



**HAL**  
open science

# **ANALYSE HYDROGEOLOGIQUE DE LA CONTRIBUTION DE L'EAU SOUTERRAINE A LA CRUE ECLAIR DES 6 ET 8 SEPTEMBRE 2005 A NIMES**

Jean-Christophe Maréchal, Bernard Ladouche, Nathalie Dörfliger

► **To cite this version:**

Jean-Christophe Maréchal, Bernard Ladouche, Nathalie Dörfliger. ANALYSE HYDROGEOLOGIQUE DE LA CONTRIBUTION DE L'EAU SOUTERRAINE A LA CRUE ECLAIR DES 6 ET 8 SEPTEMBRE 2005 A NIMES. La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, 2009, 2, pp.88-93. <10.1051/lhb/2009019>. <hal-00458984>

**HAL Id: hal-00458984**

**<https://hal.science/hal-00458984v1>**

Submitted on 22 Feb 2010

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

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



HAL Authorization

# ANALYSE HYDROGEOLOGIQUE DE LA CONTRIBUTION DE L'EAU SOUTERRAINE A LA CRUE ECLAIR DES 6 ET 8 SEPTEMBRE 2005 A NIMES

## *Hydrogeological analysis of groundwater contribution to the 6-8 September 2005 flash flood in Nîmes*

**Jean-Christophe Maréchal, Bernard Ladouche, Nathalie Dörfliger**

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (brgm) - Service Eau

Unité Ressources et Milieux Discontinus, 1039 rue de Pinville, 34 000 Montpellier, France

Tél: +33 (0)4 67 15 79 65, Fax: +33 (0)4 67 64 58 51, e-mail: [jc.marechal@brgm.fr](mailto:jc.marechal@brgm.fr)

*De tout temps la Ville de Nîmes a fait face à des crues éclair générant d'importants dégâts humains et matériels. Les fortes intensités de pluies lors des épisodes méditerranéens contribuent à générer des pluies efficaces concentrées sur de courtes périodes de quelques heures. Toutefois, les faibles épaisseurs de sols par ailleurs perméables sur les terrains karstifiés du bassin versant de la Ville sont en théorie favorables à l'infiltration d'une partie des eaux de pluie. La capacité de rétention du bassin versant devrait donc permettre de réduire l'amplitude des crues. L'analyse hydrogéologique de la crue de septembre 2005 montre que le premier évènement a saturé le karst provoquant une baisse de la capacité de rétention du bassin versant lors du second évènement, induisant ainsi une aggravation de la crue éclair. L'analyse hydrogéologique de ce double épisode pluvieux montre que le système karstique de la Fontaine de Nîmes a été lui-même le siège d'une crue éclair karstique favorisée par (i) fort taux d'infiltration suite à la présence de sols très perméables; (ii) rapide transfert de l'eau infiltrée vers les drains de la zone noyée au travers d'avens et de réseau de fissures, (iii) circulation rapide de l'eau dans un réseau de conduits karstiques en charge bien développé (iv) rétro inondation et inondation d'avens proches de la source suite à une constriction du conduit karstique et (v) faible capacité d'emmagasinement de la partie fracturée du karst.*

### MOTS CLEFS

Crue éclair, inondations, karst, eau souterraine, risque naturel, source karstique

### I INTRODUCTION

Les aquifères karstiques sont caractérisés par deux types d'écoulements : d'une part un écoulement lent suivant la loi de Darcy au sein du karst fracturé qui représente la principale masse de calcaire contenant de l'eau et d'autre part un écoulement rapide et turbulent dans le réseau de conduits karstiques qui transmettent l'eau [1]. Les échanges entre les deux systèmes sont contrôlés par les différences de charges hydrauliques ainsi que la géométrie et les propriétés hydrodynamiques du milieu [1].

Très récemment, les crues éclair d'origine karstique ont été identifiées comme un nouveau type de risque naturel en terrain karstique [2]. Une crue éclair est définie comme étant une crue soudaine provoquée par un évènement orageux. Suite aux caractéristiques des circulations d'eau souterraine dans les terrains karstiques, les crues éclair dans de tels terrains sont fortement différentes de celles qui se produisent dans d'autres types de contextes, le volume d'eau dans le cas du karst étant beaucoup plus important que dans le cas contraire. La cause principale en est la circulation rapide au sein des conduits karstiques de grandes quantités d'eau infiltrée au travers des terrains karstiques avec une dynamique très proche de celle du ruissellement de surface. Ce phénomène a été étudié sur le système karstique de la Fontaine de Nîmes.

