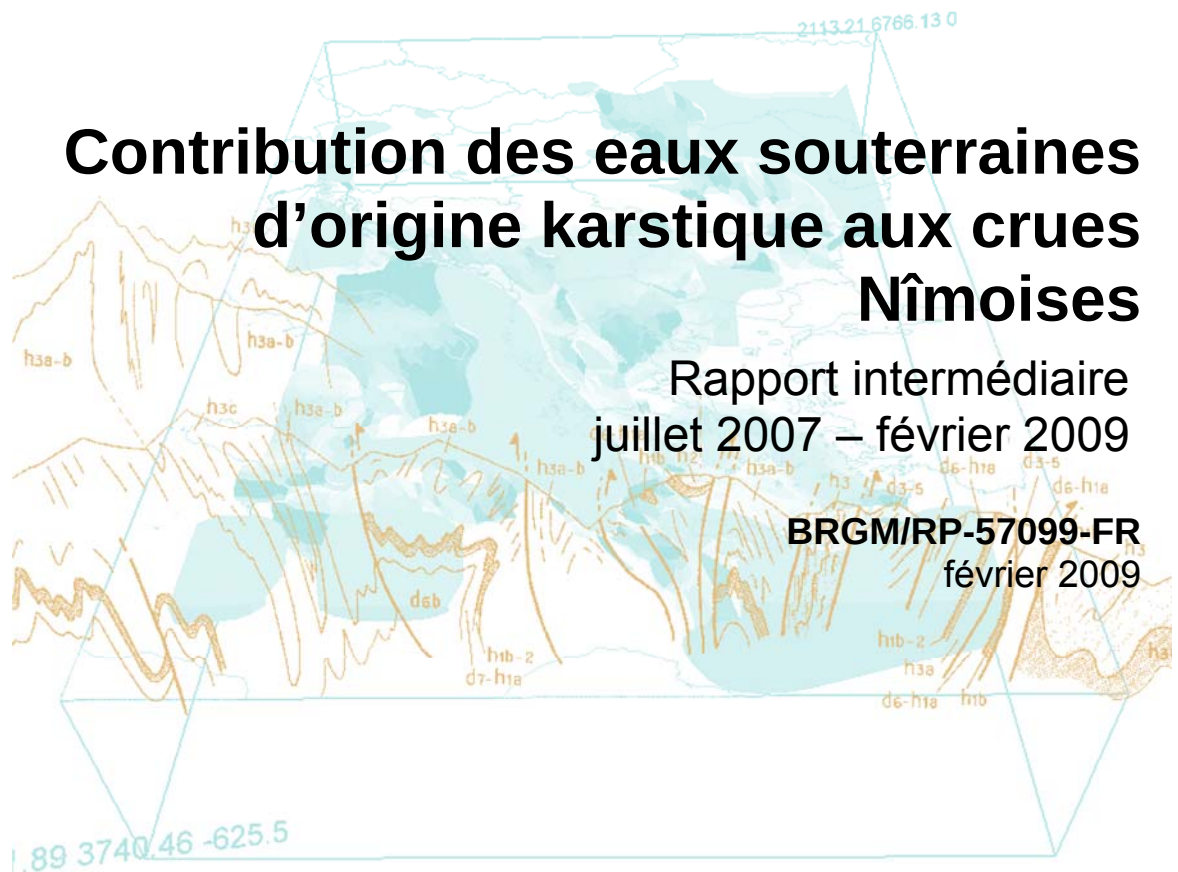




Contribution des eaux souterraines d'origine karstique aux crues Nîmoises

Rapport intermédiaire
juillet 2007 – février 2009

BRGM/RP-57099-FR
février 2009



Contribution des eaux souterraines d'origine karstique aux crues Nîmoises

Rapport intermédiaire
juillet 2007 – février 2009

BRGM/RP-57099-FR
février 2009

P. Fleury, B. Ladouche
Avec la collaboration de
J. Cubizolles

Vérificateur :

Nom : Dörfliger Nathalie

Approbateur :

Nom : Audibert Marc

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



Mots clés : Nîmes, karst, modélisation hydrologique, prévention des inondations.

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

Fleury P., Ladouche B., Cubizolles, J., 2009. Contribution des eaux souterraines d'origine karstique aux crues Nîmoises. Rapport intermédiaire. Juillet 2007 – Février 2009 - BRGM RP-57099-FR, 53 p, 39 ill.

© BRGM, 2009, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

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 1 – Réseau d'alerte « eaux souterraines » devant aboutir à la définition de seuils d'alerte et 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 des débordements de l'aquifère karstique ainsi que d'une augmentation du ruissellement induit par la saturation de l'aquifère karstique.

Ce travail a pour objectif de définir des seuils d'alerte concernant des hauteurs d'eau piézométriques critiques de l'aquifère karstique. Il implique dans un premier temps, la modélisation du débit des cadereaux à chacune des stations de référence (Anduze, Cimpro, Pondre, Valdegour, Camplanier, Engance, Vandyck et Valladas) pour les quatre crues majeures (octobre 1988, mai 1998, septembre 2002 et septembre 2005). Les premiers résultats issus de modèles simples (Pluie-Débit) se révèlent adaptés uniquement pour la crue de mai 1998, la moins importante des quatre épisodes en termes de débit. Ce résultat indique que cette crue est le résultat uniquement de ruissellement ; elle ne présente pas de composante associée à un fonctionnement karstique. Pour les trois autres crues, la prise en compte de la composante « karst » est nécessaire à la représentation des débits de manière satisfaisante. Le second modèle développé prend ainsi en considération la saturation de la zone noyée du karst. La prise en considération du comportement hydrogéologique de la zone noyée de l'aquifère karstique a été appréhendée à partir d'une reconstitution des chroniques piézométriques du piézomètre du site du « Mas à 15 francs », situé de plus à proximité du cadereau d'Alès, dans sa partie amont. Cette reconstitution a été réalisée à partir d'un modèle de transfert Pluie-Piézométrie. Ce travail de modélisation des débits des cadereaux à partir de l'information « karst » a d'abord été mis en œuvre sur le cadereau d'Alès avant d'être appliqué à l'ensemble des cadereaux.

Par la suite le modèle de transfert établi sur la piézométrie du « Mas à 15 francs » a été utilisé afin de définir un abaque Piézométrie en fonction de la Pluie. Cet abaque permet de définir en fonction de scénario climatique la valeur de la piézométrie résultante. Il peut être utilisé pour des épisodes simples et également des épisodes multiples. Aussi la cote de débordement de l'aquifère étant connue, cet abaque permet de définir des seuils d'alerte pour des événements pluvieux d'intensité et de durée données par les prévisions météorologiques. Il est alors possible de prédire avec quelques heures d'avance le débordement du karst.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Présentation des données disponibles	12
2.1. DEBIT DANS LES CADEREAUX	13
2.2. PLUVIOMETRIE SUR LES BASSINS VERSANTS DES CADEREAUX	14
2.3. PIEZOMETRIE ET INFORMATION KARST	15
3. Modélisation du débit des cadereaux	18
3.1. APPLICATION AU CADEREAU D'ALES	19
3.1.1. Réalisation d'un modèle simple	19
3.1.2. Définition de l'information karst	25
3.1.3. Modèle couplant l'information karst à la pluie	29
3.2. RESULTAT DE LA MODELISATION POUR LES AUTRES CADEREAUX	35
3.2.1. Pondre	35
3.2.2. Valdegour	37
3.2.3. Camplanier	37
3.2.4. Uzès	39
3.2.5. Valladas	41
3.3. CONCLUSION CONCERNANT LA MODELISATION DU DEBIT DES CADEREAUX	44
4. Développement méthodologique permettant de définir des seuils d'alerte	45
4.1. CAS DES CRUES SIMPLES	45
4.2. CAS DES CRUES MULTIPLES	48
5. Conclusions et perspectives	53
6. Bibliographie	55

Liste des illustrations

Illustration 1 : Réseau hydrographique de la Ville de Nîmes et instrumental (station limnimétriques, pluviographiques et piézométriques)	12
Illustration 2 : Débits de pointe en m ³ /s au droit des différentes stations limnimétriques, les valeurs en jaune correspondent au maximum mesuré au pas de temps horaire, les valeurs en bleu au maximum instantané reconstitué	14
Illustration 3 : Variations piézométriques lors de la crue de novembre 2007 associée à environ 80 mm de précipitation et log stratigraphique des piézomètres Mas à 15 francs- « 1 » et « 2 »	16
Illustration 4 : Schéma conceptuel de fonctionnement des piézomètres Mas à 15 francs 1 et 2	17
Illustration 5 : Débits pour la période 1998 - 2005 et pour les crues de mai 1998 et septembre 2005 aux station d'Anduze et CimPro – Cadereau d'Alès	20
Illustration 6 : Schéma du principe du modèle de transfert à partir du logiciel Tempo	21
Illustration 7 : Réponse impulsionnelle lente et rapide des débits du cadereau d'Alès (modèle simple)	22
Illustration 8 : Résultats graphiques pour le modèle simple développé sur Anduze	23
Illustration 9 : Résultats graphiques pour le modèle simple développé sur Cimpro	24
Illustration 10 : Tableau récapitulatif des débits maximaux en m ³ /s mesurés horaires (en jaune), et simulés à partir du modèle simple, et maximums instantannés estimés (bleu)	25
Illustration 11 : Schéma de principe du modèle de transfert du piézomètre représentatif du karst	26
Illustration 12 : Réponse impulsionnelle lente et rapide de la piézométrie du site « Mas à 15 francs »	26
Illustration 13 : Seuil de pluie efficace Oméga et de la pluviométrie	27
Illustration 14 : Comparaison de la piézométrie simulée et mesurée du site « Mas à 15 francs »	27
Illustration 15 : Piézométrie reconstituée du site Mas à 15 fr	28
Illustration 16 : Information débordement du karst au site Mas à 15 fr (le seuil de débordement ici est fixé à 120 m)	29
Illustration 17. Schéma de principe des modèles de transfert prenant en considération l'information karst	30
Illustration 18 : Réponse impulsionnelle lente et rapide des débits du cadereau d'Alès avec le modèle prenant en considération l'information karst	30
Illustration 19 : Résultats graphiques pour le modèle prenant en considération l'information karst (seuil à 120 m) développé sur Anduze	31

Illustration 20 : Résultats graphiques pour le modèle prenant en considération l'information karst (seuil à 115 m) développé sur Cimpro.....	32
Illustration 21 : Résultats graphiques pour le modèle prenant en considération l'information karst (seuil à 120 m) développé sur Cimpro.....	33
Illustration 22 : Tableau récapitulatif pour le caderau d'Alès des débits maximums instantannés estimés (bleu) et des débits maximums mesurés horaires (en jaune), et simulés à partir du modèle intégrant l'information karst. Les débits sont exprimés en m ³ /s	34
Illustration 23 : Tableau récapitulatif pour le caderau de Poudre des débits maximums instantannés estimés (bleu), maximums mesurés horaires (en jaune), et simulés à partir du modèle simple et avec l'information karst. Les débits sont exprimés en m ³ /s	35
Illustration 24 : Résultats graphiques pour les modèles simple et avec l'information karst développés sur Poudre	36
Illustration 25 : Tableau récapitulatif pour le caderau de Valdegour des débits maximums instantannés estimés (bleu) maximums mesurés horaires (en jaune), et simulés à partir du modèle simple. Les débits sont exprimés en m ³ /s	37
Illustration 26 : Résultats graphiques pour le modèle simple développé sur Valdegour	37
Illustration 27 : Tableau récapitulatif pour le caderau de Valdegour des débits maximums instantannés estimés (bleu) maximums mesurés horaires (en jaune), et simulés à partir du modèle simple et prenant en considération l'information karst. Les débits sont exprimés en m ³ /s.	38
Illustration 28 : Résultats graphiques pour les modèles simple et avec l'information karst développé sur Camplanier	38
Illustration 29 : Tableau récapitulatif pour le caderau d'Uzès des débits maximums maximums instantannés estimés (bleu) mesurés horaires (en jaune), et simulés à partir du modèle simple et prenant en considération l'information karst. débits sont exprimés en m ³ /s.	39
Illustration 30 : Résultats graphiques pour les modèles simples et avec l'information karst développés sur Engance.....	40
Illustration 31 : Résultats graphiques pour les modèles simples et avec l'information karst développés sur Van-Dyck	41
Illustration 32 : Tableau récapitulatif pour le caderau de Valladas des débits maximums instantannés estimés (bleu), maximums mesurés horaires (en jaune), et simulés à partir du modèle simple et prenant en considération l'information karst. Les débits sont exprimés en m ³ /s.....	42
Illustration 33 : Résultats graphiques pour les modèles simples et avec l'information karst développés sur Valladas	43
Illustration 34 : Définition du pic de piézométrie à Mas à 15 francs à partir de l'abaque pour l'épisode du 6 septembre 2005.....	46
Illustration 35 : Définition du pic de piézométrie à Mas à 15 francs à partir de l'abaque pour l'épisode du 3 octobre 1988.....	47
Illustration 36 : Décomposition de la récession selon la méthode de Mangin (1970).	50
Illustration 37 : Coefficient de récession déduit de l'analyse de Mangin sur différents épisodes de crue	50

Illustration 38 : Abaque piézométrie en fonction de la durée du tarissement	51
Illustration 39 : Exemple d'utilisation de l'abaque pour des épisodes multiples.....	52

1. Introduction

Dans le cadre de la convention de recherche et développement partagés avec la ville de Nîmes, le BRGM conduit un projet (PSP07LRO12) concernant la caractérisation de la composante « eaux souterraines » de l'aquifère karstique et la définition de seuils d'alerte « eaux souterraines » à intégrer dans le réseau d'alerte ESPADA de la Ville de Nîmes. La caractérisation de la composante « eaux souterraines ou karst » conduit notamment à la modélisation des débits des cadereaux lors de fortes crues. L'intégration de seuils d'alerte « eaux souterraines » au système d'alerte ESPADA de la Ville de Nîmes devra permettre d'améliorer la gestion des crises provoquées par de fortes précipitations.

Pour ce faire, les différentes composantes du flux alimentant les cadereaux lors des crues sont caractérisées à partir de l'analyse de quatre épisodes de crues majeures survenues depuis 1988. Il s'agit des épisodes d'octobre 1988, de mai 1998, de septembre 2002 et de septembre 2005. Les données de débit pour ces crues ont été acquises par la Ville de Nîmes ; elles sont de nature différente, soit continue avec un pas de temps inférieur au pas de temps horaire, soit ponctuelle avec uniquement une estimation de débit maximum. La modélisation des écoulements dans les cadereaux pour ces épisodes est réalisée au pas de temps horaire, en prenant en considération deux composantes identifiées lors des études hydrogéologiques antérieures (Fleury et al., 2007 ; Maréchal et Ladouche, 2006). Il s'agit des composantes « ruissellement de surface » et « karst ». Cette dernière est associée à la fois au débordement de l'aquifère karstique et aussi à l'accroissement du ruissellement induit par la saturation du karst.

