

Caractérisation des crues sur un système karstique urbanisé et définition de seuils d'alerte

P. FLEURY⁽¹⁾ ; B. LADOUCHE⁽¹⁾ ; N. DÖRFLIGER⁽¹⁾ ; J-C. MARECHAL^(1,2)

⁽¹⁾ BRGM, Service Eau, 1039 rue de Pinville, 34 000 Montpellier, France

⁽²⁾ IRD, LMTG, Université de Toulouse, CNRS, IRD, OMP, 14 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

p.fleury@brgm.fr, tel : 04 67 15 79 80, fax : 04 67 15 79 75

Résumé

La ville de Nîmes (département du Gard, Sud de la France) se situe au pied d'une garrigue karstique où des écoulements superficiels peuvent être importants lors d'événements pluvieux. L'exutoire principal est la Fontaine de Nîmes. Le système en crue est caractérisé par un important ruissellement au niveau des « cadereaux » (vallées sèches) et de nombreux débordements du karst au niveau de sources temporaires ou « boulidous ».

Depuis de nombreuses années, la ville de Nîmes doit faire face à des inondations résultant de crues éclairs faisant suite à de fortes précipitations de contexte climatique méditerranéen (épisodes Cévenols). Il est primordial de mettre en place un système d'alerte basé sur la connaissance de la genèse de ces crues, lequel doit intégrer les composantes eaux de surface et souterraines. La caractérisation du fonctionnement de l'aquifère nîmois ainsi que la détermination de seuils d'alerte « eaux souterraines » constituent les objectifs de cette étude.

Les études hydrologiques et hydrogéologiques mises en œuvre sur ce système ont permis de caractériser son fonctionnement en période de crue. Les analyses géochimiques ont montré que l'eau des cadereaux était essentiellement constituée d'une eau récente ayant transité par le karst. Aussi la contribution des eaux du karst aux crues dépend du degré de saturation de l'aquifère. Un suivi piézométrique sur l'ensemble du bassin d'alimentation a donc été mis en place pour caractériser la recharge du karst et son débordement.

Une méthodologie basée sur la mise en œuvre d'un modèle de transfert, à partir des chroniques de niveau piézométrique et des données météorologiques, permet de définir les réponses en termes de niveaux à différentes précipitations en fonction de l'état initial du système. Cette modélisation caractérise ainsi les débordements du karst. Un abaque (niveau piézométrique en fonction des précipitations) synthétisant les résultats du modèle a été élaboré pour différents piézomètres situés en tête de bassins versants des cadereaux. Il permet de prédire la réponse du système à des précipitations.

Ces seuils d'alerte doivent maintenant être intégrés au système d'alerte ESPADA, réalisé pour la ville de Nîmes par le groupement BCEOM-CS SI-Météo France. Ainsi la caractérisation du fonctionnement du système karstique en crue et la méthodologie développée pour la caractérisation des débordements de l'aquifère permettent d'envisager une gestion des risques liés aux inondations sur ces zones de karst soumis à des précipitations importantes. Cette méthodologie peut s'appliquer à d'autres systèmes karstiques méditerranéens, tel que l'aquifère du Lez (département de l'Hérault).

Mots clefs : Karst ; Nîmes ; Inondation ; Préviation des débits ; Alerte

Présentation de la zone d'étude

La ville de Nîmes (département du Gard, Sud de la France) se situe au pied du domaine des Garrigues Nîmoises. Cette zone est constituée de collines et de plateaux calcaires, d'âge Crétacé inférieur (Hauterivien, Barrémien). Ces roches sédimentaires d'origine marine sont de types calcaires et calcaires-marneux (Illustration 1). La zone a été plissée au Tertiaire (plis d'orientation est-ouest) suite à la structuration des Pyrénées et des Alpes. Ces calcaires sont karstifiés et constituent un aquifère bien développé. Cette entité est limitée, au Sud, par la faille de Nîmes qui sépare ce domaine des Garrigues de la plaine de la Vistrenque, bassin sédimentaire synrift de l'Oligocène. Ce bassin s'est rempli simultanément à l'existence d'une

subsidence d'origine tectonique et sédimentaire. Il est constitué de plusieurs milliers de mètres de remplissages sédimentaires déposés sous faible tranche d'eau. La faille de Nîmes joue le rôle de barrière peu perméable donnant une structure de karst barré à l'aquifère. Les roches calcaires du Crétacé « plongent » ainsi en profondeur. L'exutoire principal de type Vaclusien est la Fontaine de Nîmes. Il se comporte comme une source de trop-plein du système : son débit moyen est d'environ 560 l/s (Illustration 2). En étiage, le débit de la source est de quelques dizaines de l/s, il est supérieur à 15 000 l/s en crue (Maréchal et al., 2005a). Le système en crue est caractérisé par un important ruissellement dans des ruisseaux temporaires nommés « cadereaux » et de nombreux débordements du karst au niveau de sources temporaires ou « bouldous » (Maréchal et al. 2008).

