



Prise en compte de la composante karst dans le système ESPADA, réseau d'alerte de la Ville de Nîmes

Rapport d'activité

BRGM/RP-57767-FR

Décembre 2009



Prise en compte de la composante karst dans le système d'alerte de la Ville de Nîmes : ESPADA

Rapport d'activité

BRGM/RP-57767-FR
Décembre 2009

P. Fleury

Avec la collaboration de M. Raymond

Vérificateur : J-C. Maréchal

Approbateur : M. Audibert

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.
Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Mots clés : karst, hydrogéologie, inondation, système d'alerte, Ville de Nîmes

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : **Fleury, P., Raymond, M.** (2009). - Prise en compte de la composante karst dans le système d'alerte de la Ville de Nîmes. Rapport d'activité BRGM-57767-FR, 15 ill., 27 pp.

Synthèse

Dans le cadre de la convention de recherche et développement partagés avec la ville de Nîmes, le BRGM a pour objectif de « Caractériser et modéliser le fonctionnement des cadereaux en considérant le ruissellement de surface sur les bassins versants et l'apport des eaux souterraines de l'épikarst. » (projet PSP07LRO12). Ce présent rapport présente l'avancement des travaux de modélisation concernant le module 3 – Contribution à la modélisation des cadereaux.

Lors des fortes crues, les cadereaux de la Ville de Nîmes sont alimentés par deux composantes : la première est appelée « **composante ruissellement de surface** » et la seconde « **composante karst** ». La composante karst est constituée à la fois par des **débordements de l'aquifère karstique** et aussi par une **augmentation du ruissellement induit par la saturation de l'aquifère karstique** (refus à l'infiltration).

Ainsi ce travail a pour objectif de **définir des seuils d'alerte** au niveau de l'aquifère karstique. Il implique dans un premier temps la modélisation du débit des cadereaux à chacune des stations de références (Anduze, Cimpro, Pondre, Valdegour, Camplanier, Engance, Vandyck et Valladas) pour les quatre crues principales (octobre 1988, mai 1998, septembre 2002 et septembre 2005). Les premiers résultats issus de modèles simples (modèle de transfert Pluie-Débit) présentés dans le précédent rapport (RP-57099-FR) se révèlent adaptés uniquement pour la crue de mai 1998, le moins important des quatre épisodes en terme de débit. Ce résultat indique que cette crue ne présente finalement pas ou sinon une faible composante karst. Pour les trois autres crues, la prise en compte de la composante karst est nécessaire à la représentation des débits.

Les débits issus de la composante ruissellement ont ainsi été calculés pour les quatre crues à partir du modèle simple, et comparés aux résultats du modèle GR d'Espada. Les hydrogrammes calculés de la composante ruissellement étant très proches, **les hydrogrammes de la composante karst calculés par le modèle GR ont été utilisés comme données de calage**. Afin de s'affranchir des changements de condition sur les sous bassins versants, dus à la mise en place échelonnée dans le temps des bassins de stockage, le modèle GR a été adapté afin de fournir des hydrogrammes des composantes ruissellement et karst en l'absence de bassin de rétention. Les conditions initiales sont alors identiques pour les différentes crues.

Ainsi afin d'intégrer cette composante dans le modèle GR utilisé dans ESPADA, une modélisation innovante de type **modèle réservoir** a été entreprise. La méthodologie mise en œuvre à partir du **logiciel Vensim** (logiciel simulateur de système) est ainsi présentée dans ce rapport. Le modèle dit **modèle « composante karst dans le cadereau »** développé au **pas de temps 15 minutes** intègre ainsi la **saturation de l'aquifère karstique** par l'intermédiaire d'un **module « karst »**. Ce module est calé sur les données piézométriques de l'**aven Mazauric**, exutoire principal du système karstique. Ce point se révèle particulièrement bien adapté pour la définition de **seuils de remplissage** (saturation du karst) et d'**alerte**, il présente également l'avantage d'être déjà intégré au **réseau d'alerte ESPADA de la Ville de Nîmes**.

Le modèle a ensuite été complété du **module « cadereau »**. Il est alimenté par les pluies efficaces à partir du franchissement d'un seuil de remplissage du module karst. Ce seuil est calé à partir des

données de la crue de septembre 2005, le seul épisode conséquent sur lequel ont été acquis conjointement les données de piézométrie à Mazauric et de débit dans le cadereau d'Alès. Les paramètres de ce nouveau module sont définis afin de représenter au mieux l'évolution des débits issus de la composante karst, ils sont ainsi calés sur les hydrogrammes composante karst calculés par le modèle GR.

Par la suite, la **structure du modèle « composante karst dans le cadereau »** (modules karst et cadereau) et les différents **paramètres calés** du modèle qui permettent de représenter les débits issus de la composante karst seront **intégrés au modèle GR du réseau ESPADA**.

Sommaire

Introduction	7
1. Calcul de la composante ruissellement.....	9
1.1. COMPOSANTE RUISSELLEMENT CALCULEE PAR ESPADA.....	9
1.2. COMPOSANTE RUISSELLEMENT CALCULEE PAR TEMPO.....	9
1.3. COMPARAISON DES COMPOSANTES RUISSELLEMENT CALCULEES PAR LES DEUX MODELES.....	10
2. Réalisation d'un modèle réservoir simulant la composante karst et intégrant la saturation de l'aquifère – calage sur les hydrogrammes calculés par Egis Eau.....	13
2.1. MODELISATION DE LA PIEZOMETRIE	13
2.1.1. Réservoir sol.....	15
2.1.2. Réservoir karst.....	17
2.2. MODELISATION DE LA « COMPOSANTE KARST DANS LE CADEREAU ».	21
2.2.1. Anduze.....	23
2.2.2. Cimpro tot	24
2.2.3. Cimpro branche Camplanier.....	25
2.2.4. Anduze à Cimpro	26
Conclusion	27

Liste des illustrations

Illustration 1. Schéma du principe du modèle de transfert à partir du logiciel Tempo et résultats sur la crue de mai 1998 aux stations d'Anduze et Cimpro	10
Illustration 2. Comparaison des hydrogrammes simulés avec le modèle ESPADA et le modèle de transfert simple, présentation des hydrogrammes mesurés (lorsqu'ils existent) ou totaux simulés par ESPADA	11
Illustration 3. Comparaison des niveaux piézométriques mesurés à Mazauric et au Mas à 15 francs	14
Illustration 4. Piézométrie à Mazauric.....	15
Illustration 5. Structure d'un réservoir.....	16
Illustration 6. Structure du réservoir sol.....	16
Illustration 7. Evolution de la hauteur d'eau dans le réservoir sol	17
Illustration 8. Débit et piézométrie à Mazauric du 6 au 8 septembre 2005	18
Illustration 9. Structure du réservoir piézométrie.....	19
Illustration 10. Résultats graphiques des niveaux à Mazauric calculés par le module piézométrie20	
Illustration 11. Structure du modèle « composante karst dans le cadereau »	22
Illustration 12. Hydrogrammes de la composante karst à la station d'Anduze, simulés par les modèle GR ESPADA et modèle « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales.....	23
Illustration 13. Hydrogrammes de la composante karst à Cimpro tot simulés par les modèle GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales24	
Illustration 14. Hydrogrammes de la composante karst pour la branche Camplanier à Cimpro, simulés par les modèle GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales	25
Illustration 15. Hydrogrammes simulés, de la composante karst de Anduze à Cimpro, par les modèle GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales	26

Introduction

Ce rapport constitue une présentation des travaux réalisés en partenariat entre le BRGM et Egis-Eau. Ce travail a pour objectif l'**intégration de la composante karst au modèle ESPADA**. Cette composante karst est en réalité assimilée (i) aux débordements de l'aquifère karstique et (ii) à l'augmentation du ruissellement induite par la saturation de l'aquifère (refus à l'infiltration). Dans cette étude, l'hydrogramme de crue est scindé en deux composantes, à savoir (i) la **composante karst** et (ii) la **composante ruissellement**.

La méthodologie développée est organisée selon les deux points suivants :

- comparaison de la composante ruissellement calculée par ESPADA avec le modèle de transfert dit simple (logiciel Tempo) ;
- réalisation d'un modèle réservoir simulant à la fois la piézométrie et les débits issus de la composante karst, critique des données et analyse des résultats.

