rhône	703	797.303	1982.158	95	177	10/08/1998	0.219
La Véore	Etoile-2	à 100 m. en aval de la RN7 (amont de l'ouvrage artificiel de la Véore)	704	799.68	1985.128	112	320.00	10/08/1998	0.308
La Véore	Beauvallon	à 50 m. à l'avant du pont de la D111	705	802.62	1987.575	133	300.00	10/08/1998	0.486
La Véore	Chabeuil-2	à 300 m. à l'avant de la RD 10, amont immédiat de la ligne TGV	708	810.945	1991.749	197	72.90	10/08/1998	0.062
La Véore	Beaumont-les-Valence-1	à 100 m. à l'avant du pont de RD538a (amont confluent du Guirand)	706	805.741	1989.512	143	113.00	11/08/1998	0.032
La Véore	Chabeuil-1	à 100 m. à l'avant du pont de RD538a (amont confluent du Bost)	707	810.478	1990.478	180	11/08/1998	0.036	
La Véore	Chabeuil-3	à 400 m. à amont du lieu-dit Flandrières	709	813.231	1993.537	239	69.35	11/08/1998	0.074
La Véore	Combovin-1	avant Combovin, à 300 m amont du hameau "Le Marinet"	711	816.469	1990.706	351	34.35	11/08/1998	0.076
La Véore	Combovin-2	amont Combovin, à 500 m amont du hameau "Les Durons"	712	816.32	1987.745	440	4.68	11/08/1998	0.010
La Véore	Etoile-1	à 750 m du confluent de la Véore au Rhône	703	797.303	1982.158	95	177	22/09/1998	0.361
La Véore	Etoile-2	à 100 m. en aval de la RN7 (amont de l'ouvrage artificiel de la Véore)	704	799.68	1985.128	112	320.00	22/09/1998	0.714
La Véore	Beauvallon	à 50 m. à l'avant du pont de la D111	705	802.62	1987.575	133	300.00	22/09/1998	0.664
La Véore	Beaumont-les-Valence-1	à 100 m. à l'avant du pont de RD538a (amont confluent du Guirand)	706	805.511	1989.512	143	113.00	22/09/1998	0.122
La Véore	Chabeuil-2	à 300 m. à l'avant du pont de la RD 10, amont immédiat de la ligne TGV	708	810.455	1991.749	197	72.90	22/09/1998	0.155
La Véore	Chabeuil-1	avant Chabeuil, à 300 m. à amont du pont de Bost	707	810.478	1990.478	180	23/09/1998	0.123	
La Véore	Chabeuil-3	amont Chabeuil, à 400 m en amont du lieu-dit Flandrières	709	813.231	1993.537	239	69.35	23/09/1998	0.186
La Véore	Combovin-1	avant Combovin, à 300 m amont du hameau "Le Marinet"	711	816.469	1990.706	351	34.35	23/09/1998	0.068
La Véore	Combovin-2	amont Combovin, à 500 m amont du hameau "Les Durons"	712	816.32	1987.745	440	4.68	23/09/1998	0.009
Le Bost	Montvendre	aval Montvendre, à 100 m en amont du pont de la RD 538	724	811.578	1990.550	197	12.19	11/08/1998	0.000
Le Bost	Montvendre	aval Montvendre, à 100 m en amont du pont de la RD 538	724	811.578	1990.550	197	12.19	23/09/1998	0.024
Le Guimard	Maisillard-1	aval Maisillard, à 50m. en aval du pont de la RD538a	719	805.698	1992.03	146	11/08/1998	0.187	
Le Guimard	Maisillard-2	amont Maisillard, à 20 m en amont du pont RD68a	720	806.731	1994.053	154	11/08/1998	0.177	
Le Guimard	Montelier	à Faouonières, à 500 m aval de la Chirouze	721	809.099	1997.461	168	36.40	12/08/1998	0.073
Le Guimard	Charpey	aval Charpey et Saint Didier de Charpey, à 250 m en aval du confluent de la Boisse	722	815.181	1997.597	253	17.12	12/08/1998	0.030
Le Guimard	Chapelle-1	aval Charpey, à 50m en aval du pont de la RD538a	722	815.181	1997.597	253	17.12	22/09/1998	0.030
Le Guimard	Chapelle-2	amont Charpey, à 20 m en amont du pont RD68a	720	806.731	1994.053	154	11/08/1998	0.064	
Le Guimard	Montelier	à Faouonières, à 500 m aval de la Chirouze	721	809.099	1997.461	168	36.40	23/09/1998	0.082
Le Guimard	Charpey	aval Charpey et Saint Didier de Charpey, à 250 m en aval du confluent de la Boisse	722	815.181	1997.597	253	17.12	24/09/1998	0.040
Le Pétochin	Montleger-1	à 15							

n°	nom station	X L2é (m)	Y L2é (m)	Z NGF (m)	distance cumulée (km)	BV (km²)	Q (l/s)	Qs (l/s par km²)	S élém. (km²)	ΔQ (l/s)	ΔQ/S élém. (l/s/km²)	remarques
1	perynard	823840	2032740	442	0	54.8	67	1.2				
2	le pichat le grd serre "la 3 gare"	817660	2032940	366	6.78	68.9	111	1.6	14.1	44.4	3.2	
3	le grd serre aval	815620	2032980	346	9.17	76.9	123	1.6	8.0	11.9	1.5	jaugeage aval confluence
4	le grd serre aval	814040	2032850	323	11.27	104.6	104	1.0	27.7	-19.2	-0.7	Galaure
5	hauterives amont	811730	2032230	296	14.14	112.3	0	0.0	7.7	-103.9	-13.5	
6	treigneux chateauneuf/galaue	808730	2030500	266	18.39	130.8	16	0.1	18.5	16.1	0.9	
7	re pont	806220	2028660	238	22.01	142.3	47	0.3	11.5	31.1	2.7	jaugeage aval confluence
8	mureils radier	803720	2025770	208	26.15	170.3	166	1.0	28.0	118.3	4.2	Vermeille/Galaure+rivière parallèle
9	la motte galaure	802510	2024890	192	28.22	173.7	123	0.7	3.4	-42.5	-12.5	riviere parallèle
10	villeneuve	800500	2023250	177	31.13	202.7	295	1.5	29.0	171.9	5.9	
11	st uze aval	798600	2022730	161	34.11	221.3	536	2.4	18.6	241.1	13.0	arrivées du Bion et de l'Emeil

Tableau III.5: Jaugeage différentiel sur la Galaure (06/10/2004)

n°	nom station	X L2é (m)	Y L2é (m)	Z NGF (m)	distance cumulée (km)	BV (km²)	Q (l/s)	Qs (l/s par km²)	S élém. (km²)	ΔQ (l/s)	ΔQ/S élém. (l/s/km²)	remarques
1	st bonnet valclerieux	820317	2025764	383		14	27.8	2.0				limone seche mais ruisseau parallèle
2	poulet	814028	2025541	320		25.8	53.9	2.1	11.8	26.1	2.2	jaugé
3	les vanauds	812870	2023770	284		26.7	0.0	0.0	0.9	-53.9	-59.9	
4	miribel amont	819290	2026610	367		29.2	40.0	1.4	2.5	40.0	16.0	
5	1 miribel aval	817810	2024980	333	0	50.5	97.2	1.9	21.3	57.2	2.7	
6	2 crepol	814333	2021745	276	5.44	66.8	28.3	0.4	16.3	-68.9	-4.2	
7	3 amont charmes	811920	2020550	248	8.36	104.8	85.6	0.8	38	57.2	1.5	
8	4 st donat amont	809514	2017494	211	12.61	140.2	423.1	3.0	35.4	337.5	9.5	
9	5 les fraysses	806430	2015190	178	17.27	169.9	655.8	3.9	29.7	232.8	7.8	
10	6 clerieux	806309	2011568	153	21.16	184	610.8	3.3	14.1	-45.0	-3.2	ruisseaux parallèles à l'herbasse
11	7 pont herbasse	805922	2009321	138	24.34	191.4	609.2	3.2	7.4	-1.7	-0.2	

Tableau III.6: Jaugeage différentiel sur l'Herbasse (21/09/2004)

n°	nom station	X L2é (m)	Y L2é (m)	Z NGF (m)	distance cumulée (km)	BV (km²)	Q (l/s)	Qs (l/s par km²)	S élém. (km²)	ΔQ (l/s)	ΔQ/S élém. (l/s/km²)	remarques
1	combovin	816480	1990140	343	0	33.6	52.8	1.6				
2	chabeuil amont	813231	1993537	229	6.48	69.4	116.1	1.7	35.8	63.3	1.8	Lierne
3	chabeuil aval	810945	1991749	184	9.7	72.9	41.9	0.6	3.5	-74.2	-21.2	
4	pont chabeuil	809706	1990513	166	11.89	81	25.6	0.3	8.1	-16.4	-2.0	arrivée Riousset
5	laborie	805741	1989512	136	16.29	113	38.1	0.3	32.0	12.5	0.4	arrivée Petite Véore
6	beaumont	805191	1988844	130	17.23	184	100.6	0.5	71.0	62.5	0.9	arrivée du Guimand
7	beauvallon amont	803215	1987810	119	19.76	298	340.3	1.1	114.0	239.7	2.1	arrivée de l'Ecoutay et du Pétochin
8	amont etoile	801648	1986652	112	21.97	306	411.7	1.3	8.0	71.4	8.9	
9	pont autoroute A7	799801	1985154	101	25.46	319	329.7	1.0	13.0	-81.9	-6.3	
10	ecoutay	804873	1987973	128		29	26.8	0.9				

Tableau III.7: Jaugeage différentiel sur la Véore (23/09/2004)

n°	nom station	X L2é (m)	Y L2é (m)	Z NGF (m)	distance		Qs (l/s par km²)	S élém. (km²)	ΔQ/S élém. (l/s/km²)	remarques
					cumulée (km)	BV (km²)				
1	saladot amont	821821	2018551	255	0	16.5	22.2	1.3		
2	parnans	821207	2015864	221	3.23	27.8	49.7	1.8	11.3	27.5
3	trois morliets	820422	2012485	187	7.32	37.8	55.8	1.5	10.0	6.1
4	st paul aval	819920	2011060	182	8.49	38.8	36.4	0.9	1.0	-19.4
5	buisseries	818640	2009620	161	10.59	41	4.4	0.1	2.2	-31.9
										-14.5

Tableau III.8: Jaugeage différentiel sur la Joyeuse (16/08/2004)

n°	nom station	X L2é (m)	Y L2é (m)	Z NGF (m)	distance		Qs (l/s par km²)	S élém. (km²)	ΔQ/S élém. (l/s/km²)	remarques
					cumulée (km)	BV (km²)				
	serans	819810	2020550	345		1.6	1.3	0.8		
	bagnol	819220	2021780	374		6	3.5	0.6	4.4	2.3
1	garagnol	818950	2018990	308	0	16.6	5.7	0.3	10.6	2.2
2	bois des fourches	817670	2016560	267	3.18	17.8	0.0	0.0	1.2	-5.7
3	les chanlands	815730	2014300	221	6.42	25.4	0.0	0.0	7.6	0.0
4	aval peyrins	813200	2013160	188	9.51	35.9	11.2	0.3	10.5	11.2
5	amont romans	813010	2010210	169	12.67	42.2	6.9	0.2	6.3	-4.2
										-0.7

Tableau III.9: Jaugeage différentiel sur la Savasse (05/10/2004)

Annexe IV DOSAGE DES PHYTOSANITAIRES

Source : document Hydriad

Principe et théorie

Les agents de traitement des plantes (phytosanitaires) et certains de leurs métabolites présents dans l'échantillon d'eau sont extraits par extraction solide-liquide sur un matériau de type cartouche octadécyle (RP-18), élués à l'aide d'un solvant puis séparés, identifiés et quantifiés par chromatographie liquide à haute performance avec détection UV selon la norme internationale ISO 11369 – « Qualité de l'eau – Dosage de certains agents de traitement des plantes – Méthode par chromatographie en phase liquide à haute performance (CLHP) avec détection UV après extraction solide-liquide »

Les concentrations de pesticides contenus dans l'échantillon sont calculées en comparant les surfaces des pics des produits de l'échantillon aux surfaces obtenues avec des solutions étalons de concentrations connues.

Réactifs et produits

Les solvants acétone, méthanol et acétonitrile de qualité « Pestipur ainsi que l'acétonitrile pour la chromatographie en phase liquide de qualité « RS-PLUS» proviennent de Carlo Erba SDS - France. L'eau distillée est filtrée sur une membrane de 0,45 µm sur un système « Purelab Proma » ELGA, France. Les solutions mères de standards d'herbicides à 1 mg/mL sont préparées à partir de standards en poudre (Dr. Ehrenstorfer, Allemagne) dilués dans l'acétonitrile. Une vérification de la concentration de ces standards est effectuée par comparaison avec une solution certifiée (Dr. Ehrenstorfer, Allemagne). L'acétate de potassium purifié provient de Sigma-Aldrich, Allemagne.

Le matériau absorbant RP-18 utilisé est le Sep-Pak Plus C18 Environmental 840 mg de Waters.

Appareillage et conditions chromatographiques

L'équipement HPLC est un système Waters comprenant un module de séparation (modèle 2695) muni d'un échantillonneur automatique, d'un détecteur à barrette de diodes (modèle 2996) couplé à un spectromètre de masse MicroMass ZQ de Waters. La colonne analytique

XTerra MS 18 de 150 mm x 2.1 est de type phase inverse avec une granulométrie de 3.5 µm (Waters, France). La température de la colonne est de 40 °C et le volume d'injection : 25 µL.

- Conditions chromatographiques pour les triazines et le diuron :

Eluant A : Solution aqueuse d'acétate de potassium à 2 mmol (pH = 6.5) / acétonitrile 8 : 2

Eluant B : Acétonitrile

Gradient : 90 % A à 75 % A de façon linéaire en 25 min.

Débit : 0.35 ml/min

- Conditions chromatographiques pour l'oxadixyl:

Eluant A : Eau

Eluant B : Méthanol

Gradient : 100 % A à 10 % A de façon linéaire en 20 min.

Débit : 0.30 ml/min

Annexe V RESULTATS DES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

Annexe V.1 RESULTATS DES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DES FORAGES

n°	commune	XL2é	YL2é	Z NGF	prof. Forage	T	pH	cond. 25°C	HCO3	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	NO3	silice	Balance	Is Calcite	Is Dolomite	pCO2 éq.
																					(atm)
117	albon	799869	2029870	189	143	21.7	7.69	416	282	56	22.1	8.9	1.2	2.2	2.9	2.1		3%	0.47	0.33	0.006
226	aliyan	807579	1998955	162	185	14.9	7.06	585	352	70	29.7	16.5	1.3	5.6	10.2	10.0		3%	0	-0.56	0.030
593	aliyan	812839	2003125	181	59	13.7	6.73	810	340	171	3.9	5.0	0.5	21.0	28.8	110.1		3%	0.02	-1.8	0.061
1196	aliyan	813492	2001746	198	63	17.2	6.76	793	411	160	7.2	7.5	9.3	17.0	35.1	64.5		1%	0.1	-1.34	0.069
1236	ambonil	803739	1980641	141	30	18.3	6.96	540	371	69	27.2	5.2	1.4	3.2	7.2			-3%	-0.07	-0.75	0.040
203	arthemonay	813570	2017710	296	123	12.5	7.24	342	209	76	1.6	2.8	0.6	6.8	8.3	7.1		2%	0.04	-1.8	0.012
390	arthemonay	814899	2019718	405	272	14.8	7.44	323	211	56	8.6	4.3	0.7	1.4	0.9	0.3		3%	0.11	-0.78	0.008
405	barbieres	820534	1998826	395	105	12.9	7	525	303	109	7.0	1.9	0.9	3.4	30.7	11.5	12.1	2%	0.08	-1.24	0.030
638	bathernay	809158	2023539	367	160	13.1	7.07	534	277	98	9.4	3.2	0.9	6.4	15.0	15.6		5%	0.07	-1.08	0.023
274	beaumont/valence	804459	1991272	176	151.5	15.6	7.35	460	239	72	17.6	4.8	0.7	5.7	8.9	41.9		3%	0.16	-0.49	0.011
358	beaumont/valence	805576	1989928	142	80	15.9	7.17	458	266	48	30.7	7.1	1.0	4.9	4.0	21.5		3%	-0.15	-0.69	0.018
359	beaumont/valence	807834	1987165	157	110	13.5	6.81	695	354	134	2.5	6.8	0.7	11.3	27.2	31.4		0%	0.03	-1.87	0.054
361	beaumont/valence	804640	1990242	172	120	14	6.82	627	283	118	5.9	5.4	0.5	18.1	29.2	77.8		-3%	-0.11	-1.72	0.042
370	beaumont/valence	805254	1987872	135	114	16.5	7.36	496	349	52	33.1	15.9	1.5	2.9	6.0	0.9	22.5	1%	0.18	-0.03	0.015
640	beaumont/valence	806700	1990482	143	100.8	17.3	7.19	448	295	55	30.5	7.7	1.0	2.3	10.1	3.7		4%	-0.03	-0.52	0.019
641	beaumont/valence	805928	1990996	140	70	15.1	7.26	464	311	41	38.3	10.1	1.3	1.5	5.9	0.1		3%	-0.07	-0.36	0.017
1249	beauregard baret	824272	2003719	440	50	12.4	6.71	686	421	132	16.1	9.6	1.8	11.1	13.3	23.2		3%	-0.01	-1.14	0.080
650	besayes	815756	2001002	228	69	13.8	7.22	661	261	135	2.4	2.5	0.6	15.6	23.3	82.2		4%	0.31	-1.32	0.015
654	besayes	814441	2000429	210	100	14.5	7.28	379	241	86	1.5	0.9	1.7	3.0	7.0	9.1		2%	0.18	-1.59	0.013
383	bessins	830762	2026276	410	182.42	12.3	6.82	691	401	129	15.1	3.9	1.0	7.4	34.0	1.3		2%	0.07	-0.99	0.059
178	bourg/peage	815745	2006236	192	314	17.3	6.96	576	383	68	37.7	6.9	1.4	1.5	2.7	3.4	20.3	3%	-0.07	-0.6	0.041
304	bourg/peage	811971	2004999	178	87	14	7.55	425	287	52	27.7	4.9	1.9	2.2	3.5	5.5		2%	0.3	0.12	0.008
1149	bourg/valence	802784	2000564	134	99	15.2	7.16	728	338	133	4.6	15.0	1.4	18.4	48.8	52.7		-1%	0.35	-0.96	0.023
662	bren	805544	2018790	332	180	12.9	7.16	386	218	79	3.0	3.3	1.0	7.9	11.8	14.0		1%	-0.02	-1.66	0.015
669	bren	803131	2020280	233	127.3	13.7	7.11	401	228	82	4.5	3.9	0.7	5.7	5.7	24.4		2%	-0.04	-1.54	0.018
227	chabeuil	808351	1994060	165	228	17.5	7.24	463	304	53	31.6	8.2	1.3	1.5	8.7	0.7		4%	0.02	-0.39	0.017
259	chabeuil	812309	1993315	225	79	18.1	6.93	585	285	115	4.9	4.9	0.8	12.2	22.1	30.2		3%	0	-1.56	0.033
679	chabeuil	807093	1994870	40	14.1	6.99	588	301	132	3.7	4.0	1.0	9.4	22.8	46.6		5%	0.14	-1.48	0.030	
688	chabeuil	809005	1991062	161	130	14.5	6.93	427	255	84	8.1	4.3	0.7	3.0	7.7	9.3		5%	-0.16	-1.54	0.030
1147	chabeuil	812602	1991800	217	32	14.7	6.68	716	359	135	12.8	4.0	0.7	16.2	37.0	40.1		1%	-0.1	-1.43	0.073
1243	chabeuil	813707	1991767	295	212	14.7	6.92	484	298	93	9.6	4.1	0.7	2.2	7.1			5%	-0.07	-1.32	0.035
280	chabriillan	807374	1972467	176	108	16.3	7.12	721	423	69	35.7	51.3	4.1	8.2	54.6	8.5		2%	0.12	-0.25	0.031
323	chabriillan	808145	1971818	199	130	15.2	7.35	610	388	79	37.2	8.5	1.8	4.2	13.0	0.3		5%	0.38	0.24	0.017
695	chabriillan	806488	1972962	187	70	15.6	7.66	498	350	70	26.4	11.1	1.7	4.1	18.3			0%	0.61	0.59	0.008
1172	chabriillan	807749	1971311	232.6	120	15	7.2	731	390	74	20.0	62.8	5.9	20.7	67.1	15.9		-3%	0.2	-0.37	0.024
1211	chabriillan	807939	1972638	182	70	15.5	7.02	690	382	71	39.7	11.5	2.8	6.9	19.0	11.2		2%	0	-0.46	0.036
1217	chabriillan	809246	1971674	243	80	17.2	7.18	638	323	122	17.9	5.6	1.3	12.6	35.5	43.7		5%	0.31	-0.41	0.021

