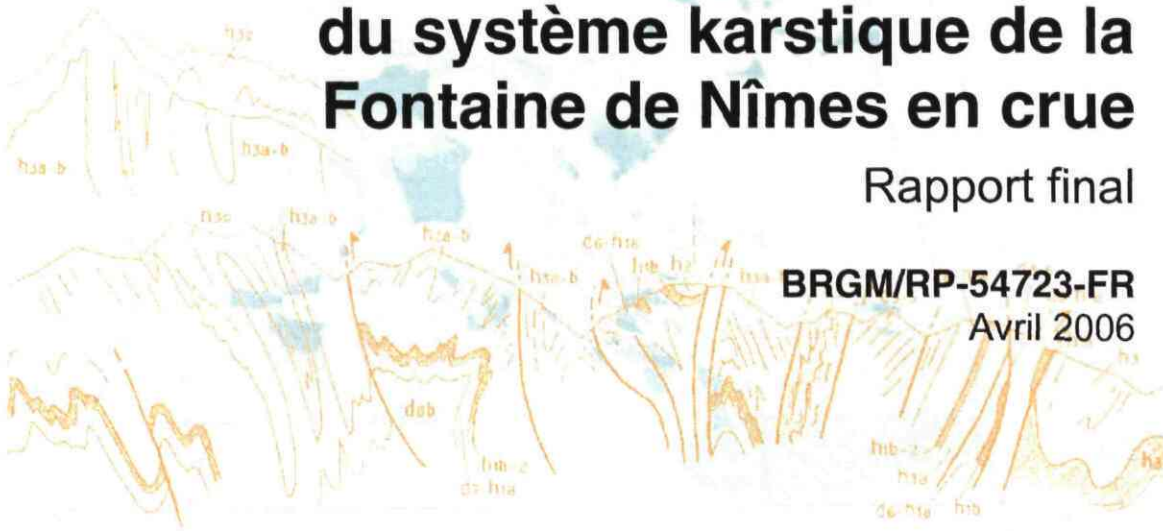
Document public

Fonctionnement hydrogéologique du système karstique de la Fontaine de Nîmes en crue

Rapport final

BRGM/RP-54723-FR
Avril 2006



Ministère de l'Ecologie
et du Développement Durable

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Fonctionnement hydrogéologique du système karstique de la Fontaine de Nîmes en crue

Rapport final

BRGM/RP-54723-FR
Avril 2006

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

J.C. Maréchal et B. Ladouche
Avec la collaboration de
J.F. Desprats et J-L. Izac

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : N. Dörfliger	Nom : D. Pennequin
Date : 12 juin 2006	Date : 3 juillet 2006
Signature :	Signature :
(Ou Original signé par)	(Ou Original signé par)

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

Ministère de l'Ecologie
et du Développement Durable

Géosciences pour une Terre durable
brgm

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

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

Maréchal J-Ch., Ladouche B. (2006) : Fonctionnement hydrogéologique du système karstique de la Fontaine de Nîmes en crue, Rapport final, BRGM/RP-54723-FR, 111 p., 77 illustrations, 1 annexe.

© BRGM, 2006, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre de l'axe KARST du projet cadre de recherche EAUR15 COMPLEX'AQUI du BRGM 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.

Ce rapport présente les résultats des actions menées dans le cadre du module 2 du projet, dont l'objectif est la connaissance du fonctionnement hydrogéologique de l'épikarst et de la zone noyée notamment au moyen de l'acquisition de nouvelles données. Il apporte des éléments complémentaires sur le modèle conceptuel du système karstique et précise le fonctionnement hydrogéologique s.l. en période de crues, notamment grâce au suivi hydrochimique réalisé durant la crue de septembre 2005 et à l'interprétation des mesures du réseau de suivi des eaux souterraines.

Les premières conclusions concernant la contribution du système karstique de la Fontaine de Nîmes aux crues dans la Ville de Nîmes sont les suivantes : (i) lors des épisodes pluvieux, certains compartiments de l'aquifère karstique, probablement des zones épikarstiques, se saturent rapidement et provoquent un débordement des eaux au droit d'émergences temporaires (« boulidous »), situés sur l'ensemble du bassin versant de la Fontaine, mais présentant une forte concentration dans le quartier d'Eaux Bouillies, (ii) ces « boulidous » contribuent pour une grande partie aux écoulements observés, aussi bien dans les cadereaux d'Alès que d'Uzès, durant les épisodes de novembre 2004 et de septembre 2005, (iii) ces zones de débordement sont déconnectées, au moins en hautes eaux, du réseau de drains karstiques de la Fontaine, dans lequel les charges hydrauliques restent notamment inférieures à celles des zones de débordement, (iv) le réseau de drains karstiques de la Fontaine déborde cependant au cours de certains épisodes (débit supérieur à 13 m^3/s) par certains des regards existant sur le réseau, (v) l'état hydraulique initial du karst jouant un rôle important sur sa saturation et donc sur l'ampleur des ruissellements engendrés au sein des cadereaux, le réseau d'alerte doit intégrer des points de suivi des eaux souterraines, (vi) de premiers essais de réflexion sur la constitution d'indices pluviométriques d'alerte tenant compte de la réponse du karst ont été effectués : le débordement du karst semble requérir un seuil d'environ 150 mm de précipitations au cours des 25 jours précédents.

Sommaire

1. Introduction **11**

2. Débits de la Fontaine de Nîmes **13**

2.1. INTRODUCTION 13

2.2. TARAGE DE LA SOURCE 13

2.2.1. Courbe de tarage 13

2.3. CHRONIQUES DE DEBITS 17

3. Analyse du fonctionnement du système karstique de la Fontaine de Nîmes **19**

3.1. ANALYSE DES DEBITS CLASSES 19

3.2. ANALYSE DES COURBES DE RECESSION 21

3.3. ANALYSES QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DU SYSTEME KARSTIQUE DE NIMES PAR UNE APPROCHE DE MODELISATION GLOBALE A L'AIDE DU LOGICIEL « TEMPO » 26

3.3.1. Modélisation inverse des relations pluie-débit pour le système karstique de la Fontaine de Nîmes 26

3.3.2. Simulation des débits de la Fontaine de Nîmes pour les épisodes de pluies d'octobre 1998, septembre 2002 et décembre 2003 30

3.3.3. Analyse qualitative et quantitative des paramètres physico-chimiques de l'eau de la Fontaine de Nîmes : vers une meilleure caractérisation du fonctionnement hydrodynamique 34

3.3.4. Synthèse sur le fonctionnement hydrogéologique du karst de Nîmes déduit par l'approche de modélisation inverse (TEMPO). 42

4. Suivi piézométrique des eaux souterraines **47**

4.1. INTRODUCTION 47

4.2. PIEZOMETRIE SPATIALE 47

4.3. VARIATION TEMPORELLE DES NIVEAUX D'EAU 48

4.3.1. Réseau de surveillance 48

4.3.2. Analyse qualitative 51

4.3.3. Traitement du signal 58

4.4. RESURGENCES TEMPORAIRES 63

4.4.1. Observations 63
4.4.2. Première réflexion sur l'alerte 67

5. Perméabilité des sols 71

5.1. MESURES REALISEES 71

5.2. GEOLOGIE ET PERMEABILITE 72

5.3. OCCUPATION DU SOL ET PERMEABILITE 74

5.4. PERMEABILITE ET PEDOLOGIE 75

5.5. SYNTHESE 79

6. Hydrochimie 81

6.1. CARACTERISATION DU FONCTIONNEMENT GEOCHIMIQUE DU SYSTEME KARSTIQUE DE LA FONTAINE DE NIMES 82

6.2. CARACTERISATION GEOCHIMIQUE DES RELATIONS EAUX DE SURFACE/EAUX SOUTERRAINES 88

6.3. SYNTHESE 96

7. Modèle conceptuel du système karstique 99

7.1. INTRODUCTION 99

7.2. STRUCTURE 99

7.3. FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE 103
7.3.1. Basses eaux 103
7.3.2. Hautes eaux et crues 104

8. Conclusion 107

9. Bibliographie 109

Liste des illustrations

Illustration 1 : Relation piézométrie Mazauric – débit Fontaine observée entre le 27 octobre 2004 et novembre 2005 14

Illustration 2 : Déversement du cadereau en crue dans le canal de la Fontaine durant la crue de septembre 2002 (photo : G. Jouanen, Association Fontaine de Nîmes) 15

Illustration 3 : Relations analytiques de l'ajustement de la courbe de tarage avant septembre 2005 15

Illustration 4 : Relations analytiques de l'ajustement de la courbe de tarage après septembre 2005 16

Illustration 5 : 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 16

Illustration 6 : Débits observés à la Fontaine de Nîmes depuis 1999 17

Illustration 7 : Débit mesuré au débitmètre dans le canal de la Fontaine durant la crue de septembre 2005 18

Illustration 8 : 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) 20

Illustration 9 : 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) 20

Illustration 10 : Décomposition de la récession selon la méthode de Mangin (1970). 22

Illustration 11 : Décomposition de la récession 2005 selon la méthode de Mangin (1970). 22

Illustration 12 : Synthèse des paramètres des récessions étudiées à l'aide de la formulation modifiée de Mangin 24

Illustration 13 : Décomposition de la récession 2005 selon la méthode modifiée de Mangin 25

Illustration 14 : Comparaison du débit modélisé au débit estimé du système karstique de la Fontaine de Nîmes : 88 % de la variance totale expliquée 27

Illustration 15 : Calcul des hydrogrammes unitaires normalisés du système karstique de la Fontaine de Nîmes (R. I. : réponse impulsionnelle) 28

Illustration 16 : Simulation des débits de la Fontaine de Nîmes sur la période du 01/09/1998 au 31/12/05. 29

Illustration 17 : Simulation des débits de la Fontaine de Nîmes sur la période du 01/09/2004 au 31/12/05. 29

Illustration 18 : Simulation des débits de la Fontaine de Nîmes en septembre 1988 31

Illustration 19 : Simulation des débits de la Fontaine de Nîmes en septembre 2002 32

Illustration 20 : Simulation des débits de la Fontaine de Nîmes en décembre 2003 33

Illustration 21 : Simulation des débits de la Fontaine de Nîmes en décembre 2003 en considérant un épisode pluvieux comparable à celui observé en 1988. 34

Illustration 22 : débit et conductivité électrique à la Fontaine de Nîmes durant la période d'observation (octobre 2004 à janvier 2006) 35

Illustration 23 : débit et conductivité électrique à la Fontaine de Nîmes durant la crue de septembre 2005 36

Illustration 24 : débit et température à la Fontaine de Nîmes durant la crue de septembre 2005 37

Illustration 25 : décomposition du débit de la Fontaine lors de la crue de septembre 2005 en composantes ancienne et récente 38

Illustration 26 : Réponse impulsionnelle de la composante événementielle et comparaison du flux modélisé au flux mesuré. 39

Illustration 27 : Réponse impulsionnelle de la composante pré-événementielle et comparaison du flux modélisé au flux mesuré. 39

Illustration 28 : Reconstruction de l'hydrogramme unitaire à partir d'une combinaison linéaire des réponses impulsionnelles événementielle (Température) et pré-événementielle (conductivité) : somme = 0,924. 40

Illustration 29 : Hydrogrammes unitaires des différentes composantes de l'écoulement 41

Illustration 30 : Décomposition des différentes composantes de l'hydrogramme de la Fontaine de Nîmes pour l'épisode de septembre 2005 42

Illustration 31 : schéma d'infiltration vers le drain karstique (la durée maximale et la contribution moyenne annuelle de chaque composante sont indiquées entre parenthèses) 44

Illustration 32 : piézométrie mesurée sur le réseau spatial le 27 octobre 2005 48

Illustration 33 : liste des points équipés d'un orphimède pour la surveillance en continu des niveaux d'eau 49

Illustration 34 : caractéristiques des points équipés d'un orphimède pour la surveillance en continu des niveaux d'eau 51

Illustration 35 : piézométries minimale, moyenne et maximale enregistrées sur les 52

Illustration 36 : caractéristiques de la saturation du karst lors de la crue de septembre 2005 (* temps mesuré depuis le début de la pluie) 53

Illustration 37 : évolution des niveaux d'eau aux piézomètres Provence, Ponge, Mas de Bruxelles (axe vertical de gauche) et aux piézomètres Moulin Daumier, Tomporski et Guigue (axe vertical de droite) lors de la crue de septembre 2005. L'altitude du sol est indiquée par un trait horizontal à tous les points sauf Mas de Bruxelles.. 53

Illustration 38 : évolution des niveaux d'eau aux piézomètres Provence, Ponge, Mas de Bruxelles (axe de gauche) et aux piézomètres Moulin Daumier, Tomporski et Guigue (axe de droite) lors des pluies de novembre 2005. L'altitude du sol est indiquée par un trait horizontal à tous les points sauf Mas de Bruxelles. 54

Illustration 39 : effet de la pluie (42 mm) du 1er novembre 2005 (* depuis le début de la pluie le 31/10 à 22 :00) 55

Illustration 40 : effet des pluies d'octobre et novembre 2004 55

Illustration 41 : évolution des niveaux d'eau aux piézomètres Provence, Ponge, Mas de Bruxelles (axe de gauche) et aux piézomètres Moulin Daumier, Tomporski et Guigue (axe de droite) lors des pluies d'octobre-novembre 2004. L'altitude du sol est indiquée par un trait horizontal à tous les points sauf Mas de Bruxelles 56

Illustration 42 : niveaux d'eau dans les piézomètres situés sur le drain karstique durant la crue de septembre 2005 57

Illustration 43 : pondération de la pluie horaire et auto-corrélogrammes des points d'eau mesurés 58

Illustration 44 : corrélogrammes croisés pluie – niveau d'eau (pas de temps : 3 h) 59

Illustration 45 : corrélogramme croisé Mazauric – Maison Carrée (pas de temps : 3 heures) 61

Illustration 46 : Réponse impulsionnelle au point Mas de Provence 62

Illustration 47 : Comparaison des niveaux observés et simulés à Mas de Provence (ligne noire : niveau du sol) 62

Illustration 48 : niveaux d'eau dans les piézomètres du cadereau d'Alès lors de l'épisode de crue de septembre 2005 (l'altitude de surface de certains boulidous est indiquée par des traits horizontaux) 64

Illustration 49 : Localisation des principales venues d'eau au niveau de la Gaffone (puits et diaclase) lors de l'épisode de septembre 2005 (photographie prise par G Jouanen) 65

Illustration 50 : Schéma de fonctionnement du système de résurgences de la Gaffone (modifié d'après J.C. Currens) 66

Illustration 51 : Niveau d'eau simulé à Provence par rapport au sol et déclenchement d'alerte pour un cumul de pluie sur les 25 jours précédents supérieur à 145 mm 67

Illustration 52 : Simulations du débordement du karst au point Mas de Provence pour les principaux évènements pluvieux entre 1998 et 2005 68

Illustration 53 : simulation de l'effet d'épisodes de pluie d'un jour sur le débordement du karst à Mas de Provence en fonction de son état initial (sec : niveau à 3,37 m sous le niveau du sol, moyennes eaux : niveau à 2,13 m, hautes eaux : niveau à 0,42 m) 69

Illustration 54 : Répartition des points de mesure 1999 – 2001 - 2005 71

Illustration 55 : Géologie et perméabilité 72

Illustration 56 : Perméabilité obtenues en 2005 en mm/heure 73

Illustration 57 : Perméabilité obtenues en 2001-2005 en mm/heure en fonction des formations géologiques 74

Illustration 58 : Perméabilité obtenues en 2001-2005 en mm/heure (occupation du sol) 74

Illustration 59 : Classification SPOT (août 1998) 75

Illustration 60 : Base de données sols 76

Illustration 61: Profondeur des sols 79

Illustration 62 : Synthèse de la perméabilité 80

Illustration 63 : Localisation des points de mesures complémentaires pour l'étude hydrochimique 82

Illustration 64 : Représentation des points d'eau souterraine du système karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}Sr/^{86}Sr$ vs 1/Sr. 84

Illustration 65 : Représentation des points d'eau souterraine du système karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}Sr/^{86}Sr$ vs Cl/Sr. 85

Illustration 66 : Représentation des points d'eau souterraine du système karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}Sr/^{86}Sr$ vs Ca/Sr. 85

Illustration 67 : Evolution temporelle des teneurs en oxygène 18 des eaux de pluies et des eaux de la Fontaine de Nîmes au cours de l'épisode de crue du 06/09/05. Les évolutions de la pluviométrie de Nîmes Courbessac (Météo France) et du niveau piézométrique da l'aven Mazauric sont également reportées. 86

Illustration 68 : Evolution des teneurs isotopiques en strontium et des teneurs en oxygène 18 des eaux de la Fontaine de Nîmes au cours de l'épisode de crue du 06/09/05. 87

Illustration 69 : Evolution temporelle des débits mesurés à la fontaine de Nîmes et au cadereau d'Alès (Maison Robert) en fonction de la pluviométrie (Pluie horaire de la station météo France de Courbessac). Le report des dates de prélèvement des points d'eau de surface (cadereaux d'Alès et d'Uzès) et de la Fontaine de Nîmes et du point « Eau bouillie » sont présentées. 89

Illustration 70 : Evolution temporelle des débits mesurés à la Fontaine de Nîmes et au cadereau d'Alès (Maison Robert) et des concentrations en bicarbonate (HCO3) et en strontium (Sr) mesurées dans les eaux. 90

Illustration 71 : Evolution temporelle des débits mesurés à la fontaine de Nîmes et au cadereau d'Alès (Maison Robert) et des concentrations en Bore (B) et en calcium (Ca) mesurées dans les eaux. 91

Illustration 72 : Evolution temporelle des débits mesurés à la fontaine de Nîmes et au cadereau d'Alès (Maison Robert) et des concentrations en chlorure (Cl) et en nitrate (NO3) mesurées dans les eaux. 91

Illustration 73 : Représentation des points d'eau souterraine et de surface du système karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}Sr/^{86}Sr$ vs 1/Sr. 93

Illustration 74 : Signature géochimique des eaux de surface et souterraine du système karstique de Nîmes le 09/09/05 vers 12h00 dans un diagramme $^{87}Sr/^{86}Sr$ vs B/Sr. 94

Illustration 75 : Signature géochimique des eaux de surface du système karstique de Nîmes lors des crues du mois de septembre 2005 dans un diagramme $^{87}Sr/^{86}Sr$ vs B/Sr. 95

Illustration 76 : Débits du cadereau d'Alès à Espesses et au Pont des 9 Arcades en septembre 2005 96

Illustration 77 : Modèle conceptuel du fonctionnement du karst de Nîmes 101

Liste des annexes

Annexe 1 Carte du réseau de surveillance des eaux souterraines (orphimèdes) 111

1. Introduction

Dans le cadre de l'axe KARST du projet cadre de recherche EAUR15 COMPLEX'AQUI du BRGM 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 des modules 1 et 2, un bilan de l'état des connaissances a été effectué au sein d'une synthèse bibliographique – rapport RP-53422-FR (Maréchal, Petit et al. 2004) ainsi qu'une première description du modèle conceptuel du système karstique – rapport RP-53827-FR (Maréchal, Ladouche et al. 2005).

Le présent rapport, clôturant le module 2, complète le modèle conceptuel et précise le fonctionnement du système en période de crue grâce au suivi de l'hydrochimie durant la crue de septembre 2005 et à l'interprétation des mesures du réseau de suivi des eaux souterraines. Il comprend :

- la mise à jour de la courbe de tarage du débit de la Fontaine grâce aux nouvelles données de basses eaux acquises durant l'été 2005 ;
- la réinterprétation de l'analyse du fonctionnement du système karstique grâce à ces nouveaux débits ;
- l'interprétation des données piézométriques du réseau de suivi des eaux souterraines ;
- l'interprétation des données hydrochimiques complémentaires acquises notamment au cours des épisodes de crue de novembre 2004 et septembre 2005 ;
- la caractérisation de l'infiltration (délivrable D27) ;
- une synthèse des données.

2. Débits de la Fontaine de Nîmes

2.1. INTRODUCTION

L'équipement installé dans les canaux pour mesurer le débit de la Fontaine a été décrit dans le précédent rapport (Maréchal, Ladouche et al. 2005).

2.2. TARAGE DE LA SOURCE

2.2.1. Courbe de tarage

Depuis la première série de mesures utilisées pour établir la première courbe de tarage (Maréchal, Ladouche et al. 2005), de nouvelles mesures ont été acquises entre le 17 décembre 2004 et novembre 2005. Elles permettent de compléter la gamme de hauteurs d'eau et de débits de la courbe de tarage dans :

- les bas débits grâce aux données de l'étiage d'été 2005 ;
- les hauts débits grâce aux données de l'épisode de septembre 2005.

La nouvelle courbe piézométrie – débit (Illustration 1) met en évidence un changement de la relation piézométrie – débit suite à l'épisode de crue de septembre 2005. Sur le graphe, on retrouve la courbe de tarage complexe d'avant septembre 2005 et décrite dans le précédent rapport (Maréchal, Ladouche et al. 2005), mais également une relation quasi-linéaire qui se met en place après septembre 2005. Ceci signifie qu'à niveau égal à l'Aven Mazauric, les débits qui s'écoulent à la Fontaine sont inférieurs depuis septembre 2005. Ceci résulterait, durant la crue de septembre 2005, d'un colmatage partiel de l'exutoire de la Vasque au profit d'autres exutoires.

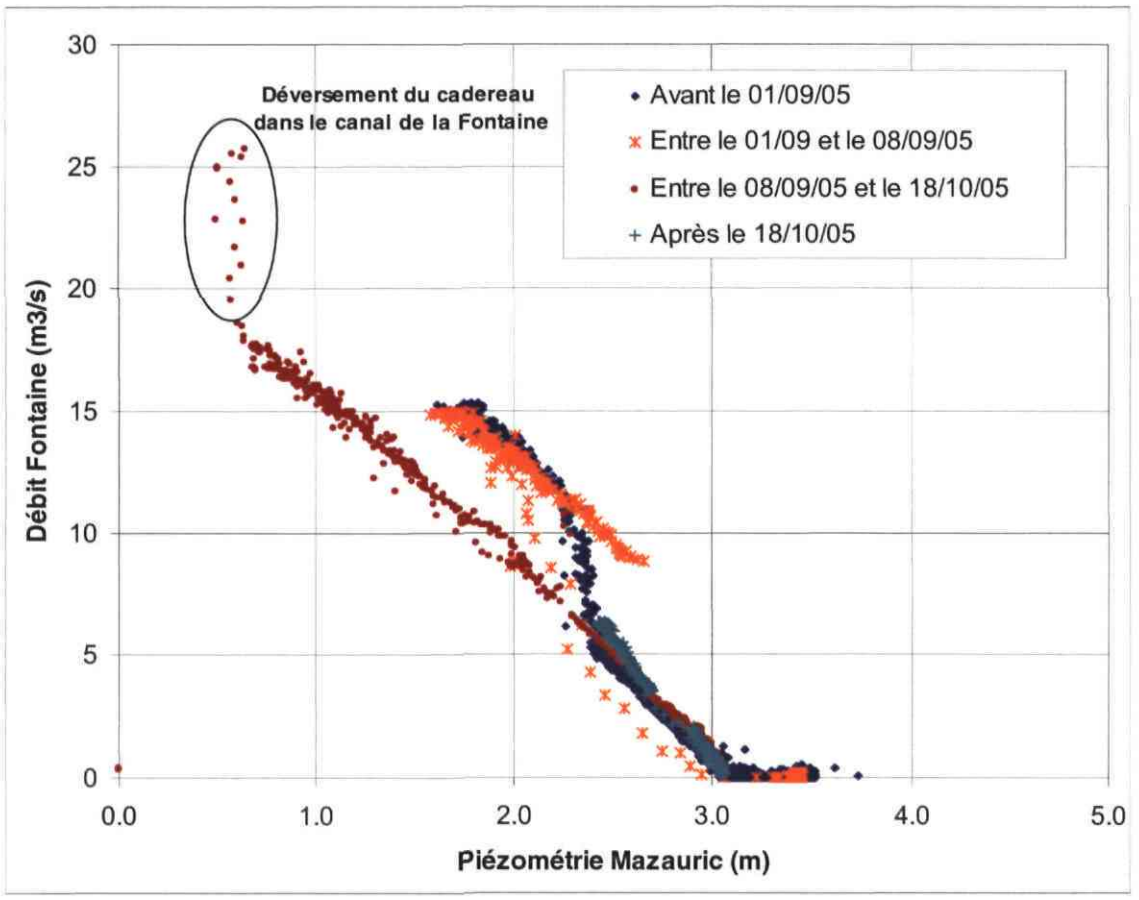


Illustration 1 : Relation piézométrie Mazauric – débit Fontaine observée entre le 27 octobre 2004 et novembre 2005

Sur l'Illustration 1, on constate également une très forte augmentation des débits en hautes eaux pour H < 0,64. Cette augmentation est probablement liée au déversement des eaux du cadereau en crue dans le canal de la Fontaine tel qu'observé par les riverains durant cet épisode et déjà photographié en septembre 2002 (Illustration 2).

Illustration 2 : Déversement du cadereau en crue dans le canal de la Fontaine durant la crue de septembre 2002 (photo : G. Jouanen, Association Fontaine de Nîmes)

Deux courbes de tarage sont en conséquence utilisées. Elles sont décrites ci-dessous (Illustration 3 et Illustration 4). La nouvelle courbe de tarage avant septembre 2005 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 (Illustration 3). Les fonctions analytiques employées sont énumérées, pour chaque tronçon, à l'Illustration 3.

Tronçon	Fonction analytique	Coefficient de régression
$H > 3.055$	$Q = 3 \times 10^{8} \times H^{-19,14}$	-
$2,425 < H < 3,055$	$Q = -8,26 \times H + 25,4$	$R^2 = 0,99$
$2,255 < H < 2,425$	$Q = -32,5 \times H + 84,2$	-
$H < 2,255$	$Q = -3,35 \times H^2 + 6,39 \times H + 13,73$	$R^2 = 0,86$

Illustration 3 : Relations analytiques de l'ajustement de la courbe de tarage avant septembre 2005

La seconde courbe de tarage, valable après septembre 2005, peut être subdivisée en deux 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 (Illustration 1). Les fonctions analytiques employées sont énumérées, pour chaque tronçon, à l'Illustration 4. La relation en basses eaux (H > 3,055) est inconnue suite à l'absence de mesures dans de telles conditions ainsi qu'à très hautes eaux (H < 0,64) car les observations disponibles sont perturbées par le déversement du cadereau dans le canal de la Fontaine.

Tronçon	Fonction analytique	Coefficient de régression
H > 3.055	non déterminée	
1,75 m < H < 3,055	$Q = -1.71 \times H^2 + 0.31 \times H + 15.36$	$R^2 = 0.99$
0,64<H<1,75	$Q = -6.38 \times H + 22.04$	$R^2 = 0.96$
H < 0,64	non déterminée	

Illustration 4 : Relations analytiques de l'ajustement de la courbe de tarage après septembre 2005

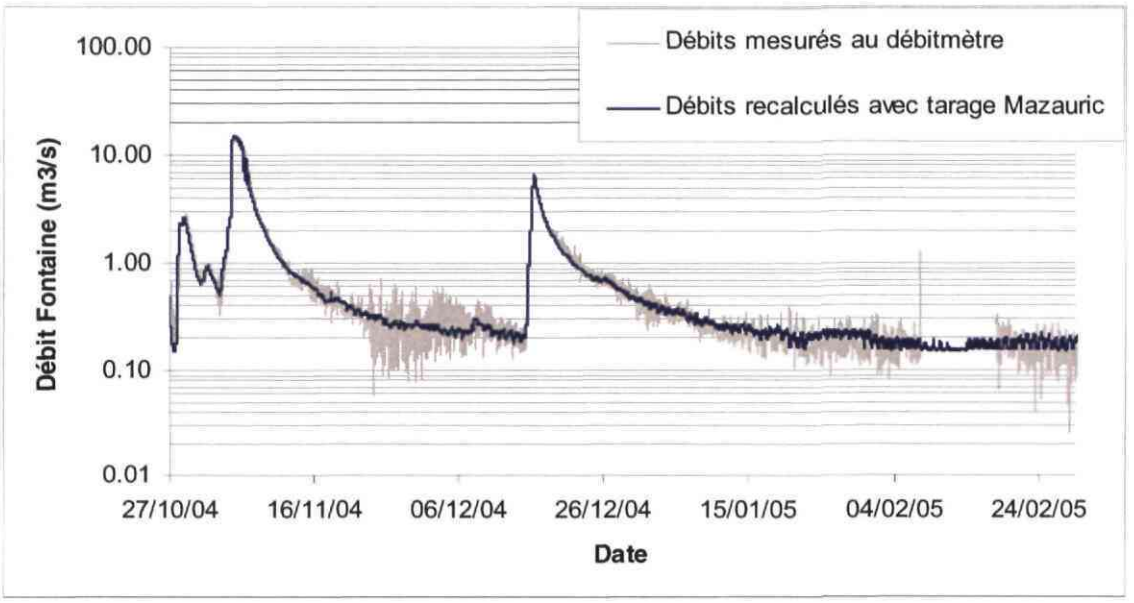


Illustration 5 : Comparaison entre les débits de la Fontaine mesurés au débitmètre et les débits recalculés à partir de la piézométrie à Mazauric et de la courbe de tarage

En utilisant les relations analytiques mentionnées ci-dessus, le débit de la Fontaine a été recalculé à partir de la piézométrie à Mazauric (Illustration 5). 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.

2.3. CHRONIQUES DE DEBITS

Grâce à la courbe de tarage obtenue et aux mesures de piézométrie à l'Aven Mazauric depuis 1999, il est possible de reconstituer les débits de la Fontaine depuis cette époque (Illustration 6).

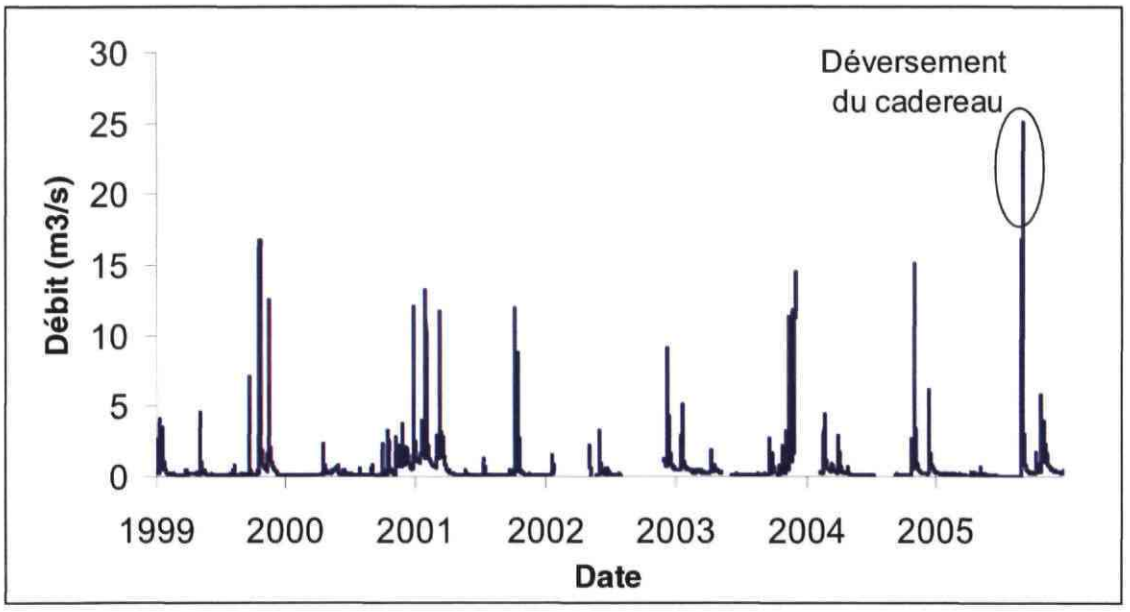


Illustration 6 : Débits observés à la Fontaine de Nîmes depuis 1999

Les débits varient entre environ 10 l/s en période d'étiage, généralement durant l'été, et environ 17 m^3/s, valeur maximale observée en octobre 1999 et le 8 septembre 2005 avant que les eaux de surface du cadereau ne perturbent les mesures. Ces valeurs sont en accord avec les premiers jaugeages effectués sur la Fontaine (Fabre and Guyot 1984). Ceux-ci, effectués au micromoulinet en 1979, oscillaient entre 0,068 et 11,2 m^3/s.

Durant l'année 2005, le volume d'eau annuel écoulé à la Fontaine est d'environ 15,5 millions de m^3, soit un débit moyen de 0,49 m^3/s.

Des évènements dont l'amplitude est comprise entre 10 et 15 m^3/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 8 septembre 2005 ($Q_{max} \approx 17$ m^3/s au moment où le cadereau se déverse dans le canal de la Fontaine) ;
- la crue du 4 novembre 2004 ($Q_{max} \approx 15$ m^3/s) ;
- la crue de décembre 2003 ($Q_{max} \approx 14,5$ m^3/s au moment où la sonde piézométrique est tombée en panne, voir Illustration 7).

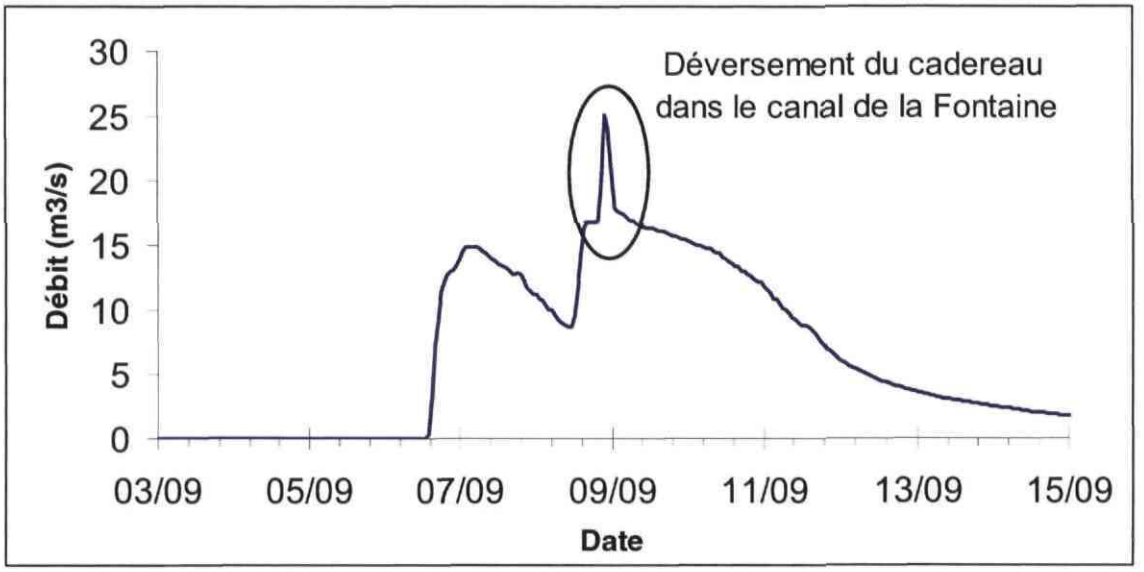


Illustration 7 : Débit mesuré au débitmètre dans le canal de la Fontaine durant la crue de septembre 2005

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

3.1. ANALYSE DES DEBITS CLASSES

L'analyse des débits classés calculés avec la nouvelle courbe de tarage confirme les résultats mis précédemment en évidence (Maréchal, Ladouche et al. 2005).

Sur l'Illustration 8, deux ruptures ont été identifiées pour des valeurs de débit proche de 0,2 m^3/s (1ère rupture) et pour des débits proches de 12 à 13 m^3/s (2nde 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 12 - 13 m^3/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>13 m^3/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 0,2 m^3/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'entrée (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 0,2 m^3/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 m^3/s. Les formations du Quaternaire au contact avec les calcaires dans la zone d'émergence des sources jouent un rôle 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 0,2 m^3/s mesuré à la Fontaine). La source de la Fontaine de Nîmes apparaît comme une source de trop plein du système karstique.
- Lorsque le débit excède 13 m^3/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 étayée par les observations de résurgences temporaires, appelées « boulidous », se mettant à fonctionner en période de crue (§ 4.4). Parmi celles-ci, on citera le Puits de la Gaffone en lien direct avec le réseau de drains karstiques de la Fontaine. Son fonctionnement est décrit au § 4.4.1 ci-dessous.