Ainsi ce travail permet d'intégrer la composante karst dans le modèle ESPADA, le calage de ce modèle a été réalisé sur les quatre crues principales dernièrement observées à Nîmes, à savoir, octobre 1988, mai 1998, septembre 2002 et septembre 2005. Le développement méthodologique a été appliqué et testé sur le bassin versant d'Alès. Les différents résultats sont ainsi présentés avec un découpage en sous-bassins versants définis par différentes stations ou sous-bassins de ce cadereau en accord avec le modèle GR utilisé dans ESPADA, à savoir :

- Anduze,
- Anduze à Cimpro,
- Branche Camplanier à Cimpro,
- Cimpro total.

1. Calcul de la composante ruissellement

1.1. COMPOSANTE RUISELLEMENT CALCULEE PAR ESPADA

Le modèle ESPADA est un modèle à réservoir de type GR développé au pas de temps 15 minutes.

Les modèles mis en œuvre dans ESPADA au pas de temps 15 minutes sont de deux natures :

- modèle de ruissellement sur zone urbaine, basé sur les fonctions Reram. Ce modèle représente la réponse rapide des zones imperméabilisées, drainées par un réseau pluvial ;
- modèle de réponse des zones rurales : il s'agit du modèle GR4 du Cemagref.

Les hydrogrammes calculés par ESPADA aux points aval des cadereaux sont donc la somme des réponses des zones urbaines et des zones rurales, calculée à l'aide des deux modèles. Pour l'étude plus précise de la réponse du karst, les composantes du modèle GR4 ont été distinguées, afin de calculer :

- l'hydrogramme en sortie du réservoir eau gravitaire : il s'agit de l'hydrogramme appelé "karst ESPADA" ;
- l'hydrogramme de ruissellement direct : il s'agit de l'hydrogramme appelé "ruissellement ESPADA".

Les hydrogrammes fournis pour l'étude sont par conséquent :

- Karst ESPADA ;
- Ruissellement ESPADA ;
- Urbain ESPADA.

La somme des trois hydrogrammes constitue le "total ESPADA". Aussi afin de travailler sur les différentes crues avec des conditions comparables, les calculs ont été faits sans incidence des bassins de stockage. Les hydrogrammes de la composante ruissellement totale (Ruissellement ESPADA + Urbain ESPADA) ont ainsi été calculés, ces derniers sont présentés dans la partie 1.3.

1.2. COMPOSANTE RUISELLEMENT CALCULEE PAR TEMPO

Les précédentes études réalisées par le BRGM (RP-57099-FR) ont montré que le modèle simple développé à partir du logiciel Tempo permettait de reproduire les crues caractérisées par du ruissellement et une contribution faible du karst voir une absence de contribution. Ce modèle avait été calé à partir de la crue de mai 1998 (Illustration 1) qui d'après les informations de terrain correspondait bien à une crue sans contribution conséquente du karst. Ce modèle simple permet ainsi de reproduire la composante ruissellement. Il a ainsi été appliqué en mode prévisionnel à

l'ensemble des événements, à savoir octobre 1988, mai 1998, septembre 2002 et 2005. Les hydrogrammes correspondant à la composante ruissellement pour les stations d'Anduze et Cimpro sont ainsi fournis Illustration 2.

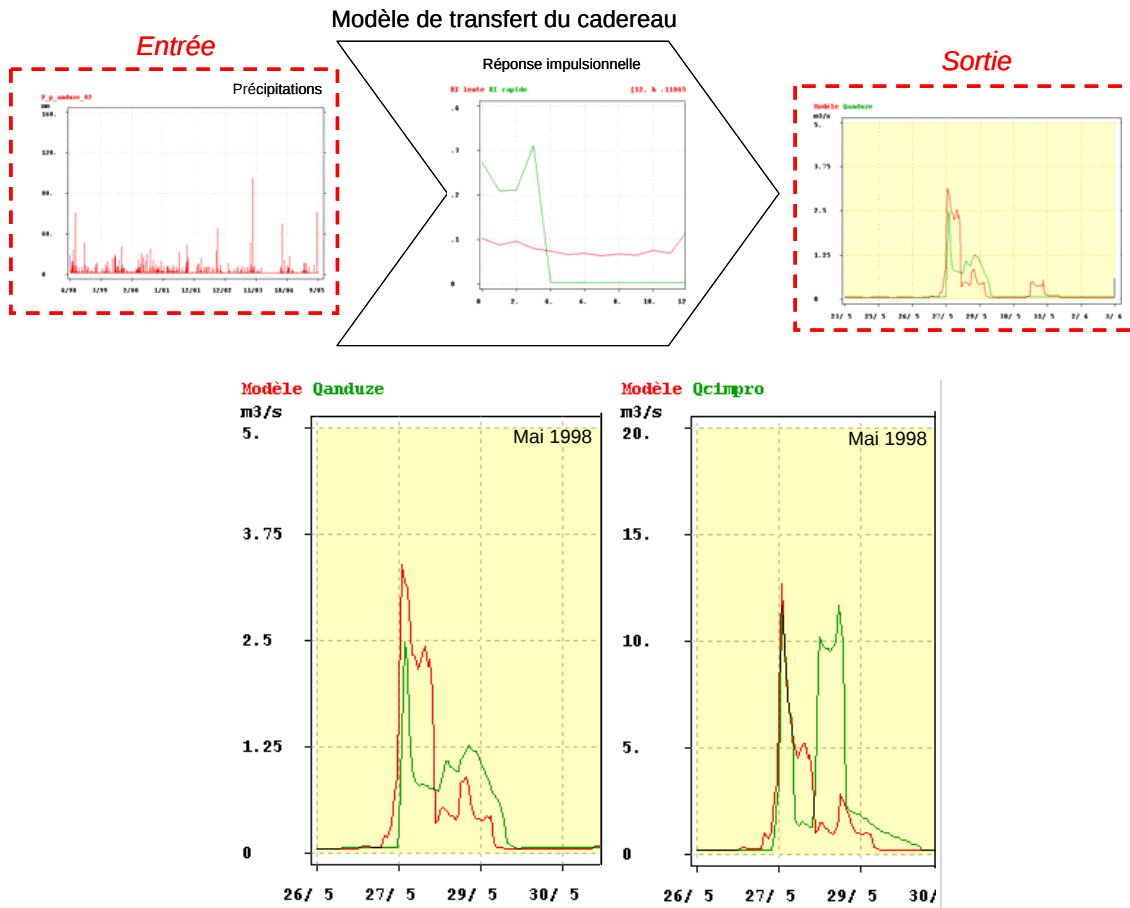


Illustration 1. Schéma du principe du modèle de transfert à partir du logiciel Tempo et résultats sur la crue de mai 1998 aux stations d'Anduze et Cimpro

1.3. COMPARAISON DES COMPOSANTES RUISSELLEMENT CALCULEES PAR LES DEUX MODELES

Les hydrogrammes présentant la composante ruissellement, calculés par les deux approches différentes pour les stations d'Anduze et Cimpro sont présentés dans l'illustration 2. Les hydrogrammes « totaux » mesurés (lorsque la donnée existe, c'est-à-dire en mai 1998 et septembre 2005) ou calculés par le modèle GR d'ESPADA sont également présentés.

Aussi les hydrogrammes totaux simulés par le modèle GR pour mai 1998 et septembre 2005 sont très proches des hydrogrammes mesurés.