n°	commune	X L2é	Y L2é	Z NGF	prof. Forage	T	pH	cond. 25°C	HCO3	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	NO3	silice	Balance	Is Calcite	Is Dolomite	pCO2 éq.
		(m)				(°C)		(µS/cm)	mg/l										(atm)		
138	chantemerle les bles	800392	2016513	270	141.5	14.1	6.84	540	304	100	6.1	4.9	0.7	4.9	8.4	14.1		2%	-0.11	-1.64	0.043
255	chantemerle les bles	799934	2015193	215	120	17.6	7.07	790	460	135	27.0	9.7	1.5	9.2	46.6	3.1		3%	0.38	-0.13	0.038
702	chantemerle les bles	799708	2018194	257	100	13.9	7.06	637	295	117	4.6	7.1	1.2	9.2	12.5	32.7		5%	0.15	-1.3	0.025
132	charmes/herbasse	812667	2021135	265	132	14.8	7.13	418	337	75	17.2	5.2	1.0	2.2	3.6	3.2	20.8	-3%	0.1	-0.64	0.025
302	charmes/herbasse	810059	2022191	272	150	13.5	7.36	476	289	91	12.3	3.6	0.9	4.3	5.9	18.1		4%	0.34	-0.38	0.012
708	charmes/herbasse	809483	2019500	300	130	12.6	6.99	434	263	86	6.9	3.1	0.7	3.7	3.8	14.5		3%	-0.08	-1.45	0.027
713	charmes/herbasse	811748	2019673	269	135	13.5	7.18	389	239	57	15.4	3.9	0.8	1.7	0.7	1.5	18	4%	-0.09	-0.96	0.016
291	charpey	815655	1997192	248	150	12.9	6.98	504	276	91	5.2	2.7	0.8	4.9	10.5	18.3		1%	-0.05	-1.53	0.029
1146	charpey	818196	1997146	307	48	14.7	7.25	699	378	155	5.2	2.2	0.9	12.7	19.8	47.7		3%	0.55	-0.57	0.021
402	chateaudouble	815689	1994396	285	83	14	6.81	524	317	114	4.7	1.8	0.6	2.6	8.9	17.7		4%	-0.07	-1.73	0.048
731	chateauneuf de galaure	806895	2031473	309	150	11.4	7.05	497	226	90	3.3	10.1	1.0	14.6	20.0	16.9		4%	-0.07	-1.77	0.020
736	chateauneuf de galaure	804996	2027576	235	48	15.4	7.32	323	189	35	15.2	5.5	0.9	1.4	2.0	0.3	16.4	1%	-0.25	-1.06	0.009
737	chateauneuf de galaure	806412	2025079	311	215	12.4	6.86	635	261	124	2.7	5.1	0.8	29.3	20.8	60.6		1%	-0.08	-2.01	0.035
268	chateauneuf/isere	806145	2004180	245	198	14.5	6.91	516	276	101	9.1	5.9	0.6	8.4	10.2	31.9		5%	-0.08	-1.41	0.033
1246	chateauneuf/isere	809431	2004612	175	80	14.3	6.74	724	327	151	8.1	4.3	0.8	20.4	44.5	59.6		3%	-0.04	-1.54	0.058
315	chatillon st jean	820548	2014656	209	247	17.9	7.05	556	375	61	37.4	11.2	1.2	1.6	5.8	1.6	25.7	2%	-0.03	-0.48	0.033
176	chatuzange le goubet	818134	2004469	260	275	13.5	6.87	614	315	108	8.0	3.5	0.9	6.9	7.0	21.9	15.6	3%	-0.04	-1.41	0.042
181	chatuzange le goubet	816922	2005648	202	153	16.4	7.56	525	280	105	4.2	2.8	0.9	7.6	8.4	21.6	13.7	4%	0.59	-0.41	0.008
749	chatuzange le goubet	816932	2005546	50	13.8	7.09	572	316	122	3.0	2.2	0.9	10.8	13.6	27.9	12.4	2%	0.23	-1.35	0.025	
294	claveyson	803392	2022691	224	122	15.1	7.1	473	273	79	18.4	4.1	0.8	5.4	6.1	22.5		5%	0	-0.83	0.021
761	claveyson	806018	2021273	360	140	12.5	6.55	526	267	110	3.3	3.8	0.7	12.3	23.0	28.8		2%	-0.42	-2.56	0.074
778	clerieux	805249	2011902	185	60	13.9	6.87	627	270	118	9.2	5.2	1.1	15.0	28.4	63.3	19	3%	-0.08	-1.46	0.036
199	crepol	815154	2022774	294	102	13.2	6.94	631	299	129	2.1	3.9	1.0	17.2	20.7	43.0	12.5	2%	0.08	-1.83	0.034
273	crepol	813423	2023137	309	225	13.3	7.19	442	311	78	15.8	4.2	0.9	2.5	5.7	1.6		1%	0.15	-0.6	0.020
783	crepol	817054	2025009	343	50	12.8	6.98	409	232	75	7.1	3.7	0.8	2.8	10.5	1.6	13.9	5%	-0.19	-1.61	0.024
792	crest	808031	1972903	178	165	19.7	7.41	555	370	51	36.3	15.1	3.1	4.9	20.4			-3%	0.25	0.14	0.014
793	crest	811567	1974662	197	150	15.7	7.22	505	318	61	27.3	5.0	1.5	4.4	7.8			0%	0.08	-0.4	0.019
1213	crest	810971	1972072	203	90	15.7	7	675	390	105	38.1	11.5	2.2	18.7	57.2	12.8		4%	0.14	-0.37	0.038
1219	divajeu	810644	1970381	270	85	17.7	7.13	586	283	97	19.0	3.8	0.8	15.2	21.7	59.6		1%	0.12	-0.66	0.021
806	etoile/rhone	804429	1984245	155	48	14.9	7.39	637	356	129	3.6	4.0	0.7	10.2	13.5	28.5		0%	0.6	-0.55	0.014
1291	etoile/rhone	804071	1984534	153	111	13.8	6.93	621	315	108	7.8	5.3	0.9	10.8	14.6	22.7		1%	0.02	-1.3	0.036
170	genissieux	816323	2014479	235	168	13.4	7.28	643	292	126	2.9	3.8	0.7	12.6	25.8	56.4		1%	0.39	-1.04	0.015
1209	grane	805807	1973015	177	100	15.2	7.24	589	327	66	30.3	6.3	1.9	5.5	22.7			1%	0.14	-0.27	0.019
123	hauterives	812130	2031696	346	253	12.6	7.43	505	221	87	10.5	7.5	0.8	74.3	3.0	2.4	13	-3%	0.28	-0.55	0.008
297	hauterives	809050	2031047	285	141	13.3	7.17	437	240	88	1.9	2.8	1.0	5.2	7.9	11.2	12.9	3%	0.08	-1.71	0.016
853	hauterives	813455	2033097	335	100	12.4	7.18	368	182	68	1.5	3.3	0.5	7.6	6.9	5.6	12.8	4%	-0.12	-2.12	0.012
859	hostun	823459	2009207	203	41	13.3	6.84	733	381	135	7.5	4.6	1.5	10.4	20.6	44.5		1%	0.09	-1.27	0.054
1250	hostun	825088	2006376	300	178	15.3	7.08	551	362	71	31.9	10.1	0.9	1.2	2.1	5.6		4%	0.05	-0.45	0.030
317	jaillans	823242	2006748	238	233	14.8	7	616	448	100	33.2	6.4	1.2	2.3	2.6	5.2		3%	0.19	-0.3	0.044
1233	la baume cornillane	813937	1985649	345	55	17.7	6.83	704	447	108	30.5	2.5	1.0	4.9	21.6	4.2		0%	0.05	-0.65	0.064
1235	la baume cornillane	812358	1984002	257	60	14.1	6.98	688	259	129	2.5	4.3	0.8	20.7	33.0	93.9		-1%	0.05	-1.82	0.027
864	la motte de galaure	803054	2025894	218	105	14.2	6.93	612	357	112	15.0	8.7	1.0	13.4	15.9	28.5	18.8	1%	0.08	-0.92	0.041
884	lapeyrouse mornay	807433	2039336	250	150	15.7	7.23	418	245	49	16.9	9.1	1.2	2.1	6.9	0.5		0%	-0.1	-0.86	0.014
126	le grand serre	815598	2033012	350.35	115.25	12.4	7.2	382	194	71	3.8	2.4	0.8	6.4	10.0	8.0	13.4	4%	-0.07	-1.6	0.012
893	livron	802064	1978497	138	60	16.5	7.45	660	442	120	15.0	11.7	1.6	3.0	4.8	2.0		2%	0.71	0.33	0.015
899	malissard	806006	1992493	143	105	15.7	7.25	465	288	40	34.9	11.7	1.5	1.4	5.8			5%	-0.12	-0.49	0.016
1288	manthes	809751	2038379	239	200	14	6.99	467	249	75	8.7	14.2	1.2	7.0	7.4	13.9		4%	-0.16	-1.46	0.025
909	marches	816673	2001335	243	120	13.3	6.9	561	248	104	2.3	2.2	0.7	10.7	19.5	47.9		0%	-0.12	-2.1	0.031
163	marsaz	805278	2014293	194	80	12.8	6.85	706	294	144	4.0	6.3	1.0	20.5	44.7	55.0	14.1	4%	0.01	-1.73	0.040
164	marsaz	803332	2015880	195	108	14.7	7.07	489	312	69	27.2	5.4	1.2	2.3	2.5	6.5		5%	-0.03	-0.67	0.026
201	marsaz	803198	2018285	235	98	13.9	7.02	389	206	71	2.2	3.0	0.6	4.1	5.8	21.3		-1%	-0.22	-2.15	0.020

n°	commune	XL2é	YL2é	Z NGF	prof. Forage	(m)	T	pH	cond. 25°C (µS/cm)	HCO3	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	NO3	silice	Balance	Is Calcite	Is Dolomite	pCO2 éq.
928	mercurol	802029	2015031	239	130	13.4	6.73	863	439	173	11.5	10.1	0.6	16.2	61.5	19.9		4%	0.12	-1.13	0.079	
247	montagne	825210	2020327	458	100	17	7.05	634	309	124	1.7	3.9	0.7	8.3	17.8	46.7		1%	0.19	-1.69	0.027	
205	montchenu	810725	2024753	365	198	12.6	6.84	586	407	124	8.5	3.8	1.0	7.3	13.6	16.1		-2%	0.09	-1.19	0.058	
930	montchenu	813513	2024820	302.5	70	11.1	6.97	499	245	93	3.6	3.4	0.6	10.7	13.4	15.3		2%	-0.1	-1.81	0.026	
352	montelegier	806168	1985648	143	130	16.8	7.17	513	316	57	28.6	13.0	1.2	3.0	7.3	13.8	22	1%	-0.01	-0.52	0.021	
932	montelegier	806168	1985682	141	70	16.6	7.18	486	309	45	35.0	13.3	1.2	1.9	4.8		23.3	5%	-0.11	-0.52	0.020	
935	montelier	813943	1996161	236	220	16.2	6.86	550	369	107	8.9	10.6	1.1	1.9	4.5	3.8		2%	0.01	-1.26	0.050	
345	montmeyran	807865	1985197	164	100	14.9	7.45	652	359	119	14.0	6.1	0.8	15.5	28.5	43.3		-1%	0.62	0.11	0.012	
355	montmeyran	809113	1986927	164	100	15.9	7.48	526	338	97	5.8	12.5	1.2	2.5	7.8	2.8		1%	0.56	-0.3	0.011	
425	montmeyran	806392	1983236	163	40	14.4	6.99	602	362	104	20.2	4.4	1.1	10.2	20.2	8.6		2%	0.11	-0.69	0.036	
426	montmeyran	806397	1983246	164	116	16.7	7.58	534	349	54	37.4	13.5	1.2	2.9	3.7			4%	0.41	0.47	0.009	
939	montmeyran	807476	1983918	166	80	15.8	7.18	570	372	56	35.5	11.5	1.4	3.1	4.7	4.2	22.7	1%	0.06	-0.28	0.024	
948	montmiral	821844	2018307	251	100	13	6.93	511	326	105	6.4	3.8	0.9	3.4	3.4	13.2	19.5	2%	0.03	-1.36	0.038	
949	montmiral	823620	2018529	356	180	13.8	6.75	574	387	122	6.0	3.6	0.9	4.2	5.7	8.0		0%	-0.02	-1.56	0.067	
951	montmiral	822817	2019720	325	100	12.6	6.82	581	345	119	5.2	3.4	0.9	7.9	11.9	13.6	15.5	1%	-0.01	-1.59	0.051	
276	moncoison	804738	1980807	163	132	17.5	7.05	594	368	62	34.0	11.4	1.6	4.4	8.5			1%	-0.03	-0.53	0.032	
362	moncoison	804363	1982028	163	40	16.5	6.78	856	369	174	4.0	8.6	0.6	24.7	70.6	73.5		0%	0.1	-1.63	0.059	
366	moncoison	807224	1980851	186	100	15.4	7.37	701	415	113	21.0	6.4	1.5	8.3	16.3	9.5		1%	0.58	0.23	0.017	
367	moncoison	805587	1979200	168	100	16.6	7.56	555	244	97	4.8	3.5	0.7	9.9	15.2	71.5		-3%	0.5	-0.5	0.007	
407	moncoison	806824	1981901	173	57	14.1	6.8	545	250	108	2.6	3.0	0.4	14.5	15.6	24.5		5%	-0.2	-2.23	0.039	
959	montvendre	809144	1989030	157	60	16	7.31	636	421	80	28.5	9.6	1.0	3.5	5.0	9.4		-3%	0.39	0.13	0.020	
960	montvendre	810054	1988286	176	100	16.4	7.07	566	296	104	8.2	5.5	0.7	8.2	10.7	37.6		1%	0.12	-1.07	0.025	
961	montvendre	811059	1989637	185	100	14.8	6.73	690	371	138	6.1	7.2	3.8	18.4	35.3	72.2		-4%	-0.03	-1.61	0.067	
966	montvendre	812938	1987805	260	100	14.1	6.6	780	345	148	4.8	3.9	0.6	22.6	39.2	62.5		1%	-0.16	-2	0.084	
971	montvendre	813079	1986974	274	200	14.3	6.94	766	305	153	3.4	2.4	1.1	43.3	28.7	120.0		-4%	0.14	-1.57	0.034	
408	mours st eusebe	814616	2011706	178	70	15.7	6.94	456	302	66	16.7	3.4	0.8	1.5	0.7	2.0		-2%	-0.18	-1.16	0.034	
1232	ourches	812410	1982855	265	71	15	7.32	393	245	48	25.3	3.2	0.6	1.3	1.9	5.0	17.3	5%	-0.02	-0.52	0.012	
172	parnans	820785	2017057	295	265	17	6.95	608	411	81	33.8	8.4	0.9	3.1	11.5	5.0	23.6	0%	0.02	-0.54	0.045	
983	parnans	822841	2016635	333	138	12.3	6.79	609	377	124	3.8	4.5	0.7	6.7	14.4	18.3		-2%	0.01	-1.7	0.060	
987	peyrins	815087	2014171	212	200	15.1	7.03	497	329	66	26.3	7.0	1.2	2.6	5.7	1.4		2%	-0.07	-0.73	0.030	
992	peyrins	811581	2012781	281	150	13.2	7.08	429	220	80	2.4	2.8	0.6	4.3	6.4	14.6		3%	-0.08	-1.9	0.018	
993	peyrins	813805	2016036	252	80	12.6	7.29	456	229	87	4.1	3.1	0.8	7.2	11.7	15.0		4%	0.17	-1.19	0.012	
997	peyrins	810433	2014301	224	110	13.3	7.09	393	231	70	3.3	2.5	0.7	3.1	3.3	17.8		-4%	-0.11	-1.74	0.019	
1002	peyrins	810726	2015671	237	110	11.8	7.28	353	174	64	2.5	2.5	0.7	6.0	8.9	15.3		1%	-0.07	-1.75	0.009	
1003	peyrins	812879	2014269	205	200	14.8	7.41	394	265	42	27.7	4.4	1.0	1.8				2%	0.04	-0.3	0.010	
1239	portes/valence	803450	1990406	167	100	13.7	6.94	607	292	126	2.3	7.1	0.3	18.1	33.6	54.8		1%	0.05	-1.84	0.033	
1007	ratieres	805770	2023496	255	70	13.3	6.98	534	293	98	18.3	3.6	1.0	9.3	23.3	26.9		5%	-0.01	-0.95	0.030	
1012	ratieres	807689	2022432	296	115	13.7	7.26	512	331	84	20.0	4.0	0.9	3.1	8.3	7.7		2%	0.26	-0.29	0.018	
159	romans/isere	811776	2011086	220	268	14	7.09	409	212	64	11.5	3.3	0.7	4.2	3.8	14.8		5%	-0.19	-1.32	0.017	
189	romans/isere	813248	2007392	160	121.5	16.1	6.9	670	334	106	24.3	4.4	0.9	20.3	19.8	71.6		1%	-0.01	-0.86	0.041	
1202	romans/isere	816177	2008357	169	56	15.8	6.73	799	412	126	10.1	6.7	1.6	12.5	24.5	38.2		-5%	-0.02	-1.33	0.075	
380	roybon	823815	2032762	445	80	12.9	7.1	385	232	82	2.0	2.5	0.5	3.3	3.2	3.9	13.7	4%	-0.03	-1.87	0.018	
248	st antoine	827489	2021369	295	120	12.2	6.88	512	266	97	4.6	3.3	0.8	8.6	13.0	21.8		1%	-0.14	-1.8	0.035	
1051	st avit	805086	2025586	243	180	13.1	6.82	698	312	113	9.2	7.1	0.9	16.7	14.6	49.1		0%	-0.08	-1.45	0.046	
1056	st bardoux	807960	2014011	250	150	14.5	6.86	571	336	103	11.2	5.1	0.8	5.7	4.8	21.6	18.1	1%	-0.04	-1.25	0.046	
1057	st bardoux	808140	2011220	260	156	14.2	6.88	513	282	104	5.3	5.2	0.7	5.6	4.7	25.9		5%	-0.09	-1.67	0.037	
144	st barthelemy de vals	800540	2020217	208	86	14.2	6.99	851	312	148	2.7	9.9	0.8	58.9	22.0	33.8		2%	0.19	-1.56	0.031	
1067	st barthelemy de vals	800871	2022847	191	70	13.7	7.01	494	240	93	2.6	3.0	0.6	6.4	7.7	38.5	16.7	1%	-0.07	-1.89	0.023	
1254	st barthelemy de vals	800096	2019088	260	120	13.8	6.77	480	276	90	6.1	6.2	0.8	4.4	6.8	19.0		2%	-0.26	-1.89	0.046	
275	st bonnet de valcrelieux	820142	2024508	505	118	11.7	6.97	356	184	66	1.3	3.8	0.7	5.4	2.9	4.4	13.7	4%	-0.34	-2.59	0.020	
1075	st christophe et le laris	815272	2027693	351	122	12.5	7	488	296	77	12.0	4.2	0.9	3.9	7.9	0.3		1%	-0.07	-1.14	0.029	

