



HAL
open science

Modèle conceptuel de la structure et du fonctionnement du système karstique de la Fontaine de Nimes

Jean-Christophe Maréchal, Bernard Ladouche, Nathalie Courtois, Nathalie
Dörfliger, Paul Le Strat, Aurélie Bironne

► To cite this version:

Jean-Christophe Maréchal, Bernard Ladouche, Nathalie Courtois, Nathalie Dörfliger, Paul Le Strat, et al.. Modèle conceptuel de la structure et du fonctionnement du système karstique de la Fontaine de Nimes. [Rapport de recherche] Brgm. 2005. hal-03141203

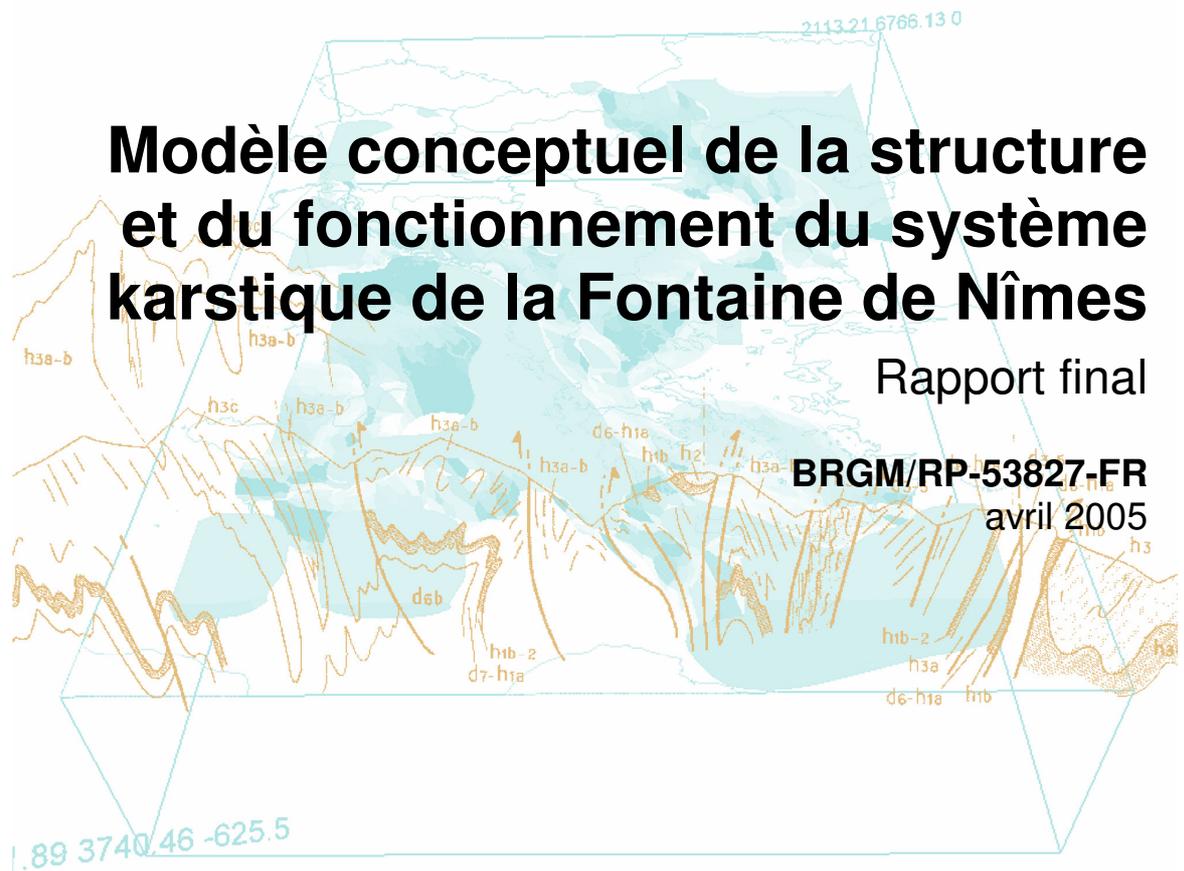
HAL Id: hal-03141203

<https://brgm.hal.science/hal-03141203>

Submitted on 15 Feb 2021

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

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



Modèle conceptuel de la structure et du fonctionnement du système karstique de la Fontaine de Nîmes

Rapport final

BRGM/RP-53827-FR
avril 2005

Étude réalisée dans le cadre du projet de recherche
du BRGM 2005 PDR05EAU01 KARSTEAU

JC. Maréchal, B. Ladouche, N. Courtois, N. Dörfliger,
Avec la collaboration de
P. Le Strat, A. Bironne

Vérificateur :

Nom : J-P. Marchal

Date : 22/04/2005

Signature :

Approbateur :

Nom : P. Lachassagne

Date : 28/04/2005

Signature :

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Mots clés : système karstique, eau souterraine, inondation, Nîmes, modélisation

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

JC. Maréchal, B. Ladouche, N. Courtois, N. Dörfliger, P. Le Strat, A. Bironne (2005) – Nîmes – aléasinondation par contribution des eaux souterraines. BRGM/RP-53827-FR, 187 p, 94 ill., 5 ann..

Synthèse

Dans le cadre du programme de recherche KARSTEAU (PDR04EAU01) et de la convention n° 2003.07.23 établie avec la Ville de Nîmes, le BRGM a pour objectif de caractériser la structure et le fonctionnement de l'hydrosystème karstique nîmois et d'évaluer sa contribution à la genèse et à la propagation des crues éclair, en travaillant à deux échelles spatiales : celle de la totalité du bassin d'alimentation et celle de sites pilotes liés à un ou deux bassins versants ou sous-bassins versants de cadereaux.

L'approche spatiale à l'échelle de la totalité du bassin d'alimentation est réalisée au sein :

- du module 1 du projet, dont l'objectif est la connaissance de la structure et du fonctionnement hydrologique du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes ;
- du module 2 du projet, dont l'objectif est la connaissance du fonctionnement hydrogéologique de l'épikarst et de la zone noyée au moyen de l'acquisition de données complémentaires.

Dans le cadre du module 1, un premier bilan de l'état des connaissances a été effectué au sein d'une synthèse bibliographique – rapport RP-53422-FR (Maréchal et al., 2004).

Le présent rapport contient les premiers résultats des observations entreprises sur le système karstique de la Fontaine de Nîmes dans le cadre de cette étude (modules 1 et 2). Son principal objectif est de fournir un premier modèle conceptuel du fonctionnement et de la structure du système karstique à l'échelle du bassin d'alimentation.

Le système karstique de la Fontaine de Nîmes est un karst gravitaire unaire. Il est le siège d'écoulements hiérarchisés vers la source de la Fontaine de Nîmes qui en constitue l'exutoire principal. La karstification s'est principalement développée au sein des calcaires de l'Hauterivien supérieur (n3b). Les phénomènes karstiques se manifestant en surface sont nombreux : avens, grottes et pertes attestent de l'intense karstification du massif calcaire. L'histoire géologique du karst de Nîmes ne permet pas d'envisager une extension très profonde de la karstification, car ce dernier a été barré pendant une grande partie de son histoire (cf. §3.3.4). Au niveau de l'exutoire, la Fontaine se situe au contact géologique entre le massif calcaire des Garrigues et le remplissage plio-quadernaire, dont les limons de Piedmont. En dépit du caractère unaire de ce karst, son bassin d'alimentation situé dans la zone des Garrigues est n'est pas encore délimité avec précision (§ 2). La contribution des formations de l'Urgonien aux écoulements souterrains, telle que le supposent les résultats de l'hydrochimie doit encore être confirmée.

Le bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes, déterminé sur la base d'un bilan hydrogéologique, possède une superficie comprise entre 45 et 60 km². Cette superficie

est une superficie minimale compte tenu du fait que la source de la Fontaine de Nîmes est une source de débordement et de la contribution d'écoulement souterrain des eaux de l'aquifère karstique à la nappe de la Vistrenque au travers de la faille de Nîmes. Les limites du bassin, encore hypothétiques à ce stade de l'étude, s'étendent de l'Ouest à l'Est, de Parignargues (pertes de la source de Parignargues et source de la Font de St-Pierre) à l'Est de Nîmes (Courbessac) et, du Nord au Sud de la limite méridionale du Camp des Garrigues à la Fontaine de Nîmes. Ce bassin d'alimentation inclut l'essentiel des bassins versants des cadereaux, à l'exception de ceux de Poudre, Valdegour et Valladas.

L'étude du tarissement de la Fontaine de Nîmes (cf. § 4.2) a permis de caractériser le fonctionnement du karst en période de basses eaux. Les coefficients de tarissement sont élevés ce qui indique que la zone noyée du système est bien karstifiée et se vidange assez vite. Le réseau karstique principal est assez bien connecté.

Le temps de fin d'infiltration est relativement court et les vitesses moyennes d'infiltration, relativement élevées dans la zone d'infiltration (épikarst) indiquent que le système présente une karstification importante. La zone d'infiltration (épikarst) apparaît donc bien connectée d'un point de vue hydraulique à la zone noyée du système.

Les valeurs du volume dynamique sont moyennement importantes (3.7 millions de m³ ± 1.3) et variables d'un cycle à l'autre ce qui traduit la sensibilité de la zone noyée du système aux variations saisonnières et inter-annuelles de l'alimentation (pluie efficace).

Le pouvoir régulateur et le retard à l'infiltration sont également variables d'un cycle à l'autre. Selon la classification de Mangin, ces valeurs sont caractéristiques d'un système bien karstifié (présentant un réseau spéléologique bien développé tel que celui observé) débouchant à l'aval sur un karst noyé important. Néanmoins, le pouvoir régulateur du système est moyennement élevé, autrement dit, le système ne semble pas accumuler de grandes quantités d'eau.

La zone noyée du système karstique apparaît comme bien drainée et bien connectée à l'épikarst qui constitue le siège de l'infiltration des pluies (cf. § 4.3.3). Le transfert des impulsions lors des périodes de crue s'effectue de manière rapide, le pic de crue se produisant en moyenne 24 heures après un épisode pluvieux. Ce faible décalage indique que les écoulements se produisent dans un système en charge, c'est-à-dire dans des conduits karstiques noyés. La réponse du système à la pluie efficace se produit pendant une durée de 12 jours environ.

L'étude des débits classés (cf. § 4.1) a mis en évidence que le comportement hydrodynamique du système karstique est différent en période de crue et d'étiage. Lors des périodes de crue, lorsque le débit est supérieur à 0.25 m³/s, le système karstique pris dans sa globalité devient moins inertiel et évacue plus facilement les eaux, qu'en plus basses eaux. La rupture observée sur les courbes de débits classés confirme que les propriétés hydrauliques du système changent. En période de crue, les formations du Quaternaire, moins transmissives, que le karst jouent le rôle d'un bouchon poreux et constituent un frein à l'écoulement. La source de la Fontaine de Nîmes apparaît donc comme une source de trop plein pour le système karstique. Au delà d'une

certaine charge hydraulique (correspondant à un débit de $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ à la Fontaine), l'écoulement du karst dans les formations quaternaires cesse d'augmenter (capacité maximale atteinte) et le système karstique se vidange essentiellement via la Fontaine dont les débits augmentent plus rapidement.

Lorsque le débit excède $11 \text{ m}^3/\text{s}$, des résurgences temporaires situées à proximité du réseau karstique se mettent en fonctionnement : puits de la Gaffone par exemple.

En période de crue, les relations eaux de surface / eaux souterraines ont été mises en évidence grâce à l'analyse des débits dans les cadereaux (cf. § 5) et à l'étude de la géochimie des eaux (cf. § 6.3). Sous réserve de la qualité des données du réseau NOE, des phénomènes de pertes au sein des vallées sèches que constituent les cadereaux semblent être mis en évidence. Par ailleurs, au cours de l'événement du 4 novembre 2004, la géochimie a mis en évidence que très tôt (quelques heures après le pic de crue), l'eau du cadereau d'Alès provient en grande partie de la zone noyée du karst. La mise en charge rapide du système karstique par les infiltrations d'eau de pluie se traduit par une mobilisation d'eau ancienne de la zone noyée qui sort en surface au travers des sources temporaires au niveau du quartier « Eau Bouillie ».

Les principaux points suivants doivent encore être précisés par la suite dans le cadre du module 2 :

- mieux caractériser les pôles géochimiques des calcaires du Barutélien (n4ab) et de l'Urgonien (n4bU) afin de lever les incertitudes qui pèsent quant à la participation éventuelle des eaux des formations calcaires de l'Urgonien au système karstique de la Fontaine de Nîmes;
- préciser les limites du bassin d'alimentation ;
- dans la mesure du possible, préciser l'interprétation des relations eaux souterraines / eaux de surface grâce à l'analyse des données limnigraphiques, si la qualité des données le permet et grâce à de la géochimie complémentaire sur l'eau des cadereaux en période de crue ;
- si les conditions météorologiques le permettent, compléter la courbe de tarage de la Fontaine en très hautes eaux ;
- localiser géographiquement et hydrogéologiquement les zones de mise en charge et de débordement du système karstique au niveau des drains et des systèmes annexes ;
- vérifier la pertinence de certaines connexions hydrauliques au moyen d'un ou plusieurs essais de traçage ;
- analyser le comportement des piézomètres en périodes de basses et de hautes eaux et le confronter au modèle conceptuel.

Sommaire

1. Introduction	15
2. Bassin d'alimentation et karstification	17
2.1. ETAT DES CONNAISSANCES	17
2.2. MISE EN PLACE DE LA KARSTIFICATION	21
2.2.1. Rappel méthodologique	21
2.2.2. Quelques définitions.....	22
2.2.3. Contexte sédimentaire – profils de dépôts.....	24
2.2.4. Contexte structural	26
2.2.5. Structure et géométries de la zone de transfert de l'Arlésienne axe de déformation préférentiel régional.....	29
2.2.6. La faille de Nîmes	32
2.2.7. Paléosurfaces	34
2.2.8. Remplissages karstiques.....	34
2.3. GEOMETRIE DES PRINCIPAUX AQUIFERES.....	38
2.3.1. Données disponibles	38
2.3.2. Cartes d'isohypses et isopaques des niveaux aquifères.....	38
2.3.3. Analyse croisée de la géométrie et de l'hydrogéologie	39
2.3.4. Synthèse	43
2.4. DELIMITATION DU BASSIN D'ALIMENTATION.....	45
3. Débit de la Fontaine de Nîmes	49
3.1. TARAGE DE LA SOURCE	49
3.1.1. Equipement de mesures	49
3.1.2. Courbe de tarage	54
3.2. CHRONIQUES DE DEBITS	56
4. Analyse du fonctionnement du système karstique de la Fontaine de Nîmes..	58
4.1. ANALYSE DES DEBITS CLASSES	58
4.2. ANALYSE DES COURBES DE RECESSION	61
4.2.1. Principe de la méthode.....	61
4.2.2. Résultats pour la Fontaine de Nîmes	64

4.3. ANALYSES QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DU SYSTEME KARSTIQUE DE NIMES PAR UNE APPROCHE DE MODELISATION GLOBALE A L'AIDE DU LOGICIEL « TEMPO »	69
4.3.1. Objectif	69
4.3.2. Démarche adoptée et données utilisées	69
4.3.3. Modélisation inverse des relations pluie-débit pour le système karstique de la Fontaine de Nîmes.....	72
4.3.4. Simulation des débits de la Fontaine de Nîmes pour les épisodes de pluies d'octobre 1998, septembre 2002 et décembre 2003.....	79
4.3.5. Information pour la délimitation du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes.....	84
4.3.6. Synthèse sur le fonctionnement hydrogéologique du karst de Nîmes déduit par l'approche de modélisation inverse (TEMPO).....	84
4.4. MODELISATION DES DEBITS DE LA FONTAINE DE NIMES AVEC LE LOGICIEL GARDENIA	85
4.4.1. Objectifs	85
4.4.2. Principe et fonctionnement du modèle GARDENIA	85
4.4.3. Modélisation de la Fontaine de Nîmes.....	89
4.4.4. Conclusions.....	98
4.5. SYNTHESE DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE	107
5. Relations eaux souterraines – eaux de surface	109
5.1. INTRODUCTION	109
5.2. CADEREAU D'UZES.....	109
5.2.1. Bassins versants	109
5.2.2. Analyse des débits	111
5.3. CADEREAUX D'ALES ET DE CAMPLANIER	113
5.3.1. Bassins versants	113
5.3.2. Analyse des débits	116
5.4. SYNTHESE	117
6. Hydrochimie	119
6.1. PLUIE.....	119
6.2. CARACTERISATION DU FONCTIONNEMENT GEOCHIMIQUE DU SYSTEME KARSTIQUE DE LA FONTAINE DE NIMES.....	122
6.2.1. Généralités sur les isotopes du strontium (rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$).....	122
6.2.2. Définition des pôles géochimiques du secteur d'étude.	122

6.2.3. Interprétation des résultats	125
6.2.4. Conclusions et perspectives	133
6.3. CARACTERISATION GEOCHIMIQUE DES RELATIONS EAUX DE SURFACE/EAUX SOUTERRAINES.....	136
6.3.1. Premiers résultats	136
6.3.2. Rôle joué par l'épikarst dans le fonctionnement hydrogéologique du système karstique.	141
7. Modèle conceptuel du système karstique.....	143
7.1. INTRODUCTION.....	143
7.2. STRUCTURE	143
7.3. FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE	146
7.3.1. Basses eaux.....	146
7.3.2. Hautes eaux et crues	147
8. Conclusion et perspectives.....	149
9. Bibliographie	151

Liste des illustrations

Illustration 1 : Résultats quantitatifs de quelques essais de traçage sur le BH de la Fontaine (M : poids de fluorescéine injectée ; Qi : débit à l'injection ; Qr : débit à la réapparition ; V : vitesse théorique ; D : distance ; h : dénivelé ; P : pente théorique ; T : temps de passage) d'après (1992).	18
Illustration 2 : Carte schématique du bassin hydrogéologique de la Fontaine de Nîmes d'après (Fabre, 1987).....	19
Illustration 3 : Essais de traçages et bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes selon (Fabre, 1997) – BH : bassin hydrogéologique – BV : bassin versant.	20
Illustration 4 : Profils de dépôts et karsts méditerranéens (d'après Duvail C., 2003) ; du domaine de socle (Cévennes), aux aquifères karstiques (Garrigues Nîmoises) et aux dépôts Mio-Pliocène et Quaternaires (Vistrenque, zones littorales avec étangs et dunes). Les flèches désignent des écoulements d'eau souterraine.	24
Illustration 5 : Schéma structural et géologique de la région de Nîmes (carte géologique à 1/50 000 de Nîmes (1971))	27
Illustration 6 : Schéma structural régional (Benedicto, 1996)	28
Illustration 7 : Coupe sismique référencée SG2, transversale au bassin de la Vistrenque (Benedicto, 1996).....	29

Illustration 8 : Coupe sismique référencée SG1 longitudinale au bassin de la Vistrenque (Benedicto, 1996)	30
Illustration 9 : Cadre structural du graben de la Vistrenque montrant la situation des données de la subsurface et des coupes sismiques recensées dans la Thèse de Benedicto (1996)	31
Illustration 10 : Coupes géologiques transversales référencées « a , b, c » du compartiment de Vauvert de Marsillargues et de Marette (Benedicto, 1996)	33
Illustration 11 : Liste des affleurements de remplissages karstiques observés (Aunay, 2000)	36
Illustration 12 : Localisation des affleurements de remplissage de Karst (d'après Aunay, 2000)	37
Illustration 13 : Carte des isohypses de la formation carbonatée de faciès Urgonien du Barrémien supérieur du secteur nîmois	38
Illustration 14 : Carte des isopaques (égale épaisseur des formations carbonatées de l'Urgonien (Barrémien supérieur) et de l'Hauterivien supérieur) de la région nîmoise.	39
Illustration 15 : Carte de situation des principaux traits structuraux (axes synclinaux et anticlinaux, failles) de la région nîmoise et des sondages géologiques de la Banque de données souterraines du Brgm.	40
Illustration 16 : Coupes géologiques transverses NNW-SE du secteur nîmois et légende (d'après Aunay, 2000)	41
Illustration 17 : Tableau synthétique de l'évolution et de la mise en place de la karstification des formations carbonatées de la région nîmoise	45
Illustration 18 : Bassin d'alimentation proposé pour la Fontaine de Nîmes en rouge; les limites en jaune correspondent aux limites des bassins versants des cadereaux	47
Illustration 19 : Principe de mesure du débit par ultrasons : exemple de mesure des vitesses sur deux cordes (Plus d'info sur : http://www.ultraflux.fr/produits/uf322co.htm)	50
Illustration 20 : Plan de situation du débitmètre installé sur la Fontaine de Nîmes	51
Illustration 21 : Position des deux cordes installées dans le canal de la Fontaine	52
Illustration 22 : Schéma global de l'installation du débitmètre	52
Illustration 23 : Intérieur du coffret électrique	53
Illustration 24 : Débit à la Fontaine et piézométrie à l'aven Mazauric, mesurés entre le 27 octobre 2004 et le 17 décembre 2004	54
Illustration 25 : Relation piézométrie Mazauric – débit Fontaine observée entre le 27 octobre 2004 et le 17 décembre 2004	55
Illustration 26 : Relations analytiques de l'ajustement de la courbe de tarage	55
Illustration 27 : Comparaison entre les débits de la Fontaine mesurés au débitmètre et les débits recalculés à partir de la piézométrie à Mazauric et de la courbe de tarage	56
Illustration 28 : Débits observés à la Fontaine de Nîmes depuis octobre 1998	56
Illustration 29 : Débits classés de la Fontaine de Nîmes sur l'ensemble des données de la période 1998-2005, (classes de débit de 0,05 m ³ /s)	60
Illustration 30 : Débits classés de la Fontaine de Nîmes sur l'ensemble des données de la période 1998-2005, (classes de débit de 0,5 m ³ /s)	60

Illustration 31 : Décomposition de la récession selon la méthode de Mangin (1970).....	62
Illustration 32 : Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse des courbes de récession (Mangin, 1975) – (i) paramètre d'infiltration et (k) pouvoir régulateur.....	63
Illustration 33 : Paramètres moyens des récessions de la Fontaine de Nîmes déterminés par la méthode de Mangin.	64
Illustration 34 : Exemple de courbe de récession de la Fontaine de Nîmes et résultats de l'ajustement (cycle hydrologique 1999-2000).	65
Illustration 35 : Position de la Fontaine de Nîmes dans la classification de Mangin (1975).....	67
Illustration 36 : Schéma de principe du modèle de transfert de la fontaine de Nîmes	70
Illustration 37 : Corrélagramme croisé pluie-débit de la Fontaine de Nîmes obtenu à partir de la combinaison linéaire des pluies (option pondération des chroniques de pluie de TEMPO).	71
Illustration 38 : Cumul des précipitations du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes déduit par l'option de pondération des précipitations du logiciel Tempo.....	72
Illustration 39 : Evolution temporelle de la pluviométrie, de l'ETP et des débits mesurés du système karstique à la Fontaine de Nîmes.....	73
Illustration 40 : Calcul des hydrogrammes unitaires normalisés du système karstique de la Fontaine de Nîmes (R. I. : réponse impulsionnelle).....	74
Illustration 41 : Évolution du seuil de pluie efficace Oméga et de la pluviométrie	74
Illustration 42 : Comparaison du débit modélisé au débit estimé du système karstique de la Fontaine de Nîmes. : 87.7 % de la variance totale expliquée.....	75
Illustration 43 : Réponse impulsionnelle d'Oméga à la pluie et à l'ETP.	75
Illustration 44 : Modèle paramétrique 1 : calcul des hydrogrammes unitaires normalisés du système karstique de la Fontaine de Nîmes (R.I. : réponse impulsionnelle).....	77
Illustration 45 : Modèle paramétrique 2 : calcul des hydrogrammes unitaires normalisés du système karstique de la Fontaine de Nîmes.....	78
Illustration 46 : Modèle paramétrique 1 : comparaison du débit modélisé au débit estimé du système karstique de la Fontaine de Nîmes. : 85,5 % de la variance totale expliquée.....	78
Illustration 47 : Modèle paramétrique 2 : comparaison du débit modélisé au débit estimé du système karstique de la Fontaine de Nîmes. : 87,3 % de la variance totale expliquée.....	79
Illustration 48 : Simulations pour 1988.....	81
Illustration 49 : Simulations pour 2002.....	81
Illustration 50 :– Simulations pour 2003.....	82
Illustration 51 : Simulation pour 2003 avec la pluie de 1988	83
Illustration 52 : Schéma de principe du modèle global à réservoirs GARDENIA	87
Illustration 53 : Données d'entrée et paramètres du modèle GARDENIA (dans le cas simple d'un seul réservoir souterrain)	88
Illustration 54 : Synthèse des résultats de calage avec GARDENIA.....	93

Illustration 55 : Répartition des différentes composantes de l'écoulement calculées avec GARDENIA (en moyenne annuelle sur la période de calage 1 ^{er} janvier 1999 – 31 mai 2004).....	94
Illustration 56 : Résultats de l'analyse de sensibilité en fonction de la RFU	95
Illustration 57 : Influence la valeur de la RFU sur la taille du bassin versant et la pluie efficace moyenne annuelle calculées.....	96
Illustration 58 : Exemples de résultats GARDENIA sur les épisodes pluvieux de 2002 et 2003	97
Illustration 59 : Résultats de la modélisation de débit, schéma GARDENIA à un réservoir souterrain à un exutoire	100
Illustration 60 : Résultats de la modélisation de débit, schéma GARDENIA à un réservoir souterrain à deux exutoires	101
Illustration 61 : Résultats de la modélisation de débit, schéma GARDENIA à deux réservoirs souterrains en série	102
Illustration 62 : Contributions comparées des différentes composantes de l'écoulement en moyennes mensuelles (résultats obtenus dans le cas du modèle GARDENIA à un réservoir souterrain à un exutoire).....	103
Illustration 63 : Pluie efficace journalière calculée par GARDENIA pour les années 2002 et 2003	104
Illustration 64 : Comparaison des pluies efficaces moyennes mensuelles calculées par TEMPO et GARDENIA (nota : il n'y a pas de valeurs calculées par TEMPO sur la période février à novembre 2002)	105
Illustration 65 : Comparaison des débits de la Fontaine de Nîmes simulés par TEMPO et GARDENIA	106
Illustration 66 : Géologie des bassins versants du cadereau d'Uzès (n3a : calcaires et calcaires marneux de l'Hauterivien inf. ; n3b : calcaires de l'Hauterivien sup. ; n4a1 : calcaires argileux du Barrémin inf. ; n4a2 : calcaires du Barrémien inf.)	110
Illustration 67 : Débits en fonction du temps lors de l'épisode du 08/08/1999	111
Illustration 68 : Débits en fonction du temps le 29/01/2001.....	111
Illustration 69 : Volume total ruisselé dans le cadereau en fonction de la quantité totale de pluie tombée lors d'un épisode de pluie.	112
Illustration 70 : coefficients de ruissellement à Engances et Vandyck dans le cadereau d'Uzès	113
Illustration 71 : Répartition des formations géologiques dans les sous-bassins des cadereaux d'Alès et Camplanier.....	114
Illustration 72 : Géologie des bassins versants des cadereaux d'Alès et Camplanier (n3a : calcaires et calcaires marneux de l'Hauterivien inf. ; n3b : calcaires de l'Hauterivien sup. ; n4a1 : calcaires argileux du Barrémin inf. ; n4a2 : calcaires du Barrémien inf.)	115
Illustration 73 : Volume total ruisselé dans le cadereau d'Alès en fonction de la quantité totale de pluie tombée au point Anduze lors d'un épisode de pluie.	116
Illustration 74 : Débits dans le cadereau d'Alès lors de l'épisode du 28 mai 1998	117
Illustration 75 : Coordonnées des pluviomètres du BRGM.	119

Illustration 76: composition des pluies	121
Illustration 77 : Liste des points d'eau avec leurs abréviations.....	123
Illustration 78 : Liste des points d'eau jugés représentatifs des formations géologiques du système karstique de Nîmes.....	124
Illustration 79 : Représentation des pôles géochimiques du système karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $1/\text{Sr}$	124
Illustration 80 : Localisation des points d'eau échantillonnés pour la caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines de la région des Garrigues Nîmoises.	125
Illustration 81 : Représentation des points d'eau souterraine du système karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $1/\text{Sr}$	126
Illustration 82 : Représentation des points d'eau souterraine du systèmes karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $1/\text{Sr}$ en considérant un modèle de mélange à 3 composantes : hypothèse d'une contribution de l'Urgonien.	127
Illustration 83 : Représentation des points d'eau souterraine du système karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs Cl/Sr en considérant un modèle de mélange à 3 composantes : hypothèse d'une contribution de l'Urgonien.	128
Illustration 84 : Synthèse des modèles de mélange des différents traceurs	129
Illustration 85 : Représentation des points d'eau souterraine du système karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs Cl/Sr en considérant un modèle de mélange à 3 composantes : hypothèse d'une contribution du Barutélien	131
Illustration 86 : Représentation des points d'eau souterraine du système karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $1/\text{Sr}$ en considérant un modèle de mélange à 3 composantes : hypothèse d'une contribution de l'Urgonien et du Barrémien.....	132
Illustration 87 : Représentation conceptuelle du fonctionnement obtenue à l'aide des informations géochimiques (n4bU : Urgonien, n3b : Hauterivien, n4aM : Barrémien inférieur).	133
Illustration 88 : Représentation des points d'eau souterraine du système karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs SO_4/Sr (considération des teneurs en sulfate mesurés pour le pôle Lauzière).	135
Illustration 89 : Représentation des points d'eau souterraine du systèmes karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs SO_4/Sr (considération de teneur vraisemblable en sulfate pour le pôle Lauzière).....	136
Illustration 90 : Report des dates de prélèvement des points d'eau de surface (cadereaux d'Alès et d'Uzès) dans le contexte hydrogéologique de système karstique de la Fontaine de Nîmes.	137
Illustration 91 : Contexte hydrologique des prélèvements réalisés à la Fontaine de Nîmes.	138
Illustration 92 : Représentation du pôle géochimique "pluie" dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs Cl/Sr . Les pôles de mélange qui permettent d'expliquer le fonctionnement géochimique du système karstique sont également reportés. La droite de mélange théorique entre les eaux de pluie et les eaux du pôle karstique de l'Hauterivien supérieur est également reportée.	139

Illustration 93 : Position des points d'eau de surface et des points d'eau souterraine dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs Cl/Sr. PP : puits Pesenti ; PB : puits poubelle ; 9a : puits des 9 arcades (Maison Robert) ; Eb : Eau Bouillie.....	140
Illustration 94 : Représentation conceptuelle du fonctionnement du karst.....	142
Illustration 95 : Modèle conceptuel du fonctionnement du karst de Nîmes.....	145

Liste des annexes

Annexe 1 Ajustement de la courbe de tarage de la Fontaine	153
Annexe 2 Courbes de récession	157
Annexe 3 Modélisations des systèmes karstiques par l'approche globale dite « boîte noire » à l'aide du logiciel « TEMPO » Principe général de la méthode	163
Annexe 4 Quelques données sur la pluie efficace	173
Annexe 5 Résultats géochimiques	179

1. Introduction

Dans le cadre du programme de recherche KARSTEAU (PDR04EAU01) et de la convention n° 2003.07.23 établie avec la Ville de Nîmes, le BRGM a pour objectif de caractériser la structure et le fonctionnement de l'hydrosystème karstique nîmois et d'évaluer sa contribution à la genèse et à la propagation des crues éclair, en travaillant à deux échelles spatiales : celle de la totalité du bassin d'alimentation et celle de sites pilotes liés à un ou deux bassins versants ou sous-bassins versants de cadereaux.

L'approche spatiale à l'échelle de la totalité du bassin d'alimentation est réalisée au sein :

- du module 1 du projet, dont l'objectif est la connaissance de la structure et du fonctionnement hydrologique du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes ;
- du module 2 du projet, dont l'objectif est la connaissance du fonctionnement hydrogéologique de l'épikarst et de la zone noyée au moyen de l'acquisition de données complémentaires.

Dans le cadre du module 1, un premier bilan de l'état des connaissances a été effectué au sein d'une synthèse bibliographique – rapport RP-53422-FR (Maréchal et al., 2004).

Le présent rapport contient les premiers résultats des observations entreprises sur le système karstique de la Fontaine de Nîmes dans le cadre de cette étude (modules 1 et 2). Ses objectifs sont de :

- préciser la délimitation du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes ;
- interpréter les données (hydrologiques, hydrogéologiques et géologiques) existantes et antérieures afin de définir l'organisation des écoulements souterrains à l'échelle de la zone d'étude, de caractériser l'importance relative du réservoir souterrain ;
- définir à l'échelle de certains événements la variabilité de la contribution de la composante « eaux souterraines » aux écoulements superficiels ;
- sur la base de l'ensemble de ces éléments, établir un modèle conceptuel de fonctionnement et de structure du système karstique à l'échelle du bassin d'alimentation.

2. Bassin d'alimentation et karstification

2.1. ETAT DES CONNAISSANCES

Le bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes a été défini par (Fabre, 1997) à partir des résultats d'essais de traçage. Les résultats de ces derniers ont été résumés dans la synthèse bibliographique (BRGM RP- 53422-FR). Ce bassin s'étend sur les bassins versants topographiques des cours d'eau du Gardon et du Vistre (Illustration 2). Les traçages ont été effectués, sur le plan géologique, dans les terrains fissurés, inégalement karstifiés, de faciès calcaro-marneux et d'âge barrémien inférieur et hauterivien.

Il est possible de distinguer deux types de traçages correspondant aux deux systèmes hydrogéologiques reconnus précédemment (Illustration 3) : au Sud, les traçages qui ressortent à la Fontaine de Nîmes et dans son bassin versant ; au Nord, les traçages dont les résurgences sont situées dans le bassin du Gard. Il apparaît que les écoulements karstiques souterrains sont clairement distincts des écoulements de surface avec en particulier un drainage vers le sud de bassins versants dont les ruissellements de surface s'écoulent vers le nord pour alimenter le Gardon (Illustration 3). Les traçages, comme l'indique l'illustration 3, suggèrent une extension du bassin vers l'Ouest jusqu'aux pertes de la source de Parignargues et de la Font de Saint-Pierre. Dans la partie septentrionale, la perte de Mangeloup et l'aven de Paulin sont drainés vers le bassin du Gard en direction du Nord et constituent dès lors l'extrême limite nord du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes. Le contour tracé par Fabre (1997) correspond à une limite topographique qui peut être différente de la crête piézométrique inconnue à ce jour. De plus, la mise en évidence d'une crête piézométrique en milieu karstique, hétérogène, peut s'avérer difficile voire impossible ; les limites du bassin peuvent être également fluctuantes en fonction des conditions hydrologiques.

Ce bassin d'alimentation comprend le vallon de Vaqueyroles qui se trouve légèrement au N-O de la ville, considéré par certains auteurs (Nejad Hachemi, 1968) comme une zone principale d'alimentation de la Fontaine de Nîmes. Il est formé par un synclinal des calcaires compacts de l'Hauterivien supérieur comprenant un lambeau de calcaire très marneux du Barrémien inférieur pincé au milieu. Selon (Nejad Hachemi, 1968), le substratum marno-calcaire ayant constitué le niveau de base karstique, les eaux infiltrées ont développé un réseau souterrain qui suit l'axe du synclinal incliné vers Nîmes et débouche au travers de la branche ouest de la Fontaine située dans le prolongement de cet axe.

Le flanc méridional de l'anticlinal du Mas Calvas où le pendage général des assises favorise l'écoulement vers Nîmes, fournirait une autre partie de l'eau à la Fontaine (Nejad Hachemi, 1968), par exemple au travers de la branche nord du réseau.

Des hypothèses sur les axes d'écoulements dans le bassin hydrogéologique de la Fontaine de Nîmes sont formulées par (Fabre, 1987) en Illustration 2.

Des informations plus quantitatives sont disponibles pour certains des traçages effectués (Illustration 1). Elles mettent en évidence des vitesses d'écoulement très variables entre 1 et 100 m/h.

Lieu injection	Auteur	Date	M (kg)	Qi (l/s)	Lieu réapparition	Qr (l/s)	V (m/h)	D (km)	H (m)	P (%)	T (j)
Aven km 7	A. Bonnet	9/1950		0,3	Vaqueyroles		18	0,8	5	0,6	2
Vaqueyroles	ASN-BRGM	30/11/1966	5	0,1	F. de Nîmes	100	7,6	4,7	74	1,6	26
Rau St-Pierre	BRGM	8/12/1967	5	2	F. de Nîmes		1,2	11	8	0,9	31
Parignargues					F. de Nîmes	2	0,6	1,1	10	0,9	80
Parignargues		22/11/1968			F. de Nîmes		30	11,5	73	0,6	16
Aven du Cheval		20/05/1978			F. de Nîmes		73	2,2			
Lauzières	G. Fabre	18/5/1978	10	112	F. de Nîmes	750	92	7,8	91	1,2	3,5

Illustration 1 : Résultats quantitatifs de quelques essais de traçage sur le BH de la Fontaine (M : poids de fluorescéine injectée ; Qi : débit à l'injection ; Qr : débit à la réapparition ; V : vitesse théorique ; D : distance ; h : dénivelé ; P : pente théorique ; T : temps de passage) d'après (1992).

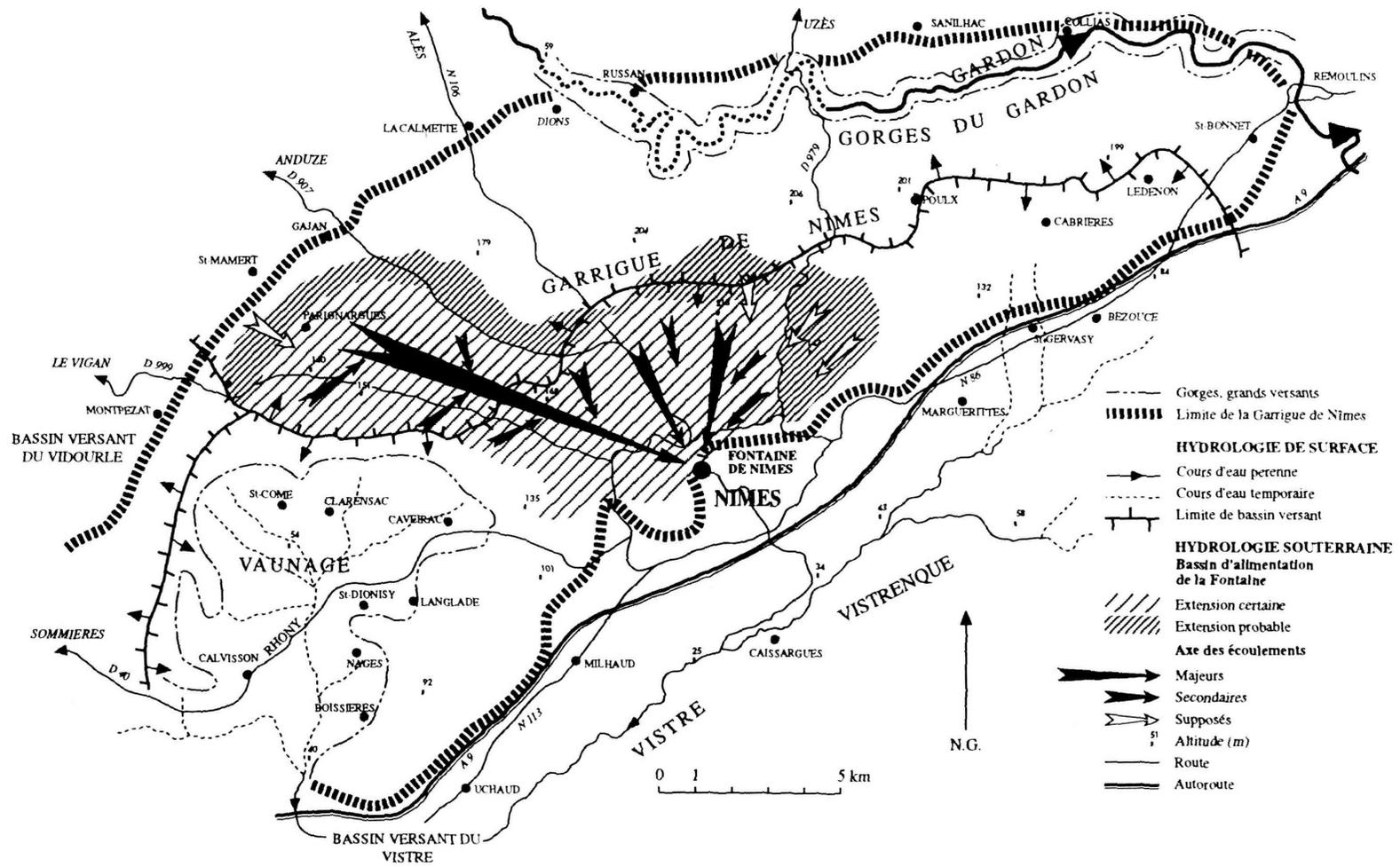


Illustration 2 : Carte schématique du bassin hydrogéologique de la Fontaine de Nîmes d'après (Fabre, 1987).

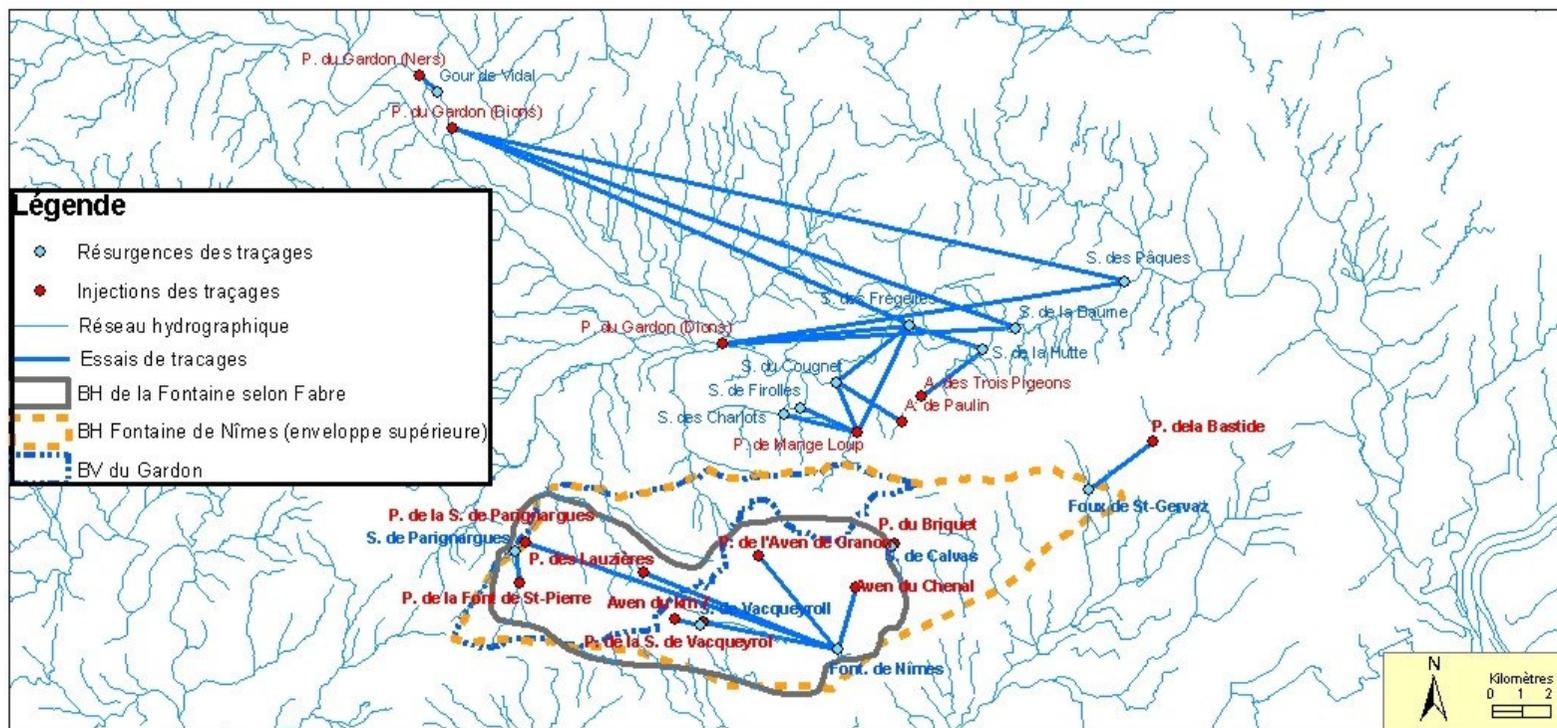


Illustration 3 : Essais de traçages et bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes selon (Fabre, 1997) – BH : bassin hydrogéologique – BV : bassin versant.

La superficie du bassin ainsi défini par (Fabre, 1997) sur base des essais de traçage est de l'ordre de 63 km², en désaccord avec les premiers bilans hydrologiques annuels effectués à partir de valeurs moyennes (Fabre, 1980) :

- précipitations efficaces (Nîmes 1946-1976) = 132 mm/an ;
- débits de la Fontaine de Nîmes = 50 l/s ;
- volume exporté par la Fontaine = 1,6 10⁶ m³ ;
- surface du BA = 12,1 km² ;

Comme le remarque (Fabre, 1980), ce chiffre est très différent des 63 km² estimés sur base d'essais de traçage (en 1980, l'auteur estimait le bassin d'alimentation sur la base des traçages à 57 km²). (Torcapel, 1894) obtenait de l'ordre de 14 km² avec des précipitations efficaces surestimées, de l'ordre de 400 mm/an. Les raisons pour expliquer ces écarts résultent quant à (Fabre, 1980) de la grande difficulté qu'il y a de chiffrer raisonnablement certains paramètres du bilan tels que ruissellement, évapotranspiration, débits...

En l'état actuel des connaissances, l'extension du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes reste imprécise globalement sur l'ensemble de ses limites. Il était donc nécessaire de préciser ses limites. Néanmoins, on peut raisonnablement estimer que ce bassin est circonscrit à l'intérieur de l'enveloppe tracée sur l'illustration 3 et qui sera considérée comme la zone de la présente étude, soient environ 109 km². À l'Ouest, cette enveloppe supérieure intègre la perte de la source de Parignargnes et se limite plus au Nord, au nord du vallon de Vallongue. À l'Est, la zone d'étude comprend les bassins versants des cadereaux d'Alès et d'Uzès.

2.2. MISE EN PLACE DE LA KARSTIFICATION

2.2.1. Rappel méthodologique

L'évaluation des capacités de stockage et la caractérisation de la géométrie du système karstique de la Fontaine de Nîmes sont des éléments importants pour la caractérisation du rôle et de la contribution des eaux souterraines aux processus d'inondation de la région nîmoise. Ces éléments dérivent de la mise en place des systèmes karstiques et de leur histoire.

Les processus à l'origine de la karstification sont complexes ; ils dépendent de la nature du massif carbonaté (importance de la porosité primaire et secondaire, joints de stratification, fractures avec ouverture sous l'effet d'une tension ou d'un relâchement [Király, 1984]). Le facteur principal intervenant dans les processus de karstification est le potentiel de karstification, contrôlé principalement par les variations eustatiques globales et par les événements géodynamiques régionaux.

La méthodologie d'étude à laquelle se réfère ce rapport a été développée dans le cadre du module « Corbières, évaluation des ressources en eau souterraine des

systèmes karstiques » du projet BRGM « KARSTEAU », - EAU01 – (Aunay & Le Strat, 2002 ; Aunay *et al.*, 2003a).

L'étude géologique des karsts est développée sur la base des concepts de la stratigraphie séquentielle et de la stratigraphie génétique ; elle consiste à replacer le massif karstique dans un contexte de géodynamique de bassin sédimentaire à partir des différents profils de dépôts au cours de son histoire géologique. L'étude de la karstification de l'ensemble d'un massif carbonaté est ainsi contrainte par l'évolution des bassins sédimentaires adjacents et par un profil de dépôt se développant depuis les paléosurfaces sur les vieux socles et les turbidites des bassins profonds.

La méthodologie comprend deux échelles d'observation :

- (i) une échelle régionale avec l'étude du karst dans son contexte géodynamique régional (évolution du niveau de la mer, évolution des mouvements tectoniques liés à la mise en place des chaînes de montagnes pour les mouvements verticaux ascendants ou liés à la subsidence (enfouissement) de sédiments au niveau de bassin sédimentaire). Cette étude nécessite la compilation et la synthèse bibliographique de documents ou cartes géologiques au sens large. L'étude des morphologies d'aplanissement (paléosurfaces) avec la datation des sédiments piégés permet de retracer l'histoire géologique et de marquer les événements fondamentaux. Le traitement d'un Modèle Numérique de Terrain permet d'appréhender l'agencement des paléosurfaces.
- (ii) Une échelle locale, avec l'analyse des enregistrements sédimentaires au sein des affleurements des formations carbonatées karstifiées (diffractométrie des rayons X, Microscope électronique à Balayage), ainsi que l'étude de la géométrie des réseaux de drainage (fossiles ou actifs) dressés par les clubs de spéléologues, sont des éléments complémentaires à l'analyse du développement et de la mise en place de la karstification.

Une synthèse sous forme d'un tableau chronologique à l'échelle des temps géologiques observés, comprenant l'évolution eustatique, les principaux mouvements tectoniques, des paléosurfaces, permet d'identifier les périodes propices au développement à dominante verticale des réseaux karstiques.

2.2.2. Quelques définitions

Systèmes karstiques

L'aquifère karstique est défini comme étant un corps de roche perméables comportant une zone saturée siège d'écoulement souterrains, dont les conditions et le comportement correspondent au karst : hétérogénéité, discontinuité (compartiment du réservoir), prédominance de l'écoulement des eaux souterraines par chenaux et conduits de grandes dimensions à fonctions collectrice ou distributrice, existence possible de cavités de grande capacité, large prépondérance de l'écoulement souterrain dans l'écoulement total du domaine correspondant (Castany et Margat,

1977). Un aquifère karstique peut comprendre plusieurs systèmes karstiques individualisés par ces exutoires.

Le système karstique est défini comme correspondant au bassin d'alimentation de la source karstique qui constitue l'exutoire unique ou principal du système. Cette définition est valable pour les systèmes karstiques dits unaires, c'est à dire dont la recharge du système aquifère est assurée uniquement par les précipitations. Le système karstique de la Fontaine de Nîmes est un système unaire.

A contrario, un système karstique binaire comporte une perte importante qui l'alimente et est constitué du bassin d'alimentation karstique (impluvium calcaire) et du bassin versant du cours d'eau qui se perd au contact des calcaires et qui participe également à la recharge du système.

Karsts gravitaires

Les karsts, ou systèmes karstiques, sont caractérisés de gravitaires, lorsque leur développement est lié principalement à l'action physico-chimique de l'eau qui s'infiltré par gravité, sur un massif, et dont l'écoulement est dirigé vers le point le plus bas. Aucun processus lié à la présence d'hydrothermalisme n'entre en ligne de compte dans les karsts dits gravitaires. Leur réseau de conduits se développe au cours des temps géologiques (quelques 10 000 ans sont suffisants à la mise en place d'un réseau karstique), selon des plans horizontaux et verticaux, le développement vertical étant lié aux périodes de chute de niveau de base (raison eustatique et/ou tectonique). La Fontaine de Nîmes est un karst gravitaire.

Profils de dépôts

Les profils de dépôts correspondent à l'environnement morphologique au sein duquel prend place la sédimentation. Dans le cas de l'étude de la mise en place et du développement de la karstification, les profils de dépôts sont associés à l'évolution des dépôts dans un environnement de bassin sédimentaire, de différents types de faciès en fonction de leur profondeur de dépôts, des conditions de dépôts (apport détritique externe ou dépôts résultant de processus chimique intra bassins). Des discontinuités, associées à des événements géodynamiques, sont enregistrées au sein des dépôts.

Les karsts gravitaires se distribuent ainsi, dans un bassin sédimentaire suivant les différents profils de dépôts qui existent tout au long de son histoire (Illustration 4).

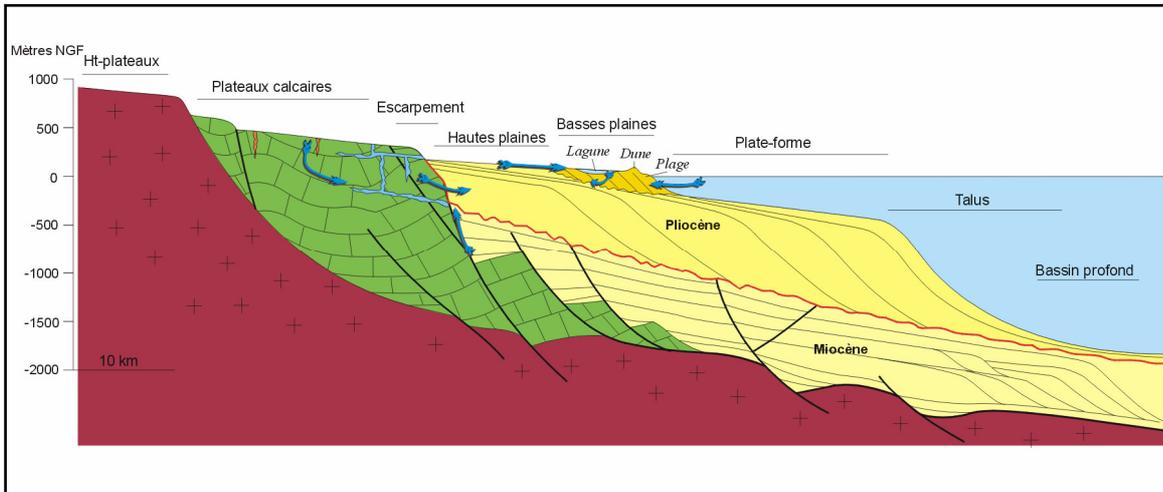


Illustration 4 : Profils de dépôts et karsts méditerranéens (d'après Duvail C., 2003) ; du domaine de socle (Cévennes), aux aquifères karstiques (Garrigues Nîmoises) et aux dépôts Mio-Pliocène et Quaternaires (Vistrenque, zones littorales avec étangs et dunes). Les flèches désignent des écoulements d'eau souterraine.

Ces profils sont régis par des facteurs globaux, tel que le climat, et par conséquent l'eustatisme¹ suivant des grands cycles, dont on peut distinguer plusieurs ordres, et par les facteurs locaux comme la tectonique, la production sédimentaire et le niveau de base fluviale. L'eustatisme concerne les changements d'ensemble du niveau des mers.

Il s'agit ainsi, d'analyser le signal sédimentaire suivant les différents profils de dépôts du continent au bassin en intégrant les objets karstiques, tels que position des exutoires, des réseaux karstiques (fossiles ou actifs, c'est-à-dire siège d'écoulements souterrains). Cette analyse s'effectue en fonction du principe de l'accommodation ou de l'espace disponible pour préserver l'enregistrement sédimentaire. L'accommodation est définie comme étant l'espace disponible pour emmagasiner du sédiment. En domaine marin peu profond, cet espace correspond en première approximation au volume délimité entre le niveau de la mer et le substrat au début de la sédimentation (Homewood et al. 2002).

2.2.3. Contexte sédimentaire – profils de dépôts

L'analyse des conditions sédimentaires et des objets karstiques suivant les profils de dépôts a été réalisée pour la période cénozoïque (65 millions d'années) au niveau de plusieurs zones ateliers, de l'Aigoual jusqu'au Golfe du Lion (Le Strat et al., 2004). Les éléments concernant la région nîmoise sont repris dans ce paragraphe. Les données concernant le remplissage cénozoïque (ère géologique tertiaire) du graben de la

¹ Eustatisme : changement d'ensemble du niveau des mers.

Vistrenque au dessus des formations mésozoïques (du Secondaire) sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Ere	Etage/ type de dépôts	Type de dépôts et Epaisseur	Références
Cénozoïque	Alluvions récentes	Alluvions holocènes : sables et limons, galets et graviers pouvant atteindre 15 m	Sondages
	Alluvions anciennes	Alluvions würmiennes : sables et galets sur 4m Alluvions du niveau des Paravaudes : galets et sables sur 5m Alluvions probablement rissiennes : galets et sables sur quelques mètres.	Carte géologiques Nîmes 1971
	Alluvions anciennes d'âge controversé	Formation détritique fluviale d'Estezargues : galets, graviers et sables altérés sur plusieurs mètres Formations détritiques des Costières : galets, graviers, sables altérés sur plusieurs mètres.	Carte géologiques Nîmes 1971
	Pliocène Pliocène marin sableux Pliocène marin argileux	Sables moyens à fins, environ 10m Argiles marines de 300m épaisseur*	Carte géologiques Nîmes 1971
	Miocène supérieur continental	Sables résiduels des molasses burdigaliennes et helvétiques, 15 à 35m	Carte géologiques Nîmes 1971
	Helvétien Helvétien sup. Helvétien inf.	Grès molassique du Comtat de faible épaisseur Marnes bleues sableuses et molasse gréseuse verdâtre, 40 à 58 m	Sondages
	Burdigalien	Formations marines détritiques calcaires et zoogènes, moins de 100m Molasse calcaréo-gréseuse, 50-70m	Sondages
	Aquitainien	Dépôts détritiques fins et marnes bariolées, 200 à 1000m	Sondages

	Stampien	Dépôts lagunaires à continentaux, jusqu'à 500m	Sondages
	Oligocène supérieur	Conglomérats et marnes, 10m	Affleurements
	Ludien	Argiles rouges, grès, calcaires lacustres à saumâtres, 20m	
	Eocène inférieur	Sables, grès et argiles bariolées, 25m	Carte géologiques Nîmes 1971
Mésozoïque	Barrémien sup.	Calcaires de faciès urgonien, 100m	Carte géologique Nîmes, 1971
	Barrémien inf. -supérieure - moyenne -inférieure	Calcaires de faciès urgonien, 200 à 300m Calcaire à chailles et marnes 100-150m Calcaires 300m à l'Ouest et 50m à l'Est	Carte géologique Nîmes, 1971
	Hautérvien sup.	Calcaires, 100 à 200m	Carte géologique Nîmes, 1971
	Hautérvien inf.	Calcaires et calcaires argileux, 300 à 400m	Carte géologique Nîmes, 1971
	Valanginien	490m	Sondage profond Nîmes 1
	Berriasien	190m	Sondage profond Nîmes 1
	Jurassique sup.	900m	Sondage profond Nîmes 1

** A des cotes voisines de 80mètres, le long du piémont des garrigues s'observent des traces de rivages marqués par des surfaces nivelées, perforées de trous de pholades et recouvertes de galets calcaires très arrondis. Le toit du Pliocène est à 80m au Sud de Garons et à 50m près de Redessan. Il s'abaisse en Vistrenque jusqu'à des cotes négatives en aval de Caissargues. Il s'enfonce encore plus profondément au Sud de Bellegarde sous la Camargue.*

2.2.4. Contexte structural

Située aux confins de la plaine côtière du Languedoc et de la basse vallée du Rhône, la région de Nîmes comprend quatre domaines bien différenciés (Illustration 5) :

- au Nord-Ouest, les Garrigues sont constitués de collines et de plateaux de calcaires d'âge Crétacé inférieur d'origine marine. Plissée au Tertiaire, cette entité est limitée au Sud par la faille de Nîmes ;
- au centre, le plateau des Costières, dont la surface est couverte par des alluvions rhodaniennes du Quaternaire ancien. Ces formations détritiques couronnent une importante série tertiaire. La partie occidentale déprimée des Costières est la plaine de la Vistrenque, largement occupée par l'agglomération nîmoise ;

- la partie sud-est de la feuille (carte géologique au 1/80 000 de Nîmes), basse et quadrillée de canaux, appartient au domaine camarguais ;
- le Nord-Est de la zone est plus complexe. Le confluent du Rhône et du Gardon y forme la limite sud-est des collines d'Avignon, mosaïques d'affleurements crétacés, miocènes, pliocènes et quaternaires.