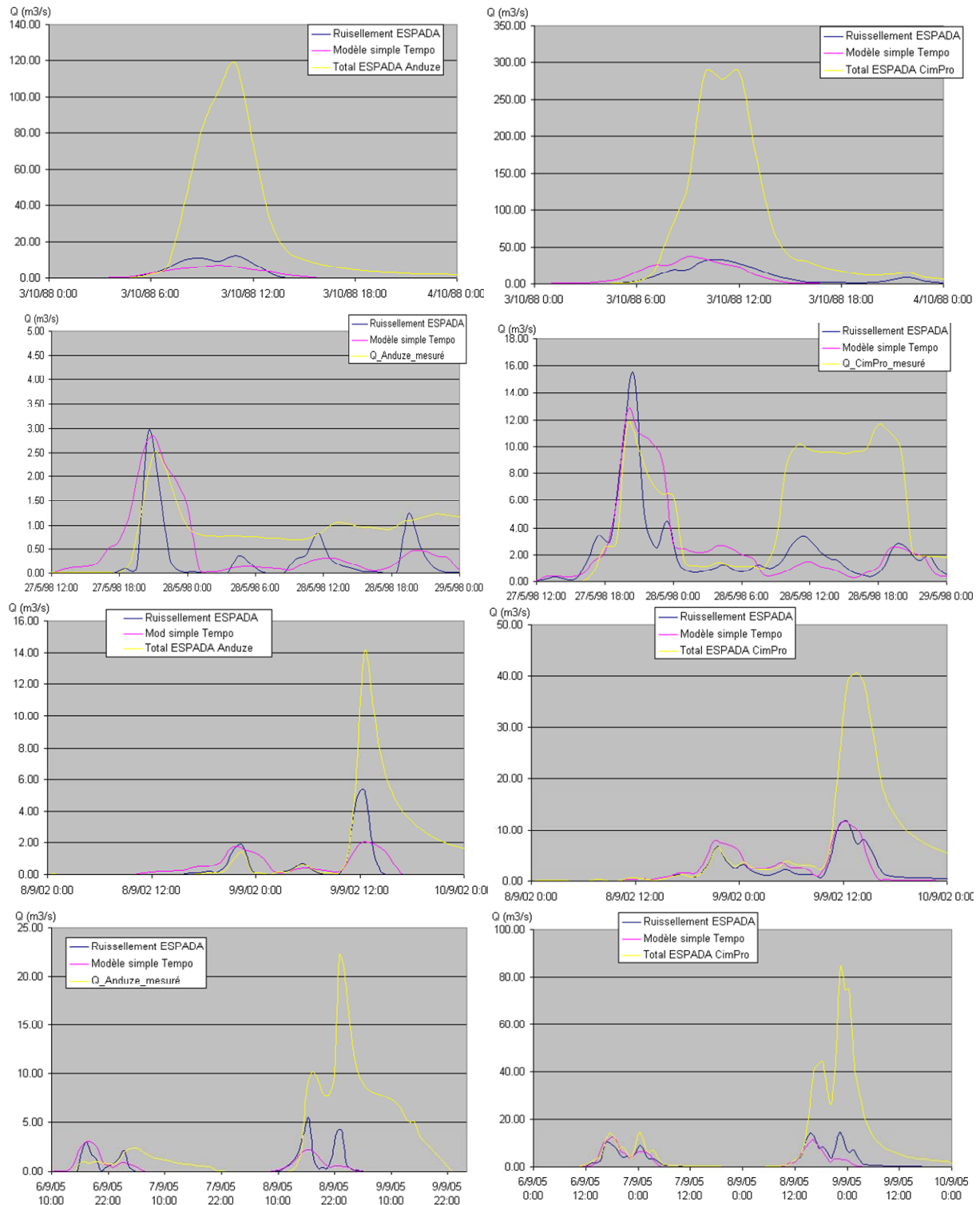


Illustration 2. Comparaison des hydrographes simulés avec le modèle ESPADA et le modèle de transfert simple, présentation des hydrographes mesurés (lorsqu'ils existent) ou totaux simulés par ESPADA

Les hydrogrammes représentant la composante ruissellement, simulés par les deux types de modélisations montrent des résultats comparables pour les quatre épisodes de crue, validant ainsi les modèles. Ainsi, la composante « ruissellement » du modèle GR-ESPADA permet, à partir de l'hydrogramme total reconstitué, de caractériser la composante karst. Cette dernière est égale au débit total simulé moins la composante ruissellement.

2. Réalisation d'un modèle réservoir simulant la composante karst et intégrant la saturation de l'aquifère – calage sur les hydrogrammes calculés par Egis Eau

Initialement, le modèle ESPADA permettait de reproduire la composante karst, mais nécessitait une initialisation du modèle avant chaque épisode de crue. Or cette initialisation résultait d'un calage et non pas de données physiques mesurables ou observables sur le terrain. C'est pourquoi, cette initialisation rendait l'utilisation du modèle difficile en temps réel en période d'alerte. Afin de s'affranchir de cette initialisation, il est devenu nécessaire d'intégrer l'évolution de la saturation de l'aquifère karstique et du sol. Ainsi, un suivi de l'aquifère karstique a été mis en place ainsi qu'une modélisation prenant en compte l'état de saturation de cet aquifère et du sol.

2.1. MODELISATION DE LA PIEZOMETRIE

Dans un premier temps, après avoir effectué une étude des variations piézométriques en relation avec les pluies sur l'ensemble des piézomètres du réseau de la Ville de Nîmes, le site du Mas à quinze francs a été retenu pour caractériser l'évolution de la saturation de l'aquifère karstique et ses débordements (voir RP-57099-FR). Malheureusement, faute de crues importantes sur la période de suivi (septembre 2007 à aujourd'hui) ce point n'a pas été caractérisé par des débordements, si bien qu'il n'est pas possible de valider son comportement en période de forte crue, du fait de l'existence de non linéarité dans le fonctionnement des aquifères karstiques.

Aussi, sur la période de suivi de ce point (septembre 2007 – juillet 2009) les variations piézométriques au Mas à quinze francs se sont révélées corrélées à celles observées à Mazauric (Illustration 3), ce qui est cohérent, puisque le forage Mas à quinze francs a recoupé un conduit qui est connecté à la zone noyée. La piézométrie à la Fontaine de Nîmes est suivie en continu par les services techniques de la Ville tout comme la piézométrie à Mazauric par le Brgm. Le site a été instrumenté en novembre 1998, les données ont été acquises en septembre 2005, malheureusement l'appareil était défaillant lors de la crue de septembre 2002. Cette chronique ayant une longue durée et présentant des données lors des fortes crues (septembre 2005 notamment) et lors de crues d'importance moindre, il a été décidé d'utiliser le site de Mazauric comme indicateur de la saturation de l'aquifère karstique pour le cadereau d'Alès. L'avantage du suivi en direct de la piézométrie, est que ce suivi doit permettre en période de crise d'évaluer la saturation de l'aquifère en temps réel et d'anticiper les débordements.

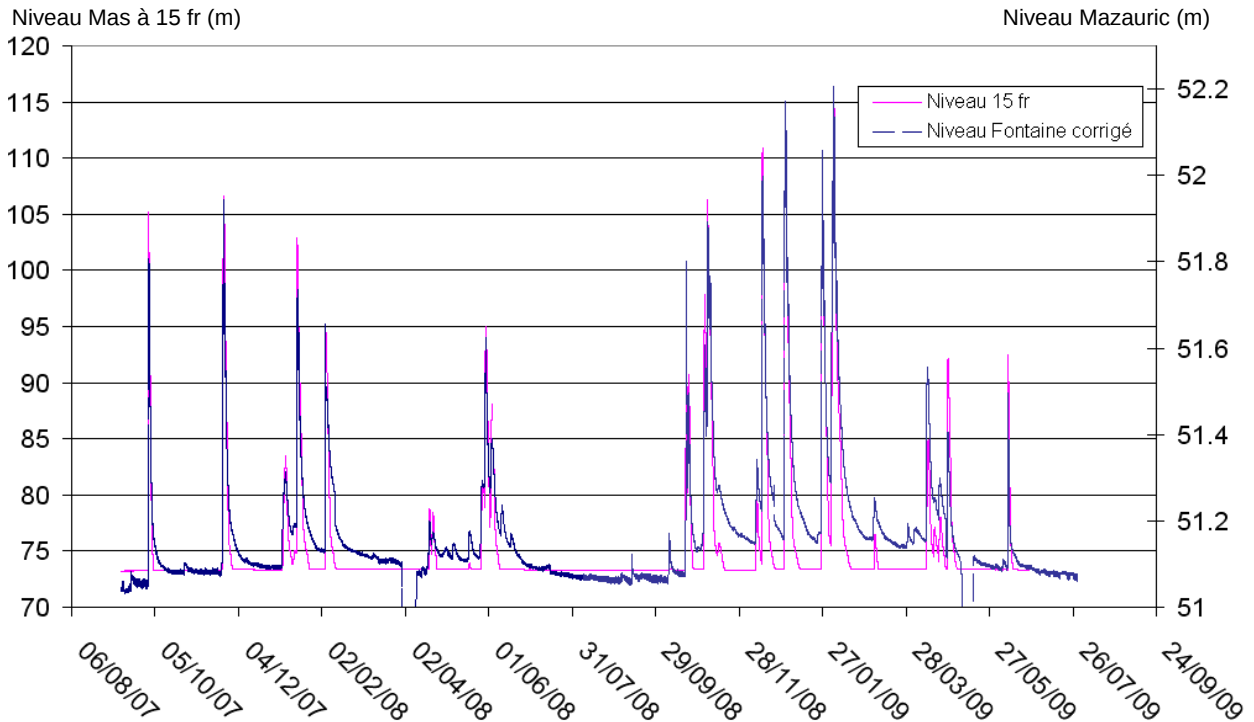


Illustration 3. Comparaison des niveaux piézométriques mesurés à Mazauric et au Mas à 15 francs

Ainsi un modèle réservoir appelé «**module piézométrie** » a été mis en place pour reproduire les variations piézométriques à Mazauric. Il est développé au **pas de temps du quart d'heure** à l'aide du logiciel simulateur de système **Vensim**. Les données d'entrée du modèle sont la pluie. La pondération des lames d'eau pour la Fontaine de Nîmes a été calculée par Egis Eau à partir de la délimitation du bassin d'alimentation et de la localisation des différentes lames d'eau. Les différents poids sont :

- UZAM (Uzès amont) : 0,07 ;
- UZMO (Uzès moyen) : 0,07 ;
- UZAV (Uzès aval) : 0,03 ;
- ALMO (Alès moyen) : 0,13 ;
- POMO (Pondre moyen) : 0,25 ;
- ALAM (Alès amont) : 0,45.