Ce document constitue ainsi un rapport d'étape, après 18 mois d'activité. Il présente l'avancement des travaux de modélisation concernant la caractérisation de l'écoulement lors des fortes crues (Module 1), mais aussi la mise en place d'une méthodologie pour la définition de seuils d'alerte (Module 3). La prise en compte de la composante « karst » dans la modélisation des débits, est effectuée à partir de l'analyse et de la modélisation du fonctionnement de la zone noyée de l'aquifère, déduite des chroniques piézométriques du site du « Mas à 15 francs ». Ce piézomètre est localisé à proximité du cadereau d'Alès, dans sa partie amont. La modélisation est réalisée sur l'ensemble des stations des différents cadereaux (Anduze, Cimpro, Pondre, Valdegour, Camplanier, Engance, Vandyck et Valladas). Concernant la méthodologie pour la définition des seuils d'alerte, elle est mise en œuvre et testée sur le cadereau d'Alès. Elle est basée sur la modélisation du remplissage de l'aquifère karstique en fonction de différents scénarios climatiques.

2. Présentation des données disponibles

La Ville de Nîmes est traversée par un réseau de six cadereaux, avec d'Est en Ouest, le cadereau de Valladas, le cadereau d'Uzès, d'Alès, de Camplanier, de Valdegour et de la Poudre (Illustration 1).



Illustration 1 : Réseau hydrographique de la Ville de Nîmes et instrumental (station limnimétriques, pluviographiques et piézométriques)

L'étude a été réalisée à partir des données acquises conjointement sur les cadereaux et les pluviographes sur la période mars 1998 à septembre 2005. Cette période couvre trois épisodes de crues majeures de :

- 27-28 mai 1998,

- 9 septembre 2002,
- 6 et 8 septembre 2005.

L'épisode du 3 octobre 1988 a également été pris en compte à partir des données de précipitations reconstituées dans le cadre des travaux menés par BCEOM-Egis pour le compte de la Ville (projet ESPADA) à partir des données pluviométriques de terrain et des maximums instantanés de débit déduits des observations de terrain.

Avant de mener ce travail réalisé dans le cadre du SCHAPI, les travaux de recherche s'appuyaient sur une modélisation des débits des cadereaux réalisée au pas de temps journalier. Ce pas de temps est jugé beaucoup trop intégrateur compte tenu de la structure de ces épisodes de crue de forte intensité et de très courte durée (les plus fortes crues ont des durées inférieures à 24 h). C'est pourquoi, l'étude est réalisée au pas de temps horaire, à partir des données horaires de précipitations.

Un autre point à souligner est la modification du comportement hydraulique des différents cadereaux du fait de l'aménagement des bassins de rétention en grande partie, situés en tête des bassins versants des cadereaux. A ce jour cette information, n'a été prise que de manière qualitative, il est prévu par la suite de travailler avec Egis qui pourra, grâce à une mise à jour du modèle à réservoir, développé pour les cadereaux, prendre en compte l'impact des bassins de rétention de volume variable et construits de façon échelonnée dans le temps depuis 1988.

Les données à disposition sont présentées ci-dessous :

2.1. DEBIT DANS LES CADEREAUX

Les hauteurs d'eau ont été mesurées sur les sites suivant (Illustration 1) : Anduze et Cimpro (Cimetière Protestant) pour le cadereau d'Alès, Engance et Van Dyck pour le cadereau d'Uzès, Camplanier, Valdegour, Pondre et Valladas pour les cadereaux du même nom. Sur l'ensemble de ces points de suivi, les chroniques sont disparates avec la présence de lacunes plus ou moins longues.

De nouvelles données sont venues étayer les chroniques dont nous disposions, à savoir la reconstitution et la récupération d'une partie des chroniques de hauteur d'eau pour l'épisode de septembre 2005 et l'évaluation des débits maximaux instantanés pour les épisodes d'octobre 1988 et septembre 2002 (Illustration 2) auprès de la Ville de Nîmes (Services techniques).

Cadereau	Localisation	Surface BV (km ²)	Octobre 1988	Mai 1998	Sept. 2002	Sept. 2005
Pondre	limni	10.8	240	7.3	25	60
Valdegour	Limni	4.9	128	23	23	24
Alès	Limni Anduze	6		3	7	22
Alès	Limni CimPro (aval confluence Camplanier)	21.1	485	12	42	65-70
Alès (Camplanier)	Limni Camplanier				6	20-25
Uzès	Limni Engances				5.6	1.4
Uzès	Limni Van Dyck	6.7	127	7.3	30	15
Valladas	Limni	6.4	132	7.2	70	7

Illustration 2 : Débits de pointe en m³/s au droit des différentes stations limnimétriques, les valeurs en jaune correspondent au maximum mesuré au pas de temps horaire, les valeurs en bleu au maximum instantané reconstitué

Concernant les données de débit pour ces quatre épisodes, il s'agit des maximums horaires mesurés aux limnigraphes (en jaune) et estimés (valeurs instantanées) à partir d'informations de terrains et calculs hydrauliques (en bleu). Les informations sur les débits estimés instantanés donnent essentiellement un ordre de grandeur, ces débits de pointe pouvant être très largement supérieurs aux débits maximums intégrés au pas de temps horaire. Il n'est malheureusement pas possible de reconstituer le débit maximum horaire, la relation entre le débit maximum instantané et horaire n'étant pas constante d'un épisode à l'autre.

2.2. PLUVIOMETRIE SUR LES BASSINS VERSANTS DES CADEREAUX

Sur la période 1998-2005, seuls trois postes pluviométriques gérés par la Ville de Nîmes se sont révélés relativement complets. Il s'agit des pluviomètres d'Anduze, de Bonfa et d'Uzès (Illustration 1). L'option pondération des chroniques de pluie du logiciel Tempo a été utilisée afin de définir pour chaque bassin ou sous-bassin versant, la chronique de pluie représentative. Ces données sont également utilisées au pas de temps horaire.

Ces chroniques sont dans l'ensemble complètes sur la période 1998 à aujourd'hui ; Il faut toutefois noter deux lacunes importantes sur ces trois stations, de juin 2003 à juillet 2004 et de janvier 2005 à juillet 2005. La seconde période, de janvier 2005 à juillet 2005, a été reconstituée à partir des données journalières de la station Météo-France située à l'Est de la ville (voir Illustration 1). Sur l'autre période, juin 2003 à juillet 2004, cette portion de chronique « vide » a été conservée afin de reconstituer l'épisode

de crue d'octobre 1988. Les données concernant les précipitations de septembre et octobre 1988 ont été introduites sur la période du second semestre 2003. Cette reconstitution permettra par la suite, en utilisant le mode prévisionnel des modèles, d'évaluer le débit des cadereaux lors de cette crue. Les données de précipitation concernant l'épisode du 3 octobre 1988 ont été reconstituées par BCEOM-Egis, à partir des données pluviométriques de terrain disponibles. Trois pluies ont ainsi été définies. La plus forte au nord de la Ville de Nîmes, s'applique au plateau des Garrigues avec 420 mm, la seconde 27 % plus faible soit 310 mm caractérise la partie médiane et orientale du bassin d'alimentation, enfin la dernière 38 % inférieure à la première pluie (265 mm) s'applique au domaine appartenant à la plaine de la Vistrenque.

2.3. PIEZOMETRIE ET INFORMATION KARST

Le comportement de plusieurs piézomètres (instrumentés dès 2004) a été étudié. Leur représentativité vis-à-vis des débordements a été testée. Ces travaux révèlent que plusieurs de ces points caractérisent l'épikarst et son fonctionnement, ce qui est le cas de Ponges et Provence qui ont été testés pour représenter l'information karst dans le précédent rapport (Desprats et al., 2007). Aussi il est apparu que la dynamique de ces piézomètres, en accord avec le fonctionnement du milieu épikarstique qu'ils représentent, est beaucoup trop inertiel. Ces points sont en effet caractérisés par des débordements relativement fréquents, mais surtout par des temps de débordement et de récession très longs. Ce même comportement a été observé sur les sites de Guigue et Tomporski, localisés sur le cadereau de Valladas.

La dynamique de crue observée dans les cadereaux n'étant pas compatible avec cette dynamique très inertielle, d'autres points de suivi ont été étudiés afin de représenter au mieux le débordement du karst à l'échelle des bassins versants des cadereaux. Le nouveau piézomètre de Mas à 15 francs (Illustration 1) réalisé en août 2007 a ainsi été retenu pour représenter les débordements du karst sur le cadereau d'Alès.

Le site Mas à 15 francs est constitué de deux piézomètres, un profond (60 m) appelé Mas à 15 fr-« 1 » et un de surface (20 m), Mas à 15 fr-« 2 ». Le piézomètre Mas à 15 fr-« 1 » recoupe un conduit à 46 m de profondeur (Illustration 3).

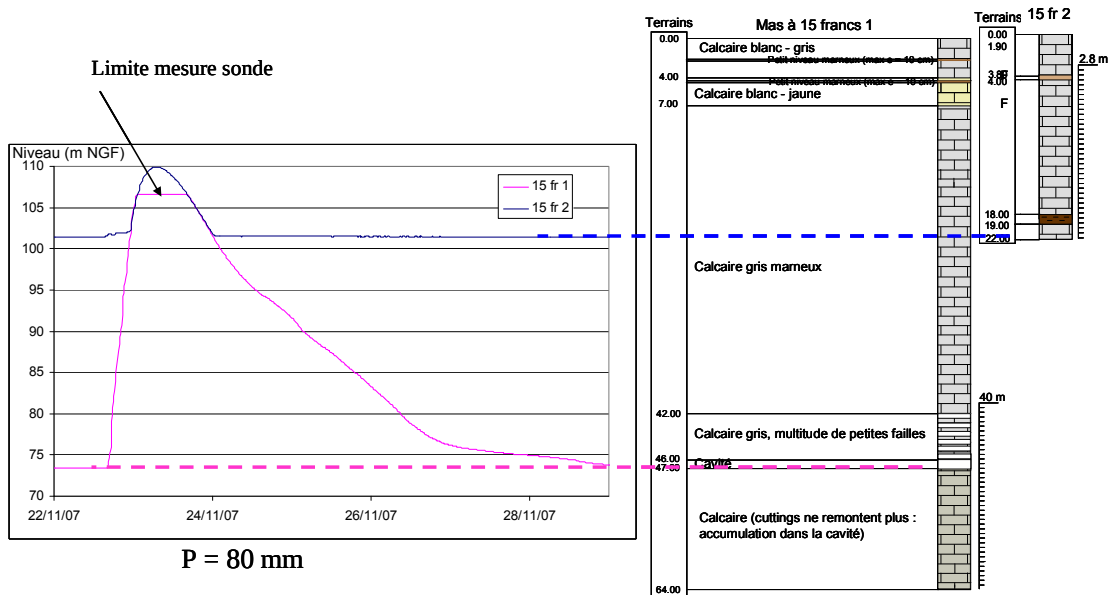


Illustration 3 : Variations piézométriques lors de la crue de novembre 2007 associée à environ 80 mm de précipitation et log stratigraphique des piézomètres Mas à 15 francs-« 1 » et « 2 ».

Lors d'épisodes de précipitation importants, le système se met en charge très rapidement. L'augmentation des niveaux d'eau est très forte (40 mètres en moins de 12 heures pour la crue de novembre 2007). Lorsque les niveaux atteignent la base du piézomètre-« 2 », les niveaux d'eau mesurés dans les deux piézomètres sont alors identiques. Ce suivi en parallèle des niveaux sur les deux piézomètres met ainsi en évidence une remontée des niveaux importante et rapide dans l'ensemble des horizons de l'aquifère. Ces variations sont comparables à celles observées sur les piézomètres recoupant le drain principal. Le schéma conceptuel de fonctionnement pour ce système a ainsi été établi, il est schématisé dans l'illustration 4.

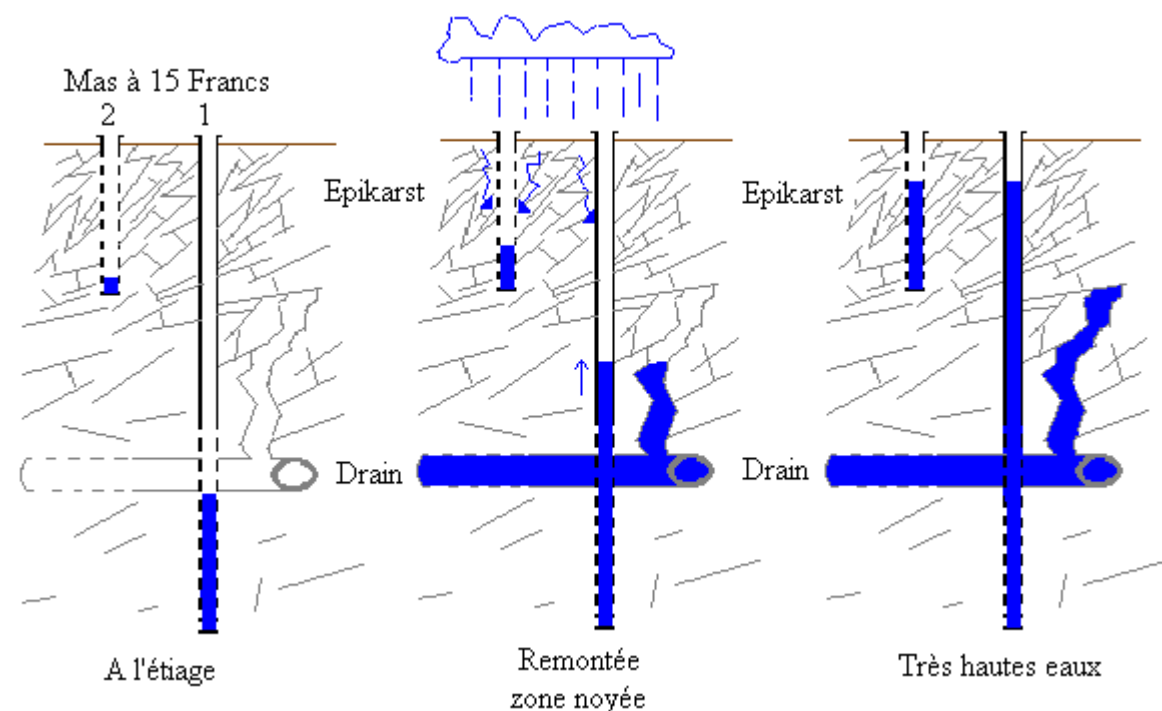


Illustration 4 : Schéma conceptuel de fonctionnement des piézomètres Mas à 15 francs 1 et 2

Ainsi compte tenu de la dynamique très rapide de ce système et de la prise en compte à la fois des remontées de la zone noyée via le réseau de drain et également les remontées au niveau de la zone épikarstique, le piézomètre Mas à 15 francs a été retenu pour la suite de l'étude.