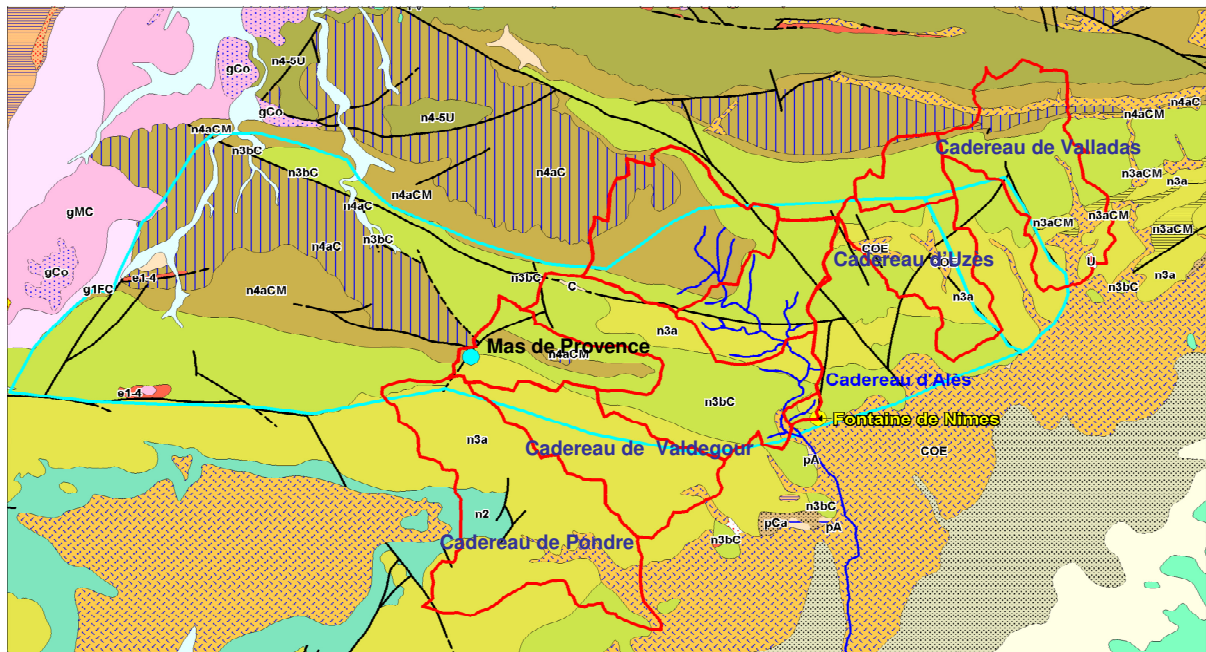


Illustration 1. Présentation de la zone d'étude (bassin d'alimentation proposé pour la Fontaine de Nîmes en bleu, limites des bassins versants des cadereaux en rouge et réseau hydrographique du cadereau d'Alès en bleu).

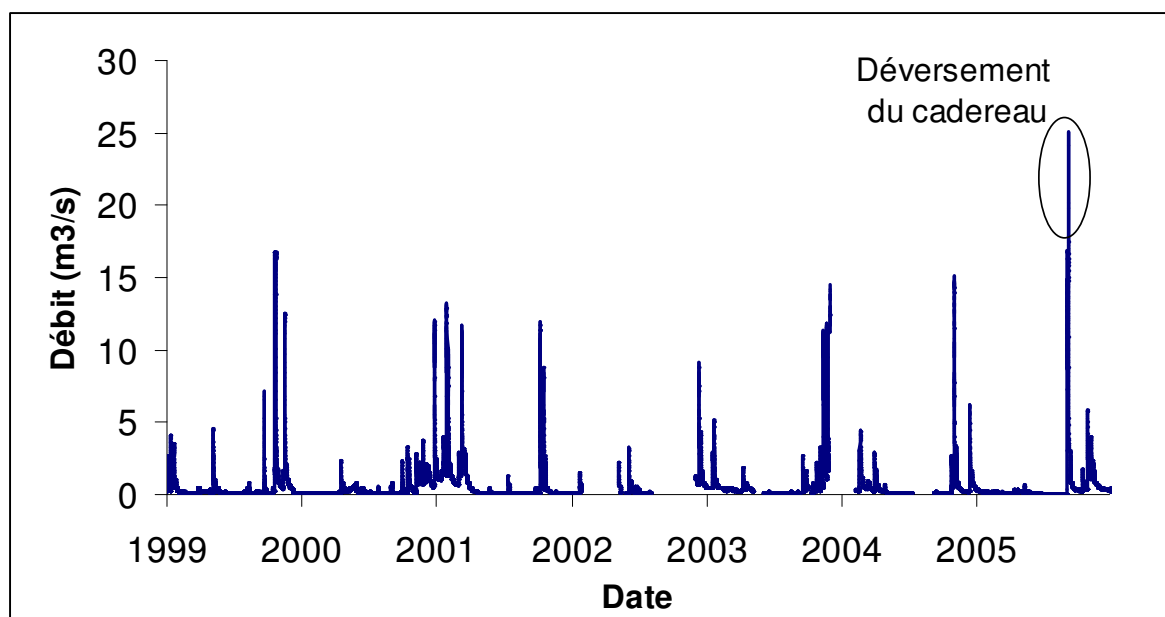


Illustration 2. Hydrogramme de la Fontaine de Nîmes.

Le bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes déterminé sur la base d'un bilan hydrologique 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. Ce bassin d'alimentation inclut l'essentiel des bassins versants des cadereaux, à l'exception de ceux de Pondre, Valdegour et Valladas (Illustration 1).