Cette pondération va ainsi être utilisée pour définir les précipitations lors des quatre crues principales. Pour la période 2007-2009 ces lames d'eau n'ont pas été calculées c'est pourquoi, en première approximation, les données des stations d'Anduze, Bonfa et Uzès ont été utilisées avec chacune 1/3 du poids total.

2.1.1. Réservoir sol

L'analyse des chroniques de précipitations et niveaux d'eau a montré que l'amplitude des variations piézométriques peut être identique pour des épisodes associés à des précipitations très différentes. Ainsi, les épisodes d'octobre 2007, novembre 2007 et décembre 2008 (Illustration 4) sont caractérisés par une augmentation de 0,8 m alors qu'ils faisaient suite à respectivement 110, 80 et 60 mm de précipitation.

Ce point met en évidence la nécessité de prendre en compte la saturation des premiers horizons du sol et du sous-sol, ces derniers permettant d'intercepter une partie des précipitations. Après calcul, la hauteur moyenne de pluie ne participant pas à la crue lorsque le sol est sous-saturé, a été évaluée à 50 mm. Dans la suite de cette étude ce fonctionnement sera simplifié et modélisé à l'aide d'un réservoir appelé « sol ».

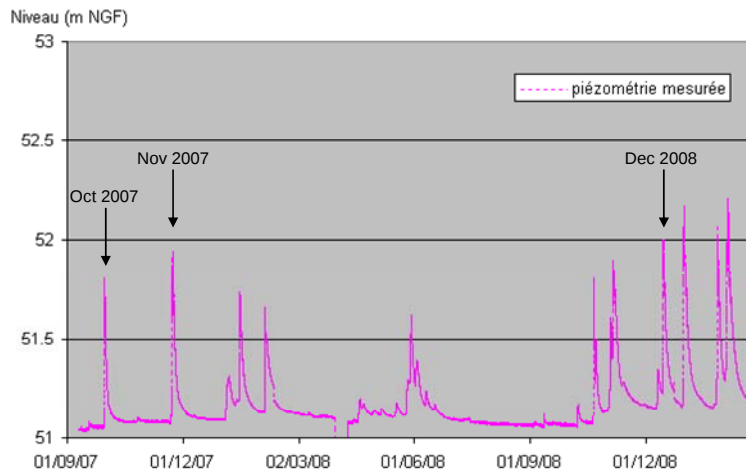


Illustration 4. Piézométrie à Mazaucic

Le réservoir appelé « réservoir sol » est utilisé en amont du modèle, il permet après les périodes d'étiages d'intercepter une partie des précipitations, qui de ce fait n'alimentent pas l'aquifère karstique. Ce réservoir a une capacité de 50 mm. Après une période d'étiage, les 50 premiers mm de pluie servent à le remplir et ne participent pas à la crue. A l'inverse s'il y a eu des précipitations conséquentes les jours qui ont précédé un événement, alors le réservoir est saturé, et lors des précipitations supplémentaires, le réservoir n'est plus en mesure de stocker de l'eau. Les nouvelles précipitations participent alors à la recharge de l'aquifère, on parlera alors de « pluie efficace ».

L'utilisation d'une loi de vidange linéaire de type **loi de Maillet** (Illustration 5) s'est révélée efficace pour reproduire ces phénomènes d'interception des pluies.

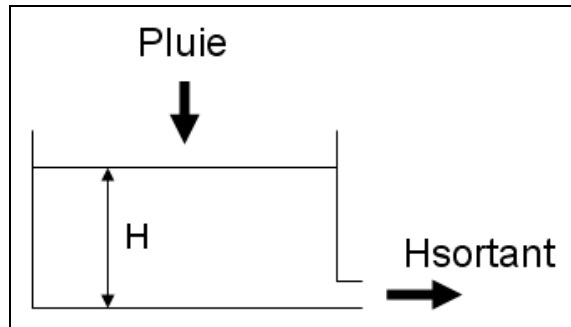


Illustration 5. Structure d'un réservoir

Avec : $H_{t1} = H_{t0} + \text{Pluie} - H_{\text{sortant}}$;

Et $H_{\text{sortant}} = K * H$, avec K un paramètre calé assimilé au coefficient de vidange du réservoir.

La structure du réservoir sol est schématisée dans l'illustration 6.

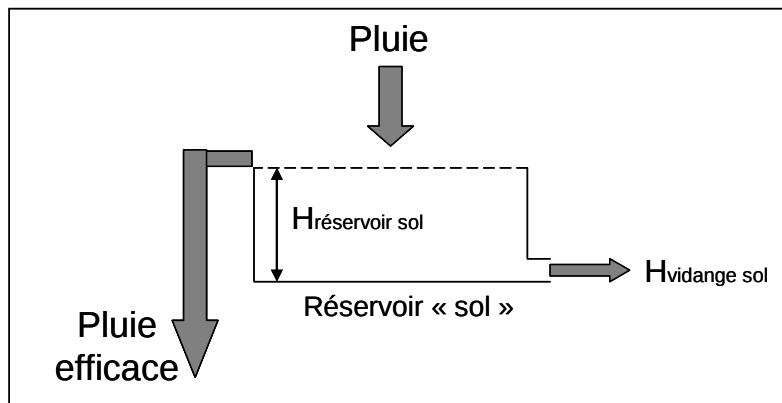


Illustration 6. Structure du réservoir sol

$H_{\text{réservoir sol}}$ est la hauteur d'eau dans le réservoir sol. $H_{\text{vidange sol}}$ est la hauteur d'eau évacuée par le réservoir, conceptuellement, cette hauteur correspond à l'évapotranspiration réelle.

Un exemple des variations du niveau dans le réservoir est fourni par l'illustration 7 pour la période d'octobre 2004 à juillet 2006. Ce dernier montre qu'avant la crue de septembre 2005 faisant suite à un étiage de plus de 8 mois, les niveaux dans le réservoir sol étaient au plus bas, permettant ainsi d'écarter les 50 premiers mm de pluie. Pour la crue de novembre 2004, le réservoir était saturé et l'ensemble des précipitations a participé à la recharge de l'aquifère.

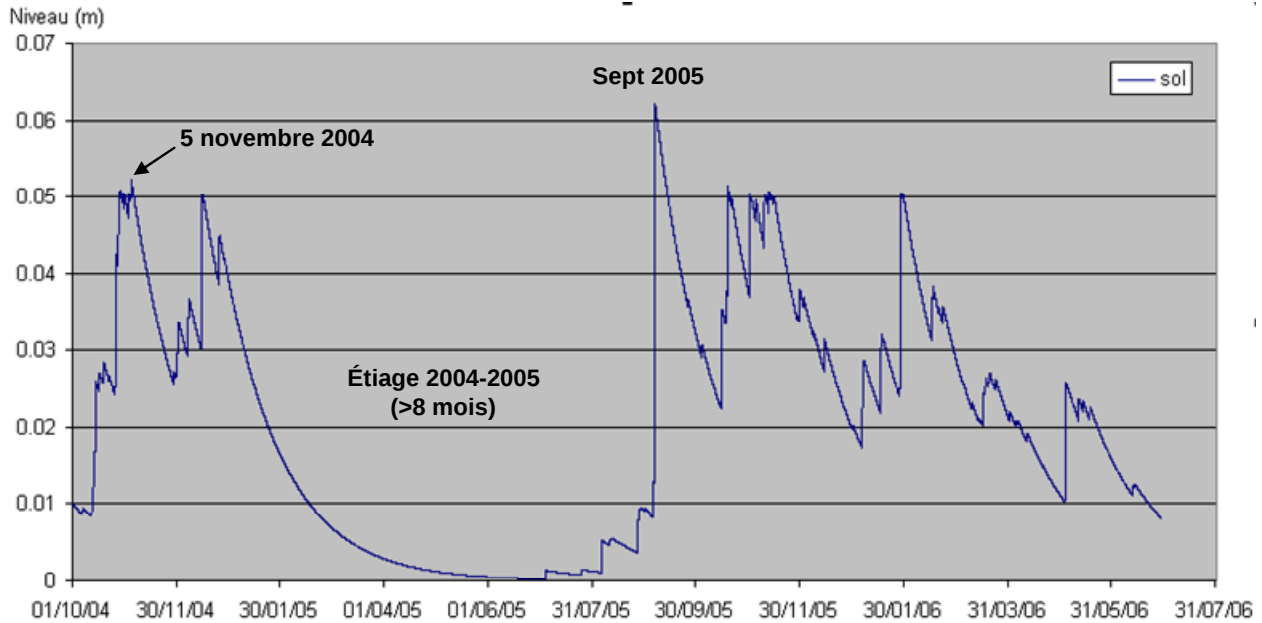


Illustration 7. Evolution de la hauteur d'eau dans le réservoir sol

Les paramètres calés du modèle réservoir sol sont les suivants :

- $K_{sol} = 0,0003$;
- $H_{max \text{ réservoir sol}} = 0,05 \text{ m}$;
- Si $H_{\text{réservoir sol}} > 0,05 \text{ m}$ alors Pluie efficace = Pluie, sinon Pluie efficace = 0.