De tout temps la Ville de Nîmes a fait face à des crues éclair générant d'importants dégâts humains et matériels. Récemment, l'évènement le plus important s'est déroulé le 3 octobre 1988 et a tué neuf personnes parmi les 45 000 victimes affectées par le désastre [3]. Les dégâts ont été estimés à près de 600 millions d'euros. Les fortes intensités de pluies lors des épisodes méditerranéens contribuent à générer des pluies efficaces concentrées sur de courtes périodes de quelques heures [4]. Ceci favorise les ruissellements en surface sur les collines situées au Nord de la ville. Habituellement, les écoulements de surface jouent un rôle prédominant dans la formation d'une crue éclair tandis que la faible capacité d'infiltration des sols est le facteur le plus important pour le développement d'écoulement de surface [5]. Ainsi, les faibles épaisseurs de sols par ailleurs perméables sur les terrains karstifiés de ces collines sont en théorie favorables à l'infiltration

d'une partie des eaux de pluie. La capacité de rétention du bassin versant devrait donc permettre de réduire l'amplitude des crues. Cette note s'attache à expliquer, au moyen d'une approche hydrogéologique sur le double épisode pluvieux de septembre 2005, les mécanismes d'interaction entre eaux de surface et eaux souterraines sur le système karstique de la Fontaine de Nîmes et pour quelle raison celui-ci ne joue pas toujours le rôle limiteur escompté en période de crue éclair.

## II ZONE D'ÉTUDE

Le système karstique de la Fontaine de Nîmes est un karst gravitaire unaire. Il est le siège d'écoulements hiérarchisés vers la source de la Fontaine de Nîmes (FdN) qui en constitue l'exutoire principal. Son bassin d'alimentation, estimé à environ 55 km<sup>2</sup>, se situe dans les Garrigues nîmoises constituées de terrains calcaires et marneux du Tertiaire. Les chenaux karstiques principaux ont été explorés à partir de l'exutoire sur quelques centaines de mètres (Figure 1). Une série de résurgences temporaires sont localisées à proximité de la Fontaine, dans le voisinage du réseau karstique.

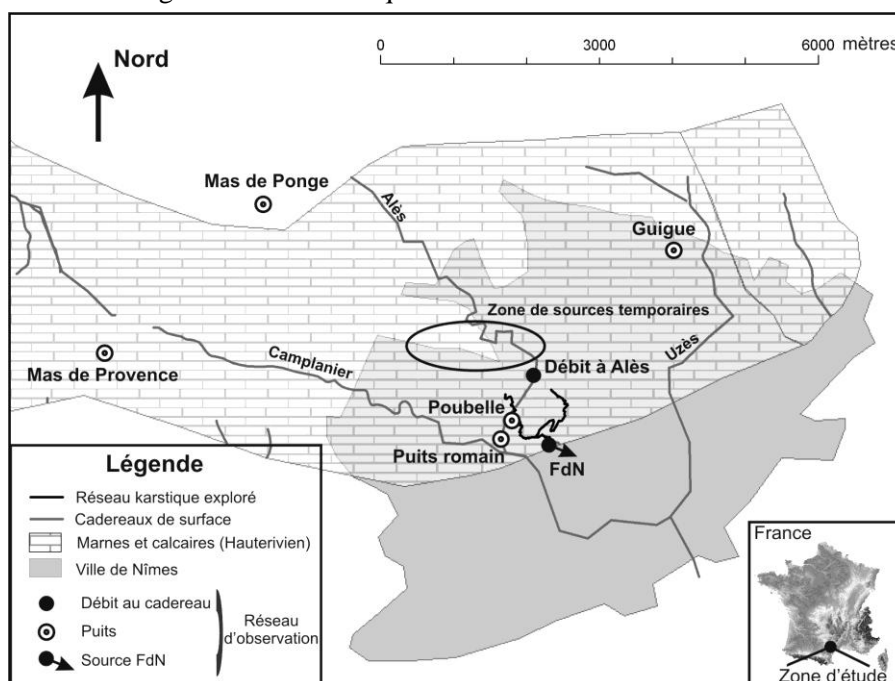


Figure 1 : localisation de la partie Est du système karstique de Nîmes et de la Ville de Nîmes. Localisation du réseau d'observation.