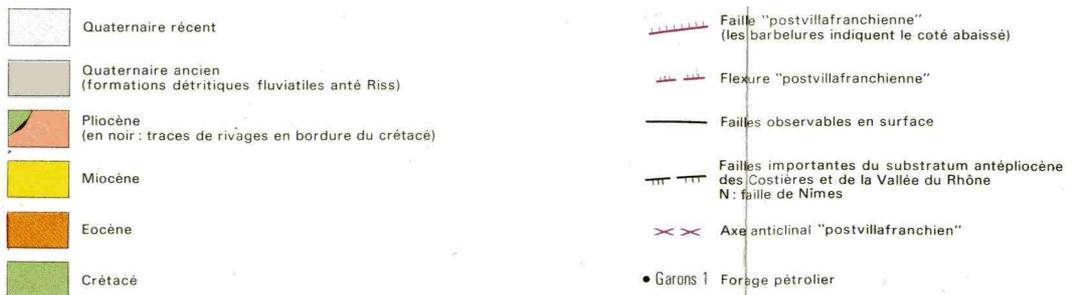
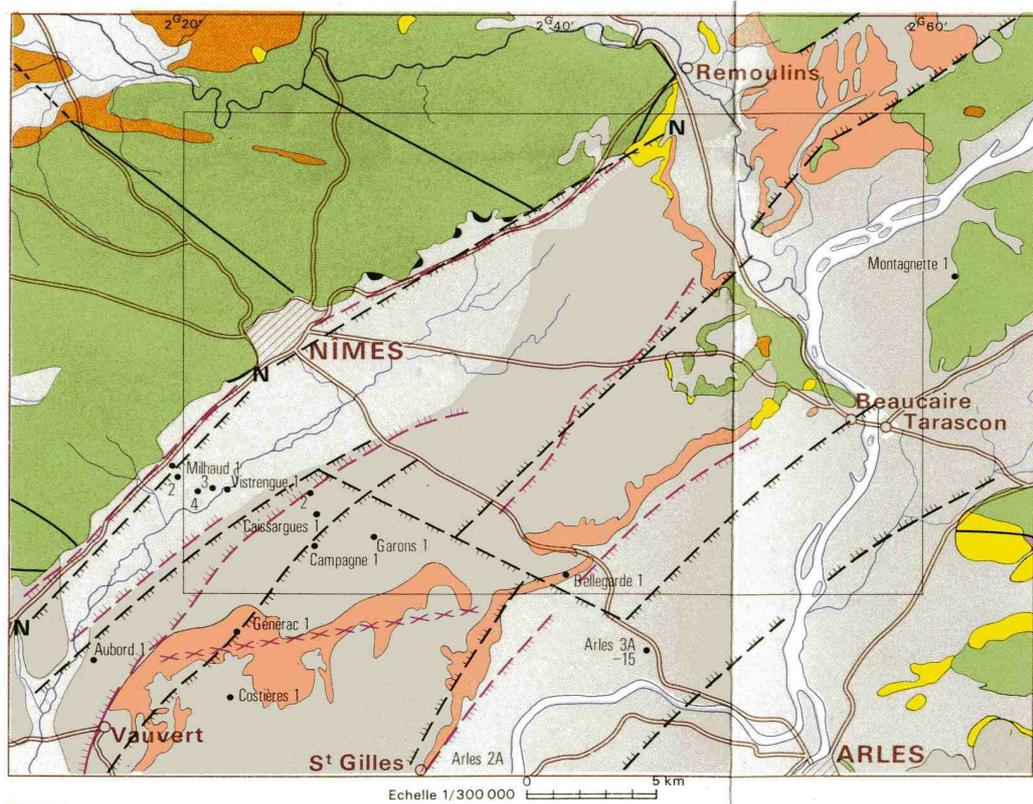


Illustration 5 : Schéma structural et géologique de la région de Nîmes (carte géologique à 1/50 000 de Nîmes (1971))

La région nîmoise appartient au domaine de la marge du Golfe du Lion ; celle-ci est divisée en deux grands domaines structuraux depuis la bordure externe (au Nord-Ouest) vers la zone interne (au Sud-Est) (Illustration 6, Benedicto, 1996) :

- le **domaine de décollement** de la couverture mésozoïque-éocène sur le socle paléozoïque entre la faille des Cévennes et la faille de Nîmes, soit au niveau de la partie externe de la marge. Ce domaine est caractérisé par la présence de failles listriques (failles proches de l'horizontale, ayant une forme de cuillère concave vers le haut) qui se couchent à la base de la couverture dans le Trias marneux et évaporitique. Ces failles contrôlent des demi grabens ou des synclinaux de bloc supérieur sur rampe ;
- le **domaine d'extension** du socle anté-triasique au Sud-Est de la faille de Nîmes. Ce domaine est connu grâce aux données de sismique réflexion, de gravimétrie et des anomalies magnétiques. Il est caractérisé par des failles d'échelle crustale à pendage faible entre la faille de Nîmes et la faille Nord-Pyrénéenne et par des blocs basculés associés à des failles sur un décollement à très faible pendage.

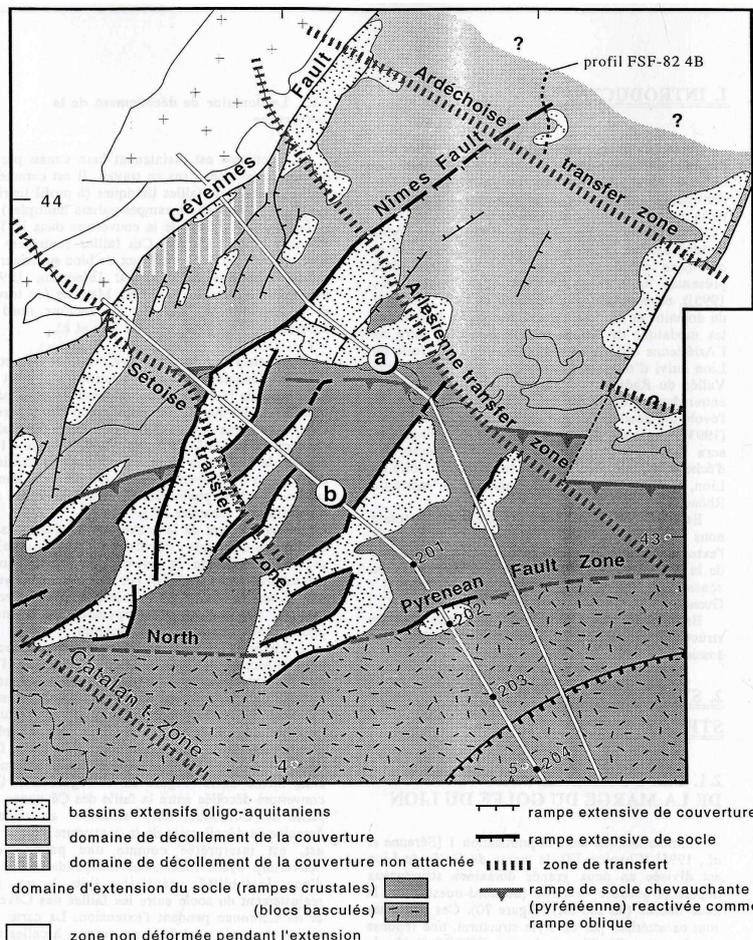


Illustration 6 : Schéma structural régional (Benedicto, 1996)

Grâce à de nombreuses données de subsurface (gravimétrie, puits profonds et sismique réflexion), le bassin de Camargue est connu comme le plus profond dépôt-centre tertiaire de la marge du Golfe du Lion. Il est limité au Nord-Ouest par la faille de

Nîmes de direction NE-SW. Les données gravimétriques et la corrélation des puits profonds montrent que le bassin de Camargue est constitué par deux grabens majeurs :

- le graben de Vistrenque, le long de la faille de Nîmes ;
- le graben de Vaccarès plus à l'Est.

Ces grabens sont séparés par une zone haute, le horst d'Albaron et limités au Sud par une autre zone haute le horst du Grau du Roi-Saintes Maries.

2.2.5. Structure et géométries de la zone de transfert de l'Arlésienne axe de déformation préférentiel régional

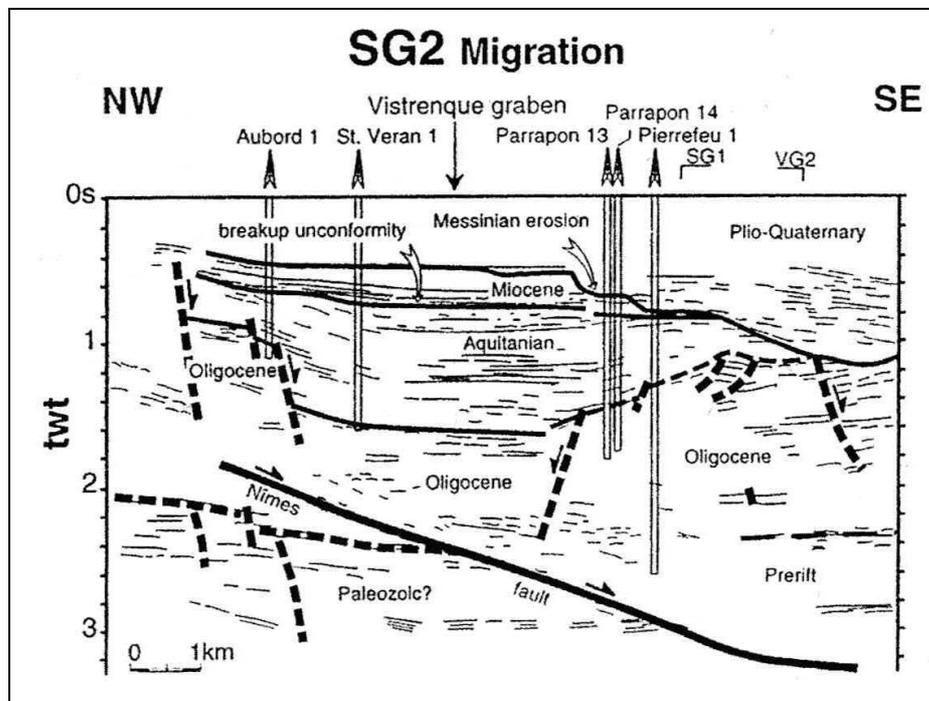


Illustration 7 : Coupe sismique référencée SG2, transversale au bassin de la Vistrenque (Benedicto, 1996)

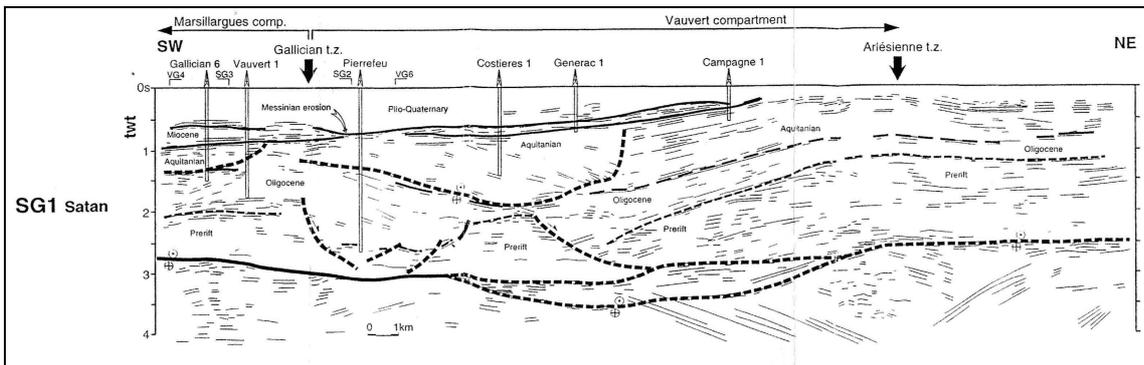


Illustration 8 : Coupe sismique référencée SG1 longitudinale au bassin de la Vistrenque (Benedicto, 1996)

La problématique structurale est un élément fort pour la compréhension des phénomènes dans le bassin de la Vistrenque d'une façon générale et autour de la source karstique de la Fontaine de Nîmes en particulier. La compréhension des géométries des corps sédimentaires et de la structure passe par l'examen de la sismique disponible (Benedicto, 1996 ; Illustration 7 et Illustration 8). On retrouve très bien les principaux ensembles structuraux que sont :

- le substratum paléozoïque ;
- le prérift mésozoïque, - le synrift Oligo-miocène inférieur lié à la subsidence tectonique et le Miocène moyen lié à la subsidence thermique séparés par la breakup unconformity² ;
- l'incision messinienne ;
- le remplissage plioquaternaire.

On retrouve de même dans ces grands ensembles structuraux les principales phases tectoniques suivantes :

- émergence de la chaîne dès le Cénomaniens avec présence de Karts alumineux (Aunay, 2000) ;
- plissement du domaine pyrénéo-provençal avec paroxysme au Bartonien ;
- tectonique cassante d'âge Oligocène suivant des failles Sud-Ouest / Nord-Est ;
- tectonique post langhienne et prémessinienne ;
- basculement plioquaternaire.

La spécificité des profils sismiques étudiés par rapport à la problématique de la source karstique de la Fontaine de Nîmes se situe dans la zone de transfert de l'Arlésienne,

² Breakup unconformity : surface sédimentaire et sismique repère qui marque le passage entre la période de synrift, marquée par la subsidence tectonique, et la période post-rift, marquée par de la subsidence thermique.

concrétisée sur la ligne sismique SG1 par un important bombement post miocène moyen et pré messinien d'amplitude verticale d'environ 800 mètres vers le Sud et un peu moins vers le Nord. Cette zone de transfert est une structure trans domaines telle qu'elle est cartographiée sur l'illustration 9 (Benedicto, 1996). Elle a des conséquences importantes en tant que zone structurale préférentielle notamment dans les massifs carbonatés des Garrigues pour des problèmes de déformation d'extrados ; ce bombement constitue une surface d'altitude plus élevée pouvant permettre le développement de structures de drainage au sein des massifs carbonatés karstifiables. Dans le bassin des Costières ce bombement va avoir un rôle majeur dans la distribution des karsts barrés au cours du Néogène.

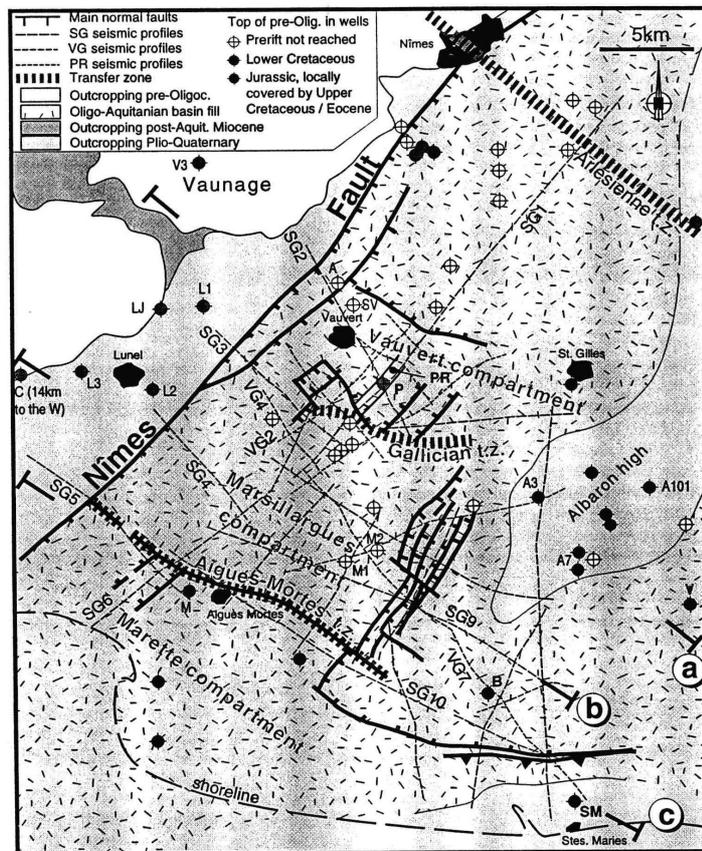


Figure 3. Structural framework of the Vistrenque graben showing location of data base and cross sections. Boreholes cited in the text or reported on line drawings (Plate 1) are: V3, Vaunage 3; LJ, La Jassette; L1, Lunel 1; L2, Lunel 2; L3, Lunel 3; A, Aubord; SV, Saint Veran; P, Pierrefeu; A3, Albaron 3; A7, Albaron 7; A101, Albaron 101; M, Marete; M1, Montcalm 1; M2, Montcalm 2; B, Baumelles; V, Vaccarès; SM, Saintes Maries 101. PR, Parrapon salt exploitation; t.z., transfer zone; a, b and c, cross sections of Figure 6.

Illustration 9 : Cadre structural du graben de la Vistrenque montrant la situation des données de la subsurface et des coupes sismiques recensées dans la Thèse de Benedicto (1996)

2.2.6. La faille de Nîmes

Il s'agit d'un linéament majeur de direction NE-SW. Ses différents jeux relatifs sont polyphasés. Ils totalisent 800 mètres de rejet minimum. La faille de Nîmes sépare le domaine des Garrigues du fossé des Costières et du fossé de Pujaut. D'après Platel (1994), le faisceau faille de Nîmes / Pujaut est un dispositif analogue en relation avec le socle profond. Dès le Crétacé inférieur, la faille joue en décrochement sénestre et ce jeu se perpétue durant la phase pyrénéo-provençale. Lors de la distension oligocène, la faille joue en jeu normal. Le compartiment nord (positif) est celui des Garrigues de Nîmes, tandis que le compartiment sud (négatif) est celui des plateaux des Costières.

La faille de Nîmes contrôle le graben de la Vistrenque sur rampe plane (Platel, 1994). Son jeu principal serait d'âge Stampien – Aquitaniens (Menillet et al. 1973). La faille de Nîmes tend vers l'horizontale dès huit kilomètres de profondeur (Dercourt, 1997). Benedicto (1996) souligne d'une part que la faille de Nîmes forme une rampe crustale d'angle faible (25°) et que dans la partie sud du Graben de la Vistrenque, il existe une géométrie listrique de la faille avec un remplissage divergent de l'Aquitaniens et de l'Oligocène.

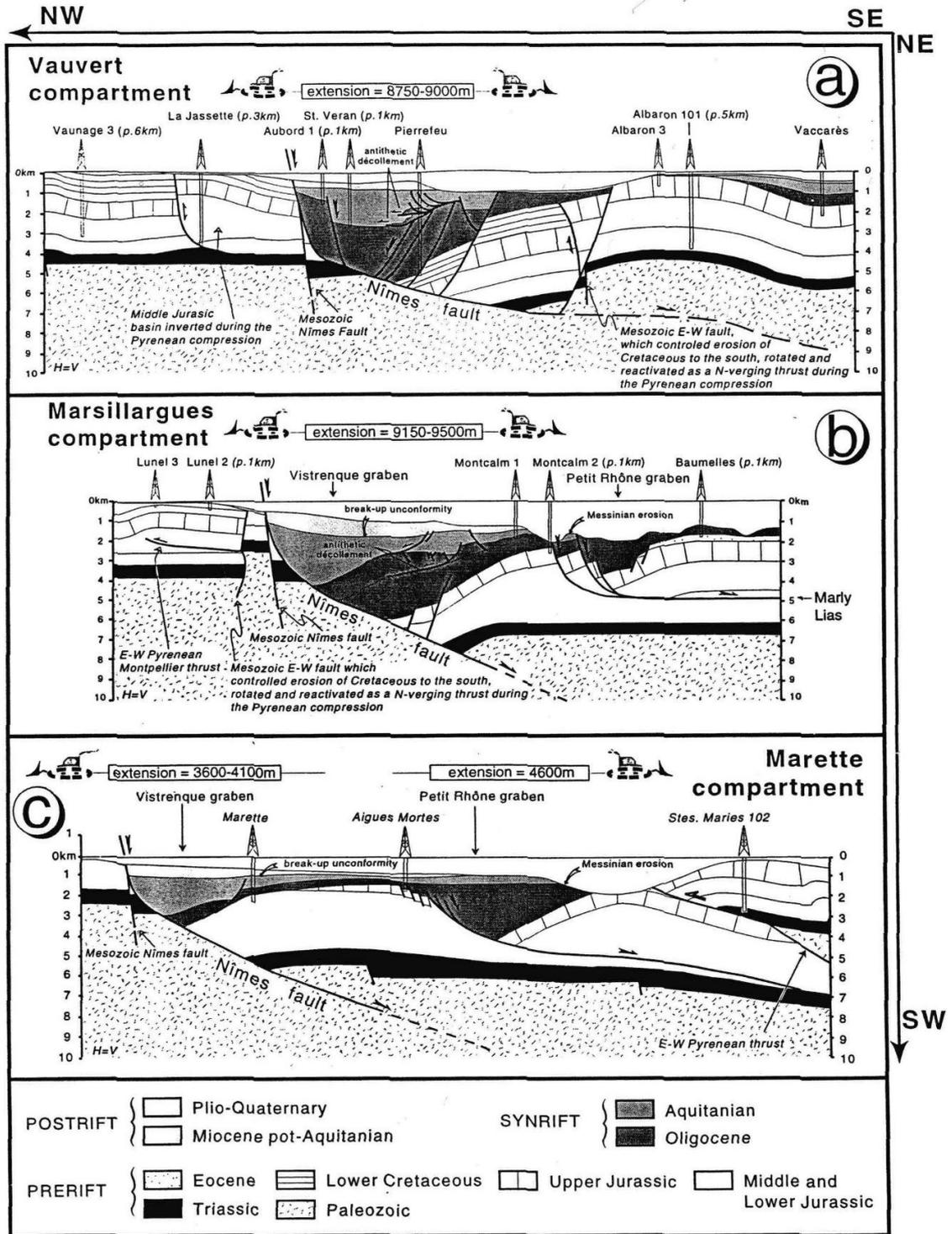


Illustration 10 : Coupes géologiques transversales référencées « a , b , c » du compartiment de Vauvert de Marsillargues et de Murette (Benedicto, 1996)

2.2.7. Paléosurfaces

Les grandes formes d'aplanissement de la région des Garrigues nîmoises marquent autant les paysages que l'histoire géodynamique de la région. Les paléosurfaces matérialisent ainsi la réaction aux agents atmosphériques d'un paysage face à des événements eustatiques (variation du niveau de la mer Méditerranée) et climatiques. Les dépôts sédimentaires sur ces surfaces planes ne sont pas marqués par des directions de dépôts, et sont nommés pédiments. Les paléosurfaces résultent d'un façonnement qui prend place sur plusieurs millions à dizaines de millions d'années. Ainsi, suivre l'évolution des paléosurfaces permet d'apporter des éléments dans la reconstitution de l'histoire géologique et de marquer les événements fondamentaux d'une région, telle que la région des Garrigues nîmoises.

La méthodologie d'étude des paléosurfaces comprend trois étapes, une première de cartographie, avec le traitement du modèle numérique de terrain qui permet de mettre en évidence les surfaces de pente comprise entre 0 et 3%, une deuxième étape de synthèse bibliographique concernant les gisements de faune associés à ces sédiments et une troisième étape de terrain afin d'identifier et de relier les morphologies entre elles.

Ce travail a été effectué par B. Aunay en 2000 dans le cadre d'un mémoire de stage de fin d'étude d'ingénieur géologue (IGAL).

A la suite de l'application de cette méthodologie, deux paléosurfaces ont été identifiées ; la difficulté d'identifier les surfaces sur le terrain est liée notamment à l'occupation de la végétation. La première surface recouverte de terra rossa (sol fossile composé d'argile rouge, résidu de la dissolution des calcaires avec un appauvrissement en SiO_2 et un enrichissement en Fe_2O_3) est située au nord de Poulx et de Cabrières. La deuxième surface est située au lieu dit le « Bois » entre Parignargues et Clarensac ; cette surface est recouverte d'altérites jaune-orangées (ocre) caractéristiques de climat méditerranéen. Cette formation est légèrement détritique. La première paléosurface à terra rossa date du Crétacé supérieur (altitude supérieure à 200 m NGF) ; la deuxième surface est située à une altitude de 170 mètres NGF, permettant de la désigner de manière relative comme plus jeune que la première.

2.2.8. Remplissages karstiques

Une trentaine d'affleurements de remplissages karstiques ont été observés par B. Aunay (2000) (tableau Illustration 11 et Illustration 12). Ils concernent les formations calcaires suivantes :

- n3a : Hauterivien inférieur (calcaires et calcaires marneux) ;

- n3b : Hauterivien supérieur (calcaires argilo-gréseuses en bancs épais très fissurés, karstifiés) ;
- n4a1 : Barrémien inférieur (calcaires contenant des chailles, discordants et transgressifs sur l'Hauterivien supérieur ; il comprend une forte dominante de marnes sur lequel prennent place les calcaires barutéliens (calcaires blancs à gris légèrement crayeux) ; le Barrémien inférieur se termine par des marnes discordantes sur les calcaires cités précédemment) ;
- n4a3 : Barrémien inférieur – marnes et bancs calcaires intercalés ;
- n4aB : Barrémien inférieur – calcaires « barutéliens » ;
- n4bU : Barrémien supérieur (puissante série de calcaire blanc très pur oolithique).

Différents types de remplissage de karst ont pu être identifiés et étudiés ; une chronologie des différents types de dépôts associés au fonctionnement des karsts a pu ainsi être proposée. Les karsts à encroûtement ferrugineux sont associés à la période de bauxitisation et de ferralisation intense du Crétacé supérieur lors de l'émergence de l'isthme durancien (continentalisation). Ainsi la karstification des Garrigues Nîmoises a débuté dès le Crétacé supérieur. Les Karsts à terra rossa fonctionnent depuis le Crétacé moyen jusqu'à l'actuel. Les karsts à argile rutilante proviennent de la déstabilisation des karsts à bauxites, et ainsi leurs sont postérieurs ; tous ces karsts sont fossiles (post Crétacé moyen à Eocène). En deux endroits de la zone d'étude, des remplissages de type argile marmorisée ont été observés ; ils sont associés à la phase tectonique de l'Eocène. Les karsts à remplissage conglomératique (gros galets de quartz) sont caractéristiques de l'épisode fluviatile intense du Miocène supérieur. Les karsts à remplissage jaune brun et riche en calcrètes se seraient remplis au cours du Pliocène. Aucun karst à remplissage quaternaire associé aux glaciations successives (formation de terrasses emboîtées) n'a été observé à l'échelle de la zone d'étude.

Référence cartes	Altitude (en mètre)	Type de remplissage	Particularités	Contenant
1	185	induré	induré, jaune, unique	n4bU
2	180 - 195	Terra Rossa	petites poches ponctuelles, sur une cinquantaine de mètres le long de la route.	n4bU
3	90	silt et sable carbonaté	Jaune, poreux, très friable, tubules. Poches métriques rares et éparses.	n3a
6	150	Terra Rossa	Poche métrique situé à une dizaine de mètre au-dessus de la route	n3b
9	195	Terra Rossa	Poche plurimétrique, aspect rougeâtre de la roche en général	n4bU
10	100	Argiles marmorisées + encroûtements ferrugineux	Remplissage bariolé, jaune, blanc, lit de vin + encroûtement oxydé	n3a
11	90	Argiles marmorisées	Carrière de Courbessac-Villevieille	n3a
12	80	Argiles marmorisées	Poche à plusieurs mètres de haut	n3a
15	120	Argiles marmorisées + encroûtements ferrugineux	sur 5-6 m de long + oxyde sur les parois	n3a
16	120	Argiles marmorisées	2 poches métriques	n3b / n3a
17	120	Argiles marmorisées	20 m de long	n3b
18	130	Terra rossa + encroûtements ferrugineux	aspect rougeâtre de la roche en général	n3b
19	140	Terra Rossa	aspect rougeâtre de la roche en général	n4a1
20	185	Encroûtements ferrugineux	Couleur rouille, orange. Reflets rappelant l'hématite	n4bU
21	85	Remplissage jaune marron, riche en calcrète	Poches métriques dans le sanctuaire de Santa-Cruz	n3a
22	115	Remplissage jaune marron, riche en calcrète	poches inframétriques et éparses	n3a
24	167	Remplissage jaune marron, riche en calcrète	Présence de manganèse (wad)	n4a3
25	178	Terra rossa		N4a3
26	185	Terra rossa		n4bU
27	200	Terra rossa + encroûtements ferrugineux	aspect rougeâtre de la roche en général	n4bU
28	175	Terra rossa		n4bU
29	100	Conglomérats à galet de quartz	Bien conservé et massif	n4bU
32	75	Gisement de Nîmes	Différentes générations de remplissage	n3b
33	180	Terra rossa	Paléolapiez rempli de Terra rossa	n3b
35	155	Terra rossa		n3b
36	120	Argile rutilante	Affleurements dans la carrière et sur le bord de la route	n4a
37	124	Terra rossa	Nombreuses petites poches décimétriques	n4a1
44	152	Remplissage jaune marron, riche en calcrète	Poches métriques	n4aB
45	110	Remplissage jaune marron, riche en calcrète	Poches métriques	n4aB
46	87	Conglomérats à galet de quartz	Pendage de plus de 30°	n4bU
47	70	Conglomérats à galet de quartz	Pendage de plus de 40° (même direction et sens que précédemment)	n4bU

Illustration 11 : Liste des affleurements de remplissages karstiques observés (Aunay, 2000)

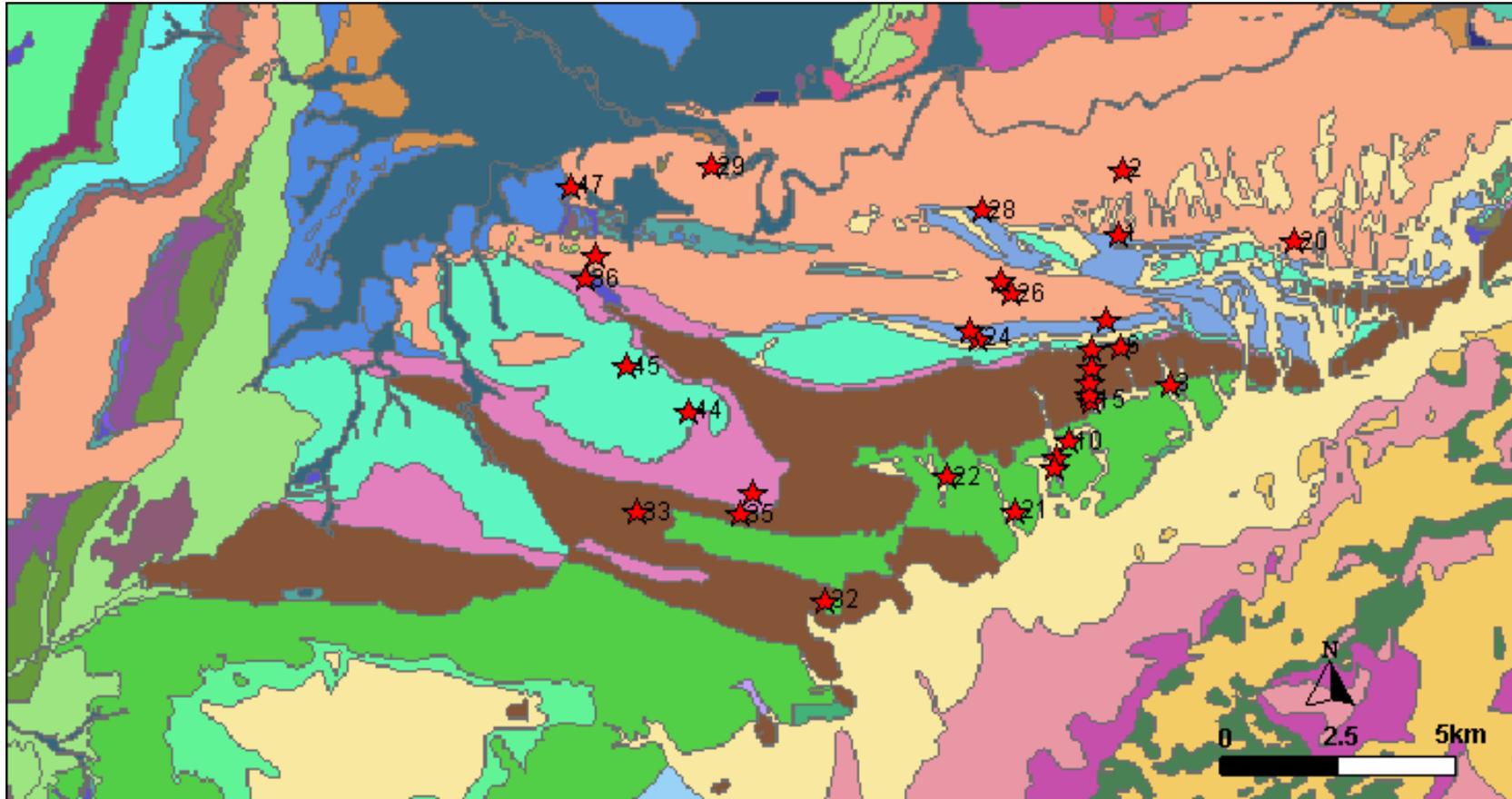


Illustration 12 : Localisation des affleurements de remplissage de Karst (d'après Aunay, 2000).

2.3. GEOMETRIE DES PRINCIPAUX AQUIFERES

2.3.1. Données disponibles

Les données disponibles sont les cartes géologiques à 1/50 000 de Nîmes, Sommières, d'Anduze et d'Uzès. Par ailleurs un certain nombre de forages de la Banque des données du sous sol du BRGM ont été sélectionnées et examinées. Ils sont portés sur la carte de situation.

2.3.2. Cartes d'isohypses et isopaques des niveaux aquifères

Les principaux niveaux aquifères sont les calcaires sous faciès urgonien du Barrémien supérieur essentiellement et ceux de l'Hauterivien supérieur. Une analyse plus détaillée a été faite sur les calcaires urgoniens du fait du grand nombre de données disponibles sur ces niveaux. Il a été en effet possible d'élaborer une carte du toit de la formation et une carte des épaisseurs. En ce qui concerne l'Hauterivien supérieur seule des indications d'épaisseurs sont fournies (Illustration 13, Illustration 14).

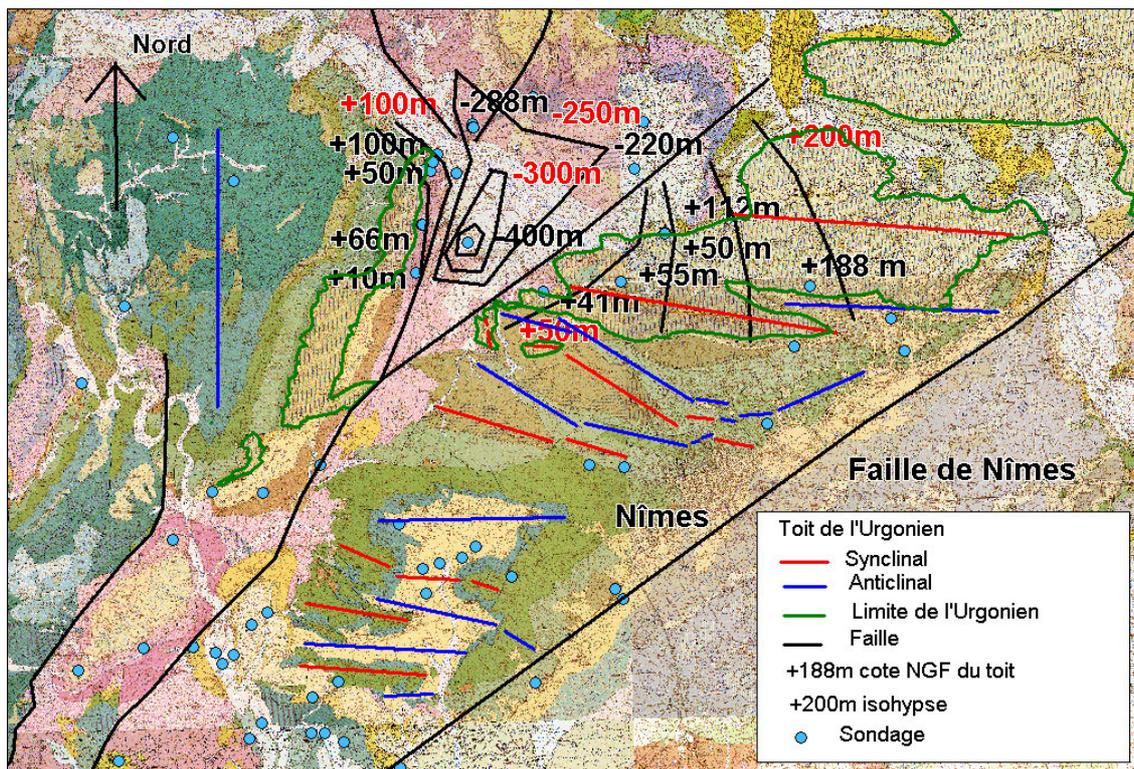


Illustration 13 : Carte des isohypses de la formation carbonatée de faciès Urgonien du Barrémien supérieur du secteur nîmois.

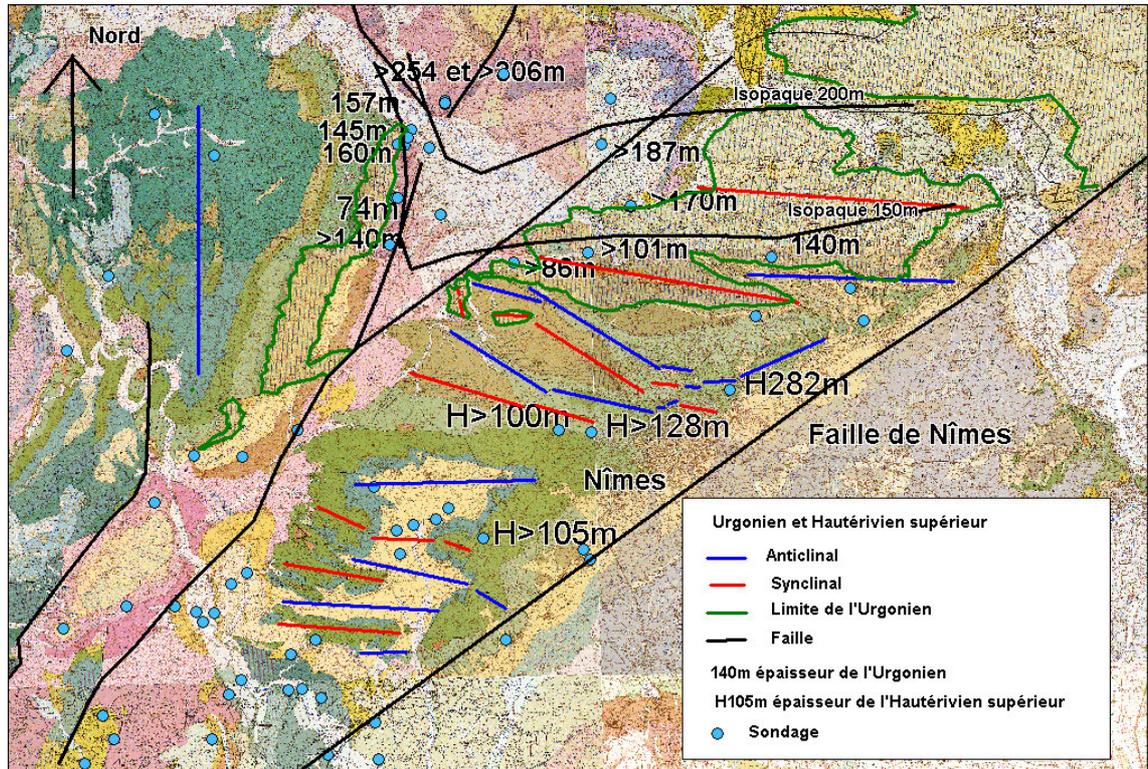


Illustration 14 : Carte des isopaques (égale épaisseur des formations carbonatées de l'Urgonien (Barrémien supérieur) et de l'Hautérivien supérieur) de la région nîmoise.

2.3.3. Analyse croisée de la géométrie et de l'hydrogéologie

L'analyse des cartes d'affleurements, des géométries géologiques et des données de forages permet de mettre en évidence des structures plissées d'axe globalement Ouest-Est tout le long de la bordure ouest de la faille de Nîmes. Ce couloir de déformations plicatives perdure à l'Ouest jusqu'à Parignargues où une autre faille d'orientation NE – SW délimite cette première zone d'un fossé oligo-miocène. Ces successions d'anticlinaux et de synclinaux sont également mises en évidence au niveau des coupes transverses NW-SE (Illustration 15 et Illustration 16).

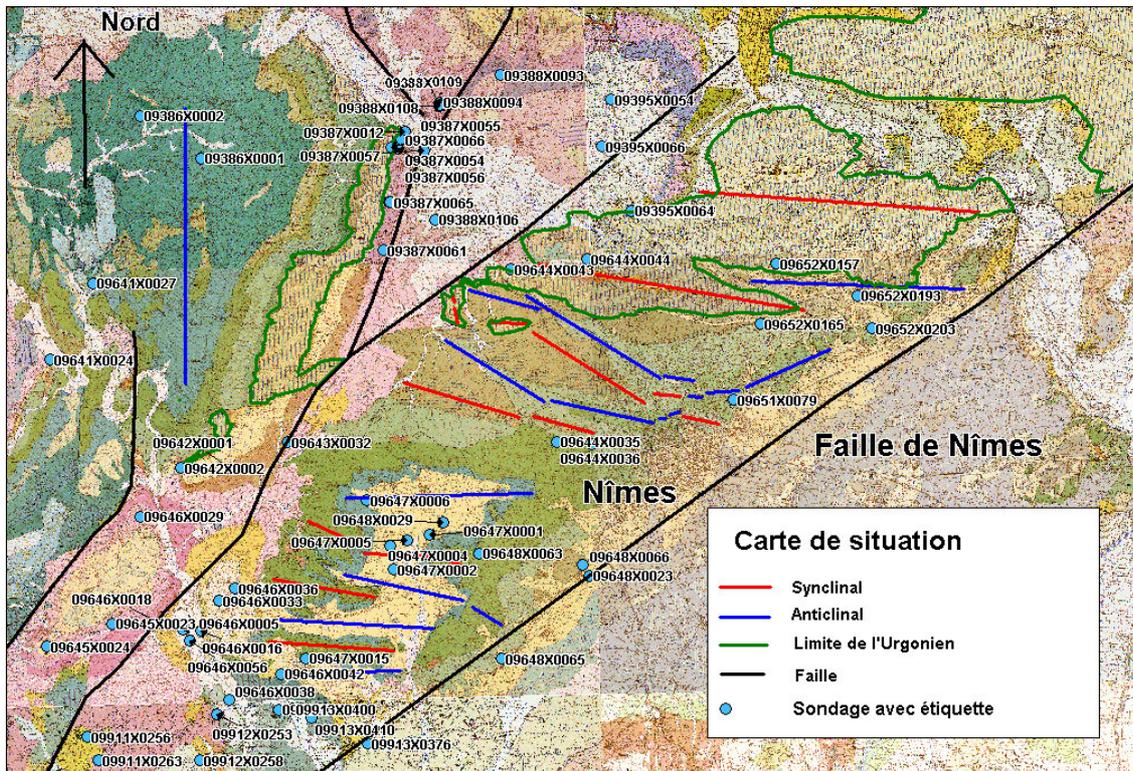


Illustration 15 : Carte de situation des principaux traits structuraux (axes synclinaux et anticlinaux, failles) de la région nîmoise et des sondages géologiques de la Banque de données souterraines du Brgm.

Ces structures se terminent à l'Ouest par l'apparition d'un anticlinal crétacé d'axe Nord Sud.

Du point de vue des connexions entre les réservoirs une première remarque concerne l'Urgonien. Ce dernier affleure essentiellement au Nord de Nîmes sous forme de bassins perchés au sein de synclinaux et d'anticlinaux d'axe Est-Ouest. Il paraît difficile ainsi d'établir des connexions géologiques et hydrogéologiques entre ce réservoir et la Fontaine de Nîmes du fait de sa disposition structurale.

De même les prolongements vers l'Ouest de cette formation est limitée par le fossé oligocène de St Mamert ou l'épaisseur de l'Urgonien est donnée comme avoisinant les 300 mètres alors qu'il n'est que de 150m au Nord de Nîmes.

L'Hautérivien supérieur, autre réservoir carbonaté, est lui par contre bien connecté structurellement avec la Fontaine de Nîmes et affiche des épaisseurs supérieures à la centaine de mètres aux environs de Nîmes.

Il semble ainsi que lorsque l'on considère les données géologiques et hydrogéologiques, la résurgence de la Fontaine de Nîmes est l'exutoire du réservoir aquifère que constituent les formations calcaires de l'Hauterivien supérieur. La formation urgonienne est quant à elle déconnectée tant géographiquement que structurellement de la formation calcaire aquifère associée à la résurgence de la Fontaine de Nîmes.

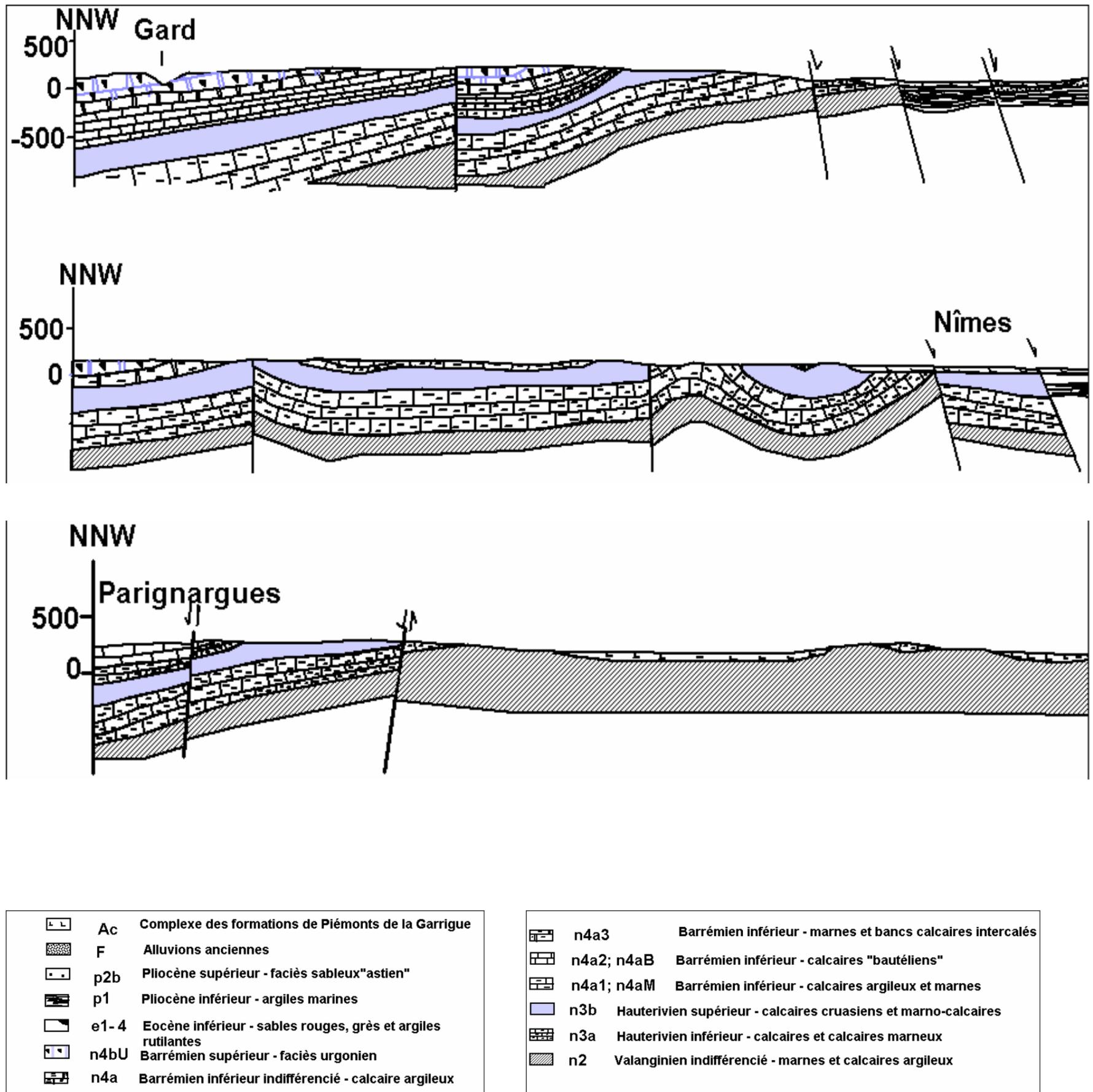


Illustration 16 : Coupes géologiques transverses NNW-SE du secteur nîmois et légende (d'après Aunay, 2000)

2.3.4. Synthèse

Les données de l'histoire structurale et sédimentaire régionale des karsts régionaux (Le Strat, 2004, Camus 2004 et Aunay et al. 2004 soumis), les données sismiques ainsi que les données de l'analyse des profils de dépôts montrent que le karst des Garrigues nîmoises, dont l'exutoire principal est la source de la Fontaine de Nîmes, est étroitement lié aux événements tortonien-messinien du point de vue stratigraphique et à la zone de transfert de l'Arlésienne du point de vue structural.

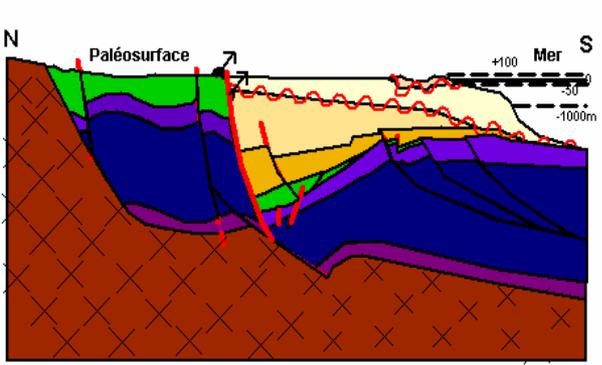
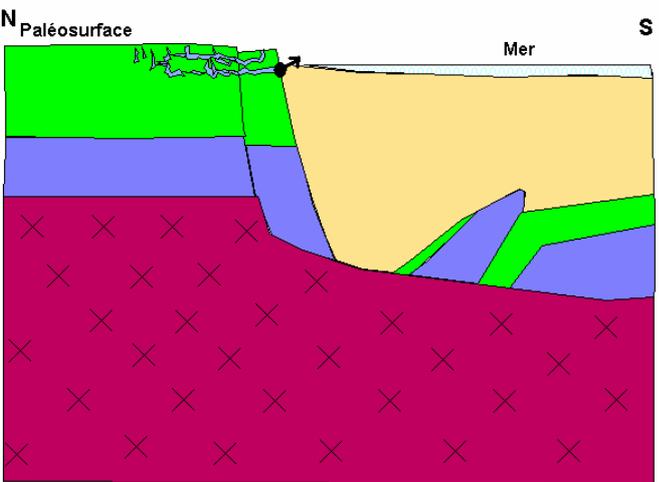
La karstification des formations calcaires de la région des Garrigues nîmoises débute dès l'émersion de la chaîne Pyrénéo-provençale avec l'événement tectonique à 100 Ma [Albien, Crétacé supérieur] (collision de l'Espagne et de l'Europe) et l'apparition de l'isthme durancien (haut-fond émergé existant depuis l'Ariège jusqu'à la Provence dès l'Aptien, env. 115 Ma). Cette karstification a perduré pendant toute la période compressive de l'orogénèse pyrénéenne soit du Crétacé supérieur au Bartonien (env. 40Ma). La période en distension du synrift (Oligocène-Langhien) enclenche une période de sédimentation à l'accommodation qui a comme principale conséquence de générer sur les reliefs une période de non incision et la création de la surface fondamentale. C'est à partir de cette période que la karstification concernant le système karstique de la Fontaine de Nîmes débute : le dernier niveau marin transgressif enregistré dans les formations du Miocène marin est connecté avec la surface fondamentale à une altitude d'environ 100 mètres. Le niveau actuel de la Fontaine de Nîmes est à 53m NGF. Ce niveau est matérialisé sur les profils sismiques par un doublet de formations sus-jacent à une discontinuité (breakup unconformity) : c'est le niveau de base de référence pour les karst du Miocène supérieur.

L'histoire moderne de la karstification de la région nîmoise commence après la genèse de la paléosurface fondamentale soit vers 13 Ma [Serravalien, Miocène moyen] (Ambert, 1994).

La tectonique et les variations eustatiques influencent la mise en place de la karstification. La tectonique liée à l'événement post langhien et prémessinien ont affecté les formations sédimentaires du bassin miocène, comme en atteste l'inclinaison des molasses de Montfrin sur les profils sismiques. Le niveau marin chute à -50m pour se stabiliser autour de 20m NGF au Tortonien (Miocène sup.). Cette dynamique affecte le domaine des Costières, le domaine des Garrigues nîmoises restant relativement stable comme en témoigne la paléosurface fondamentale : 100m NGF, son niveau de base d'origine. Lors de la crise messinienne, le niveau marin chute jusqu'à -1500 mètres ; l'incision messinienne qui en résulte atteint -1000 mètres dans le bassin de Vauvert. Le karst des Garrigues nîmoises fonctionnant déjà comme un karst barré, dû à la présence des séries miocènes en amont de l'incision, n'est ainsi pas directement influencé par cette crise. Le remplissage de la ria pliocène (post-messinienne), l'embouchure fluviale envahie par la mer à la suite d'une transgression marine, par les séries marines argileuses et sableuses sus-jacentes va ainsi obturer les exutoires marins jusqu'à l'altitude de +80m NGF; le niveau marin pliocène est visible au niveau des affleurements de phollades perforées sur le versant nord de la faille de Nîmes. L'affouillement et les remplissages quaternaires ramènent le niveau des affleurements

actuels des séries sédimentaires quaternaires vers +50m NGF, ce qui correspond à la zone d'émergence de la Fontaine de Nîmes.

En résumé le système karstique de la Fontaine de Nîmes est un karst dont l'histoire essentielle débute dès le Serravalien (même si la région a été karstifiée dès l'événement à 100 Ma) soit juste après la création de la paléosurface fondamentale qui voit son amplitude augmenter lors des évènements tortono-messiniens (présence du bombement de l'Arlésienne et incision messinienne) et qui se voit barré par les remplissages miocènes et pliocènes dans un premier temps et quaternaires dans un second temps. La fontaine de Nîmes n'est que l'exutoire perché d'un système qui possède un potentiel karstifiable théorique qui peut atteindre jusqu'à plus de 1000m au niveau du bassin de Vauvert. Au niveau de Nîmes, le potentiel karstique ne doit pas excéder les 100 mètres ; le système karstique a été barré jusqu'à +80 m par les sédiments pliocènes et enfin +50 m par les séries quaternaires (Illustration 17).

Période (Ma)	Evolution paléogéographique schématique	Commentaires
Actuel		<p>La source de la Fontaine de Nîmes est située à + 50m, en position de karst barré par les sédiments miocènes, pliocènes et quaternaires. La Fontaine est un exutoire perché.</p>
Miocène supérieur (13 Ma)		<p>Le développement du système karstique prend place entre +100 et -1000 m dans le bassin de Vauvert.</p> <p>La paléosurface fondamentale est mise en place.</p>

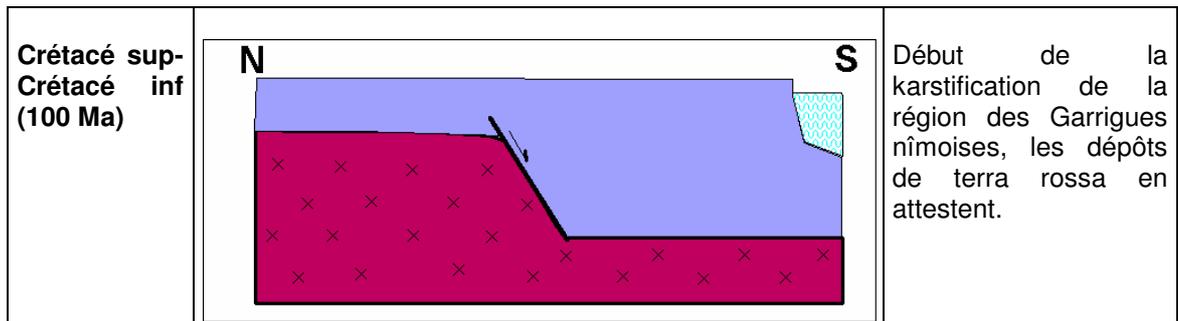


Illustration 17 : Tableau synthétique de l'évolution et de la mise en place de la karstification des formations carbonatées de la région nîmoise.

2.4. DELIMITATION DU BASSIN D'ALIMENTATION

Au vu des données antérieures d'essais de traçage, des observations géologiques revisitées, et des résultats des interprétations hydrogéologiques et hydrochimiques (§ 4.3.6, 4.4. et 6), le bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes a une superficie comprise entre 45 et 60 km². Cette superficie est une superficie minimale compte tenu du fait que la source de la Fontaine de Nîmes est une source de débordement et de l'existence d'écoulements souterrains en direction de la nappe de la Vistrenque au travers de la faille de Nîmes (Illustration 18)

Le bassin proposé, encore hypothétique à ce stade de l'étude, s'étend de l'Ouest à l'Est de Parignargues (pertes de la source de Parignargues et source de la Font de St-Pierre) à l'Est de Nîmes (Courbessac), et du Nord au Sud de la limite méridionale du Camp des Garrigues à la Fontaine de Nîmes. Ce bassin d'alimentation inclut en partie les bassins versants des cadereaux ; les écoulements souterrains des bassins versants de Pondre et Valdegour ne semblent pas être dirigés vers la Fontaine de Nîmes tout comme pour le bassin versant du cadereau de Valladas (extrémité orientale).

Du point de vue géologique, ce bassin est constitué d'une succession de plis d'orientation est-ouest ; les formations aquifères sièges des écoulements souterrains sont principalement les formations carbonatées de l'Hauterivien supérieur, de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. La limite nord du bassin se situe au niveau du contact avec les formations marneuses du Barrémien supérieur. Certains accidents ont été considérés comme pouvant jouer un rôle de limites imperméables au niveau du bassin d'alimentation.

Les résultats hydrochimiques des analyses des eaux prélevées à la Fontaine de Nîmes et au sein du réseau karstique laissent supposer la participation des formations carbonatées de faciès Urgonien (cf § 6.2). A ce stade des interprétations, du point de vue géologique, il est difficile d'étendre le bassin d'alimentation aux formations urgoniennes situées à l'Ouest du fossé de St-Mamert, d'autant plus que ces formations sont drainées vers le Creux de la Fontaine à St-Geniès de Malgoire (traçages) en rive

droite du Gardon. Une extension possible pourrait être envisagée au Nord au niveau du camp des Garrigues, bien que cette surface urgonienne apparaît comme étant perchée et indépendante des circulations des eaux souterraines du système de la Fontaine de Nîmes. Des analyses géochimiques complémentaires permettant d'intégrer la variabilité temporelle de la signature des eaux caractéristiques des différentes formations géologiques permettront d'infirmier ou de confirmer la contribution des eaux souterraines provenant des calcaires à faciès urgonien. Si nécessaire un ou plusieurs essais de traçage artificiels pourront être réalisés pour infirmer ou confirmer cette hypothèse.

L'ordre de grandeur de la superficie du bassin d'alimentation paraît cohérente, la délimitation exacte du bassin d'alimentation dans un contexte karstique reste plus délicate ; elle repose sur des mises en évidence de connexions hydrauliques par essais de traçage, sur des éléments géologiques et des hypothèses sur le rôle de certaines failles vis à vis de l'hydraulique.

3. Débit de la Fontaine de Nîmes

3.1. TARAGE DE LA SOURCE

3.1.1. Equipement de mesures

a) Objectif de l'équipement

La connaissance précise des débits de la Fontaine de Nîmes, était un point clé pour la compréhension du fonctionnement du système karstique dont elle est l'exutoire principal. Il s'agissait de pouvoir disposer de chroniques de débits, en particulier lors des épisodes de crue, où la rapidité (et aussi parfois la violence) des événements pluvieux ne permet pas d'envisager des mesures par jaugeages, qui, en outre, ne pourraient être que ponctuelles.

De plus, il s'agissait d'établir une courbe de tarage entre les débits de la Fontaine et le niveau d'eau dans l'aven Mazauric sur une période de chroniques concomitantes, ceci afin de reconstituer une chronique des débits depuis 1998, à partir des mesures de niveau de l'aven que le BRGM assure depuis cette date.

Il a donc été décidé d'installer un débitmètre pour assurer une mesure en continu du débit de la Fontaine de Nîmes.

b) Choix du type d'équipement

Après consultation, le choix s'est porté sur un débitmètre à ultrasons de marque Ultraflux, qui permet la mesure de débit pour les écoulements à surface libre en canaux, rivières, etc. La différence de temps de transit des ultrasons permet de connaître la vitesse moyenne d'écoulement entre deux sondes (« corde ») placées de part et d'autre de l'ouvrage (Illustration 19). La connaissance des vitesses sur chacune des cordes, du niveau d'eau, et de la géométrie de l'ouvrage, permet alors à l'appareil de calculer par intégration le débit moyen dans la section comprise entre les sondes.

Le recours à des mesures de vitesses sur plusieurs cordes permet d'assurer une mesure précise même par fortes fluctuations de niveaux d'eau (basses et hautes eaux par exemple). Le choix du nombre de cordes dépend de la forme de l'ouvrage, des particularités amont et aval, et de la précision souhaitée.

Les avantages de ce type d'appareil sont en particulier :

- de disposer d'une large gamme de mesures, depuis les vitesses très lentes (en période d'étiage par exemple), jusqu'aux plus rapides (périodes de crues) ;

- d'intégrer les vitesses sur toute la section, ce qui limite les incertitudes liées à la non prise en compte des variations du champ de vitesses sur la section (par exemple, profils de vitesses modifiés sur les bords et le fond, etc.) ;
- de permettre, en jouant sur le nombre de cordes, des mesures de débits que l'ouvrage soit peu ou complètement rempli.

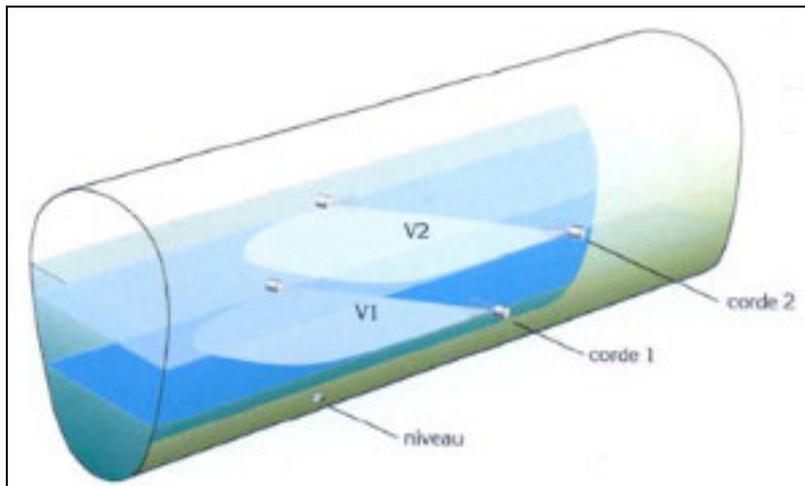


Illustration 19 : Principe de mesure du débit par ultrasons : exemple de mesure des vitesses sur deux cordes (Plus d'info sur : <http://www.ultraflux.fr/produits/uf322co.htm>)

c) Description de l'installation

Après visite du site avec la société 2G Métrologie qui a assuré l'installation de l'appareil, il a été décidé de faire la mesure du débit de la Fontaine de Nîmes en aval des jardins, sur une section du canal de la Fontaine située juste en amont du pont de Vienne (Illustration 20). Ce choix a été motivé par plusieurs raisons :

- il était impossible d'installer l'appareil en amont au niveau des jardins (séparation des écoulements en plusieurs canaux) ;
- l'écoulement dans le canal est stabilisé par la présence d'un seuil amont ;
- la présence du pont de Vienne permettait une installation du matériel relativement discrète et à l'abri des hautes eaux « classiques ».