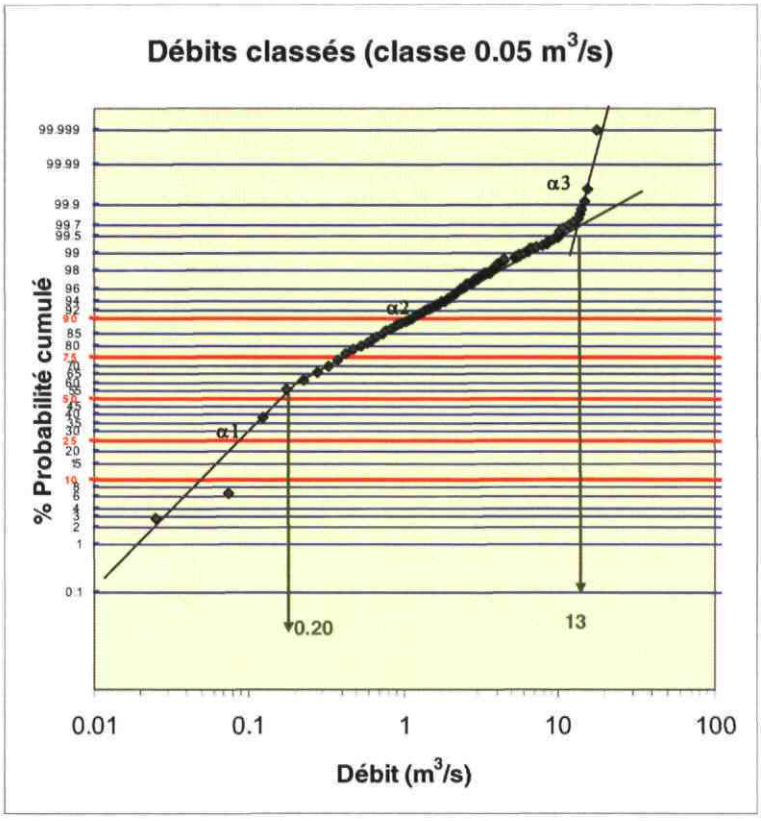


Illustration 8 : Débits classés de la Fontaine de Nîmes sur l'ensemble des données de la période 1998-2005, (classes de débit de 0,05 m³/s)

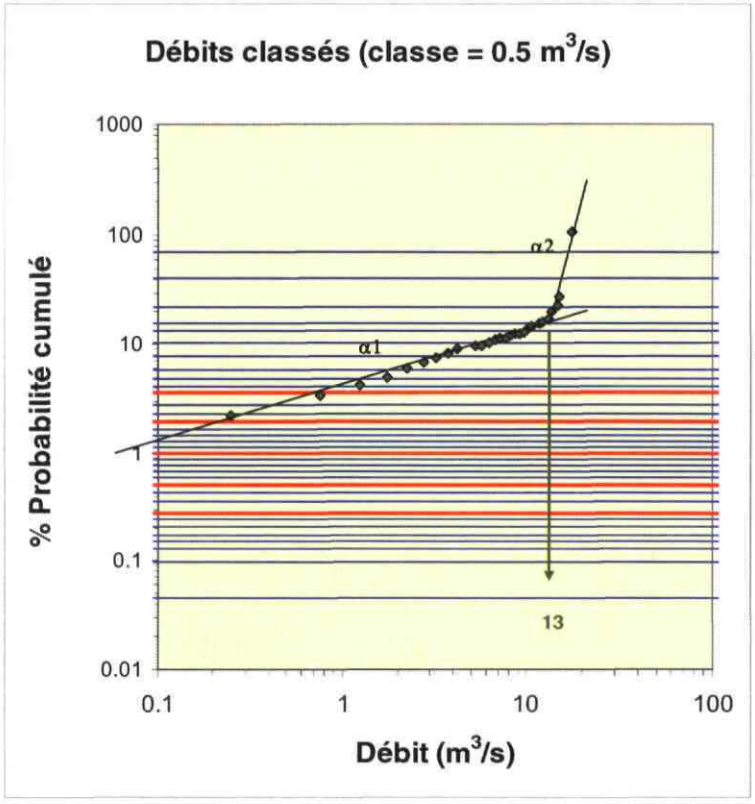


Illustration 9 : Débits classés de la Fontaine de Nîmes sur l'ensemble des données de la période 1998-2005 (classes de débit de 0,5 m³/s)

3.2. ANALYSE DES COURBES DE RECESSION

3.2.1 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 :

- la décrue, durant laquelle l'infiltration par les pluies efficace influence la vidange du réservoir de la zone noyée,
- le tarissement non influencée par les précipitations, qui débute à l'instant où les débits d'infiltration de pluie efficace deviennent nuls, 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 initialement proposé par Mangin 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 10) :

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

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 :

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

avec α coefficient de tarissement. Le débit Q_{Ro} 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 :

$$\psi(t) = q_o \frac{1-\eta t}{1-\varepsilon t} \qquad (7)$$

avec q_o: débit d'infiltration à l'instant t_o 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 (ti).

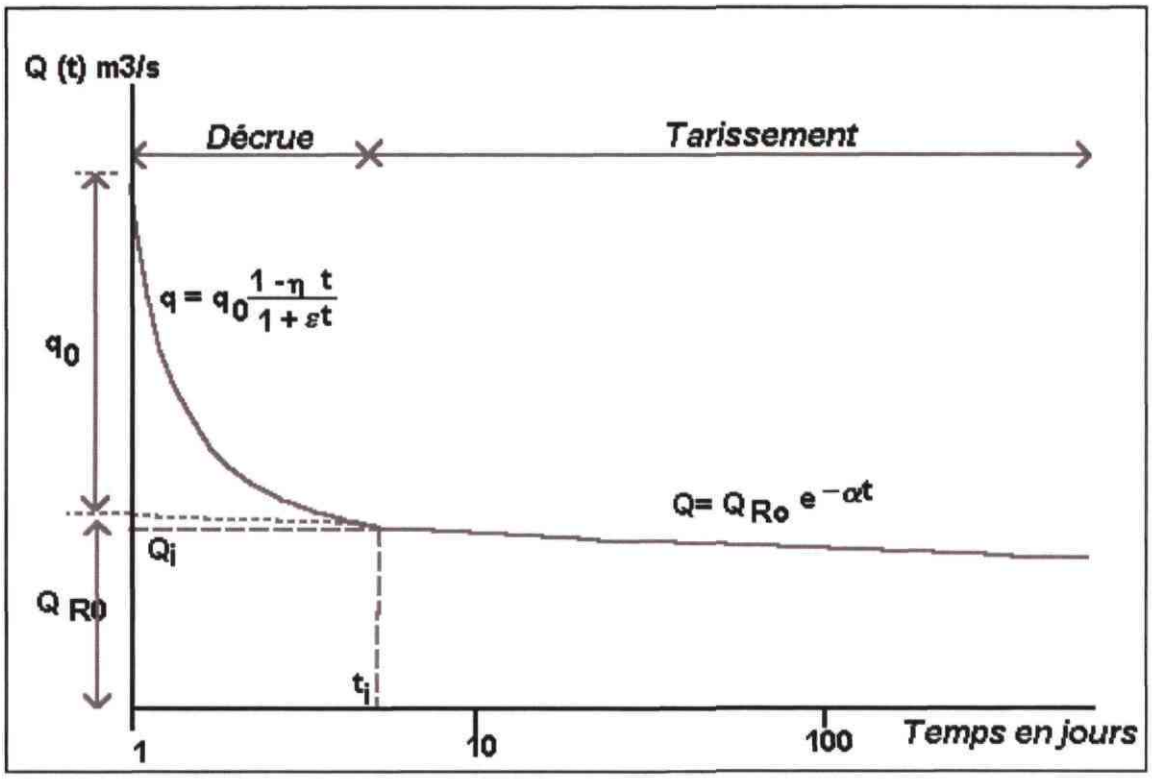


Illustration 10 : Décomposition de la récession selon la méthode de Mangin (1970).

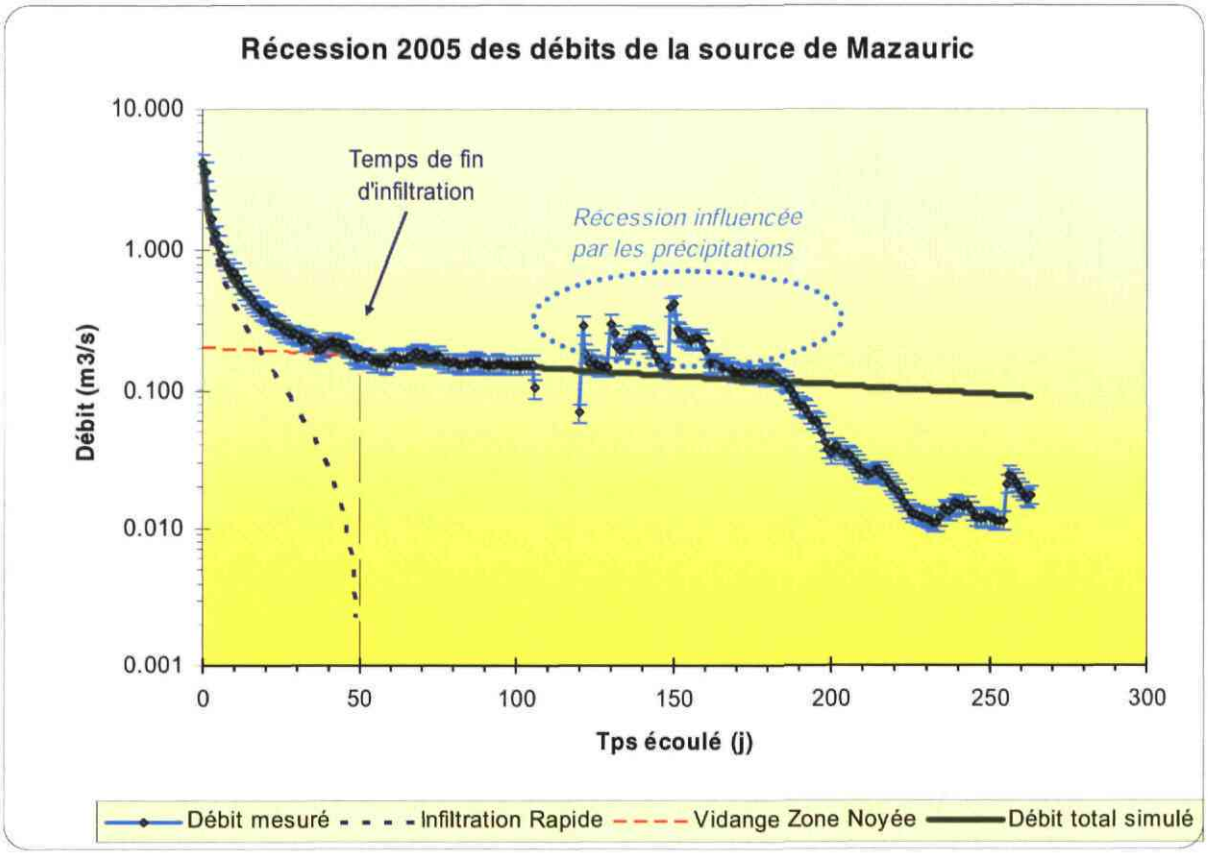


Illustration 11 : Décomposition de la récession 2005 selon la méthode de Mangin (1970).

La méthode de Mangin permet de décrire assez fidèlement les évolutions des débits de la Fontaine de Nîmes lorsque les récessions sont de durée « classiques », de l'ordre de 3 mois (Maréchal, Ladouche et al. 2005), mais s'avère non appropriée pour décrire le fonctionnement du système dans un contexte hydrologique de très basses eaux comme celui observé lors du cycle 2004-2005. Pour ce cycle hydrologique particulièrement déficitaire en précipitation, la récession a durée plus de 250 jours (Illustration 11).

Pour décrire la récession du cycle hydrologique 2004-2004, il nous est apparu judicieux de prendre en compte de manière différenciée les dynamiques d'écoulements au sein de la zone d'infiltration a savoir l'infiltration rapide et infiltration lente.

Deux fonctions homographiques distinctes ψ_1 (t) et ψ_2 (t) ont été utilisées pour décrire l'infiltration rapide et l'infiltration lente où retardée :

Infiltration rapide : $\psi_1(t) = q_{o1}\frac{1-\eta_1 t}{1-\varepsilon_1 t}$ (8)

Infiltration lente (ou retardée) : $\psi_2(t) = q_{o2}\frac{1-\eta_2 t}{1-\varepsilon_2 t}$ (9)

La vidange de la zone noyée de l'aquifère est toujours décrite à l'aide du modèle de Maillet.

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 des débits observée.

3.2.2 Analyse des courbes de récession de la Fontaine de Nîmes par la nouvelle approche développée.

Nous présentons (Illustration 13) les résultats des traitements mathématiques réalisés pour la récession du cycle hydrologique 2004-2005. Les cycles hydrologiques précédents ont été réinterprétés, les résultats sont présentés de manière synthétique au tableau de l'Illustration 12. La méthode utilisée est celle décrite dans le paragraphe précédent.

Un exemple d'ajustement pour le cycle 2004-2005 est présenté graphiquement (Illustration 13). Le critère d'ajustement de la simulation (critère de Nash = 0.91) est jugé très bon ce qui permet une exploitation des résultats obtenus.

Le temps de fin d'infiltration de l'infiltration rapide, moyennement court (30 jours) et la vitesse moyennes d'infiltration, relativement élevée (0.033) indiquent qu'une partie des eaux de pluie infiltrées rejoint rapidement la zone noyée du système via un réseau de fissure connecté à la zone d'infiltration (épikarst). En termes de flux, la composante rapide de l'infiltration pour cette récession représente 40 % (1.33 million de m^3) du volume total de l'infiltration par les pluies efficaces (3.28 millions de m^3). Notons également que l'infiltration rapide contribue majoritairement (80%, soit pour 1.2 m^3/s) au débit total (1.45 m^3/s) de la source 3 jours après le début de la récession.

Une grande part de l'infiltration par les pluies efficaces apparaît assurée par l'infiltration lente (ou retardée) au travers d'un réseau de fissures mal connectées à la zone noyée du système Le volume d'eau associé à la composante lente de la recharge par les pluies efficaces représente 1.95 million de m^3, soit environ 60% du volume d'infiltration. Le temps de fin d'infiltration de la composante lente se situe vers 225 jours, mais la contribution relative commence à devenir très faible (< 20 l/s) entre 190 et 210 jours après le début de la

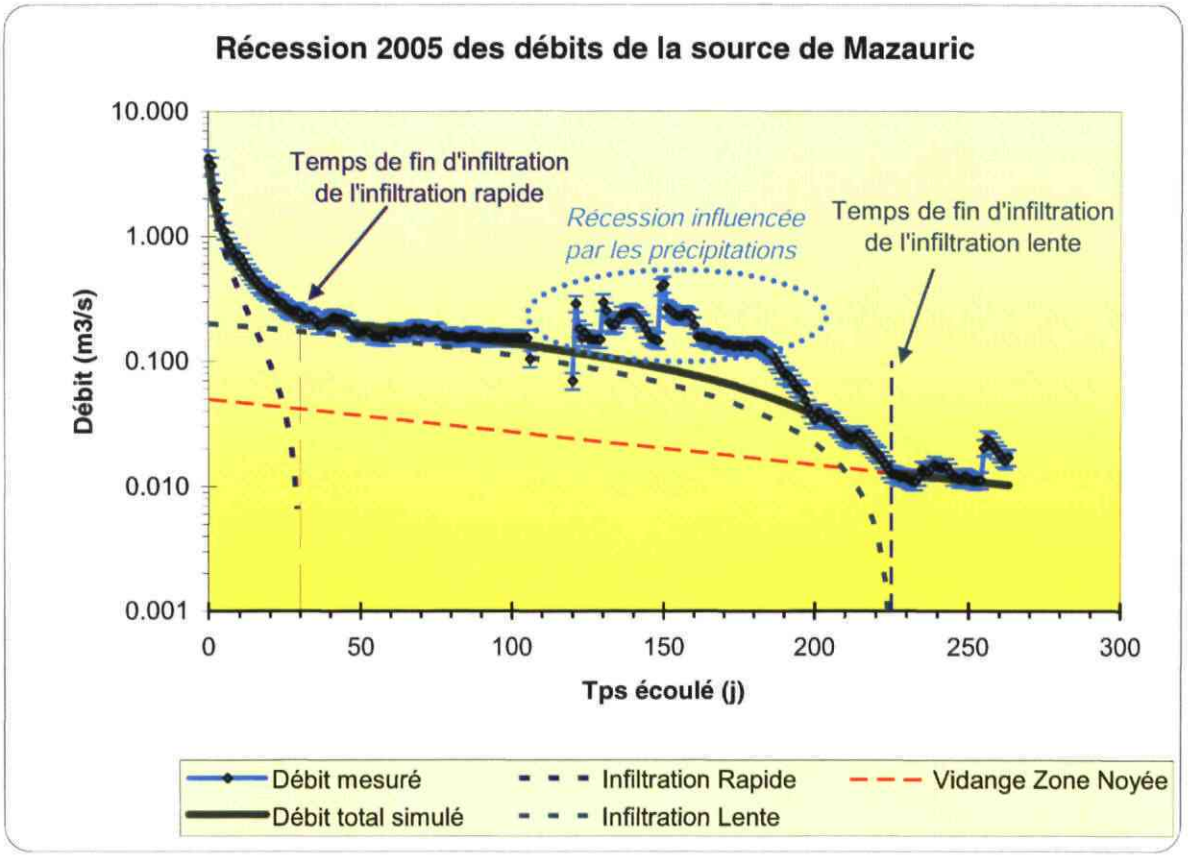
récession. La vitesse d'infiltration moyenne de la composante lente de l'infiltration par les pluies efficaces apparaît donc très faible (0.004).

Le coefficient de tarissement (α) apparaît également très faible (0.006) ce qui indique que la zone noyée du système se vidange lentement. La valeur du volume dynamique (assimilable au réserve du système) apparaît faible (0.72 millions de m^3) au regard du volume moyen interannuel (17 millions de m^3) calculé en considérant un débit moyen de 540 l/s. Le pouvoir régulateur du système défini par Mangin est très faible (0.04), autrement dit, le système n'est pas en mesure d'accumuler de grande quantité réserves au sein de sa zone noyée. Ces derniers résultats suggèrent que le degré de karstification est peu important et que développement de celle-ci en profondeur est de faible importance ; le système karstique de la Fontaine de Nîmes ne posséderait pas un réseau karstique de conduits très développé.

En résumé, la zone d'infiltration du système karstique de la Fontaine de Nîmes pris dans sa globalité apparaît relativement bien connectée d'un point de vue hydraulique à la zone noyée. Cela se traduit par des crues importantes. La part de l'infiltration rapide est prédominante dans les premiers jours qui suivent le pic de crue (80 % à t+3j) ce qui d'un point de vue conceptuel indique que la zone épikarstique située sous la surface du sol est rapidement drainée par des réseaux de fissures verticales connectées au réseau de drains karstiques de la zone noyée. En termes de flux, l'infiltration rapide représente 40 % du volume total d'infiltration par les pluies efficaces. L'infiltration lente ou retardée contribue donc de manière notable au fonctionnement du système de la Fontaine de Nîmes et de manière importante lorsque l'infiltration rapide cesse. En exemple, pour la récession 2005, le débit d'infiltration lente contribue pour 80% à l'écoulement total 30 jours après le pic de crue, la part de l'écoulement issue de la vidange de la zone noyée étant très faible (20 %). La durée de l'infiltration lente est importante (225 jours) ce qui suggère que les eaux sont difficilement sollicitées par le système karstique. D'un point de vue conceptuel, l'infiltration lente peut être rattachée aux eaux d'infiltration transitant par les blocs calcaires et systèmes annexes au drainage.

Début Recession	18/03/01	25/01/03	03/04/04	16/12/04		
Fin Recession	22/09/01	07/09/03	13/10/04	05/09/05	*Moyenne*	*2sigma*
Coef d'hétérogénéité d'écoulement rapide	0.300	1.200	0.500	0.650	***0.66***	***0.39***
Tps de fin d'infiltration rapide (en jour)	28	35	30	30	***30.8***	***3.0***
Débit d'infiltration (à t=0) en m3/s	2.530	3.941	2.061	3.954	***3.1***	***1.0***
Coef d'hétérogénéité d'écoulement lent	0.001	0.0001	0.003	0.00001	***0.0010***	***0.0014***
Tps de fin d'infiltration Lent (en jour)	225	175	200	225	***206***	***24***
qo_2 (débit d'infiltration à t=0) en m3/s	0.13	0.28	0.1	0.2	***0.178***	***0.080***
Coef tarissement Zone Noyée	0.0030	0.0030	0.0040	0.0060	***0.004***	***0.0014***
Qo Zone noyée (m3/s)	0.070	0.120	0.080	0.050	***0.08***	***0.029***
Critère de Nash (qualité de la simulation)	90.002	76.386	84.902	91.602		
vitesse moyenne d'infiltration rapide	0.036	0.029	0.033	0.033	***0.033***	***0.003***
vitesse moyenne d'infiltration lente	0.004	0.006	0.005	0.004	***0.005***	***0.001***
Parametre i1 (retard à l'infiltration rapide)	0.58	0.28	0.47	0.41	***0.43***	***0.13***
Volume d'infiltration rapide (million de m3)	1.21	1.01	0.79	1.33	***1.09***	***0.24***
Volume d'infiltration lente (million de m3)	1.16	2.12	0.73	1.95	***1.49***	***0.65***
Volume dynamique (million de m3)	2.02	3.46	1.73	0.72	***1.98***	***1.13***
Pouvoir régulateur K	0.119	0.203	0.102	0.042	***0.12***	***0.07***

Illustration 12 : Synthèse des paramètres des récessions étudiées à l'aide de la formulation modifiée de Mangin



Début Recession	16/12/04
Fin Recession	05/09/05
Coef d'hétérogénéité d'écoulement rapide	0.650
Tps de fin d'infiltration rapide (en jour)	30
Débit d'infiltration (à t=0) en m3/s	3.95
Coef d'hétérogénéité d'écoulement lent	0.00001
Tps de fin d'infiltration Lent (en jour)	225
qo_2 (débit d'infiltration à t=0) en m3/s	0.2
Coef tarissement Zone Noyée	0.006
Qo Zone noyée (m3/s)	0.050

vitesse moyenne d'infiltration rapide	0.033
vitesse moyenne d'infiltration lente	0.004
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.41
Critère de Nash (qualité de la simulation)	91.60
Volume d'infiltration rapide (million de m3)	1.33
Volume d'infiltration lente (million de m3)	1.95
Volume dynamique (million de m3)	0.72

Illustration 13 : Décomposition de la récession 2005 selon la méthode modifiée de Mangin.

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

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

Le lecteur se réfèrera au précédent rapport (Maréchal, Ladouche et al. 2005) qui décrit l'objectif et la méthodologie employée. L'étude réalisée en 2005 a été réactualisée afin d'intégrer les informations complémentaires du cycle hydrologique 2005.

La chronique de pluie utilisée pour la réactualisation des résultats de modélisation est légèrement différente de celle précédemment obtenue (Maréchal, Ladouche et al. 2005)[1] :

0,32*Courbessac + 0,43*Ponges+ 0,26*Rouvière (1)

Les périodes utilisées pour le calage du modèle de transfert sont les suivantes :

- 5/11/1998 au 16/ 1/2002 ;
- 15/02/2004 au 6/ 7/2004 ;
- 12/09/2004 au 26/12/2005.

Les résultats de la modélisation, à pas de temps journalier, sont présentés Illustration 14. Le modèle « non paramétrique » 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). Les valeurs obtenues sont comparables aux valeurs de 2005 bien que légèrement meilleures.

---

[1] En 2005, la fonction de pondération des précipitations était la suivante :

0,37*Courbessac + 0,34*Ponges+ 0,29*Rouvière

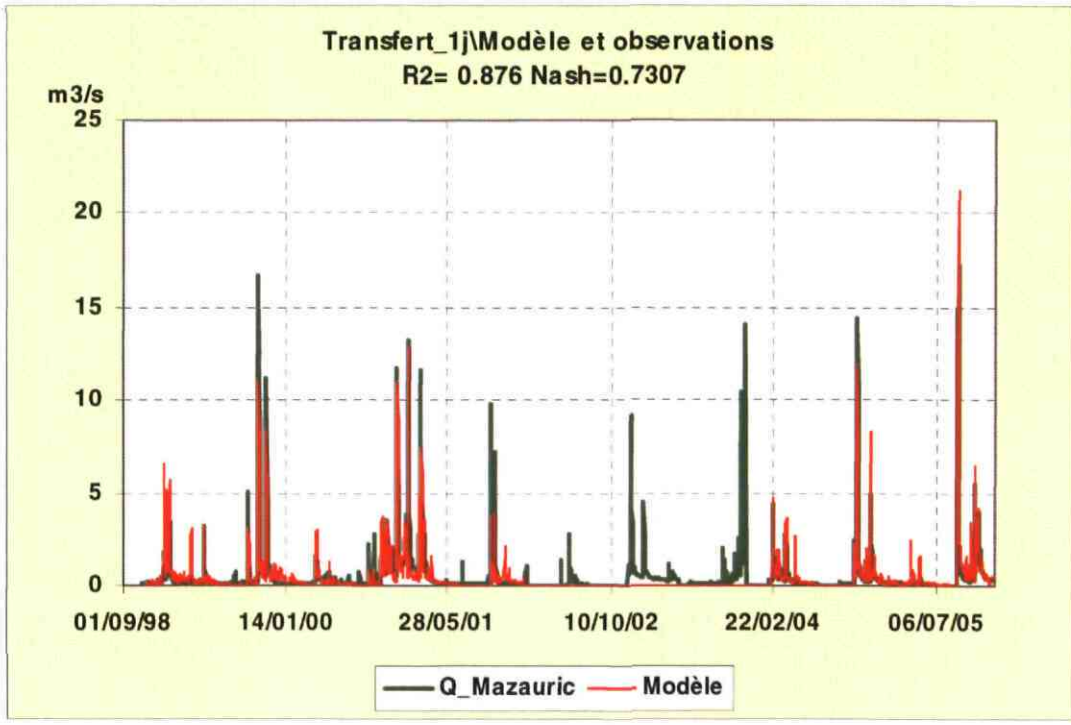


Illustration 14 : Comparaison du débit modélisé au débit estimé du système karstique de la Fontaine de Nîmes : 88 % de la variance totale expliquée

Le calcul des hydrogrammes unitaires indique, comme lors de la première étude, qu'il y a deux composantes (l'une rapide et l'autre lente). La composante rapide (écoulement non linéaire) pour le système karstique de la Fontaine de Nîmes intervient lors des crues importantes. Elle intervient dès le début des précipitations (décalage = 0 jour, (Illustration 15) et dure 4 jours environ (temps de transit moyen de l'écoulement rapide = 1,06 jour). Cette composante rapide n'intervient que pour les crues supérieures à 5 m^3/s. En terme de flux, l'écoulement rapide peut représenter jusqu'à 20 % de l'écoulement total, en général autour de 10%. 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. Pour le second épisode de crue de septembre 2005, l'écoulement rapide de type « effet de chasse » a contribué jusqu'à 1,4 m^3/s à l'écoulement de crue.

La réponse impulsionnelle de la composante lente (Illustration 15) montre un maximum prononcé le 1er jour après les pluies, puis décroît rapidement jusqu'à ce que le décalage atteigne 10 jours environ, puis faiblement de manière plus ou moins exponentielle pendant 30-40 jours environ. Ce comportement évoque la recharge, puis la vidange d'un réservoir alimenté par les précipitations. Le temps de transit moyen de l'écoulement lent = 19,18 jours, correspond en fait, au temps de fin d'infiltration de l'infiltration rapide par les pluies efficaces identifié sur la récession. Cette valeur de fin d'infiltration déterminée sur l'hydrogramme unitaire est à rapprocher des informations de l'analyse des courbes de récession : pour la récession de 2005, on a

précédemment montré que l'infiltration rapide, 20 jours après le pic de crue, contribue pour moins de 20 l/s au débit total de la source. Les résultats obtenus par les deux méthodes différentes apparaissent donc en bon accord.

Au-delà de 30-40 jours de décalage, l'effet de la pluie sur l'hydrogramme unitaire ne se fait plus sentir. Avec l'approche de modélisation Tempo, on n'est pas en mesure de distinguer la nature des écoulements contrairement à l'analyse des courbes de récession (différenciation entre écoulement lent ou retardé et vidange de la zone noyée) lorsque le décalage est supérieur à 30-40 jours.

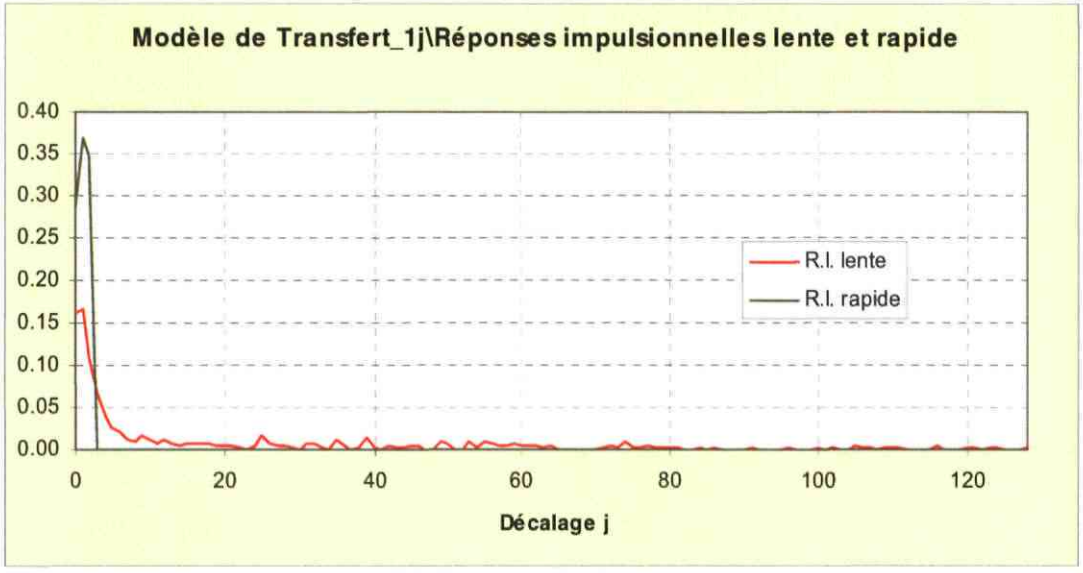


Illustration 15 : Calcul des hydrogrammes unitaires normalisés du système karstique de la Fontaine de Nîmes (R. I. : réponse impulsionnelle)

La caractérisation des réponses impulsionnelles du système (hydrogrammes unitaires) nous permet de reconstituer l'évolution passée du karst pour les épisodes pluvieux majeurs pour lesquels nous ne disposons pas d'informations.

A titre d'information, les débits journaliers des pics de crues simulés pour les épisodes des 06/09/05 et le 08/09/05 sont respectivement de 12,2 m^3/s (valeur observée = 14,9) et 21.2 m^3/s (valeur observée =17,2 m^3/s). L'estimation des débits de pointes de crue par le modèle de transfert apparaît donc entachée de 20 % d'erreur par rapport à la valeur de débit mesurée par le débitmètre installé dans le canal du jardin de la Fontaine.

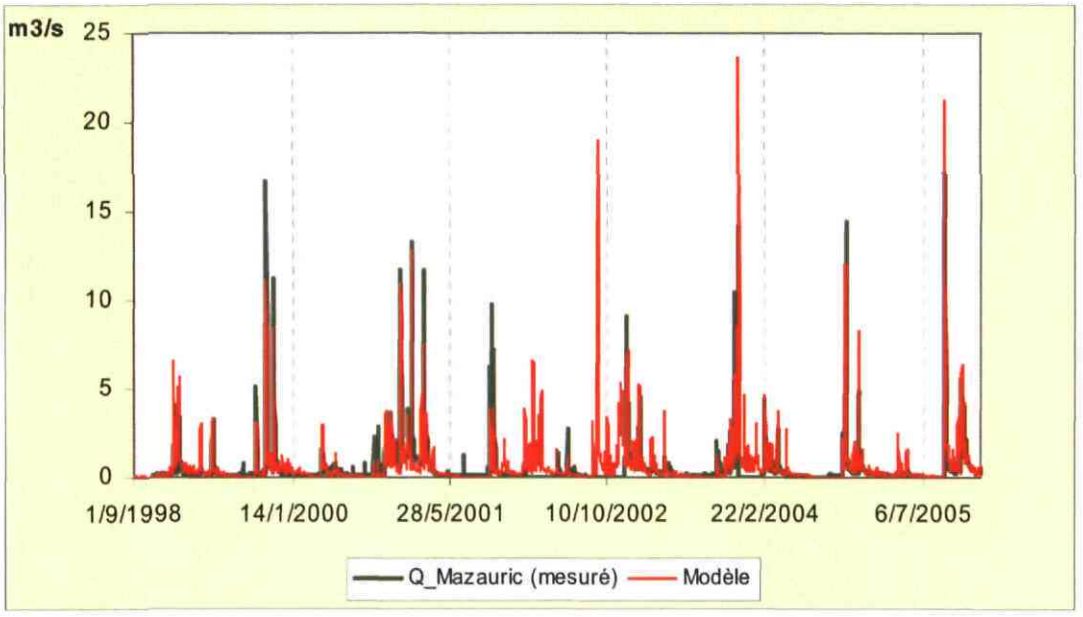


Illustration 16 : Simulation des débits de la Fontaine de Nîmes sur la période du 01/09/1998 au 31/12/05.

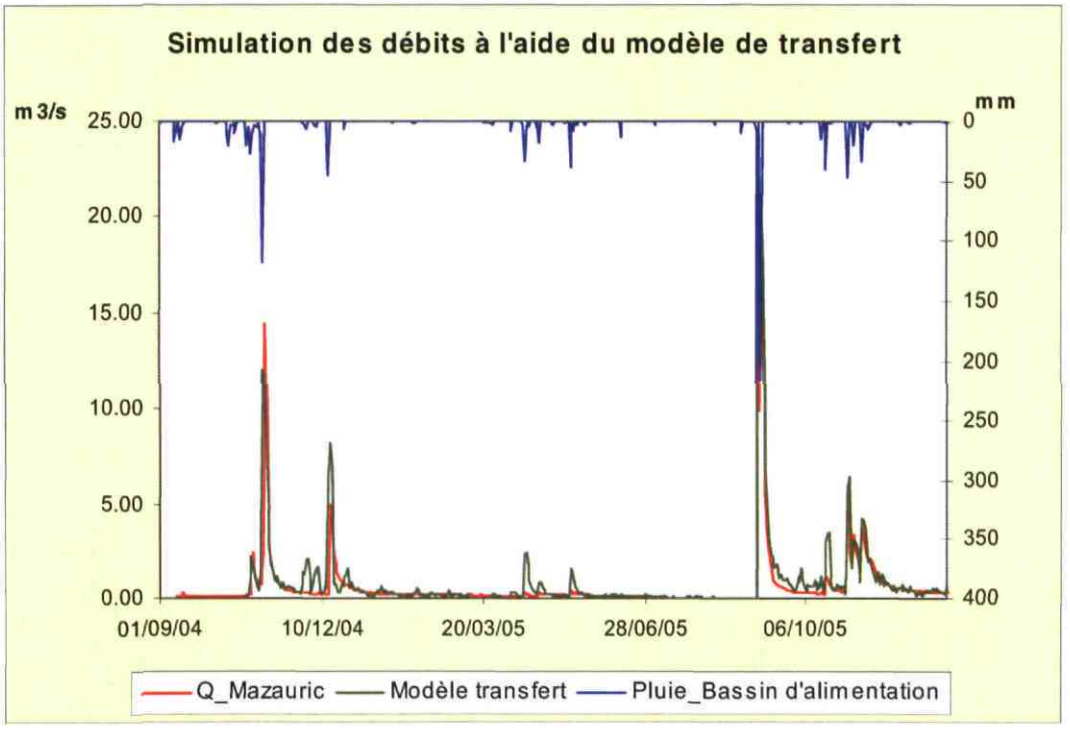


Illustration 17 : Simulation des débits de la Fontaine de Nîmes sur la période du 01/09/2004 au 31/12/05.

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

Les résultats des simulations avec le nouveau modèle 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 d'octobre 1998, le pic de crue qui s'est produit le 03 octobre 1998 est estimé à 18,9 ± 3,8 m^3/s (Illustration 18). Sur la période du 27/09/88 au 05/10/88, la contribution de la Fontaine de Nîmes au phénomène d'inondation a été estimée à 4,7 millions de m^3.

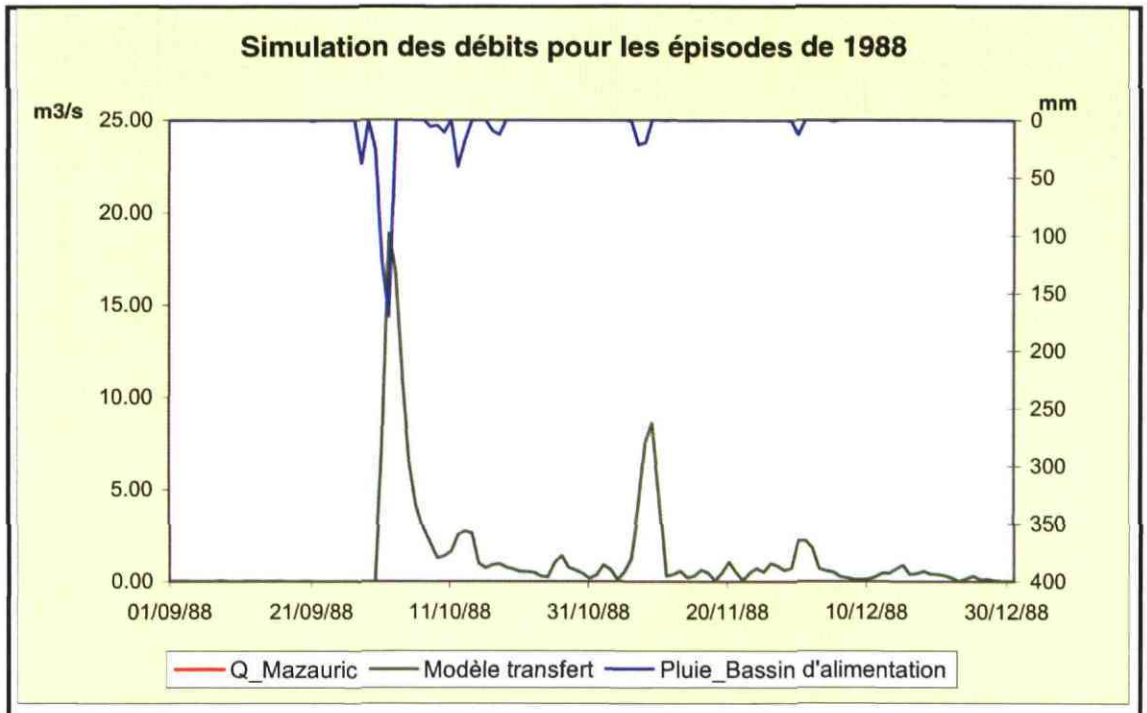
Pour l'épisode de septembre 2002, le pic de crue qui s'est produit le 09 septembre 2002 est estimé à 18,9 ± 3,8 m^3/s (Illustration 19). Sur la période du 07/09/02 au 14/09/02, la contribution de la Fontaine de Nîmes au phénomène d'inondation a été estimée à 5,7 millions de m^3.