Objectifs de l'étude

Depuis de nombreuses années, la ville de Nîmes doit faire face à des inondations résultant de crues éclairs provoquant des dommages matériels considérables ainsi que des pertes en vies humaines. Les fortes précipitations de contexte climatique méditerranéen (épisodes Cévenols) contribuent à la genèse de ces crues. La crue du 3 octobre 1988 consécutive à plus de 350 mm de précipitation sur la ville de Nîmes et ses alentours a causé la mort de 9 personnes et 0,6 Milliards d'euros de dégâts (Fabre 1990). Il est primordial de mettre en place un système d'alerte basé sur la connaissance de la genèse de ces crues, lequel doit intégrer les composantes eaux de surface et souterraines. En effet, lors des crues une partie de l'eau ruisselle sur les terrains marno-calcaires peu perméables alimentant les cadereaux. Aussi, selon le degré de saturation de l'aquifère karstique, un épisode pluvieux peut générer des débordements de certaines parties du karst au niveau des « boulidous ». Ces débordements alimentent ensuite les cadereaux et contribuent à aggraver les crues dans la Ville de Nîmes. Il s'agit d'un phénomène de crue éclair karstique (« karst flash flooding », Bonacci et al. 2006). La caractérisation du fonctionnement de l'aquifère Nîmois ainsi que la détermination de seuils d'alerte « eaux souterraines » constituent les objectifs de cette étude. L'idée est de pouvoir évaluer le risque et l'importance du phénomène de débordement du karst en fonction d'une part, de l'importance du cumul de précipitation d'un épisode pluvieux à venir (estimation Météo France lors d'une alerte Orange ou Rouge par exemple) et d'autre part, en fonction de l'état hydrogéologique du karst caractérisé à l'aide de la valeur de la piézométrie le jour où est annoncé l'alerte Météo France.

Caractérisation du fonctionnement de l'aquifère

La prise en compte de la piézométrie pour la caractérisation du système karstique en période de crue implique une bonne connaissance du fonctionnement de ce système. Une étude du fonctionnement hydrodynamique du système a ainsi été réalisée en période de basses eaux et de hautes eaux. 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.

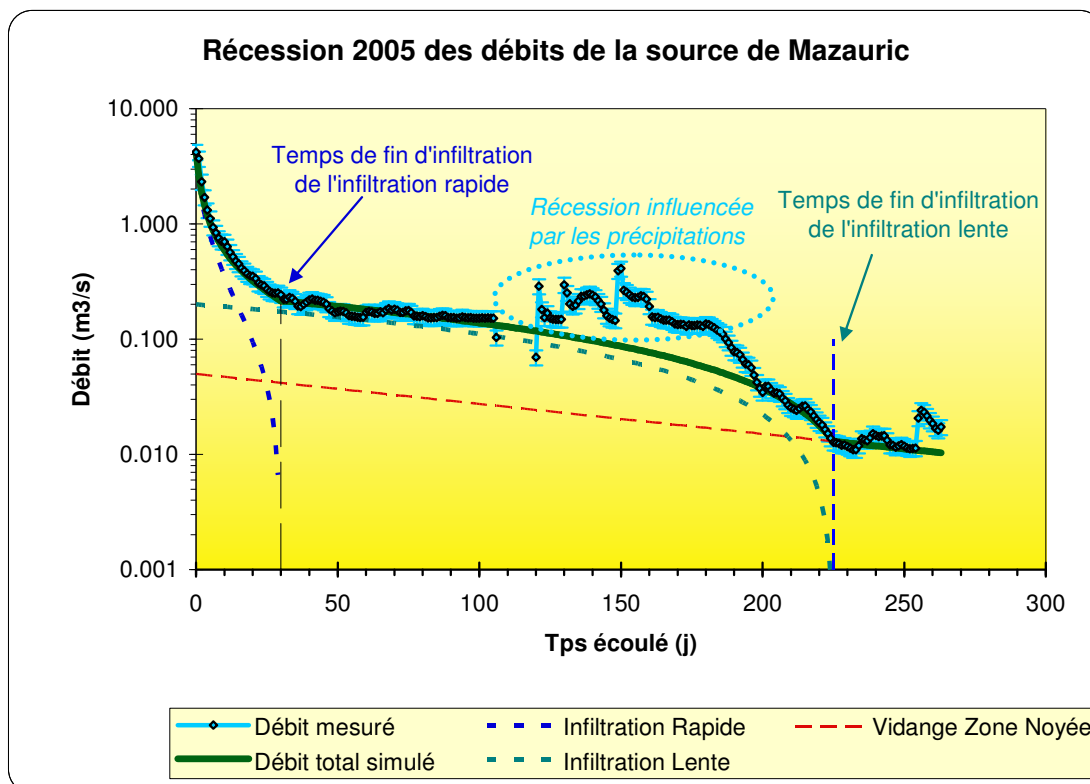
La méthode de l'analyse des courbes de récession des hydrogrammes des sources karstiques a été développée en 1970 par Mangin; elle repose sur la décomposition de l'hydrogramme résultant de la vidange d'un système conceptualisé par un modèle constitué de deux réservoirs indépendants représentant la zone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

La méthode de Mangin permet de décrire assez fidèlement les évolutions des débits de la Fontaine de Nîmes lorsque les récessions sont de durée « classique », de l'ordre de 3 mois (Maréchal, et al. 2005b), 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 duré plus de 250 jours.