Deux cordes ont été choisies, pour permettre de rendre compte des débits à la fois en période d'étiage et pour les forts épisodes pluvieux (Illustration 21) :

- la première corde a été placée environ 40 cm sous le niveau d'eau minimal imposé par la présence du seuil aval (et repéré par des traces de mousse sur les murs du canal). Les deux sondes sont donc quasiment toujours immergées, excepté lors des périodes de vidange du canal ;

- la seconde corde a été placée à environ 30 cm au-dessus de ce niveau moyen des eaux, pour rendre compte des hautes eaux. Elle n'est immergée que lors des forts épisodes pluvieux.

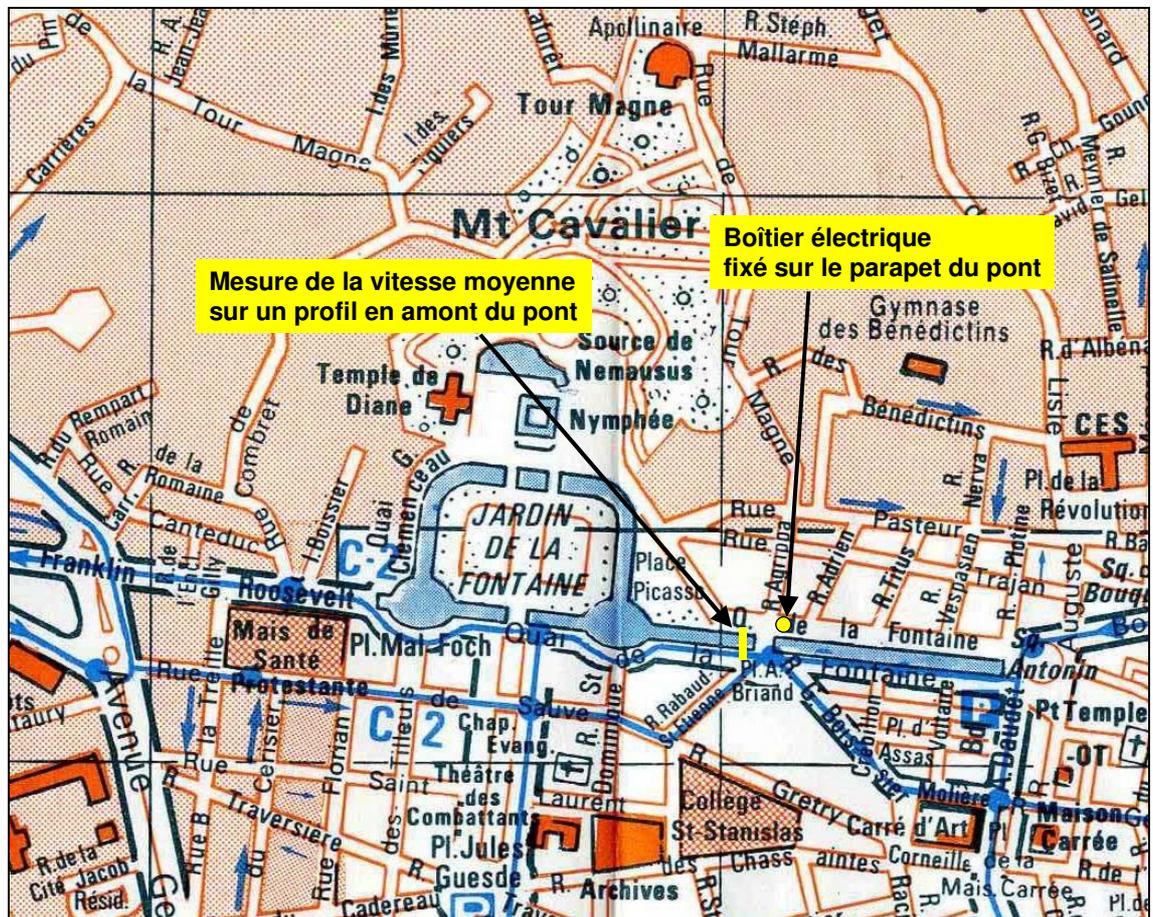


Illustration 20 : Plan de situation du débitmètre installé sur la Fontaine de Nîmes

L'installation a été effectuée en juin 2004, à la faveur d'une vidange du canal de la Fontaine. Le schéma global de l'installation est donné page suivante (Illustration 22). L'installation comporte les éléments suivants :

- quatre sondes à ultrasons réparties sur deux cordes ;
- un capteur de pression pour la mesure du niveau d'eau dans le canal, situé en rive gauche juste en aval du pont de Vienne ;
- un coffret électrique fixé sur le parapet du canal (Illustration 23), et contenant le logiciel d'acquisition et d'intégration des données Ultraflux, un modem GSM pour l'interrogation des données à distance, et une batterie 12V rechargeable, reliée au réseau 220V de l'éclairage public du pont de Vienne (elle se recharge donc lors des heures de fonctionnement de l'éclairage).

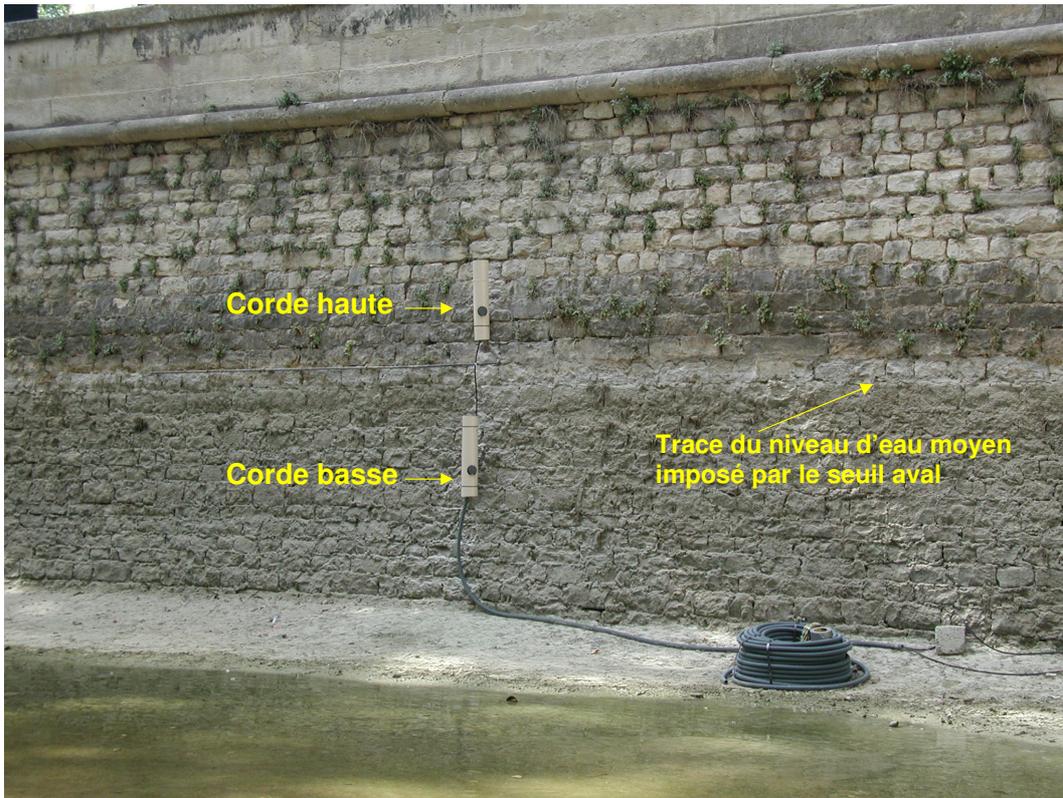


Illustration 21 : Position des deux cordes installées dans le canal de la Fontaine

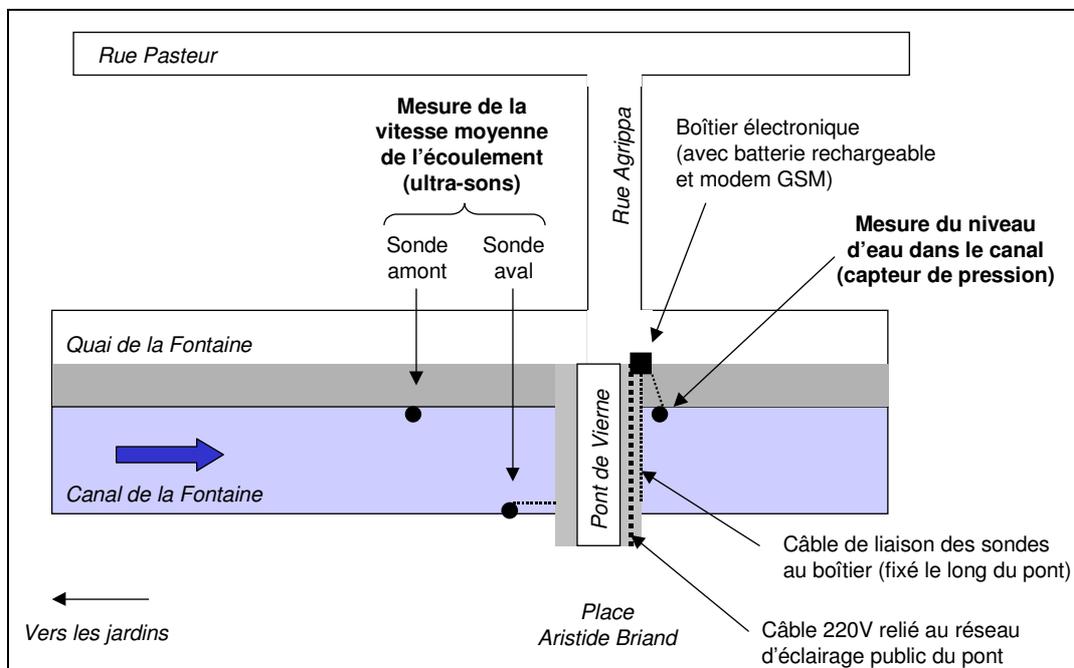


Illustration 22 : Schéma global de l'installation du débitmètre

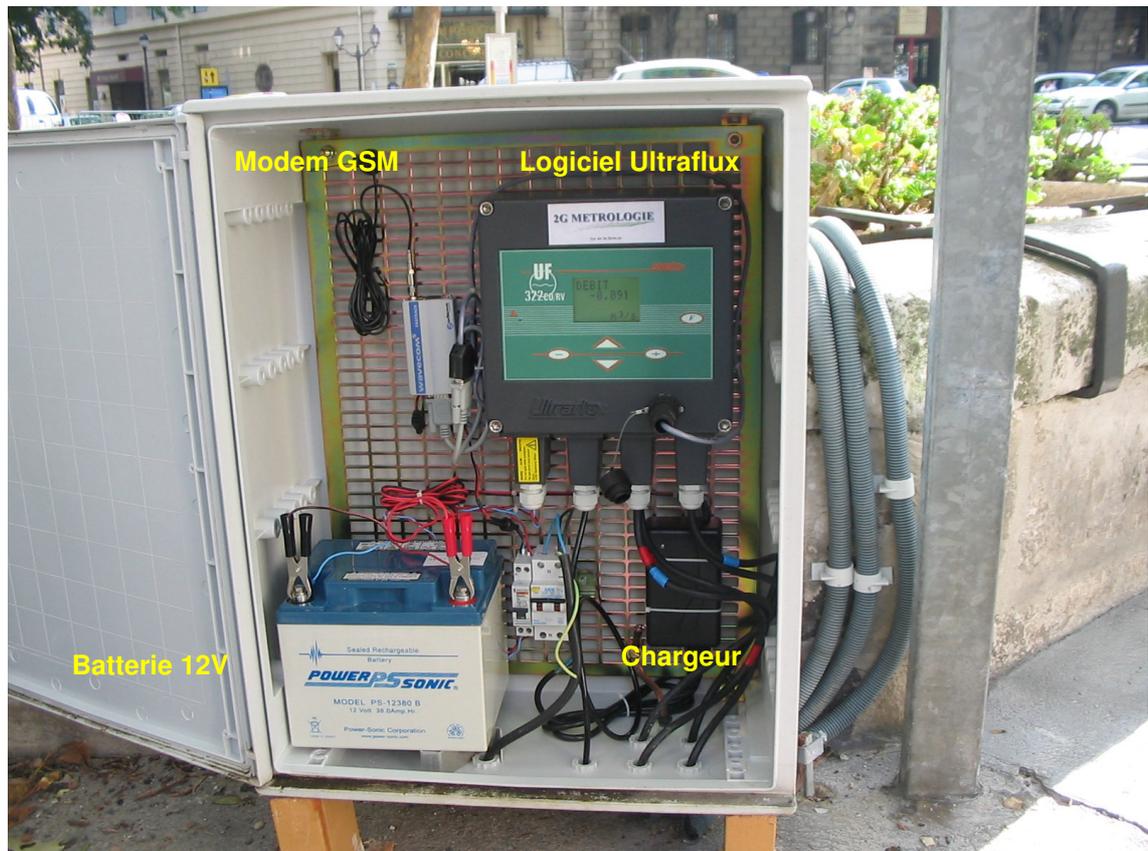


Illustration 23 : Intérieur du coffret électrique

Les sondes à ultrasons sont reliées au coffret électrique par un câble de liaison, qui, initialement, avait été fixé au fond par des pattes métalliques. Ces fixations ayant été arrachées, ce câble de liaison sera fixé en aérien le long du pont de Vienne, lors d'une intervention sur le site en avril 2005.

Au moment de l'installation, la société 2G Métrologie a effectué un relevé précis de la géométrie de la section du canal par visée infrarouge.

d) Acquisition et interrogation des données

Les données de niveaux d'eau, de vitesses moyennes sur les deux cordes, et de débit moyen intégré sur la section, sont mesurées toutes les secondes, et enregistrées au pas de temps de 15 minutes (les valeurs enregistrées correspondent alors à la moyenne des mesures sur les 15 minutes). Ce pas de temps court est intéressant pour rendre compte des variations rapides de vitesses et de débits, en particulier lors des épisodes orageux. La capacité de la carte mémoire de l'appareil est de 340 jours au pas de temps de 15 minutes.

Les données sont téléchargées depuis le BRGM de Montpellier via la liaison modem GSM.

3.1.2. Courbe de tarage

Le niveau de la Fontaine de Nîmes étant mesuré par le brgm depuis 1998 au moyen d'une sonde piézométrique installée dans l'aven Mazauric, l'établissement de la courbe de tarage piézométrie Mazauric - débit Fontaine permet de reconstituer les débits de la Fontaine depuis cette date, c'est-à-dire bien antérieurement à l'installation du débitmètre.

La courbe de tarage a été analysée sur des valeurs de piézométrie et de débit observées entre le 27 octobre 2004 et le 17 décembre 2004. La mise en service du débitmètre le 27 octobre 2004 et son fonctionnement durant trois épisodes de crue (Illustration 24) les 28-29 octobre 2004 ($Q_{\max} \approx 3 \text{ m}^3/\text{s}$), les 4-5 novembre 2004 ($Q_{\max} \approx 16 \text{ m}^3/\text{s}$) et le 17 décembre 2004 ($Q_{\max} \approx 5,5 \text{ m}^3/\text{s}$) a permis d'obtenir la relation piézométrie – débit sur une gamme assez large.

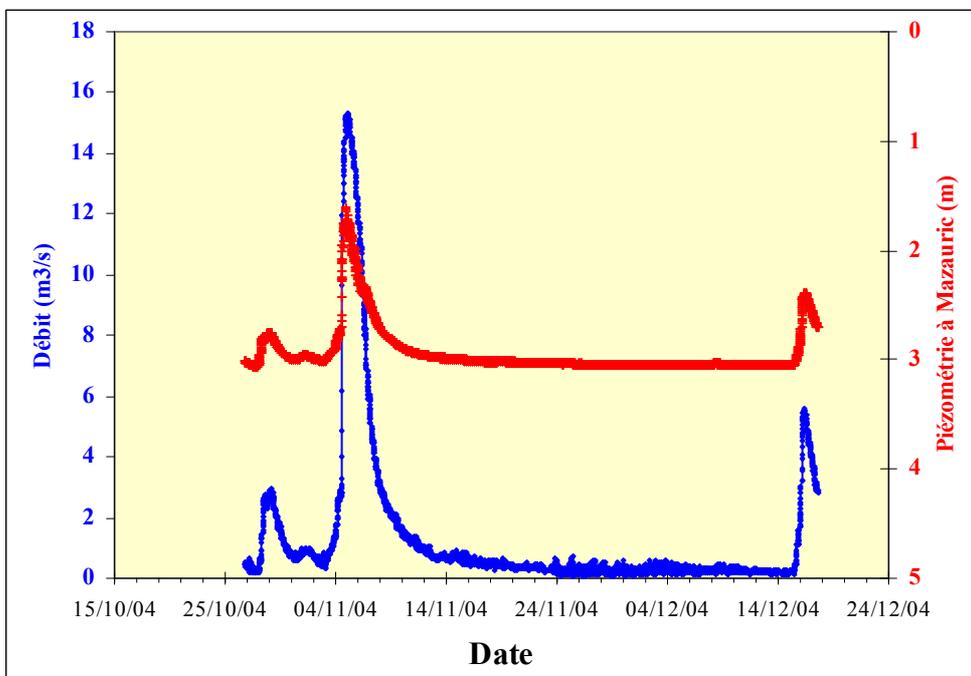


Illustration 24 : Débit à la Fontaine et piézométrie à l'aven Mazauric, mesurés entre le 27 octobre 2004 et le 17 décembre 2004

Suite à des oscillations du champ de vitesses du courant dans le canal de la Fontaine, des oscillations de débit sont observées (Illustration 24) et la relation piézométrie Mazauric – débit Fontaine n'est pas univoque. Dès lors, des débits moyens ont été calculés pour chaque valeur de piézométrie observée à Mazauric. Ils permettent d'obtenir une courbe piézométrie – débit lissée (Illustration 25).

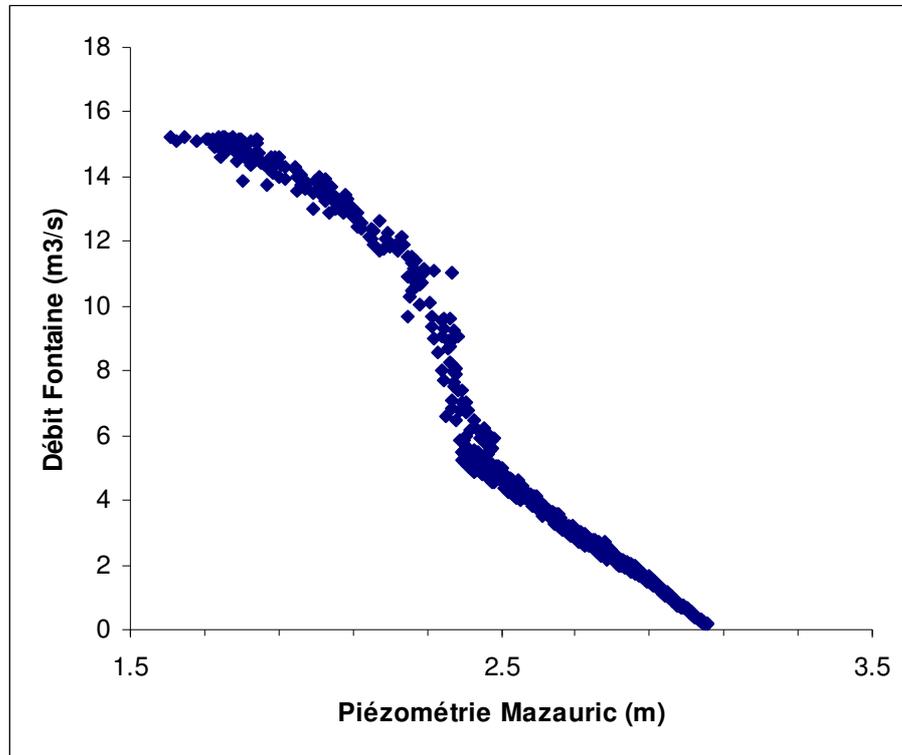


Illustration 25 : Relation piézométrie Mazauric – débit Fontaine observée entre le 27 octobre 2004 et le 17 décembre 2004

Cette courbe peut être subdivisée en quatre tronçons, ajustés indépendamment les uns des autres par des fonctions analytiques simples qui expriment le débit à la Fontaine (Q) en fonction de la piézométrie (H) à l'Aven (Annexe 1). Les fonctions analytiques employées sont énumérées, pour chaque tronçon, à l'illustration 26.

Tronçon	Fonction analytique	Coefficient de régression
$H \geq 3 \text{ m}$	$Q = 4.35 \times 10^{32} \times H^{-68.77}$	$R^2 = 0.984$
$2,5 < H < 3 \text{ m}$	$Q = -7.88 \times H + 24.33$	$R^2 = 0.99$
$2,25 < H < 2,5$	$Q = 24082 \times H^{-9.37}$	$R^2 = 0.83$
$H < 2,25$	$Q = 25.98 \times H^{-0.961}$	$R^2 = 0.85$

Illustration 26 : Relations analytiques de l'ajustement de la courbe de tarage

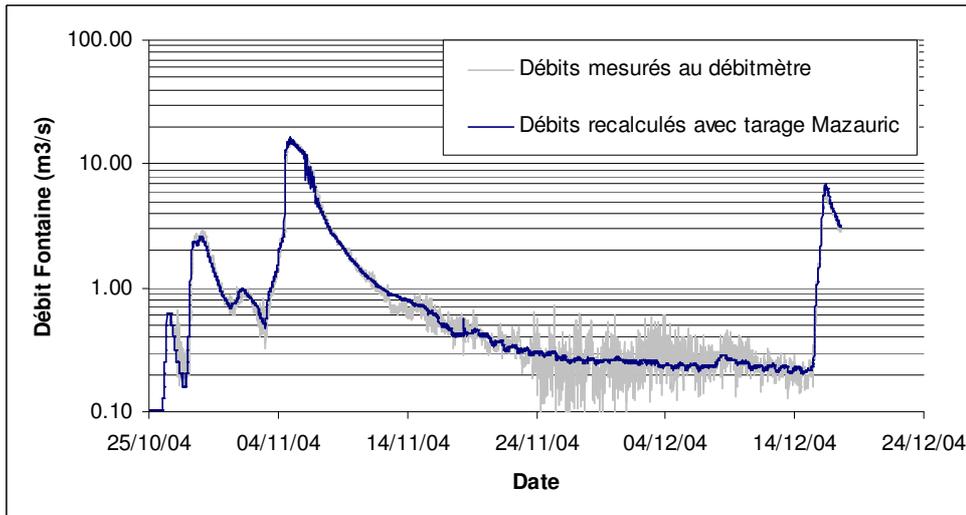


Illustration 27 : Comparaison entre les débits de la Fontaine mesurés au débitmètre et les débits recalculés à partir de la piézométrie à Mazauric et de la courbe de tarage

En utilisant les relations analytiques mentionnées ci-dessus, le débit de la Fontaine a été recalculé à partir de la piézométrie à Mazauric (Illustration 27). Les faibles écarts entre les débits de la Fontaine mesurés au débitmètre et les débits recalculés au moyen de la courbe de tarage montrent que l'approche est satisfaisante. La piézométrie à Mazauric permet donc de reconstituer de façon satisfaisante les débits de la Fontaine.

3.2. CHRONIQUES DE DEBITS

Grâce à la courbe de tarage obtenue et aux mesures de piézométrie à l'Aven Mazauric depuis octobre 1998, il est possible de reconstituer les débits de la Fontaine depuis cette époque (Illustration 28).

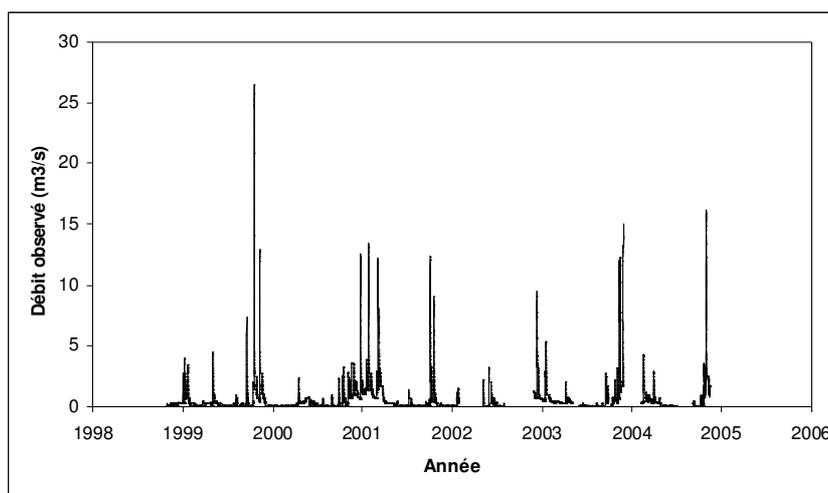


Illustration 28 : Débits observés à la Fontaine de Nîmes depuis octobre 1998

Les débits varient entre moins de 100 l/s en période d'étiage, généralement durant l'été, et 26.5 m³/s, valeur maximale observée le 21 octobre 1999. Ces valeurs sont en accord avec les premiers jaugeages effectués sur la Fontaine (Fabre et Guyot, 1984). Ceux-ci, effectués au micromoulinet en 1979, oscillaient entre 0,068 et 11,23 m³/s.

Des évènements dont l'amplitude est comprise entre 10 et 15 m³/s sont relativement fréquents ; huit ont été observés sur les six années entre 1998 et 2004. D'autres crues ont été manquées suite au dysfonctionnement de la sonde piézométrique ; parmi elles, la crue de septembre 2002. Par ailleurs, parmi les évènements récemment observés, on mentionnera :

- la crue du 4 novembre 2004 ($Q_{\max} \approx 16 \text{ m}^3/\text{s}$) ;
- la crue de décembre 2003 ($Q_{\max} \approx 15 \text{ m}^3/\text{s}$ au moment où la sonde piézométrique est tombée en panne).

4. Analyse du fonctionnement du système karstique de la Fontaine de Nîmes

4.1. ANALYSE DES DEBITS CLASSES

Cette méthode a pour objectif de caractériser les régimes d'écoulement observables sur un exutoire. Il s'agit d'identifier des événements particuliers de type mise en réserve, mise en fonctionnement d'un trop plein, fuites vers un autre système, etc à partir d'une analyse des modifications qu'ils induisent sur les hydrogrammes (Marsaud, 1997). Ces variations sont mises en évidence à partir de l'ajustement d'une loi statistique liant des classes de débit à leurs fréquences d'apparition.

Nous avons cherché à caractériser le comportement hydraulique de la Fontaines de Nîmes en considérant des classes de débit de $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ et $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivement, afin d'obtenir une bonne résolution pour les faibles débits ($< 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$) et forts débits ($> 5 \text{ m}^3/\text{s}$). L'analyse a été conduite indépendamment sur l'ensemble des données journalières (les résultats sont identiques avec les données horaires) disponibles sur la période du 29/10/1998 au 10/02/2005 (2290 valeurs de débit journalier) et également pour les cycles hydrologiques 1998-1999, 1999-2000 et 2000-2001, les cycles hydrologiques 2001-2002 ; 2002-2003 et 2003-2004 présentant trop de lacune. Seuls les résultats sur la période du 29/10/1998 au 10/02/2005 sont présentés ici, les informations de l'étude des cycles hydrologiques individualisés étant redondantes à ceux de l'étude globale.

Les ajustements réalisés sur l'ensemble de la chronique pour les deux critères de classe considérés sont présentés Illustration 29 et Illustration 30.

Sur l'illustration 29, deux ruptures ont été identifiées pour des valeurs de débit proche de $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$ (1^{ère} rupture) et pour des débits proches de $11 \text{ m}^3/\text{s}$ (2^{nde} rupture). Les traitements réalisés sur les chroniques individualisées (par cycle hydrologique) permettent également de mettre en évidence ces ruptures de pente pour des valeurs de débit comparables (figures non présentées). La première rupture se produit en contexte de moyennes et/ou de basses eaux pour une fréquence cumulée de 65 % environ. La seconde rupture (débit proche de $11 \text{ m}^3/\text{s}$) se produit, pour une fréquence cumulée proche de 99 % en contexte de forte crue. En moyennes et basses eaux, on montre que la pente α_2 est inférieure à α_1 . En période de très forte crue ($Q > 11 \text{ m}^3/\text{s}$), on observe que la pente de la droite α_3 est supérieure à α_2 . Les caractéristiques de la distribution permettent de mettre en évidence les points suivants (Mangin, 1971, Marsaud, 1996) :

- Lorsque le débit excède $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$, les propriétés hydrauliques du système changent, le système évacue plus facilement les eaux (les débits classés augmentent plus rapidement). Ce changement de comportement peut traduire :
 - une modification des conditions d'entrées (alimentation par les eaux ayant transité par l'épikarst lors des crues par exemple) ;

- (et/ou) une modification des conditions de sortie. Dans ce cas, les conditions de sortie des eaux apparaissent favorisées et peuvent également traduire une diminution de la capacité de stockage du milieu.
- Pour les débits inférieurs à $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$, le comportement du système est plus inertiel et traduit globalement la vidange des réserves. Notons que la médiane des débits (probabilité cumulé = 50%) est faible et correspond à $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Lorsque le débit excède $11 \text{ m}^3/\text{s}$, les propriétés hydrauliques du milieu changent de nouveau (changement de la pente), le système évacue moins facilement les eaux. Ce comportement peut traduire un problème dans la courbe de tarage pour les débits très élevés (débits sous estimés) ou la mise en fonction de trop-plein correspondant à des cavités à proximité de l'exutoire (une part des débits de crue échappe à la station de jaugeage). Cette dernière hypothèse est vraisemblable, mais demande néanmoins à être vérifiée par des observations de terrain lors des crues importantes.

Les formations du Quaternaire au contact avec les calcaires dans la zone d'émergence des sources jouent un rôle vraisemblablement important dans la dynamique des écoulements du système karstique. En effet, les formations du Quaternaire moins transmissives que le karst jouent le rôle d'un bouchon poreux et constituent un frein à l'écoulement (au-delà d'un débit de $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$ mesuré à la Fontaine). La source de la Fontaine de Nîmes semble apparaître comme une source de trop plein pour le système karstique.

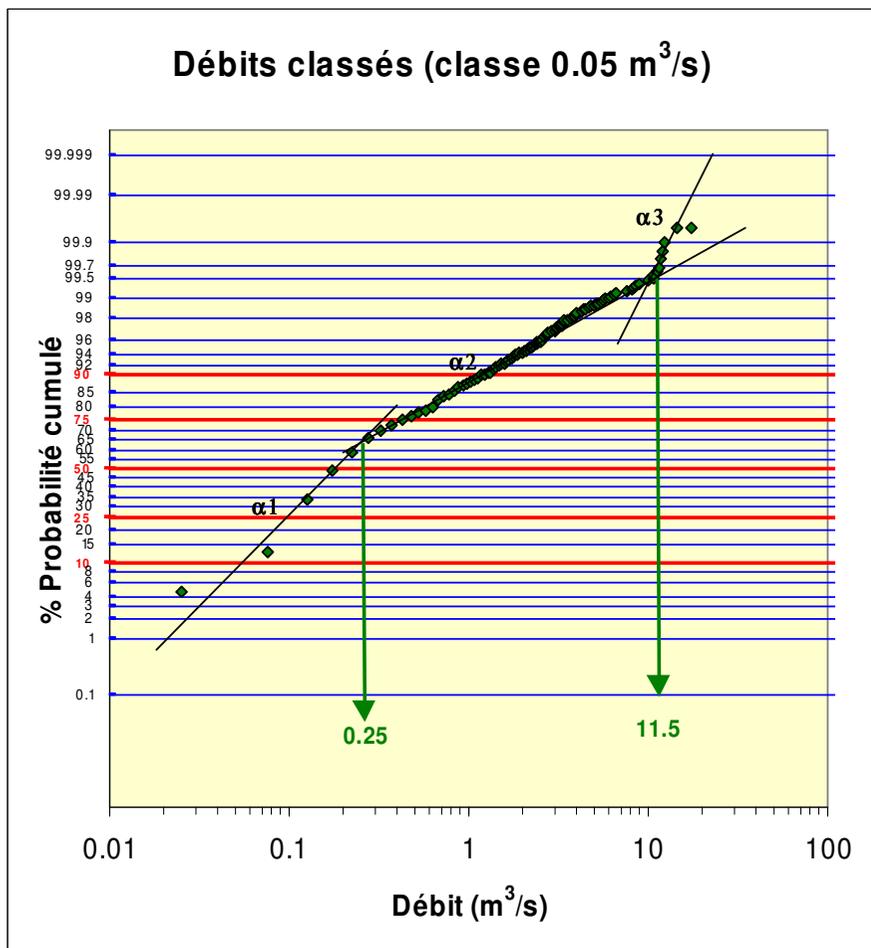


Illustration 29 : Débits classés de la Fontaine de Nîmes sur l'ensemble des données de la période 1998-2005, (classes de débit de 0,05 m³/s).

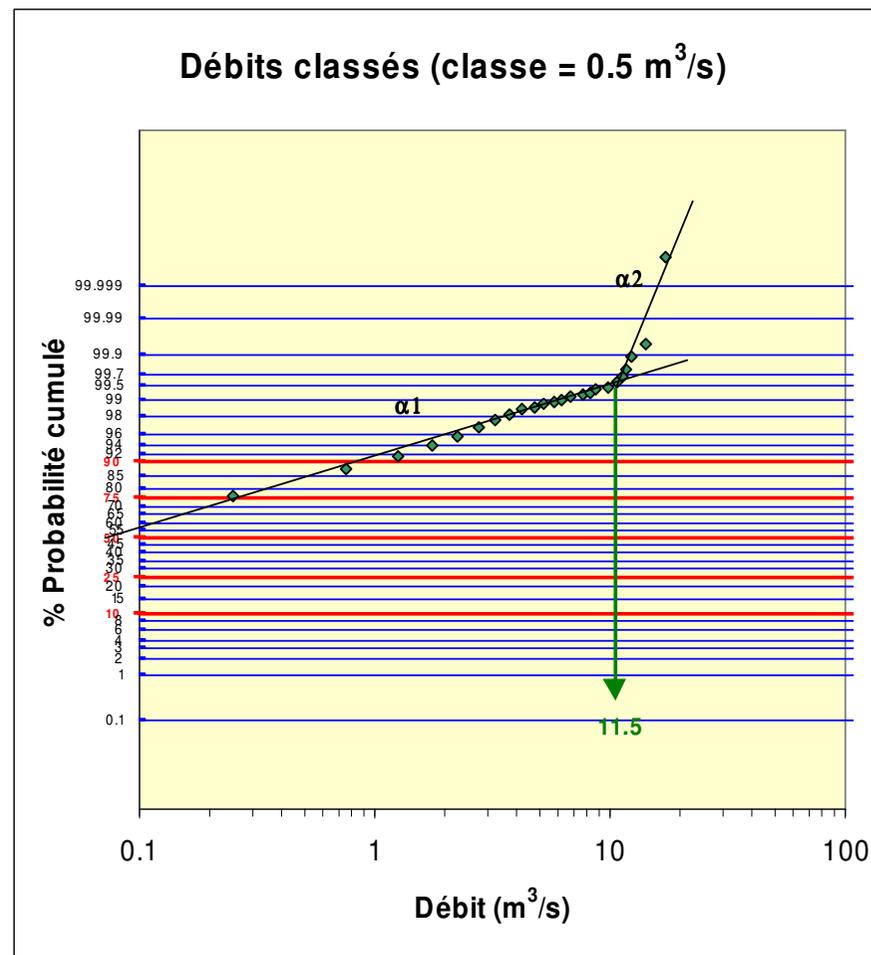


Illustration 30 : Débits classés de la Fontaine de Nîmes sur l'ensemble des données de la période 1998-2005, (classes de débit de 0,5 m³/s).

4.2. ANALYSE DES COURBES DE RECESSION

4.2.1. Principe de la méthode

L'analyse des courbes de récession consiste à étudier la partie décroissante de l'hydrogramme de crue d'une source, appelée récession, à partir d'un modèle de type global ou "boîte noire" qui assimile le système karstique à des réservoirs se vidangeant les uns dans les autres.

La méthode de l'analyse des courbes de récession des hydrogrammes des sources karstiques a été développée en 1970 par Mangin; elle repose sur la décomposition de l'hydrogramme résultant de la vidange d'un système conceptualisé par un modèle constitué de deux réservoirs indépendants représentant la zone noyée et la zone d'infiltration.

Deux parties peuvent être distinguées sur les courbes de récession et correspondent à un comportement hydraulique d'un des deux réservoirs définis :

- la décrue, durant laquelle l'infiltration influence la vidange du réservoir ;
- le tarissement, qui débute à l'instant où le débit d'infiltration devient nul, qui correspond à la vidange du réservoir de la zone noyée (réservoir principal) et qui n'obéit qu'à la loi de Maillet.

Le modèle possède donc deux réservoirs, un pour la zone d'infiltration qui se vidange avec un débit q , et un autre qui correspond à la zone noyée et qui se vidange avec un débit Q (Marsaud, 1996).

La description analytique du modèle se fait à l'aide de la formule suivante (Illustration 31) :

$$Q(t) = \varphi(t) + \psi(t) \quad (5)$$

Où $\varphi(t)$ décrit la vidange de la zone noyée et $\psi(t)$ se rapporte au fonctionnement de la zone d'infiltration.

Le modèle pour décrire la vidange de la zone noyée est le modèle de Maillet, décrit à l'aide de la formule suivante :

$$\varphi(t) = Q_{R0} * e^{-\alpha t} \quad (6)$$

avec α coefficient de tarissement. Le débit Q_{R0} ne possède aucune réalité physique, il correspond à l'extrapolation de la courbe de tarissement à l'instant de la pointe de crue.

Le modèle utilisé pour décrire la fonction d'infiltration a été établi de manière empirique à partir de l'analyse de nombreuses décrues et de l'infiltration dans une grotte (Mangin, 1970).

C'est une fonction homographique :

$$\psi(t) = q_0 \frac{1 - \eta t}{1 - \varepsilon t} \quad (7)$$

avec q_0 : débit d'infiltration à l'instant t_0 marquant la pointe de crue,

ε : coefficient d'hétérogénéité d'écoulement,

η : coefficient de vitesse d'infiltration, est égal à l'inverse du temps d'infiltration (t_i).

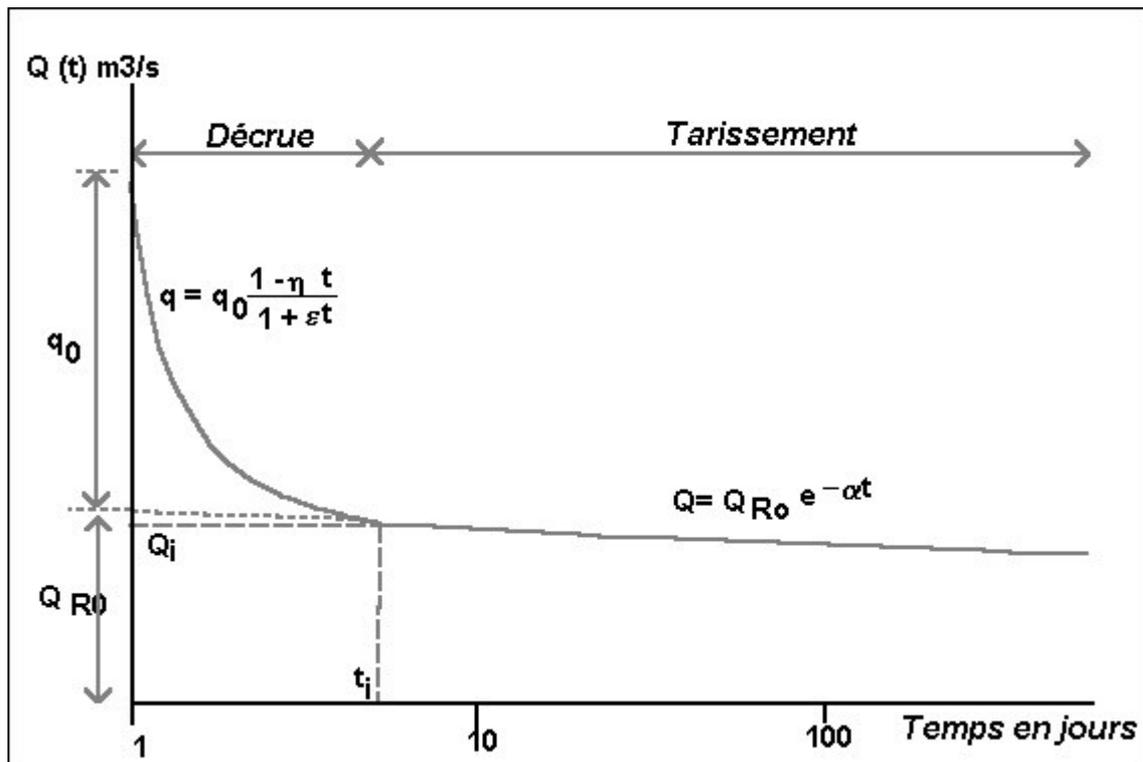


Illustration 31 : Décomposition de la récession selon la méthode de Mangin (1970).

L'ajustement des paramètres de la loi décrivant la récession conduit à :

- la caractérisation du fonctionnement de la zone d'infiltration ;
- l'estimation du volume d'eau contenu dans le réservoir, responsable de la décroissance observée des débits.

Une classification a été établie par Mangin (1970) à partir des résultats de l'analyse des courbes de récession dans le but de comparer les systèmes karstiques entre eux.

Cette classification repose sur le calcul de deux coefficients :

- le **paramètre k** qui est égal au rapport entre la plus grande valeur de volume dynamique (volume stocké dans la zone noyée = intégration du tarissement) observée sur une grande période et le volume de transit inter-annuel calculé sur la même période. Il traduit l'aptitude du système à stocker les précipitations et à les restituer progressivement au cours du temps, c'est à dire son *pouvoir régulateur*. Dans le cas des aquifères karstiques, k est en général inférieur à 0.5 ; une valeur proche de zéro indique un pouvoir régulateur peu important ;
- le **coefficient i**, compris entre 0 et 1, caractérise les retards à l'infiltration. Il est égal à la valeur de la fonction homographique deux jours après la pointe de la crue. Une forte valeur traduit une infiltration lente ou complexe contribuant à une meilleure régulation de l'écoulement, alors qu'à l'inverse une faible valeur est le signe d'un transit rapide des eaux vers la zone noyée (Marsaud, 1997).

Le report des valeurs de k et de i sur un diagramme permet d'établir une comparaison avec des systèmes de référence. Les données obtenues sur différents systèmes ont ainsi conduit Mangin à définir quatre domaines (Illustration 32) :

- le domaine 1 des systèmes complexes, généralement des systèmes de grande taille et dont la structure est faite de nombreux sous-systèmes ;
- le domaine 2 des systèmes karstiques plus karstifiés à l'amont qu'à l'aval, et avec des retards dans l'alimentation dus soit à la présence de terrains non karstiques, soit à une couverture neigeuse importante ;
- le domaine 3 des systèmes possédant un réseau de drainage très développé, avec une zone noyée peu importante ;
- le domaine 4 des systèmes possédant un réseau spéléologique bien développé et débouchant à l'aval sur un karst noyé important.

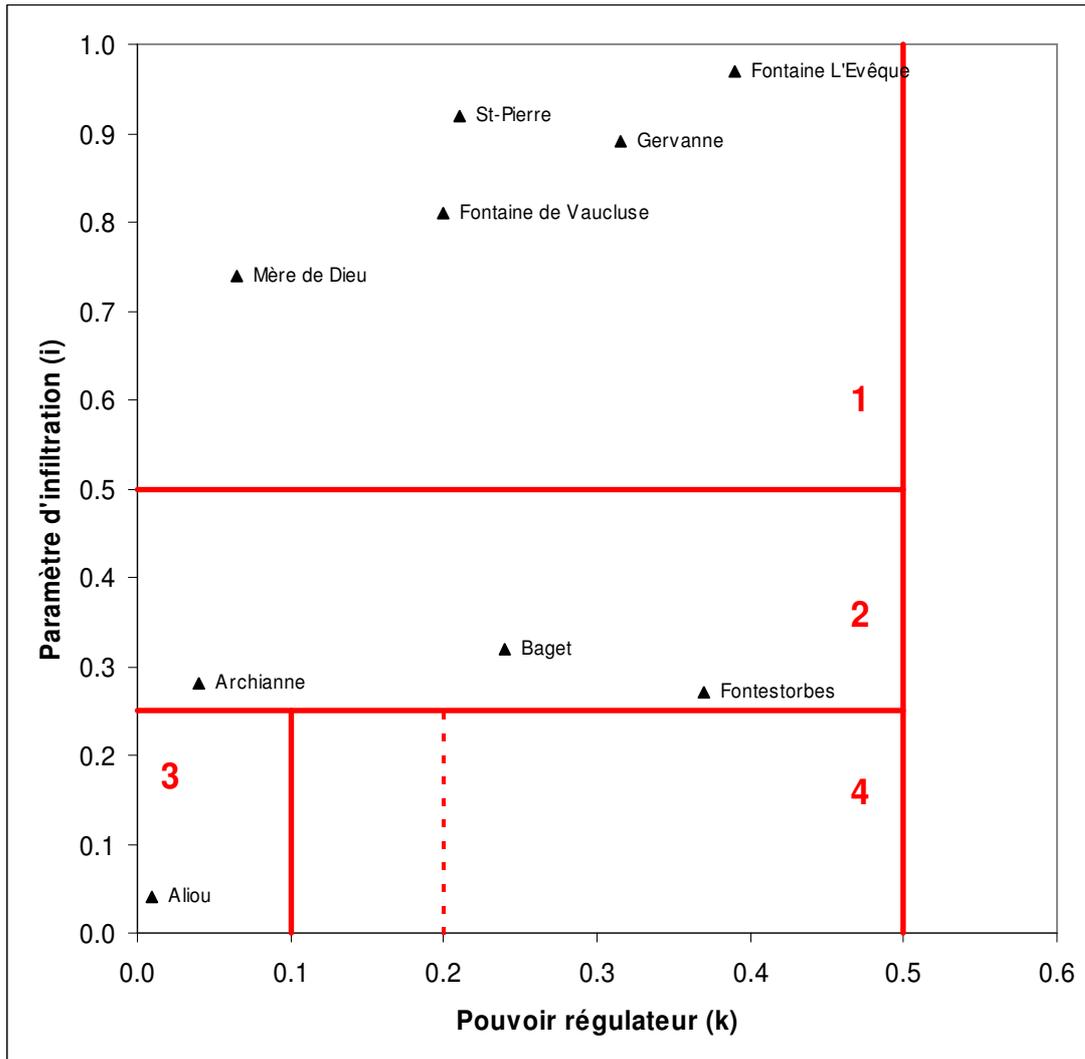


Illustration 32 : Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse des courbes de récession (Mangin, 1975) – (i) paramètre d'infiltration et (k) pouvoir régulateur.

4.2.2. Résultats pour la Fontaine de Nîmes

Les traitements mathématiques ont été réalisés pour les récessions des cycles hydrologiques 1998-1999 ; 1999-2000 et 2000-2001 ainsi que sur la crue du 04/11/2004. Les autres cycles hydrologiques présentent trop de lacune pour être étudiés.

Pour la source de la Fontaine de Nîmes, quatre périodes de décrues jugées significatives ont donc été traitées. Les paramètres des ajustements ainsi que la fiabilité des résultats (critère de Nash³) sont présentés dans le tableau de l'Annexe 2. Un exemple d'ajustement pour le cycle 1999-2000 est présenté graphiquement Illustration 34. Les paramètres moyens des 4 ajustements jugés significatifs sont rassemblés dans le tableau ci dessous (Illustration 33).

Paramètres d'ajustement	Moyens	écart type
alpha (coefficient tarissement) (j^{-1})	0.035	0.024
epsilon (coefficient d'hétérogénéité d'écoulement) (j^{-1})	1.64	0.16
Qro (m^3)	1.5	1.1
Temps de fin d'infiltration : t_i (j)	12.5	4.5
Q0 =débit au pic de crue (m^3)	12.5	1.8
qo =débit d'infiltration à t=0 (m^3)	11	3
Eta : vitesse moyenne d'infiltration (j^{-1})	0.09	0.02
Volume dynamique (million de m^3)	3.7	1.3
Volume d'infiltration (million de m^3)	1.9	0.6
Paramètre i (retard à l'infiltration)	0.19	0.02
Pouvoir régulateur K	0.18	0.06

Illustration 33 : Paramètres moyens des récessions de la Fontaine de Nîmes déterminés par la méthode de Mangin.

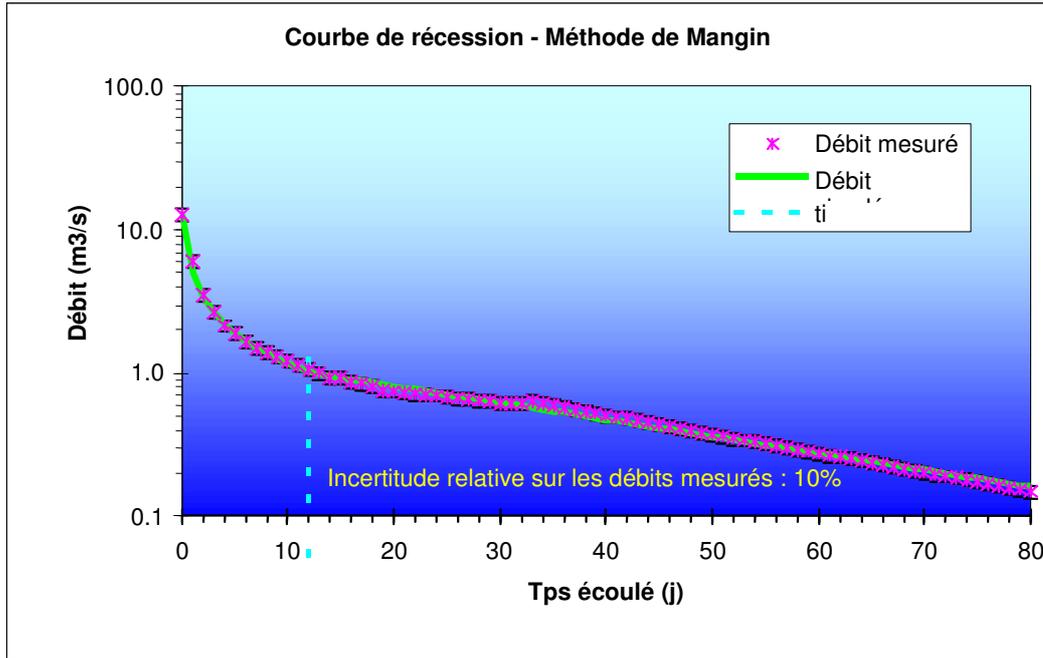
Les coefficients de tarissement sont élevés (0.035 ± 0.024) ce qui indique que la zone noyée du système est bien karstifiée et se vidange assez vite.

Le temps de fin d'infiltration est relativement court ($13 \text{ jours} \pm 5$) et les vitesses moyennes d'infiltration, relativement élevées (0.09 ± 0.02) dans la zone d'infiltration

³ Critère de Nash caractérise la distance entre la série observée et le modèle. Ce coefficient inclus à la fois les erreurs systématiques (biais) et aléatoires (bruit).

(épikarst) indiquent que le système présente une karstification importante. La zone d'infiltration (épikarst) apparaît donc bien connectée d'un point de vue hydraulique à la zone noyée du système. Les coefficients d'hétérogénéité d'écoulement sont élevés (1.5 ± 1.1) et extrêmement variables d'un cycle hydrologique à l'autre. Ce résultat indique que le système karstique est sensible aux variations saisonnières de l'alimentation par les pluies efficaces.

Les valeurs du volume dynamique sont moyennement importantes (3.7 millions de $m^3 \pm 1.3$) et aussi variables d'un cycle à l'autre ce qui traduit la sensibilité de la zone noyée du système aux variations saisonnières et inter-annuelles de l'alimentation (pluie efficace).



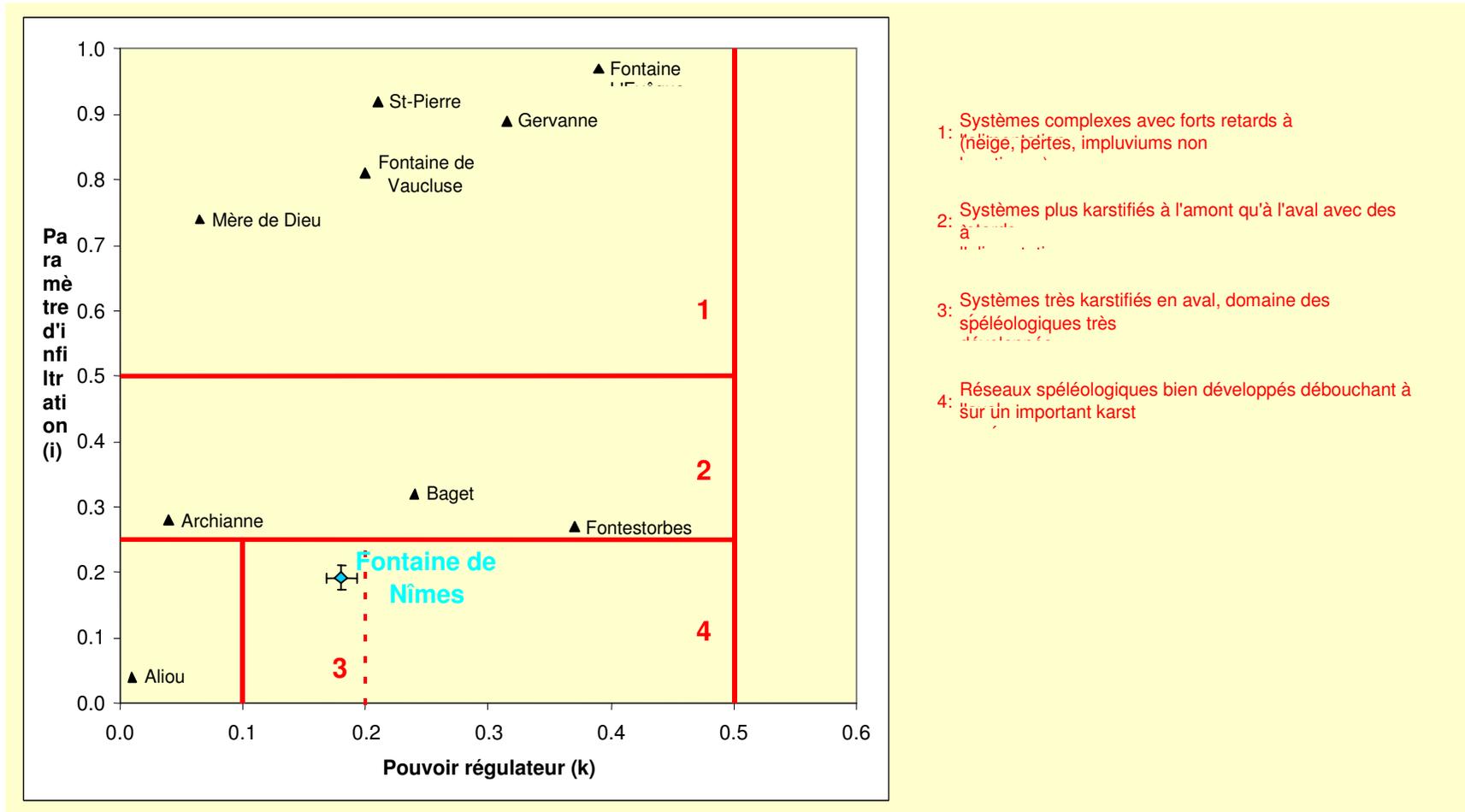
	Date
Début Récession	15/11/1999
Fin Récession	09/04/2000
Q Début Récession	12.812
Q Fin Récession	0.15
alpha (coefficient tarissement) (j^{-1})	0.027
epsilon (coef d'heterogeneite d'écoulement) en j^{-1}	1.8000
Qro :débit au pic de crue	1.400
ti : tps fin d'infiltration (j^{-1})	12

Q0 : débit de crue debut	12.812
qo : débit d'infiltration à état (vitesse moyenne)	11.412
Parámetro i (retard à l'infiltration)	0.18
Critère de Nash (qualité de la	99.56
Vdyn (Mm3)	4.48
Vinfil (Mm3)	1.86

Illustration 34 : Exemple de courbe de récession de la Fontaine de Nîmes et résultats de l'ajustement (cycle hydrologique 1999-2000).

Le pouvoir régulateur⁴ ($K= 0.18 \pm 0.06$) et le retard à l'infiltration ($i=0.19 \pm 0.02$) sont également variables d'un cycle à l'autre. Le report des valeurs moyennes dans le diagramme de classification de Mangin (Illustration 35) permet de comparer le système karstique de Nîmes avec d'autres systèmes étudiés dans la littérature. La valeur moyenne des paramètres se positionne à la limite des domaines 3 et 4 de la classification. En toute rigueur, selon la classification de Mangin, ces valeurs sont caractéristiques d'un système bien karstifié (présentant un réseau spéléologique bien développé) débouchant à l'aval sur un karst noyé important. Néanmoins, le pouvoir régulateur du système ($K= 0.18 \pm 0.06$) est moyennement élevé, autrement dit, le système ne semble pas accumuler de grande quantité de réserves.

⁴ Calculé en considérant un débit moyen inter-annuelle de $0.65 \text{ m}^3/\text{s}$



- 1: Systèmes complexes avec forts retards à (neige, pertes, impluviums non)
- 2: Systèmes plus karstifiés à l'amont qu'à l'aval avec des à
- 3: Systèmes très karstifiés en aval, domaine des spéléologiques très
- 4: Réseaux spéléologiques bien développés débouchant à sur un important karst

Illustration 35 : Position de la Fontaine de Nîmes dans la classification de Mangin (1975).

4.3. ANALYSES QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DU SYSTEME KARSTIQUE DE NIMES PAR UNE APPROCHE DE MODELISATION GLOBALE A L'AIDE DU LOGICIEL « TEMPO »

4.3.1. Objectif

Le suivi en continu d'un débit, d'un niveau piézométrique ou de paramètres physico-chimiques tels que la conductivité et la température de l'eau, renseigne sur les processus de transfert responsables des variations observées et, ce faisant, sur les mécanismes régissant le fonctionnement d'un hydrosystème. Ces mécanismes font intervenir en outre la recharge par les pluies efficaces, les modalités de vidange des réservoirs, mais également la contribution des différentes connexions hydrauliques lorsqu'elles existent.

Le traitement numérique des chroniques fait appel à des techniques d'inversion. On parle alors de modélisation inverse des phénomènes. Contrairement à la modélisation directe qui consiste à simuler le fonctionnement d'un hydrosystème à partir de concepts reposant à la fois sur la description de l'hydrosystème et l'application de lois de la physique, la modélisation inverse décrit le fonctionnement d'un hydrosystème à partir de réponses impulsionnelles (ruissellement, écoulement souterrain, transfert de masse). Ces réponses impulsionnelles (appelées également fonctions de transfert) sont estimées à partir de séries chronologiques : pluie, débit, niveau piézométrique, concentration de divers solutés, propriétés physico-chimiques du milieu.

Le principe de la méthode est décrit en annexe (Annexe 3).

4.3.2. Démarche adoptée et données utilisées

L'étude du fonctionnement du système karstique de Nîmes s'est principalement focalisée sur les données acquises à l'exutoire du système (Fontaine de Nîmes) sur la base des données de hauteur d'eau mesurées depuis octobre 1998. Ces suivis ont permis la détermination des débits suivant la procédure décrite dans les paragraphes 3.1.1 et 3.1.2.

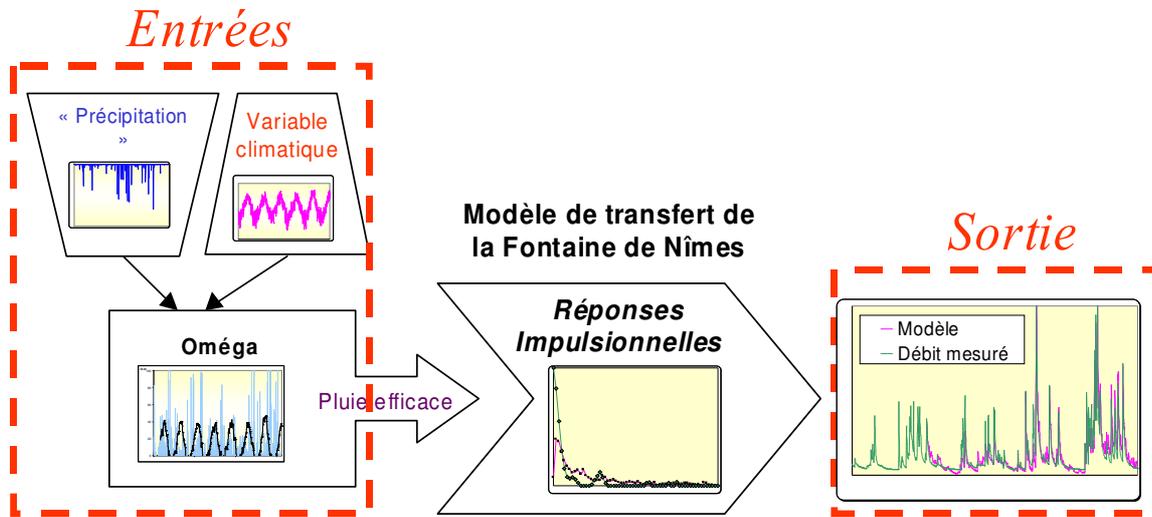


Illustration 36 : Schéma de principe du modèle de transfert de la fontaine de Nîmes

Le schéma de principe de la modélisation inverse des écoulements est présenté Illustration 36. La technique d'inversion consiste à calculer la ou des réponses impulsionnelles et une fonction « seuil » Oméga de pluie efficace de telle sorte que le modèle soit le plus proche possible du débit observé. Ce seuil Oméga est estimé par inversion à partir de la pluie et d'une variable climatique de telle façon que seule la hauteur de pluie située au-dessus de ce seuil génère un débit à l'exutoire. Dans l'approche de modélisation, le choix du type des réponses impulsionnelles est fixé par l'utilisateur. Les réponses impulsionnelles peuvent être de type paramétrique (fonction mathématique connue, fonction exponentielle par exemple) ou non paramétrique. Dans ce dernier cas, c'est le logiciel qui détermine la fonction mathématique appropriée qui permet de décrire au mieux la variable de sortie à modéliser.