Pour l'épisode de décembre 2003, le pic de crue qui s'est produit le 02 décembre 2003 est estimé à 23,7 ± 4,7 m^3/s (Illustration 20). Sur la période du 28/11/03 au 05/12/03, la contribution de la Fontaine de Nîmes au phénomène d'inondation a été estimée à 7,2 millions de m^3.

L'épisode de crue de décembre 2003 apparaît plus important que celui d'octobre 1988 alors que l'épisode de pluie qui le génère (120 mm) est plus faible que celui de 1988 (290 mm). La crue de décembre 2003 apparaît plus importante 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 120 mm et 170 mm) a été imaginé en décembre 2003 au moment où le karst était déjà rempli par de précédentes pluies (Illustration 21). Pour ce scénario, on constate que le débit de pic de crue est presque multiplié par 2, passant de 23 m^3/s à 43 m^3/s. La configuration naturelle de la Fontaine de Nîmes ne permet pas d'évacuer des débits aussi importants (43 m^3/s). L'exutoire peut vraisemblablement évacuer un débit de l'ordre de 25 m^3/s tout au plus. Aussi, l'afflux d'eau consécutive à un épisode pluvieux comparable à celui de 1998 alors que le karst est dans un contexte de moyennes hautes eaux doit se traduire par une élévation générale de la charge piézométrique du réseau de drain karstique et par la mise en fonctionnement de trop pleins du type de celui de la Gaffone. Ceci signifie que l'événement de 1988 aurait aggravé le phénomène de crue de surface 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 termes d'écoulement souterrain, qu'ont les différents bassins de rétention qui ont été construits sur les différents cadereaux. Il faudrait pour

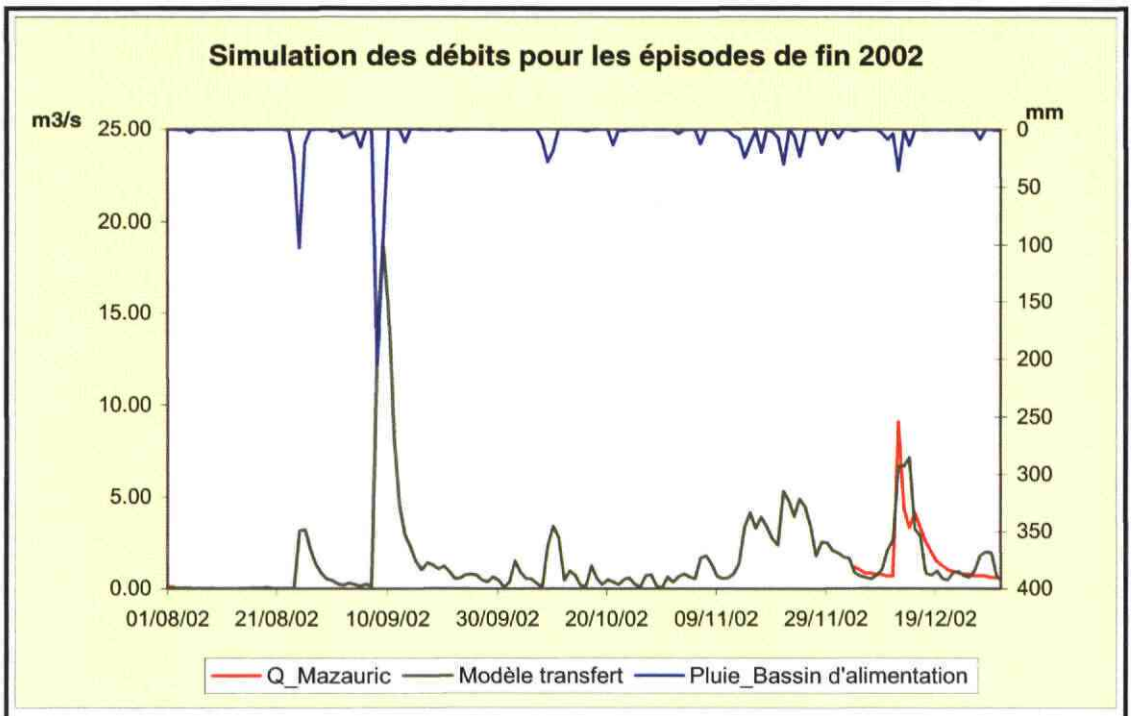
cela posséder un piézomètre de référence pour lequel une chronique est disponible de la période avant 1988 à 2006. Ce type de piézomètre n'existe pas au niveau du système karstique, il faudrait voir s'il est possible de traiter les informations des séries chronologiques d'un piézomètre de la Vistrenque enregistrant l'influence du système karstique.



date	Pluviométrie estimée (cumul journalier) en mm	Débit mesuré en m3/s	Débit simulé en m3/s	erreur simulé ± m3/s
27/09/88	0.00	pas de mesure	0.03	0.01
28/09/88	38.26	pas de mesure	0.03	0.01
29/09/88	0.52	pas de mesure	0.03	0.01
30/09/88	25.81	pas de mesure	0.03	0.01
01/10/88	121.55	pas de mesure	7.15	1.43
02/10/88	170.16	pas de mesure	18.88	3.78
03/10/88	0.00	pas de mesure	16.81	3.36
04/10/88	0.00	pas de mesure	10.95	2.19

Volume écoulé sur la période (en million de m^3) = 4.66
(du 27/09/1988 au 04/10/1988)

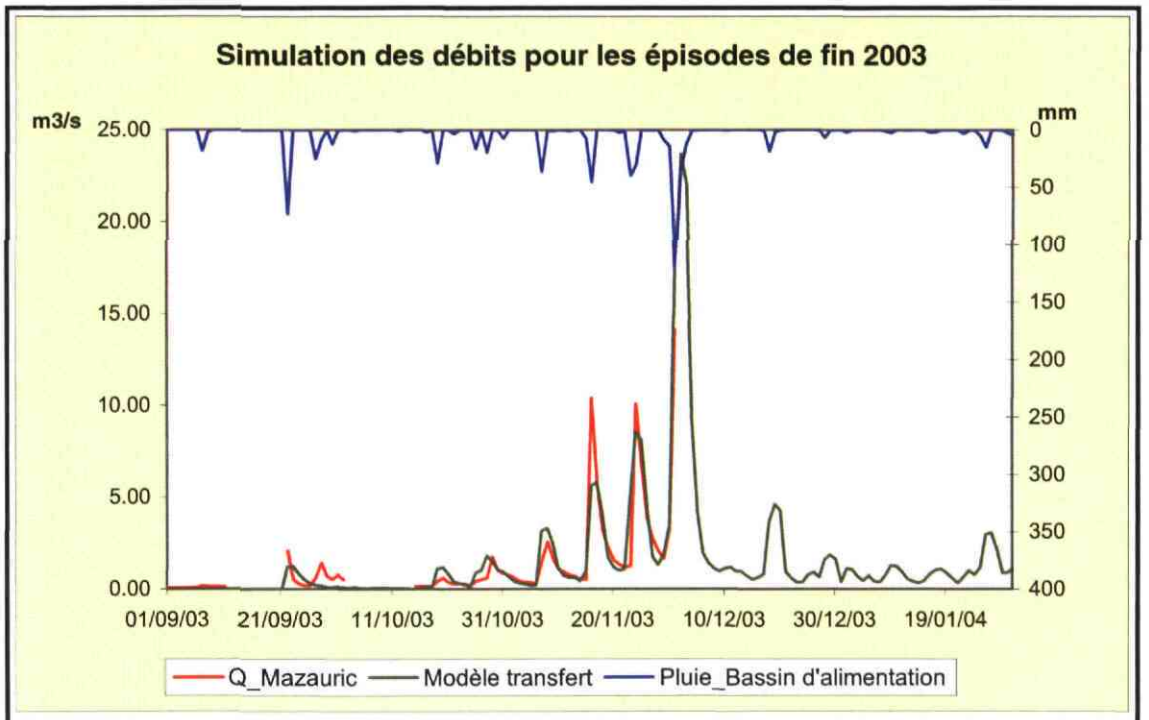
Illustration 18 : Simulation des débits de la Fontaine de Nîmes en septembre 1988



date	Pluviométrie estimée (cumul journalier) en mm	Débit mesuré en m3/s	Débit simulé en m3/s	erreur simulé ± m3/s
07/09/02	0.00	pas de mesure	0.14	0.03
08/09/02	205.14	pas de mesure	13.55	2.71
09/09/02	102.19	pas de mesure	18.94	3.79
10/09/02	0.00	pas de mesure	15.15	3.03
11/09/02	0.00	pas de mesure	8.38	1.68
12/09/02	0.15	pas de mesure	4.58	0.92
13/09/02	11.55	pas de mesure	2.94	0.59
14/09/02	0.00	pas de mesure	2.28	0.46

Volume écoulé sur la période (en million de m^3) = 5.70
(du 07/09/2002 au 14/09/2002)

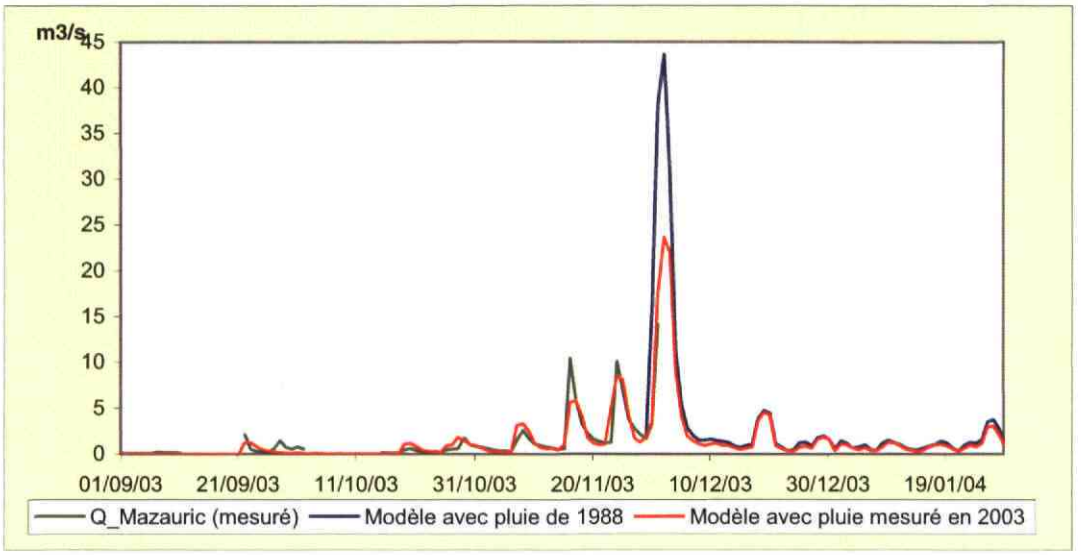
Illustration 19 : Simulation des débits de la Fontaine de Nîmes en septembre 2002



Date	Pluviométrie estimée (cumul journalier) en mm	Débit mesuré en m3/s	Débit simulé en m3/s	erreur simulé ± m3/s
28/11/03	0.00	2.10	1.31	0.26
29/11/03	8.74	1.69	1.89	0.38
30/11/03	14.37	3.26	3.46	0.69
01/12/03	119.37	14.16	17.49	3.50
02/12/03	34.78	pas de mesure	23.69	4.74
03/12/03	12.25	pas de mesure	22.04	4.41
04/12/03	0.47	pas de mesure	9.14	1.83
05/12/03	0.04	pas de mesure	4.19	0.84

Volume écoulé sur la période (en million de m^3) = 7.19
(du 28/11/2003 au 05/12/2003)

Illustration 20 : Simulation des débits de la Fontaine de Nîmes en décembre 2003



Date	Pluviométrie 2003 estimée (cumul journalier) en mm	Débit mesuré en m3/s	Débit simulé (modèle avec pluie 2003) en m3/s	Pluviométrie 2003 estimée (cumul journalier) en mm	Débit simulé (modèle avec pluie 1988) en m3/s
28/11/03	0.00	2.10	1.31	0.00	1.31
29/11/03	8.74	1.69	1.89	8.74	1.89
30/11/03	14.37	3.26	3.46	120.00	15.62
01/12/03	119.37	14.16	17.49	170.00	38.16
02/12/03	34.78	pas de mesure	23.69	34.78	43.62
03/12/03	12.25	pas de mesure	22.04	12.25	30.62
04/12/03	0.47	pas de mesure	9.14	0.47	11.34
05/12/03	0.04	pas de mesure	4.19	0.04	5.48
Volume écoulé sur la période (en million de m3) (du 28/11/2003 au 05/12/2003)			7.19		12.79

Illustration 21 : Simulation des débits de la Fontaine de Nîmes en décembre 2003 en considérant un épisode pluvieux comparable à celui observé en 1988.

3.3.3. Analyse qualitative et quantitative des paramètres physico-chimiques de l'eau de la Fontaine de Nîmes : vers une meilleure caractérisation du fonctionnement hydrodynamique

La minéralisation de l'eau de la Fontaine de Nîmes varie au cours du temps en fonction des conditions hydrologiques du système karstique entre 0,48 mS/cm le 9 septembre 2005 en pleine crue et environ 1,0 mS/cm fin octobre 2004 en période d'étiage

(Illustration 22). On constate une augmentation lente de la conductivité électrique au cours des périodes d'étiage et une diminution brusque lors des périodes de crues, suggérant un phénomène de dilution des eaux anciennes (minéralisées) par des eaux récentes (peu minéralisées) en période de crue.

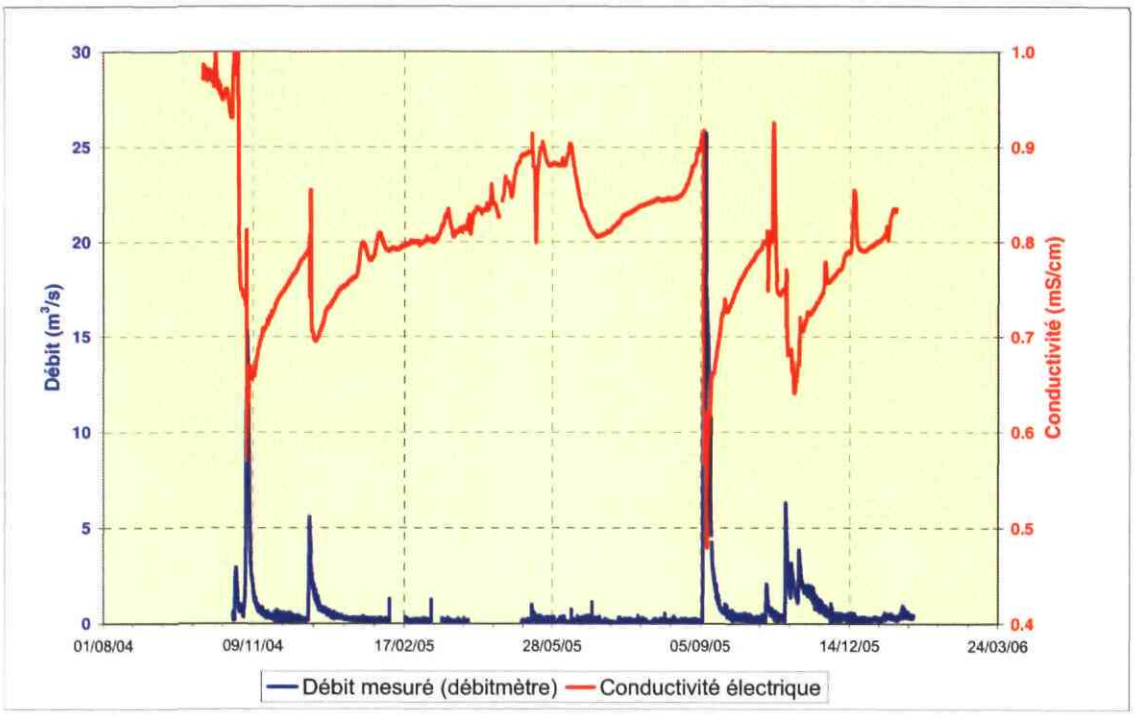


Illustration 22 : débit et conductivité électrique à la Fontaine de Nîmes durant la période d'observation (octobre 2004 à janvier 2006)

Si l'on se focalise sur les épisodes de crue, on observe que le phénomène est un peu plus complexe. Par exemple lors de la crue de septembre 2005 (Illustration 23), après une première dilution le 6/9/05 parallèlement à la forte augmentation du débit, la conductivité électrique augmente subitement pour atteindre un pic de minéralisation le 7/9/05. Ce pic de minéralisation correspond au premier pic de débit. Ensuite, la minéralisation diminue très brusquement jusqu'à 0,57 mS/cm (2ème dilution). La conductivité électrique augmente ensuite à nouveau parallèlement à la diminution du débit. Lors de la seconde crue du 9/09/05, la conductivité électrique diminue à nouveau jusqu'à 0,48 mS/cm (3ème dilution) lorsque les débits augmentent.

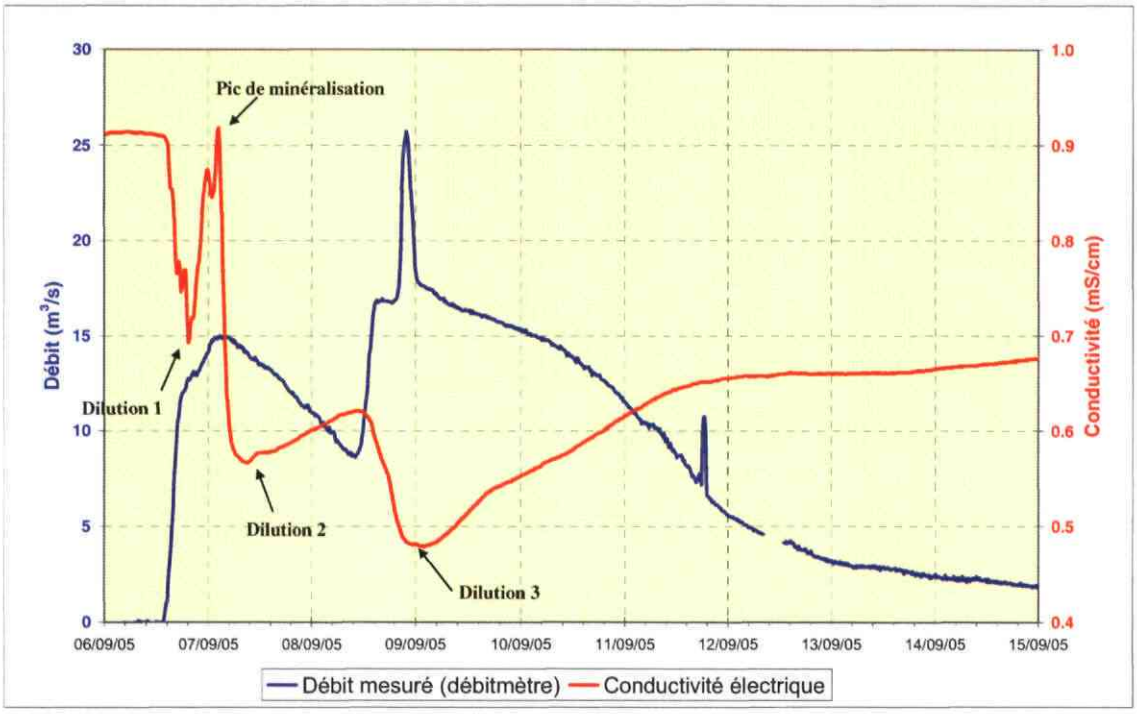


Illustration 23 : débit et conductivité électrique à la Fontaine de Nîmes durant la crue de septembre 2005

Ce même phénomène de pic de minéralisation précédant la dilution en cours de crue a également été observé lors des crues de novembre et décembre 2004.

La courbe de température de l'eau de la Fontaine durant l'épisode de septembre 2005 est également intéressante à analyser. Sur l'Illustration 24, on observe qu'un pic de température correspond à chacun des trois pics de dilution observés sur l'Illustration 23.

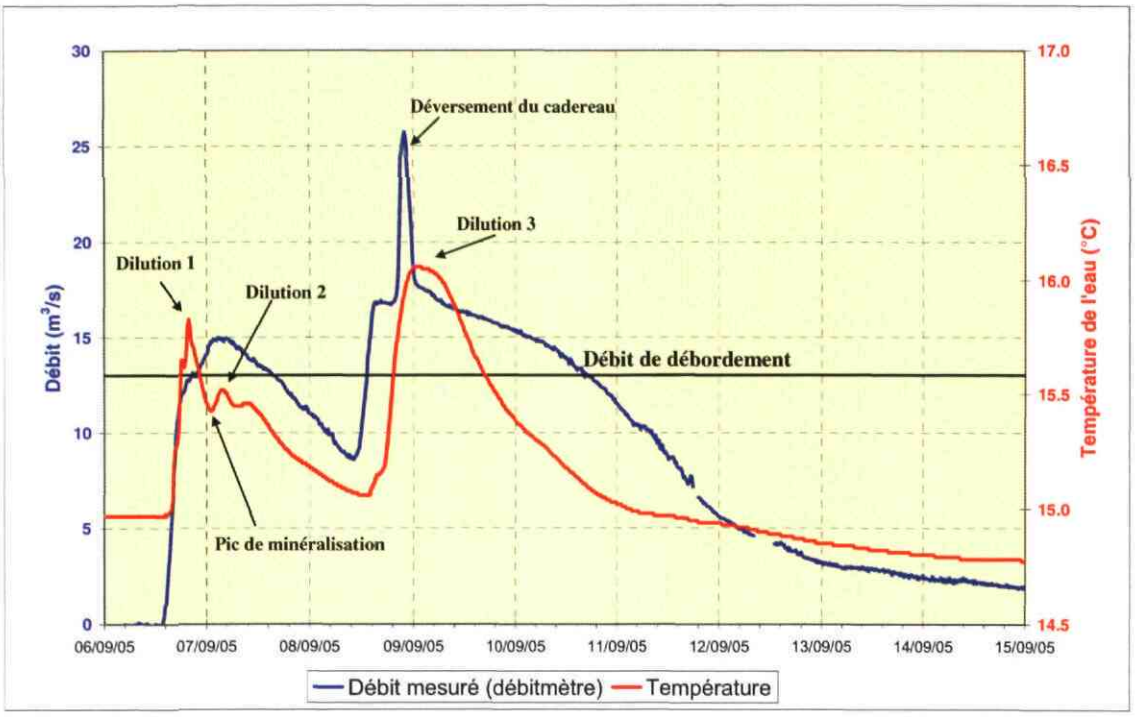


Illustration 24 : débit et température à la Fontaine de Nîmes durant la crue de septembre 2005

En schématisant les processus hydrogéologiques, on peut faire l'hypothèse que les eaux de la Fontaine résultent du mélange d'eaux provenant de deux pôles majeurs :

- eaux anciennes (ou pré-événementielles) minéralisées (~ 1,1 mS/cm) et relativement froides ;
- eaux récentes peu minéralisées (~ 0,25 mS/cm) et relativement chaudes.

Ainsi, l'épisode du 6 – 7 septembre 2005 peut être décomposé dans le temps par la théorie des mélanges (Illustration 25). On constate que chacun des deux épisodes de pluie est caractérisé par l'arrivée d'un pic d'eau ancienne. Lors du premier épisode, la contribution du pôle « eau ancienne » est prépondérante durant les premières heures. Lors du second épisode, les eaux récentes dominent.

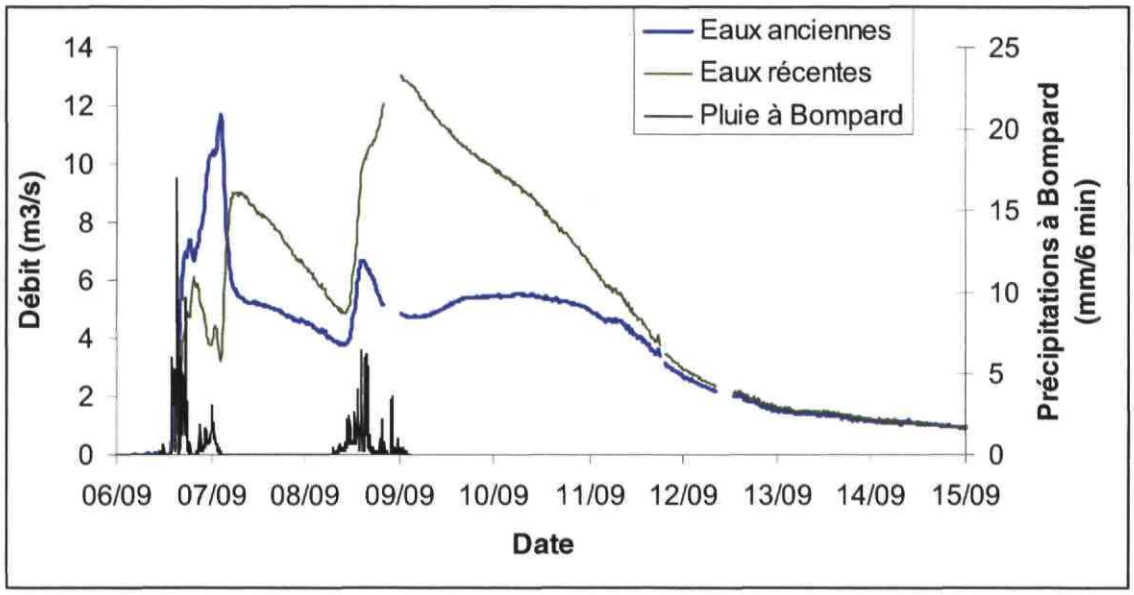


Illustration 25 : décomposition du débit de la Fontaine lors de la crue de septembre 2005 en composantes ancienne et récente

Les eaux du système karstique de la Fontaine de Nîmes sont caractérisées par d'importantes variations de minéralisation et de température comme on l'a montré précédemment. Nous allons utiliser ces propriétés pour séparer les composantes de l'écoulement à l'aide du logiciel Tempo à partir des chroniques de température et de conductivité électrique.

Dans l'approche utilisée, la conductivité électrique des eaux permet de caractériser la composante pré-événementielle, c'est à dire la composante de la zone noyée (relativement froide et minéralisée) du système. La température a été utilisée pour caractériser la composante événementielle c'est à dire la composante liée à l'infiltration par les pluies efficaces.

La technique de modélisation inverse utilisée permet de reconstruire l'hydrogramme unitaire à partir des réponses impulsionnelles des composantes événementielle et pré-événementielle, ces réponses impulsionnelles étant utilisées dans leur intégralité, ce qui confère à cette technique de décomposition de l'hydrogramme tant son originalité que sa robustesse.

Pour décomposer l'hydrogramme, on calcule dans un premier temps les flux associés à chacune des composantes, puis on détermine leurs réponses impulsionnelles par inversion afin de reproduire au mieux les évolutions mesurées. Les résultats pour les composantes événementielle et pré-événementielle sont présentés respectivement Illustration 26 et Illustration 27.

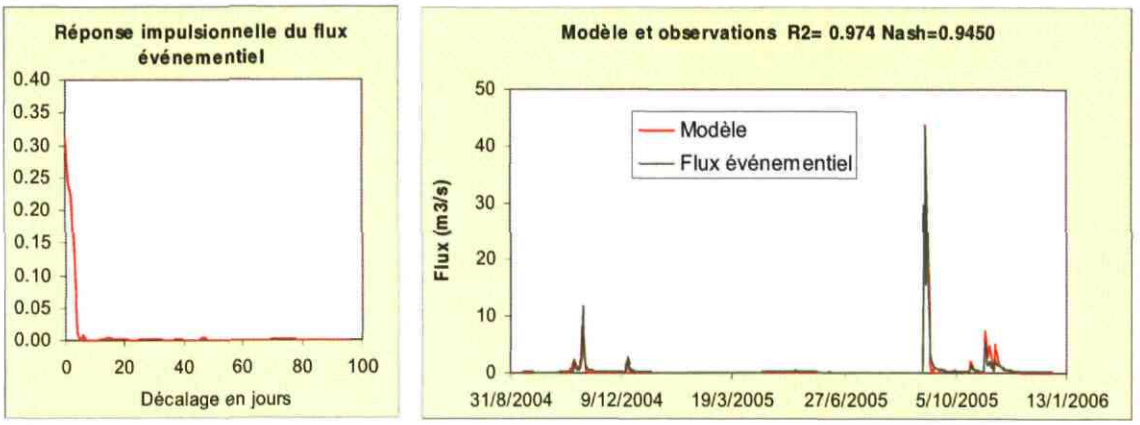


Illustration 26 : Réponse impulsionnelle de la composante événementielle et comparaison du flux modélisé au flux mesuré.

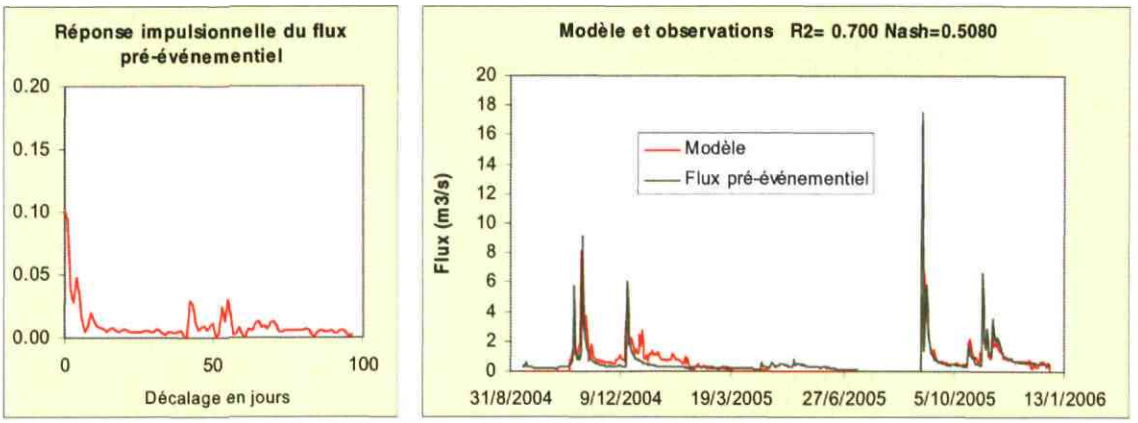


Illustration 27 : Réponse impulsionnelle de la composante pré-événementielle et comparaison du flux modélisé au flux mesuré.

Dans un second temps, on cherche à reconstruire l'hydrogramme unitaire (déterminé précédemment au § 3.3.1) à partir d'une combinaison linéaire des réponses impulsionnelles des flux pré-événementiel et événementiel.

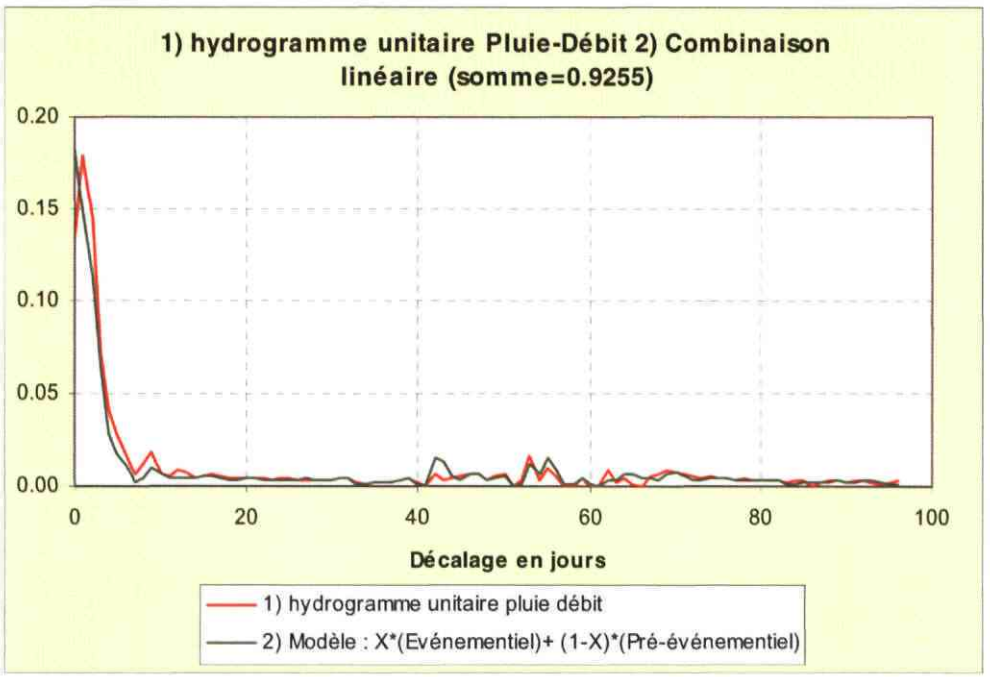


Illustration 28 : Reconstruction de l'hydrogramme unitaire à partir d'une combinaison linéaire des réponses impulsionnelles événementielle (Température) et pré-événementielle (conductivité) : somme = 0,924.

La reconstruction de l'hydrogramme unitaire (Illustration 28) à partir d'une combinaison linéaire des deux composantes ne permet pas de reproduire de manière complètement satisfaisante l'hydrogramme unitaire Pluie-Débit calculé précédemment, la somme étant de 0.92 au lieu de 1. Aussi, nous avons été amenés à considérer une composante complémentaire (estimé par le modèle) sans que l'on puisse la rattacher de manière explicite à un traceur. L'allure de la réponse impulsionnelle complémentaire (Illustration 29) présente une allure similaire à celle de la composante pré-événementielle. Ceci suggère que la composante complémentaire permet également de caractériser des eaux anciennes c'est-à-dire préexistantes dans le système avant les phénomènes de crue. Le poids respectif des différentes composantes individualisées est le suivant :

- composante événementielle déterminée à l'aide de la température : poids = 38,3 % ;
- composante pré-événementielle déterminée à l'aide de la conductivité : poids = 45,4 % .
- composante complémentaire (pré-événementielle) : poids = 16,2 %.

Ces poids représentent la contribution moyenne des différentes composantes du débit de la Fontaine de Nîmes. D'un point de vue conceptuel, les différentes composantes de l'écoulement individualisées par décomposition peuvent être rattachées de la manière suivante au schéma de fonctionnement du karst :

- la composante événementielle déterminée à partir de l'évolution de la température peut être assimilée aux eaux en provenance de la zone épikarstique située sous la surface du sol,
- la composante pré-événementielle déterminée à partir de l'évolution de la conductivité peut être assimilée aux eaux en provenance des systèmes annexes au drainage (SAD) de type fissuré,
- la composante complémentaire déterminée par le modèle peut être assimilée aux eaux en provenance de la zone noyée du système. On remarque à l'aide de l'Illustration 29 que la contribution de la zone noyée est maximale 2 jours après le début d'un épisode de pluie et est presque nulle au début de l'épisode. Ce comportement permet d'expliquer le pic de minéralisation observé sur la chronique de conductivité (Illustration 23).

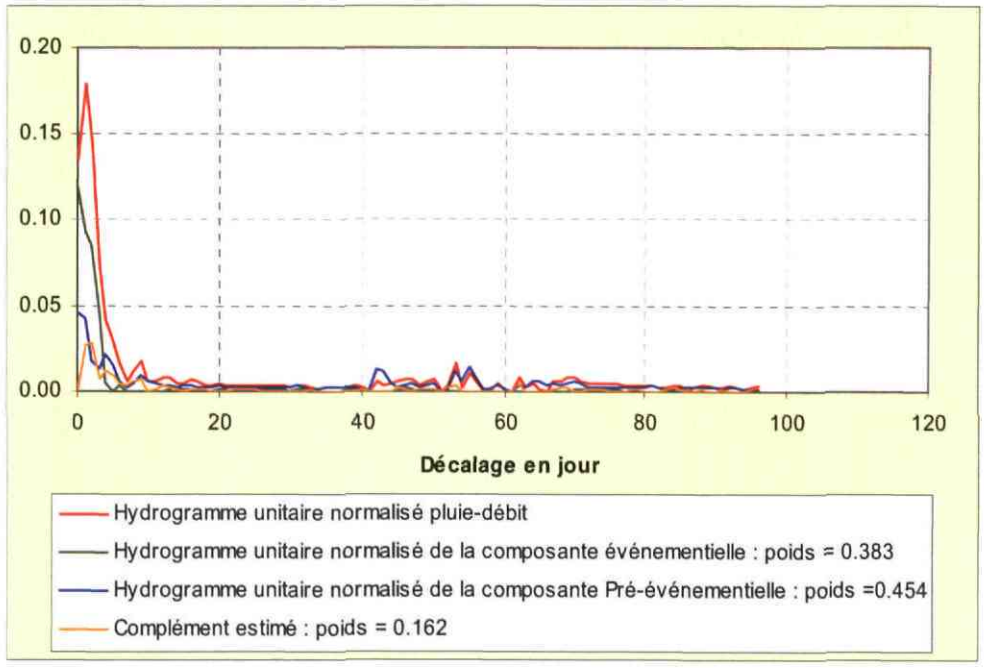


Illustration 29 : Hydrogrammes unitaires des différentes composantes de l'écoulement

La décomposition des différents flux d'eau associés aux composantes de l'écoulement de la Fontaine de Nîmes est présenté Illustration 30. Sur les 17,48 millions de m^3 qui s'écoulent à la Fontaine de Nîmes en moyenne chaque année (débit moyen interannuel de 550 l/s), les volumes d'eau associés aux différentes composantes de l'écoulement déduit de la décomposition de l'hydrogramme sont les suivants :

- volume d'eau événementielle issue de l'épikarst = 6,88 millions de m^3 (39 %) ;
- volume d'eau pré-événementielle issue des SAD (blocs fissurés) =7,76 millions de m^3 (44 %) ;
- volume d'eau pré-événementielle issue de la vidange de la zone noyée = 2,81 millions de m^3 (16 %).