n°	commune	XL2é	YL2é	Z NGF	prof. Forage (m)	T (°C)	pH (μS/cm)	cond. 25°C	HCO3	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	NO3	silice	Balance	Is Calcite	Is Dolomite	pCO2 éq.
																					(atm)
161	st donat/herbasse	809601	2017450	212	126	15.2	7.24	431	274	49	27.7	5.9	1.1	2.2	3.0	1.4	20.6	4%	-0.06	-0.56	0.016
197	st donat/herbasse	806503	2015924	195	107	15.1	6.95	528	317	88	15.6	5.8	1.0	3.7	10.2	11.9	17.9	2%	-0.04	-1.04	0.035
1084	st donat/herbasse	807821	2019894	248	50	13.7	7.21	491	287	97	2.6	3.2	0.8	4.9	9.6	23.8		-2%	0.23	-1.31	0.018
253	st lattier	826439	2015226	200	100	14.6	7.37	450	269	38	27.7	13.7	2.0	3.3	6.2	12.6		0%	-0.04	-0.42	0.011
121	st martin d'aout	809260	2027971	321	205	12.9	6.99	1059	331	188	21.4	7.4	1.4	209.1	16.3	17.2		-2%	0.28	-0.58	0.032
195	st martin d'aout	806576	2026837	255	153	14.5	6.97	515	345	75	28.1	5.2	0.8	2.4	5.6	4.2		3%	-0.06	-0.74	0.036
1097	st martin d'aout	807507	2028602	333	162	12.1	6.92	622	316	113	8.4	4.0	0.8	10.0	14.8	30.1	16.2	2%	0.03	-1.28	0.037
1101	st michel/savasse	818263	2017728	298	70	12.1	6.84	638	311	118	3.6	3.3	0.8	16.5	18.7	33.0		-1%	-0.04	-1.79	0.044
1102	st michel/savasse	818523	2019406	346.5	160	14.6	6.96	557	357	94	14.5	7.2	1.2	4.9	17.6	3.6		-1%	0.04	-0.92	0.038
1251	st michel/savasse	818530	2019394	346	120	17.6	6.91	548	332	88	12.5	6.5	1.8	4.6	17.4	3.0		-2%	-0.06	-1.17	0.040
150	st paul les romans	820223	2011855	187	260	19.4	7.12	513	314	38	34.9	14.4	1.7	1.3	6.4	1.1	26.8	1%	-0.23	-0.7	0.024
1321	st paul les romans	818940	2008970	176	60	16.5	6.98	595	294	107	12.3	8.5	0.8	12.2	45.6	34.9		1%	0.03	-1.08	0.030
1113	st rambert d'albon	803056	2031044	256	40	13.1	6.91	737	311	144	2.2	8.8	0.7	22.5	28.8	48.6		4%	0.1	-1.8	0.037
1132	st uze	799253	2024155	226	92	14.3	6.83	710	334	133	7.3	7.6	0.6	38.2	29.6	55.3		-3%	0.01	-1.43	0.048
334	tersanne	808267	2026930	275.15	245	15.1	7.28	430	239	47	22.7	5.5	1.0	2.7	4.8	1.3		4%	-0.08	-0.68	0.013
169	triors	818511	2015968	290	260	15.5	7.58	428	306	60	19.6	6.3	0.9	3.2	5.1	3.7		-4%	0.42	0.16	0.008
353	upie	808769	1982888	180	80	15.9	7.05	627	394	104	22.5	8.8	0.9	4.3	6.6	12.1	18.5	4%	0.21	-0.45	0.034
356	upie	809606	1981575	225	80	15	6.93	490	351	121	2.4	3.7	0.7	4.7	11.4	7.6		1%	0.11	-1.68	0.041
357	upie	808266	1981373	205	70	26.3	7.09	492	298	93	4.4	4.3	0.6	6.3	14.3	23.2		-5%	0.1	-1.32	0.024
588	upie	806724	1978609	186	100	30.4	6.91	664	389	144	5.0	2.7	0.6	7.3	18.1	2.5		5%	0.2	-1.26	0.047
1133	upie	810285	1982408	207	35	16.7	7.55	663	355	131	11.2	5.4	1.3	13.6	27.8	81.8	11.7	-2%	0.75	0.24	0.010
1228	upie	808769	1979103	260	45	15.9	6.9	589	325	143	1.1	7.5	0.5	9.4	56.3	19.9		3%	0.11	-2.09	0.040
240	vaunaveys la rochette	812913	1978479	262	180	14.7	7.08	743	438	111	47.5	12.1	3.5	12.7	20.6	64.9		5%	0.28	0	0.035
1227	vaunaveys la rochette	812497	1978778	265	110	21.1	7.04	759	392	145	23.8	8.4	1.3	22.7	25.4	79.7		4%	0.31	-0.36	0.035

Annexe V.2 RESULTATS DES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DES PUITS ET DES SOURCES

n°	commune	nom de la source/lieu-dit	date	X L2é	Y L2é	Z NGF	T	pH	cond. 25°C	HCO3	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	NO3	silice	Balance	Is Calcite	Is Dolomite	pCO2 éq.
				(m)			(°C)		(µS/cm)												(atm)	
P91	albon	creux de la thine	09/09/2004	795408	2031852	153	15.6	6.81	774	369	138	7.6	13.1	1.9	18.7	15.6	45.2		3%	0.05	-1.35	0.056
P13	aixan	barre	19/07/2004	813440	2002990	184	16	7.11	472	218	92	2.0	5.3	1.5	24.3	13.4	6.3		4%	-0.01	-1.88	0.017
P60	aixan	coulet	20/08/2004	809945	2000810	170	18.5	6.91	694	320	141	5.4	4.4	1.2	14.0	32.6	59.3		3%	0.1	-1.41	0.038
P62	aixan	grande grange	23/08/2004	811099	2003873	178	13.6	6.77	656	306	129	6.9	4.7	0.7	13.7	32.1	41.7		3%	-0.09	-1.65	0.051
P61	aixan	les blancs	20/08/2004	810998	2001495	174	20.6	6.92	682	320	143	7.1	4.5	0.9	13.9	30.8	64.3		4%	0.12	-1.27	0.037
P63	aixan	les levées	23/08/2004	811586	2002936	176	13.3	6.96	682	324	130	8.4	4.2	1.0	13.4	26.6	45.8		3%	0.13	-1.14	0.035
P87	allex	chassoulier	07/09/2004	804408	1975908	140	13.7	7.15	577	271	102	9.3	5.3	1.4	7.4	34.1	17.2		4%	0.15	-0.94	0.019
P88	allex	les gots	07/09/2004	806971	1976413	152	14.6	6.7	848	456	165	13.1	6.6	2.6	18.4	50.9	36.8	13.7	0%	0.09	-1.12	0.088
P94	anneyron	jomard les clavettes d'anneyron	09/09/2004	801410	2036590	191	12.7	6.79	621	351	124	2.2	6.2	1.0	17.5	14.5	41.0		-4%	-0.02	-2	0.056
P93	anneyron	les blains	09/09/2004	798460	2035850	175	15.7	6.8	627	287	125	4.1	6.7	1.1	18.3	16.3	45.2		5%	-0.09	-1.87	0.045
P95	anneyron	les blains	09/09/2004	801190	2033000	210	17.9	6.79	580	290	102	11.3	7.8	0.9	14.5	11.5	22.6		5%	-0.18	-1.52	0.046
S08	barbieres	palletou	26/04/2004	824820	1996680	800	8.3	7.38	522	309	88	12.6	1.8	2.0	1.2	26.1	1.3		1%	0.38	-0.29	0.013
S05	beaumont/valence	beaumont fontaines	16/03/2004	805060	1988460	132	15.4	7.04	575	300	104	5.5	5.5	2.1	9.5	23.9	30.6		-2%	0.09	-1.29	0.027
P70	beaumont/valence	les 3 buches	25/08/2004	805800	1992000	142	15.9	6.66	635	301	124	6.1	5.8	0.8	13.5	30.8	38.1		3%	-0.22	-1.95	0.064
P73	beaumont/valence	les chirouzes	27/08/2004	806707	1989378	141	14.5	6.96	556	265	102	6.4	4.0	1.2	9.6	21.9	25.1		3%	-0.05	-1.49	0.029
P50	monteux beaumont-	les gours	05/08/2004	801996	2004314	121	13.7	7	625	270	124	7.6	8.5	1.1	14.2	81.0	16.1		3%	0.06	-1.28	0.026
P44	monteux beaumont-	champouroux	04/08/2004	805169	2008476	147	14.4	7.06	594	310	118	7.9	5.2	1.2	9.5	22.2	20.3		5%	0.17	-1.02	0.026
P43	monteux beaumont-	les clairemonts	04/08/2004	805180	2007753	135	12.7	7.11	507	280	92	8.3	5.3	1.4	9.2	14.7	13.0	12.7	1%	0.09	-1.07	0.021
S31	monteux beaumont-	source barrage edf	30/08/2004	805284	2005477	119	13.6	7.1	491	149	84	8.4	9.7	1.1	12.7	101.8	2.2		4%	-0.24	-1.67	0.012
P45	monteux beaumont-	grand champ	04/08/2004	803645	2007000	139	12.8	7.2	499	183	91	8.5	8.6	1.0	11.7	87.2	11.2		3%	-0.02	-1.26	0.011
P47	monteux	glézolles	05/08/2004	802278	2006433	136	13.9	7.01	544	256	105	9.3	7.0	1.2	11.6	47.9	12.0		5%	-0.01	-1.26	0.025
P23	beauregard-baret	les matras	21/07/2004	820811	2008006	215	13.3	7.26	672	321	137	4.9	2.4	0.4	13.7	24.4	42.5		4%	0.45	-0.75	0.017
P17	besayes	les massetides	19/07/2004	817861	1999470	300	13.3	7.08	713	355	155	3.7	3.3	0.9	16.7	24.8	83.2	10.4	0%	0.35	-1.12	0.029
P02	bourg/péage	tépier	13/07/2004	814782	2004924	191	14.4	6.95	763	355	167	4.0	5.8	1.4	19.2	31.0	75.3		4%	0.25	-1.32	0.039
P01	bourg/péage	les plantas	13/07/2004	812635	2004825	181	14.5	6.95	720	338	131	4.9	16.0	4.6	20.9	24.7	60.1	12	1%	0.14	-1.36	0.037
P55	bourg/valence	muscat	19/08/2004	803836	1999864	175	15.1	6.84	583	243	116	4.2	6.2	0.5	17.1	30.8	40.6		5%	-0.16	-1.95	0.035
685	chabeuil	LES VIGUIERES;	2003	810831	1995043	194	13	7.17	514	321	118	3.2	2.3	0.8	5.1	9.3	34.2		1%	0.31	-1.16	0.021
S22	chabeuil	source les places	23/08/2004	808766	1995243	167	15.9	6.93	675	305	137	3.5	4.8	1.6	8.7	26.6	78.8		2%	0.09	-1.6	0.035
P71	chabeuil	brocart	25/08/2004	810814	1991809	189	15.2	6.75	549	287	105	5.0	4.5	2.6	6.5	17.8	23.5	9	2%	-0.21	-1.94	0.050

n°	commune	nom de la source/lieu-dit	date	X L2é	Y L2é	Z NGF	T	pH	cond. 25°C	HCO3	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	NO3	silice	Balance	Is Calcite	Is Dolomite	pCO2 éq.
				(m)			(°C)		(µS/cm)											(atm)		
P90	chabriillan	chastaing	07/09/2004	808238	1973036	176	17	6.89	762	350	146	9.8	4.5	1.0	35.3	36.9	58.2		1%	0.13	-1.12	0.044
P46	chanos	rostaing	05/08/2004	802427	2008700	150	14	6.85	696	321	125	10.0	8.8	2.6	17.0	36.7	31.2		3%	-0.01	-1.31	0.044
S25	charpey	source rosette	26/08/2004	818221	1995288	330	14.9	6.95	681	354	122	3.2	5.9	1.7	12.2	22.3	42.7		-5%	0.13	-1.51	0.039
P72	charpey	les virolles	26/08/2004	815961	1997491	256	12.6	6.9	507	268	97	6.1	1.7	1.2	4.0	19.7	14.1		3%	-0.12	-1.64	0.033
S27	chateaudouble	source la tube	26/08/2004	815857	1993226	284.5	14.7	6.69	717	350	128	5.1	3.7	1.3	10.1	20.4	39.7		1%	-0.11	-1.82	0.070
S09	chateaudouble	roussillon	26/04/2004	819390	1991050	520	9.7	7.35	517	315	100	7.0	1.4	0.8		22.0	0.3		0%	0.41	-0.53	0.014
S19	chateauneuf/isère	cote de beauregard	06/08/2004	812030	2006540	140	13.3	7.01	676	323	135	5.1	6.2	0.8	15.5	30.5	59.4		1%	0.19	-1.24	0.031
P07	chateauneuf/isère	chambaud	15/07/2004	807559	2002415	185	13.8	7.17	906	221	166	4.6	11.5	0.7	83.0	50.8	165.3		-3%	0.25	-1.25	0.014
P05	chateauneuf/isère	giraud	15/07/2004	808265	2004962	177	14.1	6.82	811	305	164	4.7	6.0	0.6	22.4	61.9	87.6		3%	0.04	-1.66	0.045
P04	chateauneuf/isère	bonlieu	15/07/2004	810514	2006123	180	16.8	6.99	660	318	127	4.9	8.1	1.3	8.2	18.7	36.8		5%	0.14	-1.32	0.032
P03	chateauneuf/isère	bois raymond	15/07/2004	812071	2005505	178	16.7	6.99	656	288	120	5.8	6.1	0.8	15.0	30.5	52.7	14.4	1%	0.08	-1.36	0.029
P06	chateauneuf/isère	les corneries	15/07/2004	807381	2006288	152	14.4	6.87	991	374	136	16.3	11.4	76.8	18.6	68.8	128.8	17.4	2%	0.09	-0.94	0.049
P52	chateauneuf-isère	chambons	19/08/2004	802984	2004012	118	19.3	6.99	711	309	141	6.5	7.5	1.0	21.7	46.1	55.5		3%	0.16	-1.21	0.031
P53	chateauneuf-isère	grange neuve	19/08/2004	801286	2001249	132	14.3	6.8	719	299	144	7.2	10.1	1.4	18.2	74.5	31.9		5%	-0.04	-1.57	0.046
P54	chateauneuf-isère	aubenas	19/08/2004	799750	2001327	127	16	6.7	861	372	166	9.3	17.0	4.5	23.5	100.0	40.9	12.4	2%	0	-1.44	0.071
P51	chateauneuf-isère	la tuillière	19/08/2004	800855	2002430	116	14.5	6.82	759	335	145	13.6	10.7	2.1	19.0	92.4	21.9		3%	0.03	-1.17	0.049
P16	chatuzange	le portail	19/07/2004	817240	2001860	246	13.4	7.48	760	320	164	1.2	2.6	0.8	23.9	29.1	94.3	15.8	2%	0.73	-0.88	0.010
P15	chatuzange	la part-dieu	19/07/2004	818650	2003515	253	16.5	6.92	788	350	138	1.3	20.6	2.0	20.7	35.1	51.6	16.1	0%	0.14	-1.95	0.041
S15	chatuzange	bassin	19/07/2004	818715	2003650	270	16.4	6.85	675	340	134	1.7	3.8	0.2	5.2	26.7	25.5		2%	0.06	-1.98	0.047
S17	chatuzange		21/07/2004	817630	2007595	160	14.1	6.92	688	254	114	3.1	4.9	1.0	14.3	21.2	60.0		2%	-0.06	-1.89	0.030
P25	chatuzange	canard	21/07/2004	817540	2007540	167	14.8	7.04	688	331	144	3.9	4.5	0.8	12.2	23.3	50.6		4%	0.26	-1.25	0.029
P24	chatuzange	peruzat	21/07/2004	818860	2005780	230	14	7.01	704	378	148	4.0	4.6	2.1	12.1	27.7	45.2	10.8	1%	0.29	-1.19	0.036
P21	chatuzange	la sizeranne	21/07/2004	820025	2004345	275	15.8	7.07	705	344	138	4.7	3.3	0.8	8.5	13.8	39.3		4%	0.29	-1.09	0.029
P14	chatuzange	millard	19/07/2004	815780	2002900	220	13.2	7.31	674	285	86	9.1	22.0	35.3	15.2	29.3	50.6		3%	0.25	-0.67	0.014
P41	clerieux	les saviaux	04/08/2004	806134	2011602	155	13.3	6.82	631	360	121	12.8	6.3	1.1	11.9	18.2	11.0		4%	0	-1.17	0.053
S11	combovin	les thourees	27/04/2004	817960	1987360	540	10.4	7.21	445	289	92	1.5	1.3	0.4	3.5	5.2	5.7		-2%	0.21	-1.57	0.018
P12	ecancieres	les blanchères	16/07/2004	823446	2010134	197	14	7.36	696	376	149	7.5	5.5	1.2	10.5	20.4	50.7		4%	0.64	-0.21	0.016
1230	etoile/rhone	les chabertes	2003	804461	1983018	163	18.7	6.85	895	361	188	3.7	7.5	0.6	38.8	102.6	71.5		-1%	0.19	-1.53	0.049
P80	etoile/rhone	suze	06/09/2004	801639	1984644	114	17.2	6.67	741	351	146	4.3	8.8	11.2	21.3	45.5	31.2		3%	-0.09	-1.91	0.073
P81	etoile/rhone	chabaud	06/09/2004	798436	1983363	97	15.6	6.73	749	307	137	7.8	11.0	1.7	20.9	52.9	50.2		3%	-0.11	-1.67	0.056
P08	eymeux	le prieuré	16/07/2004	824662	2012727	192	13.1	7.03	652	290	127	6.0	3.1	0.5	8.4	31.7	90.4	11.5	-1%	0.14	-1.25	0.026
P30	genissieux	les depits	02/08/2004	816599	2011864	177.5	16.7	6.93	630	383	112	15.2	6.0	1.7	8.1	17.5	22.9	17.7	1%	0.11	-0.85	0.044
P89	grane	gauthier	07/09/2004	805160	1974959	143	22.1	7.24	359	179	60	6.7	5.4	1.4	6.4	22.8	2.4	6.4	2%	-0.14	-1.42	0.010