L'étude du fonctionnement du système karstique de Nîmes a été réalisée à l'aide des deux types d'approches possibles (réponses impulsionnelles paramétrique et non paramétrique) afin d'une part, de confronter les informations obtenues sur le fonctionnement, et d'autre part de mieux encadrer les résultats des simulations obtenues pour les épisodes de crues majeurs d'octobre 1988, septembre 2002 et décembre 2003 pour lesquels aucune mesure n'est disponible.

Au préalable à l'étude du fonctionnement hydrogéologique du système karstique par l'approche de modélisation inverse à l'aide du logiciel Tempo, il a été nécessaire de déterminer « la chronique de pluie représentative » du fonctionnement du karst, c'est à dire la chronique de pluie du bassin d'alimentation. Cette étude a été menée à l'aide de l'option « pondération des chroniques de pluie » du logiciel « Tempo » qui équivaut à

établir le corrélogramme croisé « pluie-débit » à partir d'une optimisation d'une combinaison linéaire des poids associés à chaque chronique de pluie⁵.

Les postes pluviométriques utilisées pour cette analyse sont les postes Météo France suivants :

Numéro du poste	Nom du poste	Lambert X (m)	Lambert Y (m)	Z (m)
30189001	NÎMES-COURBESSAC	766500	1874900	59
30189002	NÎMES-Mas PONGES	762900	1872800	130
30224001	LA ROUVIERE	753000	1883000	73

Le meilleur corrélogramme croisé (pluie-débit, Illustration 37) a été obtenu à partir de la combinaison linéaire suivante :

$$0,37 * \text{Courbessac} + 0,34 * \text{Ponges} + 0,29 * \text{Rouvière} \quad (1)$$

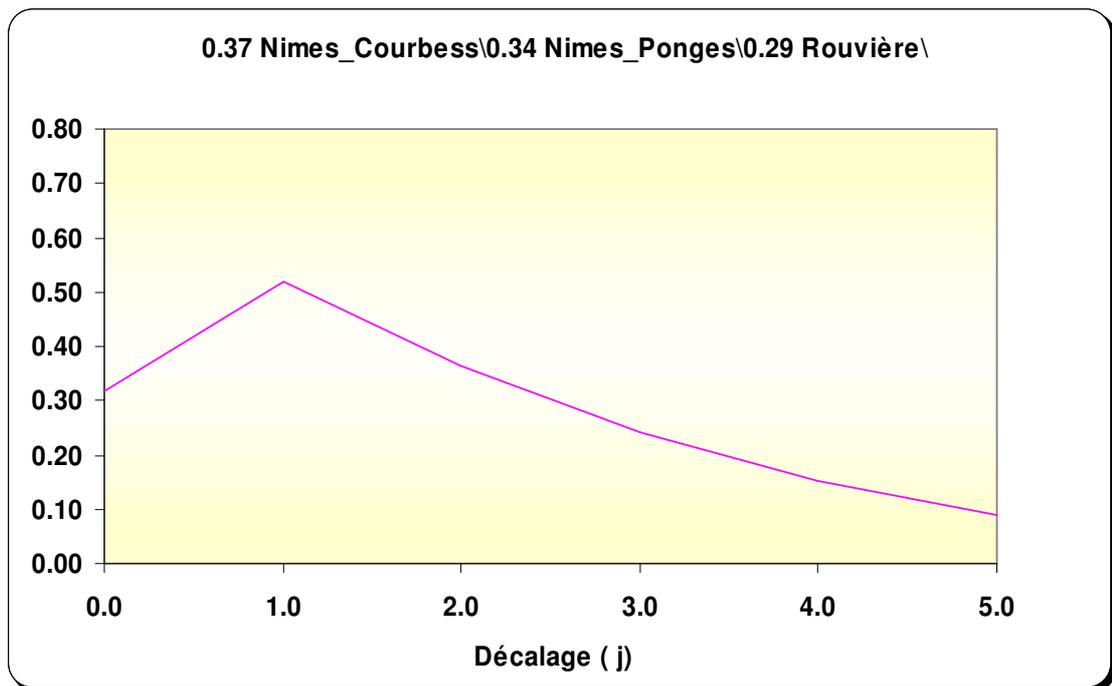


Illustration 37 : Corrélogramme croisé pluie-débit de la Fontaine de Nîmes obtenu à partir de la combinaison linéaire des pluies (option pondération des chroniques de pluie de TEMPO).

⁵ La procédure détaillée est présentée en annexe 1

La chronique de pluie utilisée pour les modélisations a donc été définie à l'aide de la combinaison linéaire précédente. Nous présentons dans le tableau suivant (Illustration 38) le cumul des précipitations des différents cycles hydrologiques étudiés⁶ :

	Cumul Pluie Bassin d'alimentation du Karst de Nîmes (mm)
Cycle 1998-1999	685
Cycle 1999-2000	839
Cycle 2000-2001	924
Cycle 2001-2002	951
Cycle 2002-2003	877
Cycle 2003-2004	910

Illustration 38 : Cumul des précipitations du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes déduit par l'option de pondération des précipitations du logiciel Tempo

La variable climatique utilisée dans les calculs est l'ETP Penman Monthei calculée par Météo-France à la station de Nîmes-Courbessac, sa variabilité spatiale étant jugée suffisamment faible pour ne considérer qu'une seule station.

4.3.3. Modélisation inverse des relations pluie-débit pour le système karstique de la Fontaine de Nîmes.

L'objectif principal de cette étude est de caractériser les processus qui contrôlent l'évolution des débits à l'exutoire du système karstique.

Nous avons, dans un premier temps, travaillé à l'aide de l'option non paramétrique de Tempo (cf. § précédent) afin de déterminer l'allure générale des réponses impulsionnelles qui permettent de reproduire les débits mesurés. L'évolution temporelle de la pluviométrie, de l'ETP et des débits mesurés est présentée Illustration 39.

⁶ Cycle hydrologique : défini entre le 01 septembre et le 31 août de l'année suivante

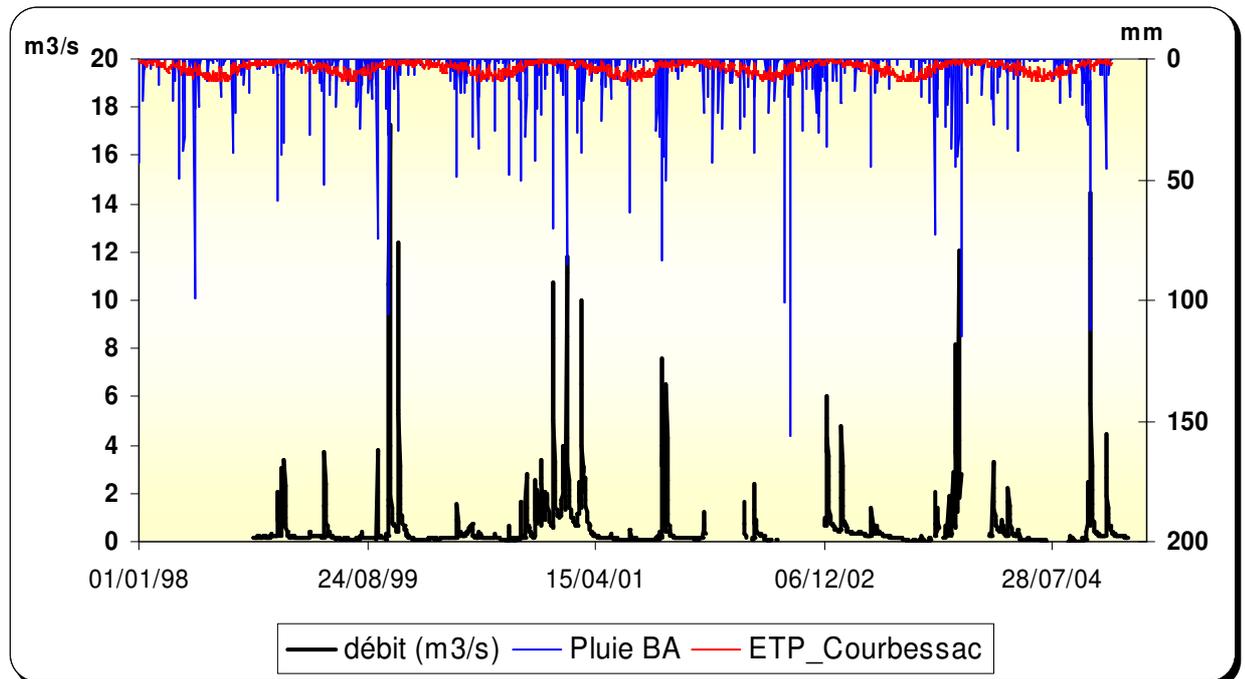


Illustration 39 : Evolution temporelle de la pluviométrie, de l'ETP et des débits mesurés du système karstique à la Fontaine de Nîmes.

La technique d'inversion consiste à calculer les réponses impulsionnelles (hydrogrammes unitaires cf. Illustration 40) et le seuil Oméga de pluie efficace (Illustration 41) de telle sorte que le modèle soit le plus proche possible du débit observé de la Fontaine (Illustration 42).

Ce seuil Oméga est estimé à partir de la pluie et d'une variable climatique de telle façon que seule la hauteur de pluie située au-dessus de ce seuil génère un débit à l'exutoire. Il est calculé à partir d'une réponse impulsionnelle à la pluie et à la température de l'air (Illustration 43), également obtenue par inversion.

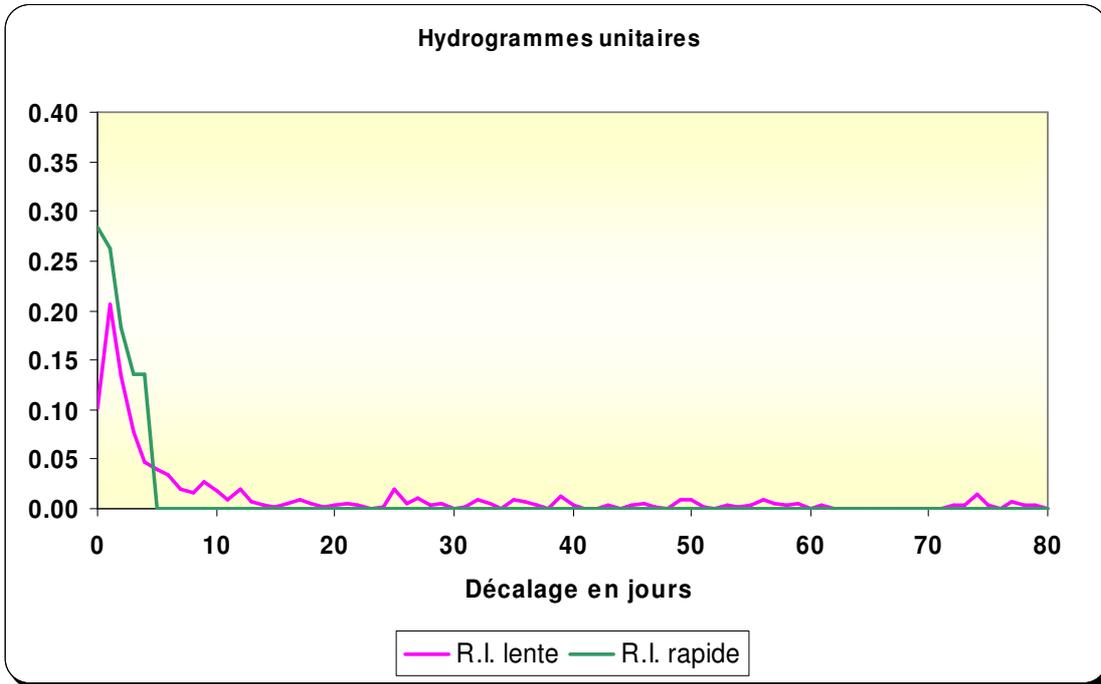


Illustration 40 : Calcul des hydrogrammes unitaires normalisés du système karstique de la Fontaine de Nîmes (R. I. : réponse impulsionnelle)

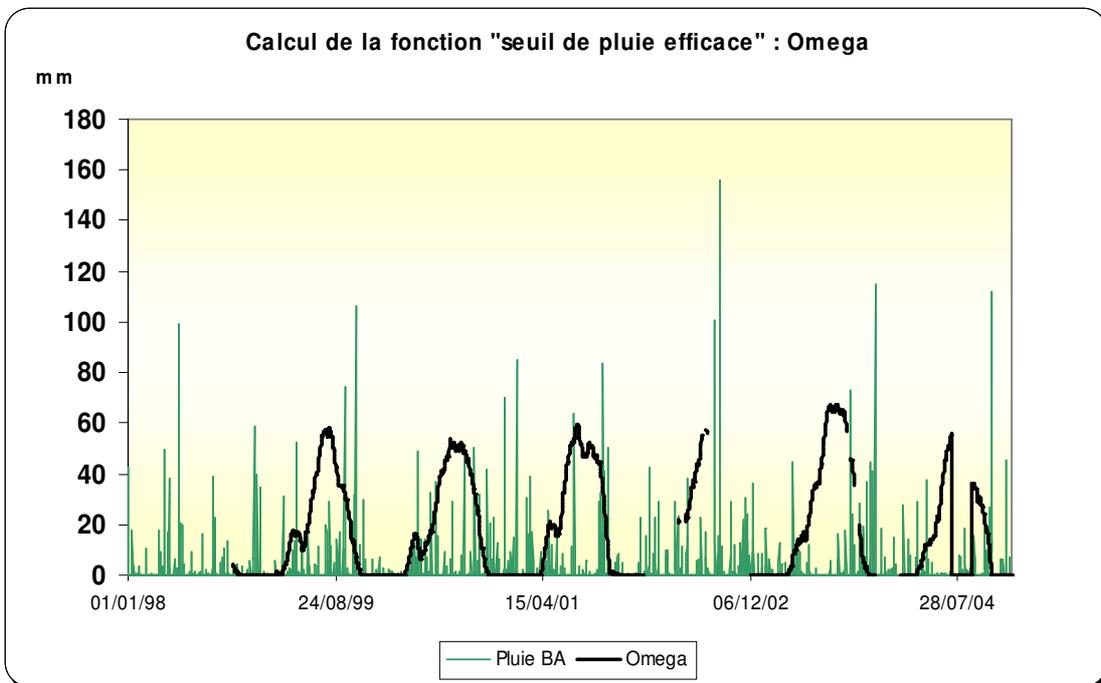


Illustration 41 : Évolution du seuil de pluie efficace Oméga et de la pluviométrie

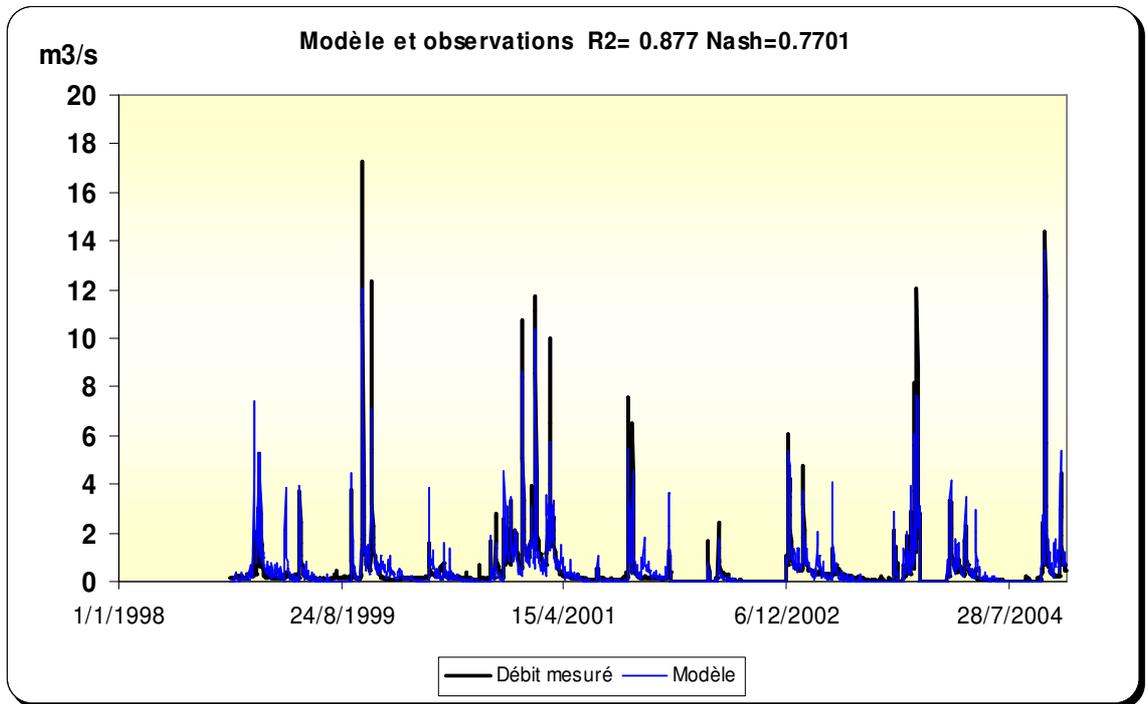


Illustration 42 : Comparaison du débit modélisé au débit estimé du système karstique de la Fontaine de Nîmes. : 87.7 % de la variance totale expliquée.

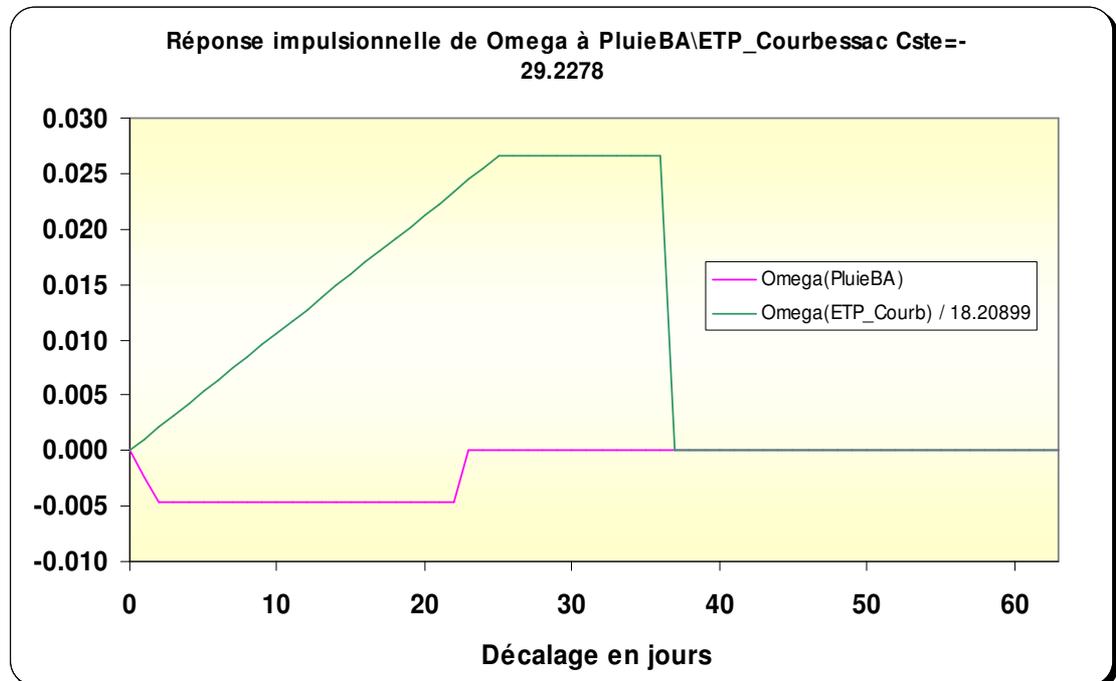


Illustration 43 : Réponse impulsionnelle d'Oméga à la pluie et à l'ETP.

Sur l'illustration 41, qui représente l'évolution temporelle de la fonction seuil Oméga et de la pluie du bassin d'alimentation, on remarque que seuls quelques épisodes de pluie provoquent une réponse de débit à la Fontaine de Nîmes. Il s'agit principalement des épisodes de pluies hivernales et printanières. Au cours des périodes estivales, le seuil Oméga de pluie efficace est proche de 50 mm, valeur importante liée à la forte demande évapo-transpiratoire (ETP) de l'atmosphère. En été, on peut donc observer une réponse des débits de la Fontaine de Nîmes aux épisodes de pluies dès lors que la quantité de pluie est supérieure à 50 mm. À l'inverse, au cours des périodes hivernales et printanières, la demande évapo-transpiratoire est faible (quelques millimètres) ce qui, d'un point de vue hydrologique, signifie que les épisodes de pluies de faible importance peuvent entraîner une réponse plus ou moins marquée du débit de la Fontaine.

Les résultats de la modélisation⁷ sont présentés illustration 42. Le modèle permet de reproduire de manière satisfaisante l'évolution observée, les pics de crues et le tarissement sont globalement bien reproduits. Le modèle permet d'expliquer 88 % de la variance totale observée ce qui constitue un résultat acceptable (critère de Nash = 0.77). Le calcul des hydrogrammes unitaires indique qu'il y a deux composantes (l'une rapide et l'autre lente). La composante rapide pour le système karstique de la Fontaine de Nîmes est importante (illustration 40). Elle intervient dès le début des précipitations (décalage = 0) et dure 4 jours environ. Cette composante rapide permet de caractériser la vidange gravitaire des eaux de pluie infiltrée dans la zone épikarstique par « effet de chasse », c'est à dire après que se soit établie une continuité hydraulique entre la zone épikarstique et la zone noyée du karst. La réponse impulsionnelle de la composante lente (illustration 40) montre un maximum prononcé le 1^{er} jour après les pluies, puis décroît rapidement jusqu'à ce que le décalage atteigne 8 jours environ, puis faiblement de manière plus ou moins exponentielle pendant 60 jours environ. Ce comportement évoque la recharge, puis la vidange d'un réservoir alimenté par les précipitations.

L'importance jouée par la composante rapide (écoulement non linéaire, « effet de chasse d'eau ») dans le fonctionnement du karst en période de crue rend problématique la détermination précise des débits de crue lors des périodes pluvieuses par les approches de modélisation. En effet, les outils de modélisation ont du mal à « gérer » ce type d'écoulement en raison de la complexité du phénomène. A titre d'illustration et dans un souci de simplification, une hauteur de pluie donnée (50 mm par exemple), génère plus ou moins d'écoulement rapide dans le karst selon l'intensité de la pluie. De même, l'état de saturation de la zone épikarstique jouera un rôle déterminant quant à l'importance du phénomène d'écoulement rapide. Si la zone épikarstique est « sèche » le phénomène sera réduit mais sera au contraire accentué si l'épikarst contient déjà un stock d'eau significatif.

Les modèles non-paramétriques ont du mal à reproduire les longues récessions (supérieur à 60 jours). Les modèles paramétriques permettent quant à eux de corriger ce problème car la décroissance des débits peut être calculée par des fonctions

⁷ Les paramètres de modélisation sont présentés annexe 2.

exponentielles. Dans cette étude, deux types de modèle paramétriques ont été utilisés pour les écoulements lents :

- modèle paramétrique 1 : convolution d'une exponentielle par une gaussienne ;
- modèle paramétrique 2 : récession reproduite par le modèle de Boussinesq (1903) :

$$Q_t = Q_0 / (1 + \alpha t)^2$$

L'allure des réponses impulsionnelles des modèles paramétriques 1 et 2 est reportée Illustration 44 et Illustration 45 et les résultats des modélisations sont présentés Illustration 46 et Illustration 47. Dans les deux cas, il faut prendre en considération une composante rapide afin d'expliquer au mieux les débits mesurés. Cette composante intervient dès le début de la pluie, le maximum de contribution est observé au bout d'un jour et l'écoulement rapide disparaît 4 jours environ après les précipitations. La composante lente qui traduit la recharge puis la vidange de la zone noyée de l'aquifère indique que la durée d'infiltration par les pluies efficaces dure une quinzaine de jours environ. Les résultats des modélisations⁸ (Illustration 46 et Illustration 47) permettent de reproduire de manière satisfaisante l'évolution observée, les pics de crues et le tarissement sont globalement bien reproduits. Les débits de pointes de crue sont parfois supérieurs à ceux calculés par le modèle non paramétrique.

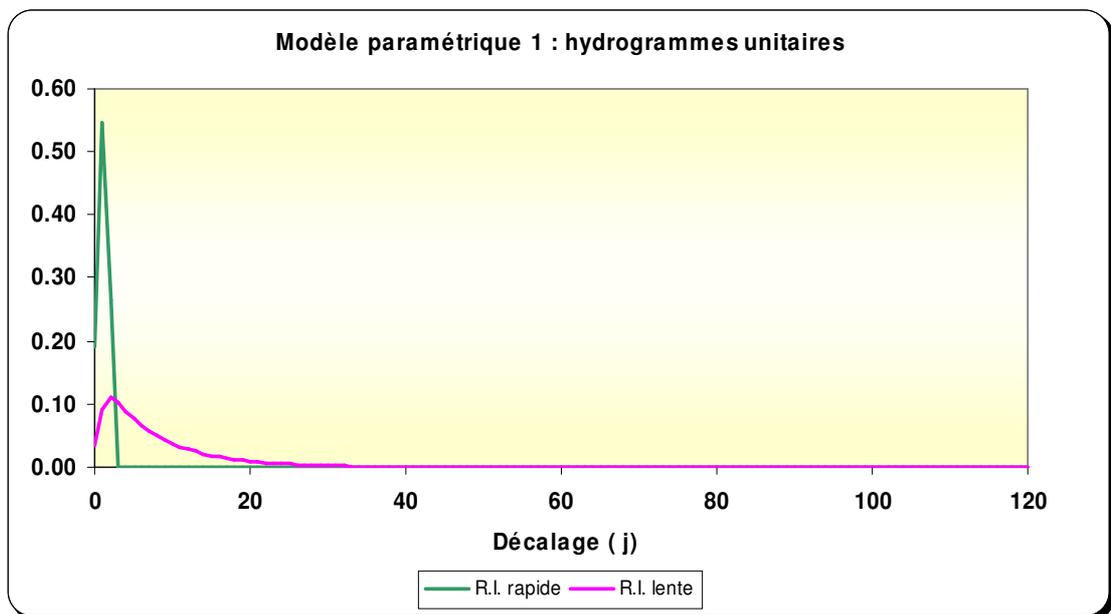


Illustration 44 : Modèle paramétrique 1 : calcul des hydrogrammes unitaires normalisés du système karstique de la Fontaine de Nîmes (R.I. : réponse impulsionnelle)

⁸ Les paramètres de modélisation sont présentés annexe ?

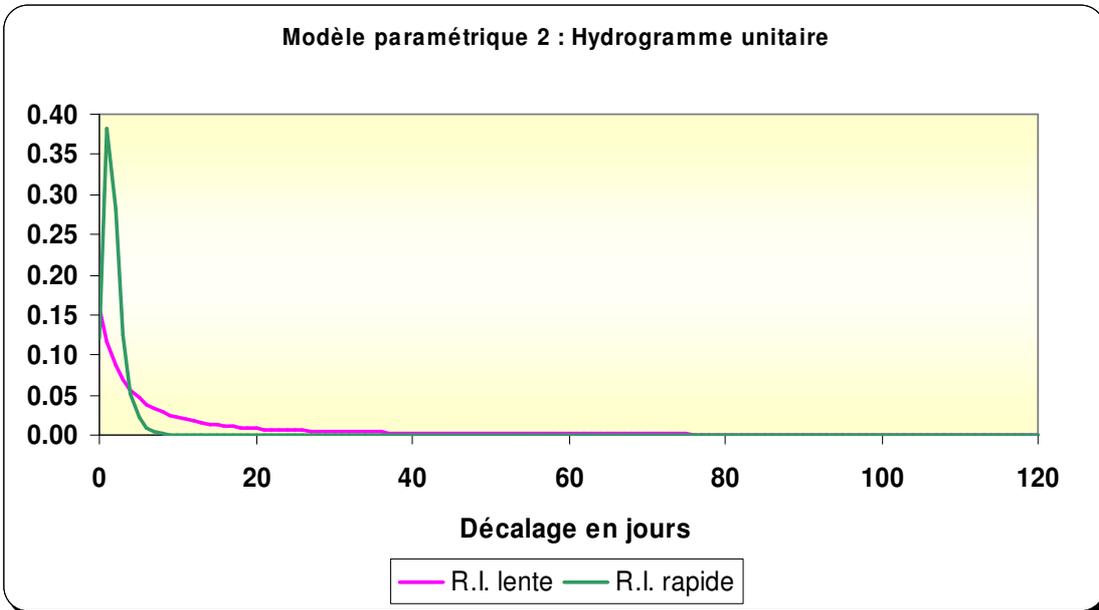


Illustration 45 : Modèle paramétrique 2 : calcul des hydrogrammes unitaires normalisés du système karstique de la Fontaine de Nîmes.

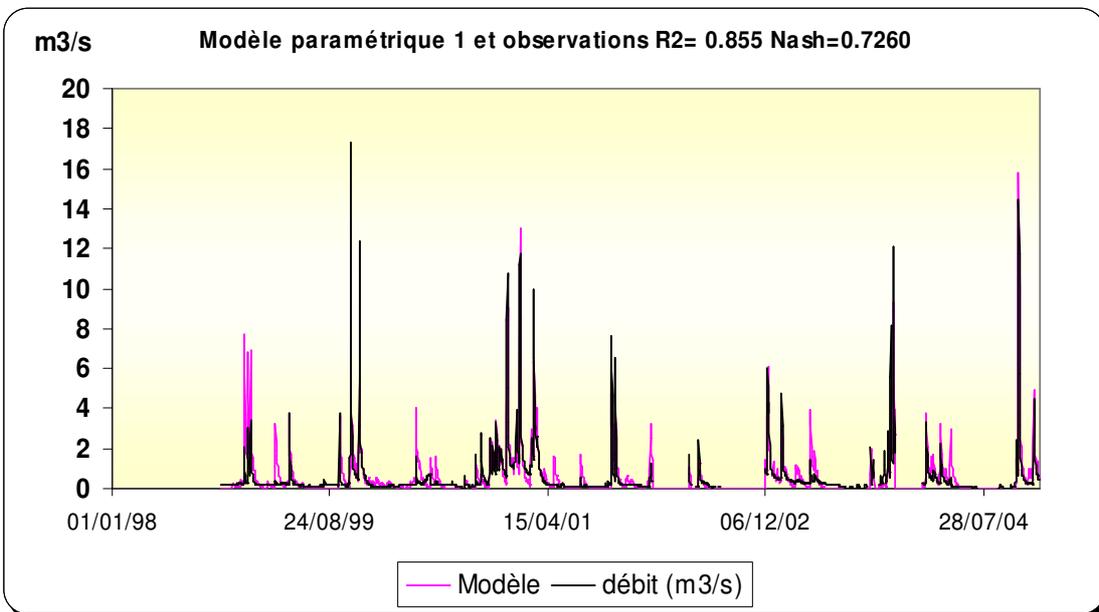


Illustration 46 : Modèle paramétrique 1 : comparaison du débit modélisé au débit estimé du système karstique de la Fontaine de Nîmes. : 85,5 % de la variance totale expliquée.

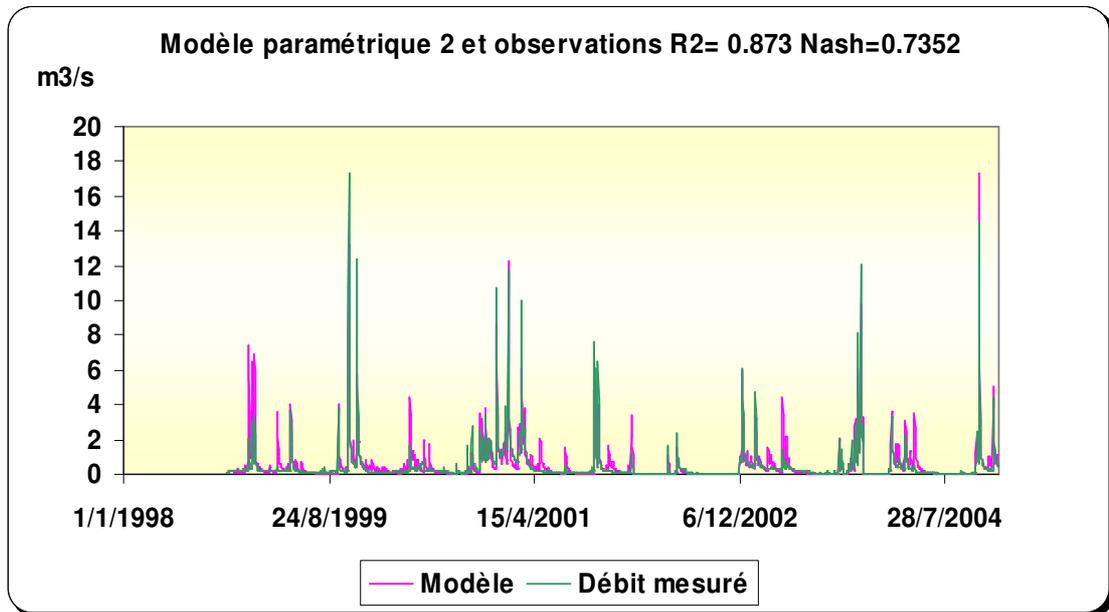


Illustration 47 : Modèle paramétrique 2 : comparaison du débit modélisé au débit estimé du système karstique de la Fontaine de Nîmes. : 87,3 % de la variance totale expliquée.

4.3.4. Simulation des débits de la Fontaine de Nîmes pour les épisodes de pluies d'octobre 1998, septembre 2002 et décembre 2003.

Les réponses impulsionnelles du système karstique aux précipitations sont maintenant relativement bien connues. Les crues de la Fontaine de Nîmes sont expliquées par deux types d'écoulement (lent et rapide). La connaissance des hydrogrammes unitaires de ces deux composantes permet de reproduire l'évolution passée du karst pour des épisodes pluvieux majeurs pour lesquels nous ne disposons pas d'informations. Les épisodes de crue d'octobre 1988, septembre 2002 et décembre 2003 ont été simulés à pas de temps journalier dans cette étude. Les résultats des modélisations sont présentés sur l'illustration 48, l'illustration 49 et l'illustration 50. Un tableau récapitulatif permet également d'illustrer les résultats obtenus.

Les résultats des simulations permettent d'encadrer la valeur des débits de pointes de crue des épisodes majeurs considérés. Les pics de crues se produisent 1 jour après les épisodes de pluie. Pour l'épisode de 1998, le pic de crue (compris entre 20 et 35 m³/s selon les résultats des simulations) se produit le 03 octobre 1998. Sur la période du 27/09/88 au 05/10/88, la contribution de la Fontaine de Nîmes au phénomène d'inondation est au maximum de 7.9 millions de m³ (compris entre 5.3 et 7.9 million de m³). L'épisode de crue de décembre 2003 apparaît légèrement plus faible que celui d'octobre 1988 mais cependant très élevé. Il est élevé car le karst est à ce moment de l'année 2003 assez bien rempli par de précédents épisodes pluvieux et la pluie de décembre 2003, d'amplitude plus faible que celle de 1988, génère quand même un événement de grande amplitude. A titre d'illustration de cette influence de l'état hydrologique initial du karst sur l'amplitude de la crue de la Fontaine générée par un

épisode pluvieux donné, un épisode pluvieux du type de 1988 (avec deux jours consécutifs de fortes pluies à 110 mm et 160 mm) a été imaginé en décembre 2003 au moment où le karst était déjà rempli par de précédentes pluies (Illustration 51). On constate une augmentation d'environ 50% du pic de crue (passage de 20 à 29 m³/s) par rapport aux débits simulés lors de l'événement pluvieux réellement observé en décembre 2003. Ceci signifie que l'événement de 1988 aurait généré un pic de crue de la Fontaine plus élevé s'il s'était produit alors que le karst était en hautes eaux.

Les simulations effectuées, notamment pour l'épisode de 1988, supposent de manière implicite que le comportement du karst en 1988 est le même que celui décrit pour la période 1998-2004. Dans l'état actuel des connaissances, nous ne sommes pas en mesure d'évaluer l'impact, en terme d'écoulement souterrain, qu'ont les différents bassins de rétention qui ont été construits sur les différents cadereaux. Nous chercherons, dans le cadre des phases suivantes du projet, à évaluer leurs impacts sur les eaux souterraines.

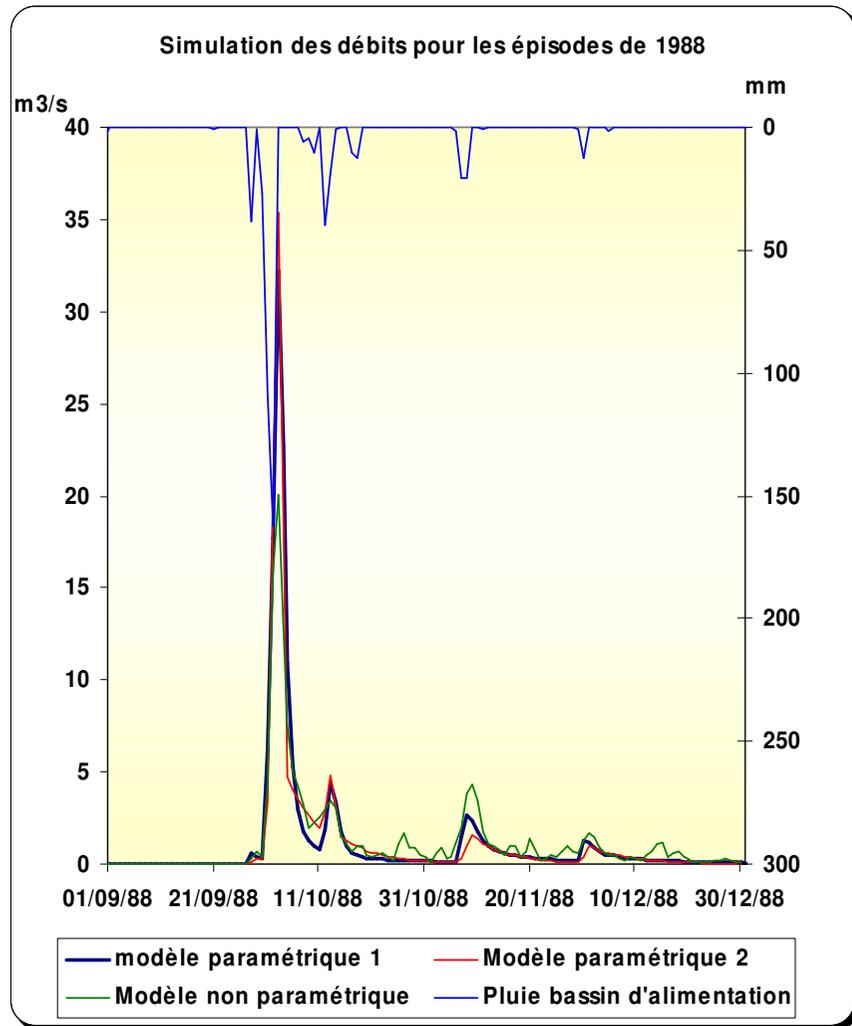


Illustration 48 : Simulations pour 1988.

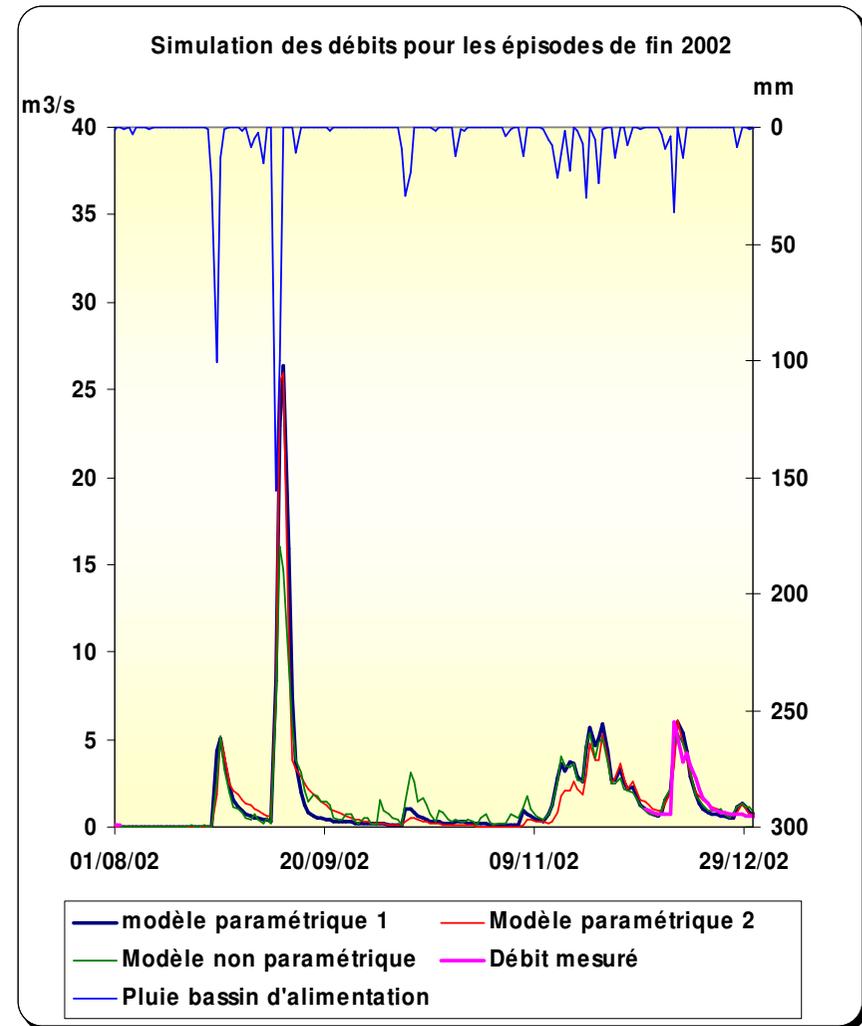


Illustration 49 : Simulations pour 2002

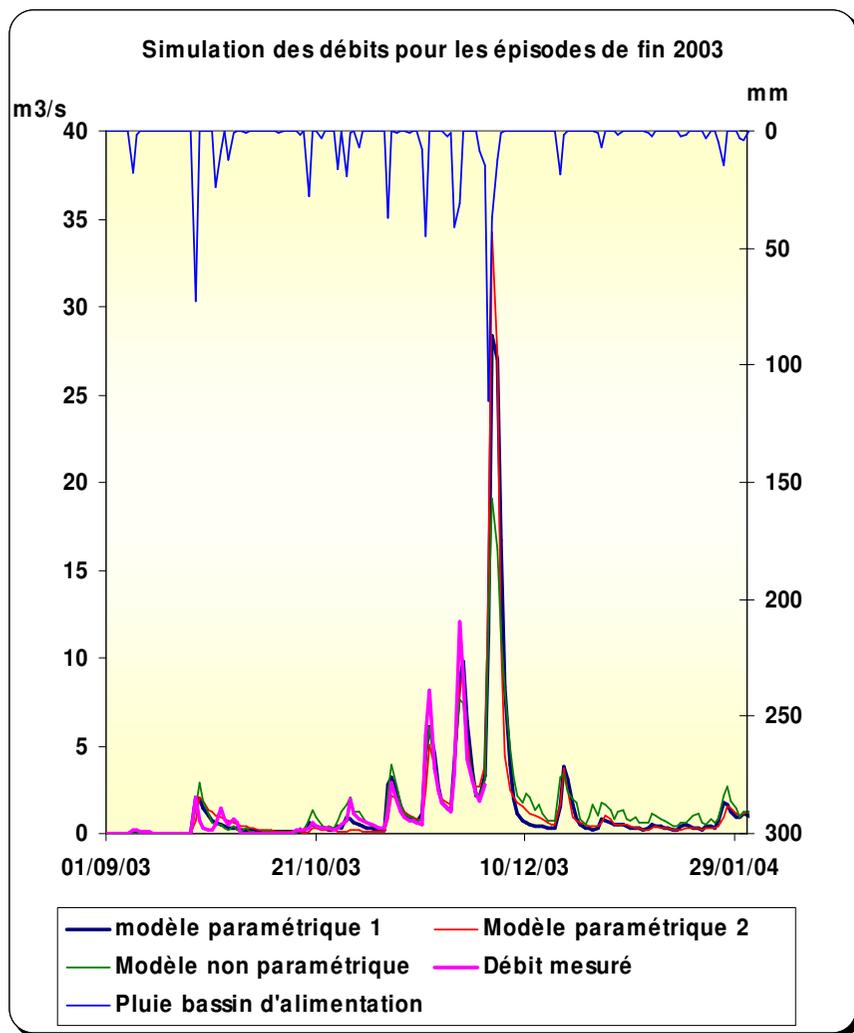


Illustration 50 :– Simulations pour 2003.

Episode pluvieux "d'octobre 1988"

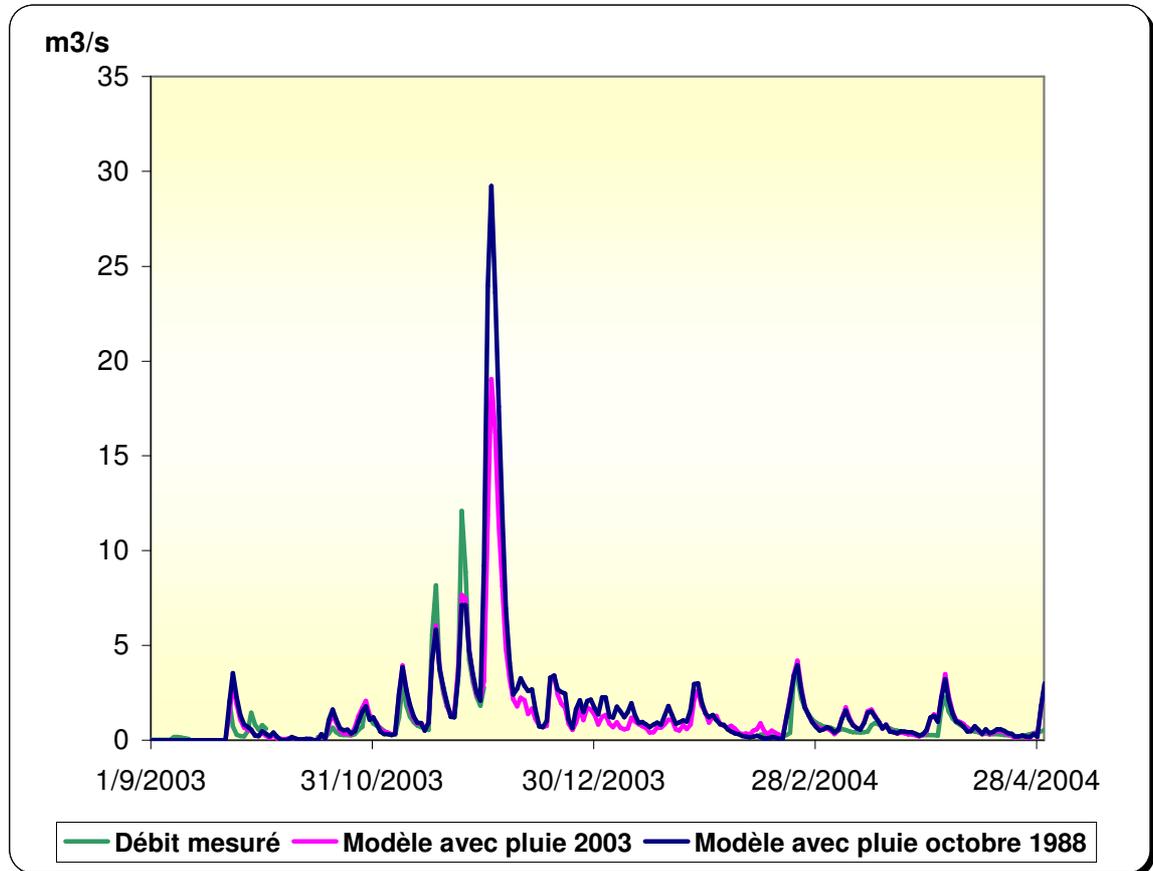
date	Pluviométrie	Débit	Débits simulés	Débits simulés	Débits simulés
	estimée cumul pluie BA mm	mesuré m3/s	m3/s modèle paramétrique_1	m3/s Modèle paramétrique_2	m3/s modèle non_paramétrique
27/09/88	0.0	pas mesure	0.01	0.01	0.00
28/09/88	38.7	pas mesure	0.55	0.10	0.32
29/09/88	0.6	pas mesure	0.43	0.28	0.65
30/09/88	26.3	pas mesure	0.33	0.33	0.42
01/10/88	108.2	pas mesure	6.23	3.39	4.42
02/10/88	162.1	pas mesure	17.67	19.15	15.84
03/10/88	0.0	pas mesure	32.22	35.37	20.03
04/10/88	0.0	pas mesure	22.71	18.50	12.65
05/10/88	0.0	pas mesure	10.87	4.70	7.47
Volume écoulé sur la période (10^6 m3)			7.86	7.07	5.34

Episode pluvieux de "septembre 2002"

date	Pluviométrie	Débit	Débits simulés	Débits simulés	Débits simulés
	estimée cumul pluie BA mm	mesuré m3/s	m3/s modèle paramétrique_1	m3/s Modèle paramétrique_2	m3/s modèle non_paramétrique
07/09/02	0.0	pas mesure	0.35	0.58	0.00
08/09/02	156.0	pas mesure	8.33	7.60	8.05
09/09/02	100.4	pas mesure	22.99	25.43	17.02
10/09/02	0.0	pas mesure	26.36	25.99	15.30
11/09/02	0.0	pas mesure	15.92	10.67	10.13
12/09/02	0.1	pas mesure	7.48	3.83	7.21
Volume écoulé sur la période (10^6 m3)			7.03	6.40	4.99

Episodes pluvieux de "décembre 2003"

date	Pluviométrie	Débit	Débits simulés	Débits simulés	Débits simulés
	estimée cumul pluie BA mm	mesuré m3/s	m3/s modèle paramétrique_1	m3/s Modèle paramétrique_2	m3/s modèle non_paramétrique
28/11/03	0.0	2.29	2.15	2.67	2.75
29/11/03	8.3	1.81	2.05	2.71	2.96
30/11/03	14.4	2.77	3.35	3.92	3.99
01/12/03	115.0	pas mesure	11.40	14.33	12.67
02/12/03	37.2	pas mesure	28.31	34.19	20.18
03/12/03	12.2	pas mesure	26.99	27.22	17.83
04/12/03	0.5	pas mesure	16.67	11.16	12.39
05/12/03	0.0	pas mesure	8.38	4.44	8.54
Volume écoulé sur la période (10^6 m3)			8.58	8.70	7.03



Date	Débit mesuré (m ³ /s)	pluie 2003 modifiée mm	pluie 2003 modifiée mm	Modèle avec Pluie 2003	Modèle avec Pluie 2003 modifiée
28/11/03	2.29	0.0	0.0	2.8	2.5
29/11/03	1.81	8.3	8.3	3.0	2.1
30/11/03	2.77	14.4	110.0	4.0	9.2
01/12/03	non mesuré	115.0	160.0	12.7	24.0
02/12/03	non mesuré	37.2	37.2	20.2	29.2
03/12/03	non mesuré	12.2	12.2	17.8	23.6
04/12/03	non mesuré	0.5	0.5	12.4	17.6
05/12/03	non mesuré	0.0	0.0	8.5	11.9
Volume écoulé sur la période (10 ⁶ m ³)				7.0	10.4

Illustration 51 : Simulation pour 2003 avec la pluie de 1988

4.3.5. Information pour la délimitation du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes

Les résultats des modélisations précédentes permettent également d'obtenir des informations sur la délimitation du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes. Les meilleurs résultats (ceux illustrés précédemment) ont été obtenus en considérant que la contribution moyenne de la pluie à la pluie efficace est de 48 %. Les bilans hydrogéologiques calculés par l'approche Tempo indiquent que la surface du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes est de 45,4 km². Cette valeur est une valeur de calage obtenue lors de la décomposition d'hydrogramme et de modélisation à l'aide du logiciel TEMPO.

4.3.6. Synthèse sur le fonctionnement hydrogéologique du karst de Nîmes déduit par l'approche de modélisation inverse (TEMPO).

Les modélisations inverses des relations pluie-débit ont apporté de précieux renseignements sur le fonctionnement hydrogéologique du système karstique de la Fontaine de Nîmes. Les résultats obtenus permettent à la fois de mieux contraindre le schéma conceptuel de fonctionnement et de déduire des informations sur la dynamique de ce système.

L'étude comparative du système karstique à l'aide de trois approches méthodologiques distinctes met en évidence les principaux points suivants :

- la surface du bassin d'alimentation calculée par TEMPO est estimée à 45 km² ;
- l'hydrogramme unitaire du système karstique est complexe. On montre que :
 1. le régime d'écoulement est non linéaire en période de crue (« effet de chasse »⁹) pour le système karstique pris dans sa globalité (étude effectuée à l'exutoire). La part de cet écoulement rapide se fait sentir dès le début des précipitations et dure 4 jours environ ;
 2. le comportement du système karstique est peu inertiel, la réponse à l'infiltration de la pluie efficace présente un pic marqué en un jour environ, puis décroît rapidement jusqu'à ce que le décalage atteigne 12 jours environ et plus lentement pendant 60 jours environ. Ce comportement évoque la recharge puis la vidange d'un réservoir (zone noyée). Ces résultats corroborent ceux obtenus par les autres approches et notamment l'analyse des courbes de récession qui permet d'estimer un temps d'infiltration de l'ordre de 16 jours (± 5).

⁹ L'effet de chasse est une connexion directe, en charge, entre l'épikarst et le réseau karstique.

La détermination des hydrogrammes unitaires du karst de la Fontaine de Nîmes (composantes lente et rapide) permet de reconstituer les débits du système pour des épisodes de crues majeurs pour lesquels aucune information hydrogéologique n'est disponible (octobre 1988, notamment). Les débits estimés permettent de fixer l'ordre de grandeur de la contribution du karst aux phénomènes d'inondations qui se sont produits dans le passé. L'estimation est néanmoins rendue délicate car l'importance de l'écoulement rapide (écoulement non linéaire = difficile à modéliser) dans le fonctionnement du système karstique induit des incertitudes non négligeables dans l'estimation des débits de pointes de crue :

- octobre 1988, pic de crue $29 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\pm 8 \text{ m}^3/\text{s}$) ;
- décembre 2003, pic de crue $28 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\pm 7 \text{ m}^3/\text{s}$) ;

Les simulations effectuées, notamment pour l'épisode de 1988, supposent de manière implicite que le comportement du karst en 1988 est le même que celui décrit pour la période 1998-2004. Dans l'état actuel des connaissances, nous ne sommes pas en mesure d'évaluer l'impact, en terme d'écoulement souterrain, qu'ont les différents bassins de rétention qui ont été construits sur les différents cadereaux. Nous chercherons, dans le cadre des phases suivantes du projet, à évaluer leurs impacts sur les eaux souterraines.

4.4. MODELISATION DES DEBITS DE LA FONTAINE DE NIMES AVEC LE LOGICIEL GARDENIA

4.4.1. Objectifs

L'objectif est de vérifier si le fonctionnement du système karstique de la Fontaine peut être reproduit par un modèle à réservoirs et de comparer ces résultats avec ceux obtenus à l'aide du logiciel de traitement du signal TEMPO. L'objectif est également d'estimer la taille du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes, en exploitant les mesures de débit de la Fontaine (débitmètre installé dans le canal depuis fin 2004), et les mesures de niveaux piézométriques dans l'Aven Mazauric pratiquées depuis 1998, en utilisant le logiciel GARDENIA, développé par le Brgm (Thiéry, 2003).

4.4.2. Principe et fonctionnement du modèle GARDENIA

a) Principe

Le logiciel GARDENIA (modèle Global A Réservoirs pour la simulation des DÉbits et des Niveaux Aquifères) a été développé par le BRGM. Il fonctionne sur le principe de réservoirs en série symbolisant les différents horizons naturels : le sol, la zone non saturée, et la zone saturée (Illustration 52) :

- la pluie efficace constitue la sortie du premier réservoir « SOL » ;

- au niveau du réservoir superficiel « ZONE NON SATUREE » s'effectue le partage de la pluie efficace entre le ruissellement de surface (assimilé à un écoulement rapide), et l'infiltration vers l'aquifère (recharge) ;
- le réservoir « ZONE SATUREE » représente l'aquifère, dont la vidange est assimilée à un écoulement retardé. L'écoulement total vers le cours d'eau est la somme des écoulements rapide et retardé.

Le modèle à un réservoir souterrain est le plus simple pour représenter la zone non saturée. GARDENIA propose également des schémas plus complexes : deux réservoirs souterrains en série pour représenter les écoulements très retardés, ou un réservoir avec deux exutoires, l'exutoire supérieur n'étant fonctionnel qu'au-dessus d'un seuil.

b) Lois et paramètres du modèle

Les lois temporelles régissant les échanges entre les réservoirs du modèle GARDENIA sont les suivantes (Illustration 53) :

- la pluie efficace est calculée à partir des chroniques concomitantes de pluie et d'évapotranspiration potentielle, selon la méthode classique de bilans enchaînés de Turc et Thornthwaite prenant en compte la réserve en eau du sol à chaque pas de temps. La réserve en eau maximale du sol est fixée par le paramètre **RFU** (Réserve Facilement Utilisable, cf. Annexe 4) ;
- l'infiltration vers l'aquifère suit une loi classique de vidange exponentielle de constante de temps τ_r . Le ruissellement suit lui une loi non linéaire contrôlée par le paramètre **H_r**, hauteur seuil pour laquelle il y a égalité des débits entre le ruissellement et l'infiltration vers l'aquifère ;
- la vidange de l'aquifère suit une loi exponentielle de constante de temps τ_1 . Le niveau d'eau résultant dans l'aquifère est dépendant du bilan en eau entre apport par la recharge et vidange.

Pour améliorer le calage du modèle, l'utilisateur a la possibilité de jouer sur des **facteurs correctifs** des pluies et des ETP (pour tenir compte d'éventuelles incertitudes sur les données d'entrée par exemple), et également :

- pour une modélisation de débits, sur la **surface du bassin versant** ;
- pour une modélisation de niveau piézométrique, sur le niveau de base **N_b**, et sur le coefficient d'emménagement **S**.

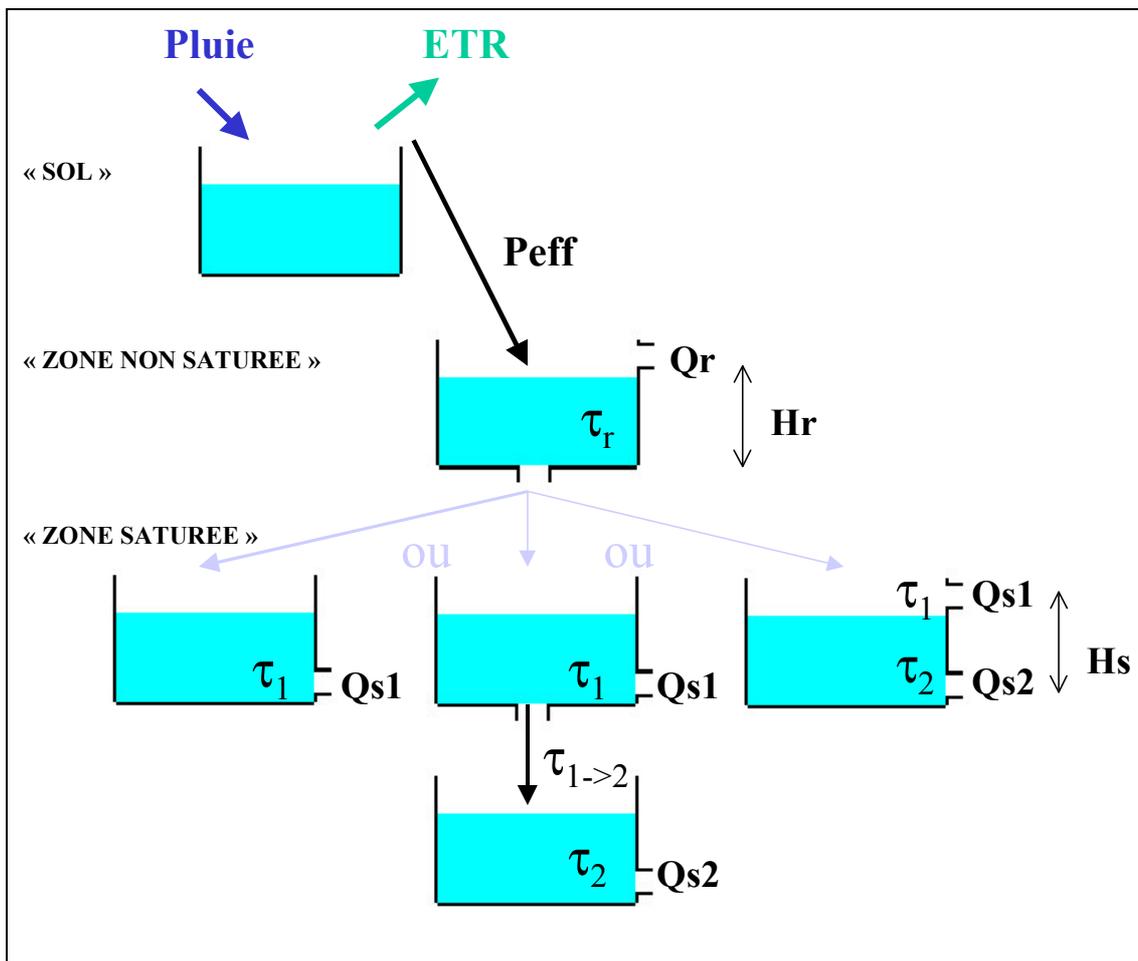


Illustration 52 : Schéma de principe du modèle global à réservoirs GARDENIA

c) Données d'entrée du modèle

Les données d'entrée du modèle GARDENIA sont :

- des chroniques concomitantes de pluie et d'ETP, une seule valeur équivalente étant considérée pour tout le bassin versant, d'où l'appellation de modèle « global » ;
- une chronique de débits observés (ou de niveaux piézométriques observés, selon le cas) qui sera utilisée pour le calage du modèle.