La valeur des différents volumes d'eau déduits de la décomposition de l'hydrogramme pour la récession 2005 (du 16/12/04 au 05/09/05) sont les suivants :

- volume d'eau événementiel issu de l'épikarst = 1.32 millions de m^3 ;
- volume d'eau pré-événementiel issue des SAD (blocs fissurés) = 3.17 millions de m^3 ;
- volume d'eau issue de la vidange de la zone noyée = 0.89 millions de m^3.

Soit un total de 5,18 millions de m^3 déterminés par le modèle contre 4,89 millions de m^3 mesurés (mois de 10 % de différence). Les volumes d'eau individualisés par décomposition sont très semblables aux volumes d'eau déduits par l'analyse de la courbe de récession 2005 (cf. Illustration 13). Ces résultats obtenus par deux approches complètement différentes renforcent donc le schéma conceptuel de fonctionnement du système karstique de la Fontaine de Nîmes.

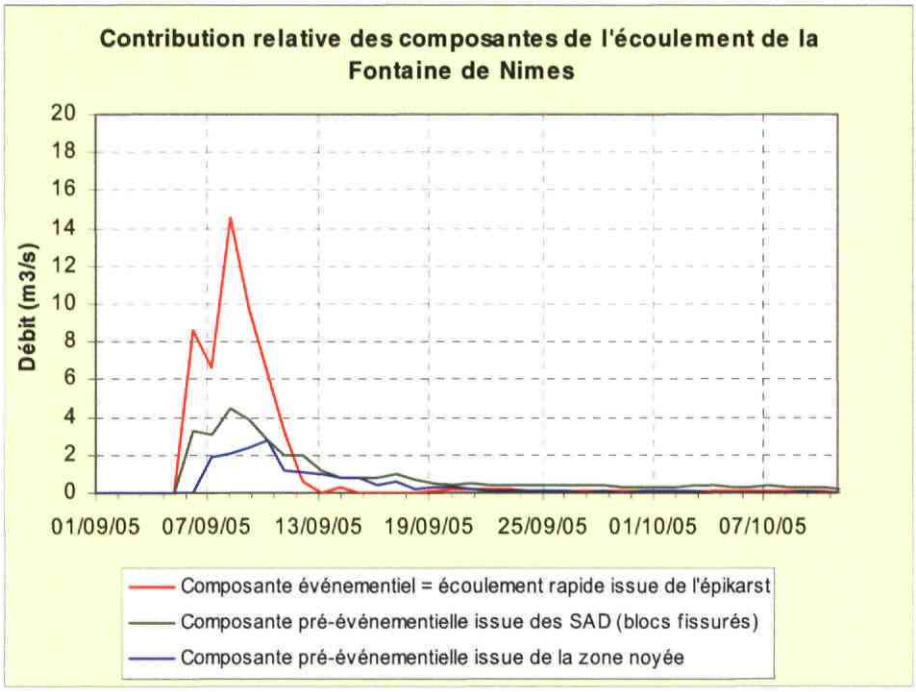


Illustration 30 : Décomposition des différentes composantes de l'hydrogramme de la Fontaine de Nîmes pour l'épisode de septembre 2005

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

Les modélisations inverses des relations pluie-débit et les décompositions des hydrogrammes à l'aide des mesures physico-chimiques 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 du système karstique par l'approche de modélisation utilisée met en évidence les principaux points suivants :

- la surface du bassin d'alimentation est estimée à 45 km^2 ;

- 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 »[2]) 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 un dizaine de jours environ puis faiblement de manière plus ou moins exponentielle pendant 30 jours environ. Au-delà de 30 jours de décalage, l'effet de la pluie efficace sur l'hydrogramme unitaire ne se fait plus sentir.

3. La part de l'infiltration rapide qui englobe à la fois, le régime d'écoulement non linéaire observé en période de crue (« effet de chasse ») et les pluies efficaces qui ont transité dans la zone épikarstique du système, est évaluée en moyenne à 38.3 % ce qui correspond à environ 6.9 millions de m^3 sur les 17.5 millions de m^3 qui s'écoule en moyenne à l'exutoire au cours d'un cycle hydrologique.

4. La part de l'infiltration lente ou retardée qui est attribuée au transit au travers du système annexe au drainage (blocs fissurés) est prédominante lorsque l'infiltration rapide cesse. En exemple, pour la récession 2005, le débit d'infiltration lente contribue pour 80% à l'écoulement total 30 jours après le pic de crue, la part de l'écoulement issu de la vidange de la zone noyée étant faible (20 %). Au cours d'un cycle hydrologique, la part de l'infiltration lente ou retardée apparaît également importante dans le fonctionnement du système karstique. Elle contribue pour près de 45,4 % au fonctionnement global du système ce qui correspond à environ 7,8 millions de m^3 sur les 17,5 millions de m^3 qui s'écoule en moyenne à l'exutoire. La durée de l'infiltration lente déterminée par l'analyse des courbes de récession est importante (225 jours) ce qui suggère que les eaux contenues dans les blocs fissurés des systèmes annexes sont difficilement sollicitées par le réseau de drainage du système karstique.

---

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

5. La part des eaux issues de la vidange de la zone noyée est faible (16.3 %) au fonctionnement global du système ce qui correspond à environ 2.8 millions de m^3 sur les 17.5 millions de m^3 qui s'écoule en moyenne à l'exutoire au cours d'un cycle hydrologique. Ces résultats suggèrent que la zone noyée du karst est peu développée en profondeur.

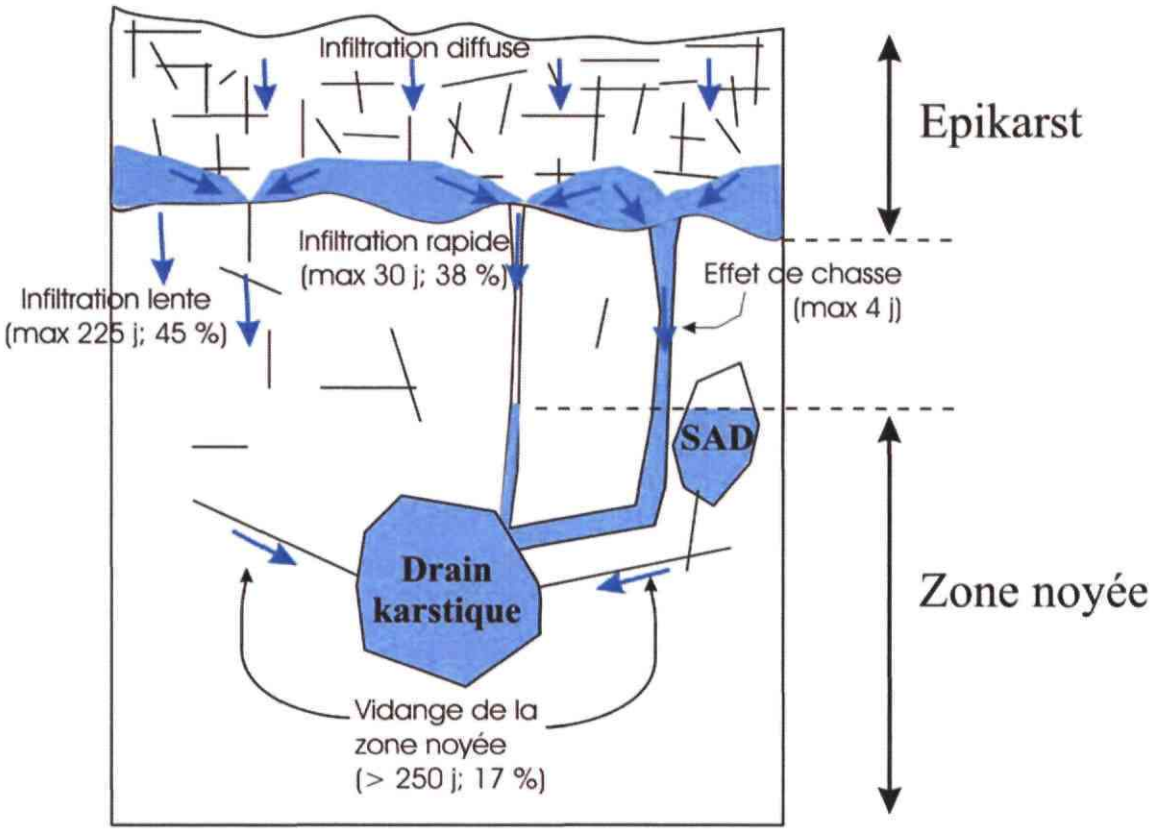


Illustration 31 : schéma d'infiltration vers le drain karstique (la durée maximale et la contribution moyenne annuelle de chaque composante sont indiquées entre parenthèses)

La caractérisation du fonctionnement du système karstique de la Fontaine de Nîmes permet de reconstituer les débits moyens journaliers 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'inondation qui se sont produits dans le passé. L'estimation est néanmoins rendue délicate car l'importance de l'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 18.9 m^3/s (± 3.8 m^3/s)

- décembre 2003, pic de crue 23.7 m^3/s (± 4.7 m^3/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 termes d'écoulement souterrain, qu'ont les différents bassins de rétention qui ont été construits sur les différents cadereaux depuis 1988. Il faudrait disposer d'un piézomètre de référence du karst couvrant la période 1980 à 2006.

Les tests de sensibilité effectués indiquent que l'état hydrologique initial du karst sur l'amplitude de la crue de la Fontaine est déterminant. A titre d'illustration, nous avons simulé les débits qu'aurait présenté la Fontaine de Nîmes en décembre 2003 si un épisode de forte précipitation semblable à celui d'octobre 1988 (deux jours consécutifs de fortes pluies à 120 mm et 170 mm) s'était produit alors que le karst était en contexte de hautes eaux (débit initial de la Fontaine de Nîmes = 1.7 m^3/s). Pour ce scénario, on constate que le débit de pic de crue est presque multiplié par 2, passant de 23 m^3/s à 43 m^3/s. La configuration naturelle de la Fontaine de Nîmes ne permet pas d'évacuer des débits aussi importants (43 m^3/s). L'exutoire peut vraisemblablement évacuer un débit de l'ordre de 25 m^3/s tout au plus. Aussi, l'afflux d'eau consécutive à un épisode pluvieux comparable à celui de 1988 alors que le karst est dans un contexte de moyennes-hautes eaux doit se traduire par une élévation générale de la charge piézométrique du réseau de drain karstique et par la mise en fonctionnement de trop pleins du type de celui de la Gaffone. Ceci signifie que l'événement de 1988 aurait aggravé de manière non négligeable le phénomène de crue de surface par une contribution d'eau souterraine en provenance du karst s'il s'était produit alors que le karst était en hautes eaux.

4. Suivi piézométrique des eaux souterraines

4.1. INTRODUCTION

Des mesures de niveau d'eau des eaux souterraines ont été effectuées spatialement et temporellement dans le bassin d'alimentation de la Fontaine.

L'interprétation de ces résultats est présentée ci-dessous :

- piézométrie spatiale ;
- variations temporelles étudiées de façon qualitative et quantitative (traitement du signal) ;
- étude et simulation des résurgences temporaires (boulidous).

4.2. PIEZOMETRIE SPATIALE

Même s'il est difficile de tracer et d'interpréter une carte piézométrique en milieu karstique à cause de l'hétérogénéité du milieu, l'examen des niveaux d'eau mesurés dans les piézomètres du réseau d'observation conduit à un certain nombre d'interprétations (Illustration 30) :

- les points dont les niveaux d'eau sont les plus bas, proches du niveau de la Fontaine (55 m NGF), sont tous localisés sur le réseau de drains karstiques dans un rayon restreint autour de la Fontaine ;
- dans la moitié est du bassin, les niveaux d'eau augmentent du sud vers le nord, en s'éloignant de l'exutoire. A des latitudes similaires, les piézomètres situés à proximité du lit des cadereaux (Grand Champ et Font Aubarne – Tomporski) sont caractérisés par des niveaux inférieurs à ceux plus éloignés dans une direction est-ouest. Ceci suggère que dans cette partie du bassin, les vallées sèches constituent des axes Nord-Sud de drainage des eaux souterraines ;
- dans la moitié ouest du bassin, les niveaux d'eau augmentent considérablement vers l'ouest avec des valeurs atteignant 130 à 165 m NGF, soit 80 à 115 mètres au-dessus du niveau de la source. Ceci indique l'existence d'une épaisse zone noyée dans des zones moins perméables (peu karstifiées) de cette partie du bassin. Les axes d'écoulement apparaissent moins clairement. Toutefois, on notera une brusque chute de niveau de 160 à 135 m NGF à proximité du Synclinal de Vacqueyrolle dont le rôle d'axe de drainage est supposé ;
- les niveaux d'eau des trois points situés à l'extrémité ouest du bassin sont peu élevés. Ceci semble indiquer, contrairement à la coloration réalisée à Parignargues,

que cette zone est le siège d'écoulements vers le Gardon. A moins que ces faibles niveaux ne soient liés à la position des points à proximité des vallées sèches.

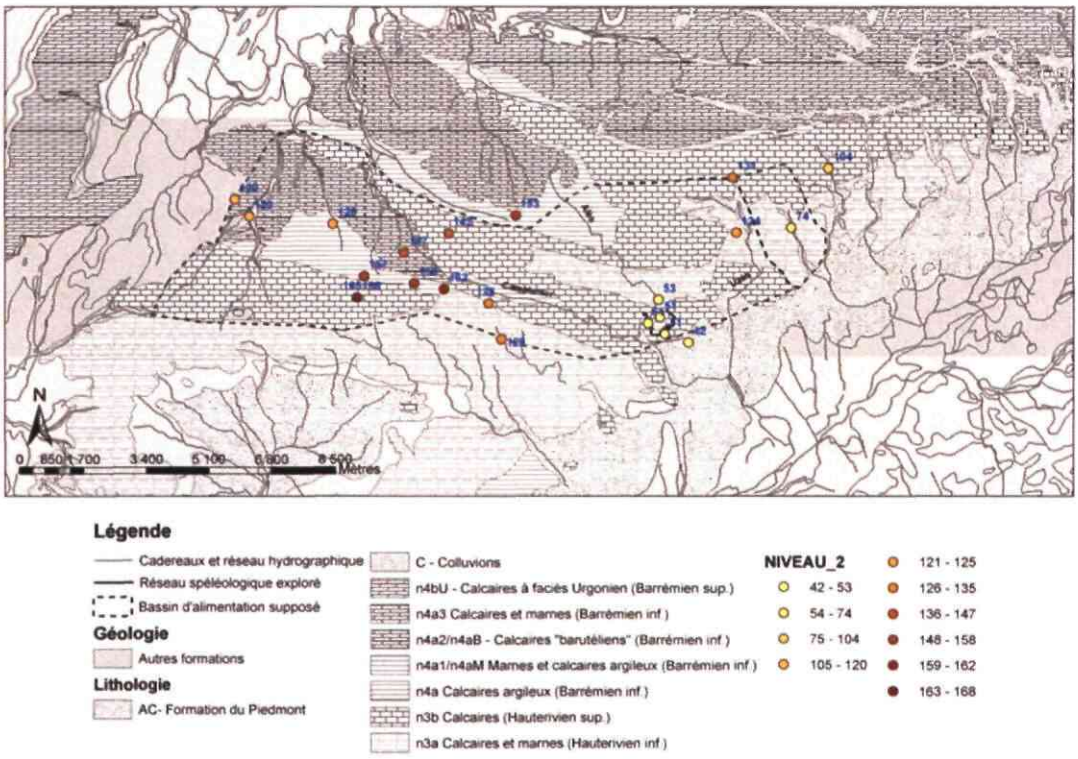


Illustration 32 : piézométrie mesurée sur le réseau spatial le 27 octobre 2005

4.3. VARIATION TEMPORELLE DES NIVEAUX D'EAU

4.3.1. Réseau de surveillance

Un réseau de surveillance en continu des eaux souterraines a été mis en place en 2004. En complément des 4 points déjà suivis depuis 1998, les niveaux d'eau de 7 points supplémentaires permettent d'obtenir un réseau de 11 points au total.

Le réseau final équipé depuis septembre 2004 est de quatre forages, six puits et un aven. Leur localisation est donnée à l'Illustration 33 et à l'Annexe 1.

No	Nom	X	Y	Nature	No BSS
O1	Mas de Ponge	757785	176292	Forage	09644X0063/PONGE
O2	Mas de Bruxelles	755990	175813	Forage	09644X0048/BRUXELL
O3	Mas de Provence	755898	174347	Forage	09644X0064/PROVEN
O4	Moulin Daumier	750673	176267	Forage	09643X0007/S
O5	Tomporski	766085	177554	Puits	09651X0123/TOMPO
O6	Source Guigue	763312	176585	Puits	09651X0122/GUIGU
O7	puits des 9 Arcades (Robert)	761604	174049	Puits	09651-X-0035
O8	Aven Mazauric	761784	173138	Aven	09651-X-0009/S
O9	F4 Puits Poubelle	761308	173402	Puits	09651-X-0121
O10	Maison Carrée	762387	172901	Puits	09651-X-0112
O11	Puits Pesenti	761305	173196	Puits	09651-X-0053/P

Illustration 33 : liste des points équipés d'un orphimède pour la surveillance en continu des niveaux d'eau

Les points ont été choisis de façon à :

- obtenir une répartition géographique et géologique sur la zone d'étude,
- être, pour certains, localisés sur les cadereaux (Uzès et d'Alès) particulièrement sensibles et étudiés dans le cadre de la partie modélisation hydrologique et hyrdraulique du projet ESPADA, réalisé par BCEOM (Source Guigue, Puits Poubelle, Puits des 9 Arcades),
- être hydrogéologiquement pertinents : proches (Puits Poubelle, Neuf Arcades) ou éloignés (Mas de Bruxelles) du réseau karstique connu, présents dans les différentes formations géologiques et contextes hydrogéologiques variés : synclinal de Vacqueyrolles (Mas de Provence) ou formations plus marneuses du Barrémien (Mas de Ponge).

Le forage de **Mas de Ponge** est situé dans les marnes et calcaires argileux du Barrémien inférieur (n4aM). Il est profond d'environ 50 mètres. Aucune information n'est disponible sur sa coupe géologique.

Le forage de **Mas de Bruxelles**, profond d'environ 40 mètres, est situé dans les calcaires de l'Hauterivien supérieur (n3b). Aucune information n'est disponible sur sa coupe géologique.

Le forage du **Mas de Provence**, d'une profondeur supérieure à 60 mètres, est situé à la limite entre les calcaires de l'Hauterivien inférieur et de l'Hauterivien supérieur. Situé à proximité du contact entre ces formations à la bordure sud du Synclinal de Vacqueyrolles, il recoupe probablement essentiellement des calcaires et marnes de l'Hauterivien inférieur (n3a).

D'une profondeur de 26,4 mètres, le puits du **Moulin Daumier** constitue un captage AEP utilisé par la Commune de Parignargues. Après 3,4 mètres de formations quaternaires (remblais, éboulis), il a traversé 18,30 mètres de formations marneuses compactes. Ensuite, il a recoupé des bancs calcaires entre 21,7 et 26,4 mètres de profondeur. Les venues d'eau ont été observées entre 24,8 et 25,5 mètres : le puits est crépiné entre 24 et 26,4 mètres de profondeur. Avec un niveau d'eau stabilisé entre 2 et 3 mètres de profondeur, la nappe est donc clairement captive.

Le **puits Tomporski**, d'une profondeur d'environ 10 mètres, est localisé dans les formations quaternaires de Piedmont sur les calcaires cruasiens (n3b) à quelques mètres du cadereau d'Uzès. Il est dès lors possiblement proche d'un axe de drainage.

La **source Guigue** est constituée d'un regard (puits) débordant une grande partie de l'année. D'une profondeur inférieure à 5 mètres, il est situé dans les calcaires de l'Hauterivien inférieur (n3a).

L'**Aven Mazauric** est un aven d'une profondeur d'environ 14 mètres en relation directe avec l'exutoire de la Fontaine de Nîmes. Il est situé à quelques mètres de la vasque de la Fontaine, dans les calcaires « cruasiens » de l'Hauterivien Supérieur (n3b).

Le puits de la **Maison Carrée** est localisé dans les formations quaternaires situées au pied des Garrigues. Aucune information n'est disponible sur sa coupe géologique.

Profond de 12 mètres, le **puits Pesenti** (lieu-dit « Creux de Moulery ») a recoupé 8 mètres d'éboulis et déblais, puis 6 mètres de calcaires cruasiens de l'Hauterivien supérieur. Il se situe dans le prolongement de la Galerie des Poteries qui rejoint le bras ouest du réseau karstique de la Fontaine.

Le forage F4 situé à proximité du **Puits Poubelle** a été réalisé dans le cadre des explorations du réseau karstique de la Fontaine. Il est situé sur le bras nord du réseau karstique dans les calcaires de l'Hauterivien supérieur (n3b).

Profond 'environ 30 mètres, le **Puits des 9 Arcades** est situé dans le prolongement du bras nord du réseau karstique. Il est situé dans les calcaires et marnes de l'Hauterivien inférieur (n3a).

Leurs caractéristiques sont résumées à l'Illustration 34.

No	Nom	Prof. (m)	Etage	Hydrogéologie	Géologie
O1	Mas de Ponge	~ 50	n4aM	Nappe superficielle dans le Barrémien marneux	Marnes et calcaires argileux (Barrémien inférieur)
O2	Mas de Bruxelles	~ 40	n3b	Hauterivien à distance du réseau karstique (blocs)	Calcaires en bancs épais (Hauterivien supérieur indifférencié)
O3	Mas de Provence	> 60	n3a	Synclinal de Vacqueyrolles	Calcaires et marnes (Hauterivien inférieur indifférencié)
O4	Moulin Daumier	26,4	Fz sur n4aB	Barrémien à distance du réseau karstique (blocs)	Alluvions sur calcaires "Barutélien" (Barrémien inférieur)
O5	Tomporski	10	AC sur n3b	Hauterivien supérieur à distance du réseau karstique (blocs)	Piedmont sur calcaires "cruasiens" (Hauterivien supérieur)
O6	Source Guigue	< 5	n3a	Source	Calcaires et marnes (Hauterivien Inférieur indifférencié)
O7	Puits des 9 Arcades (Robert)	30,45	n3a	Réseau karstique (bras est)	Calcaires et marnes (Hauterivien Inférieur indifférencié)
O8	Aven Mazauric	14	n3b	Exutoire de la Fontaine	Calcaires "cruasiens" (Hauterivien supérieur)
O9	F4 Puits Poubelle	?	n3b	Réseau karstique (bras ouest)	Calcaires "cruasiens" (Hauterivien supérieur)
O10	Maison Carrée	?	AC	Plaine de la Vistrenque	Limons et débris calcaires de Piedmont
O11	Puits Pesenti	14	n3b	Réseau karstique	Calcaires "cruasiens" (Hauterivien supérieur)

Illustration 34 : caractéristiques des points équipés d'un orphimède pour la surveillance en continu des niveaux d'eau

Le pas de temps de mesure est de 30 minutes ou une heure, selon la proximité des points par rapport au réseau karstique connu.

4.3.2. Analyse qualitative

Les eaux souterraines sont généralement peu profondes avec des piézométries comprises entre 0 et 24,17 mètres de profondeur (Illustration 35). Les fluctuations piézométriques oscillent entre 2,2 et 11,2 mètres.

Piézomètre	Piézo min (m)	Piézo moy (m)	Piézo max (m)	Fluctuation piézo (m)
Mas de Provence	0	2,77	3,59	3,59
Mas de Ponge	0	3,56	6,38	6,38
Mas de Bruxelles	6,34	15,26	16,69	10,35
Source Guigue	0	1,83	2,23	2,23
Moulin Daumier	0	4,04	10	10
Tomporski	0,3	2,09	4,11	3,81
Puits Pesenti	1,7	10,75	11,55	9,85
Puits 9 Arcades	12,93	21,91	24,17	11,24
Puits Maison Carrée	1,78	5,85	6,61	4,83
Puits Poubelle	2,34	14,97	21,04	18,7
Aven Mazauric	0,49	3,19	7,39	6,9

Illustration 35 : piézométries minimale, moyenne et maximale enregistrées sur les

L'analyse des données des piézomètres montre qu'ils réagissent rapidement après une pluie (exemple du double épisode de pluie de septembre 2005 en Illustration 37). Les niveaux aux piézomètres Provence, Guigue et Ponge situés en-dehors des drains karstiques du réseau de la Fontaine atteignent très rapidement le niveau du sol au point de mesure, ce qui signifie que la « nappe aquifère » est alors localement pleine et déborde.

La saturation du karst en ces trois piézomètres prend quelques heures (Illustration 36) durant l'épisode du 6 septembre 2005 dont l'amplitude varie entre 150 et 250 mm selon les pluviomètres.

Piézomètre	Date de saturation du karst	Augmentation du niveau d'eau	Temps de montée*	Temps de tarissement
Guigue	6/9/05 17 :00	2,18 m	~ 4 h	~ 26 jours
Mas de Provence	7/9/05 01 :00	3,13 m	~ 14 h	~ 29 jours
Mas de Ponge	7/9/05 02 :00	6,34 m	~ 15 h	> 43 jours
Moulin Daumier	8/9/05 18 :00	10,00 m	~ 56 h (2de pluie)	~ 10 jours (palier)

Illustration 36 : caractéristiques de la saturation du karst lors de la crue de septembre 2005
(temps mesuré depuis le début de la pluie)

Après la pluie du 6 septembre 2005, la pluie du 8 septembre a peu d'effet sur les niveaux des piézomètres qui ont des signes de saturation du karst (Illustration 37). L'aquifère étant déjà plein, il ne peut absorber plus d'eau et les sols étant saturés, la totalité de la pluie ruisselle sur le bassin versant et contribue à générer la forte crue dans les cadereaux lors de cet épisode. Au Moulin Daumier dans un aquifère captif sous des formations marneuses et non saturé par la première pluie, la seconde pluie le 8 septembre provoque la saturation du karst.

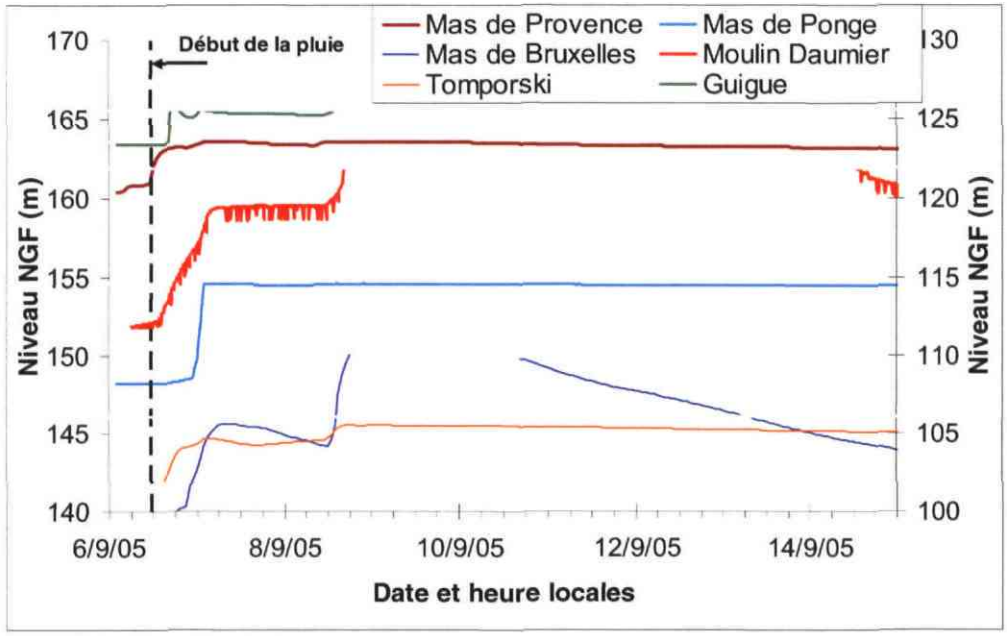


Illustration 37 : évolution des niveaux d'eau aux piézomètres Provence, Ponge, Mas de Bruxelles (axe vertical de gauche) et aux piézomètres Moulin Daumier, Tomporski et Guigue (axe vertical de droite) lors de la crue de septembre 2005. L'altitude du sol est indiquée par un trait horizontal à tous les points sauf Mas de Bruxelles..

Le tarissement des niveaux d'eau après la pluie est assez lent dans les piézomètres situés en-dehors des drains karstiques (Illustration 37). Le temps nécessaire aux piézomètres pour recouvrer leur niveau initial est de l'ordre de plusieurs dizaines de jours. Le piézomètre de Moulin Daumier ne recouvre pas son niveau initial mais se stabilise à un palier intermédiaire, déjà observé lors de la montée suite à la première pluie du 6 septembre.

Dans le courant du mois de novembre 2005, plusieurs épisodes de pluie ont été enregistrés : 42 mm dans la nuit du 31/10 au 1/11, 6 mm l'après-midi du 4/11, 32 mm l'après-midi du 9/11, 8 mm le matin du 12/11 et 9 mm entre le 13 et le 15/11. Le premier épisode a l'effet le plus sensible sur la piézométrie (Illustration 38), avec une saturation du karst à Guigue, Mas de Provence et Mas de Ponge (Illustration 39).

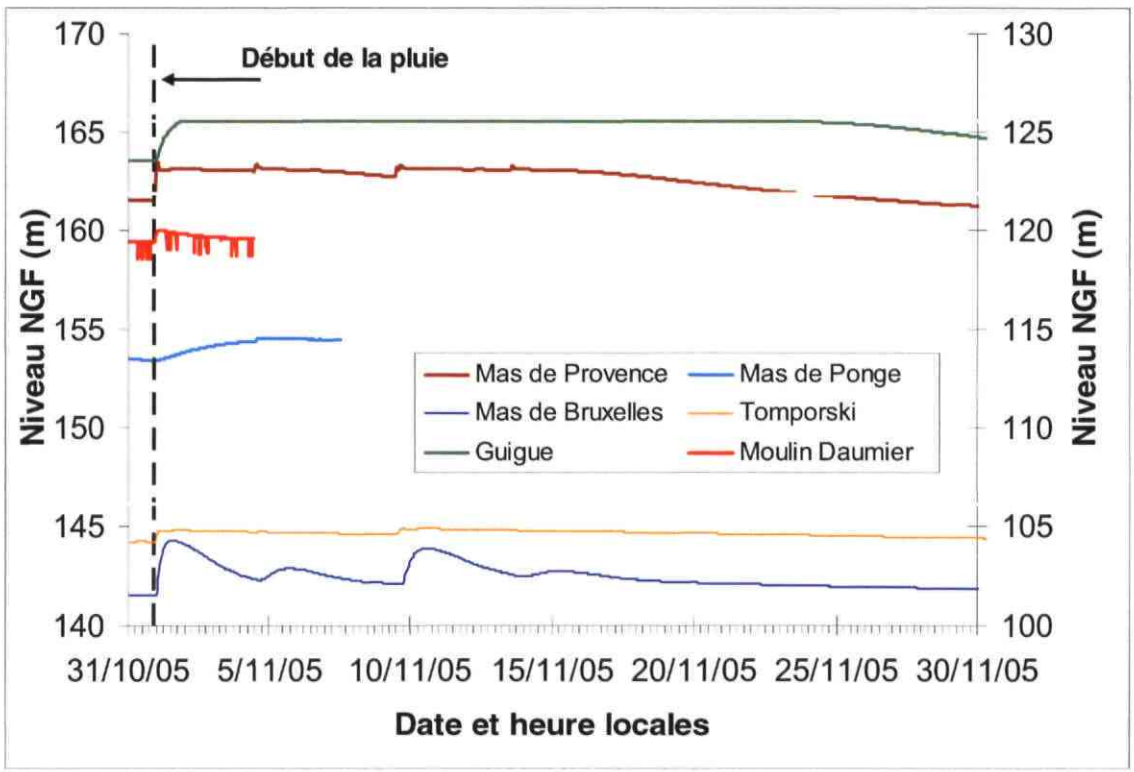


Illustration 38 : évolution des niveaux d'eau aux piézomètres Provence, Ponge, Mas de Bruxelles (axe de gauche) et aux piézomètres Moulin Daumier, Tomporski et Guigue (axe de droite) lors des pluies de novembre 2005. L'altitude du sol est indiquée par un trait horizontal à tous les points sauf Mas de Bruxelles.

Par la suite, la source Guigue déborde pendant presque tout le mois. Le Mas de Ponge est saturé tout le mois et dès lors les pluies suivantes ne l'affectent pas. Les points d'eau Tomporski et Mas de Ponge réagissent faiblement aux autres pluies du mois (Illustration 38).

Piézomètre	Saturation du karst	Augmentation du niveau d'eau	Temps de montée*
Guigue	Oui	2,14 m	21 h
Mas de Provence	Oui	2,93 m	3 h
Mas de Ponge	Oui	1,12 m	4 jours
Moulin Daumier	Non	1,48 m	3 h
Mas de Bruxelles	Non	2,9 m	10 h
Tomporski	Presque	0,76 m	12 h

Illustration 39 : effet de la pluie (42 mm) du 1er novembre 2005 (depuis le début de la pluie le 31/10 à 22 :00)*

En octobre et novembre 2004, plusieurs épisodes pluvieux se sont succédé. Entre le 26 octobre et le 3 novembre 204, on a mesuré en moyenne 85 mm sur les stations de Bonfa, Bompard, Rte d'Uzès et Météo-France, en plusieurs épisodes espacés. Hormis à Guigue et au Mas de Bruxelles où elles ont eu peu d'influence, ces pluies ont provoqué une remontée sensible des niveaux d'eau.

L'épisode du 4 novembre 2004 (76 mm en moyenne sur les stations de Bonfa, Bompard, Rte d'Uzès et Météo) provoque également une saturation du karst à la source Guigue, Mas de Ponge et Mas de Provence sur un aquifère déjà en cours de recharge suite aux épisodes de la seconde quinzaine d'octobre (Illustration 40).

Piézomètre	Saturation du karst	Augmentation du niveau d'eau – 1er épisode (85 mm)	Augmentation du niveau d'eau – 2d épisode (76 mm)
Guigue	Oui (2d épisode)	0,15 m	1,98 m
Mas de Provence	Oui (2d épisode)	1,74 m	1,48 m
Mas de Ponge	Oui (2d épisode)	1,97 m	2,88 m
Moulin Daumier	Non	2,02 m	1,62 m
Mas de Bruxelles	? (panne)	0,76 m	> 6,13 m
Tomporski	Oui (2d épisode)	0,75 m	0,65 m

Illustration 40 : effet des pluies d'octobre et novembre 2004

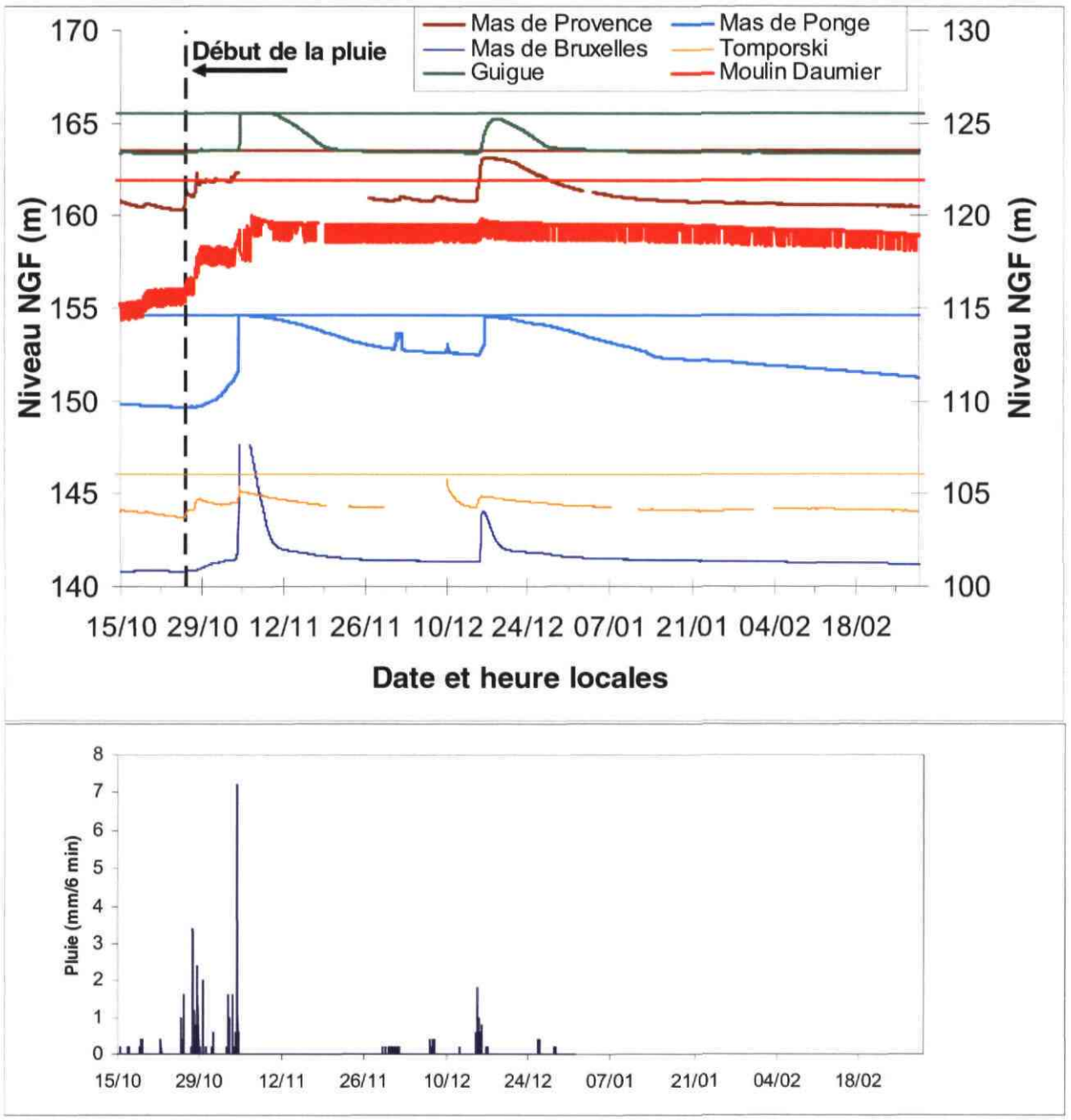


Illustration 41 : évolution des niveaux d'eau aux piézomètres Provence, Ponge, Mas de Bruxelles (axe de gauche) et aux piézomètres Moulin Daumier, Tomporski et Guigue (axe de droite) lors des pluies d'octobre-novembre 2004. L'altitude du sol est indiquée par un trait horizontal à tous les points sauf Mas de Bruxelles

Les piézomètres situés sur ou à proximité des drains karstiques possèdent un comportement différent (Illustration 42) avec une montée de niveau brusque et une

baisse de niveau beaucoup plus rapide que sur les piézomètres observés précédemment.