n°	commune	nom de la source/lieu-dit	date	X L2é	Y L2é	Z NGF	T	pH	cond. 25°C	HCO3	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	NO3	silice	Balance	Is Calcite	Is Dolomite	pCO2 éq.
				(m)			(°C)		(µS/cm)													(atm)
P39	granges/beaumon t	les blaches de l'isere	04/08/2004	807190	2008190	135	14.8	6.87	593	317	114	8.5	7.4	2.4	9.9	20.1	28.1		3%	-0.02	-1.37	0.042
P40	granges/beaumon t	pont de l'herbasse	04/08/2004	806398	2009370	151	14.3	7.07	552	271	99	8.6	5.2	1.2	10.1	19.9	17.9		4%	0.06	-1.13	0.023
P42	granges/beaumon t		04/08/2004	806874	2008782	151	14.3	6.95	591	324	112	11.9	5.4	1.2	8.8	13.0	23.4		5%	0.06	-1.05	0.036
P34	granges/beaumon t	champouillon	03/08/2004	809472	2008458	155	15	7	603	383	109	13.8	8.8	1.8	9.8	19.0	28.4		-3%	0.16	-0.77	0.037
P37	granges/beaumon t	baney	04/08/2004	808849	2009335	156	15.6	7.12	622	339	111	14.7	7.6	1.3	11.2	16.5	25.7		4%	0.24	-0.59	0.025
S06	hostun	sika st martin	06/04/2004	826330	2007820	300	11.5	7.18	544	346	119	0.4	0.7	1.2	1.5	5.8	1.0		2%	0.36	-1.92	0.023
P10	hostun	les perrets	16/07/2004	826315	2009531	213	12.9	6.91	599	362	121	4.1	2.9	1.0	5.1	14.8	19.2	10.8	-1%	0.1	-1.46	0.044
P11	hostun	les combes	16/07/2004	825175	2006277	293	12.9	7.49	646	347	130	4.8	3.4	1.4	7.7	15.8	19.4		4%	0.69	-0.25	0.011
S12	la baume cornillane	mélange	27/04/2004	814130	1984130		10.4	7.34	490	305	88	8.1	1.6	0.8	2.1	22.9	0.8		-4%	0.34	-0.56	0.014
S07	la baume d'hostun	le château	15/04/2004	827850	2009850	295	10.6	7.15	528	298	109	0.6	0.7	1.2	1.7	7.0	1.1		4%	0.23	-2.04	0.021
P09	la baume d'hostun	gervans	16/07/2004	826504	2011301	200	12.7	6.99	590	309	121	4.2	3.1	0.7	7.2	10.4	26.2		5%	0.12	-1.42	0.031
P83	livron	les roussons	06/09/2004	801981	1980729	155	16.1	6.74	612	351	133	3.2	2.7	0.4	6.1	27.5	10.5		3%	-0.04	-1.9	0.062
S33	livron	source Mas	07/09/2004	800400	1978170	170	14.8	7.01	602	288	115	3.4	7.0	6.9	12.2	40.3	24.4		1%	0.08	-1.57	0.028
P82	livron	chambaude	06/09/2004	799631	1979955	101	20.1	6.88	708	285	120	4.3	5.5	7.1	14.5	38.7	64.8	14.5	-1%	-0.04	-1.72	0.037
S32	livron	source du lavoir	07/09/2004	798806	1977896	130	15.8	7.66	756	308	125	6.0	18.0	23.0	25.0	52.0	31.7		5%	0.78	0.05	0.007
P85	livron	gravette	07/09/2004	796984	1977832	107	16.3	6.97	516	262	92	8.4	5.6	1.5	9.5	29.0	7.4	7.5	2%	-0.08	-1.4	0.028
P84	livron	la grande grange	07/09/2004	795390	1979870	95	17.9	6.7	636	342	121	9.0	9.3	1.7	12.6	40.7	11.7	9.9	2%	-0.14	-1.61	0.067
P86	livron	champy	07/09/2004	801055	1976701	127	21.8	6.84	686	308	118	10.3	16.0	4.3	25.2	38.5	20.2		5%	-0.06	-1.37	0.043
S28	malissard	source brot source fond chambonne	25/08/2004	807869	1991049	151	18.1	6.66	600	297	125	2.1	5.4	0.4	14.1	14.4	37.6		4%	-0.22	-2.42	0.064
S30	malissard	manthes	25/08/2004	809071	1992138	167	14.8	6.9	590	318	133	4.1	3.7	1.1	8.7	38.1	25.6		4%	0.07	-1.57	0.039
S34	manthes	source de manthes	09/09/2004	809480	2037238	231	12.4	6.85	591	350	120	2.3	6.0	1.2	15.5	13.0	34.5		-4%	0.02	-1.86	0.049
477	manthes	ile	2003	809744	2038364	239	13.2	6.8	607	304	130	2.5	4.9	0.8	17.8	12.6	42.8		4%	-0.05	-2.03	0.047
S16	manches	la bergère	20/07/2004	819810	2001290	319	12.9	6.95	650	289	125	2.7	3.0	1.2	9.6	18.5	42.3		4%	0.06	-1.74	0.032
906	manches	;Les Beaurents	2003	819266	2002728	276	13.2	6.6	709	353	146	4.0	3.0	1.2	7.4	18.3	43.7	10.2	5%	-0.15	-2.05	0.086
P49	mercurol	betton	05/08/2004	799480	2008630	126	28.7	7.31	478	287	71	17.8	5.2	1.1	3.5	5.1	11.9	19.2	1%	0.19	-0.42	0.014
429	montelegier	quartier les Blaches	2003	804006	1986611	135	14.3	6.86	597	349	116	6.9	4.8	0.9	7.4	13.1	30.0		1%	0.02	-1.39	0.047
S26	montelier	source bourbourée	26/08/2004	814225	1994890	256	13.1	6.83	556	301	139	3.2	5.6	1.9	11.1	25.1	79.4		3%	-0.01	-1.85	0.043
P65	montelier	pontignat	23/08/2004	810620	1995949	186	15.9	6.84	623	285	134	3.4	3.4	0.6	11.0	29.9	52.7		5%	-0.03	-1.85	0.040
S23	montelier	source langoiron	26/08/2004	813378	1997059	224	14.2	6.8	715	312	124	3.5	5.6	1.4	10.2	29.3	19.4		3%	-0.06	-1.87	0.048
S24	montelier	source les bernardins	26/08/2004	813225	1998036	204.5	13	6.93	617	303	100	4.7	4.1	1.5	8.2	22.3	12.2		-2%	-0.02	-1.57	0.035
S20	montelier	source chenevelle	20/08/2004	809764	1999462	171	19.2	6.68	688	342	131	5.1	4.6	0.8	8.5	16.3	27.5		4%	-0.12	-1.86	0.070

n°	commune	nom de la source/lieu-dit	date	X L2é	Y L2é	Z NGF	T	pH	cond. 25°C	HCO3	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	NO3	silice	Balance	Is Calcite	Is Dolomite	pCO2 éq.
				(m)	(°C)	(µS/cm)														(atm)		
P64	montelier	bel ebat	23/08/2004	811062	1998842	178	18.1	6.79	749	370	153	5.1	4.1	1.4	13.3	33.3	39.6		3%	0.07	-1.52	0.058
P59	montelier	le cognet	20/08/2004	808300	1998711	163.5	13.4	6.86	676	308	139	5.9	4.1	1.2	13.8	35.7	51.0		4%	0.03	-1.51	0.041
S21	montelier	source manuel	23/08/2004	810999	1997075	179	16.3	7.28	576	296	110	7.2	5.3	2.1	11.6	16.7	34.8		2%	0.35	-0.69	0.015
P74	montmeyran	le bois gros	27/08/2004	809912	1986521	177	16.6	7.23	643	258	128	3.4	6.5	1.0	12.5	27.8	104.0	11.2	1%	0.3	-1.18	0.015
P75	montvendre	ferme astier source pepinière roux	27/08/2004	810945	1989040	182	18.1	6.6	847	334	175	2.9	5.8	0.5	18.8	46.9	122.1	12.6	2%	-0.11	-2.21	0.081
S29	montvendre		25/08/2004	808520	1989890	154	16.3	7.15	497	271	108	3.2	3.0	2.0	6.6	14.5	23.0		5%	0.18	-1.36	0.019
S13	ourches	mélange	27/04/2004	814130	1984130		10.6	7.34	492	288	80	13.2	3.2	1.4	2.3	26.5	0.2		1%	0.27	-0.44	0.013
S01	peyrins		12/03/2004	812140	2014060	197	10.1	7.54	450	246	84	2.0	3.4	0.8	6.7	10.0	22.4		-3%	0.44	-0.95	0.007
S10	peyrus	les tuffs	27/04/2004	821660	1992440	630	10.3	7.51	400	257	80	2.2	0.7	0.3	1.5	4.8			-1%	0.41	-0.93	0.008
P48	pont d'isere	guémard	05/08/2004	800730	2007100	144	15.5	6.84	648	320	125	8.4	6.1	1.3	11.5	32.5	25.4		4%	-0.01	-1.4	0.045
P78	portes/valence	la station	06/09/2004	800175	1990220	111	15.6	7.05	625	286	119	4.9	14.1	1.3	22.1	31.0	20.0		5%	0.13	-1.31	0.025
P79	portes/valence	les gaulets	06/09/2004	801261	1987974	117	15.1	6.9	766	299	130	8.0	12.0	2.8	29.9	49.0	58.2	13.2	0%	0.03	-1.36	0.037
P77	portes/valence	margerie	06/09/2004	801899	1990117	135	15	6.87	881	348	156	11.9	10.5	3.7	28.3	76.2	73.1	16.7	0%	0.12	-1.07	0.045
P22	rochefort-samson	les rives	21/07/2004	821418	2004750	293	14.3	7.26	520	309	102	0.6	4.6	0.8	1.6	11.5	6.6	11	-1%	0.33	-1.79	0.017
P19	rochefort-samson	les bois	20/07/2004	821120	2000770	365	14.8	6.75	589	323	120	2.4	4.0	1.4	9.9	19.8	18.6	17.1	1%	-0.11	-2.11	0.056
P20	rochefort-samson	les terrets	21/07/2004	822500	2002340	356	15.2	6.94	763	477	167	2.9	3.2	0.6	15.2	16.2	31.1	11.7	-2%	0.37	-1.23	0.053
P32	romans/isere	le maupas	03/08/2004	812337	2011359	173	26	6.84	538	321	101	10.5	5.0	0.6	11.9	13.6		14.6	2%	-0.09	-1.36	0.046
P36	romans/isere	meilleux	03/08/2004	811738	2008460	161	16.2	6.98	589	320	104	13.9	10.0	1.6	9.6	17.3	24.2		4%	0.05	-0.96	0.033
P35	romans/isere	preles	03/08/2004	812096	2010029	168	15.1	7.44	587	371	110	15.9	7.4	1.4	9.1	13.3	11.7		3%	0.6	0.16	0.013
P33	romans/isere		03/08/2004	810580	2009540	159	15	6.91	610	377	113	16.1	7.7	1.4	10.5	14.9	16.9	15.6	2%	0.08	-0.88	0.045
S03	st barthelemy/vals	grand marais	12/03/2004	802350	1993590	188	8.3	7.58	650	314	125	1.8	3.7	1.2	11.4	16.1	40.3		1%	0.72	-0.59	0.008
P26	st lattier	patet	30/07/2004	822360	2012240	185	14.7	6.93	643	349	133	5.6	9.1	1.9	10.0	22.3	43.3		3%	0.14	-1.29	0.040
P58	st marcel/valence	gros eynard	20/08/2004	808862	2000298	167.41	15.6	6.88	642	305	123	6.3	4.6	1.3	14.8	35.6	49.2	12.3	1%	0	-1.49	0.039
P56	st marcel/valence	le chantre	20/08/2004	804570	1998395	151	14.4	6.88	667	287	121	8.4	7.1	1.1	15.5	35.6	42.6		4%	-0.03	-1.43	0.037
P27	st paul/romans	patas	30/07/2004	821742	2010998	182	16.1	6.77	714	378	138	10.4	7.9	1.3	13.7	29.6	42.9	18.4	2%	0.02	-1.28	0.062
S18	st paul/romans	source port d'ouvey	30/07/2004	822440	2009990	160	15.6	7.25	725	321	139	10.5	8.9	1.5	13.2	35.5	69.9		4%	0.43	-0.46	0.018
P28	st paul/romans	les gontiers	30/07/2004	819345	2010885	183	14.9	6.56	949	463	168	10.6	12.2	26.9	10.7	29.8	98.9	19.5	2%	-0.04	-1.48	0.123
P92	st rambert d'albon		09/09/2004	795283	2035360	159	13.5	6.77	629	273	120	3.4	6.4	1.1	18.3	16.3	45.1		4%	-0.16	-2.07	0.046
P97	st sorlin	grand champ	09/09/2004	805920	2036920	215	18.3	6.91	625	287	127	3.2	5.8	1.0	19.1	14.5	46.8		4%	0.02	-1.76	0.035
P96	st sorlin st vincent la commanderie	les simards	09/09/2004	804619	2034175	238	14.6	6.96	537	282	103	5.1	6.3	0.9	10.0	11.5	16.9		4%	-0.01	-1.53	0.031
S14	st sorlin st vincent la commanderie	la garde	28/04/2007	820460	1997790	410	10.6	7.08	519	311	104	2.1	0.8	0.4	1.8	10.9	1.6		0%	0.16	-1.57	0.026
P29	triors	lamuron	02/08/2004	818570	2013170	189				287	73	18.0	5.6	1.5	8.5	17.9	18.0	18.4	-2%			

n°	commune	nom de la source/lieu-dit	date	X L2é	Y L2é	Z NGF	T	pH	cond. 25°C	HCO3	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	NO3	silice	Balance	Is Calcite	Is Dolomite	pCO2 éq.
				(m)	(°C)	(µS/cm)				(mg/l)										(atm)		
P68	valence	la foret	25/08/2004	805159	1993555	149	18.3	6.71	614	276	109	4.4	5.4	1.5	6.8	20.9	27.7		4%	-0.25	-2.09	0.053
P66	valence	fontbarlette	23/08/2004	805020	1995719	153	13.8	6.91	655	293	130	6.7	4.4	0.9	13.4	30.6	48.0		5%	0.03	-1.41	0.035
P76	valence	le gibet	06/09/2004	801318	1992327	120	15.9	6.79	672	299	125	7.7	8.8	1.6	16.4	37.1	45.3		3%	-0.09	-1.6	0.047
P57	valence	vergnon marinet centre recherche	20/08/2004	805341	1997545	158	14.7	6.89	660	321	131	7.8	5.6	1.3	14.7	35.5	46.5	13.7	2%	0.05	-1.31	0.040
P69	valence		25/08/2004	803592	1992957	145	21.7	6.55	615	312	119	7.9	7.4	1.6	13.4	25.3	42.1	11.9	2%	-0.33	-2.04	0.086
S04	valence	malcontent	16/03/2004	802350	1993590	122	11.7	6.84	750	296	138	8.0	7.7	1.6	22.4	53.8	62.8		2%	-0.01	-1.46	0.042
S02	veaune	les marais	12/03/2004	803516	2015801	196	13.3	7.05	486	224	87	3.9	3.5	1.4	6.2	12.8	34.3		2%	-0.08	-1.71	0.020

Annexe V.3 RESULTATS DES ANALYSES D'EAUX CORRESPONDANT A LA DATATION DES EAUX

n°	nom commune	propriétaire	date	X L2é	Y L2é	Z NGF	prof. Forage	eau/sol	position crête/sol	A ¹⁴ C (PCM)	δ ¹³ C (‰ vs PDB)	T°C (°C)	pH	cond. 25°C (µS/cm)	HCO3	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	NO3	silice	DOC
116	albon	?	01/11/1979	799880	2029878	190	151	-1	139	22.3	-8.75	17.2	7.5		300	47.5	22.6	23.6	1.40	4.00			23.40	
117	albon	SIVAG	27/07/2004	799869	2029870	189	143	2,72	32-140	34.6	-8.40	17.2	7.4	402	255	43.94	23.69	7.56	1.50	2.68	3.09	3.02	18.30	0.83
226	alixan	SIEPV	01/02/2005	807579	1998955	162	185	22,58	75-185	49.6	-9.78	14.6	7.51	532	300	59.56	28.00	11.00	1.03	5.44	10.35	10.36	19.66	
226	alixan	SIEPV	01/02/1995	807579	1998955	162	185	22,58	75-185	39.2	-7.85	15	7.55	520	338	73	23	8	4.90	8.70	4.20	19.10		
405	barbieres	SIE Barbieres besayes	15/06/2004	820534	1998826	395	105	29	42-100	99.3	-13.37	12.8	7.32	516	290	99.34	5.4	2.41	1.41	3.54	17.85	15.73	13.50	1.10
370	beaumont/valence	Chapuis	30/06/2004	805254	1987872	135	114	5	60-110	20.3	-7.41	16.2	7.41	494	303	45.73	30.65	13.27	0.76	2.63	5.58	0.12	23.60	0.81
383	bessins	commune	16/06/2004	830762	2026276	410	182,42	45,9	120-182,42	68.4	-13.31	13.6	7.29	576	351	93.34	13.74	6.23	1.12	3.87	18.99	0.97	27.20	1.16
178	bourg/peage	SIE rochefort-samson	15/06/2004	815745	2006236	192	314	30,06	124-160; 173.3-302.3	43.2	-10.52	18.1	7.5	563	376	56.98	42.7	6.28	0.85	1.56	2.70	2.04	22.50	1.12
227	chabeuil	commune	02/02/2005	808351	1994060	165	228	22	136-220	28.3	-6.49	17.6	7.62	452	269	45.34	27.00	6.43	0.50	1.67	9.33		22.37	
688	chabeuil	particulier	17/06/2004	809005	1991062	161	130	1,4	60-130	62.0	-9.11	14.9	7.53	422	267	75.52	9.11	4.45	5.00	3.01	8.01	9.29	19.00	0.99
1243	chabeuil	particulier	17/06/2004	813707	1991767	295	212	65	146-176; 181-217; 217-	71.6	-11.86	14.4	7.46	455	293	82.13	10.07	3.92	0.91	1.78	6.18	0.92	20.80	0.90
1338	chabeuil	valence	01/02/1995	808330	1994075	166	252	9,5		18.5	-4.95	19	7.95	460	316	37	36.8	12.4	1.20	1.30	6.00		31.60	
280	chabriillan	particulier	30/06/2004	807374	1972467	176	108	1,36	35-75	31.1	-9.70	15.8	7.11	742	418	77	32	40.99	4.00	6.29	45.38	8.09	23.30	1.09
132	charmes/herbasse	SIE herbasse	03/06/2004	812667	2021135	265	132		41.8-161.8	45.0	-9.89	14.6	7.68	455	312	64.29	24.36	6.6	1.80	1.92	5.12	1.42	21.40	
135	charmes/herbasse	ASA charmes batherney	01/12/1979	810056	2022181	272	250	9,71	49.39-249.39	78.9	-10.65	13.2	7.72		270	92.5	3.7	3	0.40	5.00	7.00	3.90	18.30	
291	charpey	SIE plaine de valence	15/06/2004	815655	1997192	248	150	4,05	40-60; 60-150	85.8	-12.38	13.1	7.35	497	289	92.26	5.94	2.84	1.38	4.54	10.50	17.65	16.30	1.14
736	chateauneuf de galaure	particulier	25/06/2004	804996	2027576	235	48	4	12-30;36-48	26.3	-6.67	15.3	7.87	338	208	37	19	5.75	0.71	2.03	3.43	0.42	17.30	0.66
268	chateauneuf/isere	SIE plaine de valence	15/06/2004	806145	2004180	245	198	101,85	148-197	64.5	-12.10	14.6	7.41	520	274	93.1	9.61	5.85	0.84	9.69	13.07	33.95	17.70	0.99
315	chatillon st jean	SIE herbasse	02/06/2004	820548	2014656	209	247	-2	56-226.14	38.3	-11.10	19.0	7.48	542	335	53.22	34	9.75	0.88	1.90	6.19	1.68	25.80	