2.1.2. Réservoir karst

Ce réservoir va permettre de reproduire les variations de la piézométrie observée à Mazauric. Il est alimenté par la pluie efficace. La structure du réservoir est comparable à celle du réservoir sol (Illustration 5), caractérisée par une loi de Maillet. Le modèle simule ainsi les variations de niveau d'eau dans le réservoir, la valeur du coefficient de vidange (K_{karst}) est déduite d'un calage. La hauteur $H_{\text{sortant karst}}$ est évacuée du système, elle correspond conceptuellement au débit alimentant la Fontaine et les autres sorties du système (sources de trop plein, petites sources ...). La piézométrie est ensuite calculée à partir d'une porosité déduite d'un calage et d'une valeur de base correspondant « à la piézométrie dite du niveau de base », selon la formule :

$\text{Piézométrie} = \text{Niveau de base} + H_{\text{karst}} / \text{porosité}.$

Le niveau de base observé sur la plupart des cycles hydrologiques est égal à 51,1 m. Lors des étiages plus prononcés (2004-2005), la piézométrie descend en deçà de cette valeur. Dans le cadre de ce travail une valeur homogène du niveau de base égale à 51,1 m a été testée en première approximation, se révélant adaptée, cette valeur a été conservée.

Les premières simulations utilisant un modèle simple (alimentation par 100% de la pluie efficace et coefficient de vidange homogène) se sont révélées inadaptées. En effet, il n'était pas possible de

reproduire convenablement, à la fois les augmentations piézométriques lors des petites crues et l'augmentation lors de la crue de septembre 2005. Une bonne représentation de l'événement de septembre 2005 se traduisait par une large sous-estimation des petites crues et inversement. Le système semble donc présenter une non linéarité dans son fonctionnement, ce qui est communément observé dans le cas des aquifères karstiques. Aussi l'analyse des débits classés réalisée en 2006 (RP-54723-FR), révèle qu'à partir de 13 à 14 m³/s le système évacue moins facilement les eaux. Ce fonctionnement doit être relié à la mise en fonction de trop plein et également à un « refus partiel » à l'infiltration du fait de la saturation de l'aquifère. Ce débit correspond à une piézométrie d'environ 1,7 m (Illustration 8) soit un niveau de 52,45 m NGF (=54,15-1,7).

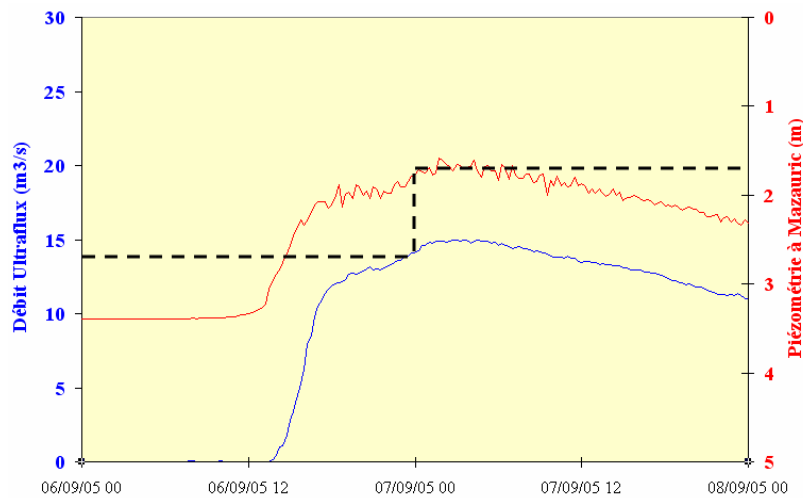


Illustration 8. Débit et piézométrie à Mazauric du 6 au 8 septembre 2005

La valeur « hauteur seuil karst » est ajoutée au modèle karst. Ainsi lorsque le niveau d'eau dans le réservoir karst atteindra 52,45 m alors une part moins importante de la pluie efficace vient recharger ce réservoir. Après calage une valeur de 30 % de la pluie efficace donne de bons résultats. La structure du réservoir karst est ainsi schématisée dans l'illustration 9

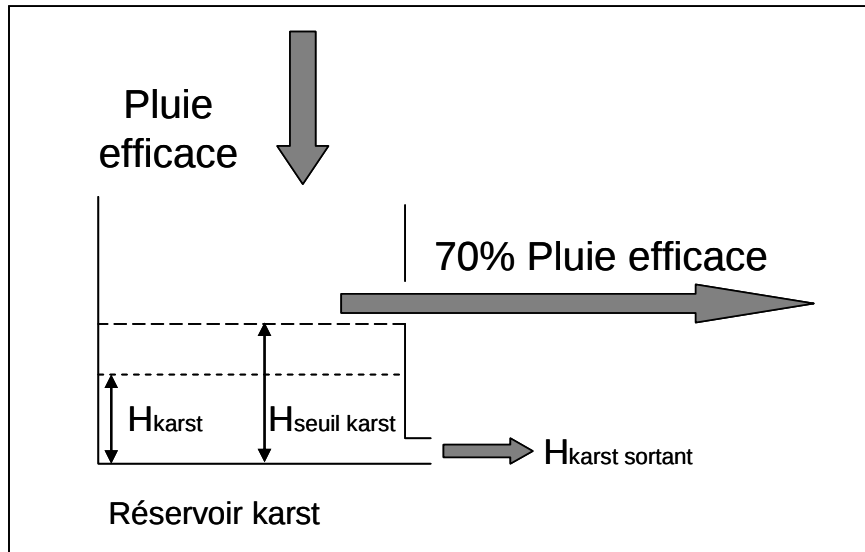


Illustration 9. Structure du réservoir piézométrie

Les résultats concernant la crue de septembre 2005 présentés Illustration 10, révèlent que globalement les variations sont bien rendues, à l'exception de la fin du second tarissement. En effet ce tarissement est caractérisé par un bombement sur la chronique mesurée qui n'est pas représenté sur la chronique simulée. Ce comportement n'a pas été observé sur les autres crues de moindre importance, si bien qu'il semble qu'un fonctionnement particulier se mette en place pour des épisodes extrêmes. La vidange des bassins de rétention au travers du karst via des avens notamment et l'apport d'eau de la Fontaine de Nîmes en provenance des zones de débordement sont probablement responsables de ces valeurs piézométriques plus élevées. Ce comportement particulier n'a pas été représenté par le modèle faute de données permettant d'expliquer les phénomènes mis en jeux.

Ainsi, le modèle karst développé permet de reproduire les grandes tendances des variations piézométriques à la Fontaine de Nîmes à la fois pour la crue de septembre 2005 mais aussi pour les autres crues secondaires, comme celle de novembre 2004 (Illustration 10). Les résultats de cette simulation semblent montrer que le fonctionnement du système évolue lorsque la piézométrie à Mazauric atteint 52,4 – 52,5 m NGF.