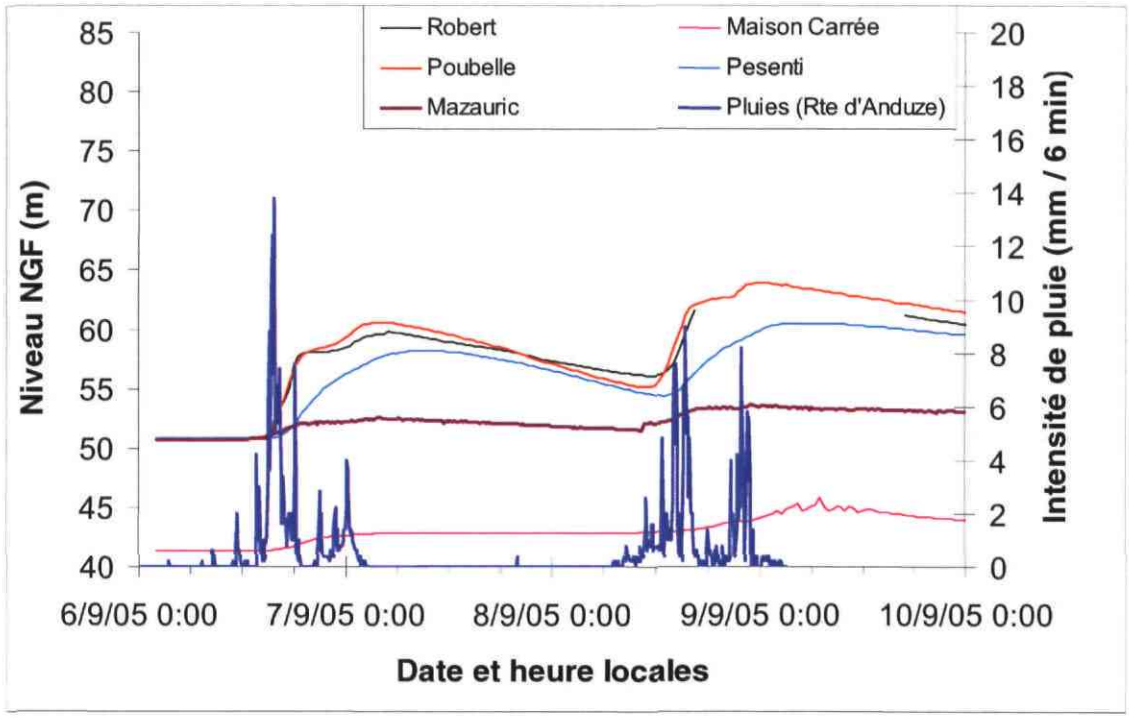


Illustration 42 : niveaux d'eau dans les piézomètres situés sur le drain karstique durant la crue de septembre 2005

En résumé, on constate lors des épisodes de pluie avec un cumul de pluie supérieur à environ 150 mm, une saturation du karst sur les points situés en-dehors du réseau karstique. Ceci s'explique par une infiltration importante d'eau au travers de sols peu épais qui ne peut être évacuée suite à une perméabilité horizontale insuffisante dans les formations calcaires. Ceci se traduit par des vitesses de tarissement extrêmement faibles.

Au contraire, dans les zones plus karstifiées (Mas de Bruxelles) ou situées sur le réseau karstique (Puits Poubelle, Pesenti, 9 Arcades), les niveaux d'eau augmentent également très vite mais diminuent tout aussi brusquement avec des vitesses de tarissement plus élevées. La perméabilité des zones karstifiées et du réseau karstique est suffisamment élevée pour évacuer l'eau accumulée dans l'aquifère durant la crue.

Ces chroniques de niveaux d'eau sont analysées par traitement du signal ci-dessous.

4.3.3. Traitement du signal

Identification des piézomètres

Les auto-corrélogrammes (pas de temps horaire ou semi-horaire) réalisés sur les différents séries de niveaux d'eau nous renseignent sur l'effet mémoire et le fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère au point de mesure (Illustration 43).

	Pondération de la pluie horaire			**Autocorrélogramme**		**Contexte hydro**
Piézomètre	Bompard	Bonfa	Anduze	Délai pour r=0.2	Délai pour r=0.2 (j)	
Cadereau Alès (sept 05)	0	0	1	205200s	2.4	surface
Pesenti	0	0.33	0.67	94 h	3.9	drain
Poubelle	0.01	0.55	0.44	338400s	3.9	drain
Mazauric	0	0.57	0.43	102 h	4.3	drain
9 Arcades	0.01	0.63	0.36	669600s	7.8	drain
Maison Carrée	0.09	0.04	0.87	1018800 s	11.8	AC
Guigue	0.46	0.07	0.47	297 h	12.4	n3a
Provence	0.74	0.17	0.1	470 h	19.6	n3a
Moulin Daumier	0.44	0.07	0.5	>1843200 s	21.3	n4a2
Bruxelles	0.43	0.57	0	540 h	22.5	n3b
Tomporski	0.13	0.87	0	588 h	24.5	n3b
Ponge	0.7	0	0.3	> 1024 h	42.7	n4aM

Illustration 43 : pondération de la pluie horaire et auto-corrélogrammes des points d'eau mesurés

Sur le tableau de l'Illustration 43, les points sont classés par effet mémoire croissant (délai de temps pour lequel le coefficient d'auto-corrélation reste supérieur à 0.2).

Le niveau d'eau mesuré dans le cadereau d'Alès (eau de surface) est le moins inertiel avec un délai de 2,4 jours. Ensuite, viennent les points situés sur les drains du réseau karstique avec un délai de l'ordre de 4 jours. Le point 9 Arcades, situé plus en amont sur le bras secondaire (bras nord), possède un effet mémoire un peu plus élevé (8 jours). La Maison Carrée, située dans un contexte de formations quaternaires semble influencé par le comportement du réseau karstique avec un délai assez faible (12 jours). Les autres points dans les calcaires montrent un effet mémoire plus important (compris entre 12 et 24 jours), avec un fonctionnement distinct des drains du réseau karstique. Le point Mas de Ponge, situé dans des formations marneuses peu perméables, montre assez logiquement un effet mémoire très élevé (> 43 jours).

Une analyse de pondération de la pluie au moyen des trois stations (Bompard, Bonfa, Anduze) du réseau dont les chroniques d'observation sont les plus complètes a été effectuée (Illustration 43). Elle permet de déterminer la combinaison linéaire des

stations pluviométriques disponibles la plus pertinente pour expliquer les fluctuations de niveau d'eau d'un point donné. Ces combinaisons ont été utilisées pour déterminer la relation pluie - niveau d'eau ci-dessous.

Relations pluie – niveau d'eau

Les corrélogrammes croisés pluie – niveau d'eau permettent de caractériser la relation entre la pluie et les fluctuations de niveau d'eau aux points de mesure. Ils donnent une bonne image de l'hydrogramme unitaire du point d'observation dans le cas où la pluie est parfaitement aléatoire.

Les doubles pics observés à l'Illustration 44 sont liés à la structure de la pluie qui est fortement influencée par les doubles évènements de septembre 2005. Dans l'analyse, il convient de ne retenir que le premier pic.

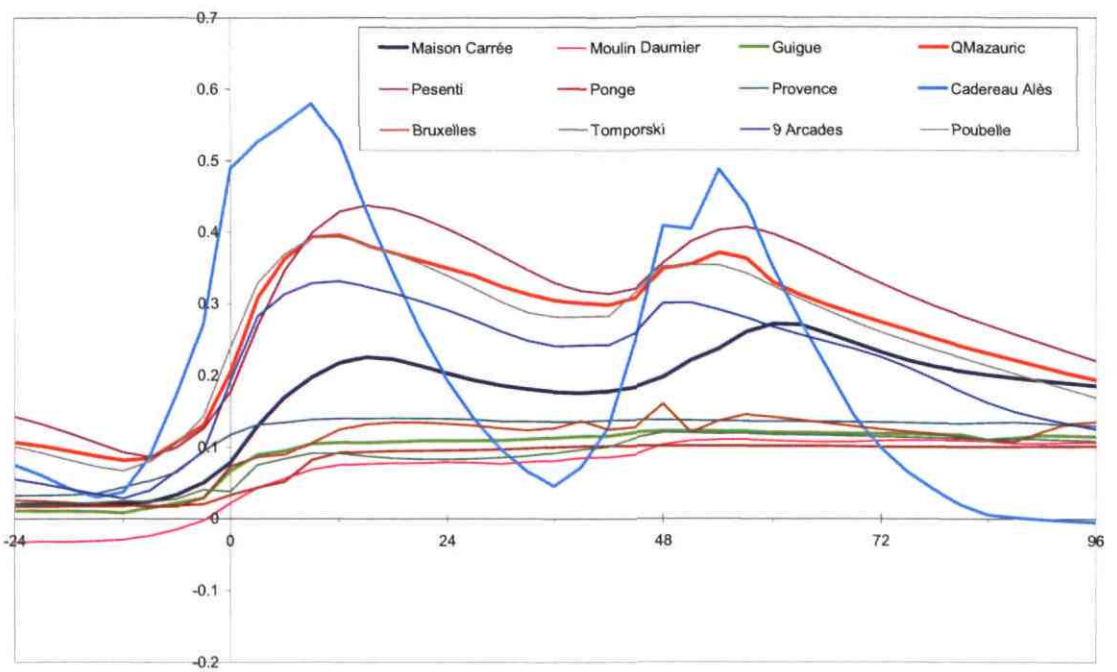


Illustration 44 : corrélogrammes croisés pluie – niveau d'eau (pas de temps : 3 h)

Ces corrélogrammes croisés confirment les premiers résultats des autocorrélogrammes, avec :

- une réaction très rapide du cadereau d'Alès (pic élevé de corrélation à 9 heures) ;
- une réaction rapide des drains du réseau karstique (pic moyen de corrélation à Mazauric, Poubelle et 9 Arcades à 12 heures et à 15 heures à Pesenti) ;

- une réaction moins marquée mais aussi rapide (pic peu élevé à 15 heures) à Maison Carrée ;

- une réaction peu marquée (pic de corrélation < 0.15) mais rapide aux autres points du réseau d'observation.

La réaction des niveaux d'eau dans les piézomètres est filtrée par le contexte hydrogéologique des points d'observation : réaction plus rapide dans les parties plus perméables (drain) et plus lente dans les moins perméables.

Relations karst – plaine de la Vistrenque

L'étude du corrélogramme croisé (Illustration 45) niveau aven Mazauric – Puits de la Maison Carrée met en évidence l'existence d'une relation de cause à effet entre les niveaux de ces deux points : les fluctuations de niveau au Puits de la Maison Carrée sont en partie dues aux fluctuations dans le système karstique dont l'Aven Mazauric est un témoin. Ceci suggère que l'aquifère de la plaine de la Vistrenque est alimenté par le système karstique de la Fontaine.

Cette analyse est confirmée par :

- le pompage réalisé en août 1998 par les spéléologues de l'Association Fontaine de Nîmes dans le réseau karstique au niveau du Puits Poubelle qui a provoqué un rabattement de l'ordre de 20 centimètres au Puits de la Maison Carrée. Ceci démontre l'existence d'une connexion hydraulique entre les deux aquifères ;

- les analyses géochimiques qui montrent que la signature isotopique en strontium des eaux des forages des Mas Miraman et Jasse Catalan, bien que situés dans le Villafranchien, est très proche des eaux karstiques prélevées dans l'aquifère de l'Hauterivien inférieur. Ce résultait permettait de montrer que l'aquifère karstique alimente localement la nappe de la Vistrenque. Des calculs de proportions de mélange ont montré que la contribution de l'aquifère karstique est d'environ 85% au niveau de ces deux points (Dorfliger, Ladouche et al. 1999) ;

- l'analyse des débits classés à la Fontaine qui suggère que la Fontaine constitue une source de trop-plein ou débordement d'un système karstique qui se vidange par ailleurs au travers d'autres exutoires (en l'occurrence dans la plaine de la Vistrenque).

L'ensemble de ces indices démontre que le système karstique se déverse dans l'aquifère de la plaine de la Vistrenque et ce, aussi bien en basses qu'en hautes eaux. Cette connexion se fait au travers de la Faille de Nîmes et n'est pas limitée aux environs du Puits de la Maison Carrée.

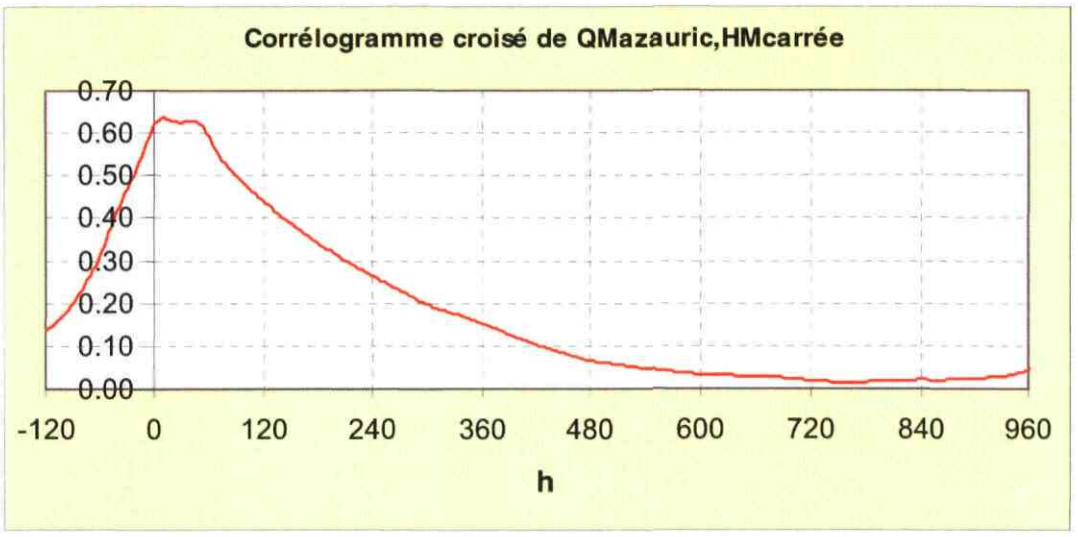


Illustration 45 : corrélogramme croisé Mazauric – Maison Carrée (pas de temps : 3 heures)

Modélisation du transfert

Le processus de transfert a été modélisé au moyen de la réponse impulsionnelle de façon à être capable de reproduire la réaction du karst à des épisodes de pluie simulés. Suite à la saturation du karst et à son débordement, les chroniques de niveau d'eau de certains points sont tronquées en période de hautes eaux. Ceci a induit une grosse difficulté dans les tentatives de modélisation. Elle n'a pu être conduite de façon satisfaisante à Mas de Ponge et Source Guigue par exemple. Outre à la Fontaine de Nîmes (§ 3.3.1 ci-dessus), cette approche a pu être appliquée au forage Mas de Provence. Ceci permet d'apporter de l'information sur le transfert dans les zones moins perméables du karst.

A Mas de Provence (Illustration 46), la réponse impulsionnelle se divise en une composante rapide (temps de transit : 2,0 jours) et une composante lente (temps de transit : 22,3 jours).

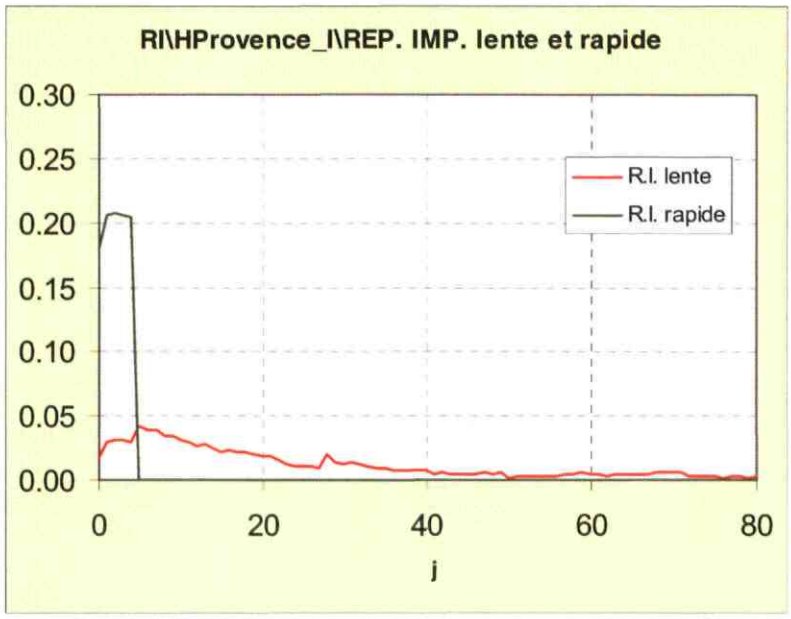


Illustration 46 : Réponse impulsionnelle au point Mas de Provence

La comparaison des niveaux observés et simulés (Illustration 47) avec des pluies observées depuis le début du suivi montre que le modèle reproduit de façon satisfaisante les fluctuations observées. Le modèle reproduit bien les deux évènements (novembre 2004 et septembre 2005) durant lesquelles le karst a débordé.

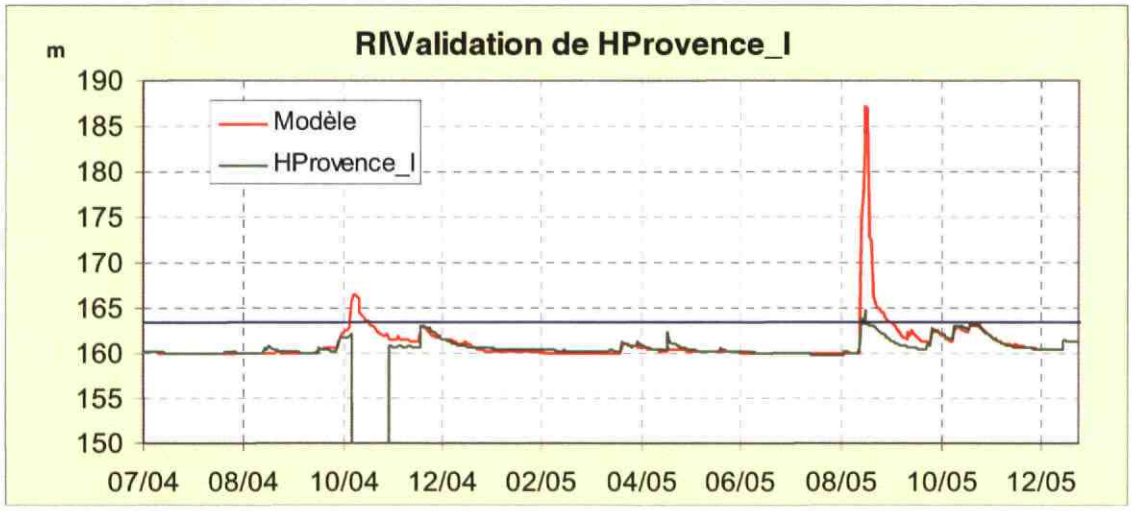


Illustration 47 : Comparaison des niveaux observés et simulés à Mas de Provence (ligne noire : niveau du sol)

4.4. RESURGENCES TEMPORAIRES

4.4.1. Observations

Connues localement sous le nom de boulidous (en Languedoc, Provence : émergence, "endroit d'où l'eau sort en bouillonnant"), des résurgences temporaires se manifestent en période de crues au sein du bassin d'alimentation de la Fontaine. Celles du quartier « Eaux Bouillies » sont les plus connues et les plus nombreuses.

D'après les témoignages des riverains, elles se mettent en fonction lors des épisodes de pluie les plus importants et déversent durant 2 à 3 jours. Les évènements pluvieux précédents durant lesquels ces sources ont fonctionné sont : septembre 2005, décembre 2003 et septembre 2002.

Il a été observé par les riverains (Mr Bedrani notamment) qu'elles ne se manifestent pas toujours simultanément avec les eaux de ruissellement dans les cadereaux mais peuvent :

- les précéder lors d'épisodes de pluie de longue durée : la saturation progressive des sols et du karst conduit au débordement de celui-ci avant la génération de ruissellement dans le cadereau;
- leur succéder lors d'une forte pluie après une longue période sèche : la pluie sur sol sec génère du ruissellement avant infiltration vers le karst.

C'est ce qui s'est produit lors du double épisode de crue de septembre 2005. Pendant la pluie du 6 octobre, le système karstique, très sec, s'est progressivement saturé en eau, mais pas assez pour donner lieu à un débordement via les boulidous. Par contre, les cadereaux ont récolté, dès le début de la pluie, les eaux de ruissellement non infiltrées au travers du sol sec. Ensuite, la pluie du 8-9 septembre, à peu près de même ampleur, a provoqué le débordement du karst et la mise en fonction des sources temporaires à partir du 8 septembre dans l'après-midi. Ceci, outre l'état d'humidité du sol, explique l'ampleur de la réponse des cadereaux à cet épisode.

La comparaison des niveaux d'eau lors de cet épisode indique que les niveaux d'eau dans les drains du réseau karstique sous le cadereau d'Alès restent largement (de l'ordre de 20 mètres) inférieurs à l'altitude des résurgences du quartier Eau Bouillie, même lorsque celles-ci se mettent à déverser (Illustration 48). Ceci indique que les résurgences du quartier « Eau Bouillie » font partie de systèmes déconnectés du drain karstique principal relié à la Fontaine.

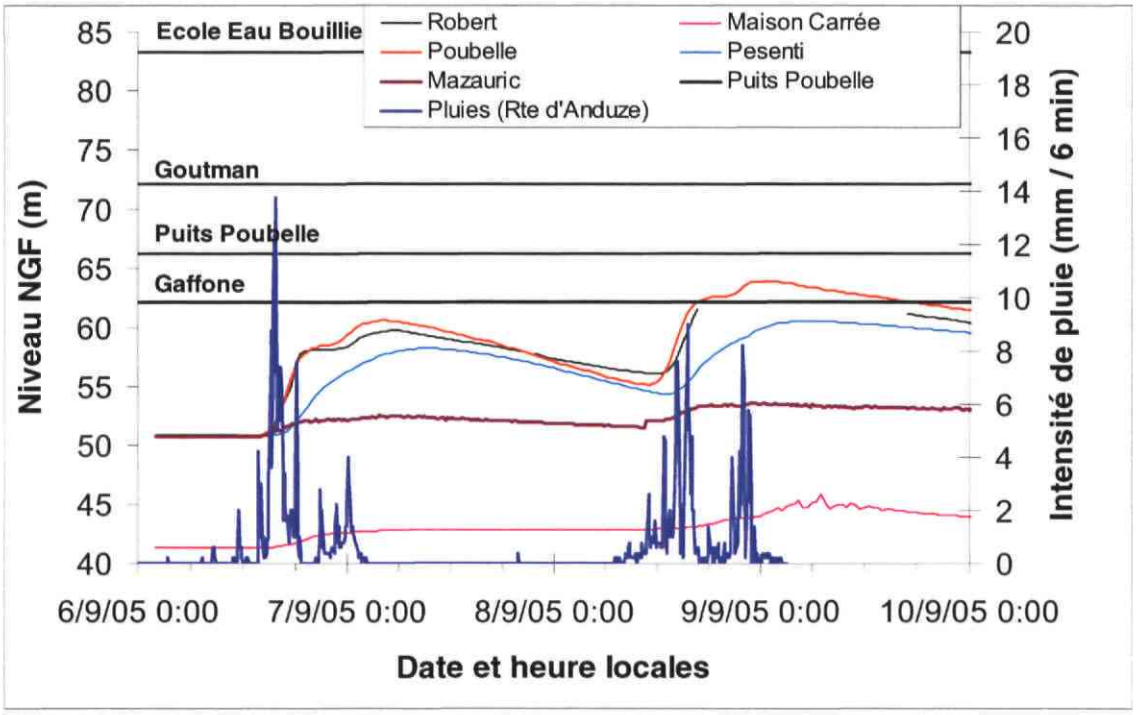


Illustration 48 : niveaux d'eau dans les piézomètres du cadereau d'Alès lors de l'épisode de crue de septembre 2005 (l'altitude de surface de certains boulidous est indiquée par des traits horizontaux)

D'autres résurgences sont présentes dans la partie avale du cadereau d'Alès, à proximité du réseau karstique ; il s'agit des résurgences du Puits de la Gaffone. Bien connues à proximité du chemin de Camplanier, ce système de résurgences est constitué d'un ancien puits romain (Puits de la Gaffone) et d'une diaclase dans la falaise située juste derrière le puits.

Le puits déborde lors des forts épisodes pluvieux par son déversoir situé environ 2 mètres en dessous de sa margelle (Illustration 49). Lors des épisodes les plus violents, la diaclase, située à une altitude plus élevée, se met également à déverser mais toujours après le puits. Ceci suggère qu'ils constituent deux résurgences à des niveaux différents du même compartiment hydrogéologique mis en charge.

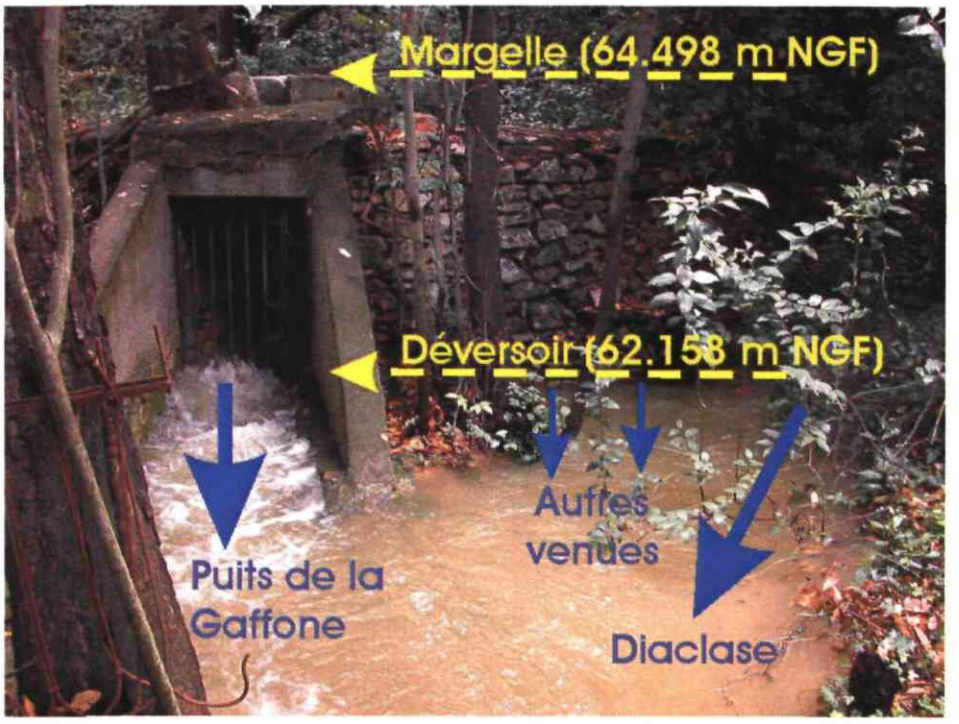


Illustration 49 : Localisation des principales venues d'eau au niveau de la Gaffone (puits et diaclase) lors de l'épisode de septembre 2005 (photographie prise par G Jouanen)

Ce système de résurgences a fonctionné lors de l'épisode de septembre 2005. Deux jaugeages ont été effectués par G. Jouanen (Association Spéléologique Nîmoise) : 1,4 m^3/s le 7/09/05 à 11h et 2,2 m^3/s le 9/09/05 à 14 h. Le débit de la Fontaine à ces deux dates était, respectivement, de 13 et 16 m^3/s environ. Selon M. Gébelin, riverain, le système aurait débordé après le 7 au matin et durant plusieurs jours après le 8.

L'importance des débits maxima de crue (confirmés comme étant supérieurs à 500 l/s par (Fabre 1980) suggère que ce système de résurgences est probablement connecté au drain karstique principal, via la Galerie des Poteries explorée par les spéléologues sur laquelle le Puits est probablement situé. Le fonctionnement de ce système correspondrait donc au débordement du drain karstique suite à une capacité d'écoulement au sein de la Galerie des Poteries inférieure aux débits en crue, comme illustré à l'Illustration 50.

Le niveau d'eau dans le drain au puits Pesenti reste en permanence inférieur à l'altitude du puits de la Gaffone. Ceci indique la présence de pertes de charge entre ces deux points et des écoulements de la Gaffone vers Pesenti.

En résumé, deux types de résurgences temporaires ont été identifiés :

- boulidous déconnectés du drain : remplissage et débordement des systèmes annexes au drainage ou de l'épikarst (l'analyse hydrochimique du § 6.2 suggère plutôt l'épikarst); ils sont la manifestation de la saturation du karst observée par nos mesures piézométriques et décrite ci-dessus ;

- boulidous connectés au drain : mise en charge dans le drain karstique suite à un rétrécissement ou à une réduction de ses capacités d'écoulement. Ce phénomène est également connu aux Etats-Unis sous le nom de « sinkhole flooding », ce qui signifie inondation par les pertes.

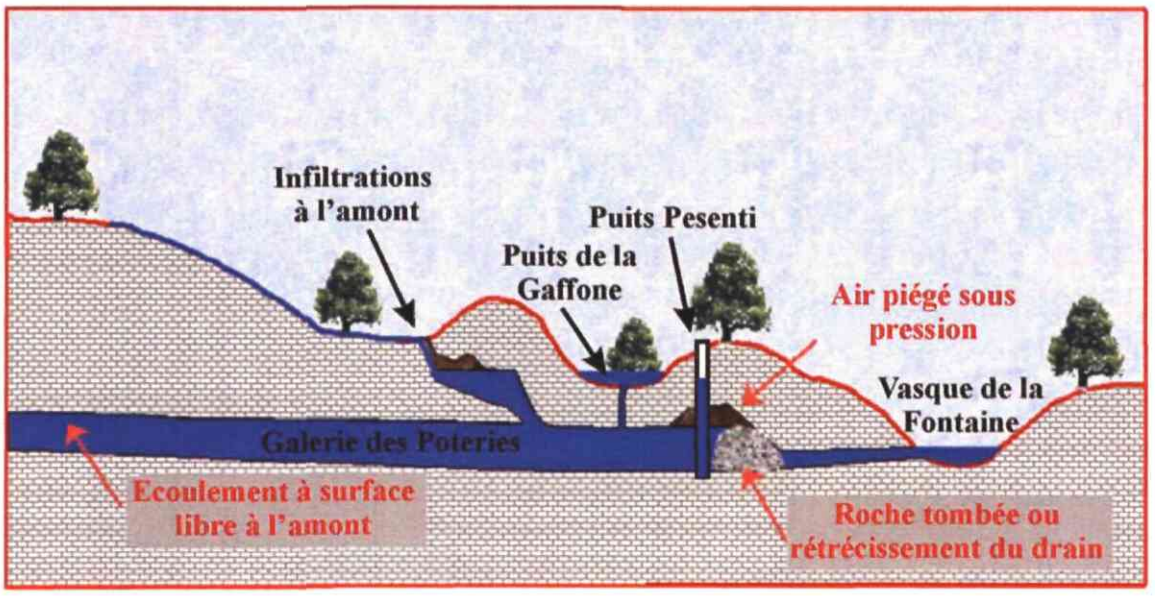


Illustration 50 : Schéma de fonctionnement du système de résurgences de la Gaffone (modifié d'après J.C. Currens)

Ces résurgences temporaires ont bien entendu fonctionné durant les principales crues que la Ville de Nîmes a connues par le passé. Selon (Gilly 1988), durant l'inondation de Nîmes du 3 octobre 1988, l'aquifère karstique de l'Hauterivien supérieur se serait mis en charge dans l'ensemble des secteurs des Monts Margarot et Cavalier, du Bois de Mittau et des quartiers de la Cigale et d'Espagne, se traduisant par un « jaillissement » de l'eau à travers les fissures du calcaire sur les fronts de taille des carrières romaines de Roquemaillère, du Creux de l'Assemblée et de la Cigale et sur les versants des Monts Margarot et Cavalier. La crue de la nappe a provoqué un débourrage de nombreuses fissures colmatées par les argiles de décalcification car les eaux qui jaillissaient des calcaires étaient colorées en jaune ou en rouge (Gilly 1988).

Les boulidous non connectés au drain ne sont pas uniquement situés aux alentours du secteur d'« Eaux Bouillies » mais également à bien d'autres endroits du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes. Leur grand nombre contribue à augmenter de façon significative les quantités d'eau écoulées dans les cadereaux.

4.4.2. Première réflexion sur l'alerte

Introduction

Dans la mesure où une partie du réservoir souterrain se sature rapidement en période de crue et contribue ainsi aux ruissellements de surface pour générer les inondations, il apparaît opportun de d'identifier des indices de saturation de ce réservoir (et donc de risque) en fonction des conditions de pluie sur la zone d'étude.

Les boulidous connectés et déconnectés du drain seront traités séparément.

Boulidous non connectés au drain karstique

Afin de simuler leur comportement, le point Mas de Provence pour lequel une modélisation satisfaisante est disponible (§ 4.3.3 ci-dessus) a été retenu.

Les niveaux d'eau ont été simulés sur la période 1998-2006 au moyen de la chronique de pluie disponible pour cette période et de la fonction de transfert déterminée précédemment. On constate que le niveau d'eau simulé dépasse le niveau du sol lors de plusieurs évènements dont récemment ceux de septembre 2002, décembre 2003, novembre 2004 et septembre 2005 (Illustration 51).

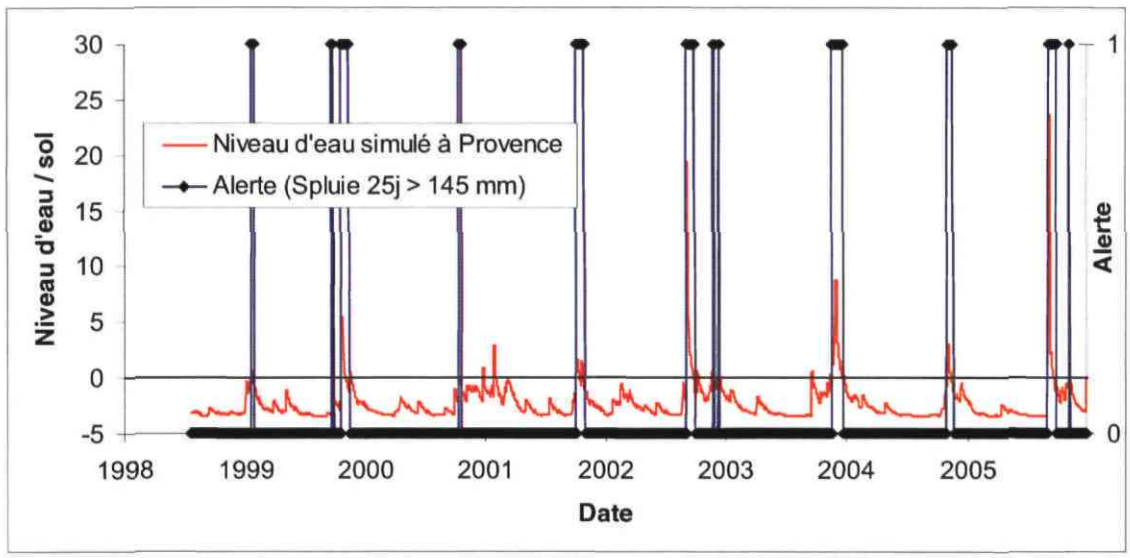


Illustration 51 : Niveau d'eau simulé à Provence par rapport au sol et déclenchement d'alerte pour un cumul de pluie sur les 25 jours précédents supérieur à 145 mm

Les occurrences de débordement du karst en ce point (niveau d'eau supérieur au niveau du sol) sont comparées aux conditions météorologiques.

Une alerte basée sur le cumul de pluie durant les jours précédant l'événement a été testée par une méthode d'essais et erreurs. La durée et le cumul de pluie les plus

pertinents obtenus sont respectivement de 25 jours et 145 mm. La durée est conforme au temps de transit de la composante lente de la réponse impulsionnelle (22 jours). Ceci signifie que tout cumul de pluie sur une durée de 25 jours dépassant 145 mm risque de générer une saturation et un débordement du karst au Mas de Provence. En l'absence d'autre information nous étendrons ce critère à l'ensemble des zones moins perméables du karst.

La réponse impulsionnelle déterminée ci-dessus à Mas de Provence permet de simuler le débordement du karst en ce point pour les principaux évènements pluvieux de 1988 et depuis 1998 (Illustration 52). Ils ont été divisés en trois classes selon le niveau de débordement simulé :

- débordement faible (< 5 m) ;
- débordement moyen (5 – 10 m) ;
- débordement fort (> 10 m).

On constate que les principaux évènements ayant provoqué un débordement des cadereaux (septembre 2002) ou une catastrophe (octobre 1988, 8 septembre 2005) à Nîmes ont été accompagnés d'un fort débordement simulé du karst. Bien que de pluviométrie inférieure (entre 100 et 150 mm), les évènements d'octobre 1999 et décembre 2003 provoquent un débordement tout de même non négligeable (entre 5 et 10 mètres) du karst suite à un état initial du karst de hautes eaux. Quel que soit l'état initial du karst, un événement inférieur à 100 mm ne provoque qu'un faible débordement du karst.