Excepté trois publications [6, 7, 8], l'hydrodynamique de ce système karstique est mal connue. La zone reçoit environ 740 mm de pluie annuelle qui recharge l'aquifère karstique principalement par infiltration diffuse au travers des réseaux de fissures présents au sein des formations carbonatées. Les exutoires du système sont la source FdN, avec un débit compris entre 0.01 et 30 m<sup>3</sup>/s (maximum estimé pour l'épisode de 1988), et plusieurs sources temporaires fonctionnant seulement durant les crues éclair. Le débit moyen de la FdN est estimé à 550 l/s sur la période 1998-2005 [9, 10].

La ville est située au pied d'une colline à la convergence de trois cours d'eau temporaires appelés "cadereaux", qui est un terme local désignant des petites vallées sèches sièges d'écoulements torrentiels très brefs durant les épisodes pluvieux: le cadereau d'Uzès venant de l'est, le cadereau d'Alès du nord et le cadereau de Camplanier de l'ouest (Figure 1).

Un réseau d'observation a été installé (Figure 1) dans des forages de façon à suivre les variations du niveau d'eau au sein du karst au cours des cycles hydrologiques. Le débit de la source FdN ainsi que le débit du cadereau d'Alès à proximité de la source sont également mesurés.

## III ANALYSE HYDROGÉOLOGIQUE

### III.1 Dynamique du système karstique

L'épisode pluvieux de septembre 2005 s'est produit après une très longue période sèche. Il est composé de deux événements:

- le 6 septembre 2005: une pluie totale de 150 mm à 250 mm s'est produite principalement entre 13h30 et 18h30 (heure locale) avec une intensité maximale comprise entre 50 et 75 mm/heure;
- le 8 septembre 2005: une pluie totale de 105 mm à 255 mm s'est produite entre 11h30 et 23h30 avec une intensité maximale variant de 30 à 50 mm/heure.

La variabilité spatiale de l'évènement est élevée avec une quantité totale de pluie variant entre 260 et 500 mm sur le bassin versant du système karstique.

Pendant cet évènement, le débit de la source karstique a pu être comparé au débit du cadereau d'Alès à une station située à quelques centaines de mètres à l'amont de la source (Figure 2). Avant l'évènement, le cadereau était sec comme c'est le cas la plupart du temps et le débit de la source était très faible ( $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Le premier évènement pluvieux a provoqué un débit souterrain plus important à la source ( $15 \text{ m}^3/\text{s}$ ) que l'écoulement de surface ( $< 10 \text{ m}^3/\text{s}$ ) dans le cadereau. Le pic de crue arrive plus tard à la source mais le retard n'est que deux heures : le délai entre le pic de pluie et le pic de crue à la source est de seulement 7 heures. L'écoulement souterrain au travers des conduits karstiques est donc très rapide.