Les autres sites piézométriques du nouveau réseau n'ont pas été caractérisés par des réactions piézométriques si intenses. Toutefois depuis leur instrumentation en août 2007, il n'y a pas eu d'épisodes de précipitation majeurs. Il est probable que des précipitations importantes engendrent des réponses proportionnellement plus fortes, notamment du fait de la non linéarité des systèmes karstiques. Le suivi se poursuit donc sur les autres sites du réseau dans le cadre de ce projet.

3. Modélisation du débit des cadereaux

La méthode développée dans le cadre de cette étude est basée sur une modélisation globale à l'aide du logiciel Tempo, mise en œuvre sur les données horaires des cadereaux enregistrées de 1998 à 2005. Cette méthode est caractérisée par l'identification de fonctions de transferts qui lient la pluie et l'information du karst au débit. Les mesures de hauteur d'eau réalisées par la Ville de Nîmes ont été converties en débit à partir de courbes de tarage établies par le BCEOM-Egis dans le cadre du projet ESPADA pour la Ville de Nîmes.

Les données concernant les maxima, bien que représentant des informations partielles, seront utilisées afin de valider les différents modèles. Nous avons ainsi travaillé sur la période avril 1998 à septembre 2005 en incluant également la crue d'octobre 1988.

Ainsi ce travail s'est attaché à représenter les débits des quatre crues principales à savoir :

- 3 octobre 1988,
- 27-28 mai 1998,
- 9 septembre 2002,
- 6 et 8 septembre 2005 .

Les précipitations associées pour le cadereau d'Alès sont respectivement de 430 mm en 1 jour, 140 mm en deux jours, 220 mm en 1 jour et 340 mm en 2 jours.

Dans un premier temps un modèle simple sans contribution du karst est testé. Si les résultats du modèle reproduisent convenablement le débit du cadereau, alors le travail de modélisation s'arrête, permettant de conclure que l'information karst n'est pas nécessaire pour expliquer le débit des cadereaux pour la gamme de débit testé. A l'inverse, si le modèle ne fournit pas de résultats satisfaisants, alors un modèle prenant en considération l'information karst est testé.

Afin de prendre en considération l'état du karst dans cette modélisation, il est nécessaire d'établir une chronique des niveaux piézométriques sur un site choisi. Le choix s'est porté sur l'ouvrage de Mas à 15 francs-« 1 ». Or les données ne sont acquises que depuis septembre 2007. Il a donc été nécessaire dans un premier temps de reconstituer cette chronique piézométrique.

La méthode complète va ainsi être présentée sur le cadereau d'Alès, les principaux résultats seront ensuite présentés sur les autres cadereaux. Ainsi le travail de modélisation prévoit les tâches suivantes :

- modélisation simple à partir de fonctions de transferts liant la pluie au débit,
- modélisation de la piézométrie de l'ouvrage Mas à 15 francs-« 1 » et reconstitution des chroniques antérieures,
- modèle couplant l'information karst à la pluie.

3.1. APPLICATION AU CADEREAU D'ALES

3.1.1. Réalisation d'un modèle simple

Les données de débit sont présentées sur l'illustration 5. Pour Anduze les crues de mai 1998 et septembre 2005 ont été enregistrées. Pour la station Cimpro (Cimetière Protestant) seule la crue de mai 1998 a été enregistrée. Toutefois la crue de septembre 2005 a été suivie par le BRGM au niveau du Pont des Neuf Arcades, situé environ 1,5 km en amont de la station de Cimpro. Le débit maximum horaire y était de $56 \text{ m}^3/\text{s}$, et le maximum sur une période de 15 minutes de $60 \text{ m}^3/\text{s}$. Aussi le débit de pointe a été estimé entre 65 et $70 \text{ m}^3/\text{s}$ à Cimpro. Afin de se rapprocher de cette valeur et reconstituer la chronique à la station Cimpro, la chronique du Pont des Neuf Arcades s'est vue appliquer un coefficient multiplicateur de 1,2. On obtient alors un débit maximum horaire égal à $67 \text{ m}^3/\text{s}$.

Aussi, le premier pic de crue du 7 septembre 2005 a été écrêté grâce au remplissage du bassin de rétention Route d'Anduze situé à l'amont la station ; Il en fut de même pour les débits à l'aval du cadereau (Cimpro), écrêtés par le bassin de Roquemaillère. La pluie du 8 septembre 2005 intervient alors que ces bassins sont pleins sans pouvoir alors jouer leur rôle d'écrêteur.

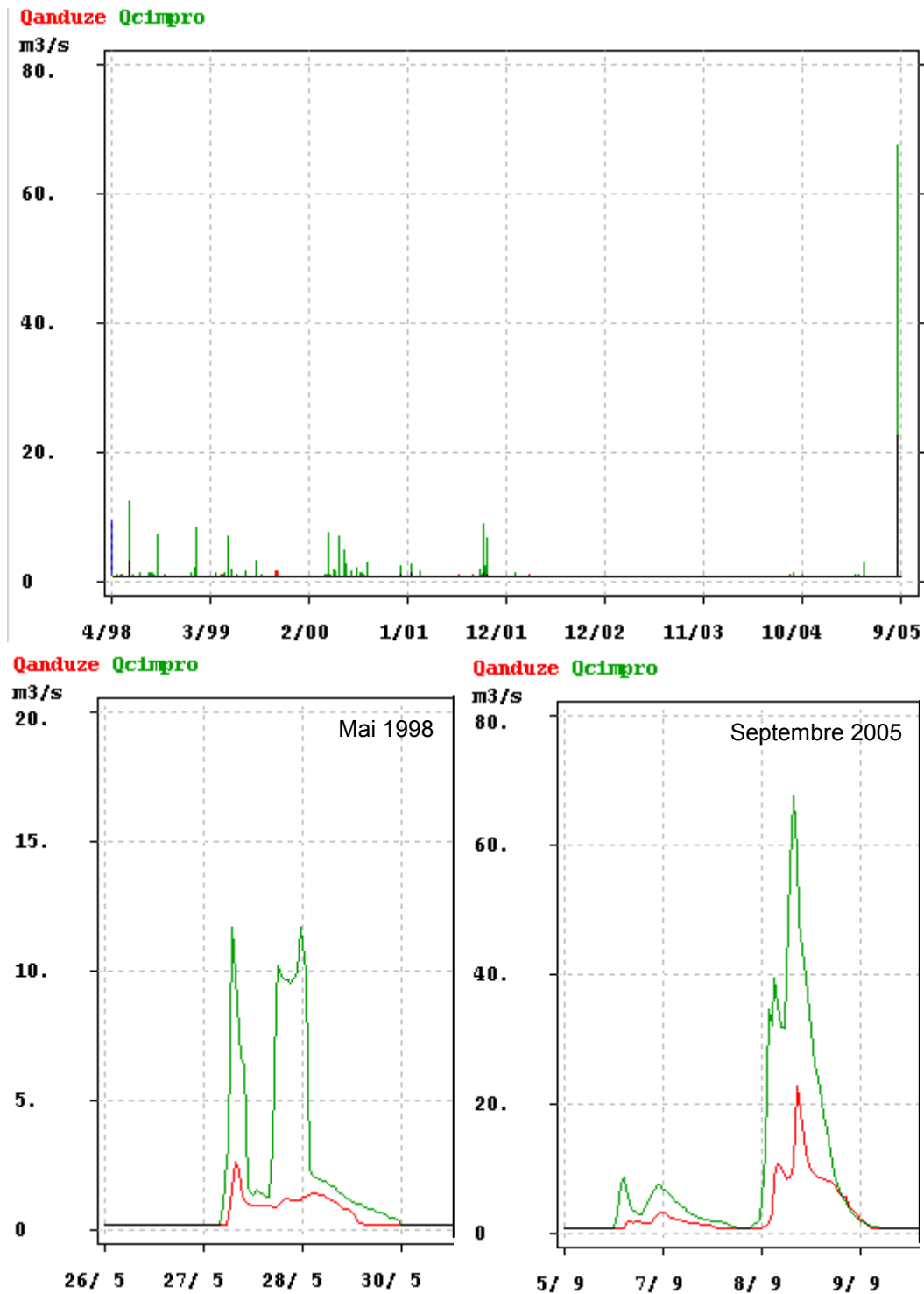


Illustration 5 : Débits pour la période 1998 - 2005 et pour les crues de mai 1998 et septembre 2005 aux station d'Anduze et CimPro – Cadereau d'Alès

Avant la mise en œuvre de la modélisation, la chronique de pluie représentative est définie à partir des chroniques des stations d'Anduze, Bonfa et Uzès, sur chaque bassin versant ou sous-bassin versant. La pondération est effectuée à partir de l'option pondération des chroniques de l'outil Tempo. Cette option équivaut à établir le corrélogramme croisé « pluie-débit » à partir d'une optimisation d'une combinaison linéaire des poids associés à chaque chronique de pluie. Les pondérations suivantes ont été définies :

$$P_{\text{pond_anduze}} = 0,64 * P_{\text{anduze}} + 0,36 * P_{\text{uzès}}$$

$$P_{\text{pond_cimpro}} = 0,49 * P_{\text{anduze}} + 0,51 * P_{\text{uzès}}$$

Dans un premier temps, un modèle simple réalisé à partir de fonctions de transferts liant la pluie au débit a été développé.

Le schéma de principe de la modélisation inverse des écoulements est présenté en Illustration 6. La technique d'inversion consiste à calculer la ou les réponses impulsionnelles (Illustration 7) de telle sorte que le modèle soit le plus proche possible du débit observé. Dans l'approche de modélisation, le choix du type des réponses impulsionnelles est fixé par l'utilisateur. Les réponses impulsionnelles peuvent être de type paramétrique (fonction mathématique connue, fonction exponentielle par exemple) ou non paramétrique. Concernant la simulation des débits des cadereaux, la pluie brute a été considérée comme étant une pluie efficace, cette option s'étant révélée plus adaptée à la simulation des débits dans les cadereaux. Conceptuellement ceci peut s'expliquer par le fait que l'eau circulant dans les cadereaux provient du ruissellement sur les zones urbanisées où l'ETP (évapotranspiration potentielle) est limitée, mais aussi du ruissellement sur des terrains peu perméables caractérisés par une faible végétation. Dans ces conditions, notamment pour des périodes courtes, l'approximation visant à négliger l'ETP et/ou l'ETR (évapotranspiration réelle) a un sens.

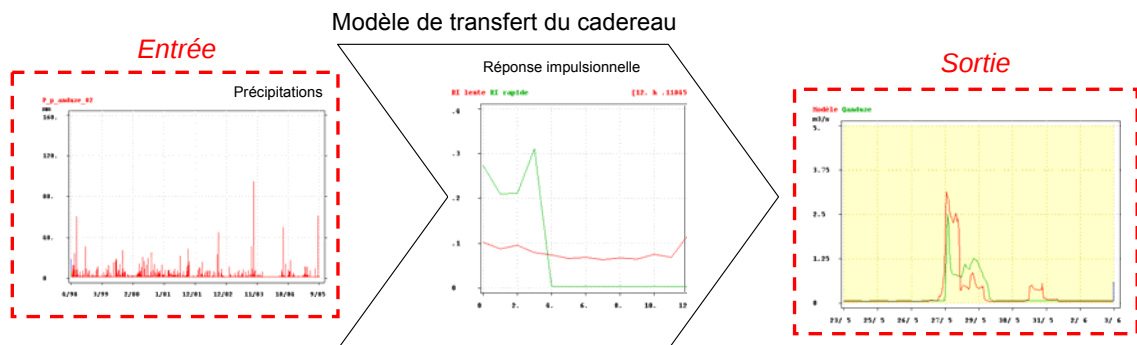


Illustration 6 : Schéma du principe du modèle de transfert à partir du logiciel Tempo

Ainsi, les réponses impulsionnelles calculées pour les modèles simples d'Anduze et Cimpro sont présentées ci-dessous (Illustration 7) :

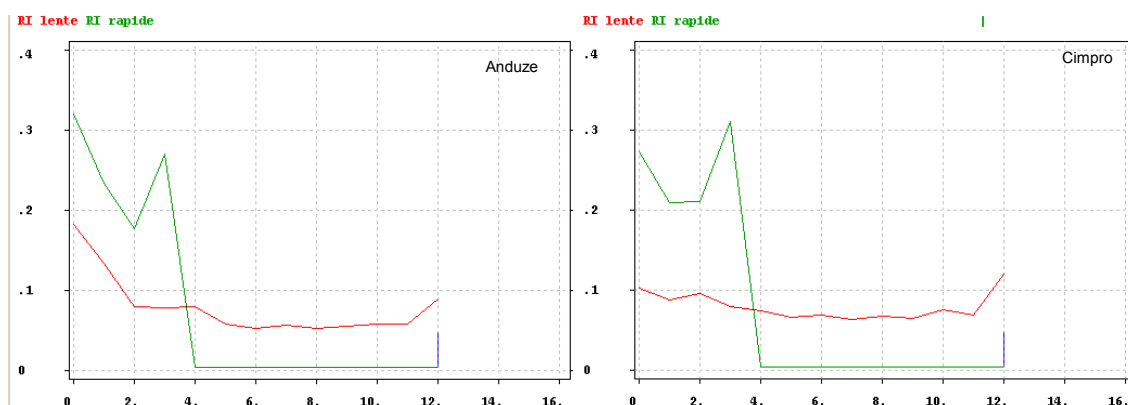
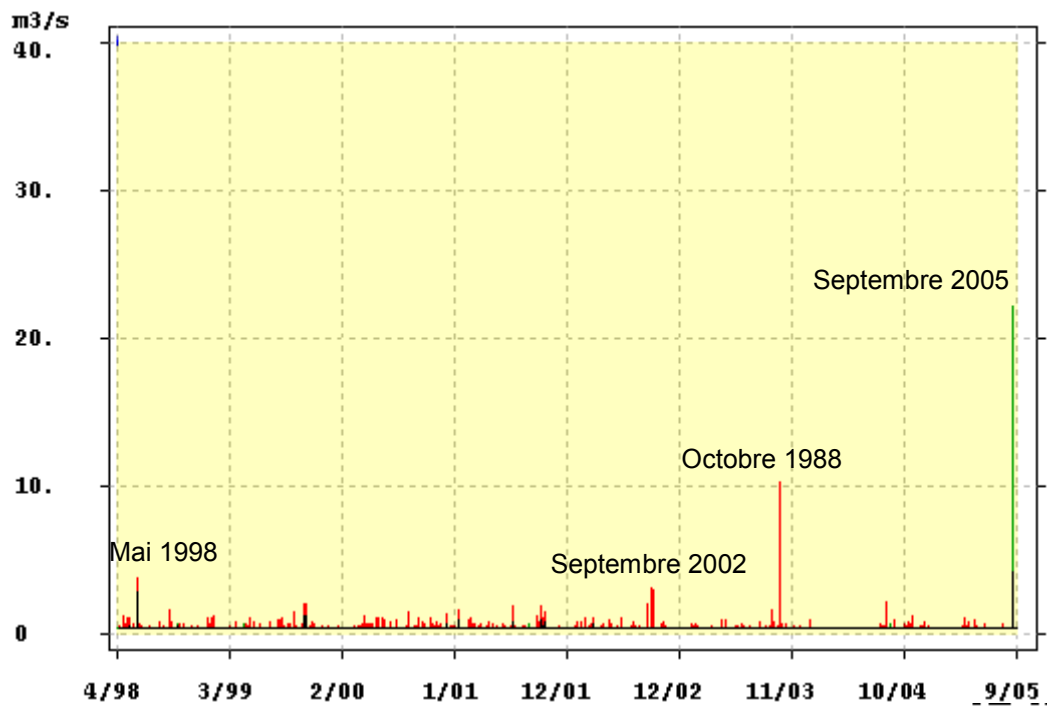