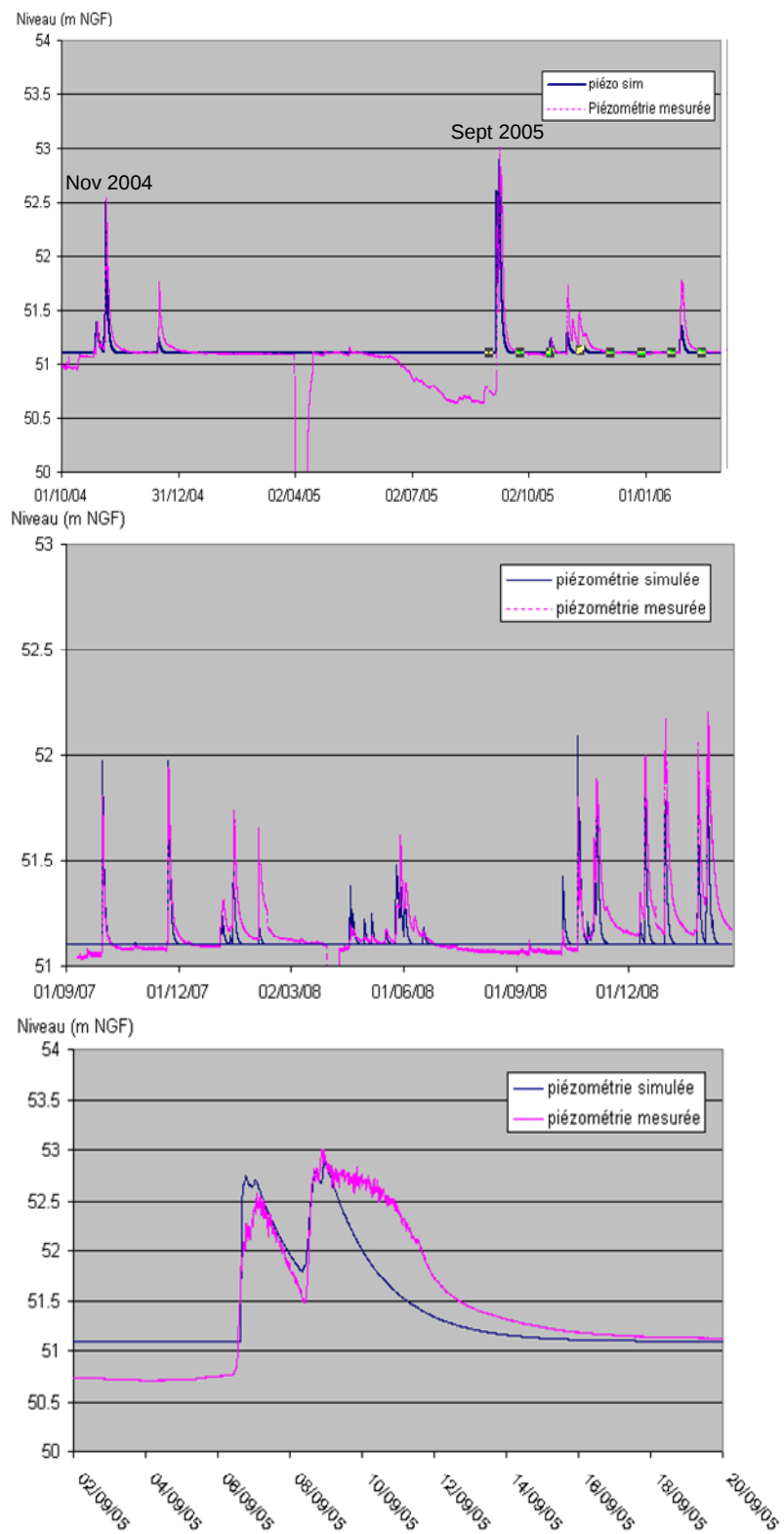


Illustration 10. Résultats graphiques des niveaux à Mazauric calculés par le module piézométrie

Les paramètres calés du modèle sont les suivants :

- Niveau de base = 51,1 m ;
- porosité = 0,06 ;
- Kkarst = 0,007 ;
- Hseuil karst = 52,45 m.

2.2. MODELISATION DE LA « COMPOSANTE KARST DANS LE CADEREAU »

Le modèle « **composante karst dans le cadereau** » va ainsi permettre de reproduire les variations de débit dans le cadereau issues de la composante karst (débordement du karst et augmentation du ruissellement induit par un refus à l'infiltration).

Le module karst est ainsi intégré à un modèle plus vaste dit **modèle composante karst dans le cadereau**, les paramètres calés précédemment sont conservés. L'architecture du modèle est schématisée Illustration 11. Un nouveau réservoir est ajouté, il s'agit du **réservoir « cadereau »**. Ce nouveau réservoir est également caractérisé par une vidange linéaire de type loi de Maillet (Illustration 5).

Lorsqu'un seuil (Hseuil karst 2 avec Hseuil karst 2 > Hseuil karst) est atteint dans le réservoir karst alors le réservoir cadereau est alimenté par les pluies efficaces (100%). Cette valeur est supérieure au 70% de la pluie efficace évacuée du réservoir karst, calculée précédemment. Toutefois, afin de reproduire les débits de la composante karst dans le cadereau et boucler le bilan hydrologique, c'est bien 100 % de la pluie efficace qui est nécessaire. Ceci semble indiquer que la surface des bassins versants des cadereaux définie dans le modèle Espada est sous-estimée, cela provient certainement du fait que dans le bilan effectué dans le modèle GR la part d'eau tombée sur chaque sous-bassin versant participant à la recharge de l'aquifère karstique n'est pas prise en compte.

La valeur Hseuil karst 2 sera définie par calage. Les niveaux d'eau dans ce réservoir sont tels que :

$$H_{cadereau}(t1) = H_{cadereau}(t0) + 100\% \text{ Pluie efficace} - H_{cadereau \text{ sortant}}(t1) ;$$

Et $H_{cadereau \text{ sortant}} = K_{cadereau} * H_{cadereau}$, avec $K_{cadereau}$ un paramètre calé assimilé au coefficient de vidange du réservoir cadereau.

Enfin le débit issu de ce réservoir est calculé, tel que :

$$Q_{cadereau} = H_{cadereau \text{ sortant}} * SBV$$

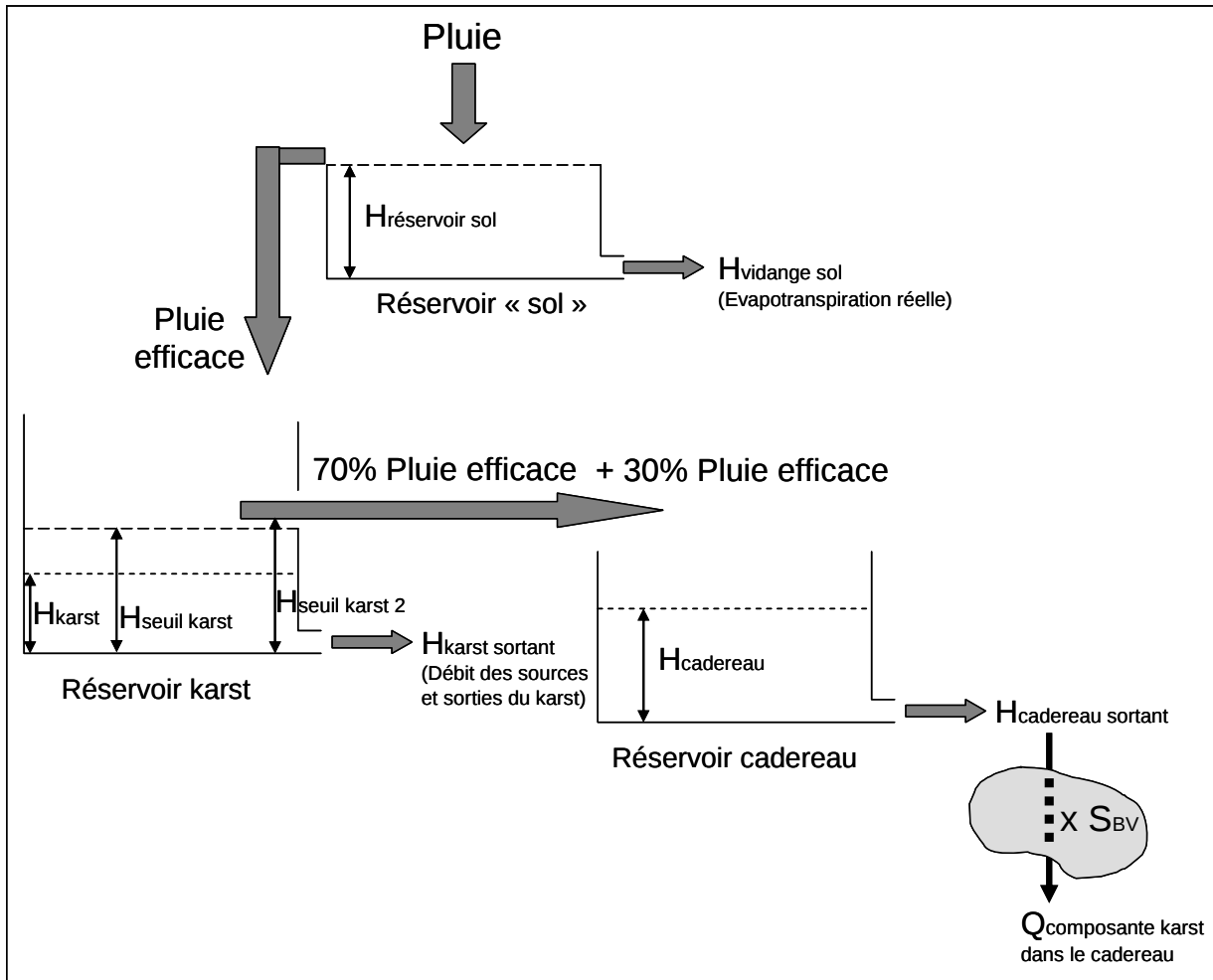


Illustration 11. Structure du modèle « composante karst dans le cadereau »

Les paramètres du modèle cadereau, à savoir $H_{\text{seuil karst2}}$ et K_{cadereau} , ont été calés afin de reproduire au mieux les hydrogrammes de la composante karst calculés par le modèle GR d'ESPADA.