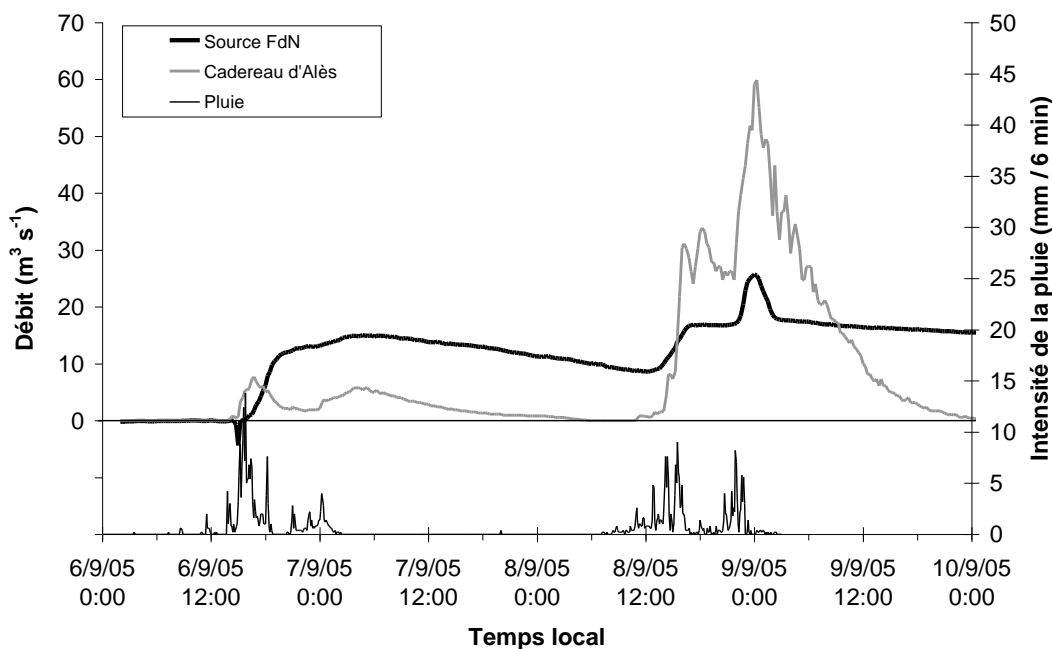


Figure 2 : débits de la source principale du système karstique (source FdN) et du cadereau d'Alès durant l'épisode de septembre 2005

Le second évènement, d'un volume de pluie comparable, provoque un pic de crue bien plus élevé dans le cadereau (débit maximal  $Q_M \approx 60 \text{ m}^3/\text{s}$ ; débit spécifique maximal  $q_M \approx 6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ) qu'à la source ( $Q_M \approx 18 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Dans le cadereau, le coefficient de ruissellement du second évènement (proche de 100 %) est beaucoup plus élevé que lors du premier évènement (à peu près 15 %). Ceci suggère qu'une grande partie de la pluie du premier évènement (85% de 230 mm, soit 200 mm) s'est infiltrée et a été stockée dans les sols et/ou le karst. Des capacités de rétention comparables liées à un stockage par infiltration de 100 à 250 mm ont été estimées pendant des crues éclair de l'Aude en 1999 dans un contexte similaire [11]. Pendant le second évènement, le double réservoir constitué par les sols et le karst étant saturé, la quantité de ruissellement augmente fortement et crée la crue avec un coefficient de ruissellement proche de 100 %.

Il est remarquable que la dynamique de la réponse du karst est très rapide, presque simultanée avec le pic d'eau de surface. Ceci est dû à (i) une infiltration rapide d'eau entrant rapidement dans l'aquifère au travers des réseaux de fissures connectés hydrauliquement à la zone noyée et à (ii) une circulation rapide de l'eau dans le réseau de conduits karstiques. Dès lors le pic de crue souterraine s'additionne au pic de crue de surface dans les cadereaux: c'est la seconde raison provoquant la crue en ville.

### III.2 Capacité limitée du principal exutoire karstique: rétro inondation et inondation des pertes

L'analyse des débits classés à la source FdN sur une longue période (1998-2005) montre que durant les périodes de hautes eaux ( $Q > 13 \text{ m}^3/\text{s}$ ), la pente de la droite  $\alpha_3$  est supérieure à  $\alpha_2$  (Figure 3). Quand le débit dépasse  $13 \text{ m}^3/\text{s}$ , les propriétés hydrauliques du système changent (brisure de pente): le débit à l'exutoire

principal augmente moins rapidement. Ce comportement est typique du débordement de sources temporaires contribuant au débit total du système: dès lors, le débit à la source principale augmente moins car l'eau s'écoule ailleurs (mise en fonctionnement de trop pleins non mesurés par la station de jaugeage de la source FdN).