ANNEXES

n°	nom commune	propriétaire	date	X L2é	Y L2é	Z NGF	prof. Forage (m)	eau/sol	position crépine/sol	A ¹⁴ C	δ ¹³ C	T°C	pH	cond. 25°C	HCO3	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	NO3	silice	DOC	
										(PCM)	(‰ vs PDB)	(°C)	(µS/cm)										(mg/l)		
176	chatuzange le goubet	SIE rochefort-samson ancienement SIE Valloire	15/06/2004	818134	2004469	260	275	70	258	96.93-114.7; 127.05-	85.8	-13.48	16.0	7	561	334	105.07	9.26	3.53	0.66	7.24	7.61	24.09	16.20	0.89
399	claveyson		01/11/1979	802791	2023281	204	150.1	0,5	29-150		76.6	-12.45	13	7.1		310	88	11.3	6.8	1.40	5.00	6.00		20.30	
778	clerieux	particulier	03/06/2004	805249	2011902	185	60	13	25-60		91.6	-13.83	14.0	7.01	671	299	120.06	8.51	5.41	5.00	17.97	32.50	74.57	14.50	
783	crepol	particulier	03/06/2004	817054	2025009	343	50	15			58.5	-12.41	12.9	7.23	457	275	82.64	9.29	3.8	5.00	4.89	13.50	3.61	16.70	
793	crest	particulier	30/06/2004	811567	1974662	197	150	-1	55-150		47.6	-9.71	15.2	7.34	532	328	62.14	31.33	5.66	0.84	4.45	11.16		19.60	1.16
1291	etoile/rhone	particulier	22/07/2004	804071	1984534	153	111	2	13-41; 47-70 88.5-118.5; 124.5-244.5		83.6	-12.97	14.8	7.22	618	327	115.72	6.33	4.85	0.86	10.24	16.14	27.10	16.60	0.88
123	hauterives	Chloralp	16/06/2004	812130	2031696	346	253	55,71			52.3	-8.75	12.7	7.79	518	162	71.58	11	6.97	1.98	79.98	3.12	1.93	13.50	1.08
297	hauterives	SIVAG	16/06/2004	809050	2031047	285	141	9,66	45-140		92.4	-13.50	13.9	7.51	420	259	88.96	2.97	2.63	2.36	4.52	7.15	8.58	12.10	0.93
317	jaillans	SIE rochefort-samson	24/06/2004	823242	2006748	238	233	6	80-104; 120-233		54.4	-12.38	14.9	7.64	590	405	86.34	26.34	5.08	1.37	2.66	3.70	6.77	19.00	1.01
893	livron	particulier	17/06/2004	802064	1978497	138	60	3			40.8	-13.22	16.3	7.21	655	446	104.88	17.87	11.73	3.00	2.78	5.37	1.98	33.10	1.37
899	malissard	particulier	17/06/2004	806006	1992493	143	105	20			19.3	-5.79	16.1	7.66	462	316	39.6	36.91	11.16	1.56	1.46	6.26		22.40	0.82
1288	manthes	SIE Valloire	25/06/2004	809751	2038379	239	200		64-196		44.4	-10.64	15.0	7.46	431	236	63	9.85	13	0.83	6.68	8.10	13.08	18.80	1.00
164	marsaz	SIE veaune	03/06/2004	803332	2015880	195	108	0,8	30-90 137.18-186.38; 198.62-216.17; 222.17-274.82		54.8	-9.75	14.8	7.25	478	304	62.14	23.92	4.95	0.32	2.55	2.41	6.06	19.30	
234	montmeyran	SIESV	02/02/2005	808530	1985466	251.8	280	83	216.17; 222.17-274.82		22.6	-7.56	16.7	7.5	494	306	55.30	26.23	10.64	0.68	3.51	7.38	5.46	21.50	
234	montmeyran	SIESV	20/04/2000	808530	1985466	251.8	280	83	216.17; 222.17-274.82		26.2	-7.32	16.7	7.5	473	315	63.3	23.6	11.9	1.00	4.20	7.00	6.00	21.00	
1252	montmeyran	particulier	17/06/2004	807161	1983739	163	85	4	30-40; 50-80		85.0	-12.35	14.7	7.49	638	322	113.92	10.9	4.08	0.82	11.67	18.57	57.78	17.80	1.13
951	montmiral	particulier	16/06/2004	822817	2019720	325	100	25	24-98		94.5	-13.34	12.1	7.21	563	338	115.12	6.07	3.16	1.28	7.39	10.79	13.27	15.10	1.16
407	montoison	particulier	22/01/2004	806824	1981901	173	57	10,8			95.2	-12.22	14.1	7	545	278	108.22	2.56	2.98	0.37	14.49	15.63	24.46		
1245t	montoison	SIESV	25/11/2004	806434	1981836	227	300	70	à partir de 231m		12.2	-7.75	16.7	7.62	559	329	54	42	14		3.71	4.95			
1245t	montoison	SIESV	04/11/2004	806434	1981836	227	300	70	150-183 150-183; 231-278; 288-		12.1	-7.73	16.7	7.66	557	360	53	40	13.7		2.40	4.52			
1245	montoison	SIESV	05/04/2003	806434	1981836	227	300	70	294		6.7	-8.10	16.7	7.7	556	361	44	37	19	1.50	2.00	11.00		24.80	
1232	ourches	particulier	17/06/2004	812410	1982855	265	71	-1			50.1	-7.86	13.8	7.63	402	259	43.3	27.05	3.34	1.05	1.19	0.88	2.77	14.50	0.85
172	parnans	SIPIRR	02/06/2004	820785	2017057	295	265	65			63.9	-11.91	17.1	7.33	598	376	66.95	32.23	7.74	1.05	3.11	11.49	5.68	22.90	
1003	peyrins	particulier	15/06/2004	812879	2014269	205	200	-1	35-100; apres trou nu		42.0	-8.93	14.7	7.76	384	244	37.78	27.23	3.99	4.14	1.88	2.18	1.06	15.90	0.99
A	peyrus	commune	17/06/2004	821660	1992440	630	0				88.0	-12.65	9.3	7.73	400	257	80.41	2.24	0.67	0.32	1.47	4.77		4.30	1.12

n°	nom commune	propriétaire	date	X L2é	Y L2é	Z NGF	prof. Forage (m)	eau/sol	position crépine/sol	A ¹⁴ C (PCM)	δ ¹³ C (‰ vs PDB)	T°C (°C)	pH	cond. 25°C (µS/cm)	HCO3	Ca	Mg	Na	K (mg/l)	Cl	SO4	NO3	silice	DOC
380	roybon	SIVOM	25/06/2004	823815	2032762	445	80	0	28-80	49.3	-13.09	13.0	7.57	374	246	73.91	3.48	2.59	0.68	3.02	3.49	2.95	14.60	0.73
161	st donat/herbasse	commune	03/06/2004	809601	2017450	212	126	0,86	40-120	41.8	-9.01	15.2	7.41	423	285	43.38	25.03	6	4.89	2.25	3.29	1.88	20.50	
531	st donat/herbasse	SMARD	01/11/1979	807740	2016080	191	120	2	30-120	19.9	-7.50	15.2	7.6	235	38.5	20.9	10.2	1.40	3.00					34.50
253	st lattier	commune	02/06/2004	826439	2015226	200	100	2,7		28.9	-8.89	15.2	7.75	436	281	36.83	31.56	15.19	1.09	3.55	6.34	12.19	17.90	
150	st paul les romans	commune	02/06/2004	820223	2011855	187	260	20	100.5-250.5	17.3	-9.25	19.4	7.41	503	338	42.04	37.9	14.23	1.00	1.42	6.62	0.60	25.70	
311	st rambert d'albon	commune	30/01/2002	795240	2035810	149	272	17	136.5-160.5; 180.5-255	1.3	-8.09	19.5	7.7	310	31	11	77	3.00	9.50	24.00			16.30	
312	st uze	commune St Vallier	16/06/2004	799640	2023176	175	72	3	20-72	61.3	-12.32	15.7	7.31	517	315	76	17.56	9.99	1.14	5.62	8.81	3.86	19.10	0.91
498	st uze	commune	01/11/1979	799540	2023216	175	59		17-35; 38-56	50.8	-9.35	15.1	7.5	300	77.4	16.5	5.3	1.20	4.00	3.00	1.40		23.40	
394	tersanne vaunaveys la rochette	GDF particulier	01/12/1979	807863	2026647	270.62	250	8,9	185-232 60-100; après en trou nu?	22.8	-7.55	15.1	7.3	215	40	17	6.8	1.40	3.20	5.00			25.40	
240			22/07/2004	812913	1978479	262	180	10		62.4	-9.84	14.6	7.24	709	436	68.24	50.94	11.45	1.06	7.55	10.34	27.59	18.90	1.15

Annexe V.4 RESULTATS DES ANALYSES DES EAUX DES FORAGES SITUÉS DANS LE PLIOCENE

n°	commune	nom du forage/lieu-dit	date	X L2é (m)	Y L2é	Z NGF	T (°C)	pH	cond. 25°C (µS/cm)	HCO3	Ca	Mg	Na	K (mg/l)	Cl	SO4	NO3	silice
222	Valence	Briffaut	27/09/1983	803664	1994353	148			770	329	51	30.5	85	4.1	125	19	0	19.4
223	Valence	Martins	02/02/1984	805384	1994475	151		8.4	554	272	40	17.8	70.4	2.7	32.5	29	2	5.1
225	Valence	Couleures	27/02/1995	805070	1997626	155	16.2		1437	548			374		183			0
228	Chabeuil	Gonnards F3	09/07/1996	808391	1994340	164				289	44	30.7	10.9	1.2	1	12	1	
373	Allex	les Layes	07/12/1983	804479	1977481	186		7.15	607	393	113	15	5.7	1.2	11.4	17	0	5.8
311	St Rambert d'Albon	Château d'eau	31/01/2000	795240	2035810	149	19.5	7.7	520	305	28	10	79.8	3.1	10.9	23	0	14
311	St Rambert d'Albon	Château d'eau	28/03/1999	795240	2035810	149		7.7		305	68	12.5	11.3	2.6	3.4	7	2	
311	St Rambert d'Albon	Château d'eau	31/01/2002	795240	2035810	149	19.5	7.7	520	310	31	11	77	3	9.5	24.0		16.3

Annexe V.5 RESULTATS DES ANALYSES PESTICIDES SUR LES EAUX DES PUITS ET FORAGES

n°puits	n° prélèvement	date prélèvement	nom commune	lieu-dit/site	X L26 (m)	Y L26 (m)	Z NGF (m)	prof. puits (m)	usage	aquéfère prélévé	point de prélévement	mg/l						µg/l						Somme pesticides			
												F	Cl	NO2	NO3	SO4	DOC	dia	déséthyl atrazine	simazine	déséthyl terbutylazine	atrazine	diuron	terbutylazine	oxadixyl		
71	B11	02/06/2005	beaumont/valence	les 3 buches	805800	1992000	142	11	irrigation	a	sortie conduite puits	13.7		43.7	26.7	1.72			0.045							0.045	
74	B10	02/06/2005	beaumont/valence	les chirouzes	806707	1989378	141	12	arrosage+divers	a	sortie tuyau arrosage	9.3		24.2	19.5	2.64											
17	B07	02/06/2005	besayes	les massetides	817861	1999470	300	28	domestique	a	sortie tuyau arrosage	15.7		61.4	24.2	1.72			0.022							0.022	
56	B05	01/06/2005	bourg/valence	muscat	803836	1999864	175	26	domestique	a+m	sortie robinet	16.4		37.1	28.9	2.2									0.022	0.07	0.092
100	A08	31/05/2005	charpey	les bonneries	815979	1997113	256	15	irrigation +domestique	a	sortie puits	4.7		19.9	17.3	1.74											
6	B06	01/06/2005	chateauneuf/isère	les cornieries	807381	2006288	152		domestique	a	sortie robinet	15.8	0.15	75.3	57.6	3.26									0.026	0.026	
7	B02	01/06/2005	chateauneuf/isère	chambaud	807559	2002415	185	45	domestique	m	sortie puits	68.4		117.6	46.8	2.63	0.163								0.713	0.876	
5	B01	01/06/2005	chateauneuf/isère	giraud	808265	2004962	177	33	domestique	a	tuyau arrosage	19.7	0.15	77.4	56.7	3.19	0.03								0.118	0.062	0.21
14	G03	21/06/2005	chatuzange	millard	815780	2002900	220	13	domestique	m	sortie puits	0.19	22.2	62.1	25.4	-	0.345	0.107							1.11	1.562	
21	A05	31/05/2005	chatuzange	la sizeranne	820025	2004345	275	16	divers	a	sortie tuyau lavage extérieur	11.0		54.7	19.5	2.05	0.05								0.038	0.088	
101	B04	01/06/2005	pizançon	les chirouzes	816218	2007766	166		irrigation	m	sortie robinet	22.3		75.5	64.5	2.58	0.022	0.055								0.077	
77	H06	22/06/2005	valence	le gibet	801318	1992327	120	12	domestique	a	sortie puits	15.6	0.15	44.0	35.3	1.185											

Tableau V.10: Résultats pesticides sur les eaux des puits.

a	alluvions	m	molasse
>0.1	limite de 0.1 µg/l par substance (niveau A2)		
>0.5	limite de 0.5 µg/l pour le total des substances (niveau A2)		

Figure V.2: Légende des résultats pesticides.

ANNEXES

n°forage	n° prélèvement	date prélèvement	nom commune	lieu-dit/site	X L2é (m)	Y L2é (m)	Z NGF (m)	prof. forage (m)	usage	aquifère prélevé	point de prélèvement	mg/l						µg/l				somme pesticides					
												F	Cl	NO2	NO3	SO4	DOC	dia	déséthyl atrazine	simazine	déséthyl terbutylazine	atrazine	diuron	oxadixyl	terbutylazine		
593	A02	31/05/2005	alixan	savoie	812839	2003125	181	59	irrigation	m+a?	une sortie tuyau irrigation	23.5	0.19	82.5	35.4	1.30	0.025								0.025		
1200	C02	03/06/2005	alixan	centre ville	812253	2000873	180	80	domestique	m	sortie tuyau bassin	84.9		99.1	59.2	3.33		0.034								0.034	
1196	G01	21/06/2005	alixan		813492	2001746	198	63	domestique	m	sortie tuyau exterieur	16.3	0.13	55.5	37.5	1.87				0.112					0.07	0.182	
635	S02	20/07/2005	arthemonay	:Quartier Reculais	814509	2018167	303	74	irrigation	m	sortie forage	0.11	10.4	26.4	12.4	0.99	0.033								0.08	0.113	
203	S03	20/07/2005	arthemonay	morteville	813570	2017710	296	123	irrigation	m	sortie vanne à 500m du forage	0.08	8.1	9.5	10.2	0.65	0.03								0.054	0.084	
274	F04	23/06/2005	beaumont/valence	clairac	804459	1991272	176	151.5	irrigation	m	sortie forage		7.5	55.1	14.1	0.73	0.047								0.05	0.097	
641	G07	21/06/2005	beaumont/valence	LES QUARTS;	805928	1990996	140	70	irrigation	m	sortie forage	0.04	0.7		6.1	2.10											
1340	G08	21/06/2005	beaumont/valence	LES QUARTS;	805928	1990990	140	37	domestique	m	sortie forage	1.3	0.16	5.8	7.0	1.42											
361	G09	21/06/2005	beaumont/valence	les perrots	804640	1990242	172	120	irrigation	m	sortie forage	31.2		85.1	61.3	1.88	0.438			0.353					0.791		
358	G10	21/06/2005	beaumont/valence	ferme laborie; LES PERROTS;	805576	1989928	142	80	irrigation	m	sortie forage	4.3		22.5	4.0	1.32											
359	H08	22/06/2005	beaumont/valence	la boulinarde	807834	1987165	157	110	irrigation	m	sortie forage	9.5		23.5	23.5	1.28									0.041		
654	R02	22/07/2005	besayes	:Les Houppes	814441	2000429	210	100	irrigation	m	sortie enrouleur	0.06	10.6	9.2	13.6	0.35											
304	A01	31/05/2005	bourg/peage	les drets	811971	2004999	178	87	arrosage+divers	m	robinet exterieur	0.09	1.7	0.17	5.0	3.4	2.46									0.02	0.02
662	Q11	21/07/2005	bren	LES BOFFARDS;	805544	2018790	332	180	irrigation	m	sortie forage	0.06	5.1	12.9	3.3	0.96											
1147	C03	03/06/2005	chabeuil	les pierres	812602	1991800	217	32	domestique	m	sortie tuyau arrosage	14.5		37.8	34.8	2.52	0.031									0.031	
679	F01	23/06/2005	chabeuil	:Quartier Parizot	807093	1994870		40	irrigation	m	sortie forage	8.4		48.7	22.3	0.98	0.06				0.044					0.104	
259	G04	21/06/2005	chabeuil	peyrus	812309	1993315	225	79	irrigation	m	sortie tourniquet	12.4		28.5	24.8	2.10	0.064				0.051					0.115	
699	R01	22/07/2005	chartemerie les bles	LE MAS DU COGNET;	802806	2018752		38	irrigation	m	sortie enrouleur	0.06	17.7	63.6	33.8	0.74	0.203	0.061		0.478					0.742		
1146	A06	31/05/2005	charpey	les chaux	818196	1997146	307	48	domestique	m	sortie forage		11.8	39.4	21.3	1.86	0.411			0.314					0.725		
1151	A07	31/05/2005	charpey	st didier	815299	1997342	250	120	irrigation	m	tourniquet vers local technique	7.3		23.0	15.8	1.86	0.028				0.028					0.056	
722	A09	31/05/2005	charpey	LES BONNERIES;	815987	1997101		92	irrigation	m	sortie forage	2.3		14.9	4.0	1.24	0.029									0.029	
582	F03	23/06/2005	charpey	les bayardières	814163	1998070	221	180	irrigation	m	sortie forage	12.2		52.6	21.7	1.23	0.177			0.115						0.292	
402	B08	02/06/2005	chateaudouble	bois des pauvres	815689	1994396	285	83	collectivité privée	m	sortie conduite forage enterré	3.2		21.3	10.2	1.44											
737	S09	20/07/2005	chateauneuf de galaure	LA MERLIERE;	806412	2025079	311	215	irrigation	m	sortie forage	15.4		40.6	16.8	0.66	0.047			0.036	0.02					0.103	
732	T09	19/07/2005	chateauneuf de galaure	MARCANDIERE;	805881	2027881	248	100	irrigation	m	sortie forage	0.07	8.3	5.0	2.6	0.51											
730	T10	19/07/2005	chateauneuf de galaure	MARCANDIERE;	805734	2024605	255	50	irrigation	m	sortie forage	0.08	6.2	26.0	10.3	0.58					0.034					0.034	
1246	F09	23/06/2005	chateauneuf/isere	les vanaux	809431	2004612	175	80	irrigation	m	sortie forage		17.5	51.0	36.1	1.23											
746	A03	31/05/2005	chatuzange le goubet	LE PORTAIL;	817238	2001858		20	irrigation	a	sortie forage robinet	26.5		71.9	25.6	1.87	0.029				0.02					0.049	
363	G02	21/06/2005	chatuzange le goubet	CET petits pourieux	819630	2007047	235	130	piezomètre	m	sortie forage	10.1		64.7	25.8	1.25	0.173			0.214						0.387	
1341	G11	22/06/2005	chatuzange le goubet	CET petits pourieux	819308	2007213	215	62	piezomètre	m	sortie forage	4.6		21.6	21.5	1.69	0.08									0.08	
364	H01	22/06/2005	chatuzange le goubet	CET petits pourieux	819730	2007087	237	160	piezomètre	m	sortie forage	12.6		68.0	5.5	0.91											
181	H02	22/06/2005	chatuzange le goubet		816922	2005648	202	153	irrigation	m	sortie derrière bâtiment	4.3		12.0	5.4	0.87											
749	H03	22/06/2005	chatuzange le goubet	CHATUZANGE LE GOUBET;	816932	2005546		50	industrielle	m?	robinet extérieur	11.1		29.4	14.8	1.13				0.026						0.026	
294	Q07	21/07/2005	claveyson	les bernards	803392	2022691	224	122	irrigation	m	sortie vanne à 100m	5.7		23.8	7.3	0.76											
1273	T11	19/07/2005	claveyson	les escoffers	804624	2023638	227	129	irrigation	m	sortie forage	3.5		2.4	11.3	0.50											
778	H05	22/06/2005	clerieux	:Les Clodits	805249	2011902	185	60	irrigation	m	robinet chemin vers l'ouest après maison	16.2	0.1	67.3	31.0	1.13											