Pour le cadereau d'Alès, les hydrogrammes des quatre sous-bassins suivants ont été simulés :

- Anduze,
- Cimpro tot,
- Cimpro branche Caplanier,
- Anduze à Cimpro.

Les modèles ont été calés avec les paramètres définis ci-après :

2.2.1. Anduze

Hseuil karst2= 52,8 m et Kcadereau = 0,09

Pour la crue d'octobre 1988, un troisième seuil a été ajouté dans le réservoir karst (Hseuil karst 3 = 53 m) pour reproduire de façon satisfaisante la crue (augmentation de l'intensité du pic de crue). Au dessus de ce seuil le Kcadereau augmente (Kcadereau2 = 0,18).

Les résultats graphiques sont présentés Illustration 12.

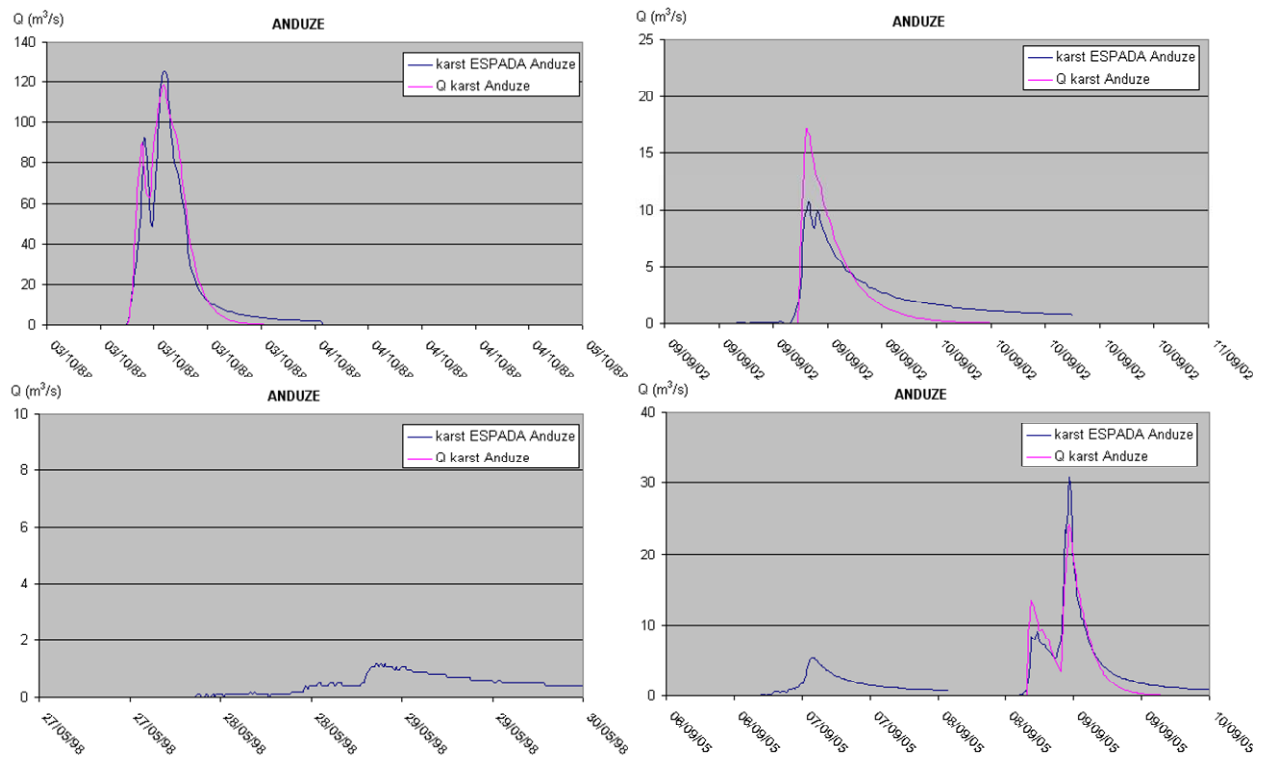


Illustration 12. Hydrographes de la composante karst à la station d'Anduze, simulés par les modèle GR ESPADA et modèle « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales

2.2.2. Cimpro tot

Les paramètres calés sont :

Hseuil karst2 = 52,55 m et Kcadereau = 0,03

Hseuil karst3= 53,5 m et Kcadereau2 = 0,08

Les résultats graphiques sont présentés Illustration 13.

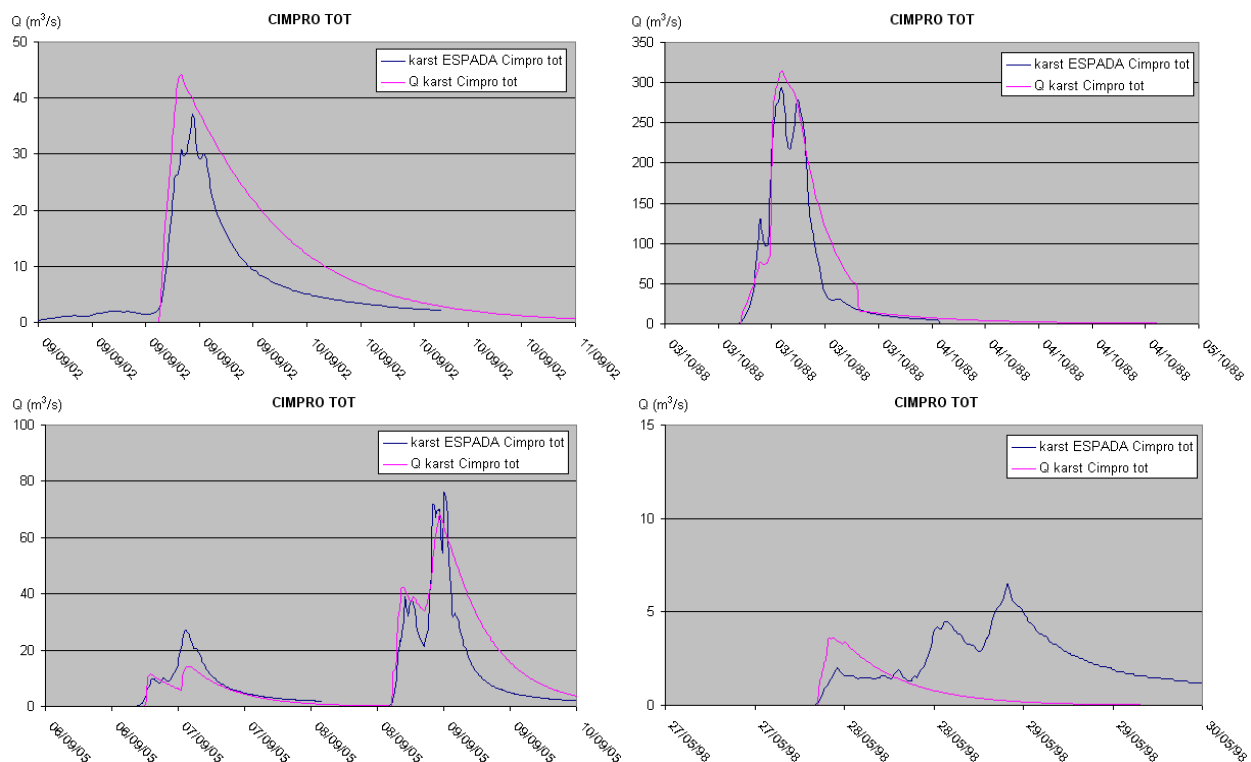


Illustration 13. Hydrogrammes de la composante karst à Cimpro tot simulés par les modèle GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales

2.2.3. Cimpro branche Camplanier

Les paramètres calés sont :

Hseuil karst2= 52,6 m et Kcadereau = 0,06

Hseuil karst3= 53,1 m et Kcadereau2 = 0,11

Les résultats graphiques sont présentés Illustration 14.