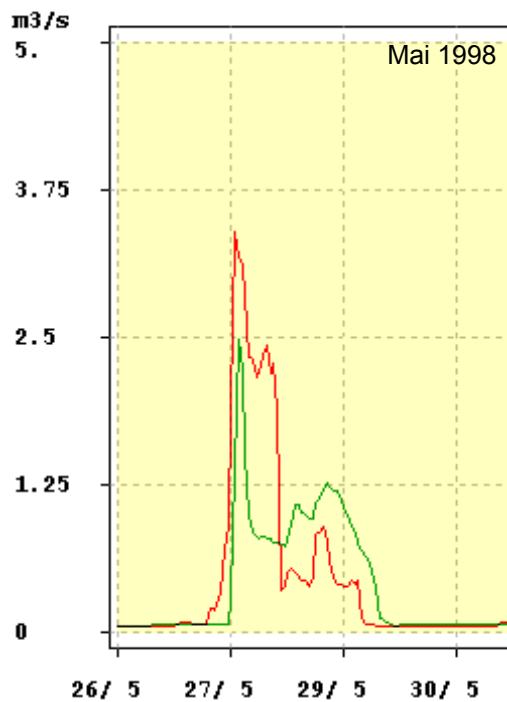
Illustration 7 : Réponse impulsionnelle lente et rapide des débits du cadereau d'Alès (modèle simple)

Les résultats graphiques de ces modèles sur les stations d'Anduze et Cimpro sont donnés ci-dessous (Illustration 8 et Illustration 9) :

Modèle Qanduze



Modèle Qanduze



Modèle Qanduze

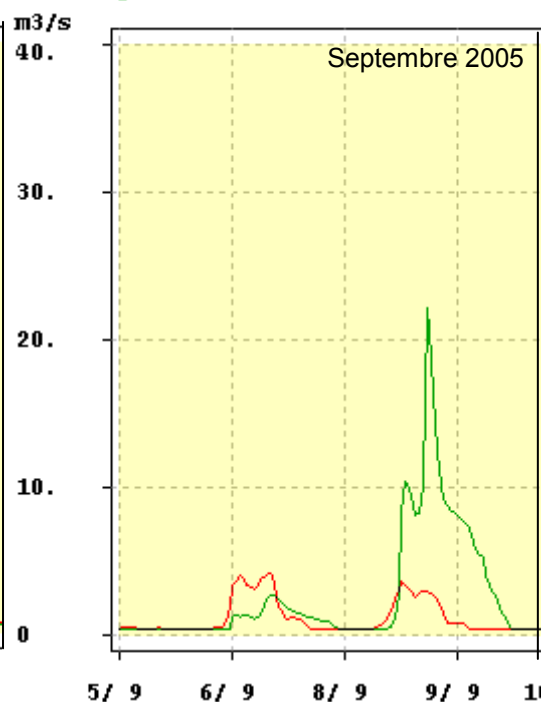


Illustration 8 : Résultats graphiques pour le modèle simple développé sur Anduze

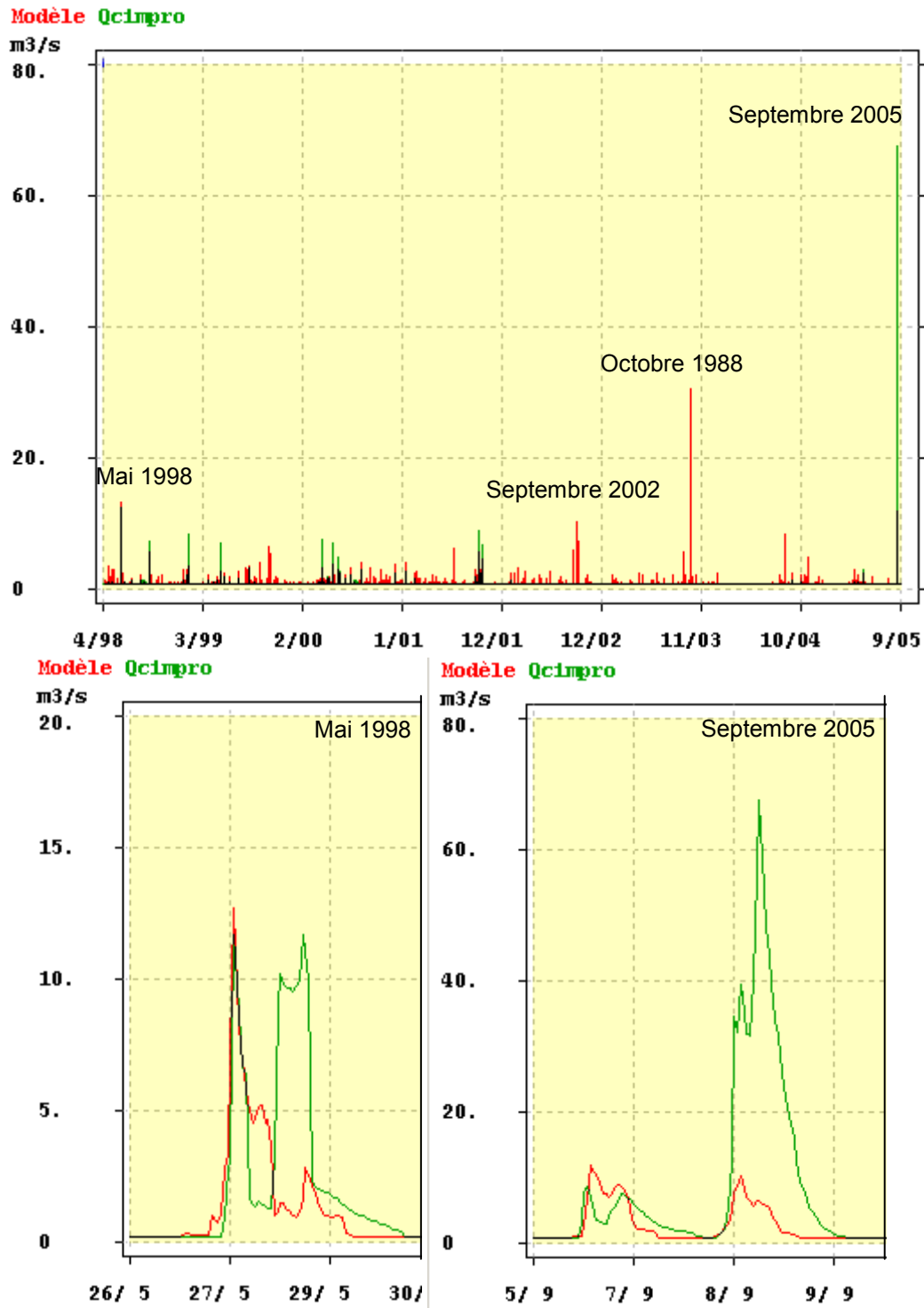


Illustration 9 : Résultats graphiques pour le modèle simple développé sur Cimpro

Les résultats concernant les débits maximaux simulés et mesurés ou reconstitués sont présentés dans le tableau récapitulatif suivant :

Station	Octobre 1988 mes	Octobre 1988 sim	Mai 1998 mes	Mai 1998 sim	Sept. 2002 mes	Sept. 2002 sim	Sept. 2005 mes	Sept. 2005 sim
Anduze	?	10	3	3	7	3	22	3
Cimpro	485	30	12	13	42	10	65-70	10

Illustration 10 : Tableau récapitulatif des débits maximaux en m³/s mesurés horaires (en jaune), et simulés à partir du modèle simple, et maximums instantanés estimés (bleu)

Au vu de ces résultats, et à l'exception de la crue de mai 1998, les débits apparaissent très fortement sous estimés. Ceci indique que seule, la pluie ne parvient pas à expliquer les débits durant les fortes crues.

Il est ainsi nécessaire de prendre en considération la composante « karst », la contribution du karst à ces épisodes ayant été démontrée au cours des précédentes études pour le cadereau d'Alès. Cette composante pour être intégrée au logiciel Tempo doit être définie comme la pluie, c'est à dire sous forme d'une impulsion. Ainsi l'information karst va être déduite à partir d'une chronique piézométrique et d'un seuil. Cette nouvelle chronique correspondra en quelque sorte aux débordements.

3.1.2. Définition de l'information karst

Une chronique caractéristique des débordements du karst doit ainsi être reconstituée sur la période 1998-2005 (avec en plus l'épisode d'octobre 1988). L'étude hydrologique réalisée sur le réseau de piézomètre a révélé que le piézomètre 1 du « Mas à 15 francs » était représentatif du fonctionnement de l'aquifère karstique et des débordements du karst. Cette reconstitution nécessite deux phases distinctes :

- elle repose en premier lieu sur la caractérisation du fonctionnement par l'identification d'une ou plusieurs fonctions de transfert qui lient la pluie à la piézométrie. Le modèle de transfert mis en œuvre permet de reproduire de manière satisfaisante l'évolution de la piézométrie observée sur la période de mesure (2007-2008). Ce modèle de transfert est schématisé à l'illustration 11 ;
- le modèle de transfert est ensuite utilisé pour simuler, de manière rétrospective, l'évolution de la piézométrie du système pour la période 1998 à 2005.

La chronique de pluie utilisée est définie par une pondération des trois chroniques de pluie présentées précédemment. La technique d'inversion utilisée par l'approche de modélisation Tempo consiste à calculer les réponses impulsionnelles (Illustration 12) et le seuil Oméga de pluie efficace (Illustration 13) de telle sorte que le modèle soit le plus proche possible de la piézométrie observée (Illustration 14). Ce seuil Oméga est estimé à partir de la pluie et d'une variable climatique (ETP, Nîmes Courbessac) de telle façon que seule la hauteur de pluie située au-dessus de ce seuil génère une

réponse de la piézométrie. Le seuil est calculé à partir d'une réponse impulsionnelle à la pluie et de la variable climatique, également obtenue par inversion.

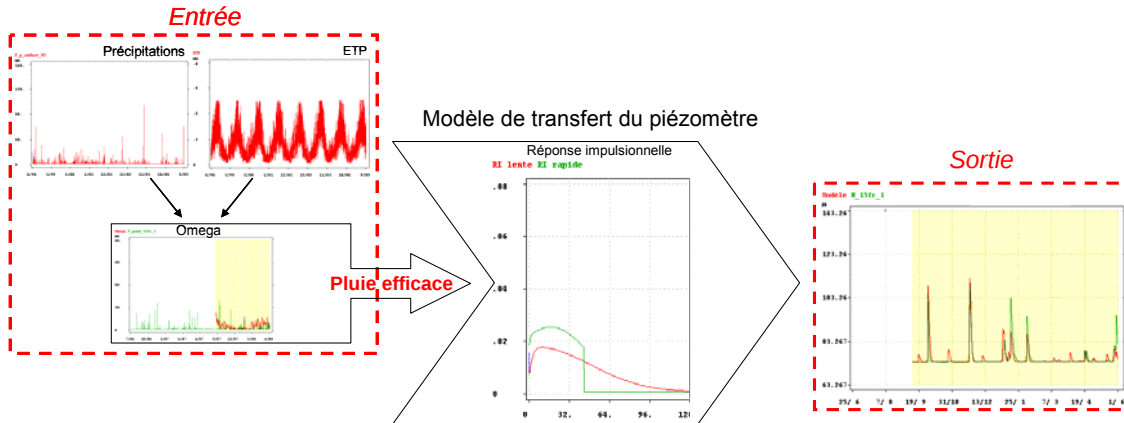


Illustration 11 : Schéma de principe du modèle de transfert du piézomètre représentatif du karst

La pluie pondérée calculée donne :

$$P_{\text{pondérée_Mas à 15francs}} = 1 * P_{\text{Anduze}}$$

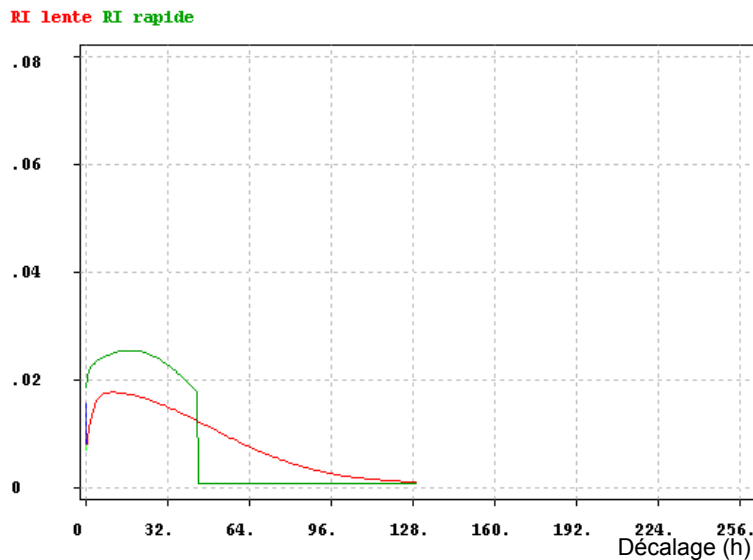


Illustration 12 : Réponse impulsionnelle lente et rapide de la piézométrie du site « Mas à 15 francs »