ANNEXES

n°forage	n° prélevement	date prélevement	nom commune	lieu-dit/site	X L2é (m)	Y L2é (m)	Z NGF (m)	Prof. forage (m)	usage	aquifère prélevé	point de prélevement	F	Cl	NO2	NO3	SO4	DOC	dia	déséthyl atrazine	simazine	déséthyl terbutylazine	atrazine	diuron	oxadixyl	terbutylazine	somme pesticides
785	Q08	21/07/2005	crepol	LES PETITS CHANTEUX;	813430	2021694	278	60	irrigation	m	sortie forage	9.8	36.2	12.5	1.01	0.048					0.02				0.068	
199	Q09	21/07/2005	crepol	les rogieres	815154	2022774	294	102	irrigation	m	sortie vanne à 20m	16.8	42.6	22.2	1.31	0.169					0.207				0.376	
198	Q10	21/07/2005	crepol	entre les milliers et clamot	814286	2021728	278	87	irrigation	m	sortie enrouleur	9.1	27.9	15.1	0.85	0.063					0.071				0.134	
783	S04	20/07/2005	crepol	LES CABINIERES;	817054	2025009	343	50	irrigation	m	sortie forage	8.2	8.0	16.9	0.63											
786	S06	20/07/2005	crepol	QUARTIER MONT DE VERDOLIV;	813015	2023628	288	55	irrigation	m	sortie forage	0.08	8.3	8.9	11.9	0.71					0.04				0.04	
789	S07	20/07/2005	crepol	:Quartier la Vieille Eglise	815325	2023606	299	56	irrigation	m	sortie forage	9.9	7.3	9.8	0.64											
1291	G06	21/06/2005	etoile/rhone	gasquet	804071	1984534	153	111	irrigation	m	sortie enrouleur	0.09	11.4	27.6	19.3	2.11					0.023	0.023			0.046	
853	T03	19/07/2005	hauterives	SAINT GERMAIN;	813455	2033097	335	100	irrigation	m	sortie forage	8.7	6.9	8.8	0.58											
297	T04	19/07/2005	hauterives	treigneux	809050	2031047	285	141	irrigation	m	sortie forage	6.3	11.2	8.5	0.54											
1235	F08	23/06/2005	la baume cornillane	les moulins	812358	1984002	257	60	domestique	m	sortie forage	16.2	86.5	30.6	1.04											
864	T05	19/07/2005	la motte de galaure	:les cornets	803054	2025894	218	105	irrigation	m	sortie forage	0.08	12.3	24.1	15.5	0.53					0.024				0.024	
906	A04	31/05/2005	Marches	:Les Beauriant	819266	2002728	276	34	irrigation	a	sortie canalisation puits	10.2	0.11	56.0	18.1	1.93					0.042				0.042	
909	B03	01/06/2005	Marches	:Quartier la Bayanne	816673	2001335	243	120	irrigation	m	sortie robinet forage	10.8	46.4	20.3	1.86	0.061					0.077				0.138	
930	S05	20/07/2005	montchenu	MONTCHENU;	813513	2024820	302.5	70	irrigation	m	sortie forage	10.9	13.9	13.9	0.82						0.029				0.029	
935	F02	23/06/2005	monttelier	LA LIMACOLE;	813943	1996161	236	220	irrigation	m	sortie forage	1.0	2.8	4.8	1.25											
1252	G05	21/06/2005	montmeyran	bouillanne	807161	1983739	163	85	arrosage+divers	m	sortie forage	11.6	48.8	19.2	2.39											
345	H07	22/06/2005	montmeyran	LES VANETS;	807865	1985197	164	100	irrigation	m	sortie forage	14.3	42.6	27.7	1.06					0.027				0.027		
407	C04	03/06/2005	montoison		806824	1981901	173	57	irrigation	m	sortie forage	12.4	20.3	16.3	1.52	0.032									0.032	
362	C05	03/06/2005	montoison	les bruyères	804363	1982028	163	40	irrigation	m	sortie tuyau arrosage	18.8	56.7	67.3	2.12	0.171					0.123				0.294	
367	F06	23/06/2005	montoison	le praticien	805587	1979200	168	100	irrigation	m	sortie enrouleur	10.3	78.3	18.5	0.92											
366	H11	23/06/2005	montoison	la forest, la garenne	807224	1980851	186	100	irrigation	m	sortie forage	10.6	22.5	24.1	1.18	0.027									0.027	
971	B09	02/06/2005	montvendre	:Blagnat	813079	1986974	274	200	arrosage+divers	m	sortie conduite forage	34.8	0.15	88.8	30.5	2.07	0.028					0.026				0.054
968	C01	02/06/2005	montvendre	LES DOURCINES;	811573	1988057		80	elevage	m	sortie tuyau arrosage	12.9	41.0	23.9	2.38	0.029									0.029	
960	H09	22/06/2005	montvendre		810054	1988286	176	100	irrigation	m	sortie pompe de reprise	7.6	40.1	10.7	0.93	0.06					0.028				0.088	
959	R03	22/07/2005	montvendre	:Quartier les Béalets, les auches :Quartier des Garennes	809144	1989030	157	60	irrigation	m	sortie forage	0.09	4.8	9.7	5.6	0.39	0.02					0.02				0.04
961	T01	18/07/2005	montvendre		811059	1989637	185	100	irrigation	m	sortie forage	0.09	17.1	26.7	14.0	0.53	0.045					0.07				0.115
408	H10	22/06/2005	mours st eusebe		814616	2011706	178	70	domestique	m	sortie apres ballon	1.0	2.2	0.7	0.74											
992	F10	24/06/2005	peyrins	VOIRAZIER;	811581	2012781	281	150	irrigation	m	sortie forage	2.6	13.6	5.0	0.86											
1002	F11	24/06/2005	peyrins	LES CORDELIERS;	810726	2015671	237	110	irrigation	m	sortie forage	5.1	13.3	8.5	1.00	0.021					0.067				0.088	
993	Q01	21/07/2005	peyrins	MONTGRENIER;	813805	2016036	252	80	irrigation	m	sortie forage	0.13	5.8	11.0	8.8	0.84										
1342	Q02	21/07/2005	peyrins	MONTGRENIER;	813805	2016036	252	40	irrigation	m	sortie forage	7.6	15.9	9.3	0.84	0.052	0.02								0.072	
1007	S08	20/07/2005	ratières	RATIERES;	805770	2023496	255	70	irrigation	m	sortie enrouleur 500m du forage	0.09	31.7	24.5	21.2	0.61										

n°forage	n° prélevement	date prélevement	nom commune	lieu-dit/site	X L2é (m)	Y L2é (m)	Z NGF (m)	prof. forage (m)	usage	aquifère prélevé	point de prélèvement	F	Cl	NO2	NO3	SO4	DOC	dia	déséthyl atrazine	simazine	déséthyl terbutylazine	atrazine	diuron	oxadixyl	terbutylazine	somme pesticides	
189	H04	22/06/2005	romans/isere	site des abattoires Carbec	813248	2007392	160	121.5	industrielle	m	robinet derriere abattoires	18.3		66.9	20.6	1.41											
1202	Q03	21/07/2005	romans/isere	chateaufleury	816177	2008357	169	56	irrigation	m	sortie forage		27.4		52.3	32.3	1.44										
1051	S10	20/07/2005	st avit	:Le Grand Champ	805086	2025586	243	180	irrigation	m	sortie forage		35.0		62.4	23.2	0.78	0.041			0.034					0.075	
1057	S01	20/07/2005	st bardoux		808140	2011220	260	156	irrigation	m	sortie forage		0.09	6.7		26.4	5.8	1.08				0.38				0.38	
143	Q05	21/07/2005	st barthelemy de vals	villeneuve	800811	2022928	185	83	irrigation	m	sortie forage		0.08	9.9		42.2	14.4	0.88									
142	Q06	21/07/2005	st barthelemy de vals	grand marais	801554	2021058	219	126	irrigation	m	sortie vanne 200m forage		6.4		34.6	11.9	0.96	0.022								0.022	
1075	T02	19/07/2005	st christophe et le laris	LE FAY;	815272	2027693	351	122	irrigation	m	sortie forage		15.7		2.7	8.9	0.44										
1097	T07	19/07/2005	st martin d'aut	LE CHIRY;	807507	2028602	333	162	irrigation	m	sortie forage		0.08	10.4		16.8	9.8	0.60									
121	T08	19/07/2005	st martin d'aut	les gentons	809260	2027971	321	205	irrigation	m	sortie forage		0.06	63.0		15.3	15.7	0.52									
1113	T06	19/07/2005	st rambert d'albon	MANTAILLE;	803056	2031044	256	40	irrigation	m	sortie forage		24.1		59.2	24.7	0.54	0.057			0.034					0.091	
1132	Q04	21/07/2005	st uze	LES TRONCHES;	799253	2024155	226	92	irrigation	m	sortie forage		0.18	25.2		37.0	25.2	1.18									
356	C06	03/06/2005	upie	les brues	809606	1981575	225	80	irrigation	m	sortie forage		5.9		11.4	15.0	1.64										
1289	C07	03/06/2005	upie	marcou	809760	1982365	205	150	divers	m	sortie lavabo salle manutention principale		3.2		6.4	3.3	1.39				0.134					0.134	
1139	F05	23/06/2005	valence	PAILLASSIER;	802552	1991731	165	80	irrigation	m	sortie enrouleur		36.0		116.6	48.2	1.08	0.041									0.041
1227	F07	23/06/2005	vaunaveys la rochette		812497	1978778	265	110	irrigation	m	sortie forage robinet interieur batiment		22.0	0.18	73.8	26.7	1.61	0.174			0.051					0.225	

Tableau V.11: Résultats des prélevements sur les eaux des forages.

Annexe VI RESULTATS DES ANALYSES ISOTOPIQUES

Annexe VI.1 RESULTATS ISOTOPIQUES DES EAUX PRELEVEES SUR LES FORAGES

n°	nom commune	X L2é	Y L2é	Z NGF	prof. Forage	eau/sol	position crête/sol	date prélevement ^{14}C (PCM)	^{14}C (‰ vs PDB)	^{13}C (‰ vs PDB)	date de prélevements Tritium/ $^{18}\text{O}/\text{D}$	incertitude Tritium (UT)	^{18}O (‰ vs SMOW)	D	ΔH	altitude bassin alim. (m) à ± 90 m	
		(m)															
117	albon	799869	2029870	189	143	2.7	32-140	27/07/2004	34.6	-8.4	03/09/2003	1.2	-8.82	-58.7	336	525	
116	albon	799880	2029878	190	151	-1.0	26-104; 122-128; 133-139	01/11/1979	22.3	-8.75		1.8	-9				
226	alixan	807579	1998955	162	185	22.6	75-185				28/08/2003		-8.61	-58.5	353	515	
1196	alixan	813492	2001746	198	63	40.0					05/09/2003	10.6	0.9	-8.05	-53.3	81	279
226	alixan	807579	1998955	162	185	22.6	75-185	01/02/1995	39.24	-7.85	01/02/1995	0.8	-8.6				
226	alixan	807579	1998955	162	185	22.6	75-185	01/02/2005	49.6	-9.78		1.5					
203	arthemonay	813570	2017710	296	123	44.3	70-120				08/10/2003	8.6	0.9	-8.43	-55.4	79	375
405	barbieres	820534	1998826	395	105	29.0	42-100	15/06/2004	99.3	-13.37	04/09/2003	10.7	0.7	-8.65	-58.9	249	534
640	beaumont/valence	806700	1990482	143	101	3.0	50-100.8				20/08/2003	2.6	0.8	-8.76	-60.5	463	606
370	beaumont/valence	805254	1987872	135	114	5.0	60-110	30/06/2004	20.3	-7.41	19/08/2003	2.5		-8.29	-57.4	330	465
274	beaumont/valence	804459	1991272	176	152	30.0					20/08/2003	2.8	0.8	-7.74	-52.7	76	252
208	beauregard-barret	824608	2003229	468	407	291.5	400-fin				12/05/2004	10	2	-8.81	-58.8	61	529
383	bessins	830762	2026276	410	182	45.9	120-182.42	16/06/2004	68.4	-13.31		3.4	0.6	-8.86	-61	219	629
196	bougé chambalud	800587	2039030	186	250		68.51-250				01/11/1979	2		-10.35			
178	bourg/peage	815745	2006236	192	314	30.1	124-160; 173.3-302.3	15/06/2004	43.2	-10.52		1.2		-8.48	-55.8	201	393
304	bourg/peage	811971	2004999	178	87	25.0					01/09/2003	1.6		-8.45	-55.7	210	388
1149	bourg/valence	802784	2000564	134	99	6.3					04/09/2003	8	1	-7.92	-54.7	209	343
662	bren	805544	2018790	332	180	70.0	140-180				11/09/2003	11	1	-7.98	-53.4	87	284
669	bren	803131	2020280	233	127	23.4	58.3-124.3				01/12/1979	2		-8.65			
577	bren	804476	2019530	265	85	27.0	45-75				01/12/1979	6	1	-8.5			
688	chabeuil	809005	1991062	161	130	1.4	60-130	17/06/2004	62	-9.11	20/08/2003	2		-8.57	-57.2	295	456
1243	chabeuil	813707	1991767	295	212	65.0		17/06/2004	71.6	-11.86	22/08/2003	1.4		-8.22	-54.4	34	329
1338	chabeuil	808330	1994075	166	252	9.5	146-176; 181-217; 217-247	01/02/1995	18.48	-4.95		1.7	0.4	-8.8			
227	chabeuil	808351	1994060	165	228	22.0	136-220	02/02/2005	28.3	-6.49		2.7					
280	chabillan	807374	1972467	176	108	1.4	35-75	30/06/2004	31.1	-9.7	31/07/2003	1.1		-8.41	-57.2	280	456
138	chartemerle les bles	800392	2016513	270	142	69.5	88.7-118.75; 124.05-139.1				10/09/2003	3.8	0.8	-8.1	-53.4	19	284
132	charmes/herbasse	812667	2021135	265	132		41.8-161.8	03/06/2004	45	-9.89	16/09/2003	1.6		-8.67	-58.2	237	502
148	charmes/herbasse	812666	2021215	265	155	-2.8	30-151.1				01/12/1979	2		-8.9			
135	charmes/herbasse	810056	2022181	272	250	9.7	49.39-249.39	01/12/1979	78.9	-10.65		2		-8.4			
291	charpey	815655	1997192	248	150	4.1	40-60; 60-150	15/06/2004	85.8	-12.38	28/08/2003	4.9	0.9	-8.56	-56.1	158	406
322	charpey	815186	1996893	267	170	34.6	98-170				01/12/1979	1.9		-8.25			
402	chateaudouble	815689	1994396	285	83	15.0					28/08/2003	4	1	-8.8	-58.9	139	534
736	chateauneuf de galaure	804996	2027576	235	48	4.0	12-30;36-48	25/06/2004	26.3	-6.67		1	1	-8.85	-60.7	380	615
268	chateauneuf/sere	806145	2004180	245	198	101.8	148-197	15/06/2004	64.5	-12.1	28/08/2003	4	1	-8.14	-55.8	148	393
315	chatillon st jean	820548	2014656	209	247	-2.0	56-226.14	02/06/2004	38.3	-11.1		1.8		-8.81	-59	395	538
176	chatuzange le goubet	818134	2004469	260	275	70.0	96.93-114.7; 127.05-258	15/06/2004	85.8	-13.48	02/09/2003	10	0.9	-8.12	-54.7	123	343
364	chatuzange le goubet	819730	2007087	237	160	87.4	100-106; 112-118; 124-130; 148-154				29/07/2002	14	2				
147	chavannes	803477	2015730	196	114	-0.4	30-86				01/12/1979	4	1	-7.9			
399	claveyson	802791	2023281	204	150	0.5	29-150	01/11/1979	76.6	-12.45		1.9		-8.7			
778	clerieux	805249	2011902	185	60	13.0	25-60	03/06/2004	91.6	-13.83		16	2	-7.71	-52.6	62	247
783	crepol	817054	2025009	343	50	15.0		03/06/2004	58.5	-12.41		4.8	0.8	-8.81	-58	150	493
793	crest	811567	1974662	197	150	-1.0	55-150	30/06/2004	47.6	-9.71	07/08/2003	3	1	-7.83	-53.4	14	284
1219	divajeu	810644	1970381	270	85	35.0					04/08/2003	11	1	-7.67	-52.2	-41	229
1291	etoile/rhone	804071	1984534	153	111	2.0	13-41; 47-70	22/07/2004	83.6	-12.97		1.8	0.8	-7.65	-50.6	3	156
123	hauterives	812130	2031696	346	253	55.7	88.5-118.5; 124.5-244.5	16/06/2004	52.3	-8.75		2.8	0.8	-8.94	-61.1	288	634
297	hauterives	809050	2031047	285	141	9.7	45-140	16/06/2004	92.4	-13.5	02/09/2003	3	1	-8.8	-59.1	338	543
124	hauterives	811709	2032276	301	25	3.2	14-25				01/12/1979	73	2	-7.5			

n°	nom commune	X L2é	Y L2é	Z NGF	prof. Forage	eau/sol	position crépine/sol	date prélèvement ¹⁴ C	¹⁴ C (PCM)	¹³ C (‰ vs PDB)	date de prélevements		incertitude Tritium	¹⁸ O (‰ vs SMOW)	D	altitude bassin alim.		
											Tritium/ ¹⁸ O/D	(UT)				(m) à ± 90 m		
1250	hostun	825088	2006376	300	178	30.0	50-96; 112-178				05/09/2003	1.7	-8.35	-57.6	175	475		
317	jaillans	823242	2006748	238	233	6.0	80-104; 120-233	24/06/2004	54.4	-12.38	14/08/2003	4.2	0.9	-8.46	-57	209	447	
1233	la baume cornillane	813937	1985649	345	55						07/10/2003	14	1	-8.12	-54.1	-30	315	
126	le grand serre	815598	2033012	350	115	51.0	114				01/10/1980	15	2	-8.87	-60	248	584	
893	livron	802064	1978497	138	60	3.0		17/06/2004	40.8	-13.22	26/08/2003	1.8		-7.66	-49.7	-23	115	
899	malissard	806006	1992493	143	105	20.0		17/06/2004	19.3	-5.79	21/08/2003	1.9		-8.83	-59	329	538	
1288	manthes	809751	2038379	239	200		64-196	25/06/2004	44.4	-10.64	23/09/2003	6.4	0.9	-9.51	-63.6	508	747	
149	marges	811070	2018192	235	250	-2.4	230				01/12/1979	1.4		-8.25				
164	marsaz	803332	2015800	195	108	0.8	30-90	03/06/2004	54.8	-9.75		1.1		-8.35	-56.2	216	411	
163	marsaz	805278	2014293	194	80	23.8	30-80				08/09/2003	9	1	-7.56	-50.4	-16	147	
201	marsaz	803198	2018285	235	98	25.1	42-92				08/10/2003	15.4	0.8	-8.45	-55.7	67	388	
205	montchenu	810725	2024753	365	198	94.3	120-187				08/10/2003			-7.56	-49.6	-52	111	
1252	montmeyran	807161	1983739	163	85	4.0	30-40; 50-80	17/06/2004	85	-12.35		4.2	0.9	-7.92				
234	montmeyran	808530	1985466	252	280	83.0	137.18-186.38; 198.62-216.17; 222.17-274.82	20/04/2000	26.2	-7.32	20/04/2000	1.7						
234	montmeyran	808530	1985466	252	280	83.0	137.18-186.38; 198.62-216.17; 222.17-274.82	02/02/2005	22.6	-7.56		2.6						
949	montmiral	823620	2018529	356	180	90.0	126-144; 156-180	15/03/2005	22.4	-7.16	16/09/2003	6.1	0.8	-8.44	-57.1	96	452	
951	montmiral	822817	2019720	325	100	25.0	24-98	16/06/2004	94.5	-13.34		11	1	-8.37	-55.9	72	397	
362	montoison	804363	1982028	163	40	2.0		05/04/2003	6.7	-8.1	12/08/2003	10	1	-7.43	-50.4	-47	147	
1245h	montoison	806434	1981836	227	300	70.0	150-183	04/11/2004	12.1	-7.73				-8.64				
1245b	montoison	806434	1981836	227	300	70.0	231-278; 288-294	25/11/2004	12.2	-7.75				-8.51				
407	montoison	806824	1981901	173	57	10.8		22/01/2004	95.2	-12.22	01/04/2003	2.3						
1245	montoison	806434	1981836	227	300	70.0	150-183; 231-278; 288-294	05/04/2003	6.7	-8.1	14/08/2003	9	1					
971	montvendre	813079	1986974	274	200	10.0	6-200				14/08/2003							
1232	ourches	812410	1982855	265	71	-1.0		17/06/2004	50.1	-7.86	14/08/2003	1.9		-8	-53.4	-48	284	
172	parmans	820785	2017057	295	265	65.0		02/06/2004	63.9	-11.91		2	1	-8.65	-58.3	211	506	
1003	peyrins	812879	2014269	205	200	-1.0	35-100; apres en trou nu	15/06/2004	42	-8.93		2.2		-8.75	-59.1	258	543	
1002	peyrins	810726	2015671	237	110	10.0					10/09/2003	16	1	-8.64	-57.3	224	461	
1002	peyrins	810726	2015671	237	110	10.0					01/12/1979	78	2	-9.05				
263	portes/valence	803000	1989830	160	120	32.0	50-120				01/12/1979	1.7		-7.95				
1012	ratieres	807689	2024242	296	115	42.0	80-116				19/09/2003	1.9		-8.37	-56.3	119	415	
1202	romans/isere	816177	2008357	169	56	16.0	25-55				10/09/2003	5.2	0.6	-8.15	-55.6	215	384	
159	romans/isere	811776	2011086	220	268	55.5	52-196; 220-226; 232-238; 244-250; 256-262				07/10/2003	2.1	0.8	-8.14	-54.7	83	343	
380	roybon	823815	2032762	445	80		28-80	25/06/2004	49.3	-13.09	23/09/2003	4.6	0.6	-9.2	-61.8	220	665	
248	st antoine	827489	2021369	295	120	12.0	39-120				23/09/2003	15	2	-8.69	-57.5	175	470	
248	st antoine	827489	2021369	295	120	12.0	39-120				01/11/1979	17	2	-8.9				
144	st barthelemy de vals	800540	2020217	208	86	11.3	36-83				02/09/2003	12.9	0.9	-7.82	-52.1	17	225	
275	st bonnet de valclierieux	820142	2024508	505	118	40.9	52-87				03/10/2003	14	1	-9.06	-60.6	106	611	
1075	st christophe et le laris	815272	2027693	351	122	60.0					17/09/2003	2.1	0.5	-8.6	-56.1	55	406	
161	st donat/herbasse	809601	2017450	212	126	0.9	40-120	03/06/2004	41.8	-9.01	17/09/2003	1.9		-8.5	-57.8	272	484	
531	st donat/herbasse	807740	2016080	191	120	2.0	30-120	01/11/1979	19.9	-7.5		1.7		-9.4				
253	st lattier	826439	2015226	200	100	2.7		02/06/2004	28.9	-8.89	25/09/2003	1.3		-8.64	-58.4	311	511	
265	st marcel/valence	805924	2001729	187	123	43.0	53-123				01/12/1979	62	2	-12				
121	st martin d'aout	809260	2027971	321	205	65.7	120-192				02/09/2003	8	1	-8.36	-55.7	23	388	
1251	st michel/savasse	818530	2019394	346	120	60.0	80-120				16/09/2003	3	0.6	-9	-61.7	315	661	
150	st paul les romans	820223	2011855	187	260	20.0	100.5-250.5	02/06/2004	17.3	-9.25	25/09/2003	1.9		-9.04	-62.1	492	679	
311	st rambert d'albon	795240	2035810	149	272	17.0	136.5-160.5; 180.5-255	30/01/2002	1.3	-8.09		1.8						
312	st uze	799640	2023176	175	72	3.0	20-72	16/06/2004	61.3	-12.32		1.1		-8.34	-56.8	263	438	
1132	st uze	799253	2024155	226	92	42.0					11/09/2003	14	1	-7.87	-51.5	-29	197	
498	st uze	799540	2023216	175	59		17-35; 38-56	01/11/1979	50.8	-9.35		1.7		-8.3				
334	tersanne	808267	2026930	275	245	11.1	180-217				06/11/2003	2.6		-8.68	-57.8	208	484	
394	tersanne	807863	2026647	271	250	8.9	185-232	01/12/1979	22.8	-7.55		1.9		-8.8				
169	triors	818511	2015968	290	260	44.4	88-251				26/08/2003	2		-8.75	-59.4	266	556	
588	upie	806724	1978609	186	100	8.3	29.8-45.4; 53.2-100				08/08/2003	15	2	-7.72	-53	79	265	
356	upie	809606	1981575	225	80	5.5					11/08/2003	7.5	0.7	-7.91	-50.8	-60	165	
240	vaunaveys la rochette	812913	1978479	262	180	10.0	60-100; après en trou nu?	22/07/2004	62.4	-9.84		1.5	0.6	-7.83	-53.1	8	270	