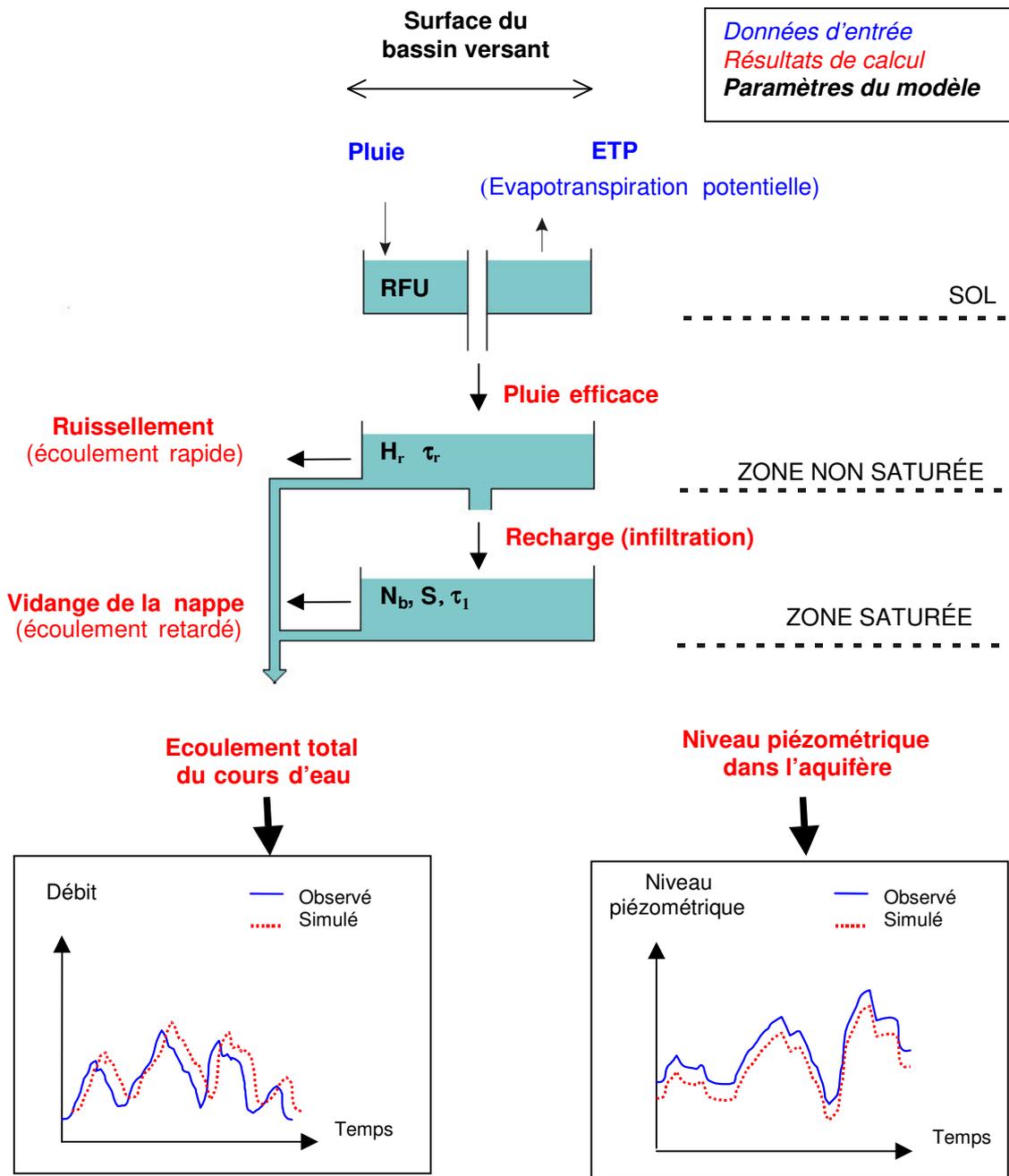


Illustration 53 : Données d'entrée et paramètres du modèle GARDENIA (dans le cas simple d'un seul réservoir souterrain)

d) Calage du modèle

Le calage s'effectue en faisant coïncider au mieux observations (débits ou niveaux piézométriques) et résultats de calcul sur la période de calage choisie, en jouant sur les différents paramètres du modèle, qui sont autant de degrés de liberté.

La qualité du calage d'un modèle dépend de plusieurs facteurs :

- l'aptitude du modèle conceptuel choisi à représenter les variations du système réel ;
- le nombre de paramètres : la difficulté du calage augmente avec le nombre de degrés de liberté du modèle ;
- l'effet de ces paramètres sur les résultats : des paramètres peuvent avoir des effets qui s'ajoutent ou au contraire s'annulent (par exemple, surface du bassin versant et coefficient correcteur des pluies). Un calage n'est donc pas univoque, plusieurs jeux de paramètres différents pouvant conduire à des calages équivalents en terme d'ajustement des chroniques observées et simulées ;
- les valeurs de départ données à ces paramètres : le calage sera facilité si les valeurs de départ sont proches des valeurs optimales.

e) Limite des interprétations

Comme tout modèle, GARDENIA est une schématisation simplifiée des phénomènes physiques naturels. Son utilisation première est la reconstitution des variations de débits et/ou de niveaux piézométriques à partir de chroniques de pluie et d'ETP. La signification physique des différents paramètres est toute relative : un calage pourra être considéré comme correct, avec des valeurs numériques de paramètres qui ne sont pas forcément très réalistes.

4.4.3. Modélisation de la Fontaine de Nîmes

a) Données d'entrée du modèle

• Données de débits de la Fontaine de Nîmes

Les données de débit de la Fontaine ont été reconstituées au pas de temps journalier depuis la fin 1998 (§ 3.2).

• Données pluviométriques

Nous disposons de chroniques de pluies journalières sur les trois stations météorologiques de Nîmes Courbessac, La Rouvière, et Mas de Ponge. GARDENIA ne prenant en compte qu'une pluie globale sur tout le bassin versant, nous avons

utilisé la pluie pondérée équivalente calculée avec le logiciel TEMPO, de façon à maximiser le corrélogramme croisé entre :

- la moyenne algébrique pondérée des pluies journalières des trois stations ;
- le niveau piézométrique mesuré à l'Aven Mazauric.

Le résultat du calcul est le suivant (cf. § 4.3.2) :

$$\text{Pluie équivalente} = 0,37 \times \text{Courbessac} + 0,34 \times \text{Ponges} + 0,29 \times \text{Rouvière}$$

La chronique de pluie équivalente pondérée utilisée couvre la période du 1^{er} janvier 1998 au 31 mai 2004, soit près de 7 ans de données au pas journalier.

• Données d'évapotranspiration potentielle

Nous disposons des valeurs journalières d'évapotranspiration potentielle calculée par Météo-France par la méthode de Thornwaith, au poste de Nîmes-Courbessac. La chronique d'ETP utilisée couvre la période du 1^{er} janvier 1998 au 31 octobre 2004, soit près de 7 ans de données au pas journalier.

b) Résultats du modèle à un réservoir souterrain à un exutoire

• Choix du modèle

Le premier choix est d'utiliser une version « simple » du modèle, en modélisant la zone saturée à l'aide d'un réservoir souterrain avec un seul exutoire (Illustration 52).

• Calage du modèle : choix des paramètres

Les choix de calage ont été les suivants :

- il n'a pas été pris en compte de coefficients correcteurs de pluie et d'ETP, ceux-ci pouvant avoir le même effet que la surface du bassin versant ;
- quatre paramètres ont été laissés libres : la surface du bassin versant, RFU, τ_r et τ_1 .

Deux types de modélisation ont été réalisées au niveau du réservoir superficiel (« zone non saturée ») :

- la première en considérant la possibilité de ruissellement (écoulement « rapide » contrôlé par le seuil H_r , paramètre supplémentaire alors laissé libre pour le calage) ;
- la seconde en supprimant la possibilité de ruissellement, ce qui revient à privilégier l'infiltration.

• Résultats des simulations

Les résultats des simulations sont assez médiocres (Illustration 59), les pics de crue importants sont sous-estimés, et les petits pics ne sont pas représentés. Si les temps d'arrivée des pics de crue sont assez bien rendus, on ne parvient pas à simuler correctement l'étiage.

Le modèle avec ruissellement surestime les étiages, les temps de vidange des réservoirs étant lents. Le modèle sans ruissellement sous-estime les étiages, les temps de vidange des réservoirs étant courts.

Dans les deux cas, le débit maximal estimé pour l'épisode de crue de septembre 2002 est de l'ordre de 28 m³/s.

c) Résultats du modèle à un réservoir souterrain à deux exutoires

• Choix du modèle

Une deuxième série d'essais a été menée en considérant un réservoir souterrain à deux exutoires : l'exutoire supérieur n'est fonctionnel que lorsque le niveau d'eau dans le réservoir dépasse le seul H_s (Illustration 52). Ce type de modèle peut être intéressant pour simuler une côte de débordement, ou pour les cas où la courbe de tarissement descend plus vite au début (quand les deux exutoires fonctionnent) qu'à la fin, lorsque seul l'exutoire le plus profond est en service.

• Calage du modèle : choix des paramètres

Dans ce cas, deux paramètres supplémentaires sont à prendre en compte : le seuil de tarissement H_s , et le temps de vidange τ_2 du deuxième exutoire (qui suit lui aussi une loi exponentielle). Comme dans le cas précédent, deux types de modélisation sont testées en permettant ou non du ruissellement dans le réservoir superficiel.

• Résultats des simulations

Les résultats de simulation sont là encore assez médiocres, les pics de crue importants sont sous-estimés, et les petits pics ne sont pas représentés.

La présence du deuxième exutoire atténue les différences engendrées par la présence ou non du ruissellement : dans le cas où le ruissellement n'est pas permis par le modèle, la composante rapide de l'écoulement est assurée par l'exutoire supérieur du réservoir souterrain.

Dans les deux cas, le débit maximal estimé pour l'épisode de crue de septembre 2002 est de l'ordre de 29 m³/s.

d) Résultats du modèle à deux réservoirs souterrains

• Choix du modèle

Enfin, une troisième série d'essais est menée en considérant deux réservoirs souterrains en série. Cette configuration peut être intéressante pour représenter un aquifère profond, ou une partie inférieure de l'aquifère.

• Calage du modèle : choix des paramètres

Dans ce cas, il faut considérer, en plus des paramètres du modèle à un réservoir à un exutoire, deux paramètres supplémentaires : les temps de vidange $\tau_{1 \rightarrow 2}$ (du réservoir 1 dans le réservoir 2), et τ_2 (temps de vidange du second réservoir).

• Résultats des simulations

Les résultats restent assez médiocres, les petits pics de crue n'apparaissent pas, les étiages sont trop importants.

Dans le cas de la prise en compte du ruissellement dans le réservoir superficiel, le réservoir souterrain profond ne participe pratiquement pas à l'écoulement (temps très long pour la vidange du premier réservoir souterrain dans le second). En revanche, il intervient lorsque le ruissellement n'est pas permis par le modèle : la composante rapide de l'écoulement est alors assurée par le premier réservoir souterrain, et le second assure la composante lente.

Le débit maximum du pic de crue de septembre 2002 est de l'ordre de 28 m³/s dans le cas où le ruissellement est pris en compte, et de 31 m³/s dans le cas contraire.

e) Synthèse des résultats de simulations avec GARDENIA

• Synthèse générale

Le tableau suivant récapitule les principaux résultats des simulations (Illustration 54). Dans tous les cas, l'ajustement reste très médiocre, avec des coefficients de Nash compris entre 0,45 et 0,6 (à comparer avec des coefficients de l'ordre de 0.73 obtenus par modélisation inverse au § 4.3.3). Globalement, si les temps d'arrivée des principaux pics de crue sont bien rendus, leur amplitude est sous-estimée. Les petits pics de crue n'apparaissent pas, et les étiages sont :

- soit surestimés quand le ruissellement est permis par le modèle (le réservoir superficiel assure alors la composante rapide, et le réservoir souterrain une composante lente avec un temps de décroissance trop important) ;
- soit sous-estimés quand le ruissellement n'est pas permis par le modèle (la composante rapide de l'écoulement est alors assurée par le réservoir souterrain).

Le débit maximal calculé serait de l'ordre de **28 à 31 m³/s** pour l'épisode de crue de septembre 2002 (avec 208 et 100 mm de pluie les 8 et 9 septembre respectivement).

Type de modèle	Ruissellement dans le réservoir superficiel (ZNS)	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non
	Réservoir(s) souterrain(s)	1 réservoir à 1 exutoire		1 réservoir, avec 2 exutoires (seuil)		2 réservoirs en série	
Paramètres calés	RFU (mm)	21	95	21	32	21	106
	Hr (mm)	17		25		17	
	τ (mois)	2,53	0,07	1,71	0,06	2,54	0,06
	τ_1 (mois)	1,28	0,05	1,55	0,05	1,31	0,08
	Hs (mm)			33	56		
	$\tau_{1 \rightarrow 2}$ (mois)					49,99	0,22
	τ_2 (mois)			2,47	1,19	1,32	2,22
	Surface du bassin versant (km ²)	54	54	54	51	54	74
Coefficient de Nash		0,45	0,54	0,45	0,58	0,45	0,57
Pluie efficace moyenne annuelle sur la période de calcul 1999-2003 (mm/an)		396	214	397	343	396	204
% de la pluie efficace / pluie équivalente moyenne sur la période de calcul 1999-2003 (939 mm/an)		42%	23%	42%	37%	42%	22%

Illustration 54 : Synthèse des résultats de calage avec GARDENIA

• Pluies efficaces

Les pluies efficaces moyennes annuelles calculées par GARDENIA sur la période d'ajustement (1^{er} janvier 1999 au 31 mai 2004) varient entre 204 mm/an et 397 mm/an.

Les valeurs de pluie efficace les plus faibles sont directement liées aux valeurs de Réserve Facilement Utilisable (RFU) les plus fortes, de plus de 95 mm. Ces valeurs de RFU ne sont pas très réalistes en contexte de karst, où les sols sont a priori peu épais. De plus, elles conduisent à des pluies efficaces a priori trop faibles, puisqu'elles ne représenteraient que 22 à 23% de la pluie totale.

Les pluies efficaces calculées avec une RFU de l'ordre de 21 mm paraissent plus réalistes : avec 396 mm/an, elles représenteraient près de la moitié de la pluie, ce qui est plus plausible.

L'illustration 63 montre la répartition des pluies efficaces journalières calculées avec GARDENIA (modèle à un réservoir souterrain à un exutoire), avec l'exemple des années 2002 et 2003. Elle fait apparaître que les épisodes pluvieux donnant lieu à des pluies efficaces ont lieu principalement au printemps et en hiver, lorsque la demande évapo-transpiratoire est faible. En été, des pluies efficaces ne peuvent avoir lieu que

pour des épisodes pluvieux plus intenses, comme dans le cas des fortes pluies de septembre 2002.

• Répartition des différentes composantes de l'écoulement

Le tableau ci-dessous (Illustration 55) résume les différentes composantes de l'écoulement, exprimées en lames d'eau moyennes annuelles calculées par GARDENIA sur la période de calage 1^{er} janvier 1999 – 31 mai 2004. Il montre qu'en moyenne annuelle, la contribution de l'écoulement dit « rapide » ayant lieu dans le réservoir de surface apparaît comme très largement majoritaire (plus de 70% de la pluie efficace), excepté dans les cas tests où cet écoulement de surface a été volontairement limité (inférieur à 5% de la pluie efficace).

Type de modèle	Ruissellement dans le réservoir superficiel (ZNS)	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non
	Réservoir(s) souterrain(s)	1 réservoir à 1 exutoire		1 réservoir, avec 2 exutoires (seuil)		2 réservoirs en série	
Lame d'eau moyenne annuelle sur la période de calage (01/01/1999 - 31/05/2004)	Pluie (mm)	823					
	<i>RFU calée (mm)</i>	21	95	21	32	21	106
	ETR (mm)	419	599	418	473	419	610
	Pluie efficace (mm)	408	235	408	355	408	225
	% pluie efficace / Pluie	50%	29%	50%	43%	50%	27%
	Débit « rapide » (ruissellement dans la ZNS) (mm)	316	11	284	14	317	10
	% / Pefficace	78%	5%	70%	4%	78%	4%
	Débit souterrain réservoir n°1 par l'exutoire n°1 (mm)	101	225	23	160	98	153
	% / Pefficace	25%	95%	6%	45%	24%	68%
	Débit souterrain réservoir n°1 par l'exutoire n°2 (mm)			112	188		
	% / Pefficace			27%	53%		
	Débit souterrain réservoir n°2 (mm)					3	62
	% / Pefficace					1%	28%

Illustration 55 : Répartition des différentes composantes de l'écoulement calculées avec GARDENIA (en moyenne annuelle sur la période de calage 1^{er} janvier 1999 – 31 mai 2004)

L'illustration 62 montre le détail de la répartition des différentes composantes de l'écoulement au pas de temps mensuel, avec l'exemple du modèle GARDENIA à un réservoir et à un exutoire. Pour être plus parlantes, les lames d'eau calculées exprimées en mm ont été traduites en débit moyen mensuel par multiplication par la

surface du bassin versant estimé (54 km² dans ce cas). Il apparaît que la contribution de l'écoulement « rapide » au débit total de la Fontaine est majoritaire en période de crue, et diminue au profit de la composante souterraine en période d'étiage. Pour l'épisode de crue de septembre 2002, la contribution de l'écoulement de surface est estimée à 95%. En période d'étiage prononcé (comme en août 2003), l'écoulement souterrain assure près de 90% du débit de la Fontaine. Ces chiffres ne sont cependant qu'indicatifs, au regard de la médiocrité de l'ajustement, et du travail sur les moyennes annuelles, nécessairement lissées.

• Taille du bassin versant

Toutes les simulations ont été réalisées en prenant une valeur initiale de 50 km² pour la taille du bassin versant. Le tableau précédent (Illustration 54) montre que les valeurs calées restent homogènes, de l'ordre de 54 km², exceptée pour la simulation à deux réservoirs et sans ruissellement dans le réservoir superficiel, qui affiche 74 km².

La taille du bassin versant ajustée par le modèle dépend directement de la valeur de la pluie efficace calculée, qui elle-même dépend directement de la valeur de la RFU. Il faut bien voir que le modèle établit des bilans en eau, et que l'on peut alors obtenir une même valeur de volume de pluie efficace avec plusieurs valeurs de couples surface du bassin / RFU, une taille de bassin importante pouvant compenser une faible lame de pluie efficace, et inversement. On peut s'en rendre compte avec une analyse de sensibilité, en faisant varier la valeur de la RFU, et en ne laissant que le paramètre « taille du bassin versant » libre pour le calage. Le tableau et le graphique ci-dessous montrent les résultats, dans le cas du modèle à un réservoir souterrain à un exutoire. Pour une RFU variant de 1 à 100 mm, la taille du bassin versant varie inversement de 36 à 77 km², et la pluie efficace moyenne annuelle (calculée sur la période d'ajustement 01/01/1999-31/05/2004) de 638 à 210 mm/an.

Un calage n'est donc pas univoque. Si l'on considère les simulations qui conduisent à des valeurs plausibles de pluies efficaces, la taille du bassin versant à retenir serait de l'ordre de **50 à 60 km²**. Cet ordre de grandeur est toutefois sujet à caution au regard de la médiocrité de l'ajustement.

RFU imposée (mm)	1	10	20	40	60	80	100
Taille du bassin versant calculée (km ²)	36	46	53	61	67	73	77
Peff moyenne calculée sur la période de calage 1999-2004	638	483	404	314	264	233	210
% Peff / Péquivalente moyenne sur la période 1999-2004 (939 mm/an)	68%	51%	43%	33%	28%	25%	22%

Illustration 56 : Résultats de l'analyse de sensibilité en fonction de la RFU

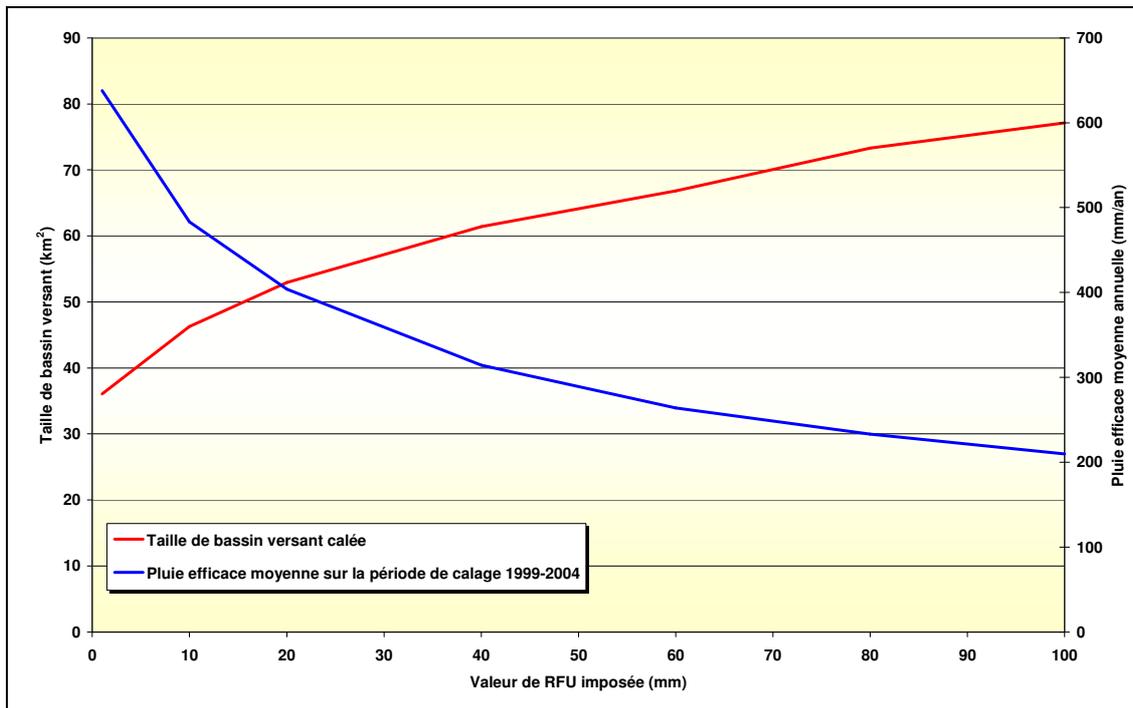


Illustration 57 : Influence la valeur de la RFU sur la taille du bassin versant et la pluie efficace moyenne annuelle calculées

f) Comparaison avec les résultats issus de TEMPO

• Pluies efficaces

La comparaison entre les valeurs mensuelles de pluies efficaces calculées par TEMPO et GARDENIA, avec l'exemple de la simulation à un réservoir à un exutoire, et en prenant en compte du ruissellement dans le réservoir superficiel, fait apparaître que les pluies efficaces calculées par TEMPO sont légèrement supérieures à celles calculées par GARDENIA, tout en restant dans les mêmes gammes de valeurs (Illustration 64). Sur la période commune d'ajustement du 1^{er} février 1999 au 31 mai 2004 (exceptés les mois de février à novembre 2002, où TEMPO n'a pas effectué de calcul de pluies efficaces en raison d'une interruption de données de débits « observés »), la contribution moyenne des pluies aux pluies efficaces est de **48% et 54%**, respectivement avec GARDENIA et TEMPO.

La taille du bassin versant calculé par TEMPO est de l'ordre de **45 km²**, soit une valeur légèrement plus faible que celle calculée par GARDENIA (**50 à 60 km²**), tendance logique si l'on considère que la lame de pluie efficace est plus importante dans le premier cas.

La comparaison des débits de la Fontaine de Nîmes simulés par GARDENIA et TEMPO montre que ce dernier permet de reconstituer de petites variations de débits,

alors que GARDENIA ne peut rendre compte que de courbes assez lissées (Illustration 65).

• Episodes pluvieux

Le tableau suivant (Illustration 58) donne quelques résultats de débit simulé pour les épisodes pluvieux de septembre 2002 et décembre 2003.

Pour l'épisode de septembre 2002, le débit maximal simulé avec GARDENIA est de l'ordre de 28 m³/s si l'on utilise les valeurs de pluie équivalente brutes (avec un maximum de 208 mm de pluie le 8 septembre), et descend à 22 m³/s si le maximum de pluie est réduit à 156 mm, comme dans les modélisations avec TEMPO. Dans ce dernier cas, on retrouve l'ordre de grandeur des débits de crue simulés par TEMPO avec les modèles paramétriques. Le modèle non paramétrique donne quant à lui des débits plus faibles (17 m³/s au maximum).

Pour l'épisode de décembre 2003, les débits simulés avec TEMPO sont supérieurs à ceux simulés avec GARDENIA. Alors que ce dernier donne un maxima estimé à 15 m³/s pour le 2 décembre 2003, le débit calculé par TEMPO varie de 20 m³/s (modèle non paramétrique) à 34 m³/s (modèle paramétrique). Cette différence s'explique peut-être en partie par l'estimation de la pluie efficace en cette période hivernale, qui est plus élevée avec TEMPO qu'avec GARDENIA.

Episode pluvieux de « septembre 2002 »					
Date	Pluie (1)	Débit mesuré(*)	Débit simulé(**)	Pluie (2)	Débit simulé(**)
	(mm/j)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(mm/j)	(m ³ /s)
07/09/2002	0.0	non mesuré	1.3	0.0	1.3
08/09/2002	208.2	non mesuré	18.2	156.0	11.9
09/09/2002	100.4	non mesuré	28.4	100.4	22.1
10/09/2002	0.0	non mesuré	21.0	0.0	16.9
11/09/2002	0.0	non mesuré	16.2	0.0	13.3
12/09/2002	0.1	non mesuré	12.9	0.1	10.8

Episode pluvieux de « décembre 2003 »			
Date	Pluie (1)	Débit mesuré(*)	Débit simulé(**)
	(mm/j)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
28/11/2003	0.0	3.0	3.2
29/11/2003	8.3	2.3	2.9
30/11/2003	14.4	1.8	3.4
01/12/2003	114.9	2.8	13.1
02/12/2003	37.2	non mesuré	14.9
03/12/2003	12.2	non mesuré	13.1
04/12/2003	0.5	non mesuré	10.7
05/12/2003	0.0	non mesuré	8.8

(1) : Pluie équivalente : 0,37*Courbessac + 0,34*Ponges + 0,29*Rouvière

(2) : Avec la valeur maximale du 08/09/2002 correspondant à la pluie à Mas de Ponges, utilisée dans la modélisation TEMPO

(*) : reconstitué d'après la courbe de tarage et les hauteurs d'eau dans l'aven Mazauric

(**) : avec le modèle GARDENIA à un réservoir à un exutoire

Illustration 58 : Exemples de résultats GARDENIA sur les épisodes pluvieux de 2002 et 2003

4.4.4. Conclusions

Il semble que le modèle GARDENIA ne permette pas de représenter les variations de débits de la Fontaine de Nîmes de façon très satisfaisante. Les variations de débits sont a priori trop rapides pour être modélisées à l'aide de cette configuration de réservoirs en série, dont l'inertie semble trop importante. Si les temps d'arrivée des pics de crue sont assez bien rendus, les amplitudes restent sous-estimées, et les petits événements sont lissés.

Les résultats suggèrent un pic de crue de l'ordre de **28 à 31 m³/s** pour l'épisode de crue majeur de **septembre 2002** (avec 208 et 100 mm de pluie les 8 et 9 septembre 2002 respectivement).

Les étiages sont généralement mal représentés, sous- ou surestimés selon les temps de vidange des réservoirs.

Les différentes configurations de modèle testées semblent montrer que le « ruissellement » (assimilé à un écoulement rapide non linéaire) n'est pas négligeable, contrairement à ce que l'on aurait pu attendre des milieux karstiques, où l'infiltration est prédominante. Ce phénomène est peut-être lié au contexte urbain d'une partie du bassin versant (surfaces imperméabilisées) et à la nature du milieu également ; les formations hauteriviennes sont souvent des marno-calcaires où le ruissellement peut s'avérer important. Il peut aussi être un artéfact de modélisation, le « ruissellement » étant le moyen, dans la configuration de GARDENIA, de rendre compte de phénomènes d'écoulement rapides. La modélisation avec TEMPO a ainsi montré que le comportement du karst de Nîmes est caractérisé par un régime d'écoulement non linéaire en période de crue (« effet de chasse »), et peu inertiel (cf §4.3.6).

La taille du bassin versant est un paramètre qui dépend fortement de la réserve facilement utilisable (RFU), qui permet le calcul de la pluie efficace. A moins de connaître ce dernier paramètre, l'utilisation du modèle GARDENIA ne permet donc pas de déterminer la taille du bassin versant avec précision. On peut cependant en fournir une fourchette, en considérant les simulations qui conduisent à des valeurs plausibles de pluies efficaces : en retenant des valeurs de RFU de l'ordre de 20-25 mm, les pluies efficaces moyennes annuelles calculées sont de l'ordre de **48 à 50%** des pluies totales, et la taille du bassin versant serait de l'ordre de **50 à 60 km²**.

Le logiciel GARDENIA est surtout dédié à la simulation de chroniques de débits ou de niveaux piézométriques à partir de chroniques concomitantes de pluies et d'ETP, avec des schémas à réservoirs dont les paramètres « optimaux » (c'est à dire obtenus pour faire coïncider au mieux les valeurs observées et calculées sur une période donnée) n'ont pas nécessairement une valeur physique très réaliste. Aussi, la détermination du bassin d'alimentation doit être prise avec précaution. C'est d'autant plus vrai dans le cas de la Fontaine de Nîmes, source karstique de débordement (voir § 4.1) : dans ce cas, elle n'est pas l'exutoire unique du système (partie de l'écoulement souterrain non contrôlé par la source), et le bilan en eau comporte donc une part d'incertitude difficilement quantifiable avec GARDENIA : la taille de bassin versant ne peut être qu'une estimation a minima.

La modélisation effectuée avec le logiciel TEMPO permet d'obtenir des variations de débits plus rapides, et également de mieux rendre compte des étiages. Elle suggère un bassin versant de l'ordre de 45 km², avec en moyenne 48% des pluies contribuant à la pluie efficace. Ces ordres de grandeur sont donc assez proches de ceux obtenus avec GARDENIA.

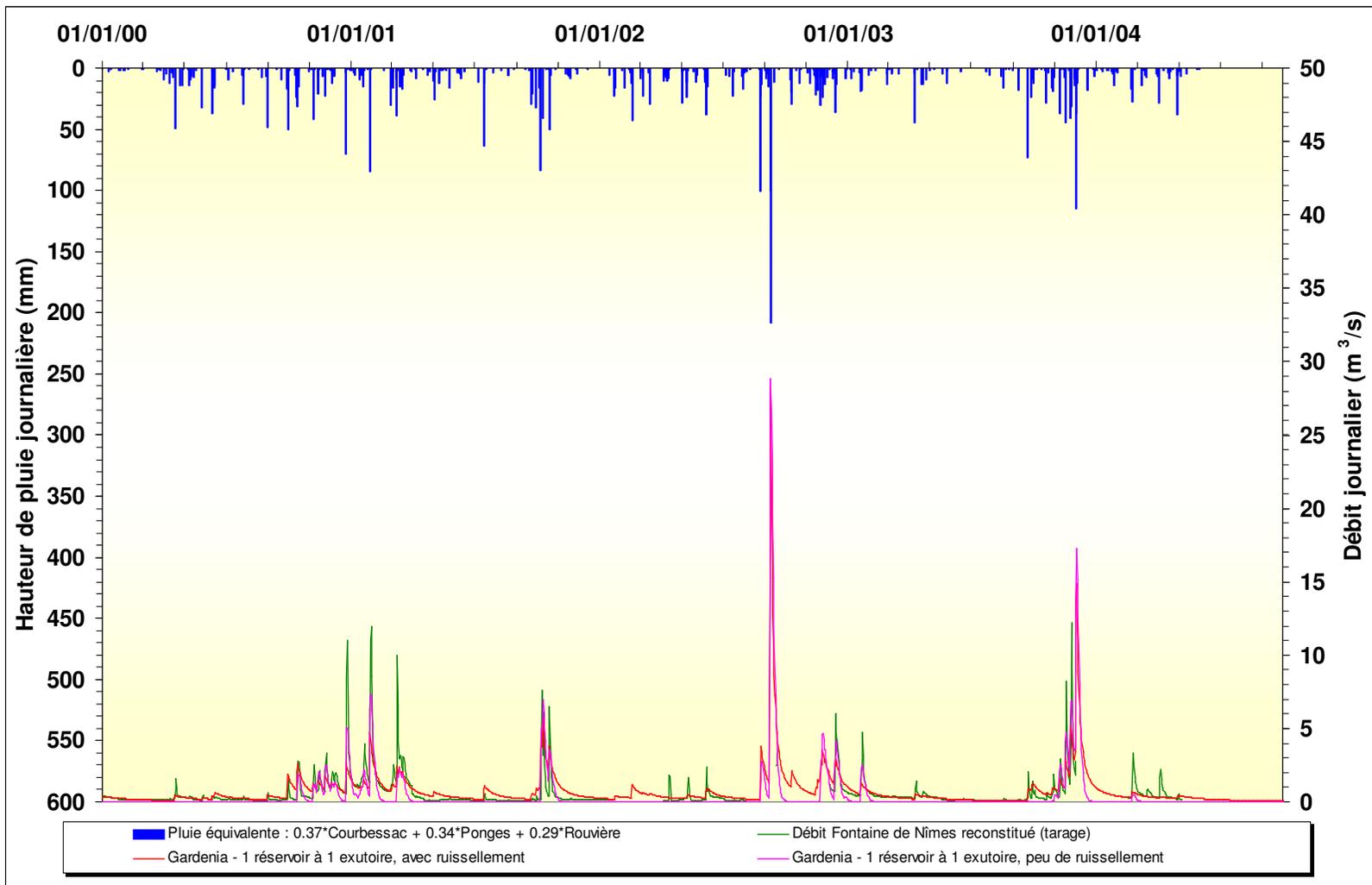


Illustration 59 : Résultats de la modélisation de débit, schéma GARDENIA à un réservoir souterrain à un exutoire

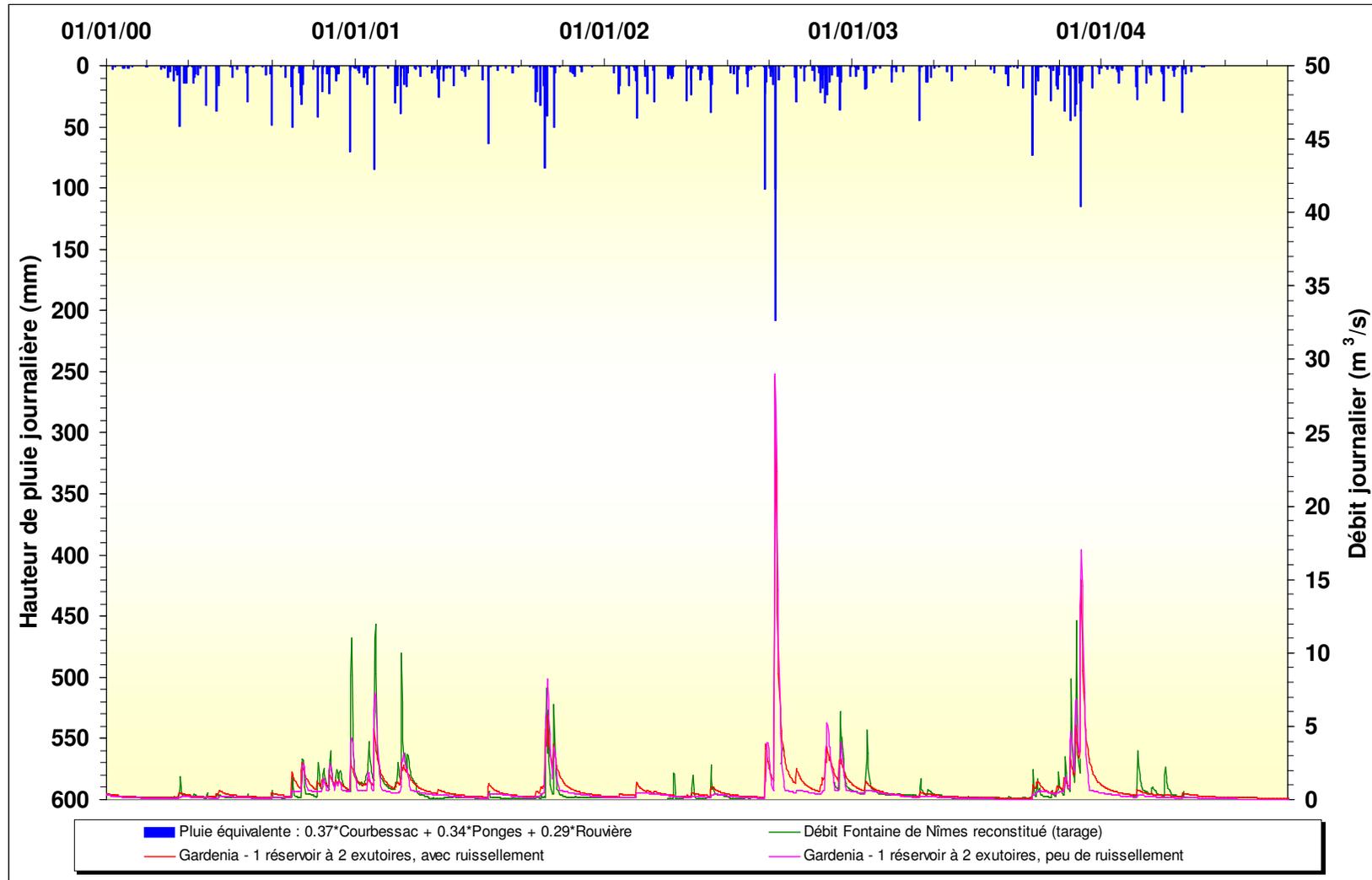


Illustration 60 : Résultats de la modélisation de débit, schéma GARDENIA à un réservoir souterrain à deux exutoires

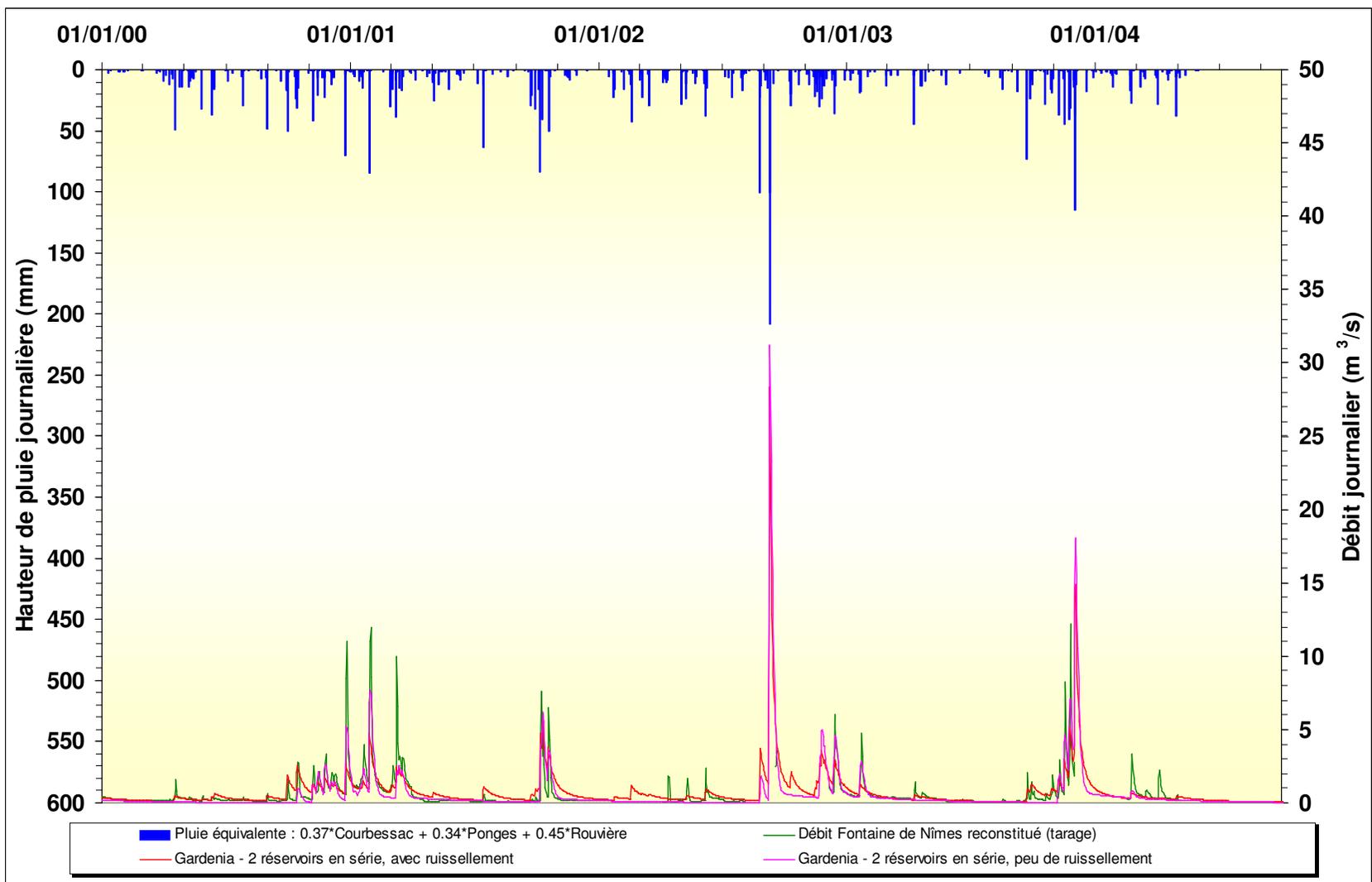


Illustration 61 : Résultats de la modélisation de débit, schéma GARDENIA à deux réservoirs souterrains en série

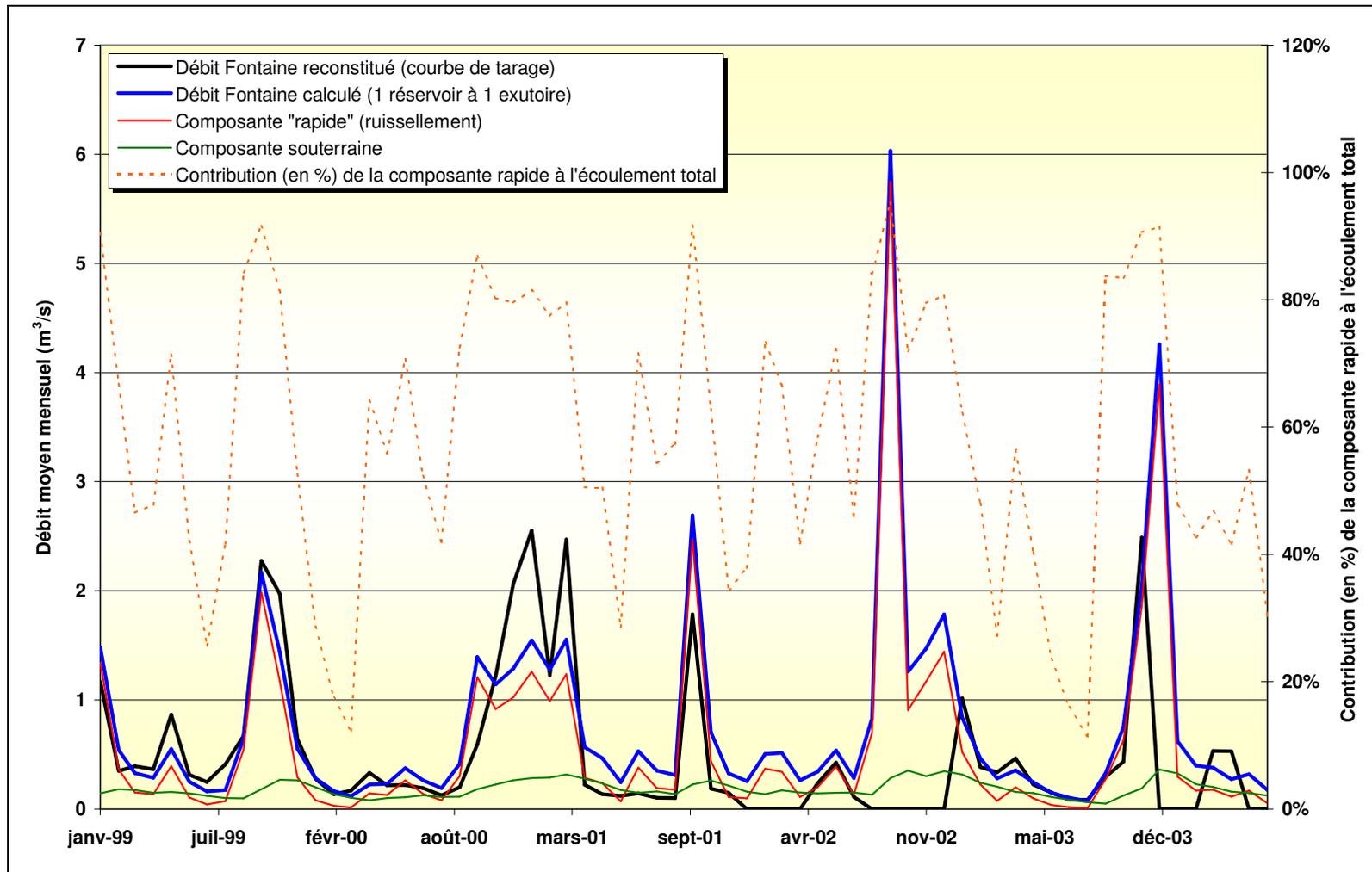


Illustration 62 : Contributions comparées des différentes composantes de l'écoulement en moyennes mensuelles (résultats obtenus dans le cas du modèle GARDENIA à un réservoir souterrain à un exutoire)

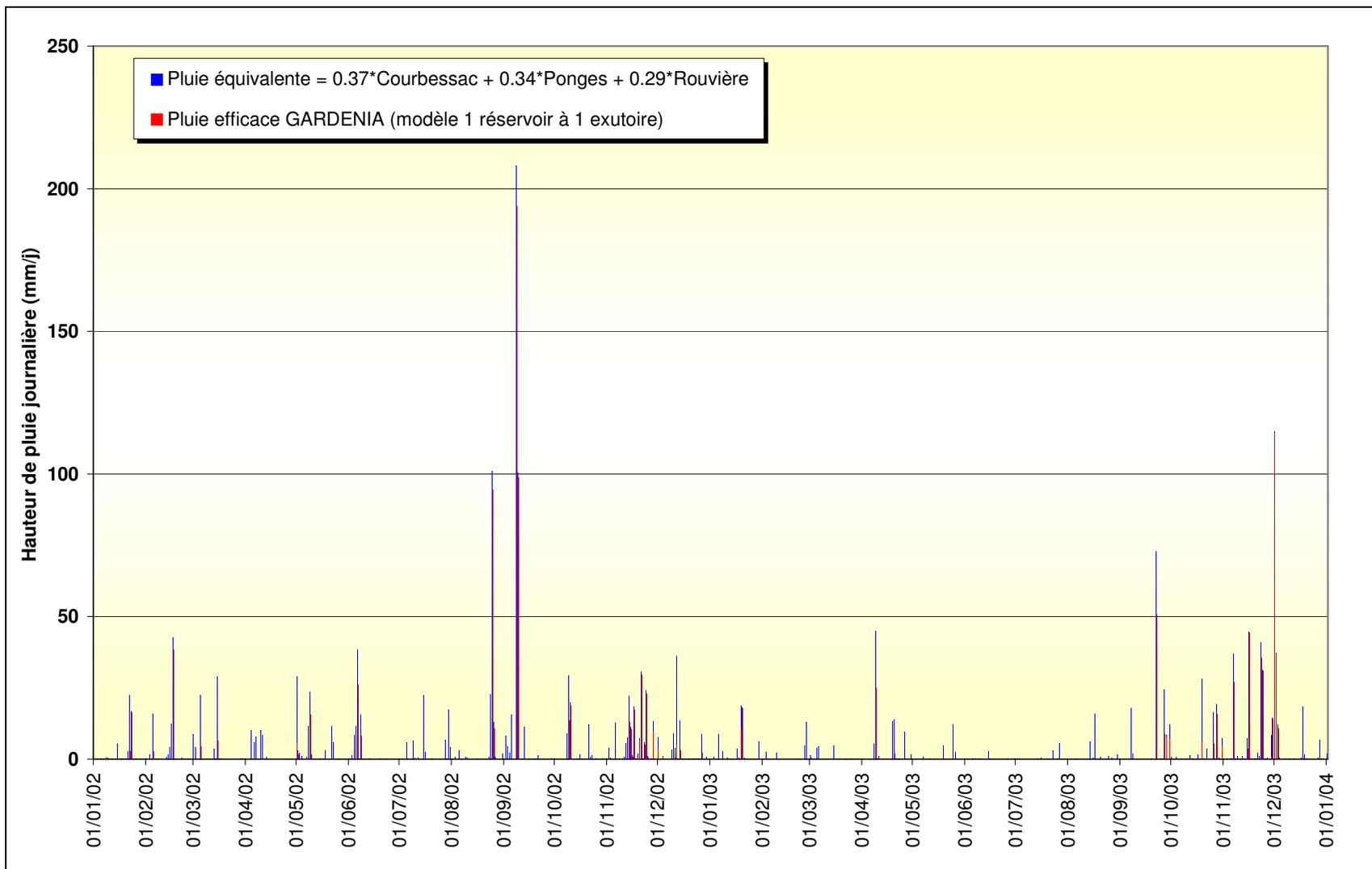


Illustration 63 : Pluie efficace journalière calculée par GARDENIA pour les années 2002 et 2003

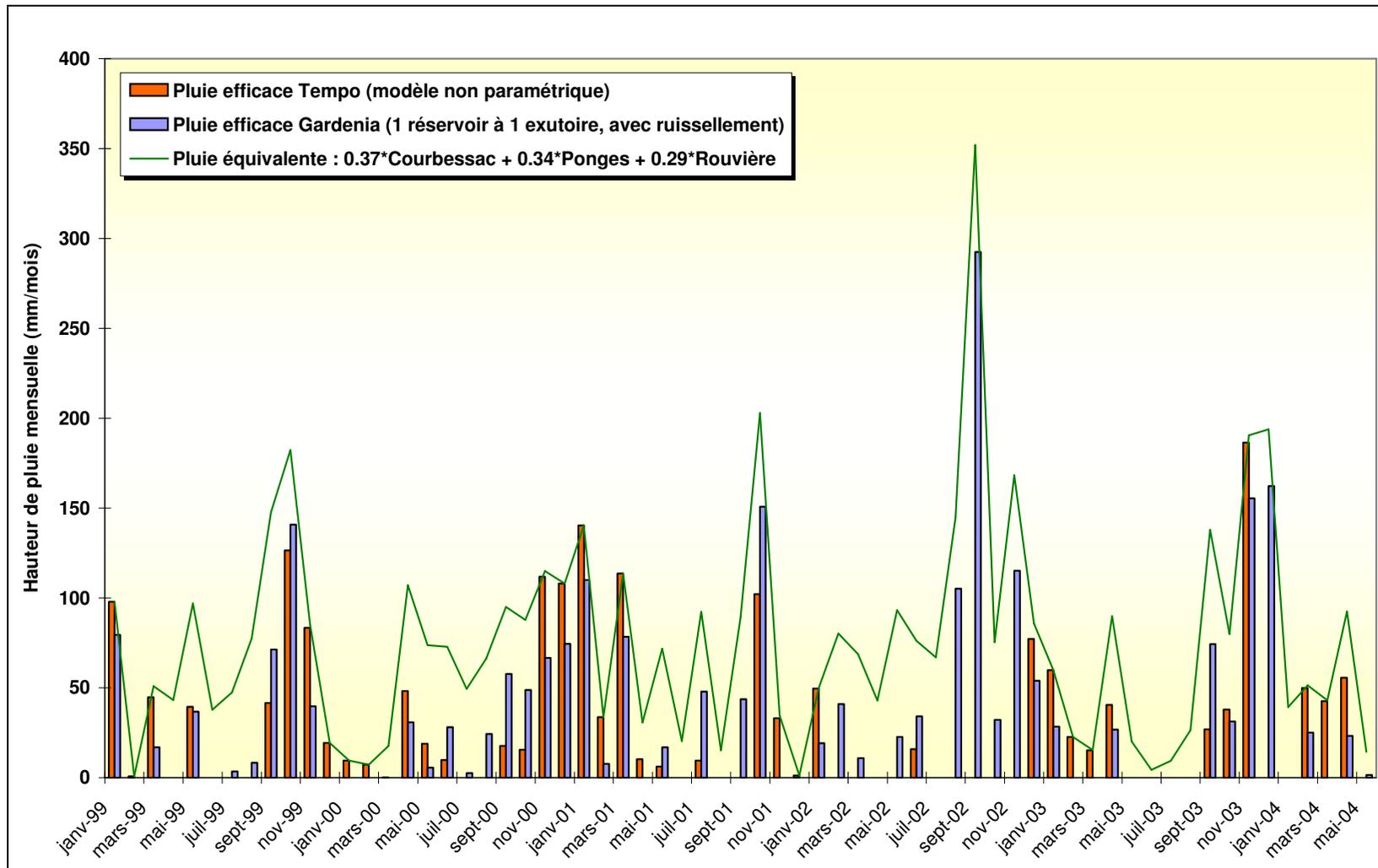


Illustration 64 : Comparaison des pluies efficaces moyennes mensuelles calculées par TEMPO et GARDENIA (nota : il n'y a pas de valeurs calculées par TEMPO sur la période février à novembre 2002)

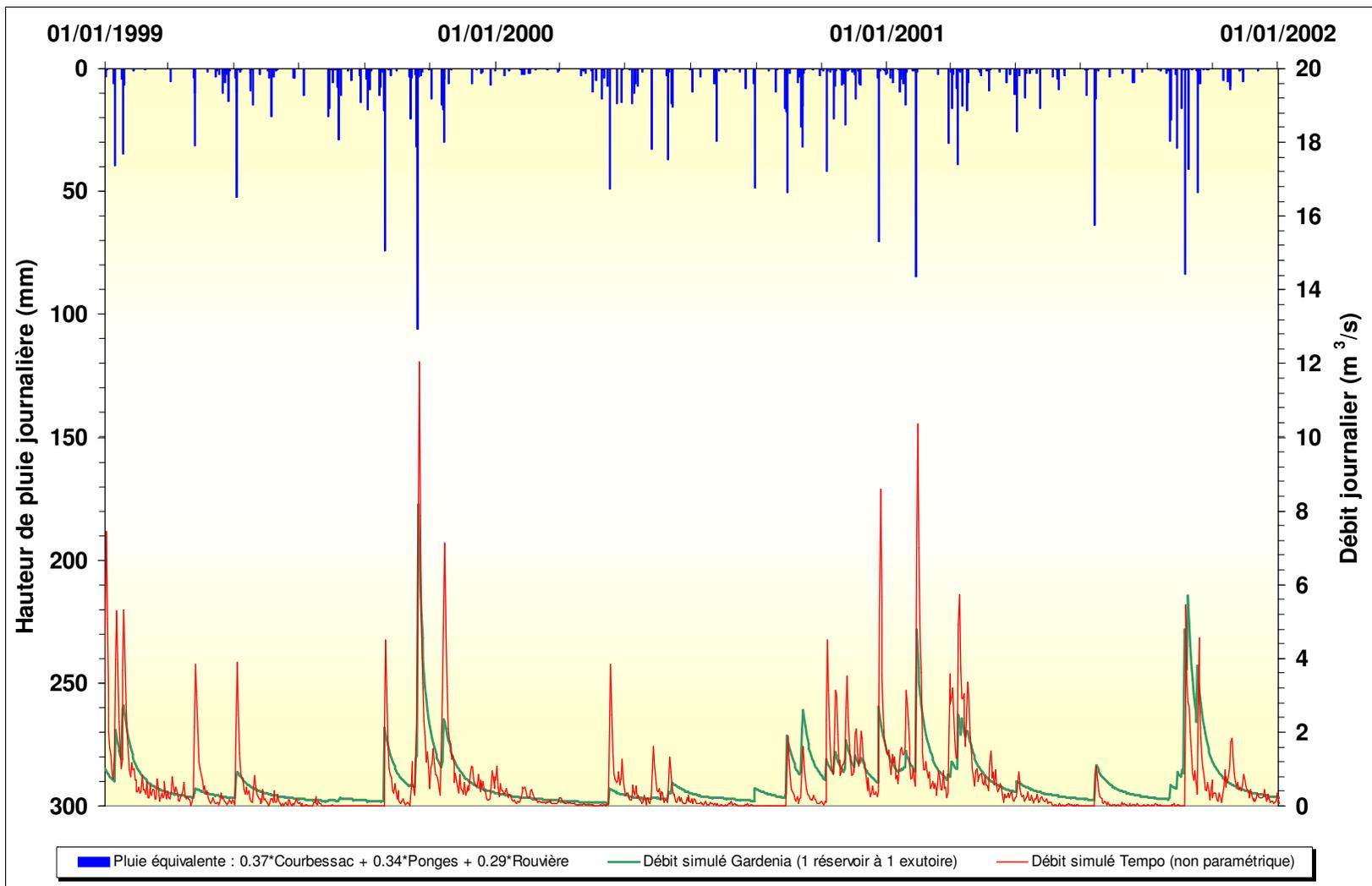


Illustration 65 : Comparaison des débits de la Fontaine de Nîmes simulés par TEMPO et GARDENIA

4.5. SYNTHÈSE DU FONCTIONNEMENT HYDROGÉOLOGIQUE

La superficie de l'impluvium des calcaires affleurants permettant la recharge par les précipitations est de l'ordre de 45 à 60 km². Ce bassin est délimité à partir des connaissances géologiques et des connexions hydrauliques prouvées ou supposées par essais de traçages artificiels.

Les caractéristiques fonctionnelles et les réserves mobilisables du système karstique ont pu être évaluées. Les données disponibles à la Fontaine de Nîmes ne permettent pas encore d'étudier le comportement du système à très à long terme (plusieurs cycles hydrologiques).

La **zone noyée du système karstique apparaît bien drainée et bien connectée à l'épikarst** qui constitue le **siège de l'infiltration des pluies**. Le transfert des impulsions lors des périodes de crue s'effectue de manière rapide, le pic de crue se produisant en moyenne 24 heures après un épisode pluvieux. Ce faible décalage indique que les écoulements se produisent dans un système en charge, c'est-à-dire dans des conduits karstiques noyés. La **réponse du système à la pluie efficace se produit pendant une durée de 12 jours** environ (durée de la recharge).

Le **comportement hydrodynamique du système karstique est différent en période de crue et d'étiage**. Lors des périodes de crue, le **système karstique** pris dans sa globalité **devient moins inertiel et évacue plus facilement les eaux lorsque le débit est supérieur à 0.25 m³/s**. La rupture observée sur les courbes de débits classés indique que les propriétés hydrauliques du système changent. Ce changement de comportement peut traduire une modification des conditions d'entrée (par les pluies efficaces) et également des conditions de sortie des eaux. En période de crue, les conditions de sortie des eaux apparaissent favorisées. Ce résultat a vraisemblablement deux origines, d'une part, la capacité de stockage du karst tend vers son maximum et celui-ci ne peut pas absorber plus d'eau, d'autre part, en période de crue, le karst mis en charge utilise un réseau plus transmissif pour évacuer les eaux. Cette seconde hypothèse peut être expliquée par la présence de formations du Quaternaire au contact avec les calcaires dans la zone d'émergence des sources. En effet, les formations du Quaternaire moins transmissives que le karst jouent le rôle d'un bouchon poreux et constituent un frein à l'écoulement. La source de la Fontaine de Nîmes semble donc apparaître comme une source de trop plein pour le système karstique. Au delà d'une certaine charge hydraulique (correspondant à un débit de 0.25 m³/s à la Fontaine), l'écoulement du karst dans les formations quaternaires cesse d'augmenter (capacité maximale atteinte) et le système karstique se vidange essentiellement via la source dont les débits augmentent plus rapidement.

Lorsque le débit excède 11 m³/s, les propriétés hydrauliques du milieu changent de nouveau, le système semble évacuer moins facilement les eaux. Ce comportement peut traduire un problème dans la courbe de tarage pour les débits très élevés (débits sous estimés) ou la mise en fonction de trop-plein correspondant à des cavités à proximité de l'exutoire (une part des débits de crue échappe à la station de jaugeage). Cette dernière hypothèse est confirmée par la mise en évidence de résurgences

temporaires situées à proximité du réseau karstique en période de crue : puits de la Gaffone à proximité de la Galerie des Poteries qui constitue un affluent du réseau spéléologique ouest et sources temporaires dans le quartier « Eau Bouillie » à proximité du réseau spéléologique nord.

Les **formations du Quaternaire** au contact avec les calcaires dans la zone d'émergence des sources **jouent un rôle vraisemblablement important dans la dynamique des écoulements du système karstique**. En effet, les formations du Quaternaire moins transmissives que le karst jouent le rôle d'un bouchon poreux et constituent un frein à l'écoulement. La **source de la Fontaine de Nîmes semble apparaître comme une source de trop plein pour le système karstique**.

Les essais de modélisation du système karstique montrent que son fonctionnement hydrodynamique est difficilement (et de façon insatisfaisante) simulé par un modèle à réservoirs de type Gardenia. Seule une modélisation inverse au moyen du modèle Tempo permet de représenter correctement la composante rapide et non linéaire de ce karst. Ce modèle a permis de recalculer les épisodes de crue non mesurés à la Fontaine (octobre 1988, septembre 2002 et décembre 2003).

5. Relations eaux souterraines – eaux de surface

5.1. INTRODUCTION

Dans le cadre du projet « ESPADA », un réseau de surveillance des cadereaux a été installé. Ce réseau, nommé NOE, est composé de neuf limnigraphes, sept pluviographes et une station couplée limnigraphe + pluviographe. Ils sont essentiellement localisés sur les cadereaux qui traversent la ville de Nîmes, à savoir les cadereaux d'Uzès, Alès, Vistre de la Fontaine, Camplanier et Valdegour. Des mesures sont également effectuées sur les cadereaux de Valladas et Pondre.