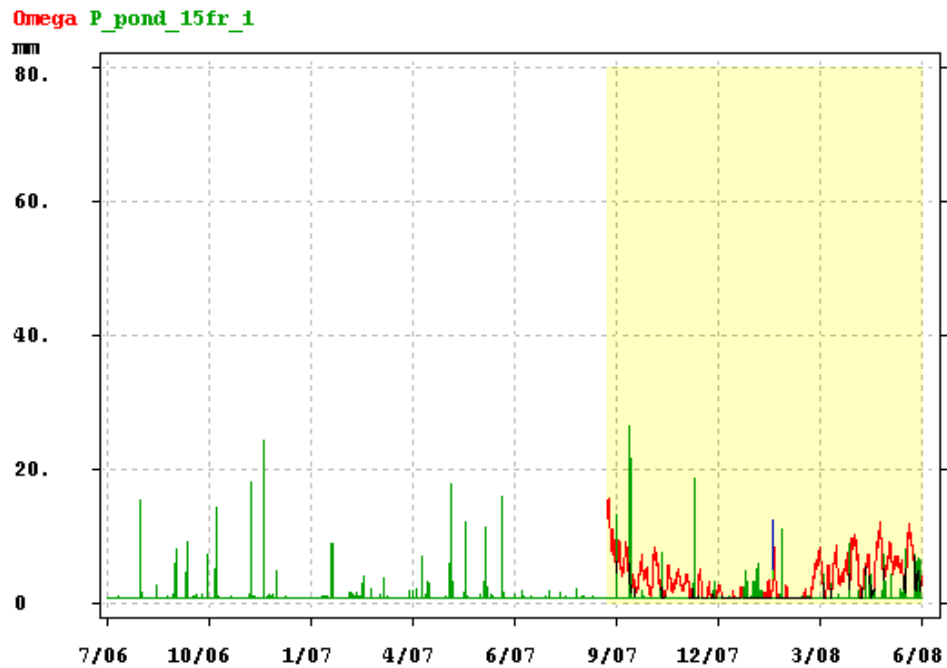


Illustration 13 : Seuil de pluie efficace Oméga et de la pluviométrie

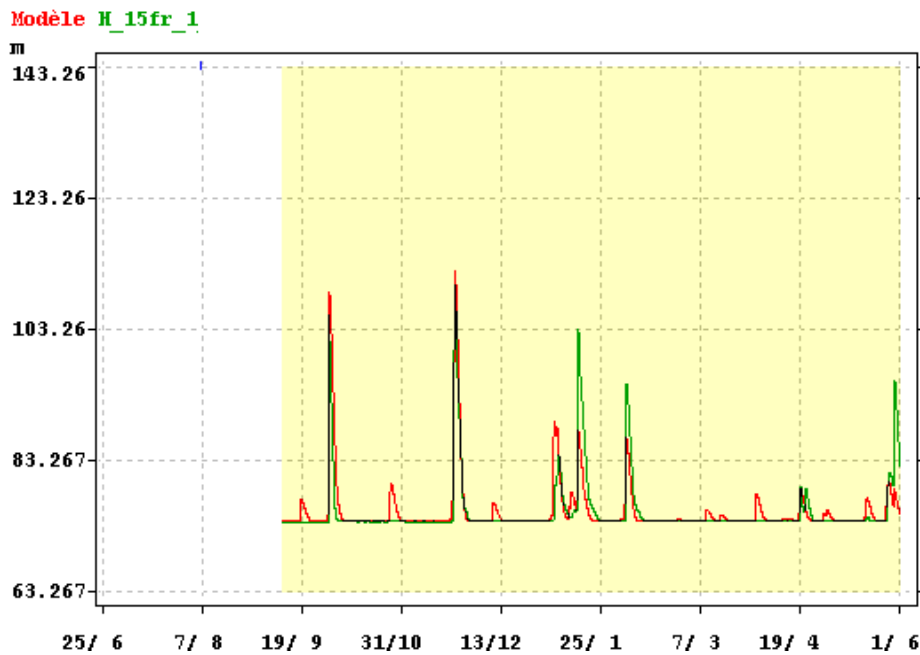


Illustration 14 : Comparaison de la piézométrie simulée et mesurée du site « Mas à 15 francs »

Le modèle de transfert mis en œuvre permet de reproduire de manière satisfaisante l'évolution de la piézométrie observée sur la période de 2007-2008 pour le site du « Mas à 15 francs ». Il reproduit correctement les pics de crues. Le modèle permet

d'expliquer 74 % de la variance totale observée, ce qui constitue un résultat satisfaisant.

Ce modèle calé sur la chronique 2007-2008 a ensuite été utilisé en mode prévisionnel sur la période 1998-2005. Les résultats obtenus sont présentés dans l'illustration 15.

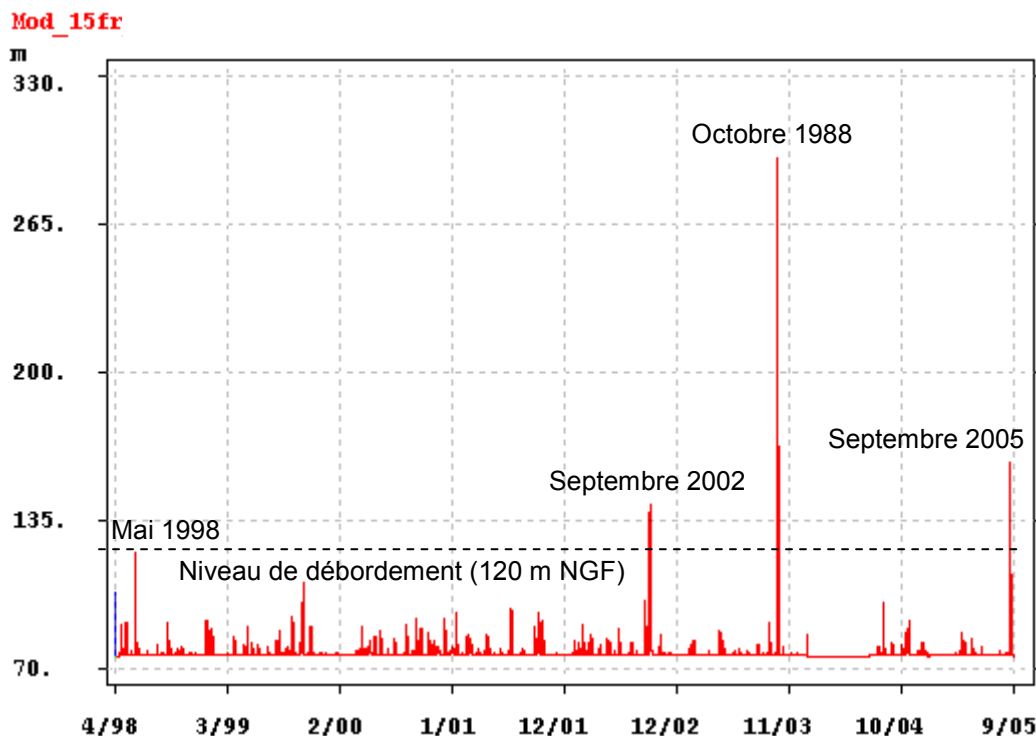


Illustration 15 : Piézométrie reconstituée du site Mas à 15 fr

Finalement, bien que le modèle ait été calé sur une période sans crues majeures, les résultats sont en accord avec les débordements observés sur le terrain. Ainsi d'après le modèle pour l'épisode de mai 1998, le niveau simulé à « Mas à 15 francs » est au niveau du sol et les débordements pour les épisodes d'octobre 1988, septembre 2002 et septembre 2005 sont respectivement de 175 m, 20 m et 40 m.

Cette chronique ne peut pas être utilisée telle qu'elle puisqu'il faut entrer, tout comme la variable pluie, des impulsions. Ainsi seules les valeurs de débordement (Illustration 16), c'est-à-dire les valeurs supérieures à la cote du sol (120 m), vont être entrées dans le modèle de transfert qui prend en compte l'information « karst ». Les valeurs de ces débordements peuvent être très fortes (+ 80 m en septembre 2005 et + 230 m en octobre 1988). Ces valeurs correspondraient au niveau atteint si l'aquifère avait une épaisseur plus importante et les mêmes propriétés du milieu (Illustration 16).

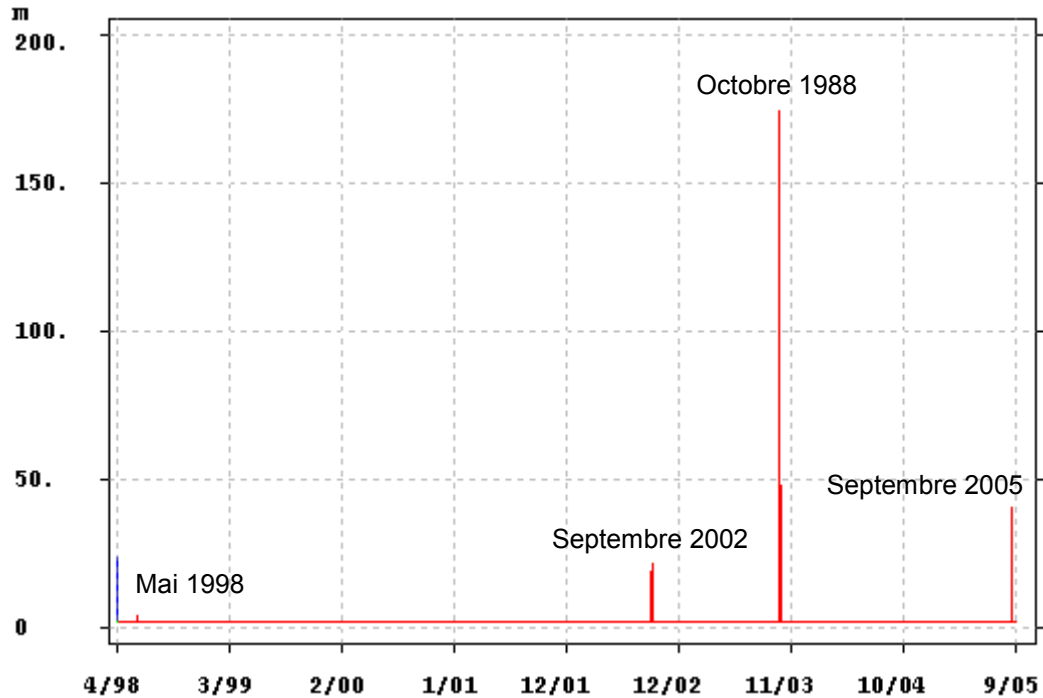


Illustration 16 : Information débordement du karst au site Mas à 15 fr (le seuil de débordement ici est fixé à 120 m)

3.1.3. Modèle couplant l'information karst à la pluie

Dans un premier temps, la chronique du débordement du karst est définie pour chaque station en reprenant la pluie pondérée associée à la station. Il est nécessaire de travailler avec la même chronique de pluie pour l'information débordement du karst et la modélisation du débit du cadereau pour pouvoir par la suite coupler les deux informations karst et pluie et ainsi définir des seuils d'alerte en fonction de la pluie. Ainsi, plusieurs chroniques de débordement vont être testées en fonction du seuil de débordement défini (il s'agit alors de seuils fictifs). Les résultats donnés sont ceux issus du modèle ayant la meilleure reconstitution avec une valeur seuil définie (calage par essai – erreur de la valeur seuil).

Le modèle de transfert est ainsi mis en œuvre à partir des données de précipitations et de la chronique « débordement du karst ». Le schéma de ce modèle est présenté Illustration 17 et les réponses impulsionnelles associées sont données Illustration 18.

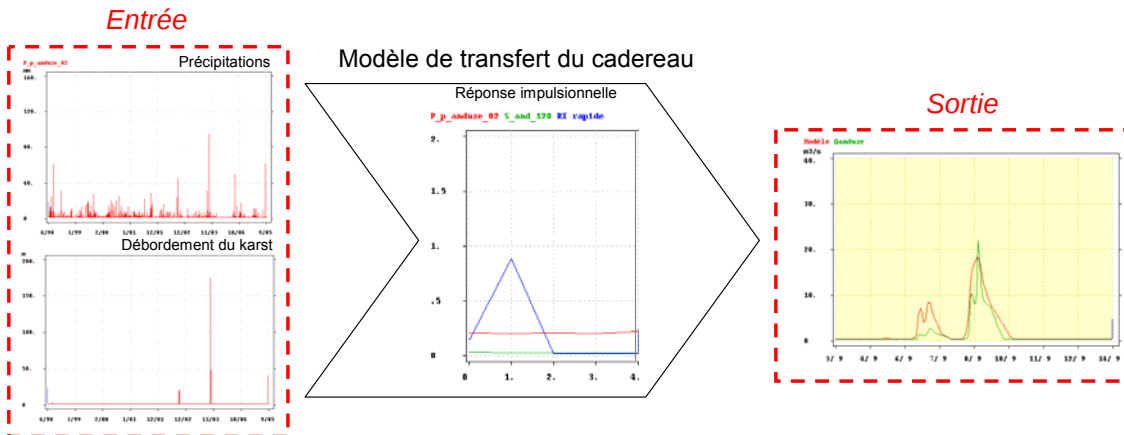


Illustration 17. Schéma de principe des modèles de transfert prenant en considération l'information karst

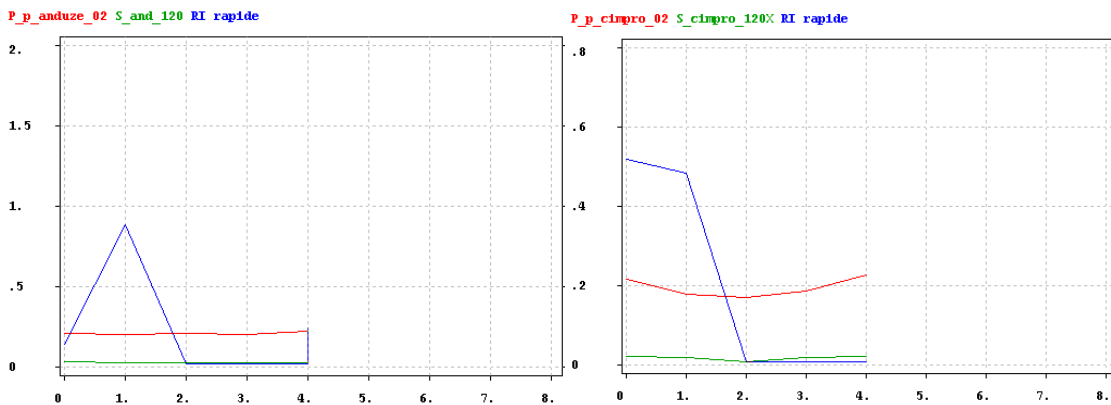


Illustration 18 : Réponse impulsionnelle lente et rapide des débits du cadereau d'Alès avec le modèle prenant en considération l'information karst

Les résultats graphiques sont donnés pour les stations d'Anduze et Cimpro dans les Illustration 19 à Illustration 21. Le meilleur calage a été obtenu à Anduze avec un seuil à 120 m, pour Cimpro les résultats sont fournis pour le seuil à 120 et à 115 m, ces deux valeurs de seuil donnant de bons résultats.