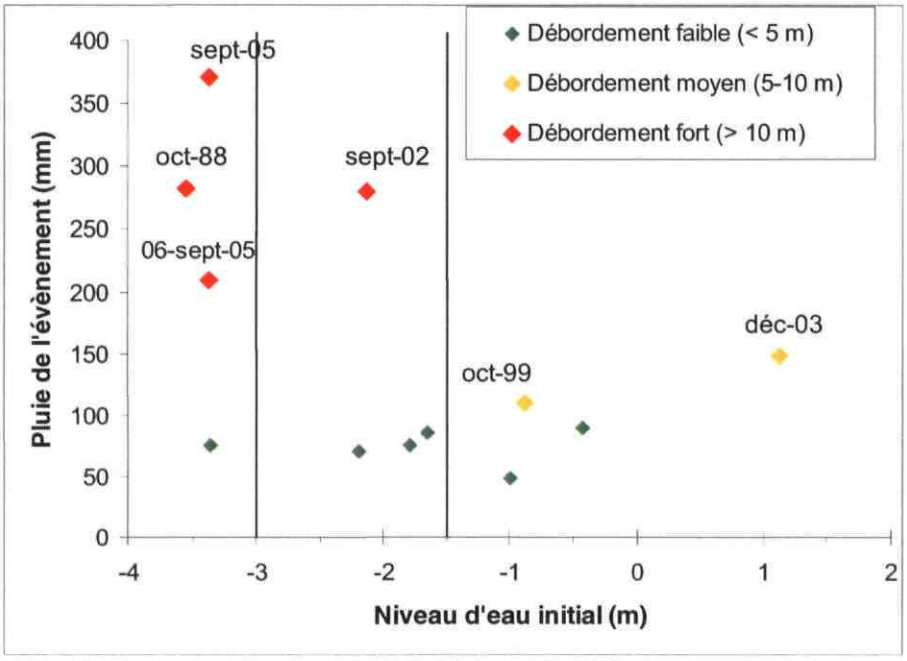


Illustration 52 : Simulations du débordement du karst au point Mas de Provence pour les principaux évènements pluvieux entre 1998 et 2005

Des évènements pluvieux d'une journée ont été simulés à Mas de Provence pour des états initiaux différents :

- basses eaux (niveau à 3,37 m sous le niveau du sol) : événement type septembre 2005 ;
- moyennes eaux (niveau à 2,13 m) : événement type septembre 2002 ;
- hautes eaux (niveau à 0,42 m) : événement type novembre 2004.

Ces résultats (Illustration 53) montrent que sur un karst en basses eaux, il faut un événement de 100 mm au moins pour provoquer un débordement du karst et de plus de 150 mm pour provoquer un débordement significatif. Sur un karst en hautes eaux, ces chiffres tombent à respectivement 50 et 100 mm. Quel que soit l'état initial du karst, un événement supérieur à 150 mm provoque un débordement significatif du karst.

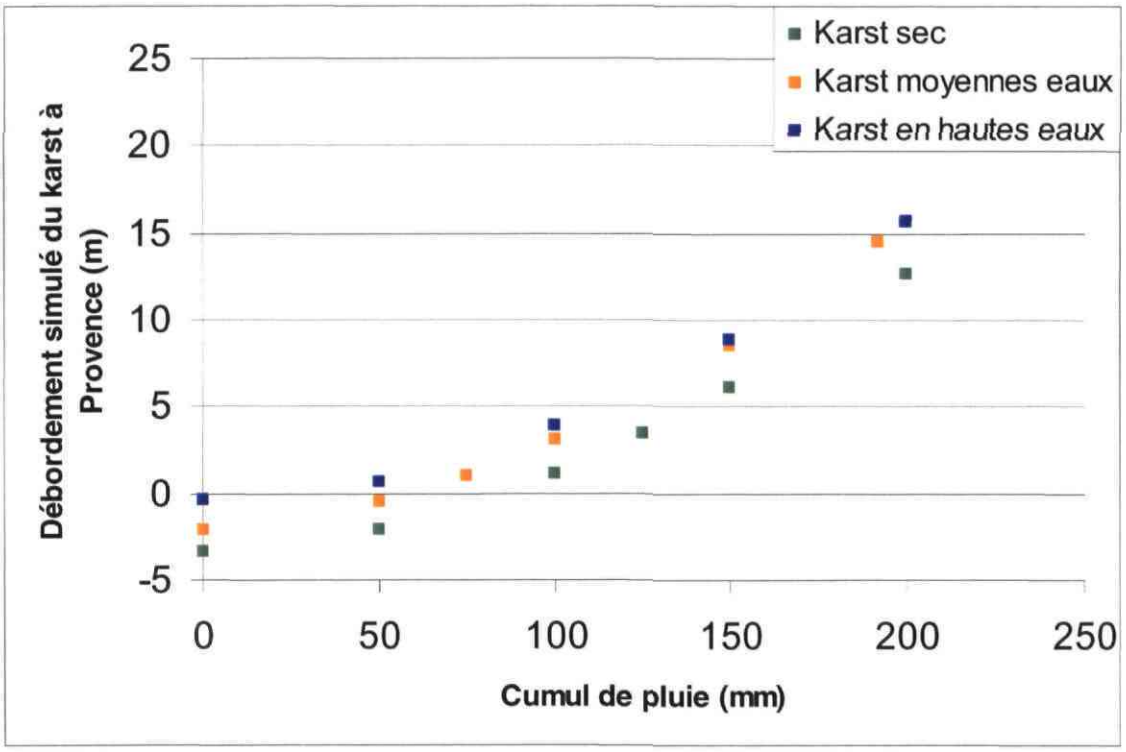


Illustration 53 : simulation de l'effet d'épisodes de pluie d'un jour sur le débordement du karst à Mas de Provence en fonction de son état initial (sec : niveau à 3,37 m sous le niveau du sol, moyennes eaux : niveau à 2,13 m, hautes eaux : niveau à 0,42 m)

Boulidous connectés au drain karstique

Pour les boulidous connectés au drain du type de celui du Puits de la Gafone, on se réfère à l'étude des débits classés de la Fontaine (§ 3.1) pour déterminer leur risque de débordement. Celle-ci a montré que des exutoires annexes connectés au système de drains karstiques se mettent en fonctionnement lorsque le débit de la Fontaine dépasse 13 m^3/s, ce qui correspond selon la courbe de tarage (Illustration 5) à l'Aven Mazauric à :

- une piézométrie de moins de 1,41 mètre depuis septembre 2005 ;
- une piézométrie de moins de 2,01 mètres avant septembre 2005.

Nous suggérons de considérer la première valeur (1,41 mètre) valable depuis le changement de la courbe de tarage en septembre 2005.

5. Perméabilité des sols

5.1. MESURES REALISEES

A partir de la carte géologique, 21 points ont été définis sur la zone englobant les bassins versants d'Alès – Camplanier à l'Ouest, et d'Uzès à l'Est (Illustration 54).

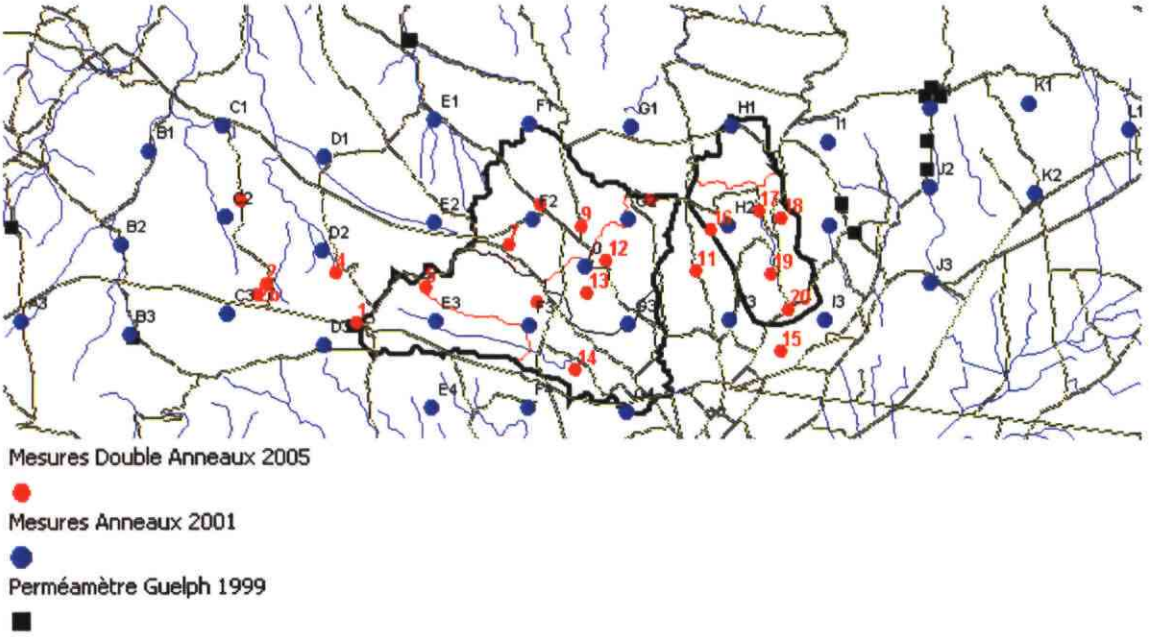


Illustration 54 : Répartition des points de mesure 1999 – 2001 - 2005

Ces 21 mesures sont complétées par les 17 mesures réalisées en 2001, à l'aide d'un système similaire (Condappa et al., 2001).

En outre treize mesures ont été réalisées en 1999 à l'aide d'un perméamètre de Guelph.

5.2. GEOLOGIE ET PERMEABILITE

Les formations géologiques rencontrées sont (Illustration 55) :

- N4a2/B : calcaire barutélien : 2 points
- N4a1/M : calcaires argileux, marnes : 6 points
- N3b : calcaires et marnes de l'Hauterivien supérieur : 6 points
- N3a : calcaires et marnes de l'Hauterivien inférieur : 4 points
- AC : alluvions – colluvions : 3 points

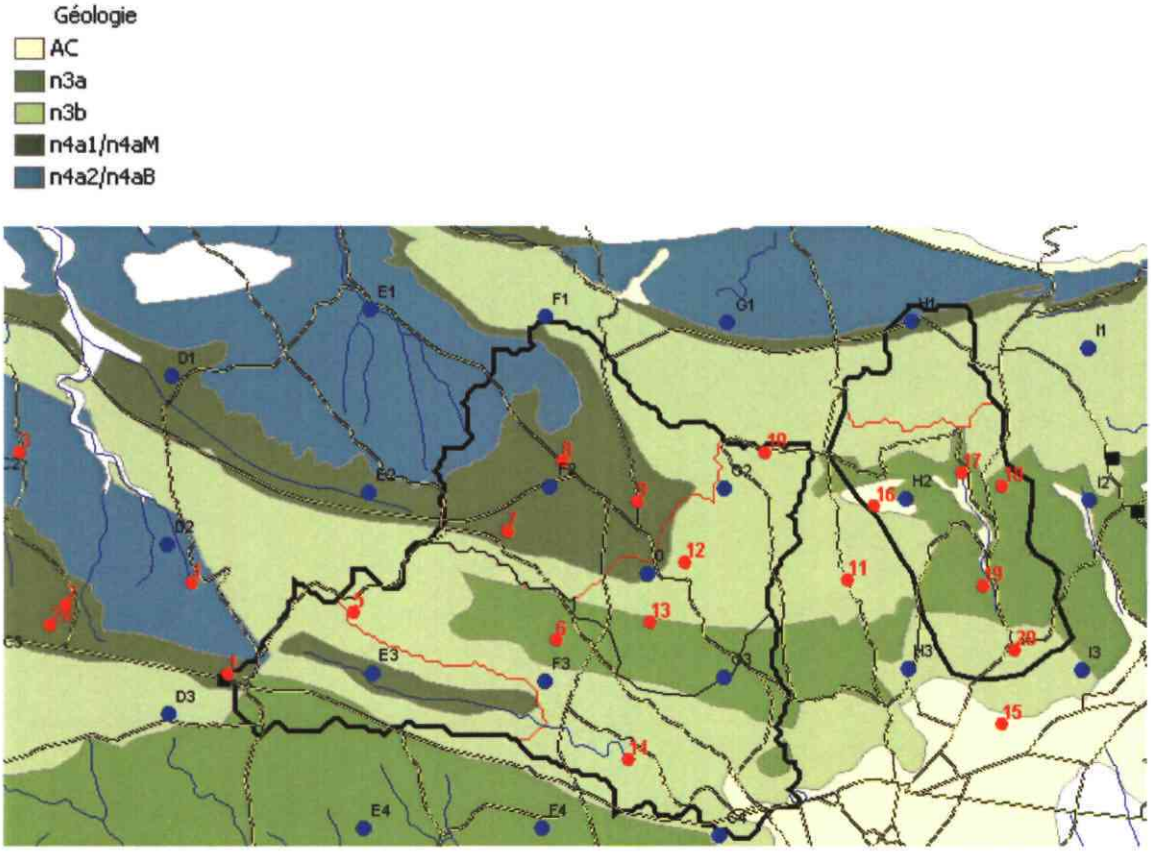


Illustration 55 : Géologie et perméabilité

Les mesures ont été réalisées sur des terrains plus ou moins anthropisés. Nous avons repris les mesures effectuées en 2001 par Condappa et al., après vérification de l'homogénéité entre les deux approches (Illustration 56).

Symbole	Nature des formations	Médiane 2005	Médiane 2001
AC	alluvions et colluvions	60	
n3a	calcaires et marnes	475	224
n3b	calcaire en bancs épais	93	192
n4a1/n4aM	calcaire argileux	364	162
n4a2/n4aB	calcaire	861	660

Illustration 56 : Perméabilité obtenues en 2005 en mm/heure

Les mesures faites sur les alluvions – colluvions sont discutables. En effet, pour deux points, il s'agit très probablement de sols remaniés, en milieu urbain.

Les formations géologiques n3b et n4a2/n4aB correspondent à des calcaires de type différents, mais très généralement affleurants. La présence de sols est anecdotique, et les mesures peuvent s'avérer particulièrement variables. En effet, une mesure de perméabilité effectuée dans une doline va donner des perméabilités plutôt faibles, du fait de l'accumulation d'argiles et limons, alors que globalement, on sait que ces formations calcaires affleurantes, fracturées et karstifiées sont totalement perméables. Le ruissellement y est inexistant, la totalité de la pluie s'infiltrant (communication P. Le Strat). On considérera donc ces formations comme très perméables, du fait de l'absence globale de sols pouvant freiner l'infiltration.

Les seules formations pouvant générer du ruissellement sont donc n3 a (calcaires et marnes) et n4a1/n4aM (calcaires argileux), ainsi que les alluvions/colluvions.

Les perméabilités mesurées sur les sols des formations n3a et n4a1 ne sont pas significativement distinctes (test de Student).

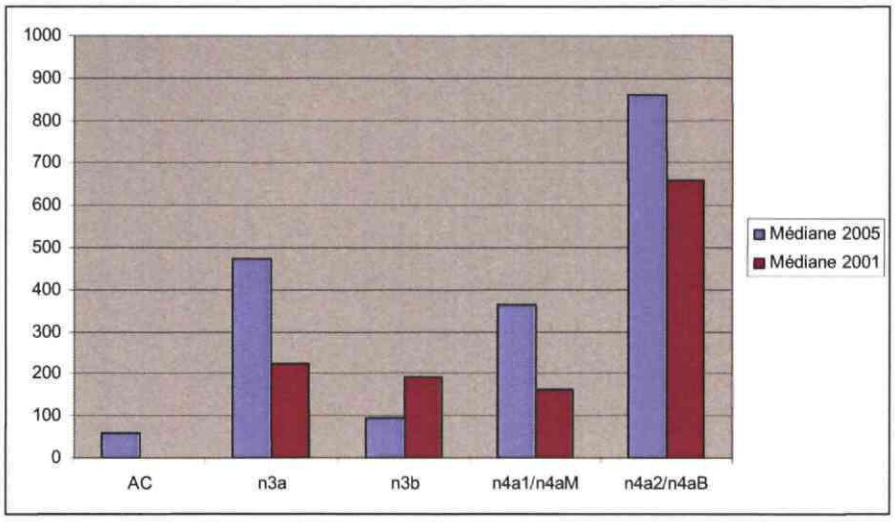


Illustration 57 : Perméabilité obtenues en 2001-2005 en mm/heure en fonction des formations géologiques

5.3. OCCUPATION DU SOL ET PERMEABILITE

L'occupation du sol est particulièrement marquée par l'urbanisation. Les exutoires des bassins versants sont totalement urbanisés (ville de Nîmes). En remontant on rencontre un habitat résidentiel, moins urbanisé, mais semble-t-il fortement imperméabilisé (surfaces construites, accès routiers, terrasses, sols très rarement retournés, donc fortement compactés).

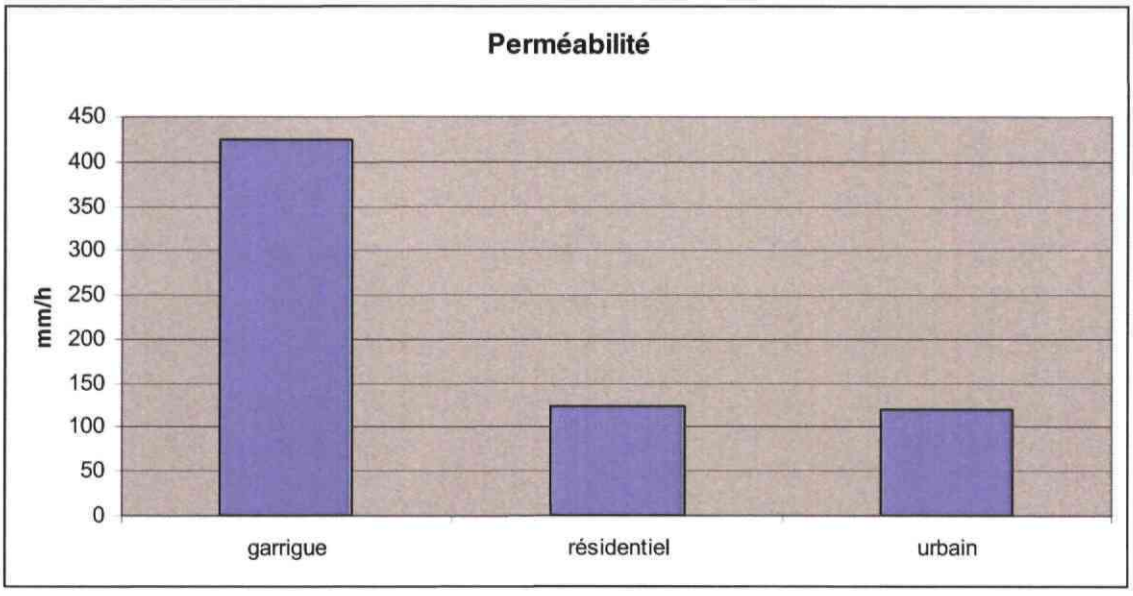


Illustration 58 : Perméabilité obtenues en 2001-2005 en mm/heure (occupation du sol)

On observe des valeurs médianes très proches en ce qui concerne les mesures réalisées en milieu urbain et en zones résidentielles (Illustration 58). Mais la différence entre ces mesures et celles réalisées sur garrigue n'est pas significativement différente, malgré l'écart constaté (425 mm/h en garrigue, 125 mm/h en zone anthropisée). Ceci s'explique par la très forte variabilité observée.

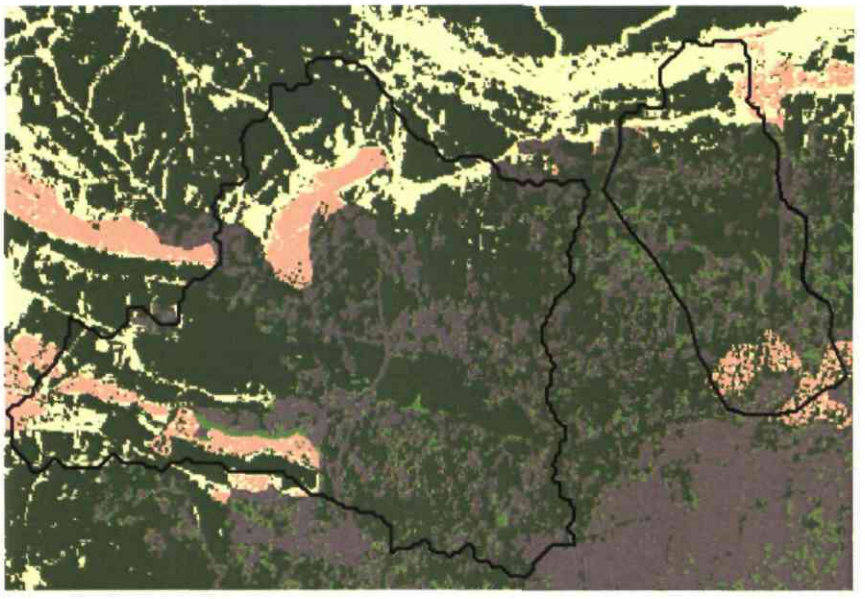


Illustration 59 : Classification SPOT (août 1998)

5.4. PERMEABILITE ET PEDOLOGIE

LA BD Sols de l'INRA a été acquise sur la zone d'étude, afin de prendre en compte les paramètres pédologiques disponibles (Illustration 60).

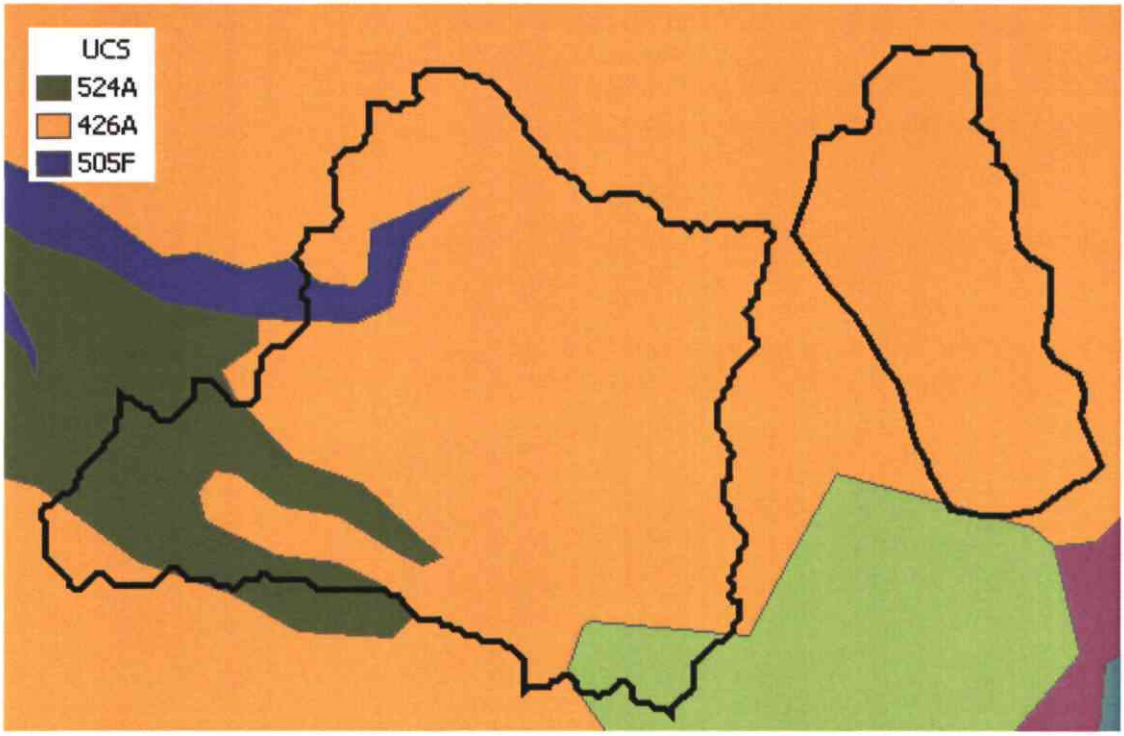


Illustration 60 : Base de données sols

Seules 3 Unités Cartographiques de sols couvrent la zone d'étude.

L'UCS 426A est ainsi décrite : « Replats et plateaux mollement vallonnés sur calcaires tendres à lits marneux et calcaires en plaquettes. Garrigues à chênes kermès et pins d'Alep. Ancien parcellaire épierré, murettes et pierriers nombreux. Oliveraies abandonnées (secteur gardois et Nord montpelliérains). Lithosol, affleurement rocheux nombreux. Rendzine grise et blanche. Sol brun calcaire dans micro-dépression.).

Elle est composée de 3 unités de sols : 424 (40%), 425 (55%)et 526 (3%).

L'unité 425 correspond :

(1) à des sols développés sur calcaires et des bancs marno-calcaires appartenant au crétacé inférieur. Défoncé sous vignes, oliviers. Pentes faibles à moyennes.
(2) A des sols moyennement profonds, parfois approfondis lors des plantations de vignes. Sol argilo-limoneux caillouteux à très caillouteux, très calcaire (40-50% en calcaire total) mais surtout à forte teneur en calcaire actif (10-15%).

On y trouve des vignes, de la garrigue à olivettes abandonnées, des chênes pubescents, des genêts. La profondeur varie de 30 à 70 cm (moyenne de 50 cm)

L'unité 424 correspond :

(1) Sol formé sur calcaires en plaquettes avec intercalations de bancs marno-calcaires. Pentes moyennes à faibles, replats. Garrigue à chênes kermés et pins d'Alep.
(2) Sol peu à moyennement épais (15-25 cm), limono-argilo-sableux, irrégulièrement caillouteux (20 à 60%), très calcaire (généralement 40-70%). Les variations du taux de carbonate dépendent de l'importance des niveaux marneux.

Elle est composée de garrigue, chênes, buis, genévriers, pelouse, pins d'Alep. La profondeur varie de 15 à 60 cm (moyenne de 20 cm)

L'UCS 524A est ainsi décrite : « Versants en pentes faibles des structures monoclinAlès sur calcaire en plaquettes faiblement karstifié. Pelouse xérophile, garrigues à chênes verts. Sol rouge rendziniforme, approfondissable, en couverture assez continue (20-40 cm). »

Elle est composée de 3 unités de sols : 518 (33%), 519 (33%) et 520 (34%).

L'unité 518 (33 % de l'UCS 524A) correspond :

(1) Sol sur calcaire en plaquettes souvent avec intercalations d'argile de quelques cm. Garrigue. Pente faible à moyenne.
(2) Sol moyennement profond (30-50 cm), argileux, rouge, à structure polyédrique. pH basique. Teneur en carbonates faible (3-8%). La complémentarité sol/substrat constitue un assez bon sol forestier dans le contexte régional.

Elle est composée de garrigues, chênaies, hermès. La profondeur moyenne est de 40 cm (minimum 30 cm).

L'unité 519 (33 % de l'UCS 524A) correspond :

(1) Sol formé sur calcaires en plaquettes, pente faible à moyenne. Chênaie.
(2) Sol peu épais, de 10 à 30 cm, brun rougeâtre, limono-sablo-argileux, peu caillouteux. pH basique. Teneur en matière organique moyenne. Calcaire total peu élevé (5-15%). Exploitation racinaire intense des lits argilo-limoneux

Elle est composée de garrigue, chêne kermès et pubescent, cistes, chênaies. La profondeur varie de 10 à 20 cm (moyenne de 15 cm)

L'unité 520 (34 % de l'UCS 524A) correspond :

(1) Absence de sol sur calcaire dur à débit en plaquettes. Végétation de garrigue basse. Pente faible.
(2) Affleurement du substratum avec parfois couverture de quelques cm de sol.

Elle est composée de garrigues basses. La profondeur moyenne est de 3 cm.

L'UCS 505F est ainsi décrite : « Pentes faibles et dépressions des bassins de remplissages marno-calcaires de l'Hérault et du Gard. Vigne, asperge et grande

culture. Sol brun calcaire colluvial, épais à très épais, à charge en éclats calcaires irrégulière, limoneux à limono-sableux. »

Elle est composée de 3 unités de sols : 512 (95%), 29 (3%) et 7 (2%).

L'unité 512 (95 % de l'UCS 524A) correspond :

(1) Sol développé sur colluvions épaisses à très épaisses recouvrant les pentes faibles et les dépressions creusées dans les formations marno-calcaires néocomiennes. Vigne, asperge et culture. Hérault. Gard.

(2) Sol profond à très profond dépassant parfois les 2-3 m d'épaisseur. Parfois très faible engorgement à la base. Profils très homogènes, limono-argilo-sableux, très calcaires, bruns-jaunes. Structure polyédrique.

Elle est composée de vignes, asperges, cultures, chênes verts. La profondeur varie de 60 à 200 cm (moyenne de 150 cm)

Conclusion

On a donc à travers la BD Sols une information en partie statistique et en partie cartographique.

Cependant, on peut considérer que sur :

- l'UCS 426A, les sols sont peu profonds (UTS 424 – 20 cm) à moyennement profonds (UTS 425 – 50 cm) ;
- l'UCS 524 A il y a soit une absence de sols (UTS 520 – 3 cm), soit des sols très peu profonds (UTS 519 – 15cm), soit des sols peu profonds (UTS 518 – 30 cm) ;
- l'UCS 505F, les sols sont profonds (UTS 512 – 150 cm).

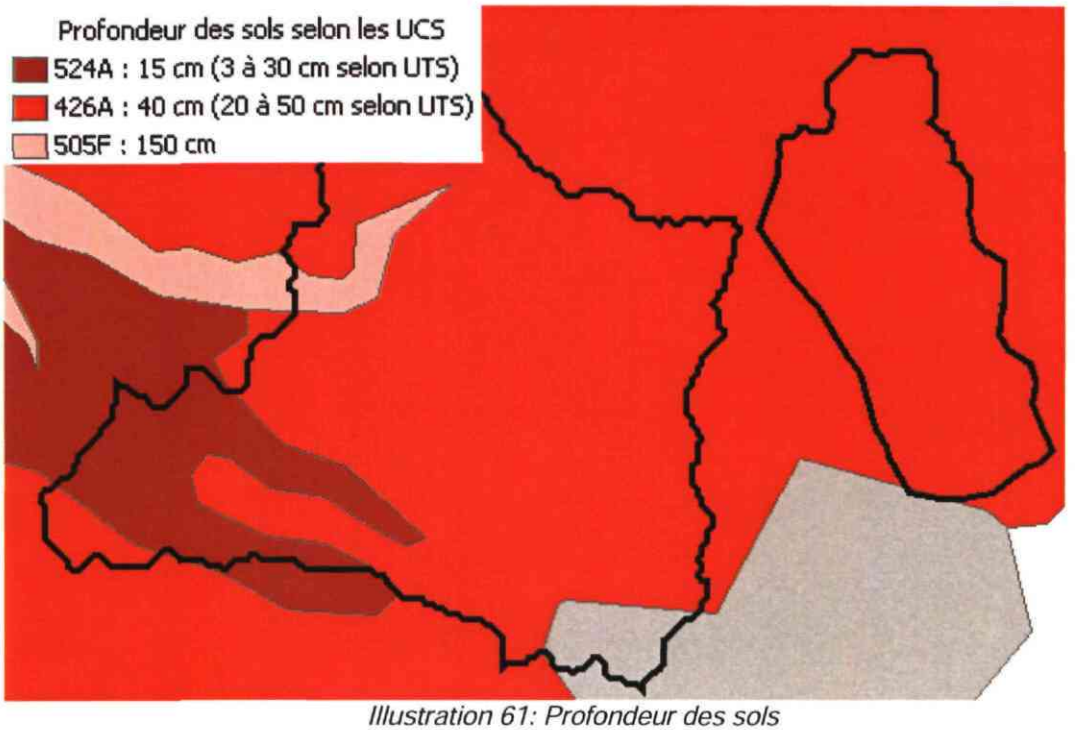


Illustration 61: Profondeur des sols

5.5. SYNTHESE

Globalement, on retrouvera des perméabilités très fortes sur les formations calcaires sub-affleurantes n3b et n4a2, et ce quelque soit l'occupation, exception faite bien sur des zones totalement imperméabilisées, en particulier lorsque les sols sont très peu épais.

Par contre, le ruissellement sur les formations n3a et n4a1, (calcaires argileux, marnes) sera beaucoup plus important, surtout sur des sols dont l'épaisseur ne sera pas négligeable : on distinguera alors les zones urbanisées ou résidentielles, qui présenteront un risque maximal de ruissellement, et les zones naturelles, où le risque sera intermédiaire.

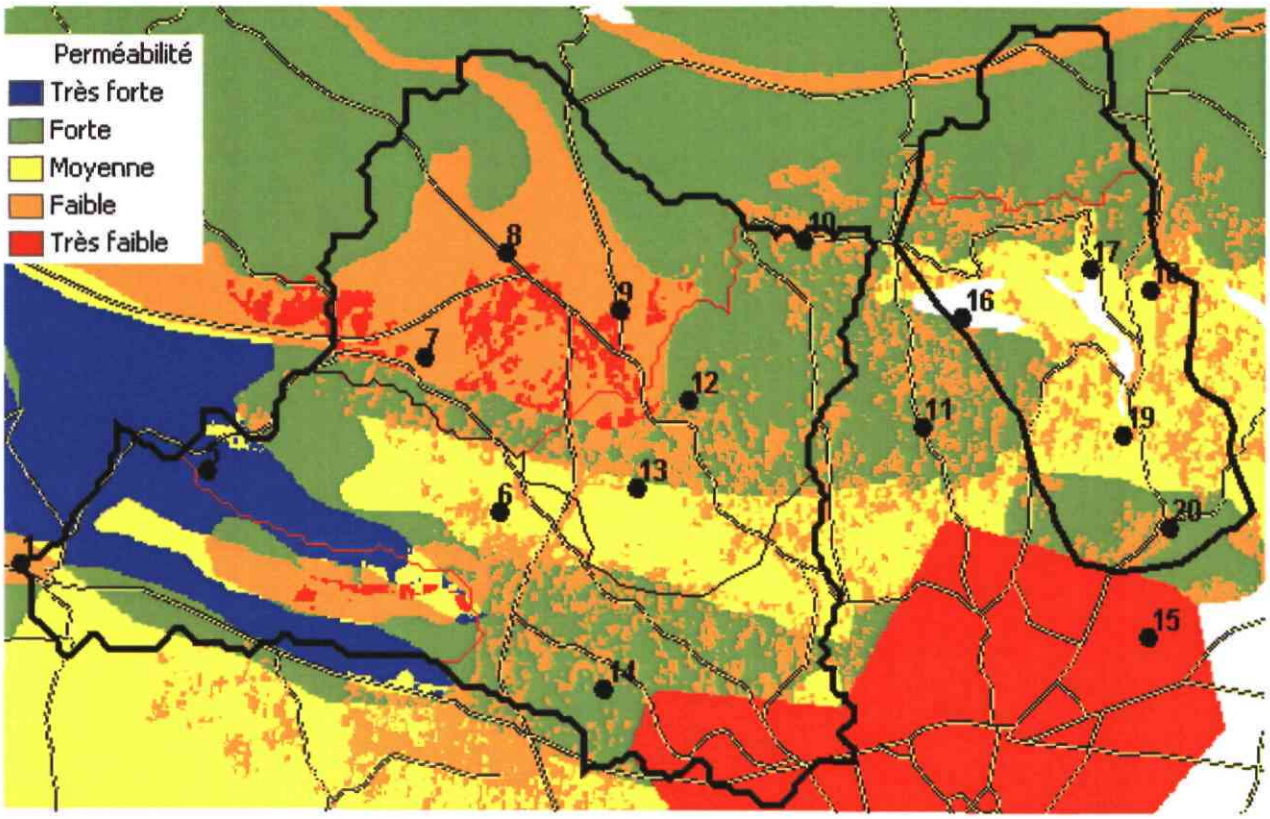


Illustration 62 : Synthèse de la perméabilité

6. Hydrochimie

Les premiers résultats géochimiques obtenus lors de l'étude préliminaire ((Maréchal, Ladouche et al. 2005)) suggéraient que la zone noyée du système karstique de la Fontaine de Nîmes développé dans les formations de l'Hauterivien supérieur pouvait être alimentée notamment en étiage, par une contribution d'eaux issues des formations du calcaire de l'Urgonien (n4bU). Ces premières interprétations géochimiques établies apparaissaient en désaccord avec les informations géologiques. Du point de vue géologique, il est en effet difficile d'étendre le bassin d'alimentation aux formations urgoniennes situées à l'Ouest du fossé de St-Mamert. 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.

Afin de lever les interrogations qui subsistent quant à l'éventuelle participation des calcaires Urgonien (n4bU) au fonctionnement de la Fontaine de Nîmes nous avons réalisé des analyses géochimiques complémentaires sur les points suivants (Illustration 63) :

- source du Roc située dans les calcaires Urgonien (n4bU) situés à l'Ouest du fossé de St-Mamert (1 échantillon) ;
- forage AEP Collias situé dans les calcaires Urgonien (n4bU) au Nord du bassin présumé de la Fontaine de Nîmes (1 échantillon) ;
- eau du piézomètre PZ3 situé à proximité de la décharge Lauzière (1 échantillon) ;
- eau de la Fontaine de Nîmes avant, pendant et après les épisodes de crue de septembre 2005 (8 échantillons) ;
- eau d'un boulidou dans le quartier « eaux bouillies » au cours de l'épisode de crue de septembre 2005 (1 échantillon).

En ce qui concerne les eaux de surface, les eaux des Cadereaux d'Alès et d'Uzès ont été échantillonnés à plusieurs reprises lors des épisodes des 6 et 8 septembre 2005 (7 échantillons pour le cadereau d'Alès, 4 échantillons pour le cadereau d'Uzès) afin de préciser les premières caractérisations de l'étude préliminaire (BRGM/RP-53827-FR).