Les mesures ont été traitées depuis le 1er janvier 1998. Elles ont été enregistrées au pas de temps de 30 minutes ou 6 minutes suivant l'événement pluviométrique. Les données brutes aux limnigraphes sont des hauteurs d'eau. Des courbes de tarage ont été établies au moyen d'une modélisation hydraulique par le BCEOM pour la ville de Nîmes.

Les données limnigraphiques comportant une certaine incertitude en terme de mesures absolues de hauteurs d'eau (trous dans les données, données aberrantes, etc.) et en termes de courbe de tarage, une interprétation quantitative des données n'est pas possible. Toutefois, des tendances peuvent être mises en évidence et sont explicitées dans la suite. A ce stade de l'étude, il s'agit d'hypothèses de travail qu'il conviendra de confirmer ou d'infirmer par la suite au moyen d'autres approches, notamment à l'aide des analyses hydrochimiques en période de crue dans les cadereaux (un premier exemple de ce type d'analyse est explicité au § 6.3).

5.2. CADEREAU D'UZES

5.2.1. Bassins versants

Les données limnigraphiques du cadereau d'Uzès sont disponibles en amont au point Engances et en aval au point Vandyck. Les bassins versants respectifs de ces exutoires sont représentés à l'illustration 66. Associées aux données limnigraphiques, des données pluviographiques ont été relevées à proximité des points Engances et Vandyck. Il s'agit des points Uzès (amont) et Bompard (aval).

Le sous bassin amont d'Engances dont la pente moyenne est de 4,5 % s'étend sur une surface de 1,5 km². La géologie de ce bassin se compose essentiellement (86 %) de calcaires de l'Hauterivien supérieur (n3b). Il s'agit d'un petit bassin versant en tête de cadereau situé exclusivement dans les garrigues nîmoises qui est extrêmement peu urbanisé. On dénombre quelques habitations seulement.

La surface du bassin versant de Vandyck englobant celui d'Engances s'étend sur 6,2 km² avec une pente de 3,45 %. La géologie du bassin est composée essentiellement

de calcaires de l'Hauterivien : à 52% de l'Hauterivien supérieur et à 40% de l'Hauterivien inférieur. Ce bassin peut être divisé en deux parties : la partie amont très peu urbanisée et la partie aval où la densité d'habitations croît vers l'aval.

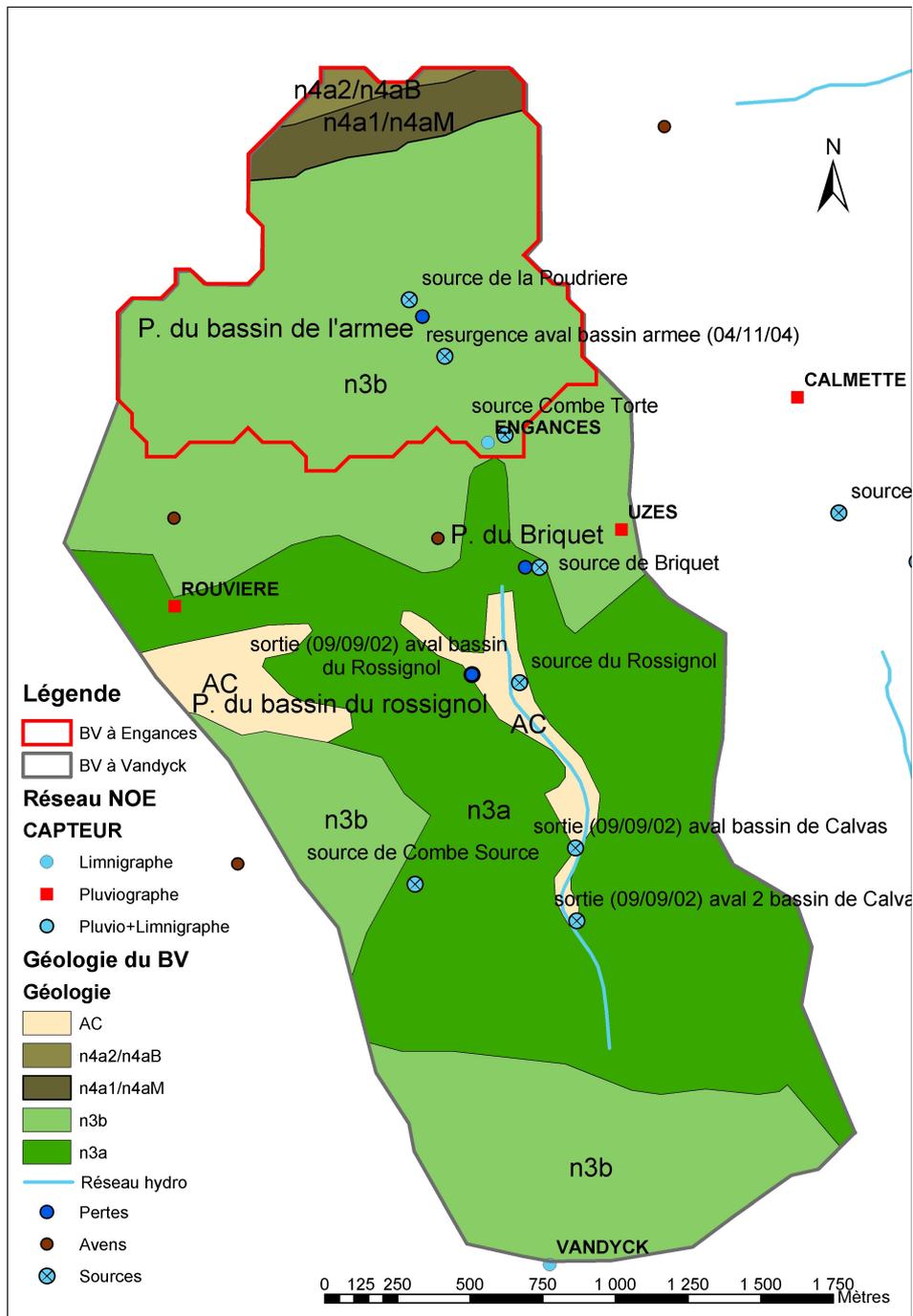


Illustration 66 : Géologie des bassins versants du cadereau d'Uzès (n3a : calcaires et calcaires marneux de l'Hauterivien inf. ; n3b : calcaires de l'Hauterivien sup. ; n4a1 : calcaires argileux du Barrémien inf. ; n4a2 : calcaires du Barrémien inf.)

5.2.2. Analyse des débits

L'évolution des débits dans les cadereaux en fonction du temps lors des épisodes de crue met en évidence deux types d'épisodes pluvieux :

- Evènement de type 1 : Débits plus élevés à l'aval qu'à l'amont (Illustration 67).

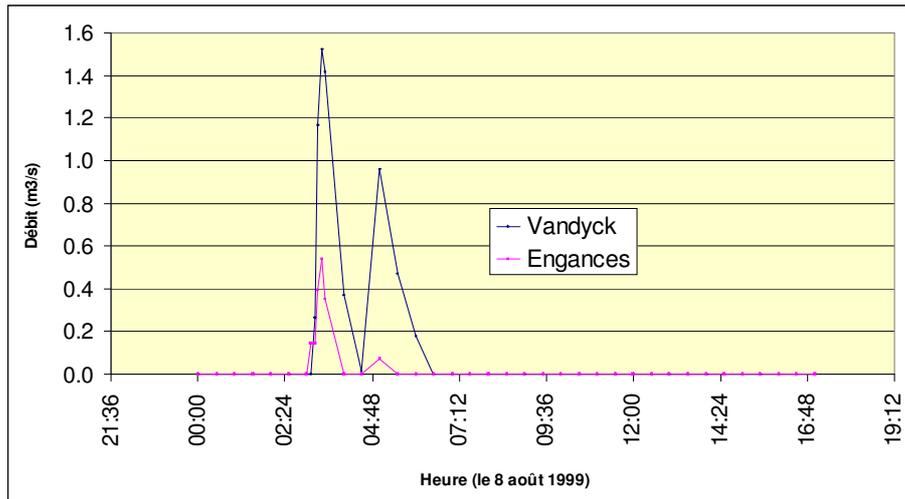


Illustration 67 : Débits en fonction du temps lors de l'épisode du 08/08/1999

- Evènement de type 2 : Débits plus faibles à l'aval qu'à l'amont (Illustration 68).

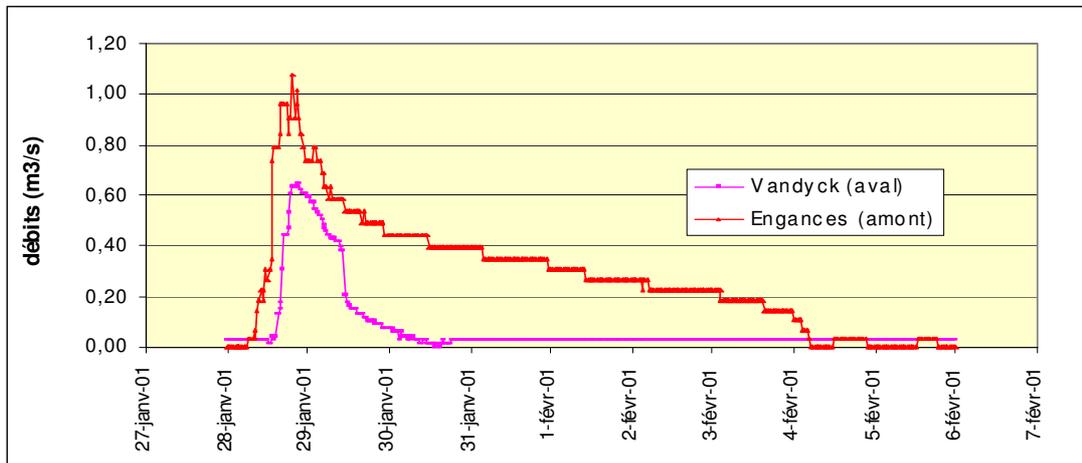


Illustration 68 : Débits en fonction du temps le 29/01/2001

Les évènements de type 1 sont rarement observés. Au contraire, les évènements de type 2 sont le plus souvent observés. Le débit en aval pendant toute la durée de l'évènement est inférieur à l'amont malgré une superficie de bassin versant plus importante. On peut donc supposer que de l'eau du cadereau s'est infiltrée vers le

karst entre les deux points de mesures. Cette infiltration se produit non seulement durant le tarissement mais également au moment du pic de crue. De telles infiltrations au sein de vallées sèches sont très communes dans les milieux karstiques.

Il a été observé que les événements de type 1 se produisent lorsque les intensités de pluie sont particulièrement élevées. Ceci suggère que les capacités d'infiltration du karst sont alors limitées lors d'évènements pluvieux particulièrement intenses.

Les relations entre le volume ruisselé et la quantité de pluie à l'amont et à l'aval sont analysées à l'illustration 69. La courbe Amont (Uzès – Engances) se situe pratiquement toujours au dessus la courbe Aval (Bompard – Vandyck), traduisant l'infiltration d'un certain volume d'eau entre l'amont et l'aval. La tendance générale de ces courbes montre une augmentation du ruissellement dans les cadereaux avec l'augmentation de la quantité de pluie, cependant, celle-ci est plus marquée à l'amont (Engances) qu'à l'aval (Vandyck).

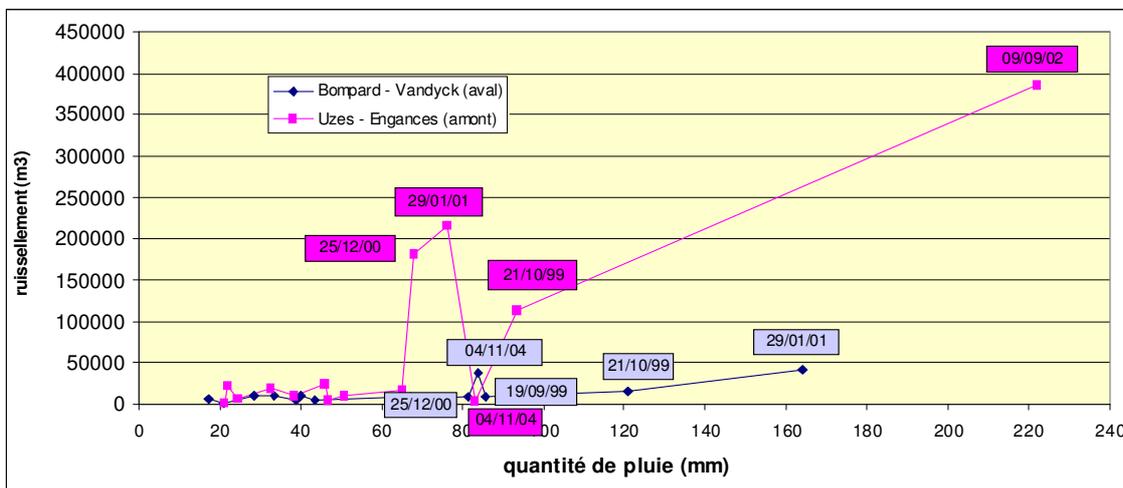


Illustration 69 : Volume total ruisselé dans le cadereau en fonction de la quantité totale de pluie tombée lors d'un épisode de pluie.

Seul l'évènement du 04/11/2004 fait exception, le volume ruisselé à Vandyck étant supérieur à celui ruisselé à Engances pour une pluie similaire. Cependant, un fort doute réside sur les données puisque selon les enregistrements, l'évènement à Engances ne durerait qu'une heure environ, contrairement aux observations des riverains qui le supposent plus long. Toutefois, un effet de la construction récente (2003) du bassin de rétention de l'armée (Camp des Garrigues, terrains militaires) à l'amont sur le volume écoulé au limnigraphe d'Engances ne peut être exclu. L'eau retenue a pu s'infiltrer en partie dans le karst, ceci expliquant la diminution de volume écoulé dans le cadereau à Engances. Cette hypothèse est confirmée par l'observation de forts remous provoqués par des remontées de bulles d'air photographiés le 4/11/2004 par des riverains dans le bassin de l'armée suggérant des remontées d'air suite à l'infiltration brutale d'eau du bassin au travers d'un aven. A l'aval du cadereau, lors du même évènement, on observe une augmentation du ruissellement à Vandyck par rapport à d'autres évènements similaires (Illustration 69), suggérant qu'une partie

de l'eau infiltrée dans le bassin de rétention est ressortie en amont de Vandyck. De telles sources temporaires sont bien connues dans les cadereaux de Nîmes sous le nom de boulidous (« l'eau qui bouillonne »). Dans le cadereau d'Uzès, plusieurs sources de ce type ont été observées dans le lit du cadereau sur un tronçon de quelques centaines de mètres en aval du pont de Ventabren (« sources aval bassin Calvas 1 et 2 » sur Illustration 66) lors des épisodes du 31/12/2002, 21/11/2003, 15/12/2003, 15/01/2004 et du 24/03/2004 (communication de M. Garrelly).

Au niveau de la courbe Amont (Illustration 69), on remarque la présence d'un seuil au delà duquel les eaux ruisselées augmentent considérablement. Ce seuil se situe vers 65 mm de pluie par épisode.

L'examen des coefficients de ruissellement dans le cadereau d'Uzès (Illustration 70) confirme les conclusions ci-dessus avec un coefficient nettement inférieur à Vandyck (entre 0.01 et 0.21) par rapport à Engances (entre 0.03 et 1.88 !). Les valeurs très élevées (≥ 0.8) de certains épisodes nous amènent à nous interroger sur la validité de ces données et sur les éventuelles interprétations qui peuvent en être faites.

Evènement	Engances	Vandyck
03/08/2004	-	0.063
10/08/1999	0.17	0.018
08/08/1999	0.03	0.058
15/03/2002	0.7	0.067
31/08/2000	0.14	0.019
17/04/2000	0.39	0.045
27/05/2000	0.18	0.02
04/09/1998	0.08	0.023
05/06/2002	0.36	0.015
25/12/2000	1.78	0.019
04/11/2004	0.03	0.07
19/09/1999	0.18	0.016
21/10/1999	0.8	0.21
29/01/2001	1.88	0.04
09/09/2002	1.16	-

Illustration 70 : coefficients de ruissellement à Engances et Vandyck dans le cadereau d'Uzès

5.3. CADEREAUX D'ALES ET DE CAMPLANIER

5.3.1. Bassins versants

Ces deux cadereaux sont regroupés car ils font l'objet d'un suivi au Cimetière Protestant (point Cimpro) en aval de la jonction entre les deux cadereaux.

Les données limnigraphiques du cadereau d'Alès sont disponibles en amont au point Anduze, au milieu au point Espesse tandis que le cadereau de Camplanier est suivi au niveau du Pont de la République. Les bassins versants respectifs sont représentés en Illustration 72. Associées aux données limnigraphiques, des données pluviographiques sont disponibles aux points Anduze (amont) et Bonfa (aval).

La surface du grand bassin versant du cimetière protestant (CIMPRO) englobant les deux cadereaux est d'environ 20 km² et sa pente moyenne de 2,36 %. La géologie des sous-bassins versants qui le composent est décrite Illustration 71. Les calcaires de l'Hauterivien (surtout supérieur) dominent dans l'ensemble sauf à l'amont, dans le bassin d'Anduze où les calcaires argileux du Barrémien dominant.

Bassin versant	Superficie (km ²)	Calcaires, Haut. Inf (n3a)	Calcaires, Haut. Sup (n3b)	Calcaires argileux du Barrémien Inf. (n4a1)	Calcaires du Barrémien Inférieur (n4a2)	Piedmont (AC)
Anduze	6.0	0 %	23 %	61 %	16 %	0 %
Espesse	10.0	10%	41 %	39 %	10 %	0 %
Camplanier	3.3	21 %	53 %	26 %	1 %	0 %
Cimetière Protestant	19.9	18 %	53 %	24 %	5 %	0.5 %

Illustration 71 : Répartition des formations géologiques dans les sous-bassins des cadereaux d'Alès et Camplanier

Tous ces bassins versants sont peu à moyennement urbanisés. Une augmentation de l'urbanisation est observée du nord vers le sud.

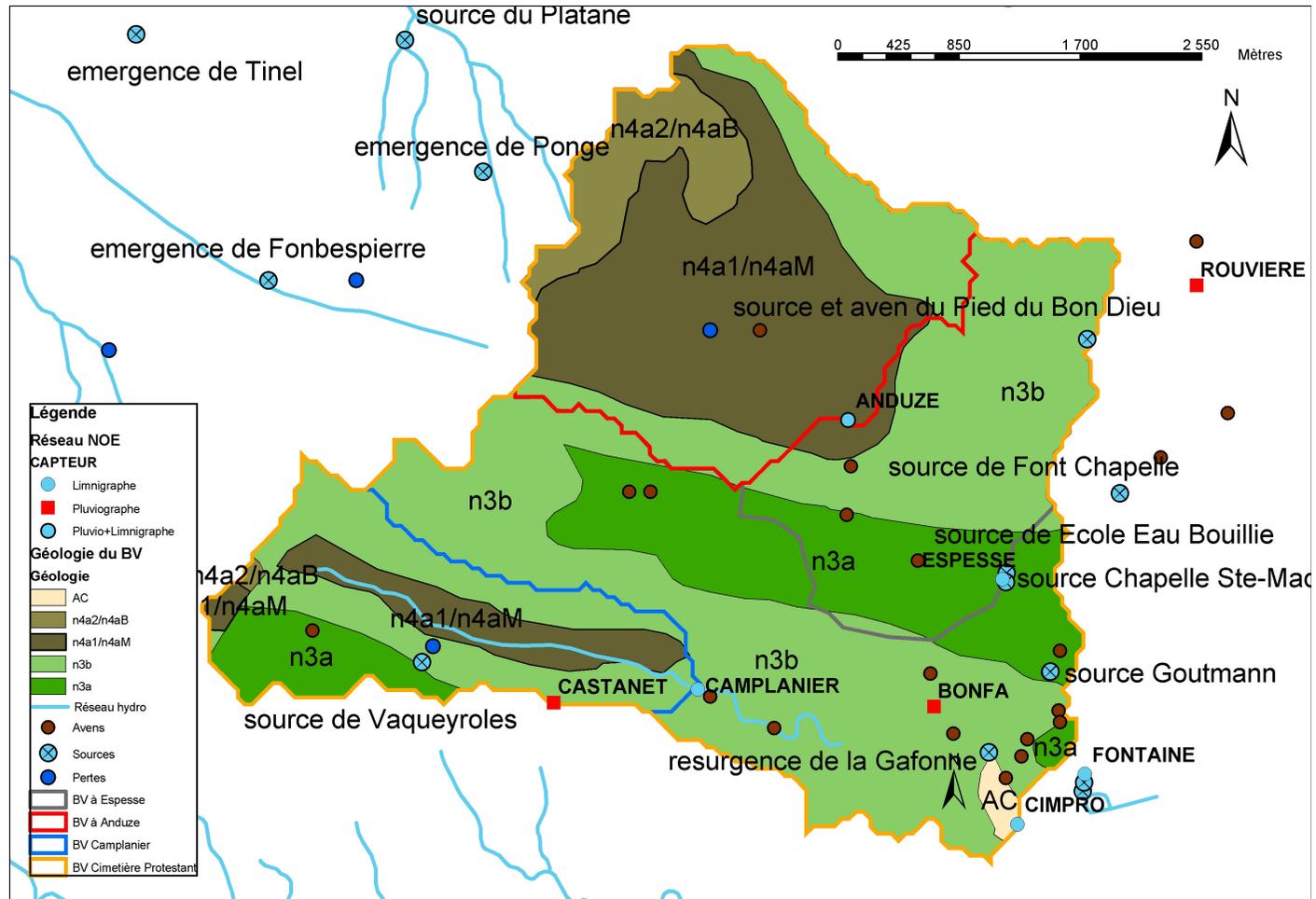


Illustration 72 : Géologie des bassins versants des cadereaux d'Alès et Camplanier (n3a : calcaires et calcaires marneux de l'Hauterivien inf. ; n3b : calcaires de l'Hauterivien sup. ; n4a1 : calcaires argileux du Barrémin inf. ; n4a2 : calcaires du Barrémin inf.)

5.3.2. Analyse des débits

Les données à Espesse sont difficilement exploitables car les débits mesurés sont très souvent très faibles voire nuls en dépit d'évènements pluvieux importants et de débits non nuls observés à l'amont et à l'aval. Un problème de métrologie est probablement en cause.

A l'amont du cadereau d'Alès, au point Anduze, la relation entre la quantité de pluie et le ruissellement est linéaire dès qu'un seuil de pluie d'environ 40 mm est atteint (Illustration 73). Les coefficients de ruissellement oscillent entre 0 et 0.14 sur ce bassin à dominante de calcaires argileux. L'accroissement linéaire observé est typique d'un bassin à fonctionnement hydrologique classique : les interactions eaux de surface/eaux souterraines sont probablement assez faibles en comparaison avec les autres bassins étudiés.

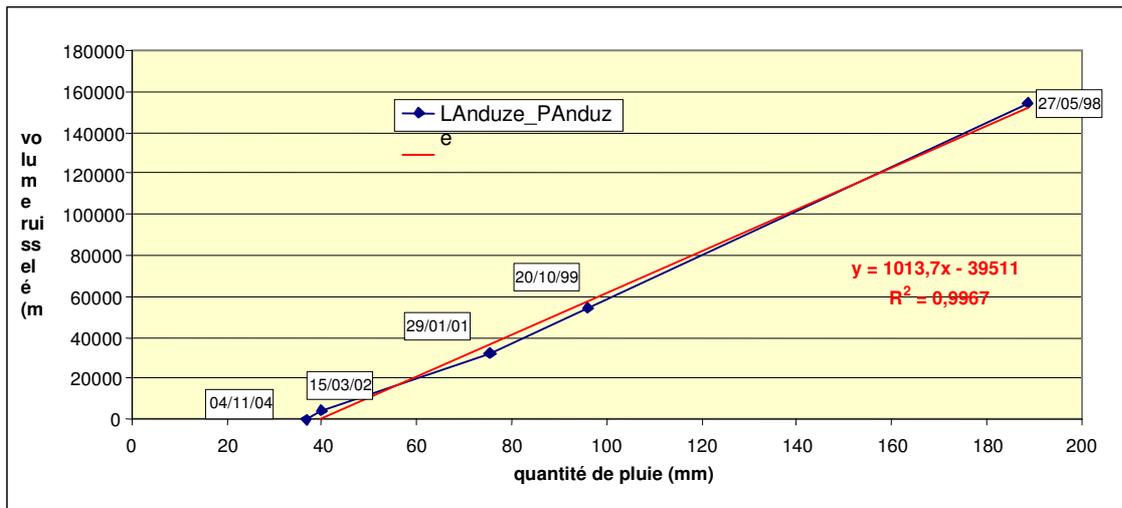


Illustration 73 : Volume total ruisselé dans le cadereau d'Alès en fonction de la quantité totale de pluie tombée au point Anduze lors d'un épisode de pluie.

Seul l'évènement du 28 mai 1998 a été enregistré aux trois stations du cadereau d'Alès (Illustration 74). Les réactions aux deux périodes de pluies de l'évènement sont plus rapides et de plus grande amplitude au Cimetière Protestant suite probablement à la plus grande urbanisation du bassin. Son coefficient de ruissellement ($C = 0.22$) est supérieur à Anduze ($C = 0.14$) probablement pour la même raison.

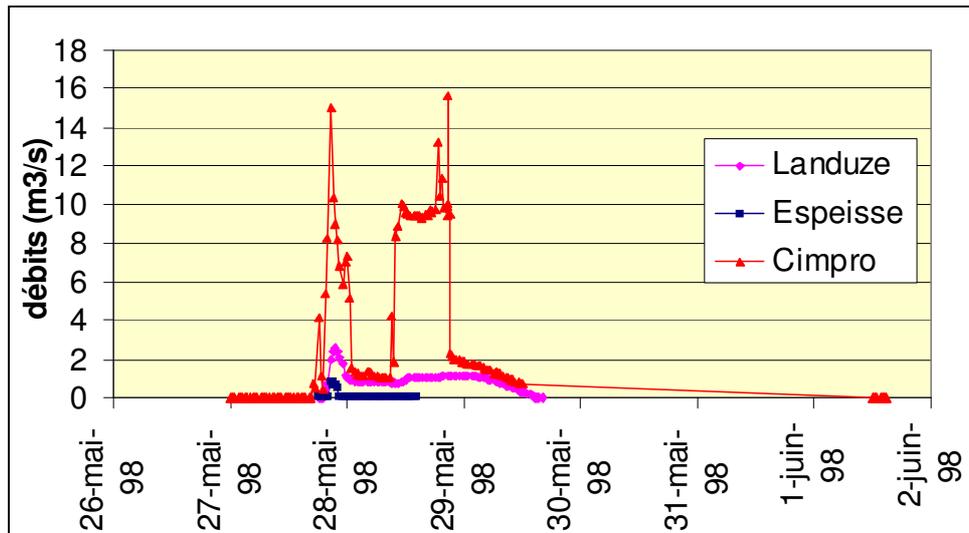


Illustration 74 : Débits dans le cadereau d'Alès lors de l'épisode du 28 mai 1998

On notera que de nombreuses résurgences ont pu être observées aux environs du point Espeisse dans le quartier de l'Eau Bouillie lors de très forts épisodes pluvieux. Il s'agit de résurgences d'eau temporaires localisées entre l'école d'Eau Bouillie et la maison de Monsieur Goutman (n°69) un peu en aval du Pont des 9 Arcades.

5.4. SYNTHÈSE

Les problèmes de métrologie associés aux limnigraphes du réseau NOE empêchent une interprétation rigoureuse et quantitative des débits mesurés.

Des phénomènes de pertes et résurgences observés par les riverains sont mis en évidence et attestent de la forte imbrication entre eaux de surface et eaux souterraines. Cet élément sera également discuté dans la suite (§ 6.3).

6. Hydrochimie

6.1. PLUIE

Au cours de la phase préliminaire de l'étude (1998-2003), un réseau de pluviomètres BRGM dédié à la caractérisation des signature chimiques des pluies avait été mis en place (cf. BRGM/RP-53422-FR). Les pluviomètres sont répartis sur l'ensemble du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes. La liste des sites et le type de suivi réalisé sont présentés dans le tableau ci-dessous.

No	Nom	Sous-type	X (m) (LIII Sud)	Y (m) (LIII Sud)
PL1	Golf Camplanier	totalisateur	757475	174175
PL2	MAS des CROTTES	totalisateur	753200	175925
PL3	Mas de CABRIERES	totalisateur	768325	179375
PL4	MAS PETIT (Nîmes)	totalisateur	782000	168425
PL5	Route d'Anduze	incrémenteur	759980	175990
PL6	Rouvière	incrémenteur	764120	176980
PL7	Calmette	incrémenteur	765880	176020
PL8	Météo	incrémenteur	766350	175040

Illustration 75 : Coordonnées des pluviomètres du BRGM.

Deux types de suivi ont été réalisés :

- Suivi mensuel de la qualité de l'eau de pluie à l'aide de 4 pluviomètres totalisateurs de type SPIEA, modifiés pour collecter l'eau dans des bidons de grande capacité (10 litres). Les analyses chimiques effectuées sur les eaux échantillonnées sont les suivantes : anions (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), cations (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+), éléments traces (bore, brome et strontium) et isotopes de l'eau (^{18}O , ^2H).
- Suivi temporel des épisodes de pluie majeurs ($H > 30$ mm) à l'aide de 4 pluviomètres « incrémenteurs » installés au niveau de 4 sites pluviométriques du réseau Noé. Ces pluviomètres d'un type particulier permettent l'échantillonnage des eaux de pluie suivant un pas incrémenté de hauteur d'eau (pas d'échantillonnage de 7 mm de hauteur de pluie). Ce type de pluviomètre, dédié exclusivement à l'analyse des signatures isotopiques de l'eau de pluie (^{18}O , ^2H) et des teneurs en chlorures des pluies, avait pour objectif la caractérisation de la variabilité temporelle des signatures isotopiques des pluies « méditerranéennes » (précipitation issue des masses d'air méditerranéennes et caractérisée par des hauteurs et des intensités de pluies importantes). Il est en effet connu que la signature géochimique des pluies évolue au cours des épisodes pluvieux. Aussi, le suivi détaillé de la signature des pluies est le préalable indispensable aux études

qui ont pour objectif la décomposition des hydrogrammes de crues (évaluation des contributions relatives des différentes composantes d'un écoulement de surface ou souterrain). Ce type de suivi a été remis en service pour les sites « Routes d'Anduze » et « Rouvière » afin de caractériser les pluies des épisodes pluvieux qui génèreront des écoulements sur les cadereaux d'Alès et d'Uzès. L'épisode pluvieux de la crue du mois de novembre 2004 a été correctement échantillonné par le pluviomètre de la route d'Anduze. La réception tardive des résultats d'analyses (^{18}O et Cl) n'a pas permis d'intégrer les résultats dans ce rapport. L'interprétation des résultats sera intégrée dans la suite de l'étude.

Une synthèse des résultats des suivis mensuels des précipitations sur la zone d'étude est présentée dans le tableau de l'illustration 76. Ce tableau présente la signature géochimique moyenne des pluies qui contribue à recharger les formations aquifères existant dans le bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes. Les eaux de pluie apparaissent très peu minéralisées au regard de celles qui sont échantillonnées dans les eaux souterraines (Annexe 5). La connaissance de la signature géochimique des pluies permet de mieux cerner le fonctionnement géochimique du système karstique tel que abordé dans les paragraphes suivants.

Période	Site	Altitude	Cumul pluie	Contribution des pluies automnales (Septembre à Novembre)	pH	HCO ₃ ⁻	Ca	SO ₄	NO ₃	NH ₄	Cl	Na	K	Mg	B	Br	Sr	δ ₂ H	δ ₁₈ O
		m	mm			mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	μg/l	μg/l	μg/l	‰	‰
0 Sept 98 - 31 Août 99	G4	135	676	25%	6.4	4.0	7.8	2.8	3.2	12.7	1.6	2.1	1.3	1.5	19.7	1.1	6.7	-34.0	-5.6
1 Sept 98 - 31 Août 99	G3	132	664	65%	6.7	1.8	1.6	1.1	0.6	2.1	1.5	2.6	0.4	0.8	14.2	1.8	1.5	-37.3	-6.1
1 Sept 98 - 31 Août 99	G2	122	655	28%	6.7	2.7	1.8	1.0	0.5	2.9	0.9	1.6	0.7	0.4	18.5	1.1	1.5	-28.9	-4.9
1 Sept 98 - 31 Août 99	G1	24	640	37%	6.8	3.5	3.0	1.4	1.3	3.6	1.5	2.4	1.0	0.6	17.7	1.1	2.6	-29.9	-5.0
1 Sept 99 - 31 Août 00	G4	135	850	25%	6.4	1.5	3.3	1.1	2.5	3.4	1.3	2.0	0.6	1.0	53.5	1.7	3.3	-38.1	-6.2
1 Sept 99 - 31 Août 00	G3	132	799	64%	6.7	1.4	1.8	0.7	0.6	1.5	1.2	1.9	0.2	0.7	47.1	1.4	1.5	-35.4	-6.0
1 Sept 99 - 31 Août 00	G2	122	701	34%	6.7	1.1	1.9	0.9	0.9	2.5	1.1	2.0	0.3	0.8	54.5	1.9	1.7	-37.0	-6.1
1 Sept 99 - 31 Août 00	G1	24	771	35%	6.8	1.6	3.2	1.0	1.8	0.8	1.5	2.1	0.6	0.9	71.2	2.0	2.7	-36.1	-5.9
1 Sept 00 - 31 Août 01	G4	135	868	25%	6.4	2.2	2.2	1.0	1.6	4.6	1.8	2.7	0.6	0.7	28.3	1.4	2.2	-37.9	-6.1
1 Sept 00 - 31 Août 01	G3	132	917	64%	6.7	1.3	1.3	0.7	0.7	1.3	2.1	3.0	0.2	0.5	25.1	1.5	1.4	-40.2	-6.5
1 Sept 00 - 31 Août 01	G2	122	840	30%	6.7	4.2	4.0	2.7	1.5	5.5	2.4	3.6	1.3	1.2	45.5	1.8	14.5	-41.0	-6.6
1 Sept 00 - 31 Août 01	G1	24	905	32%	6.8	1.9	2.3	0.9	1.6	1.9	2.2	2.9	0.7	0.6	33.6	1.6	2.2	-38.6	-6.2
1 Sept 01 - 31 Août 02	G4	135	732	22%	6.4	4.0	3.7	1.3	3.9	12.5	1.4	2.0	1.2	0.8	22.7	0.8	3.8	-36.6	-6.0
1 Sept 01 - 31 Août 02	G3	132	1057	55%	6.7	1.0	0.8	0.9	0.5	1.6	0.7	1.1	0.2	0.3	14.4	0.5	0.7	-34.6	-5.9
1 Sept 01 - 31 Août 02	G2	122	883	34%	6.7	1.8	1.7	1.0	1.0	4.1	1.0	1.5	0.6	0.5	21.6	0.5	2.1	-36.0	-5.9
1 Sept 01 - 31 Août 02	G1	24	760	34%	6.8	1.6	2.4	1.0	1.7	2.0	1.5	1.9	1.0	0.6	34.8	0.6	2.4	-36.2	-5.9
1 Sept 02 - 3 Dec 02	G4	135	498	498 mm	6.4	5.9	5.5	0.8	2.9	3.7	1.2	2.1	0.7	1.8	37.7	nm	4.2	-38.1	-6.6
1 Sept 02 - 3 Dec 02	G3	132	487	487 mm	6.7	1.4	1.3	0.5	0.6	0.7	1.4	2.3	0.2	0.3	32.8	nm	1.0	-32.9	-5.8
1 Sept 02 - 3 Dec 02	G2	122	485	485 mm	6.7	0.4	0.7	0.7	1.1	1.6	1.5	2.5	0.3	0.3	39.1	nm	0.9	-33.9	-6.0
1 Sept 02 - 3 Dec 02	G1	24	360	360 mm	6.8	9.7	8.4	0.7	1.4	0.3	1.7	2.6	0.3	0.9	35.0	nm	2.3	-33.4	-5.7

Illustration 76: composition des pluies

G1 : Petit ; G2: Golf ; G3: Crotte ; G4 : Cabrière

nm : non mesuré

6.2. CARACTERISATION DU FONCTIONNEMENT GEOCHIMIQUE DU SYSTEME KARSTIQUE DE LA FONTAINE DE NIMES.

Les eaux du système karstique de la Fontaine de Nîmes sont de type bicarbonaté calcique et présentent globalement des indices de pollution (cf. rapport BRGM/RP 53422-FR). Les prélèvements complémentaires réalisés au cours de la phase 1 du projet (cf. liste des points échantillonnés et résultats des analyses en annexe) confortent les résultats obtenus lors de la phase préliminaire (1998). Les résultats complémentaires apportent néanmoins un éclairage nouveau quant au fonctionnement global de ce système karstique.

Nous allons en particulier tirer parti des informations que portent les teneurs et les signatures isotopiques du strontium dans les eaux pour étudier de manière plus détaillée l'origine des eaux de la Fontaine de Nîmes. Dans cette étude, nous avons cherché à identifier et estimer la part respective des eaux de chaque réservoir mises en jeu dans les mélanges. Ces informations permettent de fournir des indications sur le fonctionnement hydrogéologique du système karstique mais soulève néanmoins un certain nombre de questions auxquelles il conviendra de répondre par quelques prélèvements complémentaires.

6.2.1. Généralités sur les isotopes du strontium (rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)

L'élément strontium peut être utilisé comme traceur dans les études environnementales puisqu'il est naturellement présent dans le milieu. Il possède 4 isotopes stables : ^{88}Sr , ^{87}Sr , ^{86}Sr et ^{84}Sr . Seul le strontium 87 (^{87}Sr) est radiogénique c'est à dire qu'il est issu de la désintégration radioactive d'un isotope père, en l'occurrence le rubidium 87 (^{87}Rb) par désintégration β^- .

L'abondance des isotopes ^{88}Sr , ^{86}Sr et ^{84}Sr reste constante au cours du temps alors que l'abondance de l'isotope ^{87}Sr va augmenter dans le temps suite à la production via la désintégration du ^{87}Rb . En Sciences de la Terre et dans les études environnementales, on utilise le rapport de l'isotope radiogénique sur un isotope stable soit : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Le strontium (Sr) est un élément chimique de type alcalino-terreux dont les propriétés physico-chimiques sont proches de celles du calcium. Cette similarité permet au Sr de se substituer au Ca dans les réseaux cristallins.

D'une manière générale, **les eaux qui drainent les roches acquièrent la composition isotopique en Sr (rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) des minéraux de cette roche les plus sensibles à la dissolution**. Ainsi, les eaux qui drainent des roches silicatées (granite par exemple) présentent des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ relativement élevés, celles qui drainent des roches carbonatées ont des signatures plus faibles (moins radiogéniques). Ces variations isotopiques peuvent être utilisées pour mettre en évidence et quantifier des mélanges d'eaux de diverses origines.

Le strontium n'est pas modifié par des processus tels que l'évaporation ou la précipitation de minéraux. Sa composition isotopique reflète donc un terme source soit celui du strontium de l'eau initiale, soit celui d'un minéral qui s'est dissous. Les variations du rapport isotopique du strontium dans un aquifère donnent ainsi des informations sur l'origine et les proportions de mélange des différents composants naturels (interaction eau-roche) et anthropogéniques.

6.2.2. Définition des pôles géochimiques du secteur d'étude.

Le système karstique de Nîmes et son bassin d'alimentation présumé concerne 4 ou 5 types de formations géologiques distinctes du Crétacé. Il s'agit, du plus ancien au plus récent, des

formations de l'Hauterivien inférieur (n3a) et supérieur (n3b), du Barémien inférieur (n4aM), du Barutélien (n4aB) et de l'Urgonien (n4bU).

Les eaux de chacune de ces formations ont été échantillonnées en différents points et sur la base des résultats obtenus, on a pu estimer la signature géochimique de ces différents pôles géologiques (Illustration 80). Le paramètre supplémentaire qui a guidé l'interprétation concerne également le critère de qualité (teneurs en nitrate, chlorure et bore des eaux). En effet, les variations du rapport isotopique du strontium sont sensibles aux apports anthropiques et dont ces paramètres en sont le témoin. En conséquence, seuls les points d'eau présentant de faibles teneurs en ces éléments ont été considérés.

Le pôle anthropique considéré dans cette étude est celui de la décharge des Lauzières, qui comme il a été montré précédemment (cf. rapports BRGM R 40648 et BRGM/RP 53422-FR) contribue au fonctionnement du système karstique de la Fontaine de Nîmes.

Nous présentons en Illustration 78, la liste des points d'eau qui permettent de définir les pôles géochimiques des différentes formations géologiques du secteur d'étude. Les pôles géochimiques sont reportés dans un diagramme $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ versus $1/\text{Sr}$ (Illustration 79), ce type de représentation permettant de mettre en évidence les phénomènes de mélange.

Nous présentons en Illustration 81 les résultats obtenus pour les autres points échantillonnés au cours des campagnes spatiales d'échantillonnage ainsi que les points des suivis mensuels de la Fontaine de Nîmes (Mazauric). Les points d'eau échantillonnés dans les ouvrages qui recoupent le réseau karstique ont été distingués des autres points d'eau souterrains. Il s'agit des points suivants : 9 arcades (9a) ; puits poubelles (PB) ; puits Pesenti (PP). Les autres points d'eau échantillonnés sont référencés dans les illustrations suivant les abréviations suivantes :

Nom	date du prélèvement	Abréviation
Forage Mas d'Alesti	13/11/1998	Al
Forage-Monier	09/11/1998	Mo
Forage Mas Bruxelles	04/11/1998	MB1
Forage Mas Bruxelles	08/09/2004	MB2
Puits Vallariquet	22/03/2004	Pv
Forage Rey	06/09/2004	FR
Forage-Roure	09/11/1998	Ro
Forage Mas Provence	06/11/1998	MP1
Forage Mas Provence	08/09/2004	MP2
Puits-Vacquieres	04/11/1998	Pvac
Forage-MasVallongue	04/11/1998	Va
Forage Mas Granon	09/11/1998	Gr
Mas de Ponge	08/09/2004	Mpo

Illustration 77 : Liste des points d'eau avec leurs abréviations

Nom	date du prélèvement	Formation géologique	Sr µg/l	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Source Guigue	09/09/2004	n3a	933	0.70761
Source Guigue	09/11/2004	n3a	945	0.70765
Source Vaquerole	22/03/2004	n4aM	665	0.70762
Source Vaquerole	09/09/2004	n4aM	682	0.70764
MOULIN DAUMIER	09/09/2004	n4aB	369	0.70780
Source du Roc	27/01/2005	n4bU-Urgo	148	0.70792
Puits Font Aubarne	09/11/1998	n3b	534	0.70798
Puits Font Aubarne	06/09/2004	n3b	520	0.70768
Lixiviat décharge Lauziere	13/11/1998	Décharge	1632	0.70767

Illustration 78 : Liste des points d'eau jugés représentatifs des formations géologiques du système karstique de Nîmes

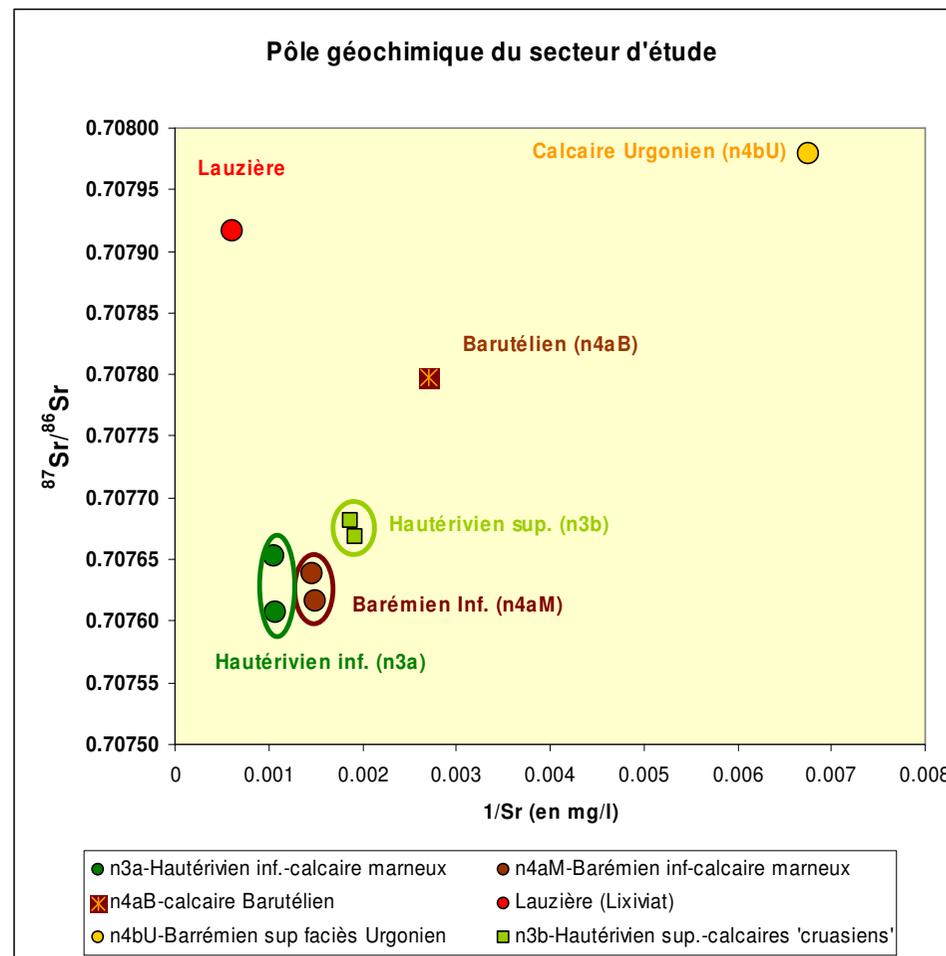


Illustration 79 : Représentation des pôles géochimiques du système karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $1/\text{Sr}$

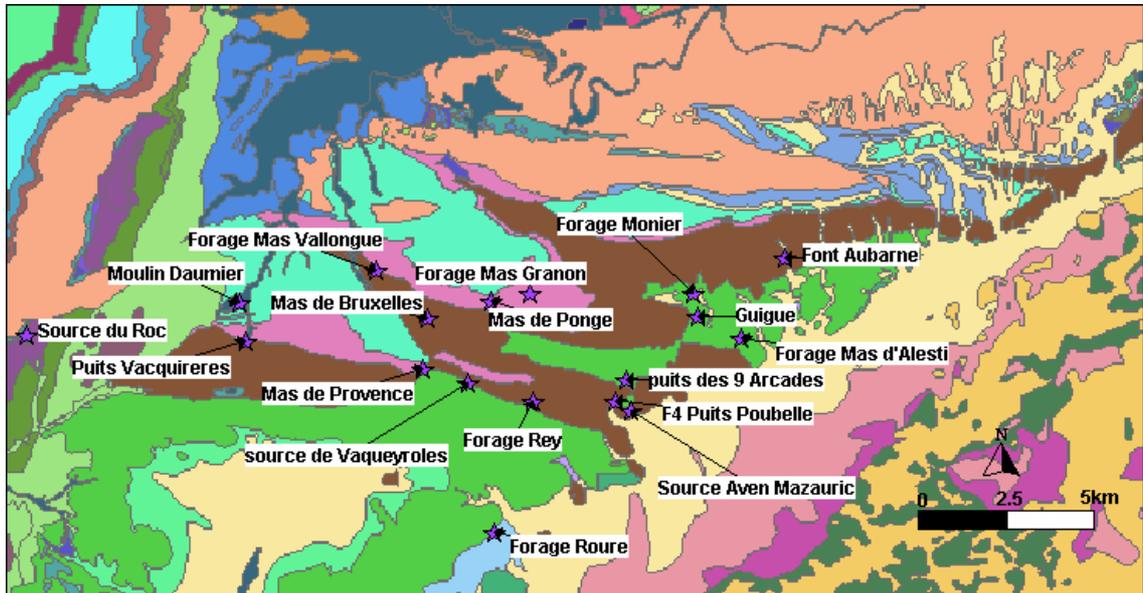


Illustration 80 : Localisation des points d'eau échantillonnés pour la caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines de la région des Garrigues Nîmoises.

6.2.3. Interprétation des résultats

Les résultats présentés Illustration 81 permettent de mettre en évidence les points suivants :

- les points d'eau souterraine échantillonnés au niveau du réseau karstique exploré par les spéléologues de l'association de la Fontaine de Nîmes (drains karstiques développés dans la formation de Hauterivien sup.) présentent une signature isotopique très différente de celle du pôle géochimique défini à partir des prélèvements de Font-Aubarne (formations de l'Hauterivien supérieur également). Les eaux apparaissent largement affectées par le pôle anthropique de la décharge des Lauzières. Une conclusion similaire peut être dressée pour les eaux de la Fontaine de Nîmes (Mazauric) ;
- les eaux de la Fontaine de Nîmes présentent une importante variabilité isotopique en fonction du contexte hydrogéologique ; ce point sera discuté ultérieurement ;
- les eaux de la Fontaine de Nîmes et celles prélevées au puits Poubelle, au puits Pesenti et au point des 9 Arcades ne peuvent pas être expliquées comme le résultat d'un simple mélange entre le pôle « Hauterivien sup. » et le pôle « Lauzière ». Pour expliquer les signatures isotopiques observées, il faut également faire intervenir un troisième pôle de mélange. Deux hypothèses sont possibles compte tenu des informations géochimiques disponibles. Il s'agit des pôles Barutélien (n4aB) et Urgonien (n4bU). Ces points vont être discutés ci-dessous ;

- compte tenu des résultats, on ne peut pas exclure que les eaux de la formation du Barémien inférieur (n4aM) contribuent à l'alimentation de l'aquifère de l'Hauterivien sup. (n3b).

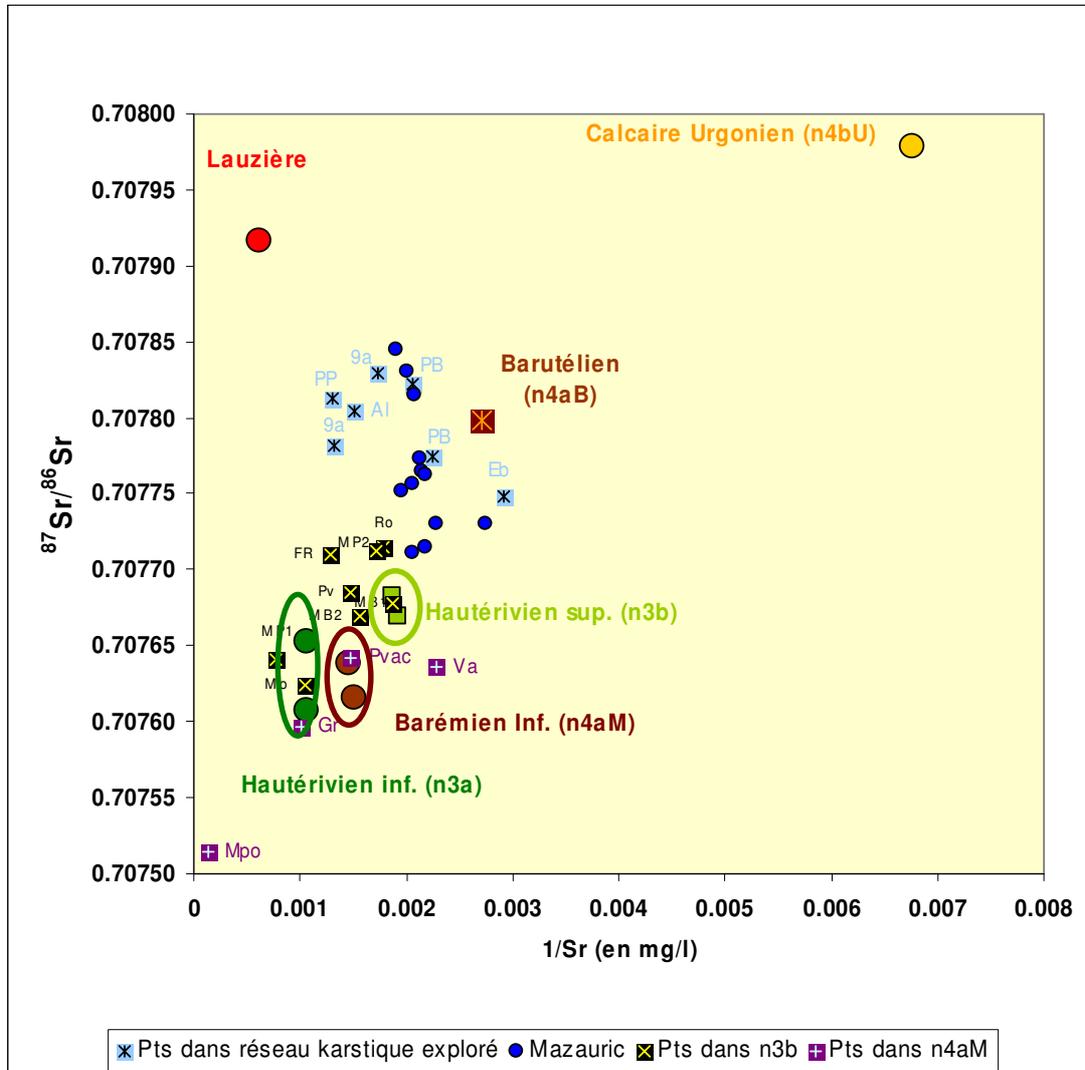


Illustration 81 : Représentation des points d'eau souterraine du système karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $1/\text{Sr}$.

Modèle 1 : hypothèse d'une contribution des calcaires de l'Urgonien

Afin de discuter de la pertinence ou non d'une contribution éventuelle des calcaires Urgoniens à l'alimentation de l'aquifère karstifié de l'Hauterivien supérieur (n3b), nous avons construit un modèle de mélange théorique à trois composantes. Dans cette approche, on considère dans un premier temps les mélanges entre chaque pôle pris

deux par deux (Illustration 82). Les calculs ont été effectués pour des proportions de mélanges comprises entre 1 % et 99 %.

Sur l'illustration 82, on montre que tous les points d'eau souterraine échantillonnés dans le réseau karstique et à la Fontaine de Nîmes (Mazauric) sont inscrits dans le triangle de mélange défini par les pôles « Lauzière », « Hauterivien sup. (n3b) » et « Urgonien (n4bU) ». La signature isotopique en strontium des eaux peut être donc expliquée par ces trois pôles de mélange.

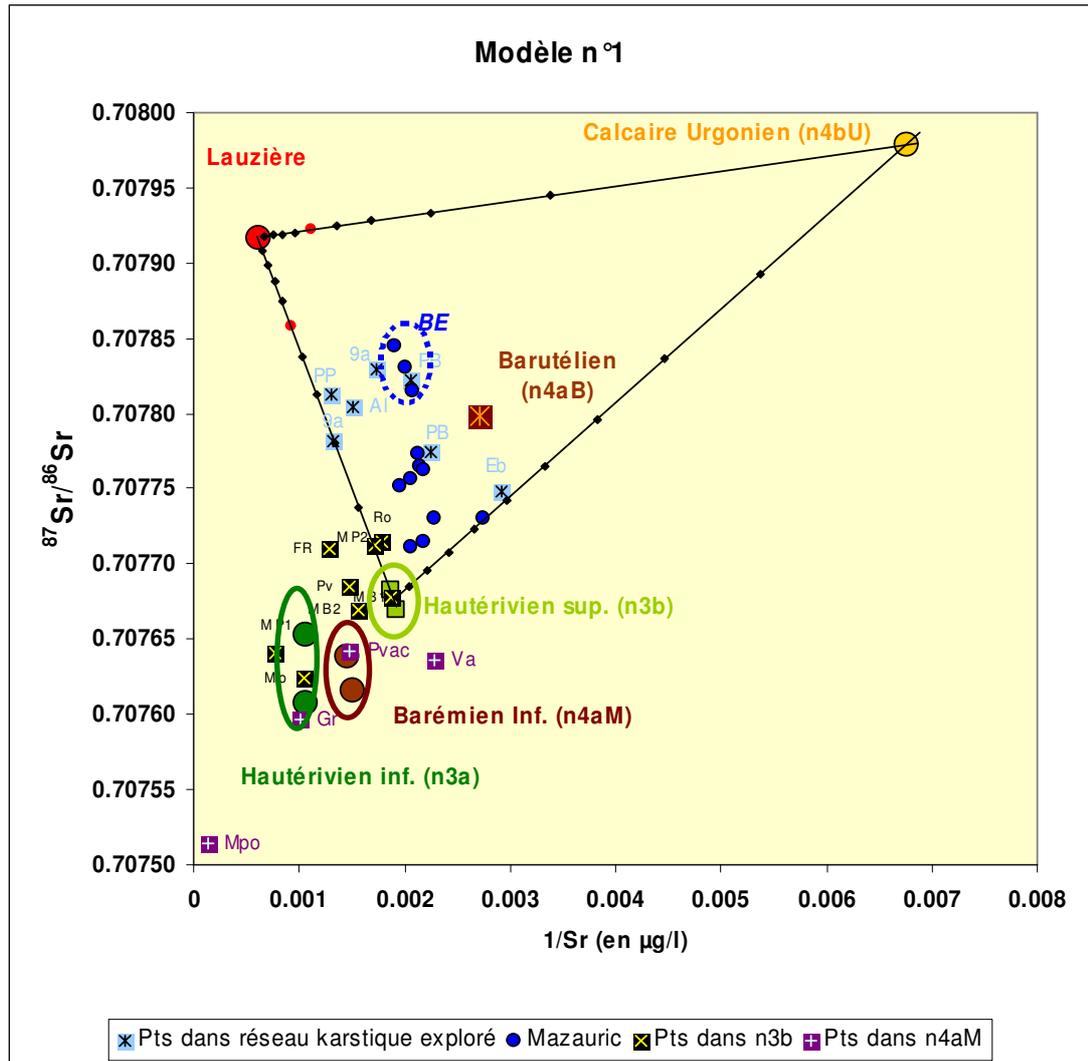


Illustration 82 : Représentation des points d'eau souterraine du systèmes karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $1/\text{Sr}$ en considérant un modèle de mélange à 3 composantes : hypothèse d'une contribution de l'Urgonien.

Dans le but de quantifier la contribution relative de ces trois pôles de mélange il convient de s'intéresser aux informations apportées par les autres traceurs. En pratique, on regarde comment évolue la signature isotopique des eaux en fonction des

rapports chimiques N_{tot}/Sr , B/Sr , Cl/Sr etc, ces rapports permettant de bien évaluer les impacts anthropiques. Ce faisant, on est en mesure de mieux encadrer les contributions relatives des différents pôles de mélange. Nous présentons (Illustration 83) un exemple de résultats obtenus à l'aide du traceur chlorure¹⁰.

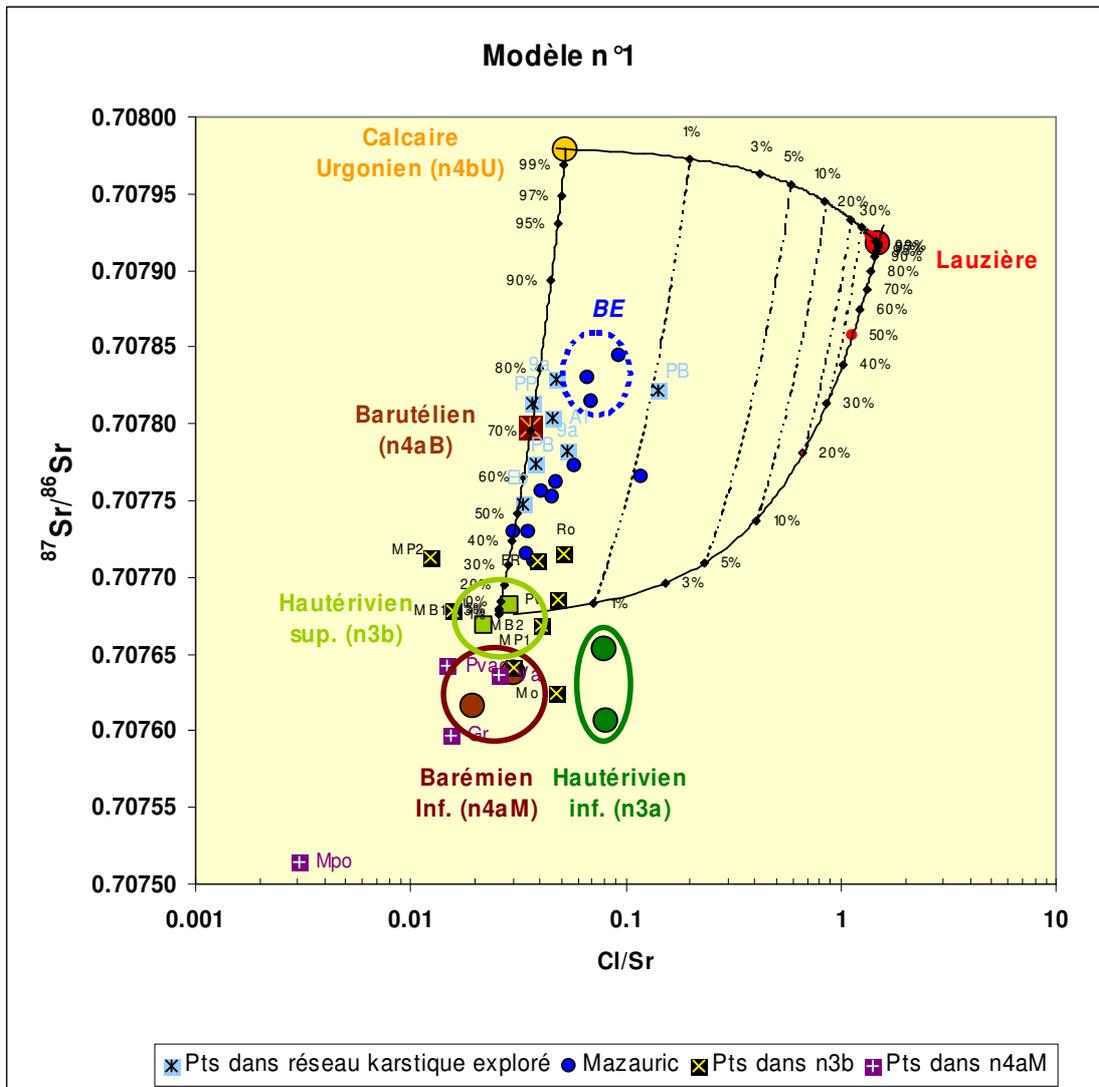


Illustration 83 : Représentation des points d'eau souterraine du système karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}Sr/^{86}Sr$ vs Cl/Sr en considérant un modèle de mélange à 3 composantes : hypothèse d'une contribution de l'Urgonien.