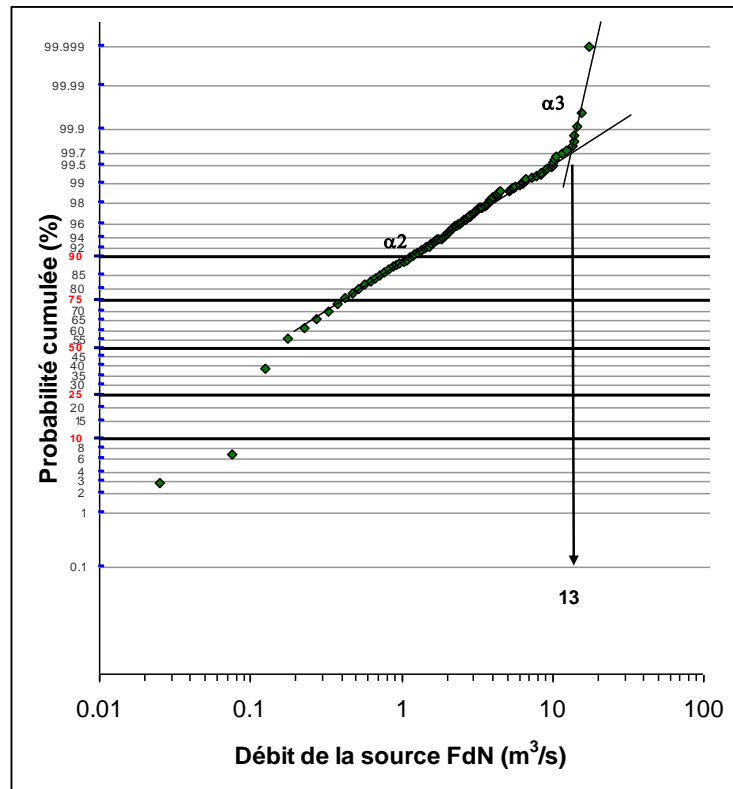


Figure 3 : débits classés de la source FdN pendant la période 1998-2005 (classes de débits de 0.05 m<sup>3</sup>/s)

Quelques unes de ces sources temporaires sont très proches du réseau connu de conduits karstiques avec lequel elles sont directement connectées. Un exemple (Figure 4) est un puits romain et un aven qui sont inondés par des débits significatifs (par exemple 1.4 m<sup>3</sup>/s le 7 septembre et 2.2 m<sup>3</sup>/s le 9 septembre selon Jouannen, communication personnelle). Cette inondation est due à un retour d'eau par excès lié à une réduction de la section du conduit majeur conduisant à la source: ce phénomène est connu en hydrologie karstique sous le nom de « rétro inondation » (« backflooding », [12]). Des indicateurs d'inversion d'écoulement (déplacement de la corde de plongée) ont été observés par les plongeurs spéléologues dans le conduit après de fortes crues (Association Fontaine de Nîmes, communication personnelle). Cette « rétro inondation » induit une mise en eau d'averns et l'activation de fortes sources temporaires à l'amont de la ville qui contribuent ainsi à la crue.



Figure 4 : inondation d'un puits romain et d'un aven lors de l'épisode du 9 septembre 2005

Avec un bassin de 55 km<sup>2</sup> et un débit historique maximal estimé à 30 m<sup>3</sup>/s en 1988, le débit spécifique maximal  $q_M$  est égal à 0.55 m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>, un des plus élevés en comparaison avec les sources étudiées pour leurs forts débits par Bonacci [13] en Croatie, France, USA et Yougoslavie.

### III.3 Saturation de la partie fracturée du système karstique

Le niveau de la nappe aquifère dans le karst fracturé a été surveillé durant l'épisode grâce à un réseau d'instruments situés dans des forages d'observation. L'évolution des niveaux d'eau (Figure 5) montre que le karst fracturé (en-dehors des conduits karstiques – Mas de Ponge et Mas de Provence) a été saturé les 6 et 7 septembre quelques heures après le premier évènement: la vitesse de remontée de la nappe oscille entre 0.2 et 0.5 m/h. Les petites fissures sont rapidement remplies par l'eau souterraine. Pendant le second épisode de pluie, l'eau infiltrée ne pouvant plus être stockée dans le karst a alors contribué à l'écoulement de surface. Des inondations locales ont été également observées où la géomorphologie est favorable, dans des dépressions locales par exemple (inondation au puits Mas de Provence à la Figure 5). La rapide saturation du karst fracturé est due à sa faible capacité de stockage en partie expliquée par la faible épaisseur (1 – 10 mètres) de la zone non saturée illustrée par les faibles profondeurs de la nappe dans les puits avant l'épisode.