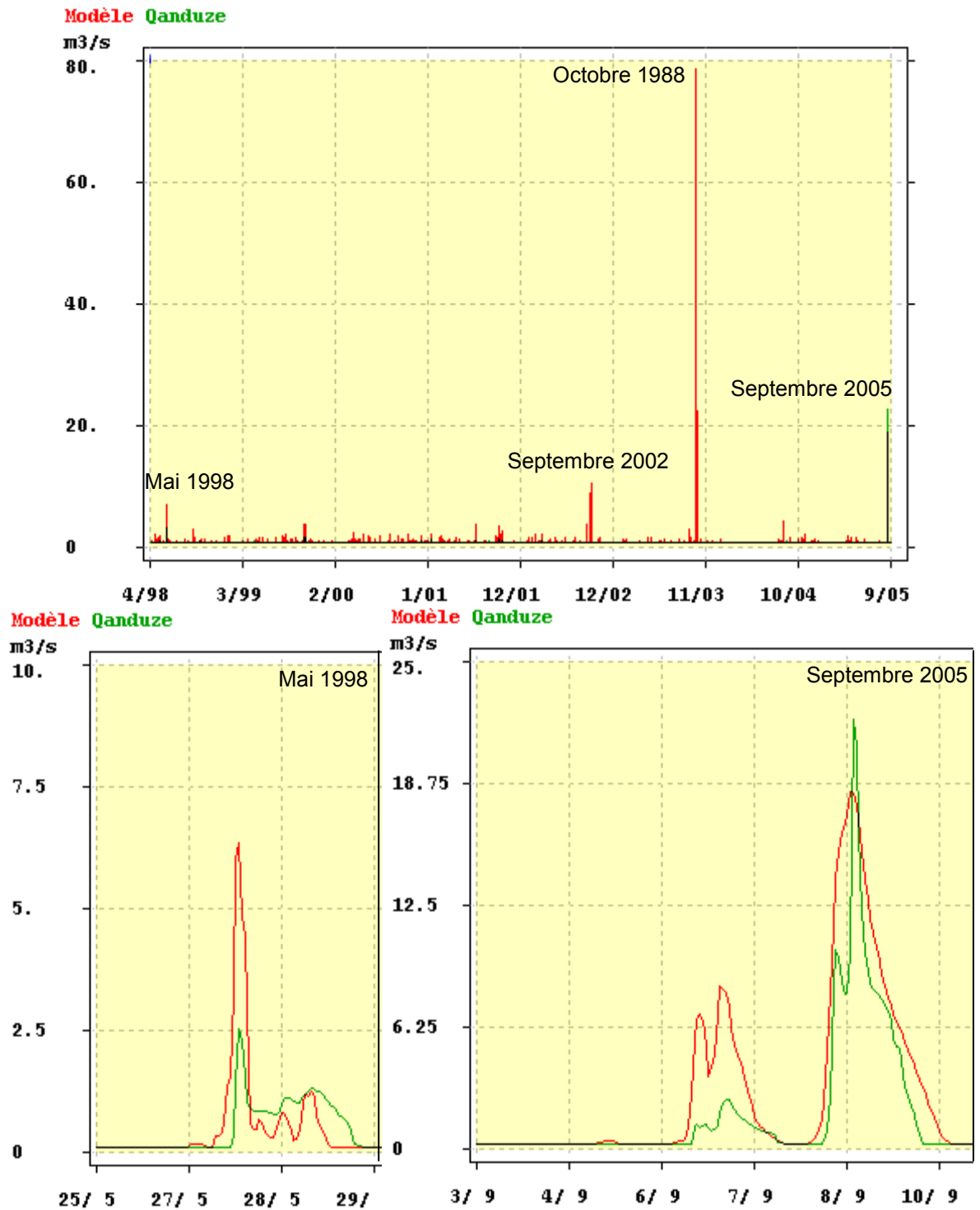


Illustration 19 : Résultats graphiques pour le modèle prenant en considération l'information karst (seuil à 120 m) développé sur Anduze

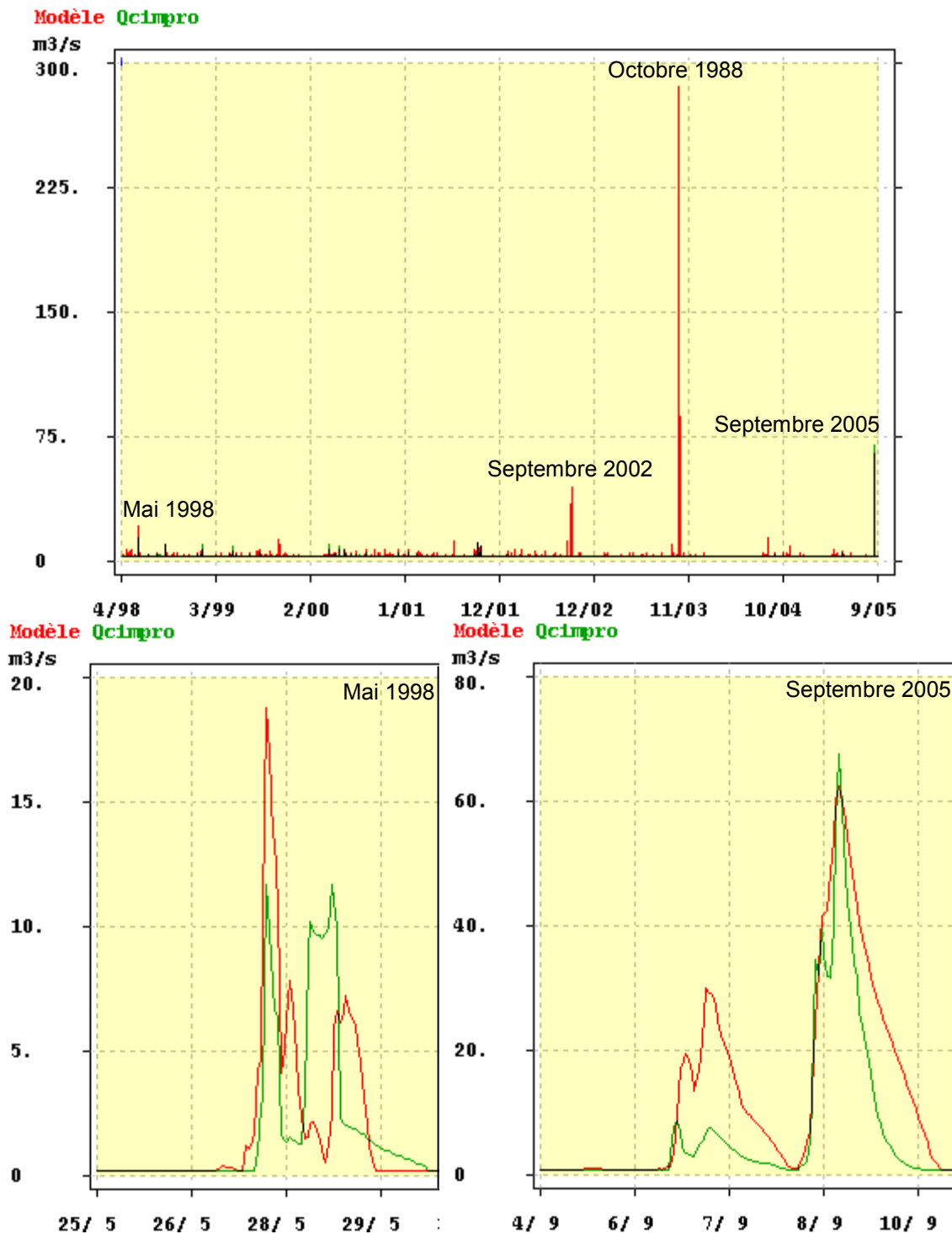


Illustration 20 : Résultats graphiques pour le modèle prenant en considération l'information karst (seuil à 115 m) développé sur Cimpro

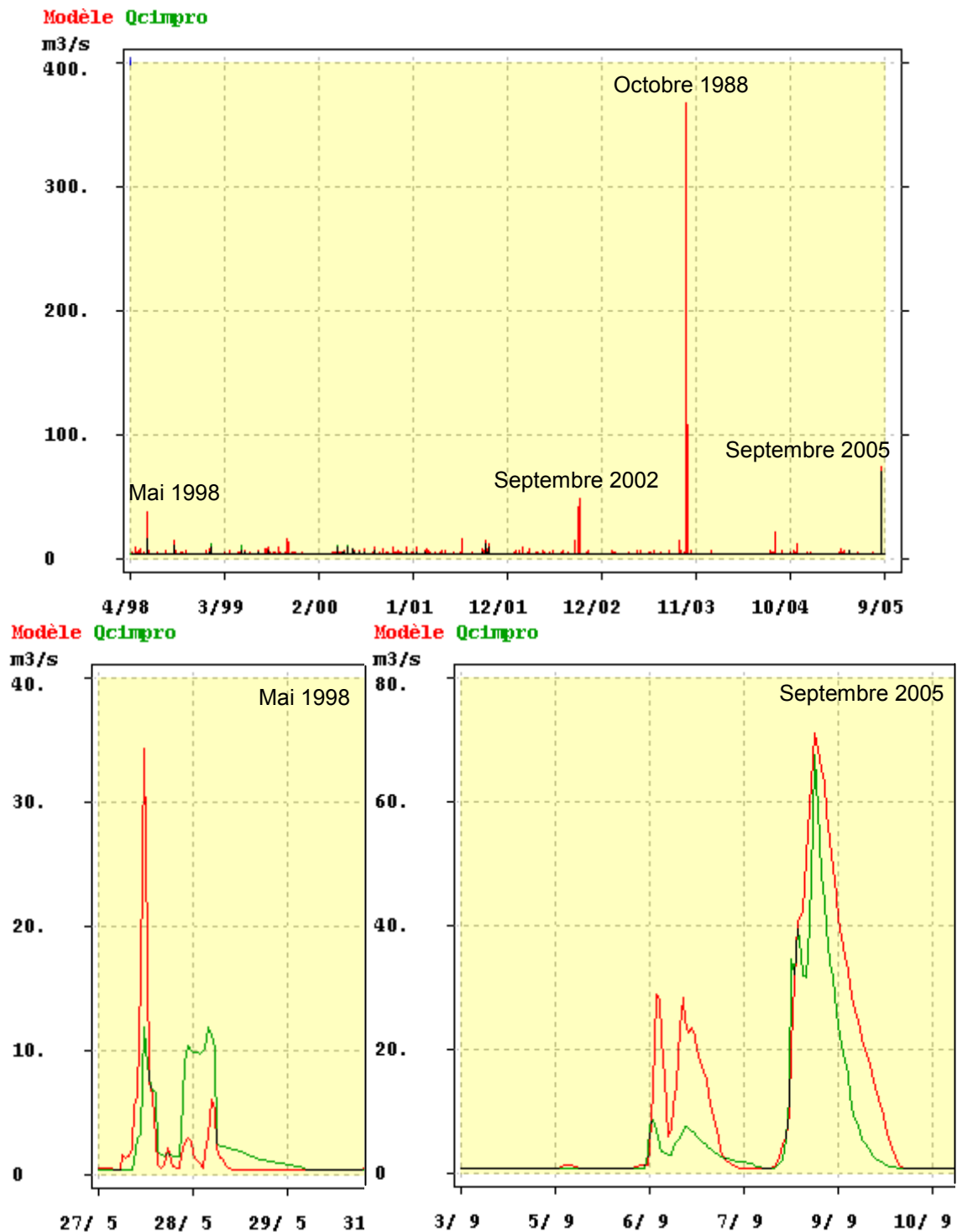


Illustration 21 : Résultats graphiques pour le modèle prenant en considération l'information karst (seuil à 120 m) développé sur Cimpro

Les résultats concernant les débits maximaux simulés et mesurés ou reconstitués sont présentés dans le tableau récapitulatif suivant :

Station	Seuil	Oct. 1988 mes	Oct. 1988 sim	Mai 1998 mes	Mai 1998 sim	Sept. 2002 mes	Sept. 2002 sim	Sept. 2005 mes	Sept. 2005 sim
Anduze	120	?	79	3	6	7	10	22	18
Cimpro	115	485	287	12	19	42	42	65-70	63
Cimpro	120	485	368	12	34	42	45	65-70	71

Illustration 22 : Tableau récapitulatif pour le caderau d'Alès des débits maximums instantanés estimés (bleu) et des débits maximums mesurés horaires (en jaune), et simulés à partir du modèle intégrant l'information karst. Les débits sont exprimés en m³/s

L'analyse des résultats obtenus à l'aide des modèles simples et prenant en compte l'information karst sur les deux stations du cadereau d'Alès (Illustration 10 et Illustration 22) montre, que la crue de mai 1998 caractérisée par de faibles débordements est correctement représentée par un modèle simple, ce qui n'est pas le cas avec un modèle prenant en compte l'information karst (forte surestimation des débits simulés). A l'inverse pour la simulation des autres épisodes, plus conséquents occasionnant de forts débordements du karst, l'information karst est indispensable. Le modèle simple conduit pour ces épisodes, à de très fortes sous-estimations des débits.

Ainsi pour l'épisode de mai 1998, l'aquifère karstique a eu peu d'influence sur la crue (comme le montre la chronique reconstituée de la piézométrie sur le site de Mas à 15 francs). Par contre, lors des trois autres épisodes marqués par de plus fortes précipitations, l'aquifère karstique joue un rôle significatif contribuant à amplifier la crue. Cette amplification est due à la saturation de l'aquifère karstique aboutissant à la formation de sources de trop plein, mais aussi à un refus à l'infiltration induisant un ruissellement amplifié sur les affleurements calcaires.

3.2. RESULTAT DE LA MODELISATION POUR LES AUTRES CADEREAUX

Différents modèles (simples et prenant en considération l'information « karst ») ont été développés à partir des données des différentes stations des cadereaux. Les résultats de ces modèles et leurs interprétations sont fournis ci-dessous.

3.2.1. La Pondre

Au vu des résultats (Illustration 23 et Illustration 24), le comportement du cadereau de la Pondre est comparable à celui du cadereau d'Alès. Ainsi pour les crues comparables à celle de mai 1998, les débordements du karst ne semblent pas significatifs, par contre pour les crues plus conséquentes (septembre 2002 et 2005) l'influence du karst est significative voire prépondérante (octobre 1988). Le modèle avec l'information karst s'est révélé satisfaisant pour un seuil à 150 et 160 m.