Les eaux de pluie ont également été échantillonnées en vu d'analyse isotopique (oxygène 18 de l'eau) au cours de l'épisode de crue de septembre 2005 à l'aide d'un pluviomètre « incrémenteur » localisé au lieu dit « Terres de Rouvière ». (Illustration 63). Le dispositif de prélèvement permet d'échantillonner des épisodes de pluie inférieure à 154 mm. En conséquence, seul l'épisode de pluie du 06/09/05 a pu être partiellement suivi (215 mm de pluie ont été mesuré à la station Météo France de Courbessac au cours de l'épisode pluvieux du 06/09/05). L'épisode pluvieux du 08/09/05 n'a pas été échantillonné, le dispositif de prélèvement étant déjà rempli par les pluies du 06/09/05.

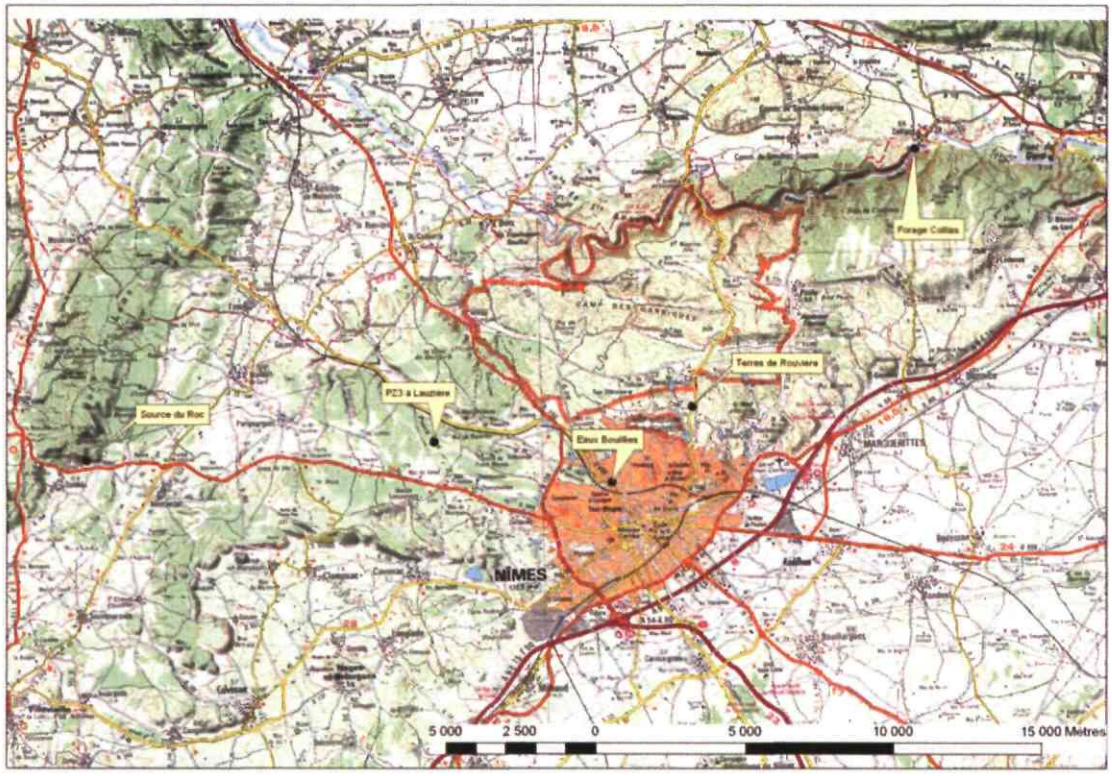


Illustration 63 : Localisation des points de mesures complémentaires pour l'étude hydrochimique

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

La caractérisation et la définition des différents pôles géochimiques de l'Hauterivien supérieur et inférieur, du Barutélien et du Barrémien a été réalisé dans l'étude préliminaire (Maréchal, Ladouche et al. 2005). Nous invitons le lecteur à se référer à ce rapport pour plus de détails.

Les prélèvements complémentaires réalisés au cours de l'année 2005 permettent d'apporter un éclairage nouveau pour la compréhension du fonctionnement géochimique de la Fontaine de Nîmes (Illustration 64).

L'eau du piézomètre PZ3 située à proximité de la décharge des Lauzières permet de mieux approcher la signature géochimique des eaux qui alimentent la zone noyée de la Fontaine de Nîmes. La signature géochimique de l'eau du piézomètre PZ3 apparaît nettement moins minéralisée que l'eau des lixiviats échantillonnés en 1998 et présente une signature isotopique en strontium différente (plus radiogénique). Ces nouveaux résultats permettent dorénavant d'exclure la participation des eaux des formations de l'Urgonien au fonctionnement du karst de la Fontaine de Nîmes. L'importante variabilité isotopique observée dans les eaux de la Fontaine de Nîmes en fonction du contexte

hydrologique peut être maintenant uniquement expliquée à l'aide des pôles géochimique « Lauzière » et par la signature des calcaires de l'Hauterivien. Il n'est pas nécessaire d'avoir recours à un autre pôle géochimique de type Urgonien par exemple.

En période de crue, la minéralisation des eaux de la Fontaine diminue ainsi que la signature isotopique en strontium. Les évolutions que l'on observe Illustration 65 et Illustration 66 indiquent que le phénomène de dilution est provoqué par des eaux qui ont transité par les formations de l'Hauterivien supérieur (n3b). Lors des périodes pluvieuses, les eaux de pluie s'infiltrent dans le karst (probablement les zones épikarstiques) de l'Hauterivien supérieur (n3b) et se mélangent avec les eaux initialement présentes dans la formation. Ce mélange d'eau interagit rapidement avec l'encaissant géologique et se charge notamment en calcium, bicarbonate et strontium. Les eaux de pluie infiltrées perdent alors leur signature isotopique en strontium « d'eau de pluie » et tendent à acquérir celle des formations géologiques dans lesquelles elles se sont infiltrées.

La signature isotopique en oxygène 18 des eaux de pluie (Illustration 67) de l'épisode du 06/09/05 apparaît globalement enrichie en isotopes lourds par rapport à l'eau préexistante dans la zone noyée avant la crue (échantillon n°1). La signature isotopique pondérée par les hauteurs d'eau présente une valeur de -7.1 ‰ vers 16h00 (heure TU) le 06/09/05. Les échantillons d'eau prélevés à la Fontaine au cours de l'épisode du 06/09/05 (échantillon n°2 et 3) sont enrichis en isotopes lourds par rapport à l'eau préexistante dans le système (échantillon n°1) ce qui dénote la participation de l'eau infiltrée dans le système au cours de l'épisode pluvieux. Le suivi partiel de la signature isotopique de la pluie au cours de cet épisode (150 mm de pluie on été caractérisé sur les 215 mm précipité) ne permet pas de définir avec précision la signature isotopique globale de la pluie qui contribue à la genèse de la crue. Néanmoins, en couplant les informations isotopiques du strontium et des isotopes stables de l'eau (oxygène 18), on peut estimer la signature géochimique du pôle d'eau nouvelle qui contribue au pic de crue de la Fontaine de Nîmes lors de la première crue (Illustration 68). Sur la base des résultats des isotopes stables de l'eau, on estime pour l'échantillon n°2 (7 :00 TU) que l'eau de la Fontaine est composée pour environ 46 % d'eau nouvelle en provenance de la zone épikarstique, la part restante (54 %) étant attribuée à l'eau préexistante dans le système avant la crue. Lors de la décrue (échantillon n°3) qui précède la seconde crue du 08/09/05 (prélevé à 10 :00 TU), la part de l'eau issue de la zone épikarstique apparaît largement majoritaire (73%). La décomposition au moyen des paramètres physico-chimiques avait précédemment donné au moment du prélèvement de :

- l'échantillon 2 : 52 % d'eau nouvelle et 48 % d'eau pré événementielle ;
- l'échantillon 3 : 73 % d'eau nouvelle et 37 % d'eau pré événementielle.

Ces résultats étant très proches ; ils permettent de valider les deux approches.

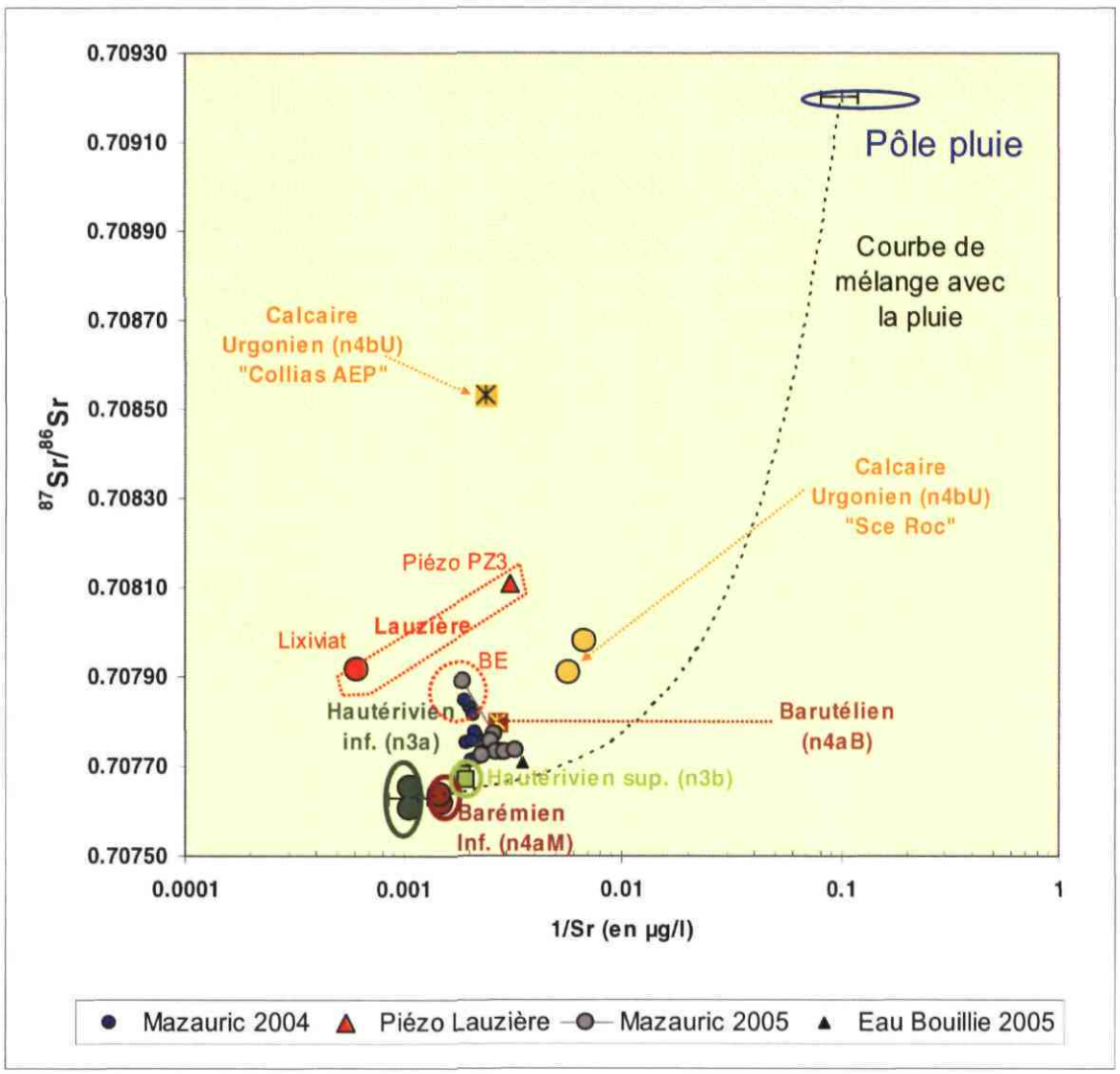


Illustration 64 : Représentation des points d'eau souterraine du système karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}Sr/^{86}Sr$ vs 1/Sr.

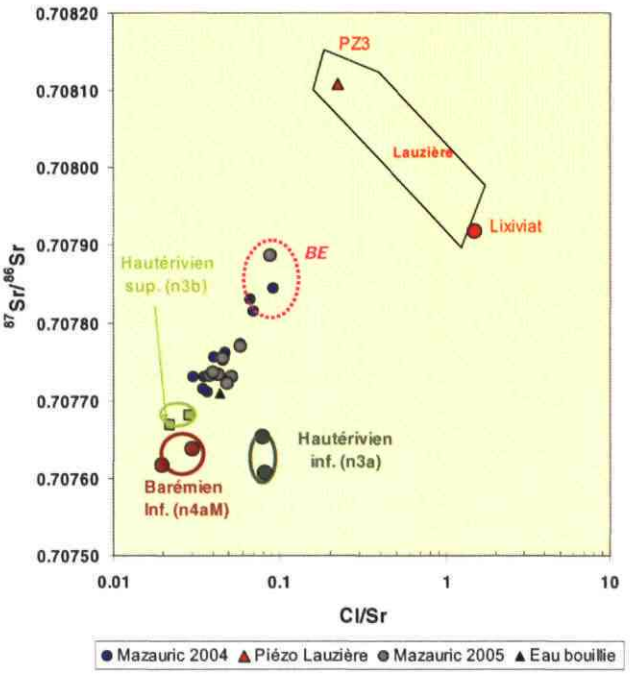


Illustration 65 : Représentation des points d'eau souterraine du système karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}Sr/^{86}Sr$ vs Cl/Sr.

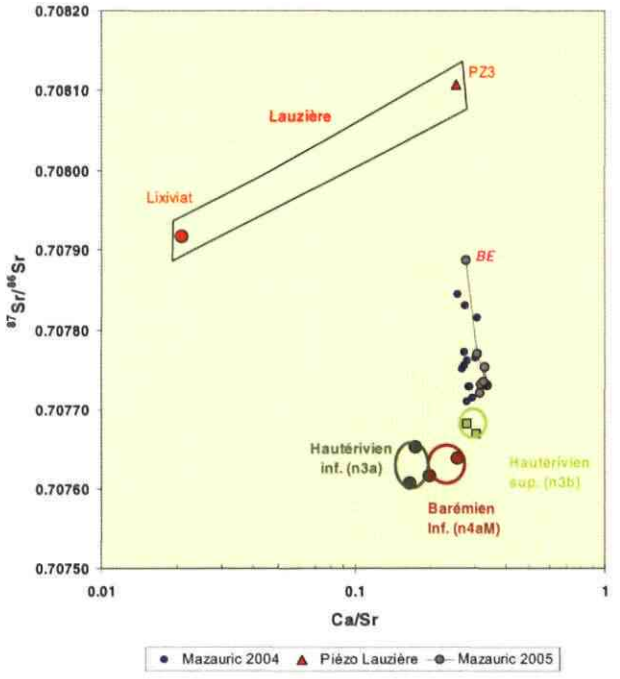


Illustration 66 : Représentation des points d'eau souterraine du système karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}Sr/^{86}Sr$ vs Ca/Sr.

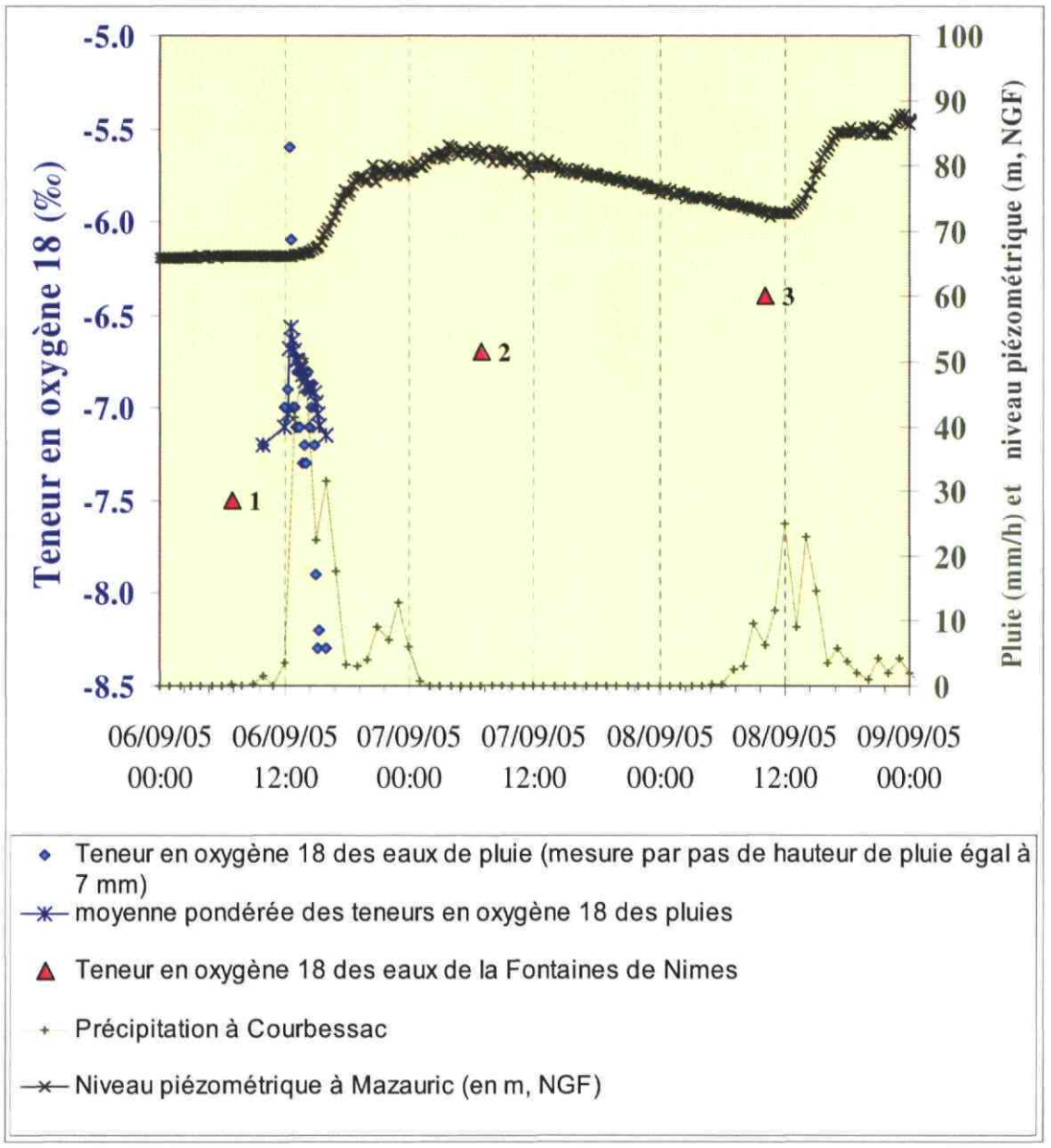


Illustration 67 : Evolution temporelle des teneurs en oxygène 18 des eaux de pluies et des eaux de la Fontaine de Nîmes au cours de l'épisode de crue du 06/09/05. Les évolutions de la pluviométrie de Nîmes Courbessac (Météo France) et du niveau piézométrique da l'aven Mazauric sont également reportées.

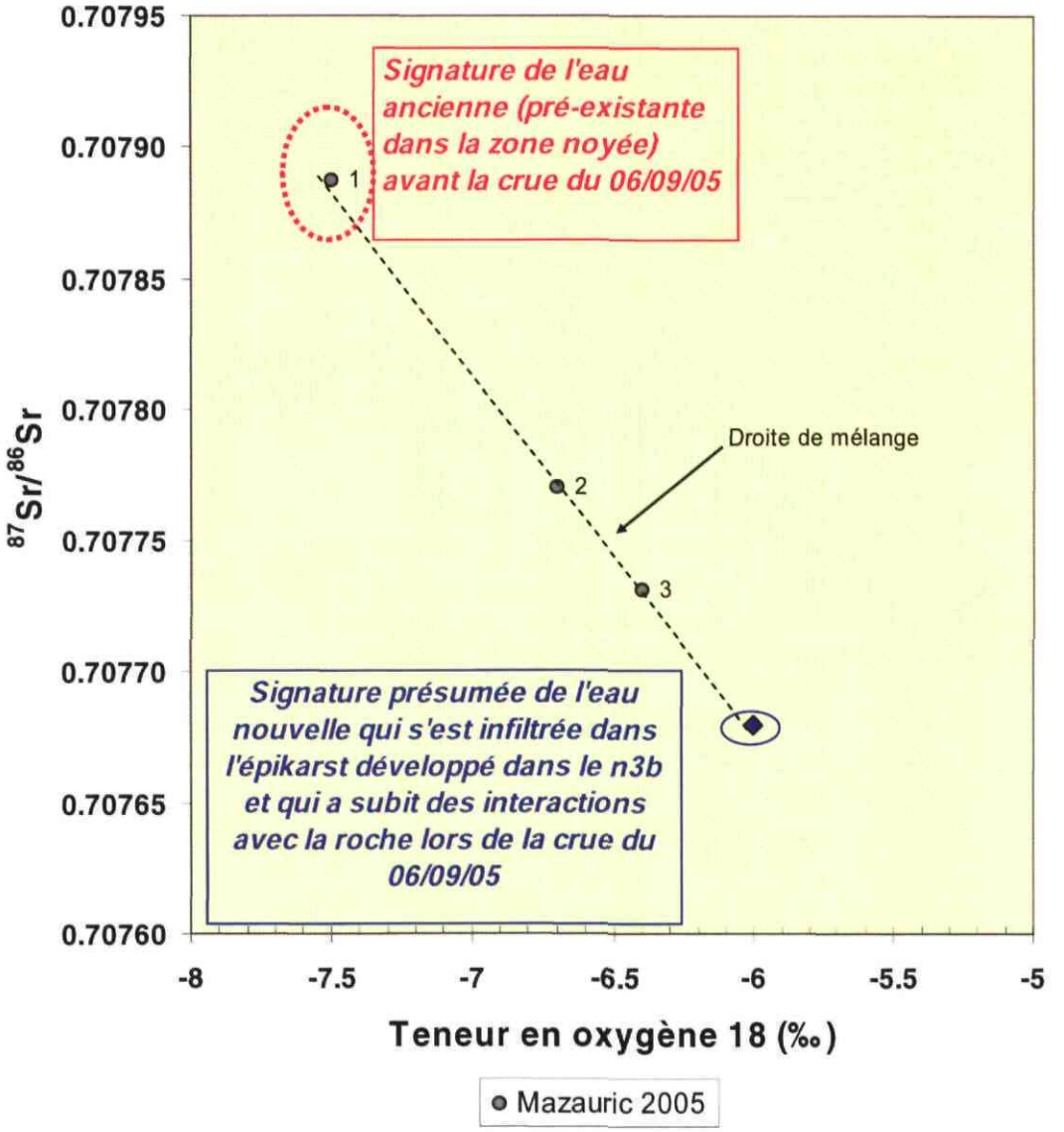


Illustration 68 : Evolution des teneurs isotopiques en strontium et des teneurs en oxygène 18 des eaux de la Fontaine de Nîmes au cours de l'épisode de crue du 06/09/05.

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

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 des crues du mois de septembre 2005 concernent donc le cadereau d'Alès (7 prélèvements réalisés au niveau de la maison de M et Mme Robert sous le Pont des 9 Arcades) et le cadereau d'Uzès (4 prélèvements réalisés à la sortie du bassin de rétention de Calvas (« Oliveraie ») par M Garrelly).

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 éléments majeurs, les isotopes du strontium et de la molécule d'eau (oxygène 18). Pour étudier les interactions eaux de surface/eau souterraine à l'aide de l'approche des isotopes du strontium, il faut prendre en considération de manière explicite la composante « eau de 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.

Nous présentons les évolutions temporelles des teneurs en bicarbonate, calcium, bore, strontium chlorure et nitrate mesurées dans les eaux de surface des cadereaux d'Alès et d'Uzès au cours des crues de mois de septembre 2005 (Illustration 70, Illustration 71 et Illustration 72).

Le 6 septembre 2005 en tout début de crue (vers 14h30), les premières eaux qui s'écoulent dans les cadereaux sont peu minéralisées mais apparaissent toutefois plus minéralisées que les eaux de pluie. Les teneurs en calcium et strontium sont respectivement supérieures à 39 mg/l et 100 µg/l ce qui indique que les eaux de pluie ont déjà subi des interactions avec les roches et se sont chargées en calcium et strontium. Les signatures isotopiques en strontium des eaux sont très différentes de celle de l'eau de pluie (0.70920) et tendent vers celles des calcaires de l'Hauterivien (0.70768).

Les teneurs en oxygène 18 des premières eaux échantillonnées dans les cadereaux ($\delta^{18}O$ = -5.9 ‰ et $\delta^{18}O$ = -6.1 ‰ pour Alès n°1 et Uzès n°1, respectivement) sont plus enrichies en isotope lourds que la signature de l'eau de pluie qui a déjà précipité (signature isotopique pondérée = -6.6 ‰, 42 mm de pluie précipité à 14h30). Ces résultats permettent de montrer que l'eau qui s'écoule dans les cadereaux en début de crue le 06/09/05 n'est pas uniquement composée d'eau de pluie. Il s'agit d'un mélange entre l'eau de pluie et l'eau préexistante dans le système avant la crue.

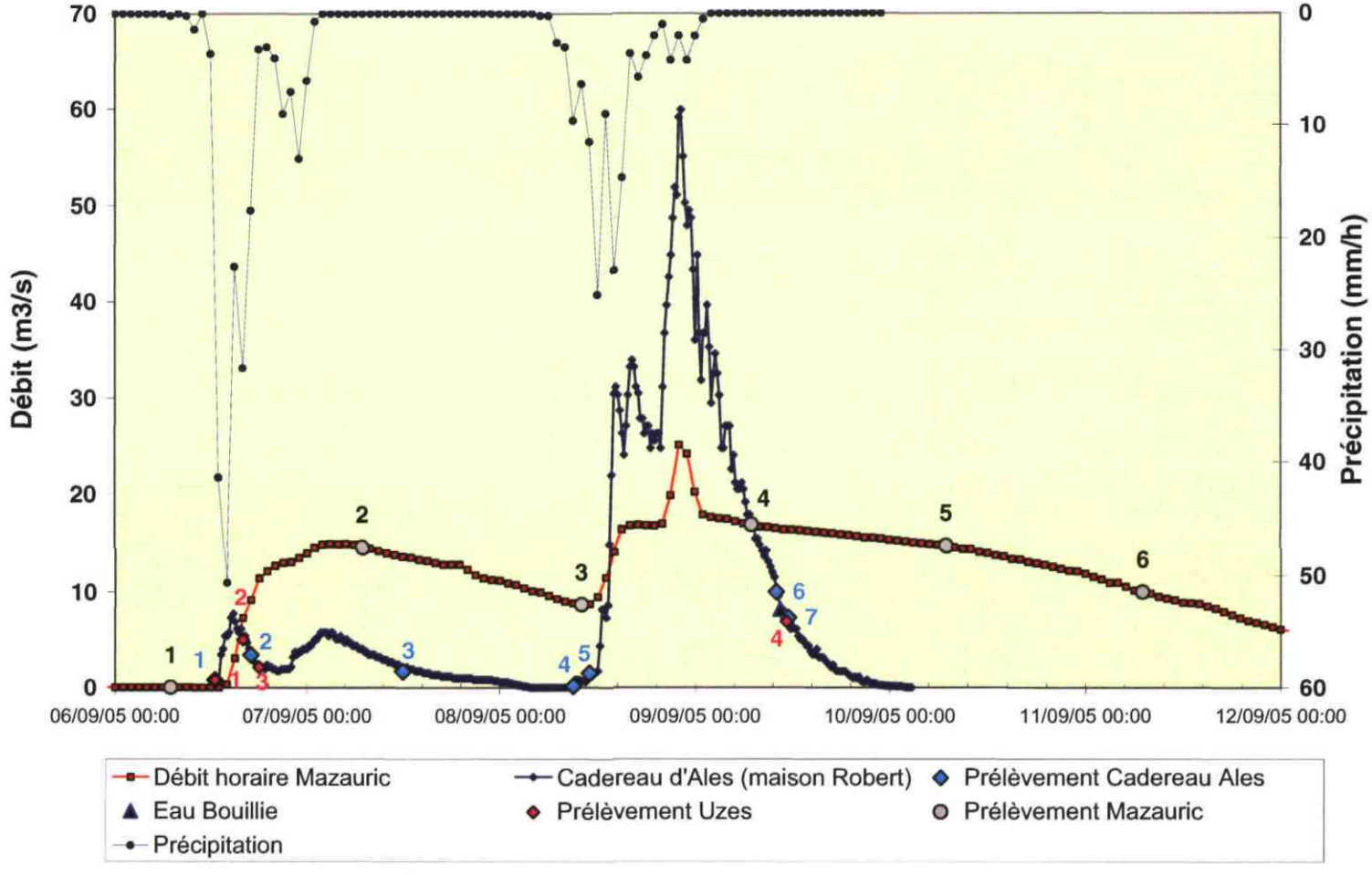


Illustration 69 : Evolution temporelle des débits mesurés à la fontaine de Nîmes et au cadereau d'Alès (Maison Robert) en fonction de la pluviométrie (Pluie horaire de la station météo France de Courbessac). Le report des dates de prélèvement des points d'eau de surface (cadereaux d'Alès et d'Uzès) et de la Fontaine de Nîmes et du point « Eau bouillie » sont présentées.

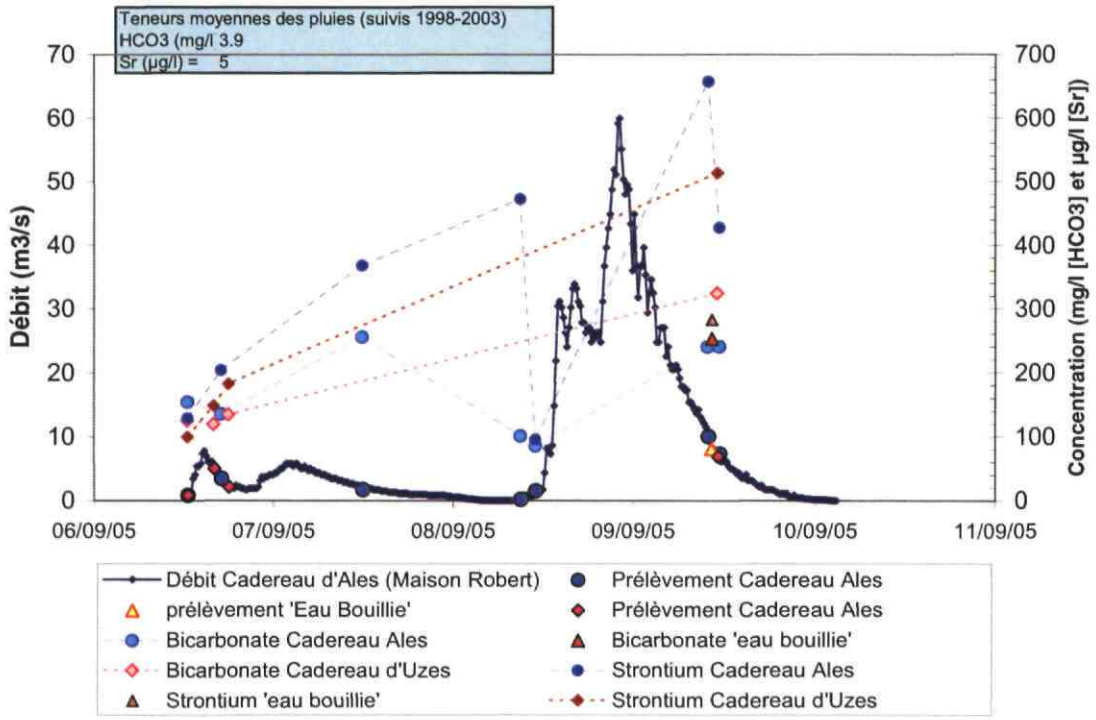


Illustration 70 : Evolution temporelle des débits mesurés à la Fontaine de Nîmes et au cadereau d'Alès (Maison Robert) et des concentrations en bicarbonate (HCO3) et en strontium (Sr) mesurées dans les eaux.

Nous ne disposons pas d'échantillon aux pics de crue. Les analyses disponibles permettent seulement de montrer que lors des décrues, l'eau qui s'écoule dans les cadereaux est très minéralisée, les teneurs en bicarbonate atteignent les 250 mg/l dans le cadereau d'Alès et dépassent les 400 µg/l pour le strontium (échantillon n° 3, 7 et 8, Illustration 70). Les teneurs en calcium et en bore sont importantes (> 100 mg/l et >30 µg/l pour le calcium et bore respectivement, Illustration 71). Les teneurs en chlorures et nitrates sont importantes (> 10 mg/l et >20 mg/l pour le chlorure et le nitrate respectivement, Illustration 72). Les eaux présentent des rapports isotopiques en strontium proche des valeurs de l'Hauterivien supérieur (Illustration 73). Le calcul des indices de saturation indiquent que les eaux sont proches de l'équilibre vis-à-vis de la calcite. Les résultats indiquent donc que les eaux qui s'écoulent dans les cadereaux sont évoluées chimiquement mais ne présentent pas la signature des eaux du drain karstique prélevées à la Fontaine de Nîmes. A titre d'illustration, les eaux du cadereau d'Alès le 09/09/05 vers 12h00 se distinguent nettement des eaux de la Fontaine de Nîmes, du cadereau d'Uzès et de l'échantillon « eau bouillie » (Illustration 74).

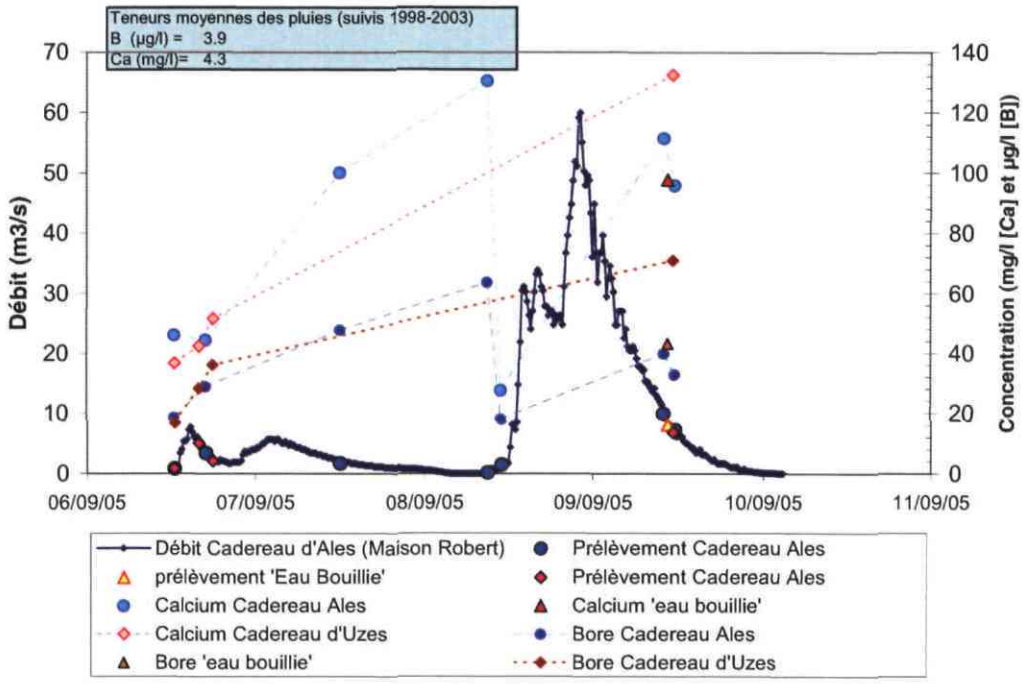


Illustration 71 : Evolution temporelle des débits mesurés à la fontaine de Nîmes et au cadereau d'Alès (Maison Robert) et des concentrations en Bore (B) et en calcium (Ca) mesurées dans les eaux.

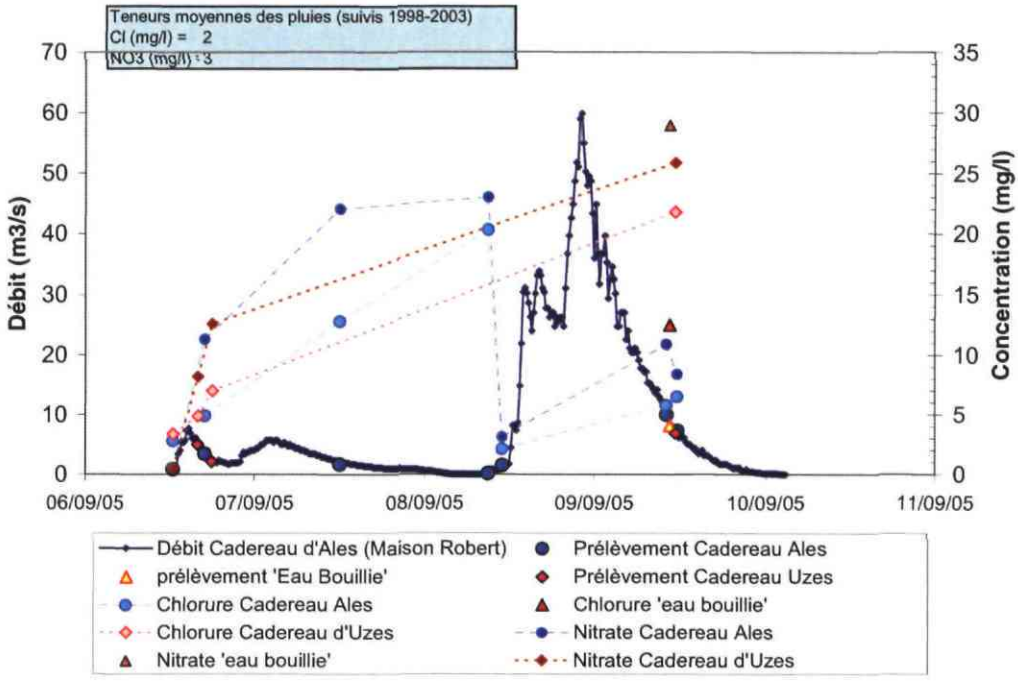


Illustration 72 : Evolution temporelle des débits mesurés à la fontaine de Nîmes et au cadereau d'Alès (Maison Robert) et des concentrations en chlorure (Cl) et en nitrate (NO3) mesurées dans les eaux.