¹⁰ Dans la représentation semi-logarithmique adoptée, les droites de mélange sont représentées par des courbes plus ou moins incurvées.

Les résultats obtenus permettent de montrer que la contribution relative du pôle « Urgonien » est comprise entre 30% et 80% au maximum tandis que la contribution relative du pôle Lauzière est faible de l'ordre de 1 % environ, la part complémentaire étant à attribuer au pôle « Hauterivien sup. (n3b) ». Rappelons que le pôle Lauzière est défini à partir des lixiviats qui ont été échantillonnés en 1998. Les solutions de lixiviat sont extrêmement chargées en chlorure, bore etc., comme on peut le constater dans le tableau 1 en annexe (Annexe 5) (teneur en chlorure = 2444 mg/l). Ainsi, un très faible flux d'eau issu de la décharge peut contaminer de manière significative et durable les eaux de l'aquifère karstique. Sur la base des débits d'étiage de la Fontaine de Nîmes (50 l/s) environ, on montre qu'un flux d'eau de 0.5 l/s issue de la décharge peut expliquer les teneurs en chlorure des eaux de la Fontaine de Nîmes (de l'ordre de 40 mg/l).

Les résultats permettent également de montrer les points suivants :

- en période de basse eaux (« BE » sur Illustration 83), les eaux de la Fontaine de Nîmes apparaissent expliquées par une contribution d'environ 80 % d'eau provenant de l'Urgonien, une contribution de l'ordre de 19 % d'eau issue de « Hauterivien sup. (n3b) », la part restante (1% environ) étant à attribuer à la pollution engendrée par la décharge des Lauzières. Sur la base d'un débit d'étiage de 50 l/s, la contribution de l'Urgonien au débit de la Fontaine de Nîmes serait donc de 40 l/s environ ;
- en période de crue, la signature isotopique des eaux de la Fontaine de Nîmes évolue vers le pôle « Hauterivien sup. (n3b) », la contribution relative des pôles Lauzière et Urgonien devenant faible (< 1% pour Lauzière et de l'ordre de 35 à 40 % pour le pôle Urgonien). Les eaux de la Fontaine de Nîmes en période de crue présentent moins d'indice de pollution, les teneurs en chlorure diminuent jusqu'à 11 mg/l.

Les résultats obtenus à l'aide des rapports B/Sr et Ntot/Sr (cf. Annexe 5) permettent d'une part, de confirmer les résultats précédents et d'autre part, de mieux encadrer la contribution relative des différents pôles de mélange. L'Illustration 84 permet de synthétiser les résultats obtenus à l'aide de ces différents traceurs environnementaux.

Traceurs	% Pôle Urgonien (n4bU)	% Pôle Hauterivien sup. (n3b)	% Pôle Lauzières (décharge)
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, Cl/Sr (Basses eaux)	80% en moyenne	19%	1% environ
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, Cl/Sr (Hautes eaux, crue)	40% en moyenne	60% en moyenne	<<1%
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, B/Sr (Basses eaux)	80% en moyenne	19%	1% environ
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, B/Sr (Hautes eaux, crue)	35% en moyenne	65%	<<1%
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, Ntot/Sr (Basses eaux)	80% en moyenne	19%	1% environ
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, Not/Sr (Hautes eaux, crue)	40% en moyenne	60%	<<1%

Illustration 84 : Synthèse des modèles de mélange des différents traceurs

Les résultats obtenus à l'aide du modèle géochimique n°1 n'apparaissent pas incohérents. Si l'hypothèse d'une participation des eaux de l'Urgonien venait à être vérifiée par les suivis géochimiques en cours, il conviendra de discuter sur la nature du massif Urgonien contribuant au système de Nîmes. En d'autre terme, s'agit-il des calcaires Urgonien du "Camp des Garrigues" situé au nord du bassin présumé d'alimentation ou s'agit-il des calcaires Urgonien du "Bois de Lens" au Nord-Ouest du bassin au dessus de Parignargues ?

Des éléments de réponse peuvent déjà être apportés par les informations hydrogéologiques. Les essais de traçage répertoriés dans la littérature pour le calcaire Urgonien du "Camp des Garrigues" semblent indiquer que les eaux de cette formation s'écoulent en direction du Gardon au nord. De plus, les essais de traçage réalisés dans le secteur du Bois de Lens montrent également un drainage souterrain vers le Nord, en direction du Creux de la Fontaine à St-Geniès de Malgoire.

La question reste néanmoins posée et devra être levée par l'étude détaillée des bilans hydrogéologiques de la Fontaine de Nîmes ou à défaut par des essais de traçage complémentaires.

Modèle 2 : hypothèse d'une contribution des calcaires du Barutélien

Nous présentons à l'illustration 85 les résultats en supposant que les eaux du Barutélien contribuent à l'alimentation du système karstique en lieu et place des calcaires Urgonien (n4bU). On montre que la plupart des points d'eau souterraine échantillonnés dans le réseau karstique et à la Fontaine de Nîmes (Mazauric) en période d'étiage ne sont pas inscrits dans le triangle de mélange défini par les pôles « Lauzières », « Hauterivien sup. (n3b) » et « Barutélien (n4aB) ». Seuls les points en crue sont inscrits dans le triangle de mélange. Les résultats de ce modèle ne sont pas pertinents.

Concernant les points d'eau échantillonnés dans le réseau karstique exploré par les spéléologues, on ne peut pas conclure quant à une éventuelle contribution des eaux du Barémien inférieur. Une conclusion similaire peut être dressée pour les eaux de la Fontaine de Nîmes. En contexte de basses eaux, les résultats suggèrent une absence de contribution du Barémien inférieur. Il conviendrait à l'avenir d'échantillonner les eaux du réseau karstique exploré lors des périodes de crue pour évaluer cette possibilité.

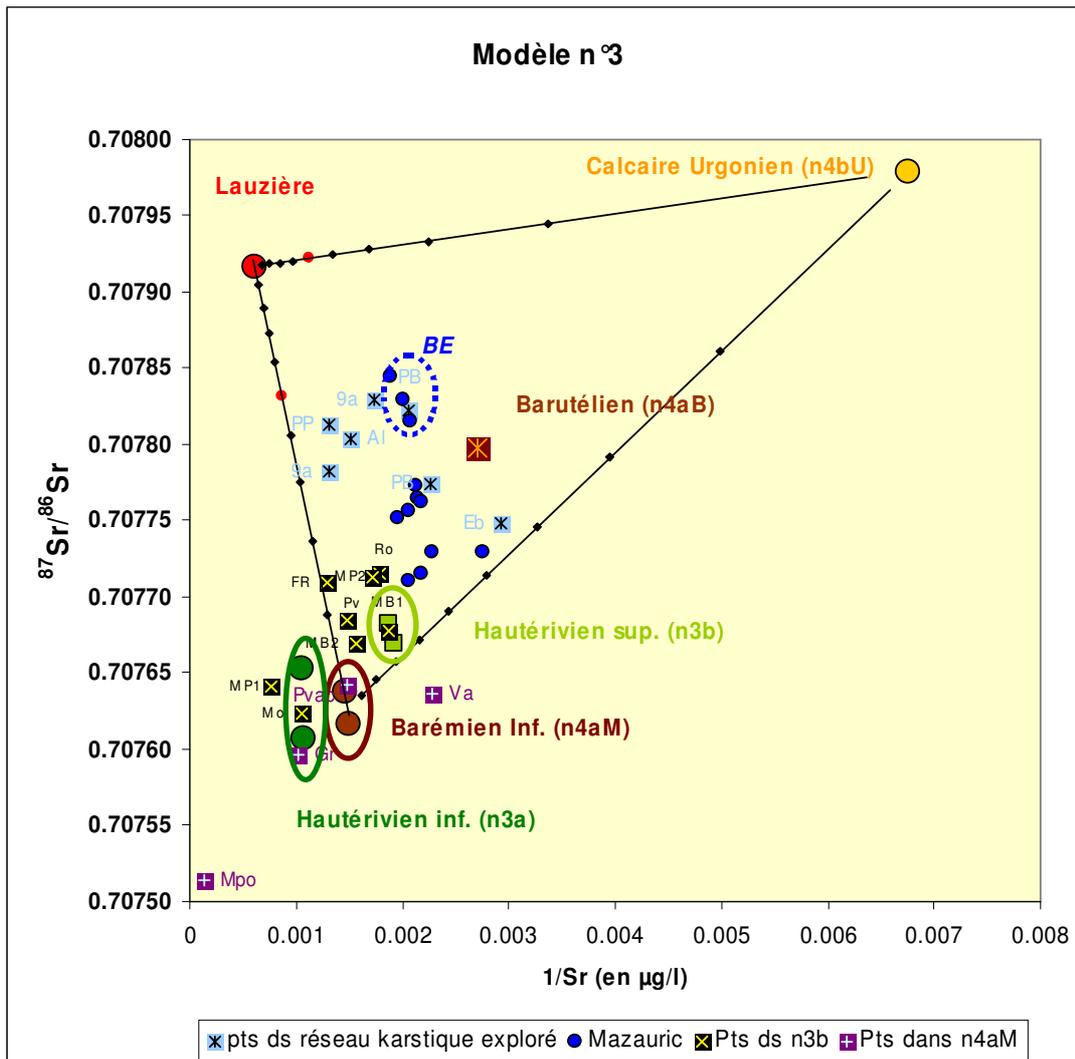


Illustration 86 : Représentation des points d'eau souterraine du système karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $1/\text{Sr}$ en considérant un modèle de mélange à 3 composantes : hypothèse d'une contribution de l'Urgonien et du Barémien

6.2.4. Conclusions et perspectives

Les résultats obtenus dans cette étude apportent un éclairage nouveau sur le fonctionnement de l'aquifère karstique de la Fontaine de Nîmes. La synthèse des résultats obtenus peut être illustrée de la manière suivante (Illustration 87).

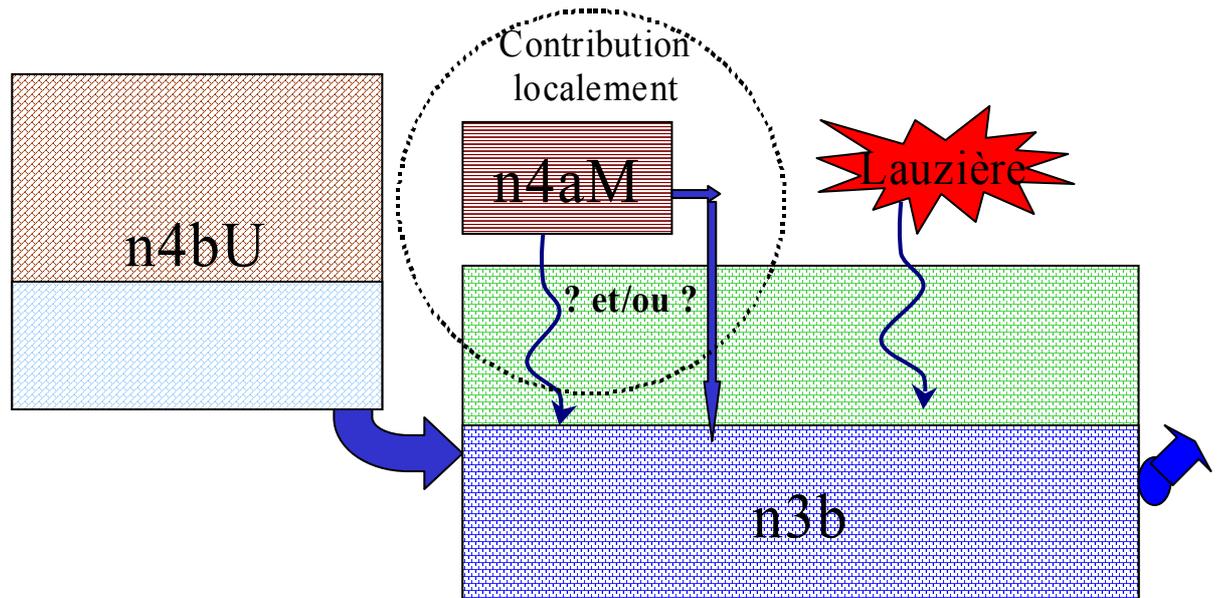


Illustration 87 : Représentation conceptuelle du fonctionnement obtenue à l'aide des informations géochimiques (n4bU : Urgonien, n3b : Hauterivien, n4aM : Barrémien inférieur).

Les résultats obtenus permettent de montrer que l'aquifère de l'Hauterivien supérieur dans lequel s'est développé le réseau karstique de la Fontaine de Nîmes apparaît alimenté, notamment en étiage, par une contribution significative d'eaux issues des formations du calcaire de l'Urgonien (n4bU). La contribution des eaux des calcaires de l'Urgonien lors des crues est nettement plus faible. Ces derniers résultats demandent à être vérifiés lors des crues importantes ($>10 \text{ m}^3/\text{s}$). Dans l'état actuel des connaissances, nous ne sommes pas en mesure d'identifier, d'un point de vue de localisation spatiale, de quel massif calcaire il s'agit (calcaire Urgonien situé au nord du bassin d'alimentation présumé (« Camps des garrigues ») et/ou massif « calcaire du Bois de Lens » ou nord-Ouest au dessus de Parignargues. De plus, ces hypothèses construites sur la base de données géochimiques doivent être validées d'un point de vue hydrogéologique notamment en terme de contribution de chacune des formations au débit de la Fontaine.

Les résultats indiquent que les formations des calcaires marneux du Barrémien inférieur (n4aM) contribuent localement à l'alimentation des calcaires de l'Hauterivien supérieur. Dans l'état actuel des connaissances, nous ne sommes pas en mesure de caractériser la nature de la relation hydraulique qui relie ces deux formations. En d'autres termes,

s'agit-il d'alimentations diffuses ou d'alimentations ponctuelles (ré-infiltration d'eau de débordement de nappe ?).

Cette étude a permis de confirmer le rôle joué par la décharge des Lauzières dans le fonctionnement de cet aquifère notamment d'un point de vue de la qualité des eaux. L'étude permet de montrer que les teneurs significatives en chlorure, nitrate et bore (marqueur de pollution) sont à attribuer aux lixiviats de la décharge qui contamine la zone noyée de l'Hauterivien supérieur. Un flux d'eau (lixiviat) de l'ordre de 0.5 l/s issu de la décharge permet d'expliquer les concentrations en chlorure, nitrate et bore mesuré à la Fontaine de Nîmes lors des périodes de basses eaux.

Les eaux de l'Hauterivien inférieur (n3a) n'apparaissent pas jouer de rôle dans le fonctionnement hydrogéologique du système karstique de la Fontaine de Nîmes.

Les pôles géochimiques identifiés dans cette étude permettent d'expliquer la plupart des évolutions chimiques observées à l'exception notable des teneurs en sulfate (Illustration 88). Dans l'état actuel des connaissances, nous ne pouvons pas donner d'explication à ce phénomène. La seule explication plausible est de considérer que les teneurs en sulfate mesurées dans les lixiviats de la décharge en 1998 ($\text{SO}_4 = 22 \text{ mg/l}$) ne soient pas représentatives de la concentration réelle de l'eau qui alimente l'aquifère du l'Hauterivien supérieur (n3b). En effet, une concentration en sulfate de 2000 mg/l pour les lixiviats permettrait d'expliquer les mesures observées dans les eaux souterraines (Illustration 89). Les proportions de mélange seraient alors compatibles avec celles calculées à l'aide des autres traceurs (1 % de contribution pour le pôle Lauzière).

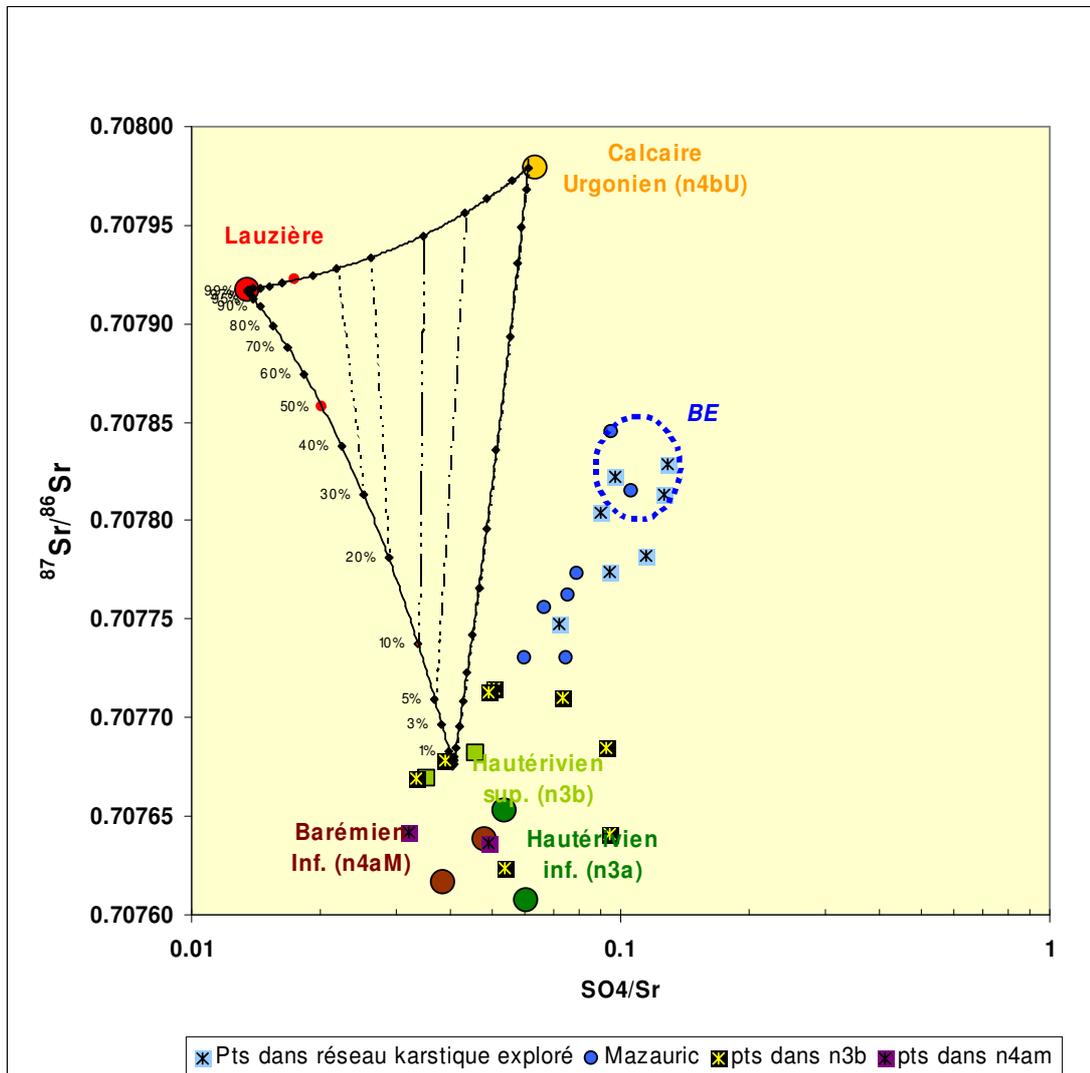


Illustration 88 : Représentation des points d'eau souterraine du système karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs SO_4/Sr (considération des teneurs en sulfate mesurés pour le pôle Lauzière).

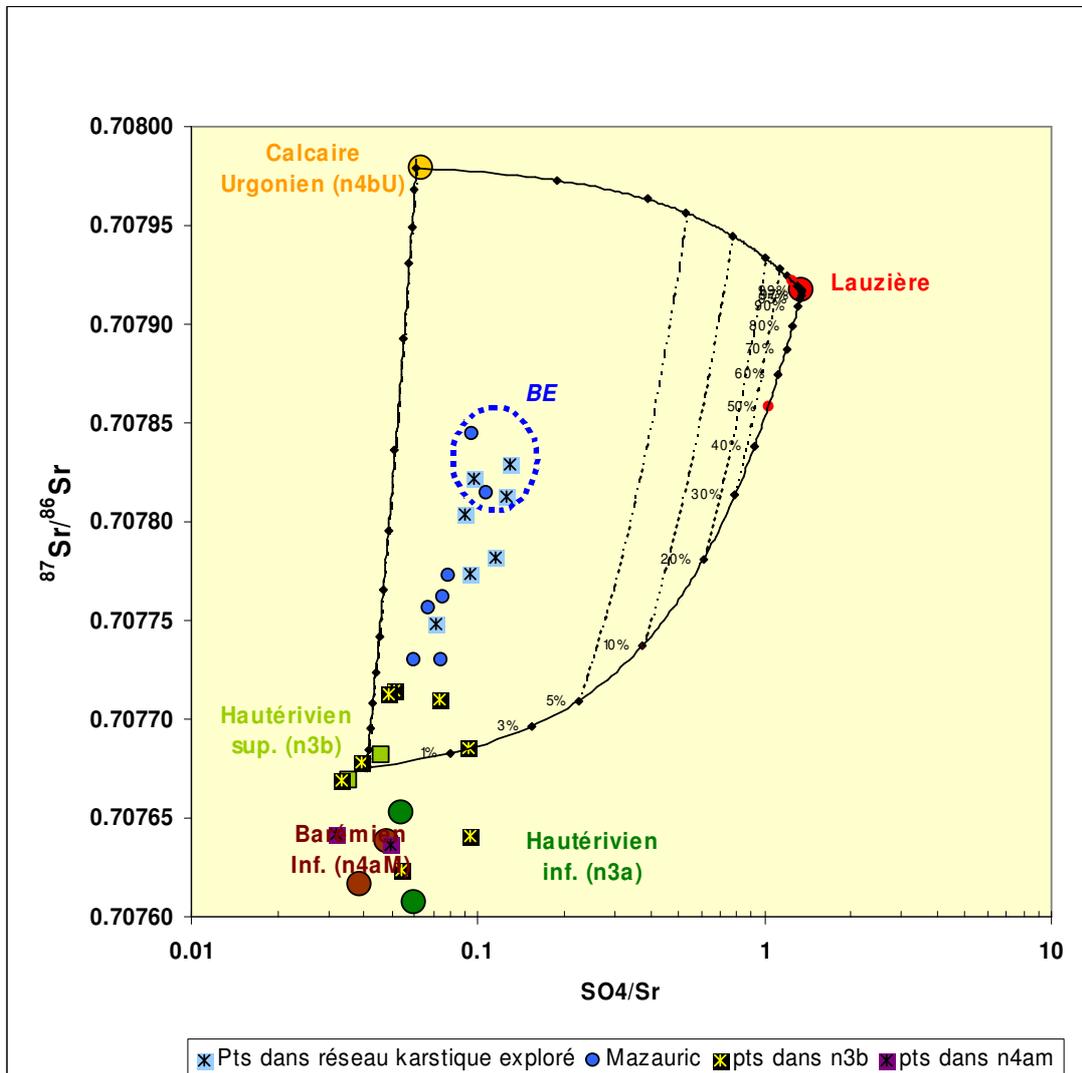


Illustration 89 : Représentation des points d'eau souterraine du systèmes karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs SO_4/Sr (considération de teneur vraisemblable en sulfate pour le pôle Lauzière).

6.3. CARACTERISATION GEOCHIMIQUE DES RELATIONS EAUX DE SURFACE/EAUX SOUTERRAINES

6.3.1. Premiers résultats

L'étude des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface a porté sur les quelques échantillons d'eau prélevées par nos collaborateurs Nîmois (M et Mme Robert, Maison des 9 arcades et M Garrelly) que nous tenons par ailleurs à remercier chaleureusement pour toute l'aide apportée.

Les eaux de surface échantillonnées lors de la crue du mois de novembre (04/11/2004) concernent donc le cadereau d'Alès (2 prélèvements réalisés au niveau de la maison de M et Mme Robert) et le cadereau d'Uzès (2 prélèvements réalisés à la sortie du bassin de rétention de Calvas (« Oliveraie ») par M Garrelly).

Pour le cadereau d'Alès, le premier prélèvement réalisé coïncide avec « la montée de crue » observée à la Fontaine de Nîmes, le second prélèvement coïncide avec le tout début de la décrue. Pour le cadereau d'Uzès, les deux prélèvements ont été effectués lors de la décrue de la Fontaine de Nîmes (Illustration 90).

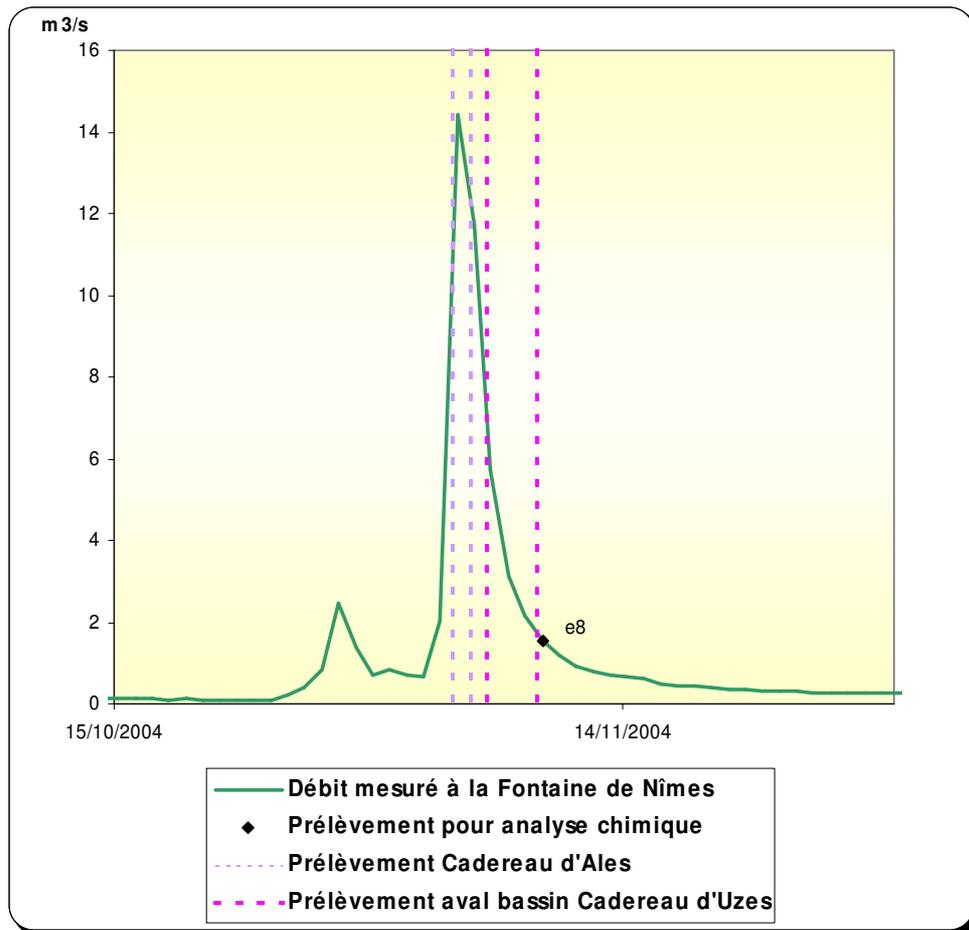


Illustration 90 : Report des dates de prélèvement des points d'eau de surface (cadereaux d'Alès et d'Uzès) dans le contexte hydrogéologique de système karstique de la Fontaine de Nîmes.

Pour les eaux souterraines, les échantillons considérés sont les suivants : eaux des puits poubelle et des 9 arcades prélevées lors de la campagne spatiale de septembre 2004, les eaux du puits Pesenti (27/01/2005) récemment équipé d'un capteur pour le suivi hydrogéologique du système karstique et enfin, les eaux prélevées à la Fontaine de Nîmes depuis septembre 2004. La position des échantillons prélevés à la Fontaine de Nîmes en fonction du contexte hydrologique est reportée sur l'illustration 91. Sept échantillons d'eau de la Fontaine de Nîmes ont été analysés sur la période comprise

entre le 01/09/04 et le 15/01/05. L'épisode de crue du mois de novembre n'a malheureusement pas été suivi de manière détaillée en raison d'un dysfonctionnement du préleveur automatique d'échantillon.

Le dernier point d'eau souterraine considéré est celui réalisé par M et Mme Robert dans le quartier « eau bouillie » le 05/11/2004 au niveau de l'école à proximité immédiate du cadereau d'Alès.

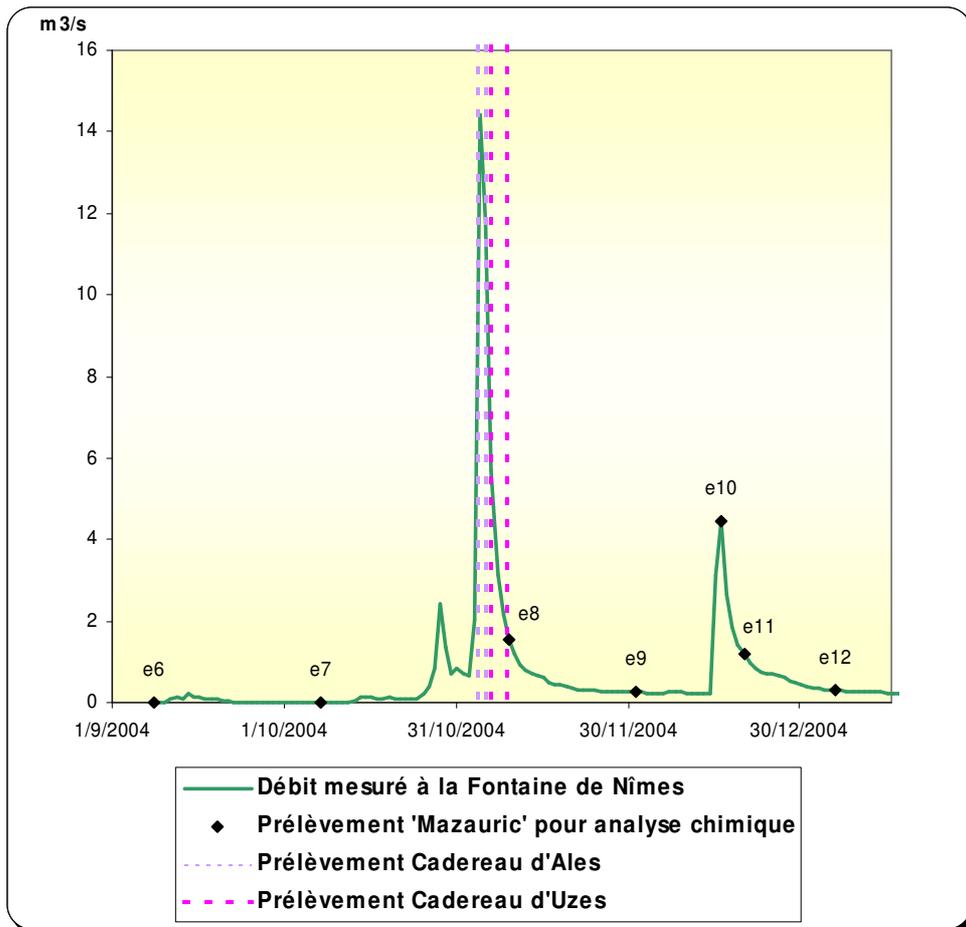


Illustration 91 : Contexte hydrologique des prélèvements réalisés à la Fontaine de Nîmes.

L'étude des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface a été menée par l'approche géochimique reposant sur l'utilisation des informations apportées par les isotopes du strontium. Pour étudier les interactions eaux de surface/eau souterraine à l'aide de l'approche isotopique, il faut prendre en considération de manière explicite la composante pluie. Les suivis des précipitations réalisés dans la phase préliminaire de l'étude (1998-2002) permettent de bien encadrer la signature chimique des eaux de pluie qui contribuent au fonctionnement hydrogéologique du système lors des crues.

Dans le diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs Cl/Sr de l'illustration 92, on montre que la signature isotopique des précipitations se distingue nettement de celle des pôles géochimiques définis précédemment lors de l'étude du fonctionnement hydrogéologique du système karstique (§ 6.2.2). Les eaux de pluie sont très nettement plus radiogéniques ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plus élevé) que celles mesurées dans les aquifères.

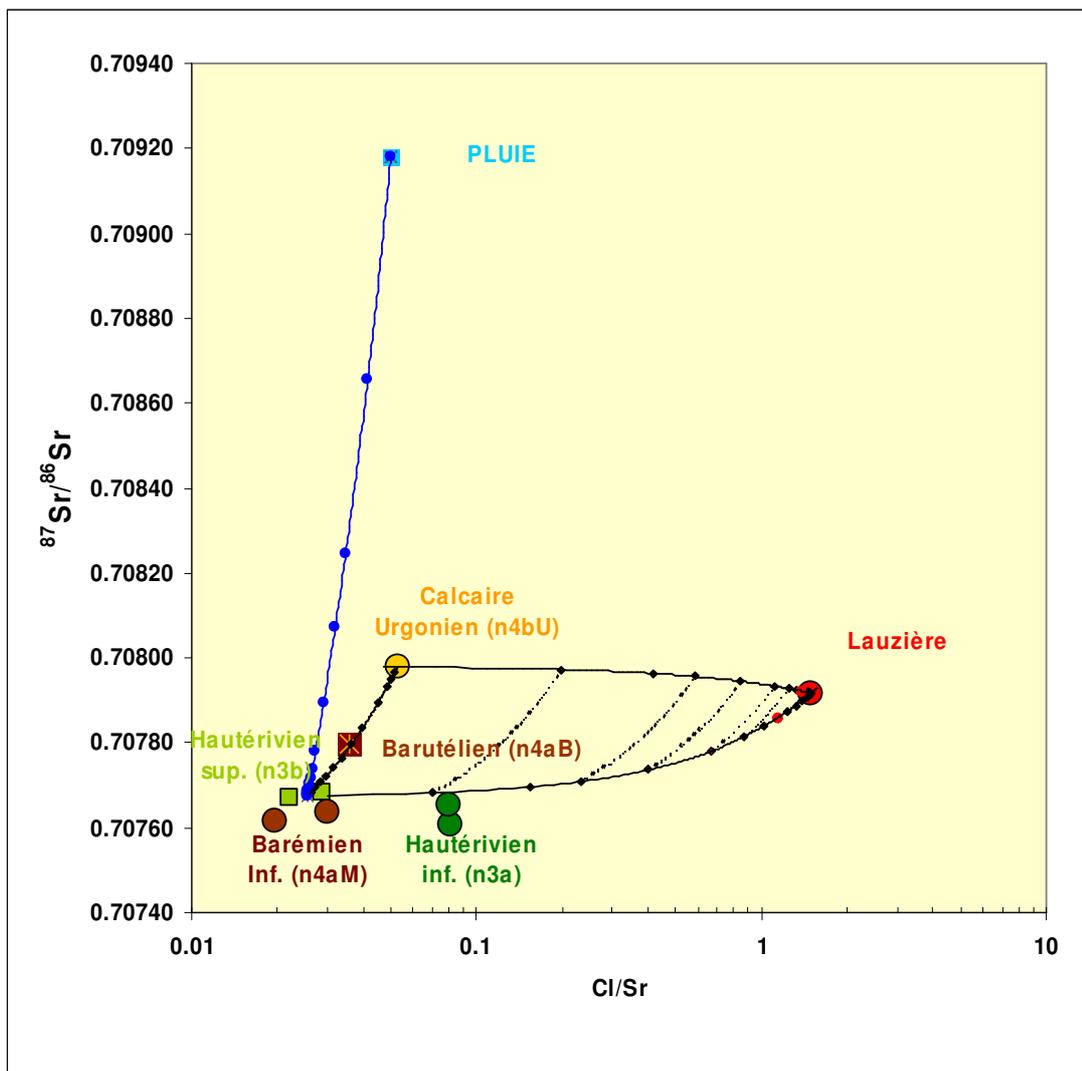


Illustration 92 : Représentation du pôle géochimique "pluie" dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs Cl/Sr . Les pôles de mélange qui permettent d'expliquer le fonctionnement géochimique du système karstique sont également reportés. La droite de mélange théorique entre les eaux de pluie et les eaux du pôle karstique de l'Hautérivien supérieur est également reportée.

Dans l'illustration 92, nous avons également reporté la droite de mélange théorique entre les eaux de pluies et les eaux karstiques contenues dans l'aquifère de l'Hautérivien supérieur (pôle géochimique).

Dans l'illustration 93, nous avons reporté les signatures géochimiques des eaux de surface et des eaux souterraines dans le diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs Cl/Sr afin d'étudier les interactions eau de surface/eau souterraine. Nous avons dilaté l'axe des ordonnées par rapport à l'illustration 92 afin d'obtenir une meilleure résolution.

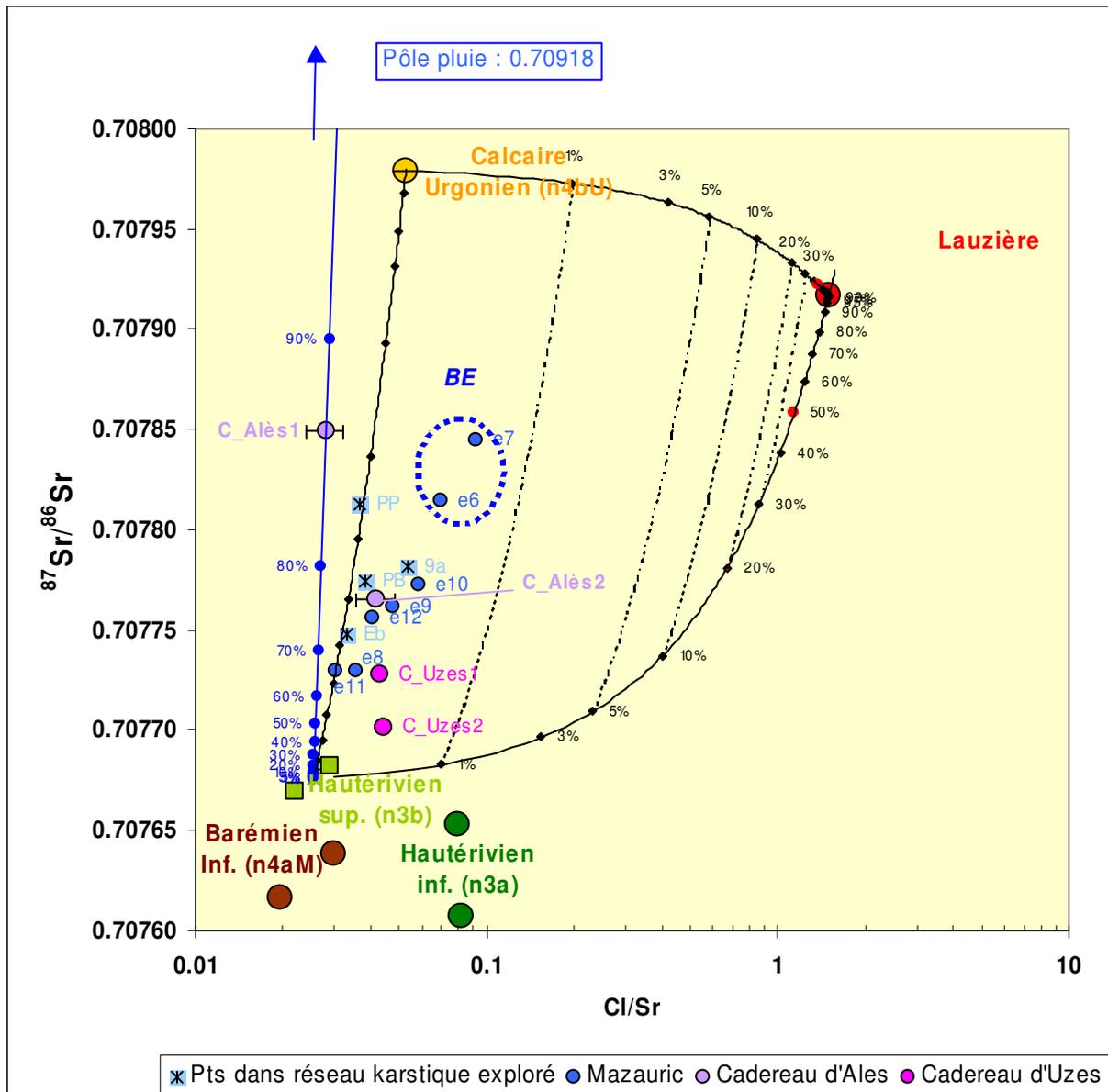


Illustration 93 : Position des points d'eau de surface et des points d'eau souterraine dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs Cl/Sr . PP : puits Pesenti ; PB : puits poubelle ; 9a : puits des 9 arcades (Maison Robert) ; Eb : Eau Bouillie.

Les résultats présentés à l'illustration 93 permettent de mettre en évidence les points suivants :

- les eaux du cadereau d'Alès lors de la montée de crue se situent sur la droite de mélange défini par les pôles « eau de pluie » et « Hauterivien supérieur ». La position du point sur la droite de mélange indique que les eaux du cadereau sont constitués de 85 % d'eau de pluie et de 15 % d'eau souterraine ;
- les eaux du cadereau d'Alès en tout début de décrue sont constituées quasi exclusivement d'eau d'aquifère. La signature des eaux du cadereau est très proche de celle de « l'eau bouillie » qui s'écoule du karst au niveau de l'école ;
- les eaux du cadereau d'Uzès lors de la de décrue ne sont également constituées que d'eau souterraine ;
- les eaux de la Fontaine de Nîmes évoluent vers le pôle « Hauterivien supérieur ». Les eaux de la Fontaine de Nîmes ne sont pas influencées par une infiltration directe d'eau de pluie. En terme de fonctionnement, ce dernier résultat permet de mettre en évidence le rôle joué par l'épikarst dans le fonctionnement global du système. Nous y revenons en détail ci-dessous.

6.3.2. Rôle joué par l'épikarst dans le fonctionnement hydrogéologique du système karstique.

Lors des périodes pluvieuses, les eaux de pluie s'infiltrent dans la zone épikarstique et interagissent rapidement avec l'encaissant géologique et se chargent notamment en calcium, bicarbonate et strontium. Les eaux de pluie infiltrées perdent alors leur signature isotopique en strontium « d'eau de pluie » et acquièrent celles des formations géologiques dans lesquelles elles se sont infiltrées. Lorsque la quantité d'eau dans l'épikarst devient suffisante, une mise en connexion hydraulique entre la zone épikarstique et la zone noyée du karst peut se produire par l'intermédiaire d'une karstification bien développée à travers la zone d'infiltration (Illustration 94). Ce type d'écoulement, caractérisé par ailleurs par l'étude des fonction de transfert (§ 4.3.3), est rapide et traduit la vidange gravitaire des eaux infiltrées dans la zone épikarstique (vidange gravitaire par « effet de chasse » = écoulement turbulent).

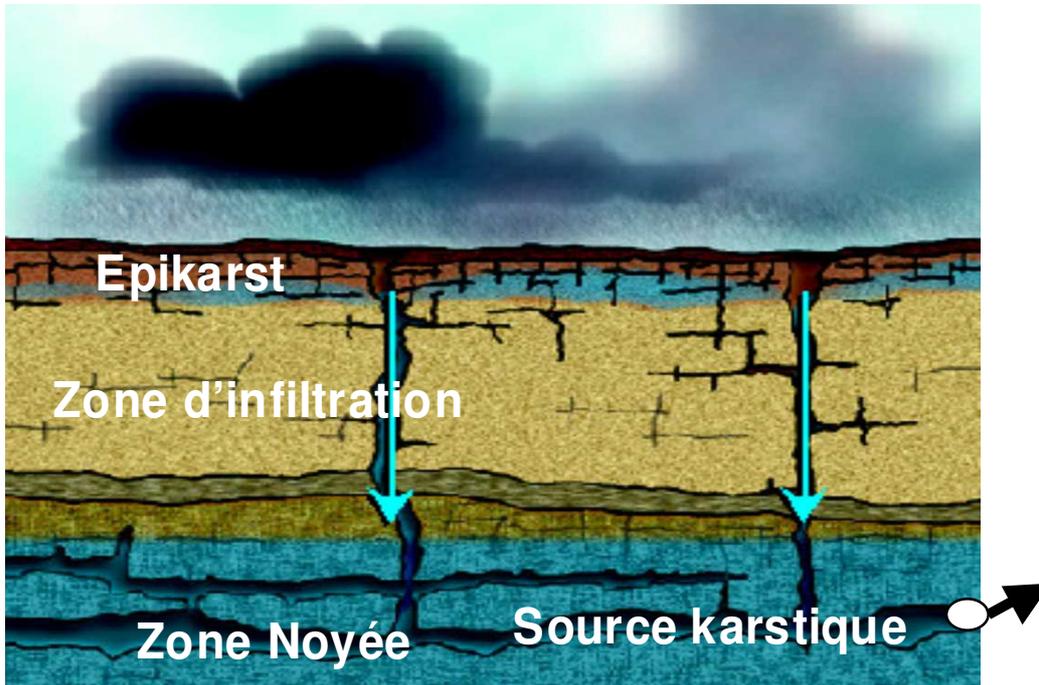


Illustration 94 : Représentation conceptuelle du fonctionnement du karst.

La réponse de la zone noyée du karst aux apports d'eau issus de l'épikarst se traduit par une élévation rapide et brutale des niveaux piézométriques dans l'aquifère. Dans le réseau karstique exploré, plus de 9 mètres de mise en charge ont été observés lors de l'épisode de crue du 04/11/04 au niveau du puits poubelle, près de 7 mètres au puits des 9 arcades. Des valeurs similaires, voire supérieures, de mise en charge sont également observées au niveau du forage de Mas de Bruxelles par exemple. La mise en charge du karst, dans les systèmes annexes au drainage qui sont plus ou moins bien connectés aux drains karstiques principaux, peut être supérieure à 8 m. De telles mises en charge dans le karst peuvent localement se manifester en surface par des arrivées d'eaux souterraines, comme par exemple le long du cadereau d'Alès dans le quartier « eau bouillie ». Les écoulements d'eau observés dans les cadereaux sont en début d'épisode de crue essentiellement composés d'eau de pluie mais la contribution relative des eaux souterraines augmente sensiblement au voisinage du pic de crue. Les résultats indiquent clairement que l'eau qui s'écoule dans le cadereau d'Alès au début de la décrue est presque exclusivement composée d'eau souterraine. Des résultats similaires sont observés pour le cadereau d'Uzès en décrue.

Il conviendra à l'avenir de porter l'effort de prélèvement et d'analyse sur les eaux des cadereaux en période de crue afin de pouvoir généraliser les résultats de cette étude préliminaire.

7. Modèle conceptuel du système karstique

7.1. INTRODUCTION

Un modèle conceptuel du système karstique de la Fontaine de Nîmes est présenté sous la forme d'une coupe schématique (Illustration 95) illustrant la structure et le fonctionnement hydrodynamique du karst en basses eaux et en période de crue. La coupe de l'illustration est orientée nord-sud et passe par la Fontaine de Nîmes.

D'un point de vue géologique, il s'agit d'une coupe très schématique. Elle ne préjuge en aucune manière de la répartition entre calcaires de l'Hauterivien sup. (n3b) et inf. (n3a) au niveau du réservoir de l'aquifère. La répartition des formations calcaires varie d'Ouest en Est au gré de la géologie et de la tectonique de la zone des Garrigues.

L'essentiel des résultats de cette première partie de l'étude, décrits au fil des précédents chapitres, est synthétisé et illustré dans ce modèle conceptuel.

7.2. STRUCTURE

Le système karstique de la Fontaine de Nîmes est un karst gravitaire¹¹ unaire¹². Il est le siège d'écoulements hiérarchisés vers la source de la Fontaine de Nîmes qui en constitue l'exutoire principal.

La karstification s'est principalement développée au sein des calcaires de l'Hauterivien supérieur (n3b). Les phénomènes karstiques se manifestant en surface sont nombreux : avens, grottes et pertes attestent de l'intense karstification du massif calcaire. Les drains du réseau karstique à l'amont de la source, explorés par les spéléologues, sont de grand diamètre, permettant des écoulements importants. Ils se divisent en deux branches principales :

- le réseau ouest sur lequel se situe le puits Poubelle dont le grand diamètre suggère d'importantes circulations d'eau ;
- le réseau nord sur lequel se situe le puits des 9 Arcades dans le cadereau d'Alès (quartier « Eau Bouillie »). De diamètre inférieur, les écoulements semblent moins importants.

¹¹ Karst gravitaire : système karstique dont le développement est lié principalement à l'action physico-chimique de l'eau qui s'infiltré par gravité, sur un massif, et dont l'écoulement est dirigé vers le point le plus bas

¹² Karst unaire : système karstique dont la recharge est assurée uniquement par les précipitations, par opposition à un karst binaire qui est en partie alimenté par une perte d'un cours d'eau de surface

L'histoire géologique du karst de Nîmes ne permet pas d'envisager une extension très profonde de la karstification, car ce dernier a été barré pendant une grande partie de son histoire, notamment durant la crise messinienne (§3.3.4). Sur l'illustration 95, un développement du système karstique sous le réseau principal est limité à quelques dizaines de mètres. Ce potentiel karstifiable n'excède certainement pas les 100 mètres.

Au niveau de l'exutoire, la Fontaine se situe au niveau du contact géologique entre le massif calcaire des Garrigues et le remplissage plio-quadernaire dont les limons de Piedmont. Ce contact coïncide plus ou moins avec la position de la Faille de Nîmes qui par son jeu en faille normale a provoqué un abaissement du compartiment sud mettant en contact les calcaires avec le remplissage plio-quadernaire.

En dépit du caractère unaire de ce karst, son bassin d'alimentation situé dans la zone des Garrigues est difficilement délimité (§ 2). L'influence de l'Urgonien au niveau des écoulements souterrains telle que le supposent les résultats de l'hydrochimie apparaît difficile à considérer du point de vue géologique. Celle-ci reste encore hypothétique à ce stade de l'étude ; elle a été schématisée à titre d'hypothèse (boîte « U ? » sur le schéma Illustration 95). Dans l'état actuel des connaissances, et au vu des résultats apportés par le seul point d'eau souterrain échantillonné dans les calcaires du Barutélien (n4ab), les eaux de cette formation ne permettent pas d'expliquer la signature géochimique observée en étiage dans le réseau karstique et à la Fontaine de Nîmes. La variabilité de la signature du point du Moulin d'Aumier devra être caractérisée ; il sera peut être nécessaire de trouver un autre point d'eau issu de cette formation pour mieux caractériser ce pôle. Ceci nous conduit à rechercher un autre pôle géochimique pour expliquer les résultats, le pôle Urgonien tel que défini par la source du Roc permettrait d'expliquer la signature géochimique observée en étiage dans le système karstique. Il conviendra dans la phase suivante de l'étude de mieux caractériser les pôles géochimiques des calcaires du Barutélien (n4ab) et de l'Urgonien (n4bU) afin de lever les incertitudes qui pèsent quant à la participation éventuelle ou non des eaux de ces formations calcaires. A noter qu'il y aient des pertes au niveau des formations du Baétulien qui seraient en relation avec la Fontaine de Nîmes.

Le bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes déterminé sur la base d'un bilan hydrogéologique possède une superficie comprise entre 45 et 60 km². Cette superficie est une superficie minimale compte tenu du fait que la source de la Fontaine de Nîmes est une source de débordement et de l'existence d'écoulements souterrains en direction de la nappe de la Vistrenque au travers de la faille de Nîmes. Le bassin, encore hypothétique à ce stade de l'étude, s'étend de l'Ouest à l'Est de Parignargues (pertes de la source de Parignargues et source de la Font de St-Pierre) à l'Est de Nîmes (Courbessac), et du Nord au Sud de la limite méridionale du Camp des Garrigues à la Fontaine de Nîmes. Ce bassin d'alimentation inclut l'essentiel des bassins versants des cadereaux, à l'exception de celui de Pondre, Valdegour et Valladas.

Du point de vue géologique, ce bassin est constitué d'une succession de plis d'orientation est-ouest ; les formations aquifères sièges des écoulements souterrains sont principalement les formations carbonatées de l'Hauterivien supérieur, de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur.

7.3. FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE

7.3.1. Basses eaux

L'étude du tarissement (§ 4.2) de la Fontaine de Nîmes a permis de caractériser le fonctionnement du karst en période de basses eaux.

Les coefficients de tarissement sont élevés (0.035 ± 0.024) ce qui indique que la zone noyée du système est bien karstifiée et se vidange assez vite. Le réseau karstique principal est assez bien connecté.

Le temps de fin d'infiltration est relativement court (13 jours \pm 5) et les vitesses moyennes d'infiltration, relativement élevées (0.09 ± 0.02) dans la zone d'infiltration (épikarst), indiquent que le système présente une karstification importante. La zone d'infiltration (épikarst) apparaît donc bien connectée d'un point de vue hydraulique à la zone noyée du système. Les coefficients d'hétérogénéité d'écoulement sont élevés (1.5 ± 1.1) et extrêmement variables d'un cycle hydrologique à l'autre. Ce résultat indique que le système karstique est sensible aux variations saisonnières de l'alimentation par les pluies efficaces.

Les valeurs du volume dynamique sont moyennement importantes (3.7 millions de $m^3 \pm 1.3$) et aussi variables d'un cycle à l'autre ce qui traduit la sensibilité de la zone noyée du système aux variations saisonnières et inter-annuelles de l'alimentation (pluie efficace).

Le pouvoir régulateur et le retard à l'infiltration sont également variables d'un cycle à l'autre. Le report des valeurs moyennes dans le diagramme de classification de Mangin permet de comparer le système karstique de Nîmes avec d'autres systèmes étudiés dans la littérature. La valeur moyenne des paramètres se positionne à la limite des domaines 3 et 4 de la classification. En toute rigueur, selon la classification de Mangin, ces valeurs sont caractéristiques d'un système bien karstifié (présentant un réseau spéléologique bien développé tel que celui observé) débouchant à l'aval sur un karst noyé important. Néanmoins, le pouvoir régulateur du système est moyennement élevé, autrement dit, le système ne semble pas accumuler de grandes quantités de réserves.

7.3.2. Hautes eaux et crues

La zone noyée du système karstique apparaît bien drainée et bien connectée à l'épikarst qui constitue le siège de l'infiltration des pluies (§ 4.3.3). L'effet de chasse qui en résulte est schématisé notamment sur l'aven 1 du modèle (Illustration 95b). Le transfert des impulsions lors des périodes de crue s'effectue de manière rapide, le pic de crue se produisant en moyenne 24 heures après un épisode pluvieux. Ce faible décalage indique que les écoulements se produisent dans un système en charge, c'est-à-dire dans des conduits karstiques noyés. La réponse du système à la pluie efficace se produit pendant une durée de 12 jours environ (durée de la recharge).

L'étude des débits classés (§ 4.1) a mis en évidence que le comportement hydrodynamique du système karstique est différent en période de crue et d'étiage. Lors des périodes de crue, le système karstique pris dans sa globalité devient moins inertiel et évacue plus facilement les eaux lorsque le débit est supérieur à 0.25 m^3/s . La rupture observée sur les courbes de débits classés indique que les propriétés hydrauliques du système changent. Ce changement de comportement peut traduire une modification des conditions d'entrée (par les pluies efficaces) et également des conditions de sortie des eaux. En période de crue, les conditions de sortie des eaux apparaissent favorisées. Ce résultat a vraisemblablement deux origines. D'une part, la

capacité de stockage du karst tend vers son maximum et celui-ci ne peut pas absorber plus d'eau. D'autre part, en période de crue, le karst mis en charge utilise un réseau plus transmissif pour évacuer les eaux. Cette seconde hypothèse peut être expliquée par la présence de formations du Quaternaire au contact avec les calcaires dans la zone d'émergence des sources. En effet, les formations du Quaternaire moins transmissives que le karst jouent le rôle d'un bouchon poreux et constituent un frein à l'écoulement. La source de la Fontaine de Nîmes semble donc apparaître comme une source de trop plein pour le système karstique. Au delà d'une certaine charge hydraulique (correspondant à un débit de $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ à la Fontaine), l'écoulement du karst dans les formations quaternaires cesse d'augmenter (capacité maximale atteinte) et le système karstique se vidange essentiellement via la Fontaine dont les débits augmentent plus rapidement.

Lorsque le débit excède $11 \text{ m}^3/\text{s}$, les propriétés hydrauliques du milieu changent de nouveau ; le système semble évacuer moins facilement les eaux. Ce comportement peut traduire un problème dans la courbe de tarage pour les débits très élevés (débits sous estimés) ou la mise en fonction de trop-plein correspondant à des cavités à proximité de l'exutoire (une part des débits de crue échappe à la station de jaugeage). Cette dernière hypothèse est confirmée par la mise en évidence de résurgences temporaires situées à proximité du réseau karstique en période de crue : puits de la Gaffone (Illustration 95b) à proximité de la Galerie des Poteries qui constitue un affluent du réseau ouest et sources temporaires de systèmes annexes au drainage dans le quartier « Eau Bouillie » à proximité du réseau nord.

En période de crue, les relations eaux de surface / eaux souterraines ont été mises en évidence grâce à l'analyse des débits dans les cadereaux (§ 5) et à l'étude de la géochimie des eaux (§ 6.3). Sous réserve de la qualité des données du réseau NOE, des phénomènes de pertes au sein des vallées sèches que constituent les cadereaux semblent être mis en évidence (Illustration 95b au niveau du cadereau). Par ailleurs, au cours de l'événement du 4 novembre 2004, la géochimie a mis en évidence que très tôt (quelques heures après le pic de crue), l'eau du cadereau d'Alès provient en grande partie de la zone noyée du karst. La mise en charge rapide du système karstique par les infiltrations d'eau de pluie se traduit par une mobilisation d'eau ancienne de la zone noyée qui sort en surface au travers des sources temporaires au niveau du quartier « Eau Bouillie » (« Bouldou » type « Eau Bouillie » sur Illustration 95b). La remontée de niveau piézométrique au sein du réseau karstique est importante également (7 mètres au puits des 9 arcades) mais moins grande (pas de débordement du système) que dans les systèmes annexes au drainage suite à sa plus grande perméabilité.

8. Conclusion et perspectives

Un premier ensemble d'éléments sur la structure et le fonctionnement du système karstique de la Fontaine de Nîmes ont été mis en évidence au moyen des premières données acquises dans le cadre de la phase 1 du projet. Un premier modèle conceptuel est proposé. Il permet de mieux comprendre le fonctionnement du système et de sa source notamment en période de crue. Ce modèle sera amené à être précisé et amélioré au cours de l'étude.

Les principaux points suivants doivent être précisés (module 2) :

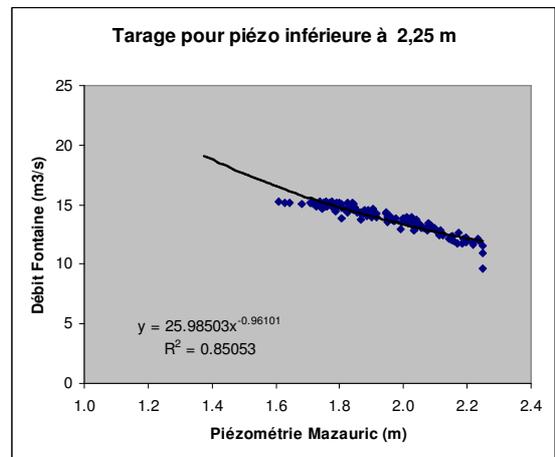
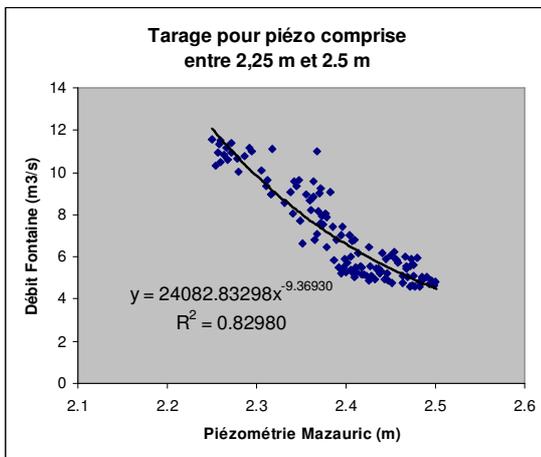
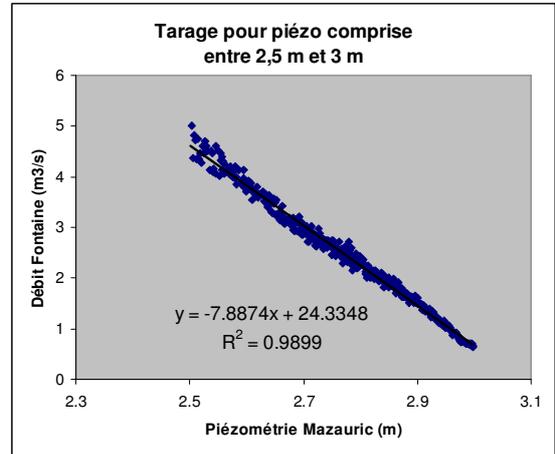
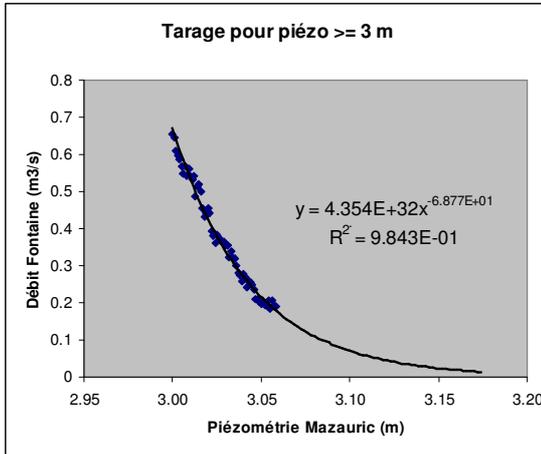
- mieux caractériser les pôles géochimiques des calcaires du Barutélien (n4ab) et de l'Urgonien (n4bU) afin de lever les incertitudes qui pèsent quant à la participation éventuelle des eaux des formations calcaires de l'Urgonien ;
- préciser les limites du bassin d'alimentation ;
- dans la mesure du possible, préciser l'interprétation des relations eaux souterraines / eaux de surface grâce à l'analyse des données limnigraphiques si la qualité des données le permettent et grâce à de la géochimie complémentaire sur l'eau des cadereaux en période de crue ;
- si les conditions météorologiques le permettent, compléter la courbe de tarage de la Fontaine en très hautes eaux ;
- localiser géographiquement et hydrogéologiquement les zones de mise en charge et de débordement du système karstique au niveau des drains et des systèmes annexes ;
- vérifier la pertinence de certaines connexions hydrauliques au moyen d'un ou plusieurs essais de traçage ;
- analyser le comportement des suivis du réseau piézométrique en périodes de basses et de hautes eaux et le confronter au modèle conceptuel.