Station	Seuil	Oct. 1988 mes	Oct. 1988 sim	Mai 1998 mes	Mai 1998 sim	Sept. 2002 mes	Sept. 2002 sim	Sept. 2005 mes	Sept. 2005 sim
Pondre	/	240	20	6	6	25	5	15	6
Pondre	150	240	196	6	8	25	7	15	23
Pondre	160	240	226	6	12	25	11	15	14

Illustration 23 : Tableau récapitulatif pour le cadereau de Pondre des débits maximums instantannés estimés (bleu), maximums mesurés horaires (en jaune), et simulés à partir du modèle simple et avec l'information karst. Les débits sont exprimés en m³/s

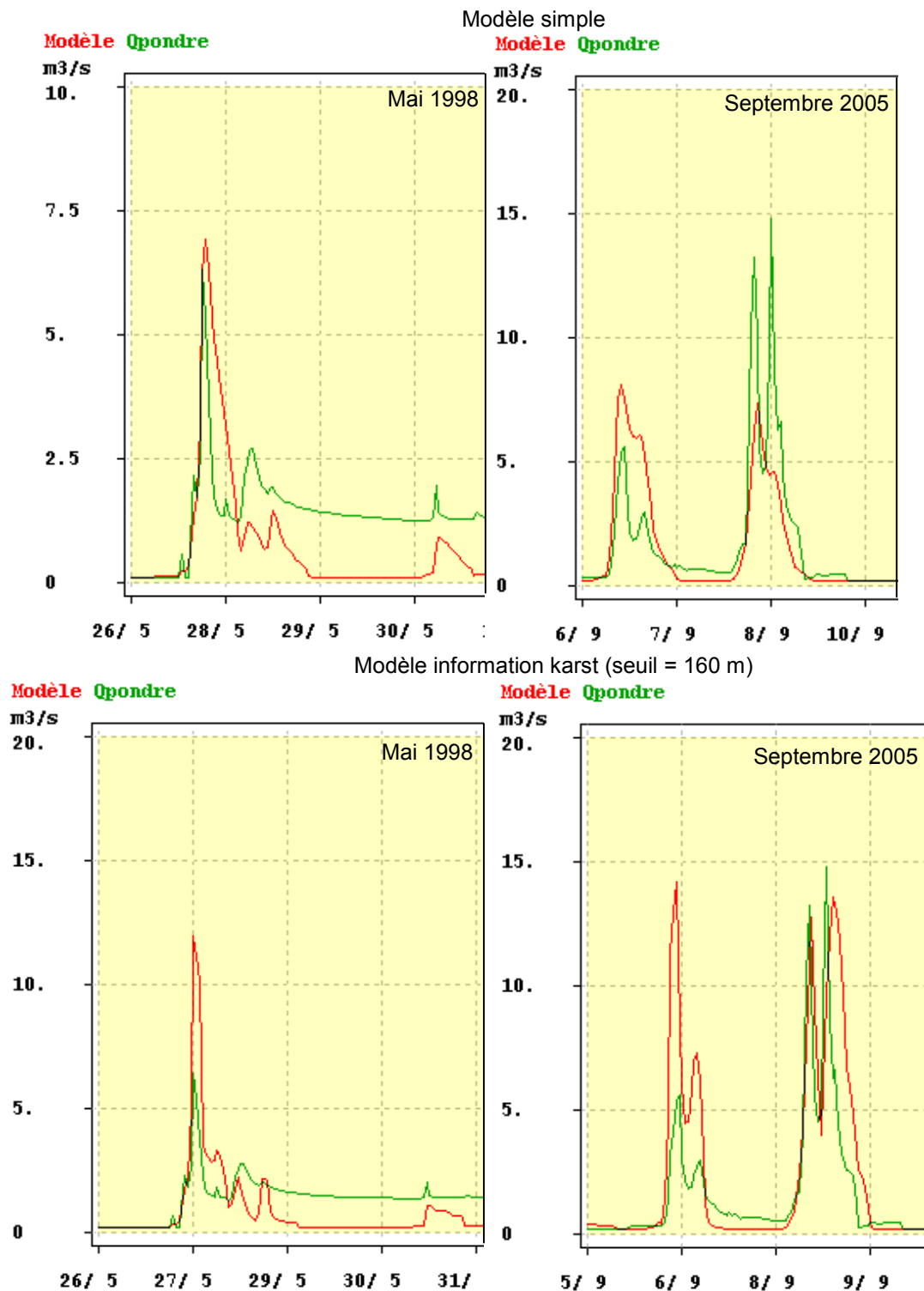


Illustration 24 : Résultats graphiques pour les modèles simple et avec l'information karst développés sur Pondere

3.2.2. Valdegour

Le modèle simple développé sur Valdegour permet de reproduire convenablement les crues de mai 1998 et septembre 2005 (Illustration 26). Utilisé en mode prévisionnel ce modèle donne un débit de pointe horaire pour l'épisode de septembre 2002 de 17 m³/s, qui est compatible avec le débit maximum instantané estimé (23 m³/s). Ce résultat indique que pour cette gamme de crue/débit le modèle simple, ne faisant pas intervenir les débordements du karst, est adapté. Par contre le débit de la crue d'octobre 1988 reconstitué est largement sous estimé, avec un débit maximum horaire de 44 m³/s et un débit maximum instantané reconstitué de 128 m³/s. Il semblerait que pour les très fortes crues, les débordements de l'aquifère karstique viennent amplifier la crue. Compte tenu de l'absence d'hydrogramme pour ce type d'épisode, la reconstitution via un modèle avec seuil n'est pas possible.

Station	Seuil	Oct. 1988 mes	Oct. 1988 sim	Mai 1998 mes	Mai 1998 sim	Sept. 2002 mes	Sept. 2002 sim	Sept. 2005 mes	Sept. 2005 sim
Valdegour	/	128	44	22	25	23	17	23	24

Illustration 25 : Tableau récapitulatif pour le caderau de Valdegour des débits maximums instantannés estimés (bleu) maximums mesurés horaires (en jaune), et simulés à partir du modèle simple. Les débits sont exprimés en m³/s

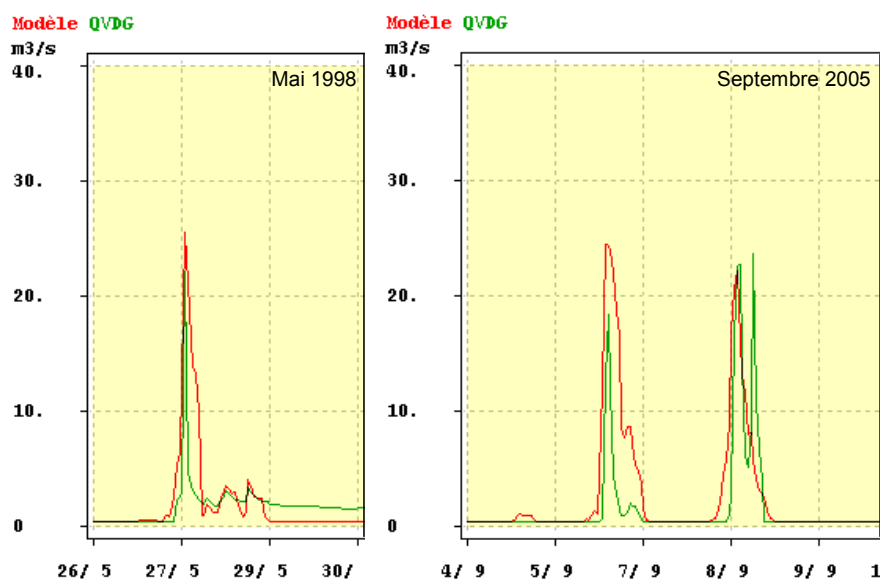


Illustration 26 : Résultats graphiques pour le modèle simple développé sur Valdegour

3.2.3. Camplanier

Les modèles ont été calés à partir d'un seul des quatre épisodes significatifs, du fait de l'absence de données. Les résultats sont ainsi à prendre avec précaution. Il

apparaît toutefois que le modèle simple puisse convenir à la crue de mai 1998 (Illustration 28), mais que ce modèle ne soit pas adapté aux plus fortes crues (Illustration 27). L'intervention de l'information « karst » est alors nécessaire. Différents modèles ont été calés, avec pour objectif de se rapprocher au mieux des maximums de débits instantanés évalués. Du fait de l'absence d'hydrogramme et de l'absence de données au même pas de temps que les modèles, ces résultats sont assez délicats à interpréter. Faute de données supplémentaires, les modèles présentant un seuil à 115 et 120 m sont conservés.

Station	Seu il	Oct. 1988 mes	Oct. 1988 sim	Mai 1998 mes	Mai 1998 sim	Sept. 2002 mes	Sept. 2002 sim	Sept. 2005 mes	Sept. 2005 sim
Camplanier	/	?	4	3	2	6	2	20-25	2
Camplanier	115	?	63	3	3	6	11	20-25	17
Camplanier	120	?	90	3	3	6	14	20-25	23

Illustration 27 : Tableau récapitulatif pour le caderau de Valdegour des débits maximums instantannés estimés (bleu) maximums mesurés horaires (en jaune), et simulés à partir du modèle simple et prenant en considération l'information karst. Les débits sont exprimés en m³/s.

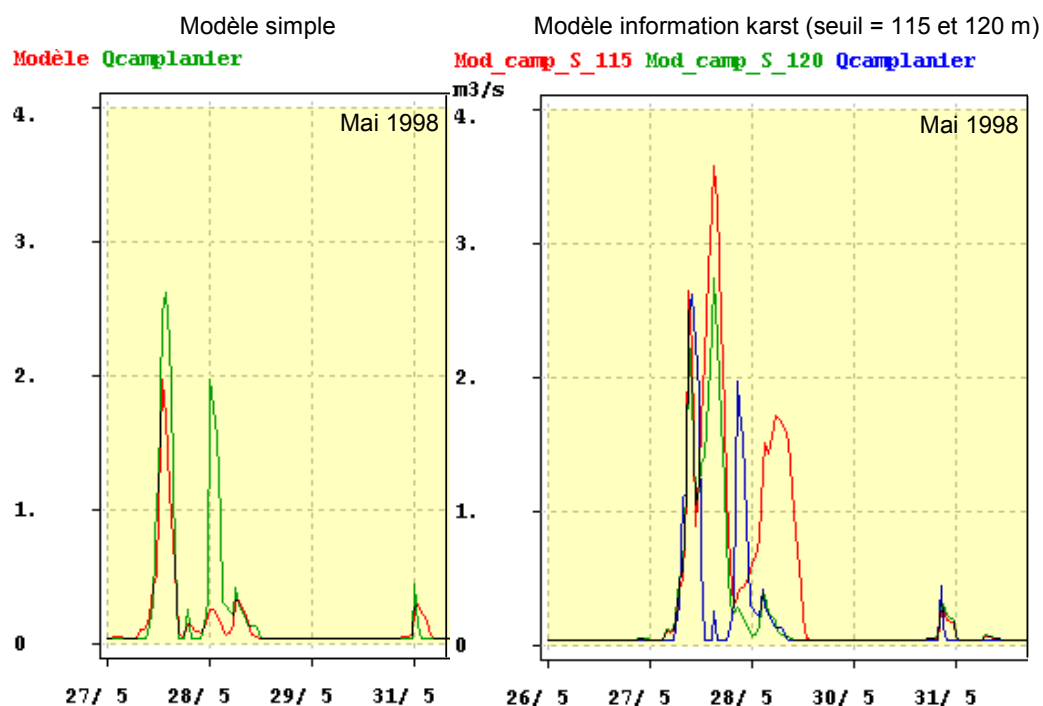


Illustration 28 : Résultats graphiques pour les modèles simple et avec l'information karst développée sur Camplanier

3.2.4. Uzès

L'épisode de crue de mai 1998 a été reconstitué pour Engance (nombreuses lacunes sur cet épisode) à partir des données de Van-Dyck.

Les modèles ont été calés sur les crues de mai 1998 et septembre 2002 pour Engance et sur la crue de mai 1998 pour Van-Dyck. Les résultats pour l'ensemble des modèles sur les deux stations (Illustration 30 et Illustration 31) surestiment très largement la crue de septembre 2005. Cette surestimation peut avoir deux causes :

- soit un problème de mesure de la pluie ou du débit,
- soit un écrêtage de la crue grâce à la mise en place de bassin de rétention notamment celui dit de l'Armée (Illustration 1) réalisé en 2004-2005.

Ainsi à Engance, le modèle simple est satisfaisant pour les crues comparables à celles de mai 1998, mais ne l'est pas pour les crues plus fortes (Illustration 29). Un modèle faisant intervenir l'information « karst » est alors nécessaire (Illustration 30).

A Van-Dyck, le modèle simple n'est pas satisfaisant pour aucun des épisodes de crue majeurs (Illustration 31), par contre le modèle prenant en considération l'information « karst » reproduit bien la crue de mai 1998 et est également en accord avec les maximums de crue instantanés reconstitués en 2002 et 1988 (Illustration 29). L'épisode de septembre 2005 est à nouveau surestimé par le modèle, cette surestimation semble être à mettre en relation avec la mise en place des bassins écrêteurs.

Station	Seuil	Oct. 1988 mes	Oct. 1988 sim	Mai 1998 mes	Mai 1998 sim	Sept. 2002 mes	Sept. 2002 sim	Sept. 2005 mes	Sept. 2005 sim
Engance	/	?	7	≈ 2-3	3	5	2	1	3
Engance	115	?	15	≈ 2-3	5	5	5	1	6
Engance	120	?	24	≈ 2-3	5	5	5	1	6
Van Dyck	/	127	3	7	3	30	2	15	2
Van Dyck	115	127	115	7	7	30	30	15	38
Van Dyck	120	127	119	7	7	30	27	15	35

Illustration 29 : Tableau récapitulatif pour le caderau d'Uzès des débits maximums maximums instantanés estimés (bleu) mesurés horaires (en jaune), et simulés à partir du modèle simple et prenant en considération l'information karst. débits sont exprimés en m³/s.