Les résultats de l'Illustration 74 permettent de suggérer que l'échantillon « eau bouillie » est à rattacher aux écoulements de débordement (boulidou) des formations de l'Hauterivien inférieur (n3a) au sein duquel le boulidou est situé. L'écoulement du cadereau d'Uzès apparaît également à rattacher aux eaux issues de cette formation qui est majoritaire dans ce bassin versant et située à proximité de l'exutoire. L'écoulement du cadereau d'Alès le 09/09/05 apparaît être principalement issu des formations de l'Hauterivien supérieur (n3b). Néanmoins, les suivis géochimiques réalisés sur le cadereau d'Alès indiquent une évolution complexe lors des épisodes de crue de septembre. Les résultats de l'Illustration 75 suggèrent que l'écoulement du cadereau d'Alès était principalement composé d'eau en provenance des formations de l'Hauterivien inférieur (n3a) situé à l'aval du bassin versant lors de la première crue et au début de la seconde crue. La contribution majoritaire des eaux issues de l'Hauterivien supérieur (n3b) situé à l'amont du bassin versant ne semble se produire que logiquement plus tard lors de la seconde décrue. Ceci est confirmé par les débits dans le cadereau (Illustration 76) qui montrent que le débit au Pont des 9 Arcades est égal au débit à Espesses au moment du prélèvement des échantillons 6 et 7, ce qui veut dire que l'eau prélevée au Pont des 9 Arcades (échantillons 6 et 7) provient alors uniquement de la zone située à l'amont d'Espesses et que la contribution des boulidous du n3a est négligeable.

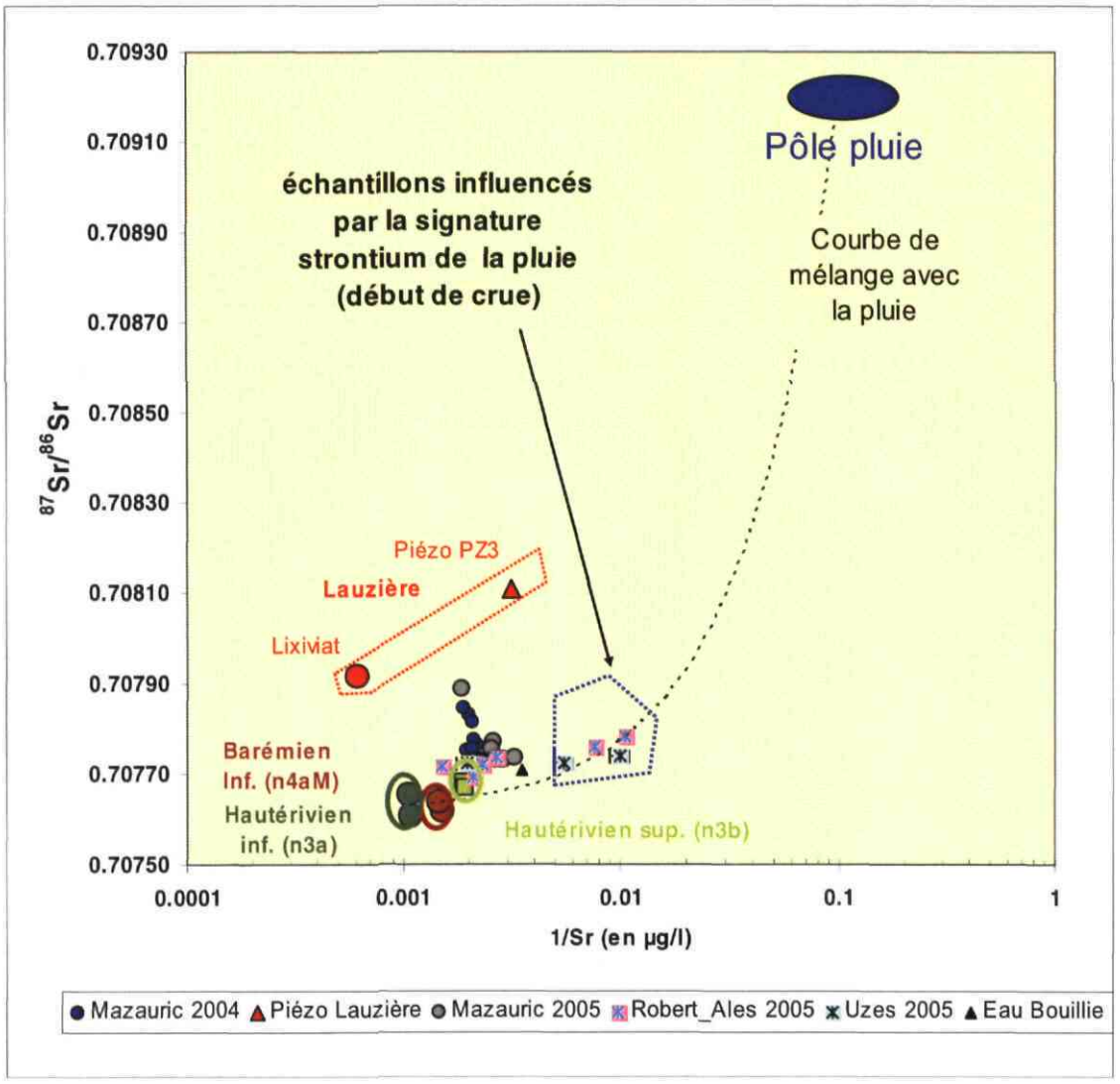


Illustration 73 : Représentation des points d'eau souterraine et de surface du système karstique de Nîmes dans un diagramme $^{87}Sr/^{86}Sr$ vs 1/Sr.

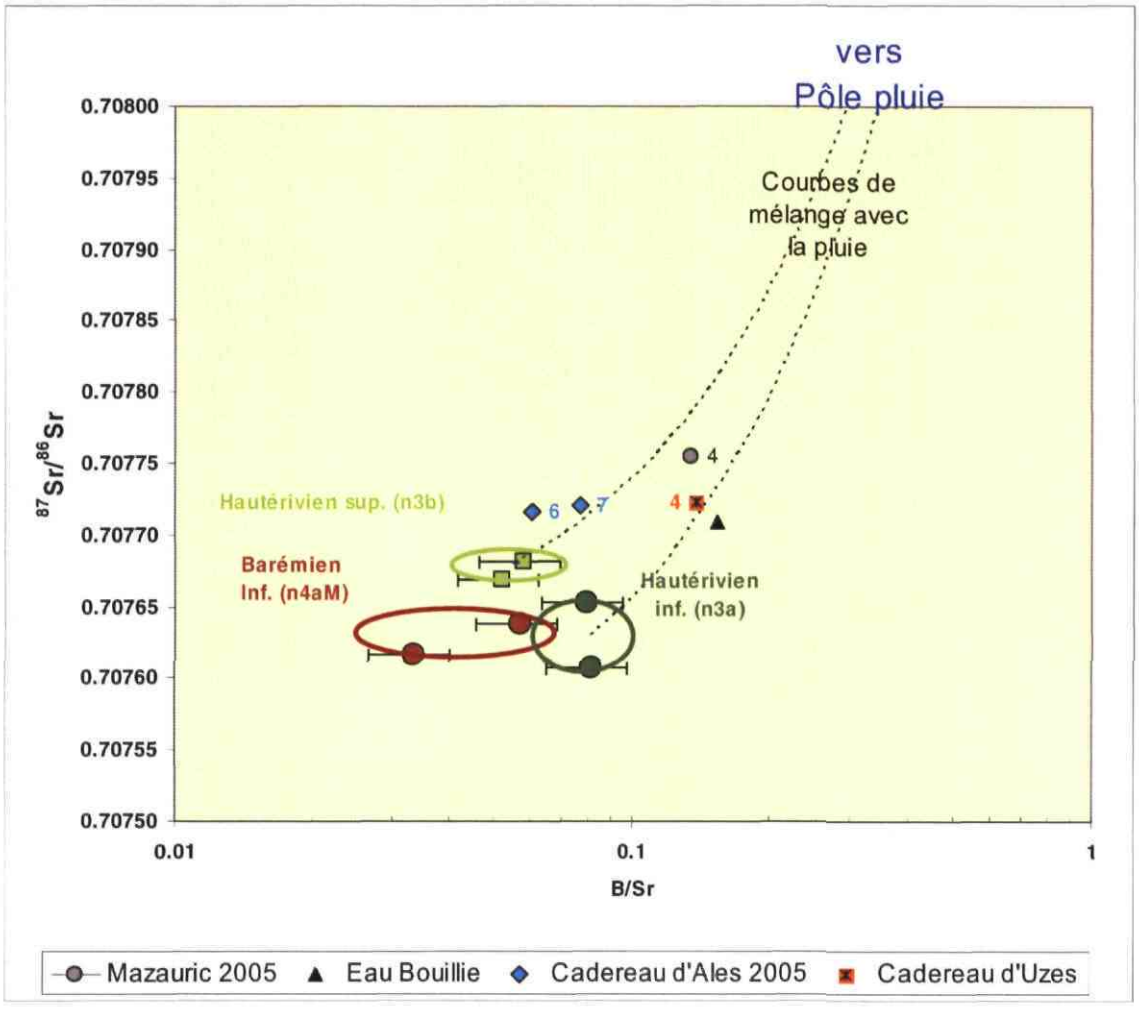


Illustration 74 : Signature géochimique des eaux de surface et souterraine du système karstique de Nîmes le 09/09/05 vers 12h00 dans un diagramme $^{87}Sr/^{86}Sr$ vs B/Sr.

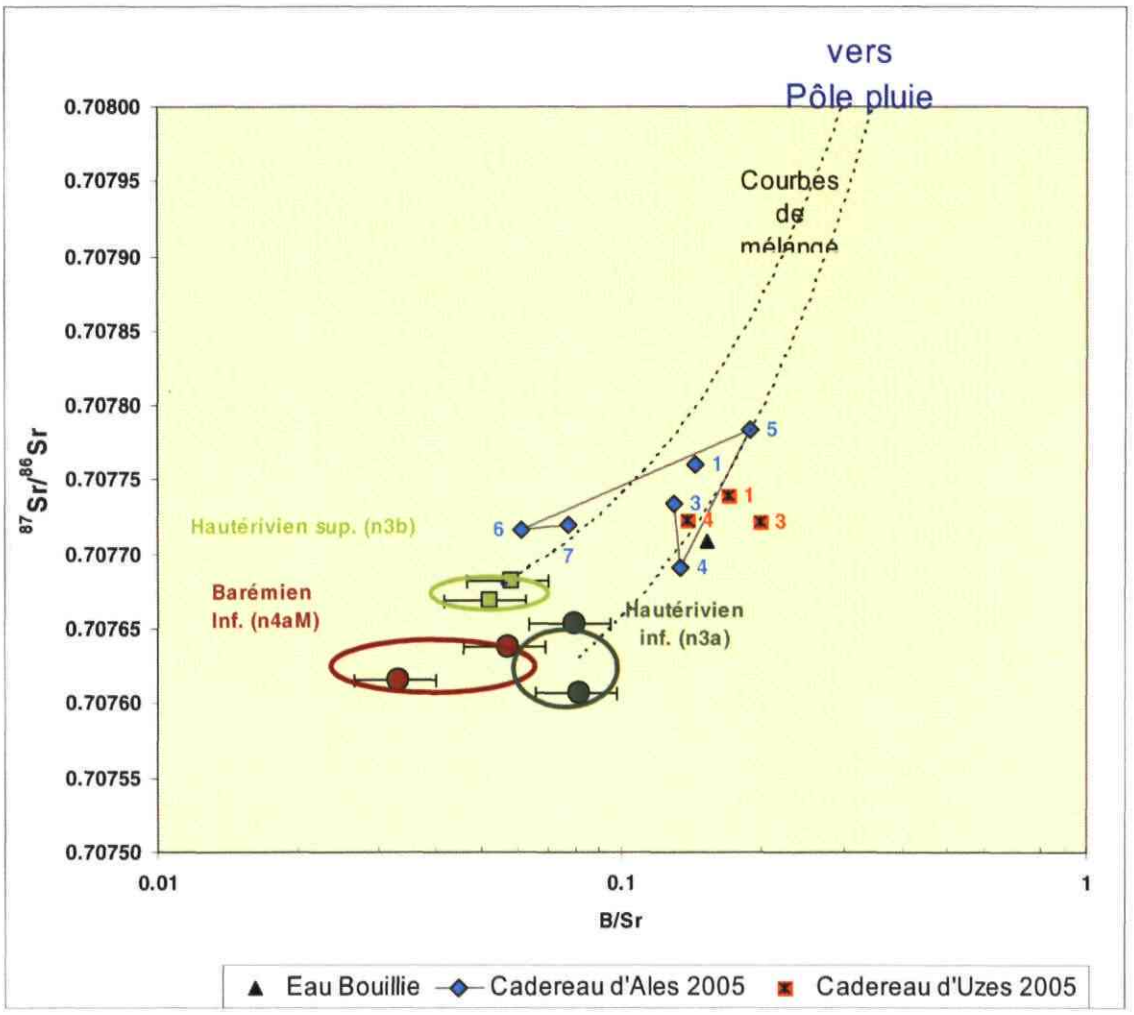


Illustration 75 : Signature géochimique des eaux de surface du système karstique de Nîmes lors des crues du mois de septembre 2005 dans un diagramme $^{87}Sr/^{86}Sr$ vs B/Sr.

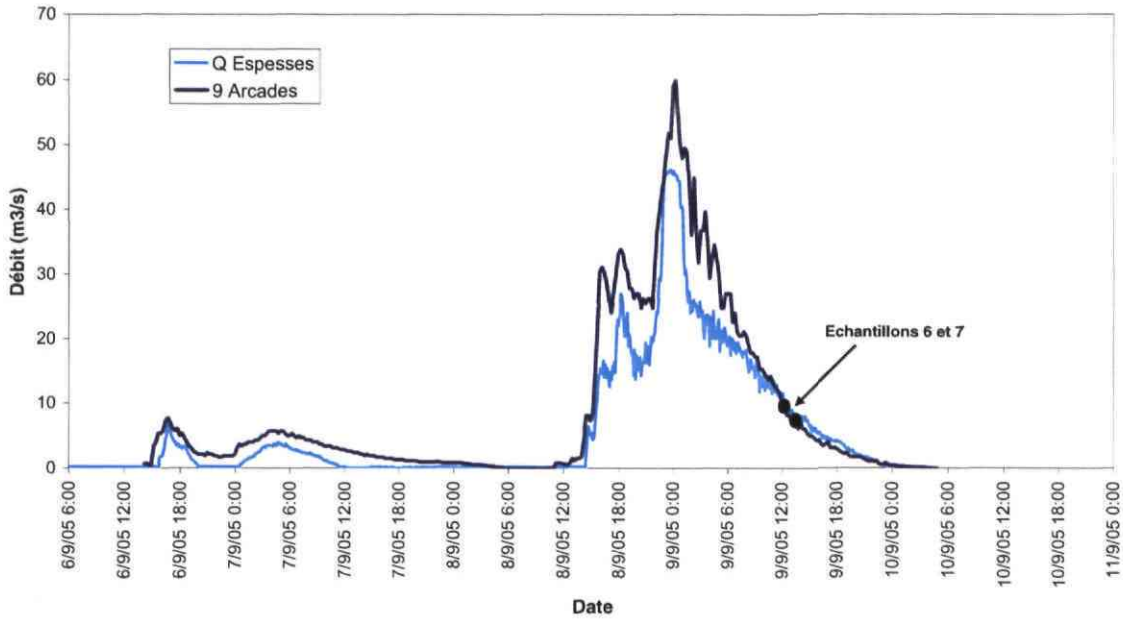


Illustration 76 : Débits du cadereau d'Alès à Espesses et au Pont des 9 Arcades en septembre 2005

6.3. SYNTHESE

Les résultats géochimiques obtenus lors des campagnes de suivis de crue de septembre 2005 (pluie, eaux de surface et eaux de la Fontaine), et notamment les résultats des isotopes stables de l'eau, apportent des éléments d'informations nouveaux et complémentaires sur le fonctionnement hydrogéologique complexe de ce système karstique. L'éclairage porte principalement sur les points suivants :

- lors des crues, l'écoulement de la Fontaine de Nîmes apparaît en majorité issu des eaux nouvelles infiltrées dans les zones épikarstiques du système karstique (de 54% à 73 %, d'après les estimations ponctuelles réalisées) ;
- les écoulements de surface dans les cadereaux apparaissent eux aussi principalement composés de la composante « eau nouvelle » ayant cependant transité par le karst, la part du ruissellement direct de la pluie (faiblement minéralisée) sur les surfaces imperméables des bassins versants étant très faible. La composante « eau nouvelle » qui transite par les zones épikarstiques ne présente pas les caractéristiques chimiques et isotopiques des eaux de pluie. En effet, l'eau de pluie qui s'infiltre évolue rapidement en raison (1) du phénomène de mélange avec l'eau préexistante présente au sein de l'épikarst et (2), en raison des interactions eau-roches (dissolution des carbonates). Le premier phénomène permet d'expliquer les teneurs significatives en chlorures et nitrates et bore (marqueurs de pollution anthropique) observées dans les eaux de surface. Les teneurs importantes en calcium, magnésium, bicarbonate et strontium permettent

d'expliquer le deuxième phénomène (interaction eaux-roches). Les réactions de dissolution sont très rapides puisque les eaux de surface échantillonnée présentent des indices de saturation proche de l'équilibre voire même sont légèrement sursaturées par rapport à la calcite (IS>0) ;

- les évolutions des signatures isotopiques du strontium des eaux de surface et des eaux souterraines semblent indiquer que les eaux qui s'écoulent dans les cadereaux à un instant donné sont différentes de celle du drain karstique ;
- les résultats semblent indiquer que les eaux du cadereau d'Uzès sont principalement à attribuer aux écoulements issus des formations de l'Hauterivien inférieur (n3a). Pour le cadereau d'Alès, l'évolution apparaît complexe. Les résultats suggèrent que l'écoulement du cadereau d'Alès était principalement composé d'eau en provenance des formations de l'Hauterivien inférieur (n3a) lors de la première crue et au début de la seconde crue. La contribution de l'Hauterivien supérieur (n3b) devient très largement majoritaire lors de la seconde décrue. L'origine des eaux de l'échantillon « eau bouillie » est à attribuer aux écoulements issus des formations de l'Hauterivien inférieur (n3a).

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 77) 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. Il s'agit d'une adaptation (peu modifiée) de la première ébauche de modèle présentée lors du précédent rapport (Maréchal, Ladouche et al. 2005).

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 et du précédent rapport (Maréchal, Ladouche et al. 2005), est synthétisé et illustré dans ce modèle conceptuel.

7.2. STRUCTURE

Le système karstique de la Fontaine de Nîmes est un karst gravitaire[3] unaire[4]. 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 ;

---

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

[4] 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

- le réseau nord dans le prolongement duquel se situe le puits des 9 Arcades dans le cadereau d'Alès (quartier « Eau Bouillie »). De diamètre inférieur, les écoulements semblent moins importants.

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 (Maréchal, Ladouche et al. 2005). Sur l'Illustration 77, 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-quaternaire dont les limons de Piedmont. Ce contact coïncide plus ou moins avec la position de la Faille de Nîmes qui par son rejeu en faille normale a provoqué un abaissement du compartiment sud mettant en contact les calcaires avec le remplissage plio-quaternaire.

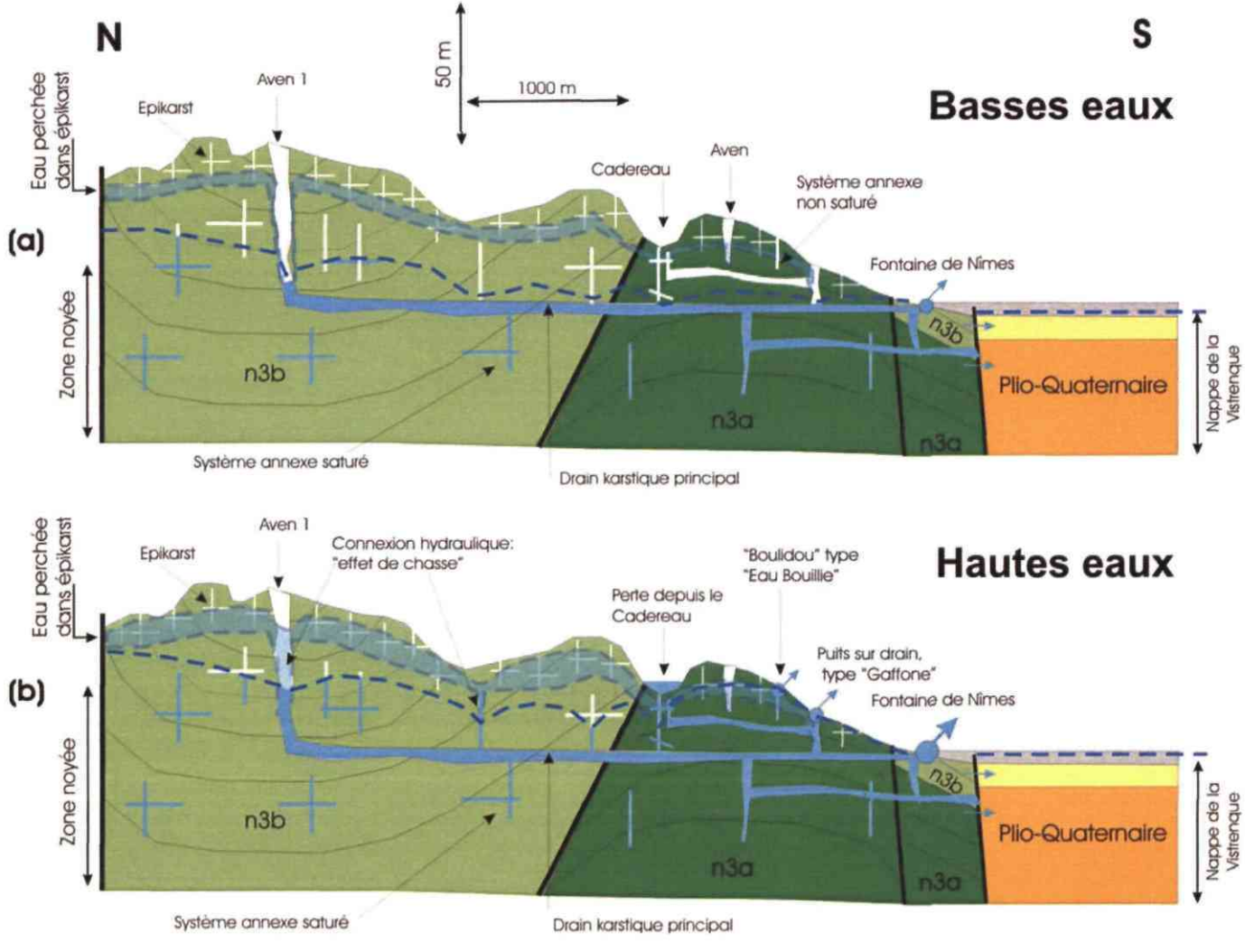


Illustration 77 : Modèle conceptuel du fonctionnement du karst de Nîmes

En dépit du caractère unaire de ce karst, son bassin d'alimentation situé dans la zone des Garrigues est difficilement délimité (Maréchal, Ladouche et al. 2005). L'influence de l'Urgonien au niveau des écoulements souterrains telle que le supposaient les premiers résultats de l'hydrochimie peut être exclue à la lumière des nouveaux résultats acquis (§ 6.1).

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, 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 (§ 3.2) de la Fontaine de Nîmes a permis de caractériser le fonctionnement du karst en période de basses eaux, notamment sur l'épisode de 2004-2005. Cette analyse sur une très longue récession permet de préciser le fonctionnement mis en évidence précédemment (Maréchal, Ladouche et al. 2005). La nouvelle interprétation fait appel cette fois à trois composantes décrites en détails ci-dessous : infiltration rapide, infiltration lente et vidange de la zone noyée (tarissement).

Le temps de fin d'infiltration de **l'infiltration rapide**, moyennement court (30 jours) et la vitesse moyennes d'infiltration, relativement élevée (0.033) indiquent qu'une partie des eaux de pluie infiltrées rejoint rapidement la zone noyée du système via un réseau de fissures connecté à la zone d'infiltration (épikarst). En termes de flux, la composante rapide de l'infiltration pour la récession 2004-2005 représente 40 % (1,33 million de m^3) du volume total de l'infiltration par les pluies efficaces (3,28 million de m^3).

Une grande part de l'infiltration par les pluies efficaces apparaît assurée par **l'infiltration lente** (où retardée) au travers d'un réseau de fissures mal connectées à la zone noyée du système. Le volume d'eau associé à la composante lente de la recharge par les pluies efficaces représente 1,95 million de m^3, soit environ 60% du volume d'infiltration. Le temps de fin d'infiltration de la composante lente se situe vers 225 jours, mais la contribution relative commence à devenir très faible (< 20 l/s) entre 190 et 210 jours après le début de la récession. La vitesse d'infiltration moyenne de la

composante lente de l'infiltration par les pluies efficaces apparaît donc très faible (0.004).

Le **coefficient de tarissement** (α) apparaît également très faible (0.006) ce qui indique que la zone noyée du système se vidange lentement. La valeur du volume dynamique (assimilable au réserve du système) apparaît faible (0.72 millions de m^3) au regard du volume moyen interannuel (17 millions de m^3) calculé en considérant un débit moyen de 540 l/s. Le pouvoir régulateur du système défini par Mangin est très faible (0.04), autrement dit, **le système n'est pas en mesure d'accumuler de grandes réserves au sein de sa zone noyée**.

En résumé, la zone d'infiltration du système karstique de la Fontaine de Nîmes pris dans sa globalité apparaît relativement bien connectée d'un point de vue hydraulique à la zone noyée. Cela se traduit par des crues importantes. La part de l'infiltration rapide est prédominante dans les premiers jours qui suivent le pic de crue (80 % à t+3j) ce qui d'un point de vue conceptuel indique que la zone épikarstique située sous la surface du sol est rapidement drainée par des réseaux de fissures verticales connectées au réseau de drains karstiques de la zone noyée. En termes de flux, l'infiltration rapide représente 40 % du volume total d'infiltration par les pluies efficaces. L'infiltration lente ou retardée contribue donc de manière notable au fonctionnement du système de la Fontaine de Nîmes et de manière importante lorsque l'infiltration rapide cesse. La durée de l'infiltration lente est importante (225 jours) ce qui suggère que les eaux sont difficilement sollicitées par le système karstique. D'un point de vue conceptuel, l'infiltration lente peut être rattachée aux eaux d'infiltration transitant par les blocs calcaires et systèmes annexes au drainage.

7.3.2. Hautes eaux et crues

La zone noyée du système karstique apparaît moyennement bien drainée et bien connectée à l'épikarst qui constitue le siège de l'infiltration des pluies. L'effet de chasse qui en résulte est schématisé notamment sur l'aven 1 du modèle (Illustration 77b). 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 30 jours environ (durée de **l'infiltration rapide**).

L'étude des débits classés (§ 3.1) 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 0,20 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 0,20 m^3/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 12-13 m^3/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 77b) à proximité de la Galerie des Poteries qui constitue un affluent du réseau ouest.

Le suivi du réseau d'eaux souterraines a mis en évidence, lors d'épisodes pluvieux, la rapide saturation de certaines parties du karst. Cette saturation se traduit ensuite par des débordements (« boulidous ») du réservoir souterrain vers les cadereaux. Cette configuration contribue à aggraver les crues dans la Ville de Nîmes.

Lors des crues, l'écoulement de la Fontaine de Nîmes apparaît en majorité issu des eaux nouvelles infiltrées dans les zones épikarstiques du système karstique (de 54% à 73 %, d'après les estimations ponctuelles réalisées). En moyennes annuelles, ces contributions tendent à s'inverser : 60 % d'eaux anciennes et 40 % d'eaux nouvelles.

En période de crue, les relations eaux de surface / eaux souterraines ont été mises en évidence grâce à l'analyse de la géochimie des eaux (§ 6.2). Les écoulements de surface dans les cadereaux apparaissent eux aussi **principalement composés de la composante « eau nouvelle » ayant cependant transité par le karst,** la part du ruissellement direct de la pluie (faiblement minéralisée) sur les surfaces imperméables des bassins versants étant très faible. La composante « eau nouvelle » qui transite par les zones épikarstiques ne présente pas les caractéristiques chimiques et isotopiques des eaux de pluie. En effet, l'eau de pluie qui s'infiltre évolue chimiquement rapidement en raison (1) du phénomène de mélange avec l'eau préexistante présente au sein de l'épikarst et (2), en raison des interactions eau-roches (dissolution des carbonates). Le premier phénomène permet d'expliquer les teneurs significatives en chlorures et nitrates et bore (marqueurs de pollution anthropique) observées dans les eaux de surface et les teneurs importantes en calcium, magnésium, bicarbonate et strontium expliquent le deuxième phénomène. Les réactions de dissolution sont très rapides puisque les eaux de surface échantillonnée présentent des indices de saturation

proche de l'équilibre voire même sont légèrement sursaturées par rapport à la calcite (IS>0).

Les évolutions des signatures isotopiques du strontium des eaux de surface et des eaux souterraines semblent indiquer que les eaux qui s'écoulent dans les cadereaux à un instant donné sont différentes de celle du drain karstique. Ceci confirme que l'eau du cadereau a bien transité par le karst, mais pas par sa partie la plus profonde que constitue la zone noyée, expliquant ainsi une mobilisation rapide dans les cadereaux.

8. Conclusion

Les éléments acquis sur la structure et le fonctionnement du système karstique de la Fontaine de Nîmes ont été mis en évidence au moyen des données acquises dans le cadre de la phase 1 du projet. Le modèle conceptuel du karst nîmois, proposé lors du précédent rapport (Maréchal, Ladouche et al. 2005), est significativement précisé dans ce rapport. Il permet de mieux comprendre le fonctionnement du système et de sa source notamment en période de crue.

Pour ce qui concerne la contribution du karst aux crues dans la Ville de Nîmes, les premières conclusions suivantes peuvent être effectuées :

- lors des épisodes pluvieux, certaines parties du karst (probablement des zones épikarstiques) se saturent rapidement (en quelques heures) et provoquent un débordement du karst au droit d'émergences temporaires (« boulidous ») ;

- ces « boulidous », situés sur l'ensemble du bassin versant de la Fontaine, présentent une forte concentration dans le quartier d'Eaux Bouillies. Ils contribuent pour une grande part aux écoulements observés dans les cadereaux d'Alès et Uzès durant les épisodes de novembre 2004 et septembre 2005 ;

- ces zones de débordement situées dans les Garrigues sont déconnectées, au moins en hautes eaux, du réseau de drains karstiques de la Fontaine dans lesquels les charges hydrauliques restent inférieures à la cote de ces zones de débordement ;

- le réseau de drains karstiques de la Fontaine déborde cependant au cours certains épisodes (lorsque le débit de la Fontaine dépasse 13 m^3/s) par certains des regards sur le réseau (exemple du Puits de la Gaffone), situés au pied des Garrigues ;

- l'état hydraulique initial du karst joue un rôle important sur sa saturation et donc sur l'importance des ruissellements engendrés dans les cadereaux. En conséquence, un suivi des eaux souterraines du karst apparaît nécessaire et opportun dans le cadre du réseau d'alerte de la Ville de Nîmes, notamment afin d'affiner les prévisions des crues éclaires karstiques;

- parmi ces points de suivi, nous préconisons au moins de maintenir le suivi de la Fontaine de Nîmes ainsi qu'un autre point dans la zone de débordement d'Eaux Bouillies. D'autres points de suivi seront éventuellement suggérés par la suite ;

- de premiers essais de réflexion sur la constitution d'indices pluviométriques d'alerte tenant compte de la réponse du karst ont été effectués : le débordement du karst semble requérir un seuil d'environ 150 mm de précipitations au cours des 25 jours

précédents. Ces résultats sont préliminaires et doivent être critiqués dans la suite de l'étude (module 4 notamment).

9. Bibliographie

Dorfliger, N., B. Ladouche, et al. (1999). Eaux souterraines et inondations, bassin d'alimentation de la ville de Nîmes. Rapport d'activités 1998. Montpellier, Rapport BRGM - R 40648.

Fabre, G. (1980). Les karsts du Languedoc oriental. Recherches hydrogéomorphologiques. Thèse doctoctorat état, géographie. Mémoire. Nîmes, Association Française de Karstologie. **2:** 470.

Fabre, G. and J. L. Guyot (1984). "Première série continue de jaugeages sur la Fontaine de Nimes (Gard); données et interprétations des principaux résultats. Gauging the Nimes Spring (Gara); data and interpretation of initial results." Travaux **13**: 65-78.

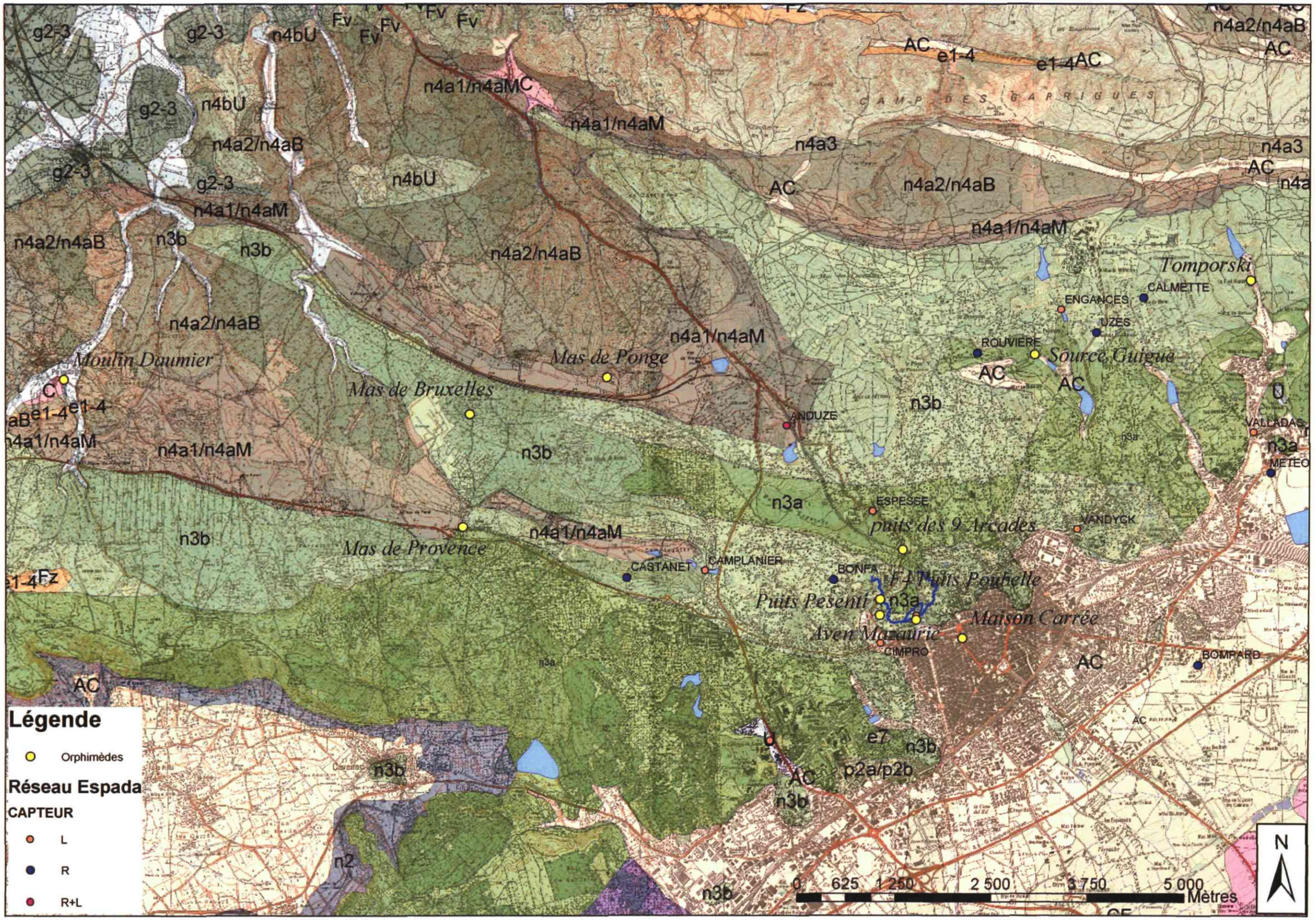
Gilly, J. (1988). L'apport et le rôle des aquifères dans le phénomène catastrophique du 3 octobre 1988.

Maréchal, J. C., B. Ladouche, et al. (2005). Modèle conceptuel de la structure et du fonctionnement du système karstique de la Fontaine de Nîmes, Rapport BRGM/RP-53827-FR: 187 p.

Maréchal, J. C., V. Petit, et al. (2004). Synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques sur le bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes. Montpellier, Rapport BRGM/RP-53422-FR: 78 p.

Annexe 1

Carte du réseau de surveillance des eaux souterraines (orphimèdes)


Légende
Orphimèdes
Réseau Espada
CAPTEUR
L
R
R+L
0 625 1 250 2 500 3 750 5 000 Mètres
N
Moulin Daumier
Mas de Bruxelles
Mas de Ponge
Mas de Provence
Tomporski
Source Guigue
puits des 9 Arcades
Puits Pesenti
Aven Mazauric
Maison Carrée
CALMETTE
ENGANCES
UZES
ROUVIERE
ANDUZE
VALLADAS
METEO
ESPESSE
VANDYCK
CASTANET
CAMPLANIER
BONFA
CIMPRO
BOMPARD
CAMP DES GARRIGUES
g2-3
n4bU
Fv
n4a1/n4aM
n4a2/n4aB
n4a3
AC
e1-4
n3b
n3a
e7
p2a/p2b
n2
Fz

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