9. Bibliographie

- Anonyme** (1992).- Etude géologique et synthèse des données sur le site de l'extension de la décharge d'ordures ménagères des Lauzières. Ville de Nîmes.- Rapport Sud Aménagement Agronomie 42.30.55.
- Boussinesq, J.** (1903). Sur un mode simple d'écoulement des nappes d'eau d'infiltration à lit horizontal, avec rebord vertical autour lorsqu'une partie de ce rebord est enlevée depuis la surface jusqu'au fond. C. R. Acad. Sci. 137,5-11.
- Fabre, G.** (1980).- Les karsts du Languedoc oriental. Recherches hydrogéomorphologiques.-, Thèse doctocratorat état, géographie. Mémoire., Association Française de Karstologie., Nîmes.
- Fabre, G.** (1987).- Fontaine de Nîmes. Origine des eaux. La source. Le réseau naturel exploré. Les canaux. Le Vistre de la Fontaine.- Rapport
- Fabre, G.** (1997).- Le bassin d'alimentation de la fontaine de Nîmes d'après les expériences de traçages.- Bul. Soc. et Sc. Nat. Nîmes et Gard, vol. 61, 52-57.
- Fabre, G., Guyot J.L.** (1984).- Première série continue de jaugeages sur la Fontaine de Nîmes (Gard); données et interprétations des principaux résultats. Gauging the Nîmes Spring (Gara); data and interprétation of initial results.- Travaux, vol. 13, 65-78.
- Faillat JP.** (1972) - Contribution à l'étude des circulations souterraines dans les formations carbonatées du haut-bassin de l'Agly (ruissellement souterrain et nappes karstiques). Thèse de l'Université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier. 219 p.
- Maréchal JC., Petit V., Ladouche B.** (2004) – Synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques sur le bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes. Rapport BRGM/RP-53422-FR.
- Mori A.** (1982) - Notice et carte au 1/2.000.000 des réserves en eau utiles des sols de France. INRA, 54 p.
- Nejad Hachemi, M.A.** (1968).- Contribution à l'étude hydrogéologique de la région nîmoise.-, Faculté des Sciences. Institut de Géologie., Université de Montpellier, Montpellier.
- Thiéry D.** (2003) – Logiciel GARDENIA, version 6.0, Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-52832-FR.
- Torcapel, A.** (1894).- Les garrigues de Nîmes, leur constitution géologique, et le bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes.- Mém. de l'Académie de Nîmes, vol. 17, 157-189.

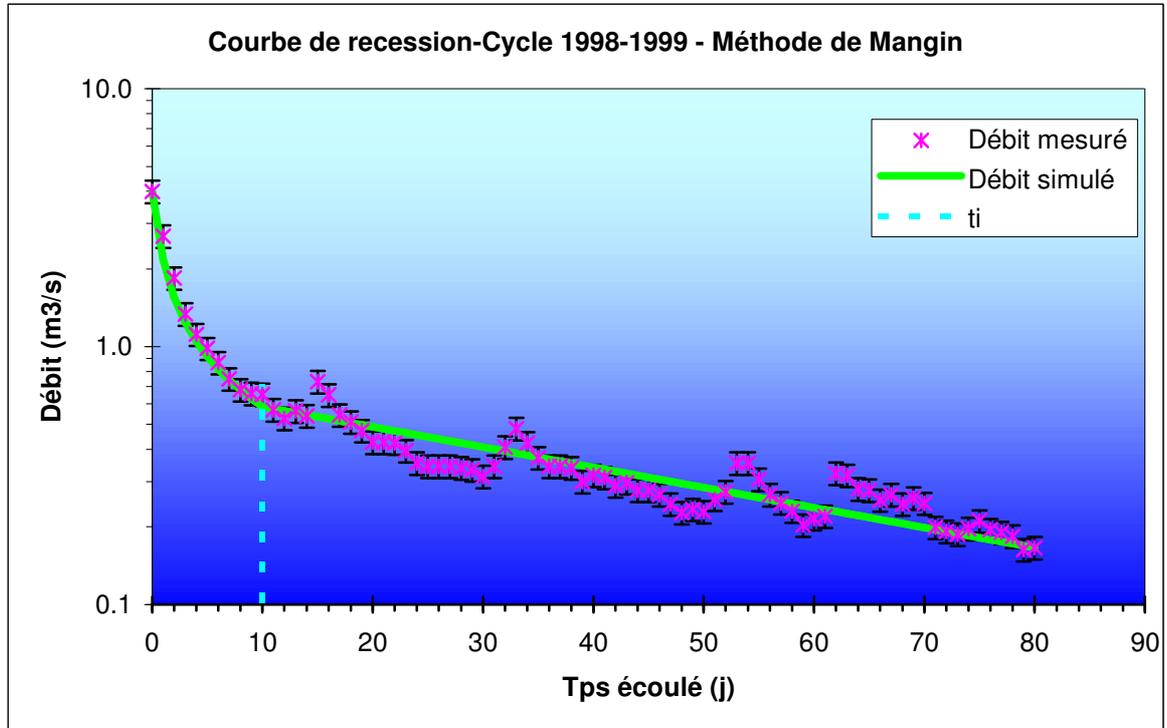
Annexe 1

Ajustement de la courbe de tarage de la Fontaine



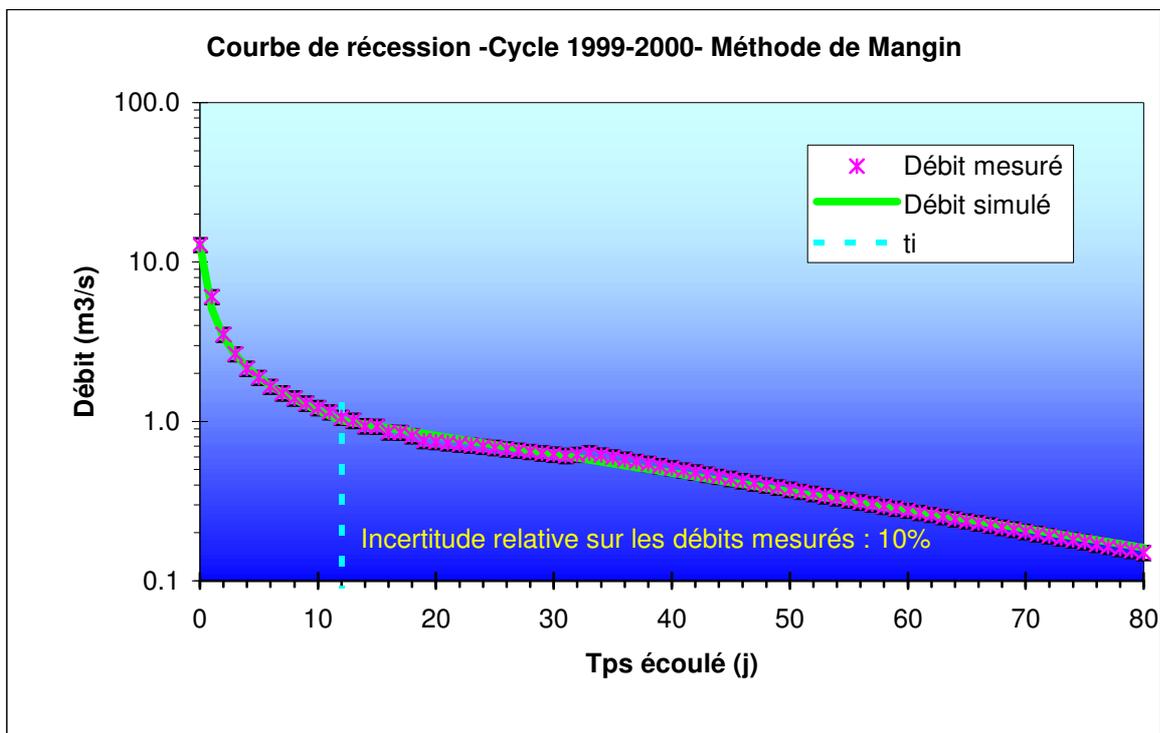
Annexe 2

Courbes de récession



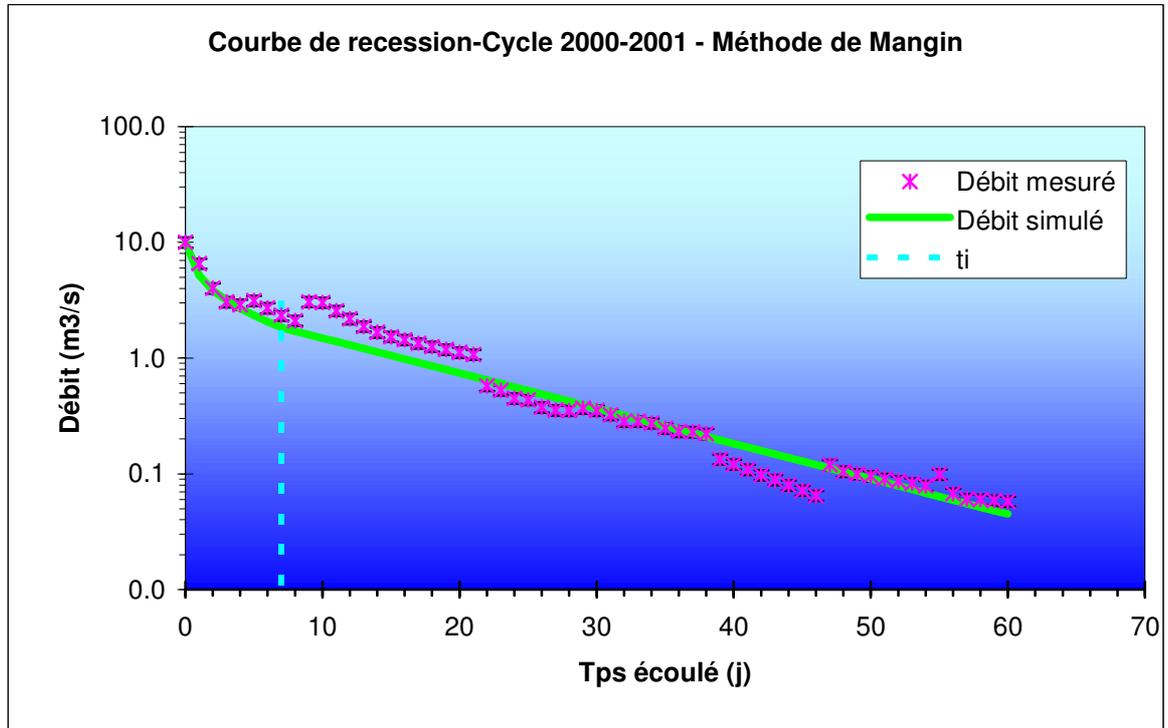
	Date
Début Recession	05/05/1999
Fin Recession	24/07/1999
Q Début Recession (m3/s)	3.994
Q Fin Recession (m3/s)	0.166
alpha (coefficient tarissement) (j^{-1})	0.018
epsilon (coef d'hétérogénéité d'écoulement) en j^{-1}	1.00
Qro :débit au pic de crue (m3/s)	0.700
ti : tps fin d'infiltration (j)	10

Q0 : débit de crue debut recession (m3/s)	3.994
qo : débit d'infiltration à t=0 (m3/s)	3.294
eta (vitesse moyenne d'infiltration)	0.1000
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.27
Critère de Nash (qualité de la simulation)	97.65
Volume dynamique (million de m3)	3.36
Volume d'infiltration (million de m3)	0.63



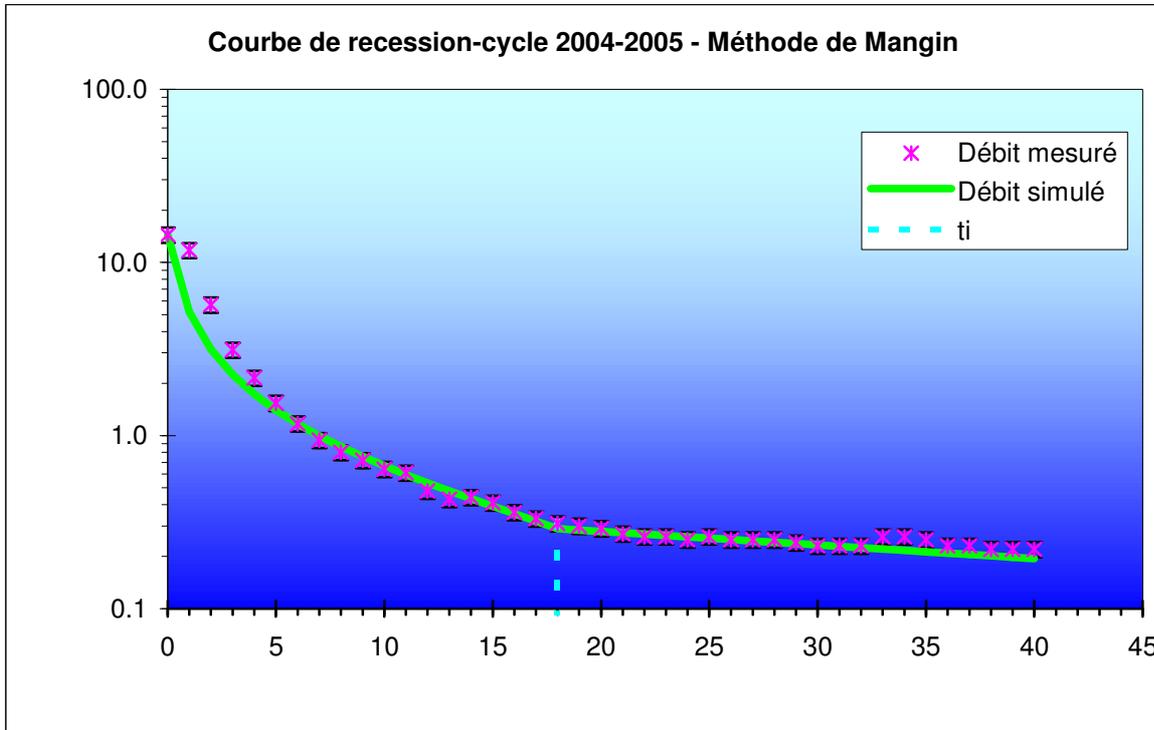
	Date
Début Récession	15/11/1999
Fin Récession	03/02/2000
Q Début Récession (m3/s)	12.812
Q Fin Récession (m3/s)	0.15
alpha (coefficient tarissement) (j ⁻¹)	0.027
epsilon (coef d'hétérogénéité d'écoulement) en j ⁻¹	1.8000
Q _{ro} :débit au pic de crue (m3/s)	1.400
t _i : tps fin d'infiltration (j)	12

Q ₀ : débit de crue debut recession (m3/s)	12.812
q ₀ : débit d'infiltration à t=0 (m3/s)	11.412
eta (vitesse moyenne d'infiltration)	0.0833
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.18
Critère de Nash (qualité de la simulation)	99.56
Volume dynamique (million de m3)	4.48
Volume d'infiltration (million de m3)	1.86



	Date
Début Recession	09/03/2001
Fin Recession	08/05/2001
Q Début Recession (m3/s)	9.992
Q Fin Recession (m3/s)	0.058
alpha (coefficient tarissement) (j^{-1})	0.07
epsilon (coef d'hétérogénéité d'écoulement) en j^{-1}	1.50
Qro :débit au pic de crue (m3/s)	3.00
ti : tps fin d'infiltration (j)	7

Q0 : débit de crue debut recession (m3/s)	9.992
qo : débit d'infiltration à t=0 (m3/s)	6.992
eta (vitesse moyenne d'infiltration)	0.1429
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.18
Critère de Nash (qualité de la simulation)	95.36
Volume dynamique (million de m3)	3.70
Volume d'infiltration (million de m3)	1.05



	Date
Début Recession	04/11/2004
Fin Recession	14/12/2004
Q Début Recession (m3/s)	14.430
Q Fin Recession (m3/s)	0.220
alpha (coefficient tarissement) (j^{-1})	0.018
epsilon (coef d'hétérogénéité d'écoulement) en j^{-1}	1.7600
Qro :débit au pic de crue (m3/s)	0.400
ti : tps fin d'infiltration (j)	18

Q0 : débit de crue debut recession (m3/s)	14.430
q0 : débit d'infiltration à t=0 (m3/s)	14.030
eta (vitesse moyenne d'infiltration)	0.0556
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.20
Critère de Nash (qualité de la simulation)	85.00
Volume dynamique (million de m3)	1.92
Volume d'infiltration (million de m3)	2.55

Annexe 3

Modélisations des systèmes karstiques par l'approche globale dite « boîte noire » à l'aide du logiciel « TEMPO »

Principe général de la méthode

1. Le calcul des réponses impulsionnelles -Principe de la méthode

La modélisation inverse fait appel à des techniques numériques complexes s'appuyant sur différentes méthodes de régularisation. Le problème inverse a généralement plusieurs solutions (parfois une infinité de solutions) et il convient, pour le résoudre, d'ajouter des informations pertinentes permettant de préciser la réalité physique des phénomènes, assurant ainsi l'unicité de la solution.

1.1. MODÉLISATION INVERSE DES ÉCOULEMENTS

La modélisation des écoulements consiste à calculer les réponses impulsionnelles lente (Gl) et rapide (Gr) associées aux différents types d'écoulement.

Le transfert rapide peut être dû au ruissellement de surface, dans le cas d'un bassin versant. Dans un aquifère karstique, il est souvent associé à l'effet de chasse qui peut se produire lorsqu'une continuité hydraulique s'établit entre la zone non saturée et la zone noyée, suite à une recharge importante.

Le transfert lent met en jeu les différents processus d'infiltration induisant un retard plus ou moins important entre la pluie et le débit (ou la variation du niveau piézométrique) observés en sortie : infiltration lente et rapide, ruissellement différé, ...

L'utilisation de deux réponses impulsionnelles rend le problème non linéaire dont la résolution nécessite un processus itératif. L'équation du transport s'écrit :

$$S(t) = \text{surface} \cdot (Gr * Pr + Gl * Pl) + a.t + b$$

où * représente le produit de convolution discret, t le temps, S(t) la sortie de l'hydrosystème (débit, niveau piézométrique), le terme a.t + b la tendance, « Surface » la surface du bassin d'alimentation, Pr et Pl les composantes de la pluie induisant le transfert rapide et lent, respectivement. Lorsque la sortie S(t) représente un niveau piézométrique, le terme « Surface » doit être remplacé par l'inverse de la porosité efficace. Les réponses impulsionnelles Gr et Gl sont normalisées (aire unité) et sont donc sans dimension.

La somme Pr + Pl représente la pluie efficace. Elle est calculée à partir d'un seuil Oméga(t) de telle sorte que :

$$\text{Pluie efficace} = \text{pluie} - \text{Oméga}(t) \text{ si pluie} > \text{Oméga}(t)$$

$$\text{Pluie efficace} = 0 \text{ si pluie} < \text{Oméga}(t)$$

Le seuil Oméga(t) est lui-même calculé à partir de la pluie et de l'ETP (ou température journalière) passées de sorte que :

$$\text{Oméga}(t) = G_p * \text{pluie} + \text{Getp} * \text{ETP} + \text{constante}$$

Les réponses impulsionnelles G_p et Getp sont représentées par des trapèzes (modèle à 2 x 4 degrés de liberté) :



de sorte que $\text{Getp} > 0$ et $G_p < 0$: l'ETP augmente le seuil $\text{Oméga}(t)$ alors que la pluie le fait diminuer.

La part relative $\text{Pr}/(\text{Pr}+\text{PI})$ de la pluie impliquée dans le transfert rapide est donnée par la fonction $\text{Alpha}(t)$ qui, elle-même, dépend de la pluie efficace passée :

$$\text{Alpha}(t) = G_{\text{peff}} * (\text{Pr} + \text{PI})$$

La réponse impulsionnelle G_{peff} est, là encore, représentée par un trapèze (modèle à 4 degrés de liberté) :



Les solutions du modèle inverse sont les réponses impulsionnelles G_I et G_R , $\text{Oméga}(t)$ (G_p , Getp et la constante) et $\text{Alpha}(t)$ (G_{peff}).

1.2. MODÉLISATION INVERSE DES TRANSFERTS DE MASSE

La modélisation des transferts de masse consiste à calculer les réponses impulsionnelles lente (H_I) et rapide (H_R) associées aux différents types de transport d'un traceur particulier. Ces réponses impulsionnelles se distinguent généralement de celles associées aux écoulements car elles font intervenir des processus physico-chimiques modifiant les flux observés en sortie. Les flux sont le produit d'un débit (ou d'une variation de niveau piézométrique) par une concentration (ou une variation de concentration par rapport à une concentration de base, ou bien encore une variation de conductivité, de température, ...).

L'équation du transport régissant les écoulements peut être généralisée au transfert de masse à condition de représenter l'entrée et la sortie par des flux. Le flux de sortie $F(t)$ s'exprime alors de la sorte :

$$F(t) = \text{surface} \cdot (\text{Cr}(t) \cdot H_R * \text{Pr} + \text{Cl}(t) \cdot H_I * \text{PI})$$

où $Cr(t)$ et $Cl(t)$ représentent les concentrations en entrée associées aux différents types de transport (rapide et lent). Ces fonctions sont estimées de telle sorte que le flux de sortie calculé soit le plus proche possible du flux observé. Les concentrations en entrée de l'hydrosystème subissent en effet des variations liées soit à des processus naturels (dissolution plus ou moins active, dilution du réservoir, ...) soit à l'activité anthropique. Étant donné le caractère pseudo-périodique des phénomènes d'une année sur l'autre, les concentrations d'entrée sont représentées par leur développement en série de Fourier de telle sorte que le nombre de cycles par an soit modifiable en fonction des applications (le calcul de la concentration d'entrée d'un traceur événementiel n'est réalisé que dans le cas du traçage indirect de la pluie).

Là encore, le terme « surface » doit être remplacé par l'inverse de la porosité efficace lorsque le flux de sortie est le produit d'une concentration par la variation d'un niveau piézométrique.

Les solutions du modèle inverse sont les réponses impulsionnelles HI et Hr ainsi que les coefficients des développements en série de Fourier de $Cr(t)$ et $Cl(t)$.

1.3. POROSITÉ EFFICACE

Lors d'un suivi piézométrique, la porosité efficace intervient dans la loi de conservation des espèces (eau, espèces dissoutes), suivant la loi :

$$\frac{\text{Somme (pluie efficace)}/\text{porosité efficace} = \text{somme (niveau)}}{\text{Somme (pluie efficace concentration d'entrée)}/\text{porosité efficace} = \text{Somme (niveau} \times \text{concentration de sortie)}}$$

la somme étant effectuée sur les points de mesure pendant la période d'observation. Le niveau piézométrique est exprimé par rapport à un niveau de référence.

En ce qui concerne la concentration d'entrée, ce peut être la concentration d'un traceur mesurée dans la pluie (signature isotopique, ...) lors du traçage direct de la pluie, ou bien la concentration présumée d'un traceur marquant l'eau de ruissellement ou l'eau de recharge, lorsque la cinétique de dissolution du traceur est compatible avec le temps de régulation des processus de transfert. Dans ce cas, cette concentration d'entrée est calculée en utilisant la modélisation inverse (traçage indirect de l'eau événementielle).

1.4. OMEGA (SEUIL DE PLUIE EFFICACE)

La prise en compte de la loi de conservation :

$$\text{Somme (pluie efficace)} \times \text{Surface} = \text{Somme (débit)}$$

applicable également aux flux ainsi qu'aux niveaux piézométriques, suppose le calcul de la pluie efficace, qui doit prendre en compte les pertes dues à l'évapotranspiration ainsi qu'à la recharge des sols.

Le calcul de la pluie efficace à partir de la pluie et de l'ETP (ou la température extérieure moyenne) est réalisé grâce au seuil de pluie efficace Oméga. Cette fonction du temps a la même dimension que la pluie (hauteur d'eau par unité de temps).

À un temps t donné, la hauteur de pluie efficace est :

- la différence entre la hauteur de pluie et ce seuil si la hauteur de pluie est supérieure ou égale au seuil ;
- zéro si la hauteur de pluie est inférieure au seuil.

La fonction Oméga est obtenue à partir du produit de convolution de la pluie et de l'ETP (éventuellement T) et d'une réponse impulsionnelle constituée de 2 trapèzes de part et d'autre de l'axe des X. Le produit de convolution de l'ETP par la partie positive de la R.I. donne la contribution de l'ETP au seuil de pluie efficace (l'ETP ou T ont une contribution positive sur le seuil car l'une et l'autre de ces grandeurs caractérise la perte en eau des sols et de la végétation). Le produit de convolution de la pluie par la partie négative de la R.I. donne la contribution de la pluie au seuil Oméga : la pluie a une contribution négative sur le seuil, suite à la recharge des sols.

1.5. CONTRIBUTION DE LA PLUIE AU TRANSFERT RAPIDE (ALPHA)

Les processus de transfert intervenant à l'échelle de bassins font généralement intervenir plusieurs réponses impulsionnelles. Deux réponses impulsionnelles peuvent être utilisées simultanément :

- une courte réponse impulsionnelle dite rapide, destinée à caractériser le ruissellement de surface d'un bassin versant, ou l'effet de chasse d'un karst ;
- une réponse impulsionnelle lente, nécessairement plus longue que la précédente, décrivant à la fois les processus de transfert rapides (s'ils sont linéaires) et différés : infiltration, ...

Pour cela, la pluie efficace est décomposée en une composante rapide et une composante lente, chacune de ces composantes étant transférée à l'exutoire ou dans la nappe au moyen de la réponse impulsionnelle correspondante. La contribution de la pluie efficace au transfert rapide est décrite au moyen de la fonction Alpha dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1.

Cette fonction donne, au temps t , la contribution de la pluie efficace impliquée dans le transfert rapide. Elle est obtenue à partir du produit de convolution de la pluie efficace et d'une réponse impulsionnelle en trapèze dont le front de montée caractérise la durée du processus conduisant à la modification de l'état du bassin : en effet, le transfert rapide résulte généralement de phénomènes transitoires induits par un régime pluviométrique de forte intensité ou de longue durée. Ces processus comprennent la saturation en eau des sols, l'extension de zones humides dans les bas-fonds ou l'accroissement de la charge hydraulique dans un aquifère karstique.

La longueur de la plus petite base du trapèze régit l'amplitude des phénomènes de transfert rapide. En particulier, la fonction Alpha peut prendre d'importantes valeurs lorsque la longueur de cette base est supérieure à la durée moyenne séparant deux événements de pluie efficace consécutifs, en raison du phénomène d'empilement observé lors du produit de convolution de la pluie efficace par ce trapèze (un événement de pluie efficace fait monter la fonction Alpha alors que celle-ci n'était pas encore redescendue à 0).

1.6. NIVEAU DE RÉFÉRENCE

Dans le cas de la modélisation inverse d'un niveau piézométrique, le niveau de référence représente la valeur du niveau piézométrique en l'absence de sollicitation en entrée (recharge, alimentation, prélèvements).

La connaissance de ce niveau de référence est déterminante lors du calcul des réponses impulsionnelles. En particulier, la valeur du niveau de référence conditionne la porosité efficace.

D'une manière générale, le niveau de référence est le niveau minimum atteint au cours de la période d'observation. Lorsque des prélèvements sont effectués, le niveau de référence peut être situé au-dessus du niveau minimum observé.

1.7. TRACEUR NATUREL OU D'ORIGINE ANTHROPIQUE

L'utilisation de traceurs géochimiques ou isotopiques pertinents peut permettre de différencier les différents types d'eau intervenant dans les processus de transfert. Cette différenciation peut résulter ou bien de la variabilité temporelle des concentrations d'entrée (signature isotopique de la pluie), ou bien d'un contraste de concentration entre l'eau événementielle et préévénementielle.

Ce contraste peut résulter :

- de l'évolution de la concentration d'entrée, l'évolution de la concentration dans le réservoir étant différée dans le temps par effet tampon. De tels régimes transitoires caractérisés par l'absence d'équilibre entre l'entrée et le réservoir se rencontrent lors de l'augmentation ou de la diminution des apports de nitrate en surface, fonction de l'évolution des techniques culturales, ou lors d'apports de chlorures d'origine anthropique ;
- de la modification de la concentration du traceur événementiel dans le réservoir, suite à des processus de précipitation, ou de dissolution ;
- dans certains aquifères karstiques, le calcium peut être utilisé en tant que traceur événementiel lorsque l'eau d'infiltration séjourne dans l'épikarst, suite aux processus d'échange entre la phase aqueuse et la calcite. Un contraste de concentration relativement important peut être observé entre la concentration d'entrée et le réservoir en raison du phénomène de précipitation congruente de la calcite et de la dolomite dans la zone noyée ;

- de la variabilité de la concentration d'entrée, suite à la dilution des eaux interstitielles de la zone non saturée lorsque plusieurs événements de pluie efficace se succèdent, alors que, conséquence de l'effet tampon, la concentration dans le réservoir reste relativement stable. Dans ce cas, l'entrée et le réservoir sont globalement en équilibre, mais des différences de concentration significatives peuvent être observées au cours d'un même cycle hydrologique.

1.8. CYCLE (NOMBRE DE CYCLES)

Le développement d'un modèle inverse associé à un flux de traceur nécessite la connaissance des concentrations d'entrée et de sortie du traceur. La concentration d'entrée n'est pas toujours observée directement (traçage indirect de la pluie). Dans ce cas, la concentration en entrée de l'hydrosystème doit être calculée. Il s'agit le plus souvent de la concentration du traceur dans l'eau de ruissellement ou d'infiltration, suite à des processus d'échange entre la phase liquide et la phase solide. Ce traceur peut néanmoins jouer le rôle de traceur événementiel si les processus d'échange sont rapides, par comparaison aux temps de transfert. De même, la concentration du traceur pré-événementiel dans le réservoir doit être calculée pour obtenir les réponses impulsionnelles associées au flux de traceur pré-événementiel.

Dans l'un et l'autre cas, il y a lieu de représenter des variations de concentration à l'entrée de l'hydrosystème, en fonction du temps. L'utilisation de séries trigonométriques est bien adaptée à ce problème en raison du caractère pseudo-périodique des variations saisonnières ou annuelles des concentrations. Le nombre de cycles annuels permet alors de définir la résolution temporelle, ce nombre de cycles devant être choisi le plus petit possible, conformément au principe de parcimonie (ne prendre en compte des variations temporelles que si elles sont justifiées).

Ce nombre de cycles annuels est généralement compris entre 1 et 4, 4 cycles par an (régime saisonnier) pouvant être nécessaires pour la prise en compte de phénomènes rapides tels que les effets de dilution de l'eau d'un réservoir présentant un faible effet tampon.

2. Pondération des chroniques de pluie

La pondération des chroniques de pluie permet d'optimiser une combinaison linéaire pour expliquer au mieux un débit ou un niveau piézométrique. Pour cela, les poids associés aux différentes chroniques de pluie sont calculés de telle sorte que la fonction objectif représentée par le corrélogramme croisé non centré (ni la pluie ni le débit ne sont centrés) :

[Combinaison linéaire des Pluies, Débits]

ait une surface maximale pour un décalage appartenant au segment $[0, T]$ où T est le temps de régulation du système (exprimé en nombre d'incrément).

Les poids sont positifs et leur somme est égale à 1.

Les pluies considérées doivent être issues des mesures brutes, sans aucun traitement. En particulier, il n'est pas utile de considérer les pluies efficaces car les pluies qui se produisent en l'absence de recharge n'ont que peu d'influence sur le corrélogramme croisé non centré. Dans ce cas, le produit d'une hauteur de pluie par un débit ou un niveau d'étiage est faible par construction.

Les niveaux piézométriques doivent être exprimés par rapport à un niveau de référence proche du minimum observé sur la période d'observation.

La pondération des chroniques de pluie prend un sens lorsque la variabilité spatiale des pluies est supérieure aux erreurs d'échantillonnage. Puisque le critère d'optimisation des poids porte sur le corrélogramme croisé non centré, non seulement les moyennes pluviométriques mesurées par les différentes stations ont une influence sur le calcul des poids, mais également les variations relatives des hauteurs de pluie observées aux différentes stations.

Non seulement cette méthode est destinée à pondérer les pluies de manière à calculer des fonctions de transfert Pluie/Débit de manière optimale, mais encore elle permet de quantifier l'influence des surfaces contributives d'un bassin. Ces surfaces contributives sont obtenues par pondération des intersections des supports des différents pluviomètres et de la surface du bassin. De la même manière que la pluie possède une signature isotopique particulière en fonction de l'altitude, on recherche ici une signature « corrélatoire » entre la pluie et le débit.

3. Paramètres des simulations Tempo

Variables d'entrées	PluieBA
	ETP_Courbessac

Variable de sortie	Débit mazaauric (m3/s)
--------------------	------------------------

Contribution de la pluie à la pluie efficace:	48%
---	-----

Surface Bassin d'alimentation (km2)	45.42595
-------------------------------------	----------

Base de temps pour les calculs	1 jour
--------------------------------	--------

Périodes considérées pour les calculs	
	29/10/1998 au 28/ 1/2002
	10/ 5/2002 au 14/ 5/2002
	30/ 5/2002 au 19/ 7/2002
	31/ 7/2002 au 2/ 8/2002
	5/12/2002 au 11/ 9/2003
	22/ 9/2003 au 2/10/2003
	16/10/2003 au 30/11/2003
	13/ 2/2004 au 10/ 7/2004
	8/ 9/2004 au 30/12/2004

Modèle paramétrique	
Critère d'ajustement	Minimisation de la distance S
R2 :coefficient corrélation (mesuré/calculé)	R2= 0.873
Critère de Nash	Nash=0.7352

Modèle Exp_Gauss	
Critère d'ajustement	Maximisation du coefficient de corrélation R2
R2 :coefficient corrélation (mesuré/calculé)	R2= 0.855
Critère de Nash	Nash=0.7260

Modèle non_paramétrique	
Critère d'ajustement	Maximisation du coefficient de corrélation R2
R2 :coefficient corrélation (mesuré/calculé)	R2= 0.857
Critère de Nash	Nash=0.6992

Annexe 4

Quelques données sur la pluie efficace

1. Définitions

La pluie efficace est le solde de la pluie totale une fois retirées :

1. La part reprise par l'évaporation directe et par la transpiration foliaire (évapotranspiration),
2. La part reprise par le sol pour reconstituer sa réserve en eau.

La pluie efficace se traduit par un écoulement d'eau, que l'on répartit schématiquement en deux composantes :

- un ruissellement de surface ;
- une infiltration dans le sous-sol (recharge des aquifères).

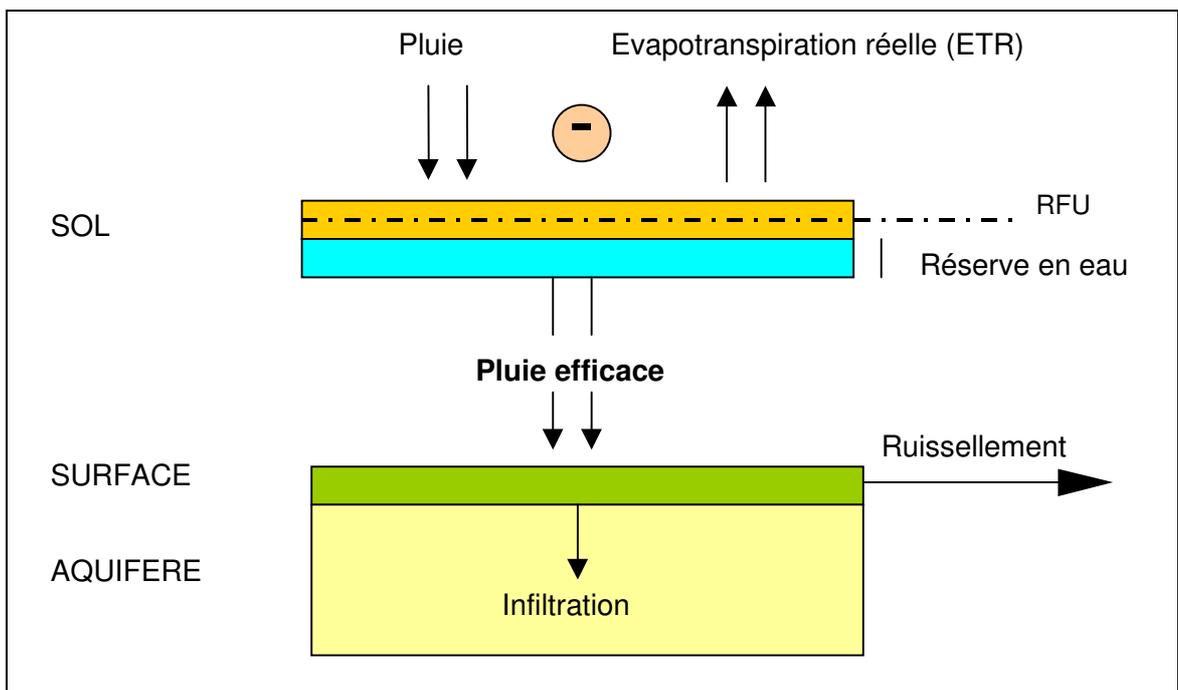


Figure 1 : Répartition de la pluie efficace en ruissellement et infiltration

L'estimation des pluies efficaces passe par celle de l'évapotranspiration réelle (ETR), paramètre qui dépend :

- de l'évapotranspiration potentielle (ETP), valeur maximale théorique de l'ETR ;

- de la réserve en eau du sol. La valeur maximale théorique de la réserve en eau du sol est assimilée par commodité à la Réserve Facilement Utilisable (RFU) définie par les agronomes. Cette réserve facilement utilisable est égale à la quantité d'eau du sol qui soit facilement extractible par les racines sur une profondeur utile, c'est-à-dire sur la profondeur atteinte par l'enracinement. Les plantes iront puiser dans la réserve en eau du sol si l'apport d'eau par les pluies ne suffit pas.

Les valeurs de réserve facilement utilisable (RFU) des sols sont très variables en fonction du type de sol. Elles peuvent varier de moins de 30 mm pour les sols fins, à plus de 300 mm pour les sols profonds rétenteurs d'eau. Les classes de réserves facilement utilisables des sols de la France à l'échelle 1/2,000,000^{ème} définies par l'Institut National de la Recherche Agronomique (Mori, 1982) illustrent cette variabilité.

2. Quelques ordres de grandeur

Le BRGM (Daum, 1996) a effectué en 1996 une étude sur les précipitations efficaces moyennes annuelles en France pour la période 1965-1994, à partir des classes de réserves en eau des sols données par l'INRA, et en utilisant le logiciel GARDENIA. Les précipitations efficaces moyennes annuelles calculées pour la région des Corbières se situent dans les fourchettes 100-250 mm/an vers la côte, et 250-500 mm/an en allant vers l'intérieur des terres. Les résultats obtenus pour quelques stations météorologiques du Languedoc-Roussillon et des Pyrénées, en considérant trois hypothèses de réserves facilement utilisables (basse, moyenne, et haute), sont présentés ci-dessous. A Perpignan, la pluie efficace calculée varie entre 195 et 257 mm/an suivant les hypothèses de RFU utilisées, ce qui représente entre 22 et 32% de la pluie totale sur la même période. A Saint-Girons, la pluie efficace représente entre 45 et 50% de la pluie totale. Ce pourcentage est de 47 à 62% à Montpellier.

Dans le cas particulier des milieux karstiques, tels que les Corbières, les sols sont souvent secs et peu épais, donc a priori présentent une faible réserve utile. D'autre part, le ruissellement de surface est peu représenté, au profit de l'infiltration. Certains auteurs assimilent d'ailleurs la pluie efficace à l'infiltration (citée « infiltration efficace », dans Faillat, 1972).

Dans sa thèse, Faillat établit un bilan hydrologique sommaire pour Estagel (p 120), et donne les ordres de grandeur suivants :

- pluie moyenne de 550 mm/an ;
- une « infiltration efficace » de 40%, soit 220 mm/an.

Station	Pluie totale	RFU basse	Pluie efficace		RFU moyenne	Pluie efficace		RFU haute	Pluie efficace	
	mm	mm	mm	% de la pluie totale	mm	mm	% de la pluie totale	mm	mm	% de la pluie totale
Montpellier	414	50	257	62%	70	221	53%	90	195	47%
Perpignan	578	50	187	32%	70	154	27%	90	130	22%
Saint-Girons	1024	50	508	50%	70	483	47%	90	461	45%

Tableau 1 : Pluie efficace moyenne annuelle calculée sur la période 1965-1994 (Daum, 1996)

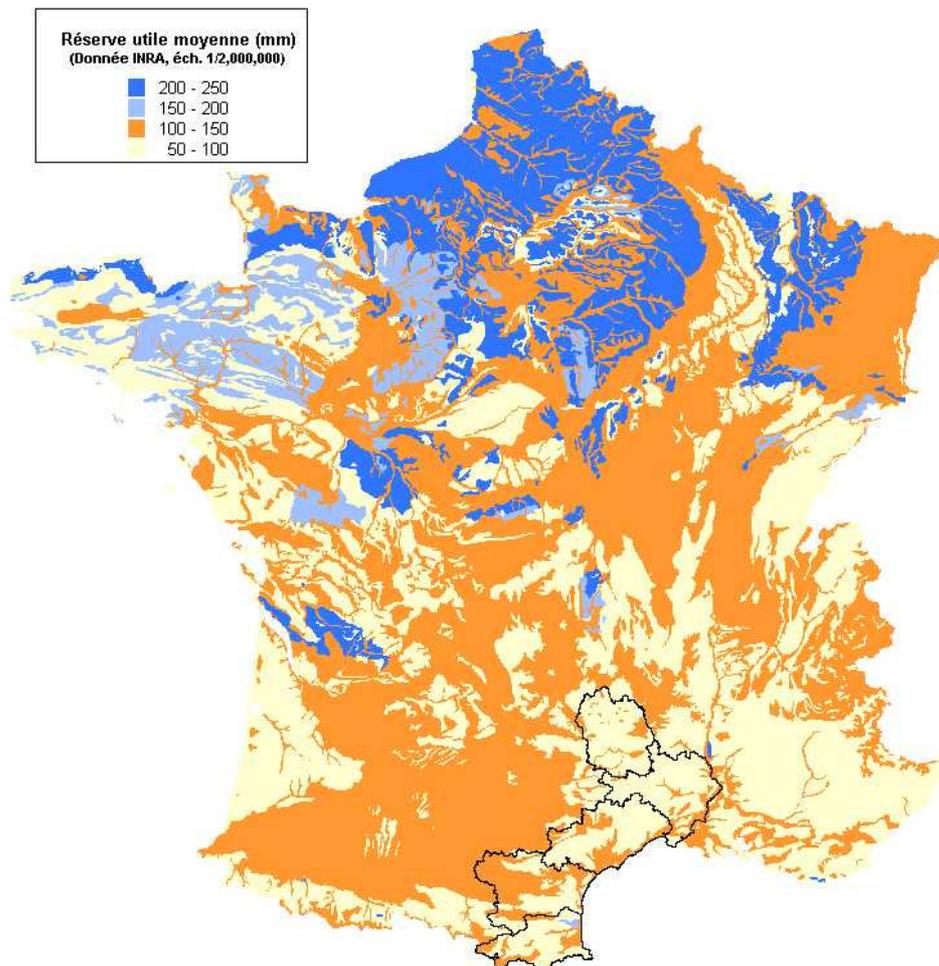


Figure 2 : Réserves utiles moyennes (données INRA, éch. 1/2.000.000^{ème})

Annexe 5

Résultats géochimiques

Nom	date préltv	HCO3 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	NH4 mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	NO3 mg/l	NO2 mg/l	Ntot mmol/l	SiO2 mg/l	B µg/l	Br µg/l	Rb µg/l	Sr µg/l	87Sr/86Sr	+/-
Lixiviât décharge Lauziere	13/11/1998	10371	34.2	76.6	1789	1316	1956	2444	22	5	5.00	108.9	196	14600	8700	770	1632	0.707917	0.000010
Forage-MasVallongue	04/11/1998	359	124	4.5	7.9	0.7	0	11.4	21.7	17.2	0	0.277	13	17	20	0.30	439	0.707636	0.000008
Forage Mas Granon	09/11/1998	300	105	9.2	18.9	11.9	0	15.1	63.1	39.8	0.06	0.643	16	54	27	4.40	979	0.707597	0.000010
Puits-Vacquieres	04/11/1998	562	179.0	3.2	5.1	0.3	0	10	21.8	0.2	0.03	0.004	17	18	44	1.40	679	0.707642	0.000008
Forage Mas d'Alesti	13/11/1998	369	144	5.9	14.1	1.4	0	30	59.3	20	0	0.323	13	91	64	0.80	661	0.707804	0.000010
Forage-Monier (Mas Calvas)	09/11/1998	523	185	8.8	21.1	0.7	0	45.1	51.1	19.9	0	0.321	18	82	35	0.30	949	0.707624	0.000007
Forage-Roure (Puech Nieux)	09/11/1998	522	180	4.2	17.2	0.4	0	28.7	28.5	6.2	0	0.100	19	33	31	0.40	560	0.707715	0.000010
F4 Puits Poubelle	04/11/1998	496	141	8.1	53.9	17.8	18.5	68.7	47.3	20.9	0.26	1.371	16	281	262	7.80	486	0.707822	0.000008
PUITS POUBELLE	08/09/2004	384	141	4.3	12	3.3	nm	16.9	41.6	28.9	nm	0.466	9	68	< 20	nm	443	0.707774	0.000008
Robert Puits 9 Arcades	04/11/1998	381	145	7.3	20.4	2.7	0	27.3	74.7	22.1	0	0.356	13	110	50	0.60	578	0.707829	0.000007
M. ROBERT	08/09/2004	441	179	7.5	26.5	2.3	nm	40.8	87.2	29.1	nm	0.469	12	150	< 20	nm	759	0.707782	0.000009
Forage Mas Provence	06/11/1998	418	120	11.6	80.3	2.2	0	39.6	122.1	5.1	0	0.082	17	91	79	1.60	1300	0.707641	0.000007
MAS DE PROVENCE	08/09/2004	382	131	4.5	5.8	0.4	nm	7.2	28.7	6.1	nm	0.098	10	36	< 20	nm	584	0.707713	0.000009
Puits Font Aubarne	09/11/1998	457	149	4.8	11.8	0.6	0	15.4	24.6	10.1	0.17	0.167	16	31	126	0.70	534	0.707682	0.000006
FONT AUBARNE	06/09/2004	472	158	3.7	7	0.9	nm	11.4	18.3	7.5	nm	0.121	9	27	< 20	nm	520	0.707669	0.000007
Forage Mas Bruxelles	04/11/1998	556	180	3.5	5.2	0.1	0	8.4	20.9	4.1	0	0.066	11	21	26	0.20	536	0.707678	0.000011
BRUXELLE (M.Tubert)	08/09/2004	573	197	3.4	10.3	0.1	nm	25.7	21.4	6.3	nm	0.102	9	37	< 20	nm	639	0.707669	0.000007
Sce Vaquerole	22/03/2004	432	131.9	3.6	7.2	0.4	nm	13.1	25.6	6	nm	0.097	8.9	22.1	25.7	nm	665	0.707616	0.000009
S. VACQUEROLLE	09/09/2004	489	175	4.1	10.1	0.3	nm	20.5	33	6.1	nm	0.098	8.6	39	< 20	nm	682	0.707638	0.000008
Puits Vallariquet	22/03/2004	492	175.3	3.9	21.3	0.4	nm	32.9	62.7	24.2	nm	0.390	9	101	48.2	nm	677	0.707685	0.707685
MAS DE PONGE	08/09/2004	358	77.7	51.8	23.5	9.2	nm	23.4	131.5	3.9	nm	0.063	8.4	173	< 20	nm	7717	0.707514	0.000008
MOULIN DAUMIER	09/09/2004	364	132	3.7	6.4	1.3	nm	13.2	22.9	9	nm	0.145	9.2	56	< 20	nm	369	0.707798	0.000008
S. GUIGUE	09/09/2004	379	154	5	15.1	0.7	nm	21.3	56.1	37.2	nm	0.600	9.6	76	< 20	nm	933	0.707607	0.000009
Sce Guigue	09/11/2004	471	165.3	4.2	15.6	0.6	nm	17.2	50.9	17.8	nm	0.287	9.2	75	nm	nm	945	0.707653	0.000008
F. REZ	06/09/2004	446	176	6.9	19.6	2	nm	30.4	56.8	23.5	nm	0.379	11	103	59	nm	778	0.70771	0.000008
Eau bouillie	05/11/2004	341	116.7	2.5	8	0.8	nm	11.4	24.5	13.5	nm	0.218	7	42	nm	nm	342	0.707748	0.000008
Puits Pesenti	27/01/2005	300	130.7	5.9	18.5	5.1	nm	28.3	96.7	32.5	nm	0.524	10.2	111	nm	nm	767	0.707813	0.000007
Source du Roc	27/01/2005	403	127.5	1.6	4.2	0.5	nm	7.8	9.4	0.7	nm	0.011	6.7	11	nm	nm	148	0.707979	0.000007

nm : non mesuré

Tableau 1 : Résultats géochimiques des campagnes spatiales d'échantillonnage des eaux souterraines (1998 et 2004).

Nom	date prélt	HCO3 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	NH4 mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	NO3 mg/l	NO2 mg/l	Ntot mmol/l	SiO2 mg/l	B µg/l	Br µg/l	Rb µg/l	Sr µg/l	87Sr/86Sr	+/-
Source Aven Mazauric	04/11/1998	447	141	6.7	36.7	11	10.3	55.4	49.2	23	0.09	0.945	20	191	176	4.70	465	0.707765	0.000008
Source Aven Mazauric	22/03/2004	403	135.6	4.2	11.6	1.9	nm	18.2	29.5	13.7	nm	0.221	7.7	47.6	20.3	nm	486	0.707711	0.000006
Source Aven Mazauric	06/04/2004	382	135.2	4	10.5	1.5	nm	16	29.2	12.5	nm	0.202	8	42.5	< 20	nm	459	0.707715	0.000008
Source Aven Mazauric	25/05/2004	384	137.6	5	15.3	2.7	nm	23.6	34.6	19.5	nm	0.315	8.4	71.5	24.4	nm	512	0.707752	0.000008
Source Aven Mazauric	02/07/2004	415	136.7	5.7	19.5	3.8	nm	33.4	52.8	17.4	nm	0.281	8.7	92.3	29.7	nm	499	0.707830	0.000008
Source Aven Mazauric	08/09/2004	363	149	5.2	21.6	3.3	nm	33.7	51.4	38	nm	0.613	9.0	111	< 20	nm	483	0.707815	0.000008
Source Aven Mazauric	07/10/2004	374	135	6.4	33.2	8.2	nm	48.7	50.4	47.3	nm	0.763	7.4	149	nm	nm	527	0.707845	0.000006
Sce Maz.-préleveur Nimes	09/11/2004	291	103.4	3.1	8.4	1.3	nm	12.9	27.2	13.2	nm	0.213	7.6	41	nm	nm	363	0.707730	0.000007
Sce Maz.-préleveur Nimes	01/12/2004	362	128.4	4.5	14.2	2.6	nm	21.9	34.5	19.1	nm	0.308	7.8	73	nm	nm	459	0.707762	0.000006
Sce Maz.-préleveur Nimes	16/12/2004	370	128.1	4.8	19.1	4.2	nm	27.5	37.2	25.2	nm	0.406	8.1	102	nm	nm	470	0.707773	0.000006
Sce Maz.-préleveur Nimes	20/12/2004	373	125.8	3.3	9.2	1.2	nm	13.3	26	10.5	nm	0.169	7.5	35	nm	nm	437	0.707730	0.000007
Sce Maz.-préleveur Nimes	24/12/2004	367	124.9	3.6	10.1	1.5	nm	14.8	27.9	12	nm	0.194	7.5	50	nm	nm	448	nm	
Sce Maz.-préleveur Nimes	05/01/2005	391	132	4.3	13.1	2.1	nm	19.6	32.3	16.7	nm	0.269	7.7	61	nm	nm	484	0.707756	0.000006

nm : non mesuré

Tableau 2 : Résultats géochimiques des suivis de la Fontaine de Nimes (Mazauric 1998 et 2004).

Nom	date prélt	HCO3 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	NH4 mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	NO3 mg/l	NO2 mg/l	Ntot mmol/l	SiO2 mg/l	B µg/l	Br µg/l	Rb µg/l	Sr µg/l	87Sr/86Sr	+/-
Cadereau Alès	04/11/2005	134	37	1.2	nm	nm	nm	2.1	9.6	5.8	nm	0.094	nm	17	nm	nm	154	0.707849	0.000008
Cadereau Alès	05/11/2005	351	115.8	3.1	nm	nm	nm	12.1	32.3	15.3	nm	0.247	nm	50	nm	nm	431	0.707765	0.000008
Cad.Uzès Av.bassinC	06/11/2005	351	143.3	3.6	nm	nm	nm	23.7	42.7	16.5	nm	0.266	nm	82	nm	nm	554	0.707728	0.000008
Cad.UzèsAv.bassin C	09/11/2005	422	141.5	3.8	nm	nm	nm	27.8	45	17.2	nm	0.277	nm	91	nm	nm	628	0.707701	0.000008

nm : non mesuré

Tableau 3 : Résultats géochimiques des suivis sur les cadereaux d'Ales et d'Uzes (2004).

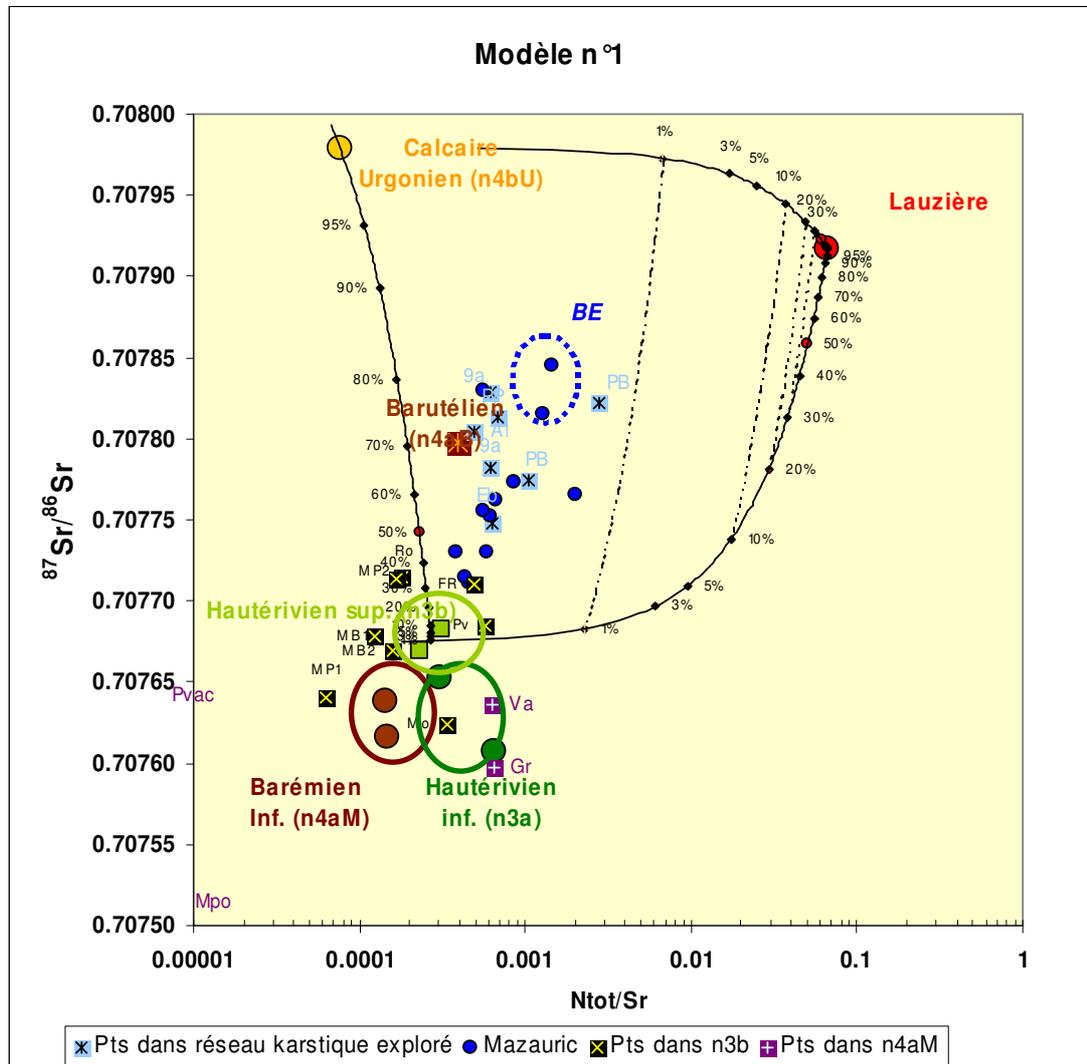


Figure 1 : Représentation des points d'eau souterraine du systèmes karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs Ntot/Sr en considérant un modèle de mélange à 3 composantes : hypothèse d'une contribution de l'Urgonien.

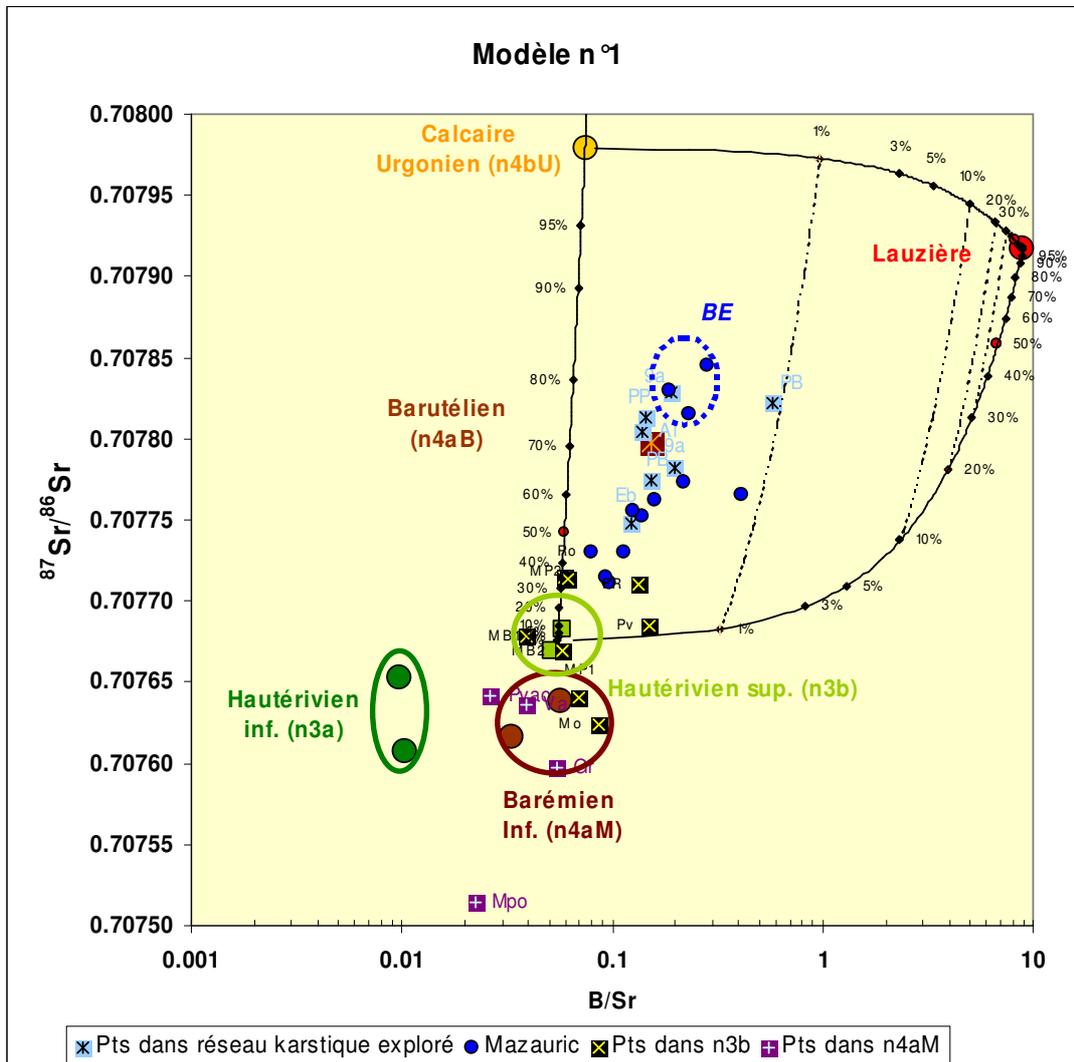


Figure 2 : Représentation des points d'eau souterraine du systèmes karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs B/Sr en considérant un modèle de mélange à 3 composants : hypothèse d'une contribution de l'Urgonien.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service EAU

Unité RMD
1039 rue de Pinville
34000 – Montpellier - France
Tél. : 04 67 15 79 90