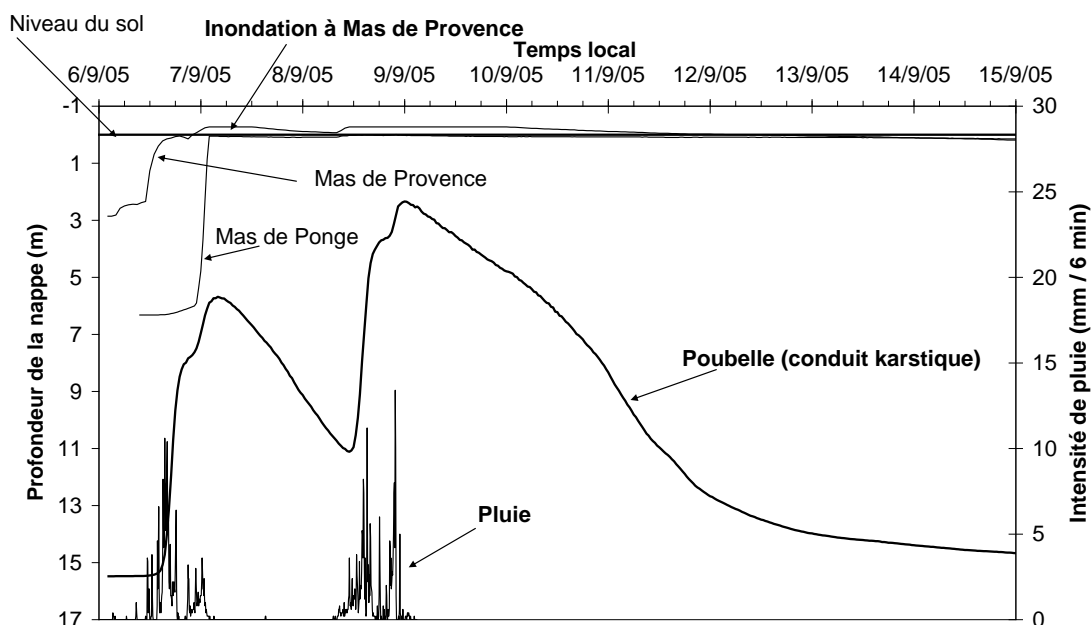


Figure 5 : évolution des niveaux d'eau dans les puits situés dans la partie fracturée du karst pendant et après l'épisode des 7 et 9 septembre 2005

Cette saturation de la partie fracturée du karst induit de nombreuses sources temporaires situées dans l'ensemble du bassin karstique. Il apparaît que ces sources fonctionnaient et que le karst fracturé était saturé tandis que le niveau d'eau était beaucoup plus profond dans le réseau de conduits karstiques (puits Poubelle à la Figure 5 par exemple). Ceci signifie que dans ce cas, les fissures ne sont pas saturées par de l'eau en provenance des conduits karstiques comme cela a été classiquement observé dans les karsts lors d'inversions hydrauliques entre matrice fracturée et conduits karstiques (Marina Bay, [2]) mais par de l'eau s'infiltrant directement sur sa partie superficielle caractérisée par une intense fracturation – l'épikarst. L'analyse de la géochimie de l'eau dans les cadereaux [14] confirme que durant l'épisode de crue :

- le ruissellement d'eau dans le cadereau durant l'épisode est composé d'eau provenant de l'évènement et non d'eau pré évènementielle,
- une part majeure (plus de 90%) de cette eau a eu un cheminement souterrain au travers du karst (très probablement l'épikarst), ce qui a induit le fort contenu de l'eau en chlorures et autres éléments. Ensuite, cette eau s'est écoulée hors du karst par de nombreuses sources temporaires.

Après l'épisode de crue, les niveaux d'eau dans les puits décroissent très lentement: les récessions sont très longues suite à la mauvaise connexion de ces parties du karst avec le système de drains. Au contraire, le niveau d'eau décroît rapidement dans les conduits karstiques (exemple du puits Poubelle à la Figure 5) bien connectés à la source.