Pour décrire la récession du cycle hydrologique 2004-2005, il est apparu judicieux de prendre en compte de manière différenciée les dynamiques d'écoulements au sein de la zone d'infiltration à savoir l'infiltration rapide et infiltration lente (Illustration 3).

L'étude du tarissement (Maréchal et Ladouche, 2006) a révélé que le temps de fin d'infiltration rapide était moyennement court (30 jours). Ceci indique qu'une partie des eaux de pluie infiltrées rejoignent 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 % du volume total de l'infiltration par les pluies efficaces. Une grande part de l'infiltration par les pluies efficaces (60 %) apparaît assurée par l'infiltration lente au travers d'un réseau de fissures mal connectées à la zone noyée du système. Le temps de fin d'infiltration lente se situe vers 225 j. Le coefficient de tarissement apparaît également très faible (0,006), ce qui indique que la zone noyée se vidange très lentement. Le pouvoir régulateur défini par Mangin est très faible (0,04), ce qui indique que le système n'est pas en mesure d'accumuler de grandes réserves au sein de sa zone noyée. Ainsi, la zone d'infiltration du système prise dans sa globalité apparaît relativement bien connectée d'un point de vu hydraulique à la zone noyée. Cela se traduit par des crues importantes. La zone noyée du système est moyennement bien drainée.



Début Récession	16/12/04
Fin Récession	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 m ³ /s	3.95
Coef d'hétérogénéité d'écoulement lent	0.00001
Tps de fin d'infiltration Lent (en jour)	225
q _{0_2} (débit d'infiltration à t=0) en m ³ /s	0.2
Coef tarissement Zone Noyée	0.006
Q ₀ Zone noyée (m ³ /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 m ³)	1.33
Volume d'infiltration lente (million de m ³)	1.95
Volume dynamique (million de m ³)	0.72

Illustration 3. Décomposition de la récession 2005 selon la méthode modifiée de Mangin (Maréchal et Ladouche, 2006). Les paramètres déduits de cette analyse montrent la capacité limitée du système à emmagasiner l'eau ce qui induit un refus à l'absorption provoquant les crues éclairées karstiques lors des fortes précipitations.

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% sur la base des résultats des isotopes stables de l'eau, d'après les estimations ponctuelles réalisées). En moyenne annuelles, ces contributions tendent à s'inverser : 60% d'eau anciennes et 40 % d'eaux nouvelles.

En période de crue, les relations eau de surface / eaux souterraines ont été mises en évidence grâce à la géochimie des eaux au moyen de l'étude de la crue de septembre 2005 réalisée sur les cadereaux d'Alès et d'Uzès (Maréchal et al. 2008). 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'infiltré 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 sont expliquées par le deuxième phénomène. Les réactions de dissolution sont très rapides puisque les eaux de surface échantillonnées présentent des indices de saturation proches de l'équilibre voire même sont légèrement sursaturées par rapport à la calcite ($IS > 0$). Aussi, les études visant à la caractérisation de l'infiltration au niveau des bassins versants des cadereaux à l'échelle de la parcelle, ont confirmé que l'infiltration était le processus dominant avec toutefois une grande partie de l'eau qui ne s'infiltré pas profondément et circule dans le sol et rejoint la surface à la faveur de la topographie alimentant drains et ravines.

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 (Maréchal et al. 2008). 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.

Le modèle conceptuel de fonctionnement de l'aquifère karstique en période de Basses et Hautes eaux est ainsi présentée dans l'illustration 4.