Annexe VI.2 RESULTATS ISOTOPIQUES DES EAUX PRELEVEES SUR LES PUITS

n°	nom commune	lieu-dit	X L2é (m)	Y L2é (m)	Z NGF	eau/sol	date prélèvement	incertitude Tritium		18O (‰ vs SMOW)	D	altitude bassin alim.	
								Tritium	UT			(m) à ± 90 m	
62	alixan	les blancs	810998	2001495	174	22.0	20/08/2004			-8.02	-53.7	123	297
88	alex	chassoulier	804408	1975908	140	6.0	07/09/2004			-8.34	-55.7	248	388
95	anneyron	jomard	801410	2036590	191	12.5	09/09/2004			-8.69	-59.4	365	556
48	beaumont-monteux	glézolles	802278	2006433	136	14.9	05/08/2004	7	1	-9.63	-67.6	235	370
44	beaumont-monteux	les clairemonts	805180	2007753	135	6.0	04/08/2004	6	1	-8.17	-55.3	793	929
68	chabeuil	parlanges	807425	1995936	156		25/08/2004			-8.05	-54.2	164	320
73	charpey	les virolles	815961	1997491	256	8.0	26/08/2004			-8.72	-57.5	214	470
53	chateauneuf-isere	chambons	802984	2004012	118		19/08/2004			-8.25	-54.9	234	352
21	chatuzange	la sizeranne	820025	2004345	275		21/07/2004			-8.07	-54.1	40	315
24	chatuzange	peruzat	818860	2005780	230		21/07/2004			-7.83	-53.8	72	302
41	granges/beaumont	pont de l'herbasse	806398	2009370	151	20.2	04/08/2004	7	1	-8.13	-56.5	274	425
477	manthes	îles SIE Valloire	809744	2038364	239	22	23/09/2003			-8.77	-59.4	317	556
20	rochefort-samson	les terrets	822500	2002340	356		21/07/2004			-8.06	-55.4	19	375
93	st rambert d'albon		795283	2035360	159	21.0	09/09/2004			-8.69	-58.8	370	529

Annexe VI.3 RESULTATS ISOTOPIQUES DES EAUX PRELEVEES SUR LES EAUX DE SURFACE

nom/lieu point de prélèvement	X L2é (m)	Y L2é (m)	Z NGF	date prélèvement	incertitude Tritium		18O (‰ vs SMOW)	D	altitude bassin alim.	
					Tritium	UT			(‰ vs SMOW)	(m) à ± 90 m
isère à Romans	817248	2008344	155	13/10/2003			-11.23	-76.7	1188	1343
barberolle à Barbieres	821685	1998457	430	13/10/2003			-8.6	-57.1	22	452
véore à combovin	816481	1990100	350	13/10/2003			-8.39	-54.9	2	352
drôme amont Crest	814919	1972023	192	13/10/2003			-9.21	-60	392	584
rhône amont confluence Isère	797752	2007444	118	13/10/2003			-8.85	-60.7	497	615
véore amont étoile	801648	1986652	110	23/09/2004			-7.92	-51.9	105	215
véore combovin	816480	1990140	350	23/09/2004			-8.79	-57.4	115	465
galaure st uze	798600	2022730	158	06/10/2004			-8.07	-53	107	265
galaure perynard	823840	2032740	443	06/10/2004			-8.4	-57.3	18	461
herbasse charmes	811920	2020550	249	22/09/2004			-8.3	-56.3	166	415
herbasse clerieux	806309	2011568	152	21/09/2004			-8.21	-54.7	191	343
Bourne, canal	813750	2006485	187	18/07/2003	7	1				

Annexe VI.4 RESULTATS ISOTOPIQUES DES EAUX PRELEVEES SUR LES EAUX DE SOURCES

n°	nom commune	nom de la source/lieu-dit	X L2é	Y L2é	Z NGF	remarques	date prélevement	Tritium	incertitude Tritium	¹⁸ O	D	¹⁴ C	¹³ C	altitude bassin alim.
			(m)					(UT)	(‰ vs SMOW)	(PCM)	(‰ vs PDB)			
4 valence	malcontent	802350	1993590	122			16/03/2004			-7.7	-51			53 175
5 beaumont/valence	beaumont fontaines	805060	1988460	132			16/03/2004			-8.35	-56			270 402
6 hostun	sika st martin	826330	2007820	300			06/04/2004			-8.72	-58.5			215 515
7 la baume d'hostun	le château	827850	2009850	295			15/04/2004	11	2	-8.84	-58.4			216 511
8 barbieres	palletou	824820	1996680	750			26/04/2004			-9.39	-62.9			-35 715
9 chateaudouble	roussillon	819390	1991050	520			26/04/2004			-8.53	-56.1			-114 406
10 peyrus	les tuffs	821660	1992440	630			17/06/2004	7	0.7	-9.81	-63.1	88	-12.65	95 725
11 combovin	les thourees	817960	1987360	540			27/04/2004			-9.11	-59.8			35 575
12 la baume cornillane	mélange	814130	1984130		mélange		27/04/2004			-8.69	-59.4			556 556
13 ouches st vincent la 14 commanderie	mélange	814130	1984130		mélange		27/04/2004			-8.79	-56.9			443 443
17 chatuzange		817630	2007595	160			21/07/2004			-8.24	-56			242 402
19 chateauneuf/isere	cote de beauregard	812030	2006540	140			06/08/2004	9	1	-8.35	-56			262 402
26 montelier	source bourbourée	814225	1994890	256	source drainée		26/08/2004			-8.54	-58.6			264 520
29 montvendre	source pepiniere roux source fond chambonne	808520	1989890	154	source drainée		25/08/2004			-8.32	-54.5			180 334
30 malissard		809071	1992138	167	source drainée		25/08/2004			-8.1	-54.3			158 325
31 beaumont-monteux	source barrage edf	805284	2005477	119	grosse source 200l/s		30/08/2004			-12.07	-84.1			1560 1679
32 livron	source du lavoir	798806	1977896	130			07/09/2004			-7.52	-49.2			-37 93
34 manthes	source de manthes	809480	2037238	231			09/09/2004			-8.8	-61.1			403 634
a	chanos				etude CPGF, localisation imprécise		01/10/1980	75	20	-8.3				
b	st andeol				etude CPGF, localisation imprécise		01/10/1980	75	20	-8.6				
c	montchenu				etude CPGF, localisation imprécise		01/10/1980	75	20	-8.9				
d	montrigaud	la verte			etude CPGF, localisation imprécise		01/10/1980	75	20	-9.9				

Annexe VII EQUATIONS DES MODELES DE CORRECTION DE A₀

Cette annexe est pour partie un résumé des publications de Fontes et Kalin (Fontes, 1992; Kalin, 1999).

Abréviations utilisées:

g = CO₂ du sol

s = carbonate solide

A = activité du carbone 14 (pcm)

δ = teneur en ¹³C (‰ vs PDB)

a = concentration en H₂CO₃

b = concentration en HCO₃⁻

c = concentration en CO₃²⁻

T = concentration en CMTD

ε_{ij} = facteur d'enrichissement de l'isotope stable entre l'espèce i et j.

Modèle de dilution

Le modèle de Tamers (1967) se base sur une balance chimique:

$$A_{0_{Tammers}} = \frac{(a + 0,5.b).A_g + 0,5.b.A_s}{a + b}$$

Le modèle d'Olive (1998) utilise la notion d'alcalinité et d'acidité pour définir un paramètre p correspondant au pourcentage de carbone actif dans le CMTD. Il distingue:

- milieu calcaire $p = \frac{(ACI)}{(ACI) + (ALC)} = \frac{(ACI)}{2.T} < 1$

- milieu non calcaire $p = 1$

avec $(ALC) \sim b + 2.c$ et $(ACI) \sim b + 2.a$ en meq/l.

La correction sur A₀ est alors:

- A₀ = p. 90 pour une eau infiltrée avant 1952;
- A₀ = p. 110 pour une eau infiltrée après 1952.

Le modèle de Pearson (Ingerson et Pearson, 1964) est basé sur une balance isotopique sur le carbone 13:

$$A_{0\text{Pearson}} = \left[\frac{(A_g - A_s).(\delta_T - \delta_s)}{\delta_g - \delta_s} \right] + A_s$$

Modèles d'échanges isotopiques

Le modèle de Mook (1976) présente un facteur de correction ajouté au $A_{0\text{Tamers}}$: $A_{0\text{Mook}} = A_{0\text{Tamers}} + k_{\text{Mook}}$:

$$k_{\text{Mook}} = \frac{0,5.(A_g - A_s).\left[\delta_T.(a+b) - (a+0,5.b).\delta_g - 0,5.b.\delta_g\right]}{(a+b).\left[0,5.(\delta_g - \delta_s) - \varepsilon_{gb}\right]}$$

Le modèle de Fontes et Garnier (1979) présente aussi un terme additif $k_{\text{F&G}}$ à $A_{0\text{Tamers}}$ mais il permet d'envisager différentes possibilités d'échanges entre la phase gazeuse (F&G eq.) ou la phase solide (F&G):

$$k_{\text{F&G}} = \frac{(A_g - A_s).\left[\delta_T.(a+b) - (a+0,5.b).\delta_g - 0,5.b.\delta_g\right]}{(a+b).\left[\delta_g - \varepsilon - \delta_s\right]}$$

On suppose que pour le premier calcul ε égale ε_{gb} . Si $k_{\text{F&G}}$ est négatif, l'échange isotopique se fait avec la phase solide, si $k_{\text{F&G}}$ est positif l'échange se fait avec la phase gazeuse.

- Si il y a échange avec la phase gazeuse, a et b sont en équilibre avec cette phase et il faut alors remplacer les termes de $k_{\text{F&G}}$. On parle alors du modèle de F&G équilibrant.
 ε par ε_{gb}
 $(a+0,5.b).\delta_g$ par $0,5.b.(\delta_g - \varepsilon_{gb}) + a.(\delta_g + \varepsilon_{ag})$
 $(a+0,5.b).A_g$ par $A_g.(1 + \varepsilon_{ag}^{14}).a + 0,5.b.(1 + \varepsilon_{gb}^{14}).A_g$ avec $\varepsilon_{ij}^{14} = \frac{2,3}{1000} \cdot \varepsilon_{ij}^{13}$ facteur d'enrichissement en radiocarbone entre l'espèce i et j.
- Si il y a échange avec la phase solide, il faut simplement remplacer dans $k_{\text{F&G}}$, ε par ε_{bs} .

Le modèle AIEA (Salem *et al.*, 1980) considère deux étapes, avec d'abord un équilibre entre bicarbonates et le CO₂ gazeux puis une dissolution des carbonates de la matrice:

$$A_{0_{AIEA}} = \frac{(\delta_T - \delta_s).(A_g - A_s) + (\delta_g - \varepsilon_{gb} - \delta_s).A_s}{\delta_g - \varepsilon_{gb} - \delta_s}$$

Le modèle d'Evans (1979) propose un modèle basé sur les processus de dissolution et précipitation. Il considère que seule la précipitation est associée à un fractionnement isotopique:

$$\frac{A_g}{A_{0_{Evans}}} = \left[\frac{(\delta_s - \varepsilon_{sb} - \delta_g)}{(\delta_s - \varepsilon_{sb} - \delta_T)} \right]^{(1+10^{-3} \cdot \varepsilon_{sb})}$$

Pour une température comprise entre 0 et 25°C, ε_{sb} est inférieur à 1 ‰ et l'équation précédente se simplifie:

$$A_{0_{Evans}} = A_g \cdot \left[\frac{(\delta_s - \varepsilon_{sb} - \delta_g)}{(\delta_s - \varepsilon_{sb} - \delta_T)} \right]$$

Le modèle de Eichinger (1983) propose une correction du A_{0 Tamers} dans le cas d'un échange isotopique partiel avec les carbonates de la matrice:

$$A_{0 \text{ Eichinger}} = A_{0 \text{ Tamers}} * E \text{ avec } E = \frac{\delta_T - \delta_e}{\delta_i - \delta_e}$$

δ_i correspond au δ¹³C du CMTD après qu'aient eu lieu les processus de dissolution mais avant tout échange:

$$\delta_i = \frac{a \cdot \delta_a + 0,5 \cdot b \cdot (\delta_a + \delta_s)}{a + b}$$

δ_e correspond au δ¹³C du CMTD en équilibre avec les carbonates solide:

$$\delta_e = \frac{a \cdot (\delta_s - \varepsilon_{sb} + \varepsilon_{gb} + \varepsilon_{ag}) + b \cdot (\delta_s - \varepsilon_{sb})}{a + b}$$

Bibliographie des annexes

- Eichinger, L. (1983).** A contribution to the interpretation of ^{14}C groundwater ages considering the example of the partially confined sandstone aquifer. Proceedings of the 11th International ^{14}C Conference. (coll./conf.), Radiocarbon, p. 347-356.
- Evans, G. V., R. L. Otlet, A. Downing, R. A. Monkhouse et G. Rae (1979).** Some problems in the interpretation of isotope measurements in United Kingdom aquifers. Isotope Hydrology (coll./conf.), Vienna, IAEA, p. 679-708.
- Fontes, J.-C. (1992).** Chemical and isotopic constraints on ^{14}C dating of groundwater. Radiocarbon after four decades: an interdisciplinary perspective. R. E. Taylor, A. Long et R. S. Kra. New-York, Springer-Verlag: p. 242-261.
- Fontes, J. C. et J. M. Garnier (1979).** Determination of the initial ^{14}C activity of total dissolved carbon: a review of the existing models and a new approach. Water resources research 15 (2) p. 399-413.
- IFP (1983).** Rapport d'interprétation de la campagne sismique I.F.P./DHYCA 1981 dans le Sud-Est de la France. IFP 76 p. (rapport).
- Ingerson, E. et F. J. Pearson (1964).** Estimation of age and rate of motion of groundwater by ^{14}C -méthod. Recent Researches in Field of Hydrosphere, Atmosphere and Nuclear Geochemistry. (coll./conf.), Tokyo, p. 263-283.
- Kalin, R. M. (1999).** Radiocarbon dating of groundwater systems. Environmental tracers in subsurface hydrology. C. P. et H. A. L. Boston, Kluwer Academic Publisher: p. 111-144.
- Mook, W. G. (1976).** The dissolution-exchange model for dating groundwater with ^{14}C . IAEA 213-225 p.
- Olive, P. (1998).** La datation des eaux souterraines par le radiocarbone revisitée. Université Paris VI - centre recherches géodynamiques 34 p.
- Salem, O., J. H. Visser, M. Dray et R. Gonfiantini (1980).** Environmental isotopes used in a hydrogeological study of north-eastern Brazil. IAEA 165-179 p.
- Tamers, M. A. (1967).** Radiocarbon ages of groundwater in an arid zone unconfined aquifer. In Isotope Techniques in the Hydrological Cycle, American Geophysical Union Monograph 11 p. 143-152.