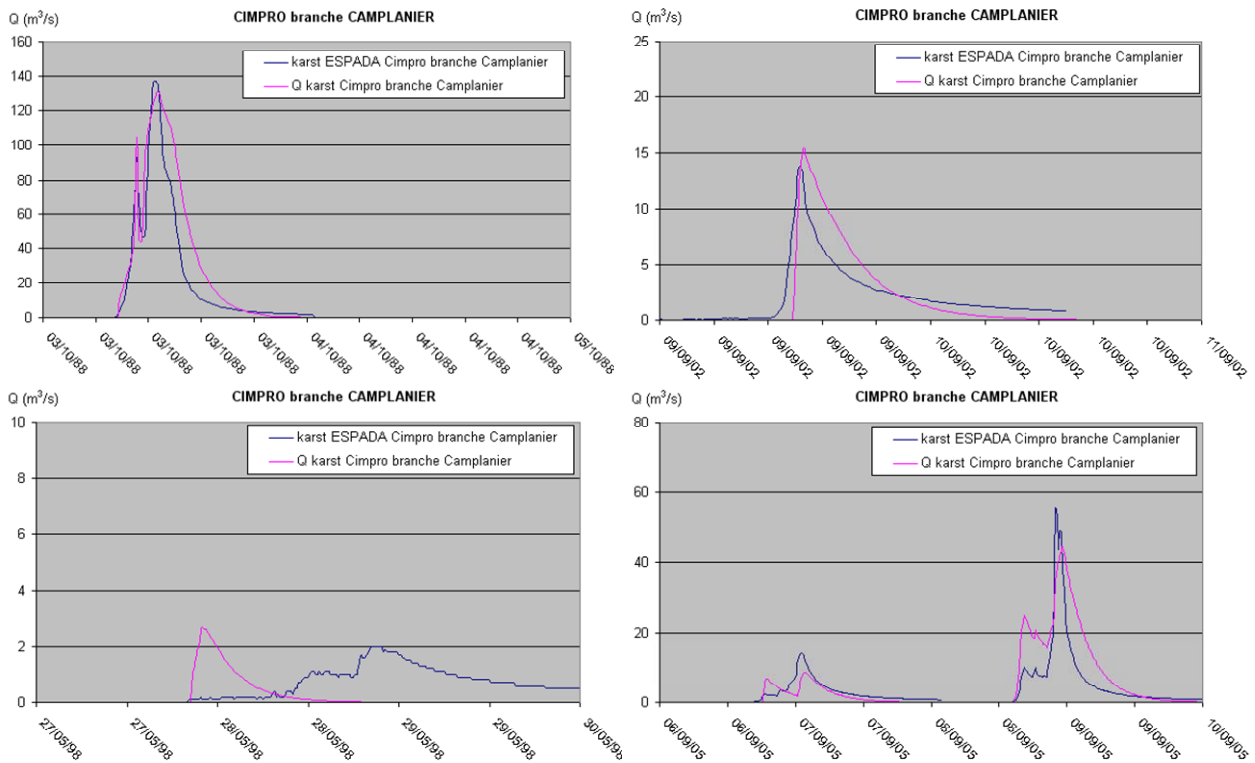


Illustration 14. Hydrogrammes de la composante karst pour la branche Camplanier à Cimpro, simulés par les modèle GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales

2.2.4. Anduze à Cimpro

Les paramètres calés sont :

Hseuil karst2 = 52,55 m et Kcadereau = 0,07

Hseuil karst3= 53,5 m et Kcadereau2 = 0,095

Les résultats graphiques sont présentés Illustration 15.

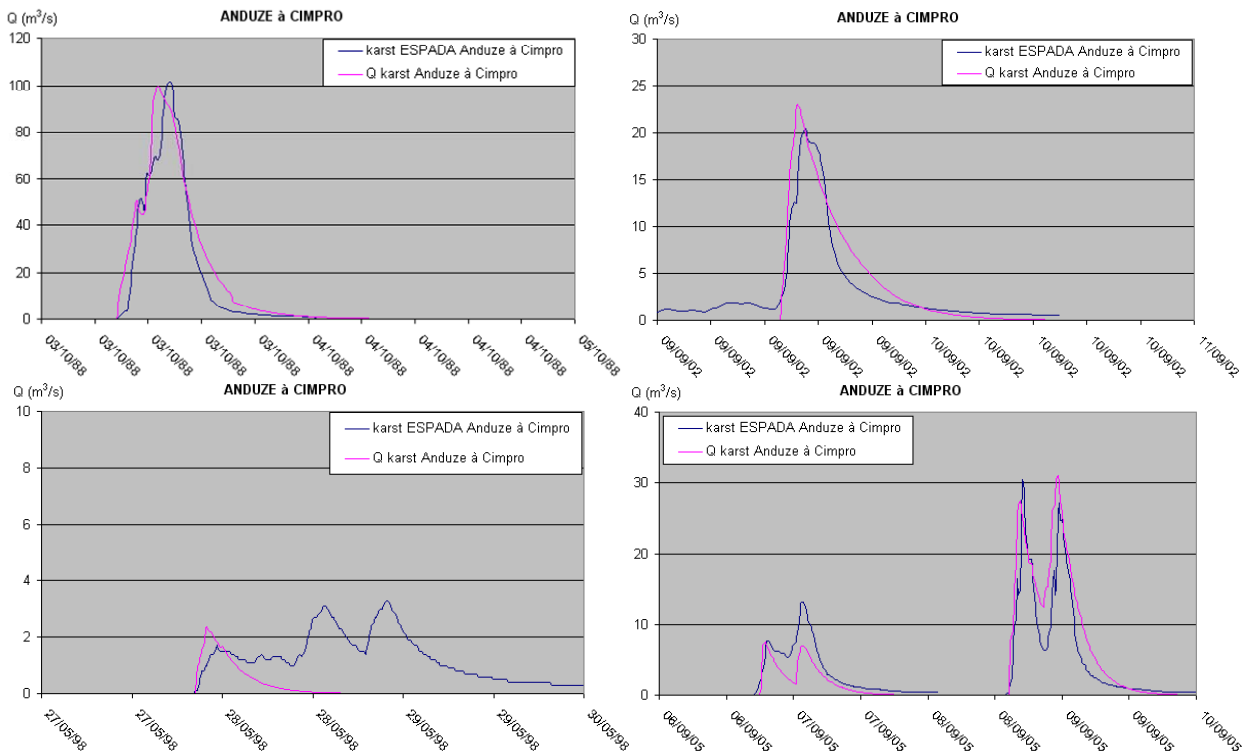


Illustration 15. Hydrogrammes simulés, de la composante karst de Anduze à Cimpro, par les modèle GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales

Conclusion

Ce travail a permis de mettre en œuvre la méthode permettant d'intégrer la composante karst en fonction de la saturation de l'aquifère dans le modèle GR d'ESPADA. Cette méthode a été développée sur le **cadereau d'Alès** en utilisant notamment les données piézométriques de l'**aven Mazauric** pour caractériser la **saturation de l'aquifère**.

Un modèle réservoir, dit **modèle « composante karst dans le cadereau »**, a ainsi été développé au pas de temps 15 minutes à partir du logiciel Vensim. Il intègre (i) un **module karst** calé sur les données de l'**aven Mazauric** caractéristiques du remplissage de l'aquifère et (ii) un **module cadereau** alimenté par les pluies efficaces en fonction de l'état de saturation de l'aquifère karstique défini par le module karst. Ce module cadereau est calé à partir des hydrogrammes de la composante karst, reconstitués par le modèle GR. Ce modèle est adapté, **sa structure et les paramètres calés doivent maintenant être intégrés au modèle GR d'ESPADA**. Il permet de calculer en période de crue, le débit en (m^3/s) produit par le débordement du karst et le refus à l'infiltration, dans le cadereau d'Alès.

Aussi, la prochaine étape de ce travail, visera à généraliser la modélisation à l'**ensemble des cadereaux**. Il faudra alors définir des piézomètres adaptés à la caractérisation de la saturation locale de l'aquifère karstique sur les différents sous bassins versants des cadereaux puis simuler les débits dans les cadereaux.



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

Service géologique régional LRO
1039 rue de Pinville
34000 – Montpellier - France
Tél. : 04 67 15 79 91