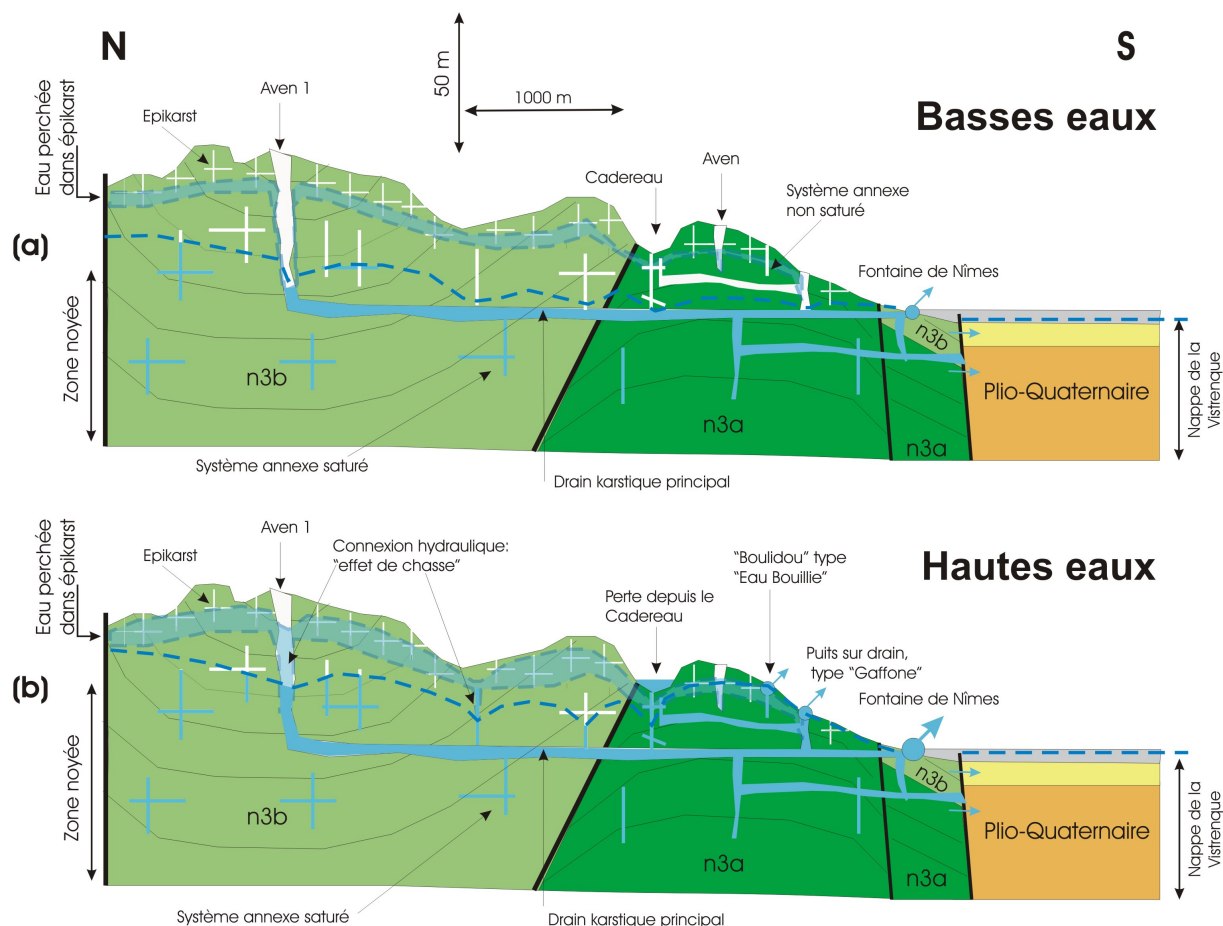


Illustration 4. Modèle conceptuel du fonctionnement du karst de Nîmes (Maréchal et Ladouche, 2006).

Caractérisation des débordements

La contribution des eaux du karst aux crues dépend du degré de saturation de l'aquifère. Un suivi piézométrique sur l'ensemble du bassin d'alimentation a donc été mis en place pour caractériser la recharge du karst et son débordement (19 piézomètres). Une méthodologie basée sur la mise en œuvre d'un modèle de transfert à l'aide du logiciel Tempo® (Pinault, 2001), à partir des chroniques de niveau piézométrique et des données météorologiques, permet de définir les réponses en termes de niveaux à différentes précipitations en fonction de l'état initial du système. Le cas du site de Mas de Provence caractérisé par des débordements lors de fortes précipitations et par un comportement de type bloc et non drain karstique est présenté pour illustrer la méthode (Illustration 5).

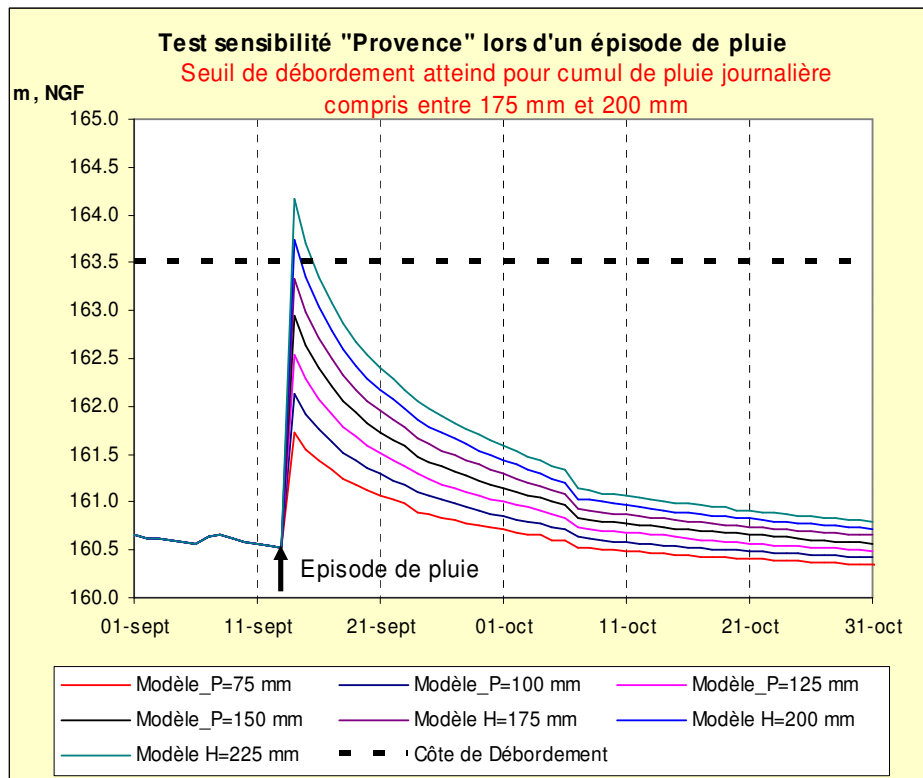


Illustration 5. Evolution de la piézométrie au site Mas de Provence pour différentes configurations d'épisodes de pluie testées par le modèle de transfert (Fleury et al. 2007). Le pas de temps est journalier.