Table des figures

Figure 1-1: Présentation du secteur d'étude.	18
Figure 1-2: Situation géographique et contexte géologique général du bassin de Valence. Répartition des deux principaux faciès karstifiables du Secondaire (D'après Germain et al., 1958 et Debrand-Passard et al., 1984 modifié)	21
Figure 1-3: Sédimentation secondaire et faciès de transitions vers la fosse Vocontienne (plan de situation des forages sur la figure précédente) (d'après Mandier, 1988 modifié).	22
Figure 1-4: Carte des isobathes de la discordance du Paléogène sur le Crétacé ou le Jurassique et le socle (cotes NGF en mètres). En bleu correspond la zone profonde, supérieure à 2000 m de profondeur (d'après Dumas, 1988 modifié).	24
Figure 1-5: Cartes de la paléogéographie du sillon subalpin du Burdigalien supérieur jusqu'au Tortonien (d'après Sissingh, 2001 modifié).	27
Figure 1-6: Charte eustatique du Tertiaire et Quaternaire (d'après Haq et al., 1987 modifié).	29
Figure 1-7: Modèle de déformation lithosphérique dans les bassins d'avant-pays (d'après Quilan et Beaumont, 1984 in Rubino et al, 1990 modifié).	30
Figure 1-8: Relation entre l'océan Atlantique et la mer Méditerranée lors de la crise Messinienne (Warny et al., 2003).	33
Figure 1-9: Paléogéographie du Sud-Est de la France lors du déclenchement de la crise messinienne et de la réinondation pliocène (d'après Sissingh, 2001 modifié).	34
Figure 1-10: Organisation du prisme sédimentaire du Gilbert delta du Rhône (d'après Audra et al., 2004 modifié).	35
Figure 1-11: Carte de la ria pliocène entre Lyon et Crest (Ballésio, 1972).	36
Figure 1-12: Ria pliocène au niveau de la plaine de Valence (Jeannolin, 1985).	37
Figure 1-13: Plan de localisation des unités géographiques au cours du Quaternaire (voir texte).	40
Figure 1-14: Exemple de coupes géologiques associées à la table 'FORAGE table principale'.	43
Figure 1-15: Carte des forages d'eaux ou de reconnaissance géologique répertoriés sur le bassin de Valence de profondeur supérieure à 20 m.	44
Figure 1-16: Carte du prisme marin des Gilbert deltas pliocènes dans la moyenne vallée du Rhône.	46
Figure 1-17: Carte morphostructurale du bassin de Valence. Plan de position des coupes géologiques.	49
Figure 1-18: Coupes géologiques Est-Ouest du bassin molassique du Bas-Dauphiné.	50
Figure 1-19: Carte du substratum du Néogène du bassin de Valence (mètre NGF).	51
Figure 1-20: Synthèse des formations du miocène inférieur et moyen (d'après Rubino et al., 1990).	52
Figure 1-21: Extension du faciès marneux du Miocène de base.	53
Figure 1-22: Extension des conglomérats de Voreppe (fini-miocène) et des cailloutis fluviatiles au niveau de la Drôme des Collines (fini-pliocène) (d'après Mandier, 1988 modifié).	54
Figure 1-23: Coupes géologiques simplifiées de forages selon un axe Est-Ouest entre Chantemerle-les-Blés et Margès.	56

Figure 1-24: Diagramme de répartition latérale et verticale des principaux faciès du Pliocène de la vallée du Rhône (Ballésio, 1972). _____	58
Figure 1-25: Coupes représentatives du Pliocène marin du bassin de Valence. _____	59
Figure 2-1: Carte des isohyètes normales (compilation de données). _____	63
Figure 2-2: Carte piézométrique du Miocène Nord-Drôme tirée de l'étude Duplouy (DIREN, 2001). _____	71
Figure 2-3: Carte piézométrique du Néogène de la plaine de Valence et du bassin de Crest (Jeannolin, 1985). _____	72
Figure 2-4: Suivis piézométriques de l'aquifère molassique (données DIREN Rhône-Alpes). _____	74
Figure 2-5: Carte piézométrique synthétique de l'ensemble aquifère néogène et quaternaire. _____	76
Figure 2-6: Carte des paramètres K et T recensés de l'aquifère néogène. _____	78
Figure 2-7: Histogrammes des perméabilités (K) et des transmissivités (T). _____	79
Figure 2-8: Histogramme des débits spécifiques en fonction de la nature de l'encaissant. _____	83
Figure 2-9: Carte des débits spécifiques de l'aquifère miocène (échelle exprimée en m ³ /h/m). _____	84
Figure 2-10: Schéma et définitions du débit spécifique et des variations du débit spécifique i.e. production. _____	88
Figure 2-11: Profils et débits des rivières jaugées en fonction de la distance cumulée par rapport au premier point de jaugeage. a: Véore, b: Herbasse, c: Galaure, d: Joyeuse et e: Savasse. _____	92
Figure 2-12: Sectorisation des échanges entre nappe profonde, nappe superficielle et écoulements de surface (synthèse de données). _____	94
Figure 3-1: Carte des points de prélèvement des aquifères superficiels. _____	104
Figure 3-2: Faciès des eaux superficielles _____	108
Figure 3-3: ACP des eaux superficielles. _____	110
Figure 3-4: Carte des forages prélevés au niveau de l'aquifère profond. _____	112
Figure 3-5: Faciès des eaux de la nappe profonde. _____	114
Figure 3-6: ACP des eaux de la nappe profonde (F1+F2+F3 = 74% de la variance). _____	116
Figure 3-7: Evolution des teneurs en Mg en fonction des teneurs en Ca des eaux souterraines. _____	120
Figure 3-8: Relation entre les teneurs en Ca en fonction des teneurs en HCO ₃ des eaux souterraines _____	122
Figure 3-9: Evolution des teneurs en sodium en fonction des teneurs en calcium des eaux souterraines. _____	125
Figure 3-10: Evolution des teneurs en chlorure en fonction des teneurs en sodium des eaux souterraines _____	126
Figure 3-11: Diagrammes de stabilité des minéraux silicatés (données traitées avec le logiciel Aqua). _____	128
Figure 3-12: Relation entre sulfate et nitrate des eaux souterraines (mg/l). _____	130
Figure 3-13: Relation entre chlorure et nitrate des eaux souterraines (mg/l). _____	131
Figure 3-14: Relation Na+K vs nitrate des eaux souterraines (meq/l). _____	131

Figure 3-15: Evolution des teneurs en calcium et magnésium en fonction des teneurs en bicarbonates des eaux souterraines.	134
Figure 3-16: Lignes d'écoulements représentatives de l'évolution géochimique des eaux.	136
Figure 3-17: Evolutions chimiques des eaux souterraines selon 3 lignes d'écoulements. Paramètres exprimés en mg/l pour nitrate, silice, calcium et magnésium et en meq/l pour bicarbonates et Na+K.	137
Figure 3-18: Carte des teneurs en nitrate de la nappe superficielle de la plaine de Valence (mg/l).	140
Figure 3-19: Carte des teneurs en sulfate des eaux de la nappe superficielle de la plaine de Valence (mg/l).	141
Figure 3-20: Carte des teneurs en magnésium des eaux de la nappe superficielle de la plaine de Valence (mg/l).	142
Figure 3-21: Carte des nitrates des eaux de la nappe profonde (mg/l).	146
Figure 3-22: Carte des sulfates des eaux de la nappe profonde (mg/l).	147
Figure 3-23: Carte des chlorures des eaux de la nappe profonde (mg/l).	148
Figure 3-24: Carte des teneurs en magnésium des eaux de la nappe profonde.	149
Figure 3-25: Carte de répartition du paramètre D de la nappe profonde (en meq/l).	151
Figure 3-26: Carte des teneurs en sodium et potassium des eaux de la nappe profonde (meq/l).	152
 Figure 4-1: Teneurs moyennes annuelles pondérées en tritium (UT) des précipitations à Thonon (données extrapolées avant 1963 à partir de la station d'Ottawa).	156
Figure 4-2: Histogramme des fréquences des teneurs en tritium de l'aquifère molassique (données 2000-2005).	158
Figure 4-3: Activités tritium vs teneurs en magnésium de la nappe profonde.	160
Figure 4-4: Activités tritium vs teneurs en nitrate de la nappe profonde.	161
Figure 4-5: Carte de répartition des teneurs en tritium de l'aquifère néogène (données 2000-2005) exprimée en UT.	162
Figure 4-6: Activité tritium en fonction de la profondeur des ouvrages.	163
Figure 4-7: Activité tritium vs épaisseur mouillée par rapport aux premières crêpines.	164
Figure 4-8: Comparaison des activités tritium pour des forages échantillonnés deux fois.	165
Figure 4-9: Principaux modèles de fonctionnement d'un aquifère et réponse à une impulsion (d'après Mook et de Vries, 2000 modifié).	166
Figure 4-10: Exemple d'un modèle dispersif sur le site de St Antoine (données traitées avec LUMPED).	168
Figure 4-11: Carte des points prélevés pour l'analyse ^{18}O et D.	172
Figure 4-12: Répartition des teneurs en oxygène 18 de l'aquifère néogène (en ‰ vs SMOW).	177
Figure 4-13: Répartition des teneurs en deutérium de l'aquifère néogène (en ‰ vs SMOW).	178
Figure 4-14: Vue en perspective de la bordure occidentale du Vercors et hydrologie du secteur (MNT* maille 100 m).	179
Figure 4-15: Coupe Est-Ouest de la limite plaine de Valence et bordure occidentale du Vercors à la latitude de Charpey. Relation hydrogéologique entre Vercors et plaine.	180

Figure 4-16: Diagramme D vs ^{18}O des eaux superficielles et souterraines de la zone d'étude (en ‰ vs SMOW)._____	182
Figure 4-17: Diagramme D vs ^{18}O pour les eaux des forages (en ‰ vs SMOW)._____	184
Figure 4-18: Relation teneur en deutérium et altitude des forages prélevés._____	187
Figure 4-19: Comparaison des altitudes entre les bassins d'alimentations calculées par le deutérium et les points prélevés._____	188
Figure 4-20: Carte des \square calculés pour l'aquifère néogène (incertitude ± 90 m)._____	189
Figure 5-1: Schéma des variations naturelles en carbone 13 dans le cycle hydrologique (Mook et al., 2000)._____	193
Figure 5-2: Fractionnement isotopique à l'équilibre du carbone 13 à 25°C (Clark et al., 1997)._____	198
Figure 5-3: Fractionnement à l'équilibre du carbone du système $\text{CO}_2\text{-HCO}_3\text{-CO}_3\text{-CaCO}_3$. La valeur de $\varepsilon_{y/x}$ représente le fractionnement de l'espèce y par rapport à l'espèce x. Dans les équations, T est donné en $^\circ\text{ Kelvin}$ et g= $\text{CO}_2(\text{g})$; a= CO_2 dissous ou H_2CO_3 ; b= HCO_3^- ; c= CO_3^{2-} et s= $\text{CaCO}_3(\text{s})$ (Mook et al., 2000 modifié)._____	199
Figure 5-4: Teneurs et cheminement du carbone 13&14 depuis l'atmosphère jusqu'aux eaux souterraines (Clark et al., 1997 modifié)._____	202
Figure 5-5: Variation atmosphérique du radiocarbone jusqu'à 24000 ans BP (Stuiver et al., 1998 modifié)._____	204
Figure 5-6: Carte des activités carbone 14 mesurées dans le bassin de Valence (pcm)._____	207
Figure 5-7: Relation A ^{14}C vs $\delta^{13}\text{C}$ du CMTD des eaux de l'aquifère néogène._____	212
Figure 5-8: Carte des âges moyens de l'eau dans l'aquifère néogène (âge arrondi en année)._____	219
Figure 6-1: Application de la loi de Darcy pour le calcul des vitesses hydrauliques._____	228
Figure 6-2: Interprétation des vitesses isotopiques réelles avec les vitesses hydrauliques._____	229
Figure 6-3: Plan de situation des forages choisis pour la comparaison des vitesses._____	230
Figure 6-4: Schéma conceptuel des écoulements dans un aquifère libre, homogène et isotrope (d'après Hubbert, 1940 modifié)._____	232
Figure 6-5: Fonctionnement global d'un aquifère homogène. Typologie des écoulements (d'après Tóth, 1995 modifié)._____	233
Figure 6-6: Circulations préférentielles mises en évidence par diagraphe micromoulinet sur deux forages dans l'aquifère molassique (données Idées Eaux)._____	234
Figure 6-7: MNT de la vallée de la Joyeuse, sectorisation des bassins d'alimentations et des écoulements souterrains._____	236
Figure 6-8: Vue schématique des circulations au niveau de la vallée de la Joyeuse (sans échelles)._____	237
Figure 6-9: Carte des sections d'écoulements choisies et position des forages avec datation de l'eau._____	243
Figure 6-10: Légende des différentes sections présentées._____	244
Figure 6-11: Section n°1 (Ourches-Beauvallon)._____	244

Figure 6-12: Section n°2 (Combovin-Lautagne). _____	245
Figure 6-13: Section n°3 (Peyrus-Valence)._____	246
Figure 6-14: Section n°4 (Barbières-Bourg de Péage). _____	247
Figure 6-15: Sections n°5 (moyenne vallée Herbasse)._____	249
Figure 6-16: Sections n°6 (moyenne vallée de la Galaure)._____	250
Figure 7-1: Répartition des usages de l'eau de l'aquifère néogène (année 2002). _____	258
Figure 7-2: Evolution des nitrates dans la nappe superficielle (données DDASS). _____	262
Figure 7-3: Evolution des teneurs en nitrate sur trois forages AEP de la plaine de Valence (données DDASS). _____	263
Figure 7-4: Situation des points prélevés pesticides._____	265
Figure 7-5: Diagramme somme pesticides vs concentrations en nitrates (95 points). Pointillé = limite potabilité._____	267

Liste des tableaux

Tableau 2-1: Pluviométries (P en mm) et températures (T en °C) moyennes pour 3 stations de la moyenne vallée du Rhône. Données météofrance (1961-1990). _____	62
Tableau 2-2: Correction apportée aux ETP Penman (pas de temps décadaire) à la station de Saint Marcel les Valence. _____	64
Tableau 2-3: Description statistique des paramètres hydrodynamiques (K et T) de l'aquifère néogène. _____	79
Tableau 2-4: Coefficient d'emmagasinement de l'aquifère miocène. _____	81
Tableau 2-5: Valeurs des débits spécifiques pour les différentes matrices aquifères. _____	82
Tableau 2-6: Débits moyens des rivières Véore, Herbasse et Galaure (données DIREN). _____	85
Tableau 2-7: Variations du débit spécifique pour chaque tronçon de rivière (l/s/km ²)._____	88
Tableau 3-1: Paramètres physico-chimiques mesurés sur le terrain pour les puits des nappes superficielles._____	105
Tableau 3-2: Concentrations moyennes en éléments majeurs mesurées sur les eaux des aquifères superficiels. _____	106
Tableau 3-3: Paramètres physico-chimiques des sources mesurés sur le terrain. _____	106
Tableau 3-4: Concentrations moyennes en éléments majeurs des eaux des sources. _____	107
Tableau 3-5: Matrice de corrélation de l'eau des nappes superficielles. _____	109
Tableau 3-6: Paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe profonde. _____	113
Tableau 3-7: Concentrations moyennes en éléments majeurs mesurées sur les eaux profondes. _____	113
Tableau 3-8: Matrice de corrélation des eaux de la nappe profonde. _____	115

Tableau 3-9: Bilan réactionnel entre chimie des carbonates, hydrolyse des silicates et échanges de bases.	133
Tableau 4-1: Tableau récapitulatif des analyses tritium effectuées.	157
Tableau 4-2: Corrélations entre activité tritium et la chimie de la nappe profonde.	159
Tableau 4-3: Calculs du t_m à partir des 3 modèles classiques empiriques de transit de l'eau dans l'aquifère.	168
Tableau 4-4: Ensemble des résultats en isotopes stables obtenus au cours de cette étude (exprimés en ‰ vs SMOW).	171
Tableau 4-5: Gradients isotopiques altitudinaux des précipitations connus dans le Sud-Est de la France et dans les Alpes italiennes et suisses.	175
Tableau 5-1: Teneurs en carbone 13 d'échantillons représentatifs de la matrice aquifère.	205
Tableau 5-2: Valeurs isotopiques des pôles de mélange.	206
Tableau 5-3: Formalisation des indicateurs de temps de séjour à l'aide de seuils.	208
Tableau 5-4: Indice de l'âge de l'eau à partir de la géochimie et du tritium.	209
Tableau 5-5: Comparaison des âges calculés par les modèles avec les classes d'âges définies par i.	211
Tableau 5-6: Calculs du $\delta^{13}\text{C}$ (‰ vs PDB) et $A^{14}\text{C}$ (pcm) équilibrants.	214
Tableau 5-7: Teneur de la minéralisation initiale de l'eau (après fermeture du système).	217
Tableau 5-8: Activité A_0 et âges calculés pour les nouveaux modèles.	218
Tableau 5-9: Comparaison des teneurs isotopiques des forages.	221
Tableau 6-1: Comparaison des vitesses hydrauliques et isotopiques.	231
Tableau 6-2: Données hydrogéologiques concernant les forages de la vallée de la Joyeuse.	237
Tableau 6-3: Vitesse de circulation de l'eau dans l'aquifère au niveau de la vallée de la Joyeuse.	238
Tableau 6-4: Estimation des vitesses moyennes d'écoulements de l'eau dans l'aquifère.	239
Tableau 7-1: Prélèvements par forage dans l'aquifère molassique pour l'année 2002.	258
Tableau 7-2: Bilan des écoulements dans le bassin de Valence.	261
Tableau 7-3: Nombre d'analyse dépassant le seuil analytique de 0,02 µg/l par substance analysée (95 échantillons).	266
Tableau 7-4: Résultats des échantillonnages des sites.	267

Abstract

The studied area is located in the South-East of France in the Rhone River valley between the Alpine chain to the East and the European craton (Massif Central) to the West. The Valence basin is a molassic foreland basin due to the orogenesis of the Alps during the Miocene with a surface area around 1600 km². This foreland basin is filled with multilayered sands, sandstones, clays and marls with an average thickness of about 400 m. This basin is an important unconfined groundwater resource for freshwater supply and agriculture. The use of geochemical and isotopic tools made it possible to understand the groundwater flow system of this patrimonial resource. Indicators of groundwater time residence were defined. These tools showed the systematic presence of sectors marked by the upwelling of major circulation recognizable by old groundwater aged from few hundreds to several thousands years (¹⁴C less than 30 PMC, tritium free, high contents of magnesium, sodium and silicate) and infiltrated in altitude (¹⁸O and D depleted). Moreover, these sectors are located downstream the aquifer or localised under river valleys. Apart from these sectors, the groundwater is infiltrated in the vicinity and is described as Actual with the presence of tritium and sometimes of nitrate and pesticides. Only the conceptual groundwater flow diagram suggested by Hubbert (1940) and Tóth (1963) could explain this hydrochemical and isotopic groundwater behaviour. The relief and the geological structure of the basin govern the water flow run-offs. In this acceptation, the groundwater flow velocity was calculated by using the Darcy's law and tritium-radiocarbon age. This groundwater flow velocity ranges between 5-10 m/y for the deepest flow and for the flow which circulates in the less permeable layers to 100-200 m/y for the shallowest flow and/or for the flow which circulates in the more permeable layers. The vulnerability of the Neogene aquifer was shown. An effective protection of this patrimonial resource should be developed from the groundwater flow model.

Keywords: molassic foreland basin, Pliocene ria, unconfined aquifer, stable isotopes, carbon-14, residence time indicators, preferential groundwater flow, vulnerability.

Résumé

Le bassin néogène de Valence situé dans le Sud-Est de la France est un bassin molassique d'avant-pays. Ce bassin, d'épaisseur moyenne de l'ordre de 400 m, a une superficie d'environ 1600 km² où circule un vaste aquifère libre. Cette ressource qui a été reconnue comme patrimoniale est principalement utilisée pour l'agriculture et l'eau potable. L'utilisation des outils géochimiques et isotopiques a permis d'appréhender le fonctionnement hydrogéologique de cette ressource patrimoniale. Des indicateurs de temps de séjour de l'eau ont été définis. Ces outils ont montré la présence systématique de secteurs marqués par des remontées de circulation profonde reconnaissables par des eaux âgées de quelques centaines à plusieurs milliers d'années (teneurs en carbone 14 inférieures à 30 PCM, sans Tritium et avec des teneurs en magnésium, sodium et silice élevées) et infiltrées en altitude (teneurs en Oxygène 18 et Deutérium appauvries). Ces secteurs sont localisés au niveau de Chabrillan, de Beaumont les Valence à St Marcel les Valence pour la plaine de Valence et au niveau des basses vallées de la Joyeuse, du Bancel et des moyennes vallées de l'Herbasse et de la Galaure pour la Drôme des Collines. Ces zones se situent donc soit dans les parties avales de l'aquifère, soit au niveau des principales vallées. En dehors de ces secteurs, l'eau de l'aquifère molassique s'est infiltrée à proximité et est qualifiée de récente avec la présence de tritium et parfois de nitrate et pesticides. Le schéma conceptuel de fonctionnement proposé par Hubbert (1940) et Tóth (1963) permet d'expliquer cette sectorisation de la nappe. Le relief et la structure géologique du bassin régissent les écoulements de l'eau. Les vitesses de circulation de l'eau souterraine varient entre 5-10 m/an pour les circulations les plus profondes et pour les horizons les moins perméables à 100-200 m/an pour les circulations les plus superficielles et/ou pour les horizons les plus perméables. La vulnérabilité de l'aquifère néogène a été démontrée. L'application de mesures de protection efficace de cette ressource patrimoniale doit tenir compte de ce schéma de fonctionnement.

Mots clés: bassin molassique d'avant-pays, ria pliocène, indicateurs de temps de séjour, circulation préférentielle, schéma de fonctionnement, vulnérabilité.