## IV CONCLUSION

La surveillance détaillée du double épisode de septembre 2005 montre que le système karstique de Nîmes est le siège de crues éclair souterraines. L'analyse de l'épisode de crue de novembre 2004 (précipitation sur l'impluvium karstique de 102 mm et débit à FdN de 18 m<sup>3</sup>/s) conduit à la même conclusion [10].

Les caractéristiques spécifiques du karst nîmois favorisant la crue éclair karstique sont : (i) fort taux d'infiltration suite à la présence de sols très perméables; (ii) rapide transfert de l'eau infiltrée vers les drains de la zone noyée au travers d'avens et de réseau de fissures, (iii) circulation rapide de l'eau dans un réseau de conduits karstiques en charge bien développé (iv) rétro inondation et inondation d'avens proches de la source suite à une constriction du conduit karstique et (v) faible capacité d'emmagasinement de la partie fracturée du karst.

L'analyse hydrogéologique de ce double épisode pluvieux montre que le premier évènement pluvieux a saturé le karst provoquant une baisse de la capacité de rétention du bassin versant lors du second évènement, induisant ainsi une aggravation de la crue éclair observée dans le cadereau.

Ce cas d'étude montre que la contribution de l'eau souterraine doit être considérée comme un possible facteur aggravant dans la genèse de crue éclair sur des bassins versants karstiques.

## V REMERCIEMENTS

Cette recherche a été conduite grâce au financement de la Ville de Nîmes et du Ministère de l'Environnement et du Développement Durable.

## VI RÉFÉRENCES

- [1] Atkinson, T. C. (1977). - Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in Mendip Hills, Somerset (Great Britain), *J. Hydrol.*, **35**, 93–100.
- [2] Bonacci, O., Ljubenkovic, I. & Roje-Bonacci, T. (2006). - Karst flash floods: an example from the Dinaric karst (Croatia). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **6**, 195-203.
- [3] Fabre, G. (1990). - La catastrophe hydrologique éclair de Nîmes (3 octobre 1988). The Nimes flash flood on October 3, 1988. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, **67**(2), 113-122.
- [4] Gaume E., & Bouvier C. (2004). - Analyse hydro-pluviométrique des crues du Gard et du Vidourle des 8 et 9 septembre 2002. *La Houille Blanche*, **6**, 99-106.
- [5] Smith, K., & Ward, R. (1998). - *Floods – physical processes and human impacts*. John Wiley and Sons, Chichester.
- [6] Fabre, G. (1997). - Le bassin d'alimentation de la fontaine de Nîmes d'après les expériences de traçages. *Bul. Soc. et Sc. Nat. Nîmes et Gard*, **61**, 52-57.
- [7] Fabre, G., & Guyot, J.L. (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.
- [8] Fabre, G., & Guyot, J.L. (1988). - Sur l'hydrologie karstique de la Fontaine de Nimes (Gard). Karst hydrology of Nimes Fountain, Gard. *Bul. Soc. et Sc. Nat. Nîmes et Gard*, **58**, 39-47.
- [9] Maréchal, J.C., Courtois, N., Ladouche, B., & Dörfliger, N. (2006). - Jaugeage en continu de la Fontaine de Nîmes (Gard) : premiers résultats. *Bul. Soc. Et. Sc. Nat. Nîmes et Gard*, **65**, 89-96.
- [10] Maréchal, J.C. et Ladouche, B. (2006). - Fonctionnement hydrogéologique du système karstique de la Fontaine de Nîmes en crue. Rapport final. BRGM/RP-54723-FR.
- [11] Gaume, E., Livet, M., Desbordes, M., & Villeneuve, J.P. (2004). - Hydrological analysis of the river Aude, France, flash flood on 12 and 13 November 1999. *J. Hydrol.*, **286**, 135-154.

- [12] Lowe, D., & Waltham, T. (2002). - Dictionary of karst and caves; a brief guide to the terminology and concepts of cave and karst science. *BCRA Cave Studies Series*, **10**: 40.
- [13] Bonacci, O. (2001). - Analysis of the maximum discharge of karst springs. *Hydrogeology J.*, **9**, 328-338.
- [14] Maréchal, J.C., Ladouche, B., & Dörfliger, N. (2008). - Karst flash flooding in a Mediterranean karst, the example of Fontaine de Nîmes. *Eng. Geol.*, **99**, 138-146.