Cette modélisation caractérise ainsi les débordements du karst. Un abaque (niveau piézométrique en fonction des précipitations) synthétisant les résultats du modèle a été élaboré pour différents piézomètres situés en tête de bassins versants des cadereaux (Illustration 6). Il permet de prédire la réponse du système aussi bien à des événements de précipitations uniques que successifs.

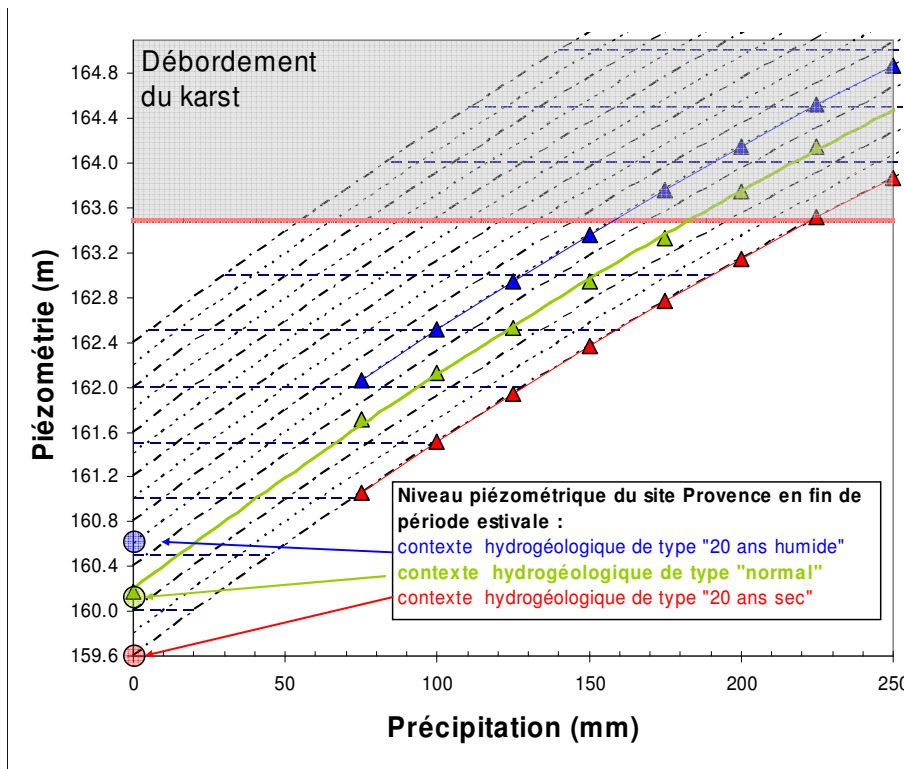


Illustration 6. Abaque Piézométrie-Pluviométrie du site du Mas Provence (Fleury et al. 2007).

Afin de caractériser les relations eau souterraine / eau de surface, une approche de modélisation globale à l'aide du logiciel Tempo a été mise en œuvre sur les données du cadereau d'Alès enregistrées en 2005 au site des « 9 arcades ». L'objectif de cette analyse est d'une part, de caractériser la dynamique d'écoulement du cadereau pour différentes configurations d'épisode de pluie et d'autre part, d'évaluer le rôle joué par des eaux souterraines sur la dynamique d'écoulement des eaux de surface. Le modèle de transfert a été établi sur les données au pas de temps journalier. Le modèle établi permet de reproduire de manière acceptable les débits moyens journaliers mesurés au site des « 9 arcades » lors de l'épisode de septembre 2005 (Illustration 7).

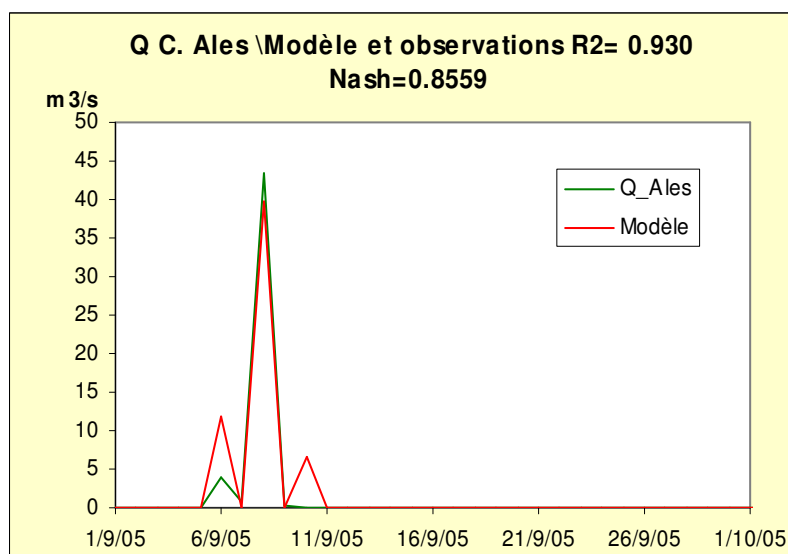


Illustration 7. Comparaison du débit modélisé au débit mesuré au cadereau d'Alès (« 9 arcades ») : 93 % de la variance totale expliquée, critère de Nash = 0,86 (Fleury et al. 2007).

Ce modèle de transfert a ensuite été utilisé en mode prévisionnel pour caractériser la relation qui lie le débit à la pluviométrie. Différentes configurations de cumul de pluie journalier ont été considérées (comprises entre 25 mm et 400 mm). L'évolution des débits moyens journaliers maximum en fonction de la pluviométrie est présentée sur l'illustration 8. On observe que la dynamique d'écoulement change lorsque le cumul de pluie devient supérieur à 225 mm. Le débit se met à augmenter de façon nettement plus rapide dès lors que le cumul de pluie devient de l'ordre de 225 mm. Cette modification peut être liée à la contribution des eaux du karst. Pour tester cette hypothèse, nous avons mis en regard les résultats obtenus par le modèle de transfert « Mas de Provence » aux résultats du modèle de transfert du Cadereau d'Alès.

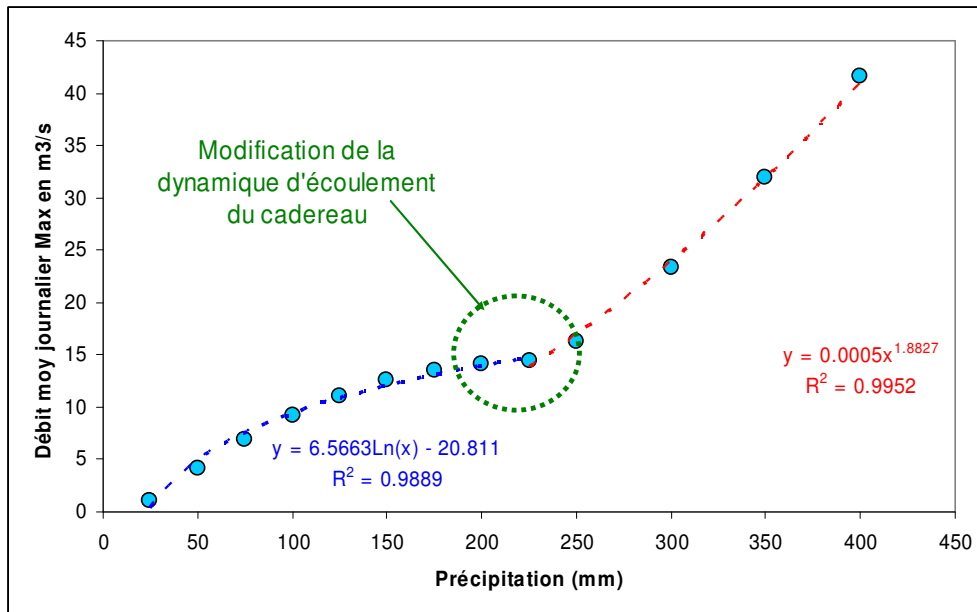


Illustration 8. Evolution du débit moyen journalier maximum calculé par le modèle de transfert du cadereau d'Alès en fonction du cumul de pluie journalier (Fleury et al. 2007).

Nous avons reporté sur l'illustration 9, pour différentes configurations d'épisodes pluvieux, l'évolution des débits moyens journaliers maximum (calculée par le modèle de transfert du cadereau d'Alès) au niveau piézométrique maximum calculé par le modèle de transfert « Provence ». Nous avons considéré les résultats obtenus par le modèle « Provence » pour une situation hydrogéologique comparable à celle de l'été 2005. Il ressort que le moment où le karst est susceptible de déborder au Mas Provence correspond également à la modification du comportement hydrologique du cadereau d'Alès lorsque le cumul de pluie devient supérieur à 225 mm. Ainsi le phénomène de débordement du karst induit la modification de la dynamique d'écoulement du cadereau d'Alès.

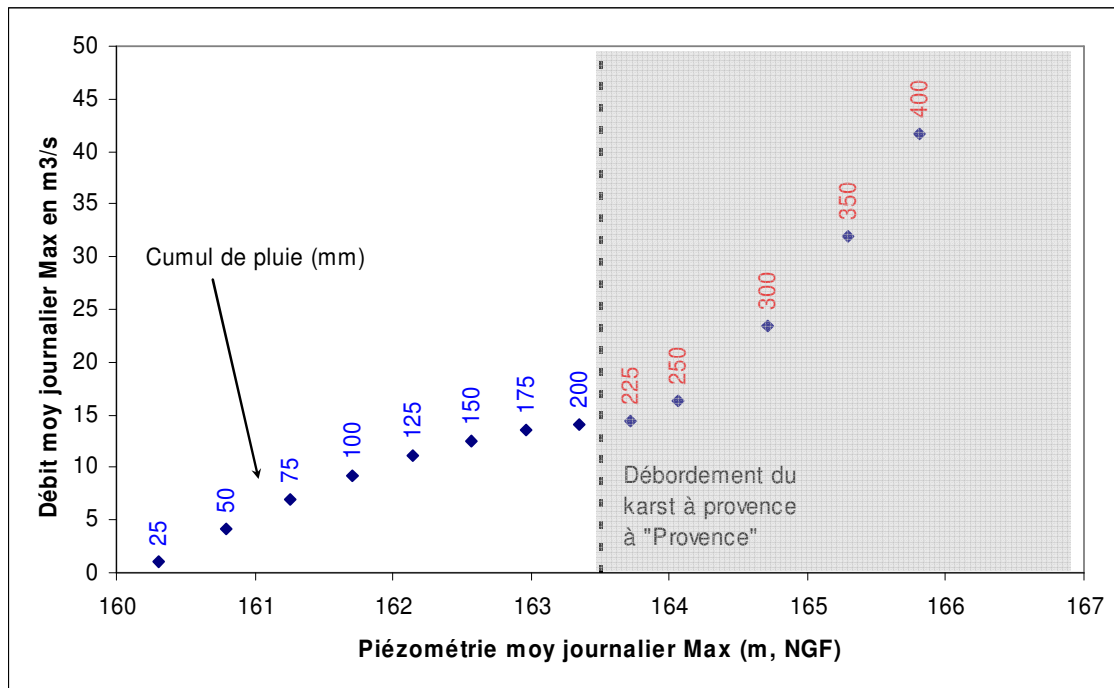


Illustration 9. Evolution du débit moyen journalier maximum calculé par le modèle de transfert du cadereau d'Alès en fonction du niveau piézométrie maximum calculé par le modèle de transfert Provence (Fleury et al. 2007).

Perspectives : intégration de la composante « eaux souterraines » à la gestion de l'alerte

Le système d'alerte ESPADA, réalisé pour la Ville de Nîmes par le groupement BCEOM-CS SI-Météo France, a été mis en œuvre à partir de 2004. L'outil installé à la Ville de Nîmes permet l'élaboration, en temps réel des prévisions de débits des cadereaux et de proposer les changements de niveaux d'alerte du système en liaison avec le plan de secours de la Ville. La prise en compte de la composante « eaux souterraines » devrait ainsi permettre d'améliorer la qualité des prévisions hydrologiques.

A partir de l'exemple du Mas de Provence présenté dans cette étude, le débordement du karst au niveau de ce site semble représentatif des débordements globaux du karst dans la zone d'alimentation du cadereau d'Alès. Cette information peut ainsi être prise en compte ; l'utilisation de l'abaque (Illustration 6) est un outil efficace. Par exemple pour un état de la piézométrie à 160 m, 180 mm de précipitation seront nécessaires pour générer un débordement du karst. Ainsi à partir de cette valeur de cumul de précipitation, l'augmentation des débits s'accélère générant des crues que l'on sait être dévastatrices. Ces valeurs ainsi déterminées constituent des seuils d'alerte.

Ainsi, les seuils d'alerte représentatifs de l'information « eau souterraine » définis à partir de l'information cumuls de pluies et niveaux piézométriques doivent maintenant être intégrés au système d'alerte ESPADA. La caractérisation du fonctionnement du système karstique en crue et la méthodologie développée pour la caractérisation des débordements de l'aquifère permettent d'envisager une gestion des risques liés aux inondations sur ces zones de karst soumis aux précipitations importantes. Cette méthodologie peut s'appliquer à d'autres systèmes karstiques méditerranéens, tel que l'aquifère du Lez (département de l'Hérault).

Références bibliographiques

Bonacci, O., Ljubenkovic, I., Roje-Bonacci, T. (2006). Karst flash floods: an example from the Dinaric karst (Croatia). *Natural Hazards Earth System Science* 6, 195–203.

Fabre, G. (1990). La catastrophe hydrologique éclairée de Nîmes (3 octobre 1988). The Nîmes flash flood on October 3, 1988. *Bulletin de l'Association de Géographes Français* 67 (2), 113–122.

Fleury, P., Ladouche, B., Courtois N. (2007). Aléas inondations de la ville de Nîmes par contribution des eaux souterraines, rapport final, BRGM RP-55558-FR, 152 p.

Mangin, A. (1970). Contribution à l'étude d'aquifères karstiques à partir de l'analyse des courbes de décrue et de tarissement. *Annales de Spéléologie*, 25 (3) : 581-609.

Maréchal, J.C., Courtois, N., Ladouche, B., Dörfliger, N. (2005a). Jaugeage en continu de la Fontaine de Nîmes (Gard) : premiers résultats. *Bul. Soc. Et Sc. Nat. Nîmes et Gard*, 2005, tome 65, p. 89-96.

Maréchal, J. C., Ladouche, B., Courtois, N., Dörfliger N., Le Strat, A., Bironne, A. (2005b). Modèle conceptuel de la structure et du fonctionnement du système karstique de la Fontaine de Nîmes, Rapport final, BRGM/RP-53827-FR, 184p.

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.

Maréchal, J.C., Ladouche, B., Dörfliger, N. (2008). Karst flash flooding in a Mediterranean karst, the example of Fontaine de Nîmes, *Engineering Geology*, sous presse, doi:10.1016/j.enggeo.2007.11.013

Pinault, J. L. (2001). Manuel d'utilisateur de TEMPO: logiciel de traitement et de modélisation des séries temporelles en hydrogéologie et en hydrochimie. Projet Modhydro.BRGM report RP51459-FR, 221p.