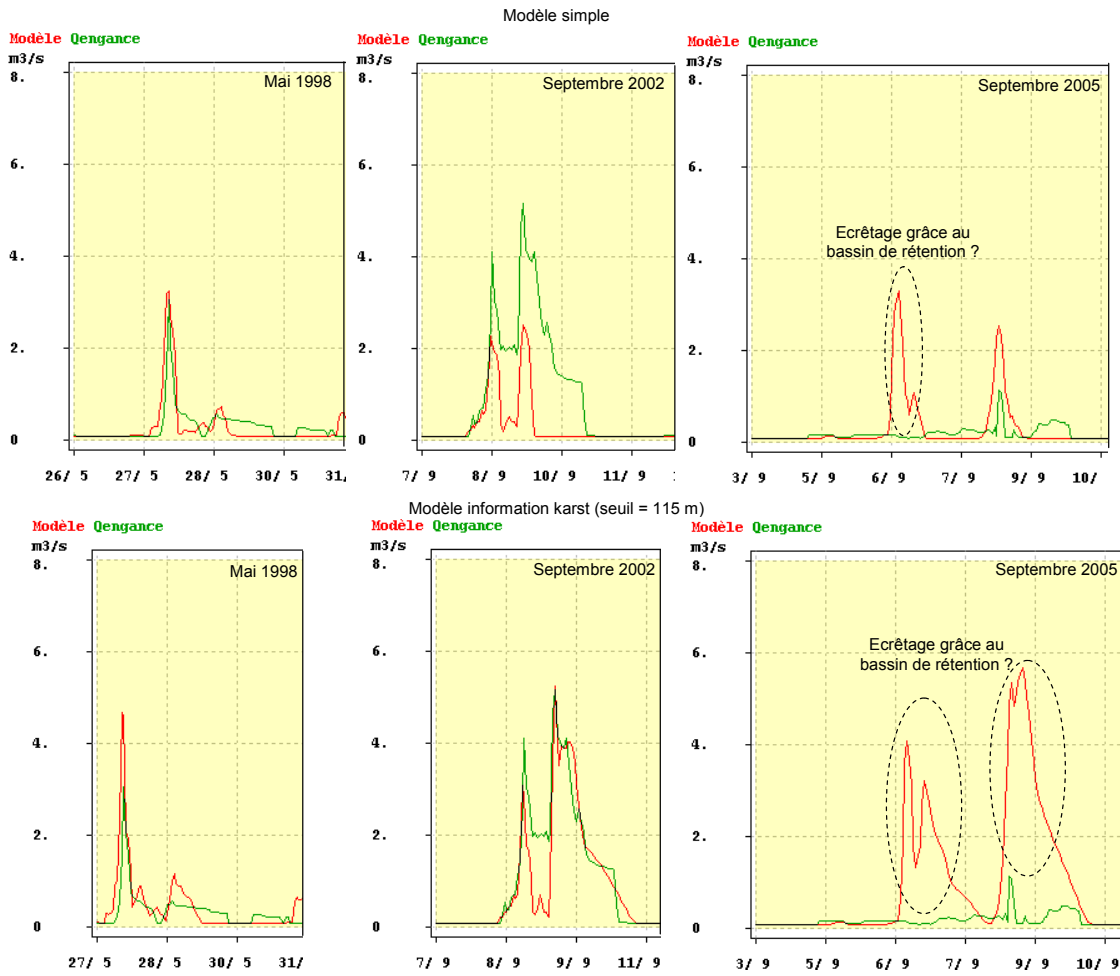


Illustration 30 : Résultats graphiques pour les modèle simples et avec l'information karst développés sur Engage

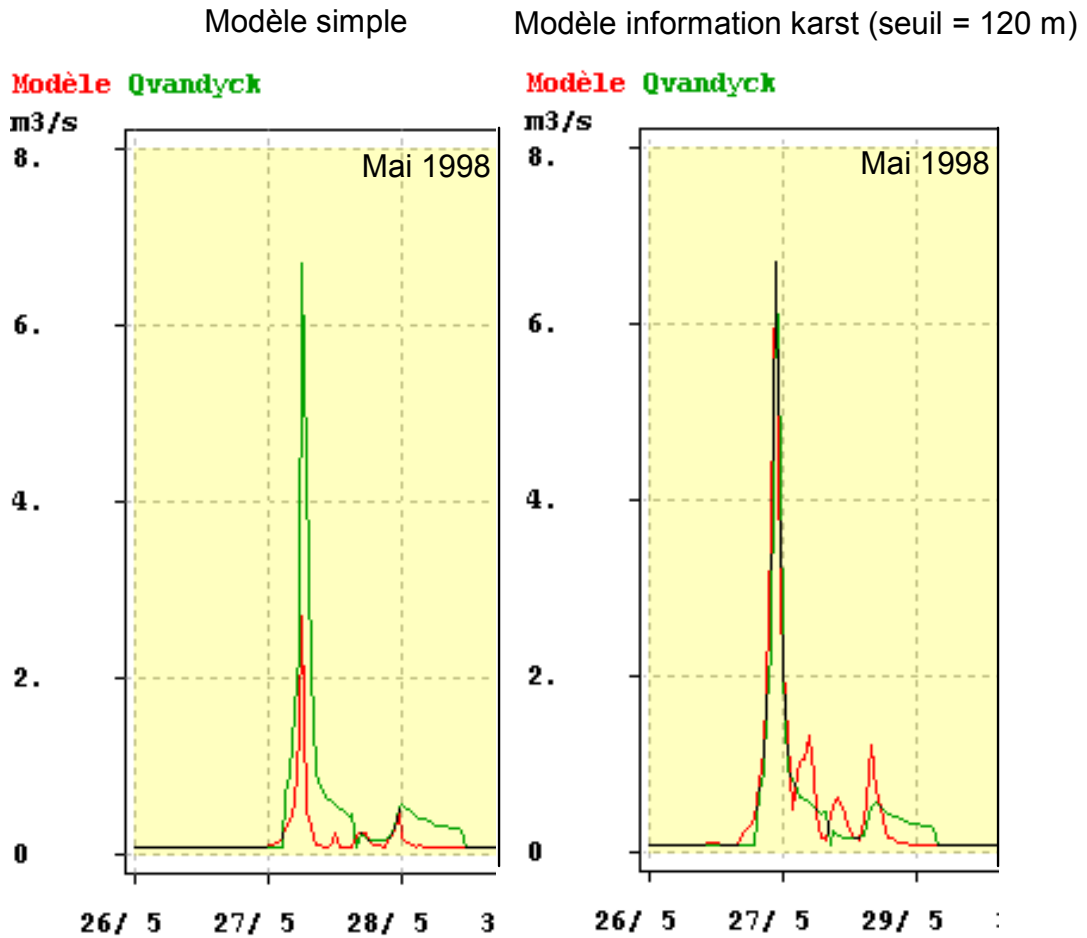


Illustration 31 : Résultats graphiques pour les modèle simples et avec l'information karst développés sur Van-Dyck

3.2.5. Valladas

Les crues de mai 1998 et septembre 2005 ont été enregistrées. Les modèles sont ainsi calés à partir de ces deux épisodes. Le modèle simple ne permet pas de reproduire ni la crue de 1998 ni celle de 2005. Un modèle avec la composante « karst » est adapté à la simulation de l'épisode de septembre 2005, et est également dans la gamme de débits observés pour la crue d'octobre 1988. Par contre, ce modèle ne permet pas de simuler la crue de septembre 2002 (maximum instantané d'environ 70 m³/s). Toutefois cette valeur n'est pas réaliste compte tenu de la pluie utilisée. En effet la crue de 2002 est caractérisée par un débit 10 fois supérieur à celui de 2005, or la hauteur d'eau précipitée est 50 % plus forte pour l'épisode de 2005 que pour celui de 2002. Ainsi la hauteur d'eau définie par pondération des chroniques de pluie d'Anduze et Bonfa n'est pas adaptée à cet épisode. Il est probable que la pluie sur ce bassin versant fut supérieure (orage localisé) à ce qui fut mesuré sur les stations pluviographiques.

Station	Seuil	Oct. 1988 mes	Oct. 1988 sim	Mai 1998 mes	Mai 1998 sim	Sept. 2002 mes	Sept. 2002 sim	Sept. 2005 mes	Sept. 2005 sim
Valladas	/	132	6	7	4	70	4	7	4
Valladas	160	132	87	7	3	70	9	7	6

Illustration 32 : Tableau récapitulatif pour le caderau de Valladas des débits maximums instantannés estimés (bleu), maximums mesurés horaires (en jaune), et simulés à partir du modèle simple et prenant en considération l'information karst. Les débits sont exprimés en m³/s.

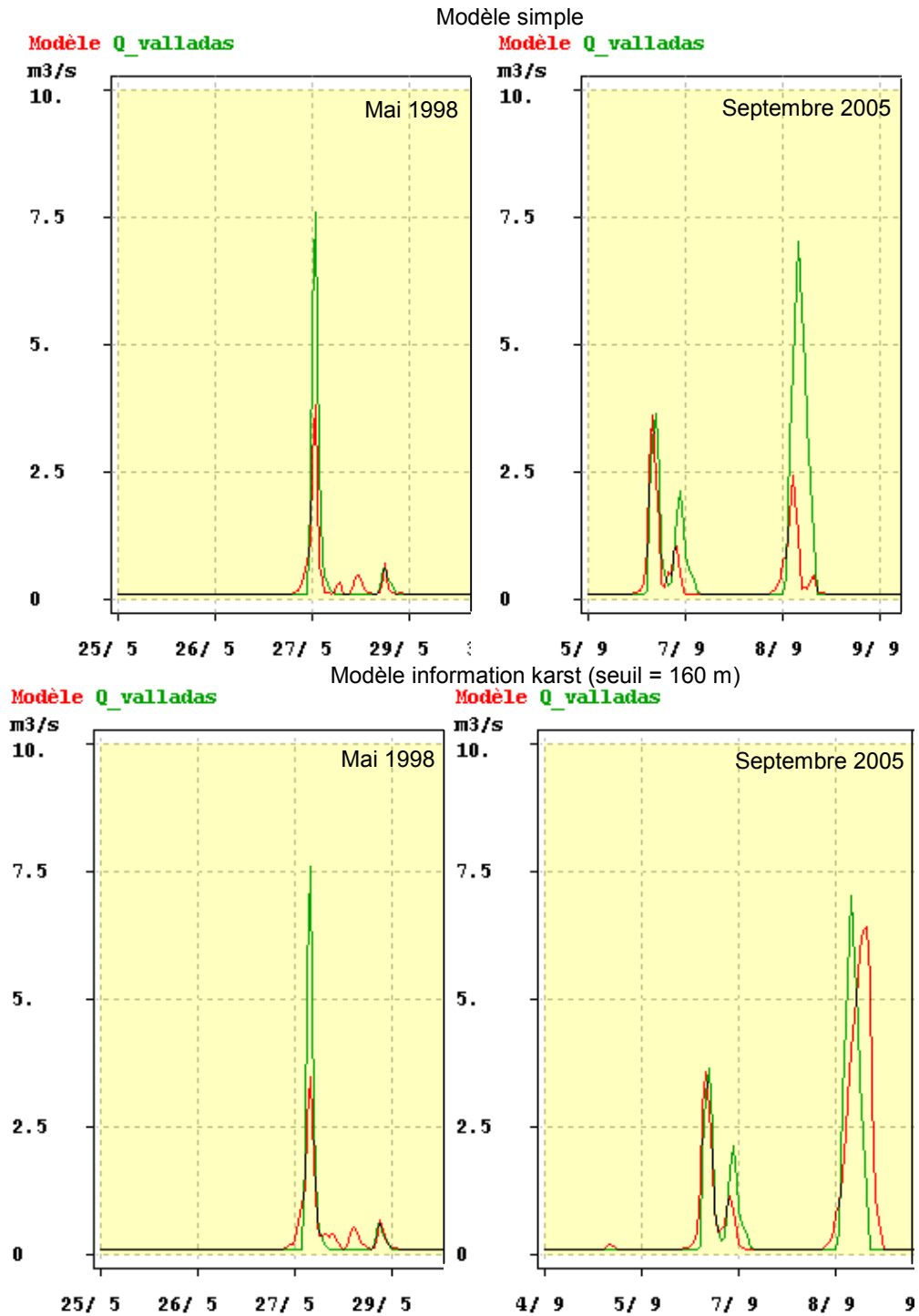


Illustration 33 : Résultats graphiques pour les modèle simples et avec l'information karst développés sur Valladas

3.3. CONCLUSION CONCERNANT LA MODELISATION DU DEBIT DES CADEREAUX

Ce travail de modélisation réalisé sur l'ensemble des cadereaux a montré, qu'à l'exception de la station Van Dyck dans le cadereau d'Uzès, un modèle simple sans prise en compte de l'information « karst » était adapté pour les épisodes de type mai 1998. Ceci implique que pour ce type de précipitation et compte tenu du niveau initial de l'aquifère karstique (qui était à son niveau de base), la composante « karst » n'intervient pas ou peu.

Pour les autres crues de type septembre 2002, 2005 ou octobre 1988, la composante « karst » a été utilisée pour retranscrire le débit des cadereaux. Ceci met en évidence le rôle de la composante « karst » dans la genèse des fortes crues. A ce stade l'information « karst » déduite du piézomètre Mas à 15 francs a été utilisée pour caractériser l'ensemble des stations des cadereaux. Par la suite, nous envisageons de conserver l'information Mas à 15 francs pour les stations localisées à l'Ouest de la ville et utiliserons un autre piézomètre dès lors que les chroniques seront suffisamment longues pour mener à bien cette tâche. Les piézomètres Combe Torte et Carrière (Illustration 1) seront ainsi testés.

Ce travail de modélisation a montré l'impact de la saturation de l'aquifère karstique sur le débit des cadereaux. La prise en compte du comportement du karst apparaît indispensable à la prévision des crues. La suite de l'étude va ainsi consister à mettre en place une méthodologie basée sur les précédents résultats, afin de définir des seuils d'alerte.

4. Développement méthodologique permettant de définir des seuils d'alerte

Le piézomètre Mas à 15 francs s'est révélé adapté pour caractériser la saturation de l'aquifère karstique et ses débordements. Il est ainsi intéressant de pouvoir évaluer sa réponse aux précipitations en fonction de son état initial. Aussi, lorsque l'aquifère est peu saturé, il existe un délai de quelques heures entre le début des précipitations et le pic de crue (ce délai était d'environ 6 heures pour la crue du 6 septembre 2005). Ce délai permet d'anticiper l'alerte. Sur l'ensemble des épisodes le délai est compris entre 3 et 6 heures selon le type d'épisode de pluie (intensité, durée) et l'état initial de l'aquifère karstique.

A partir du modèle piézométrie « Mas à 15 francs », un abaque a été réalisé (Illustration 34). Sur cet abaque sont fournis en bleu les épisodes associés à des crues marquées par une continuité des précipitations. Ces crues par la suite seront dites « simples » et engloberont également les épisodes de précipitations marqués par des interruptions de faible durée, inférieures à 4 h. Au-delà de cette durée d'interruption, l'épisode sera qualifié de « multiple ». Ces épisodes sont représentés en rose sur le diagramme. La caractérisation du pic de piézométrie va ainsi s'appréhender de façon différente en fonction du type d'épisode de précipitation.

4.1. CAS DES CRUES SIMPLES

Ainsi pour les épisodes simples, l'abaque s'utilise simplement en se déplaçant selon les précipitations (axe des abscisses) sur la courbe noire. Il suffit alors de se rapporter à l'axe des ordonnées pour déterminer la valeur de la piézométrie. Les épisodes du 3 octobre 1988 et 6 septembre 2005 sont donnés à titre d'exemple dans les illustrations suivantes.

On obtient ainsi avec le diagramme pour la crue du 6 septembre 2005 un pic à 135 m (au lieu de 137 m sur la chronique simulée) et pour la crue du 3 octobre 1988 un pic à 297 m (au lieu de 295 m sur la chronique simulée). Les deux exemples traités valident la méthode.

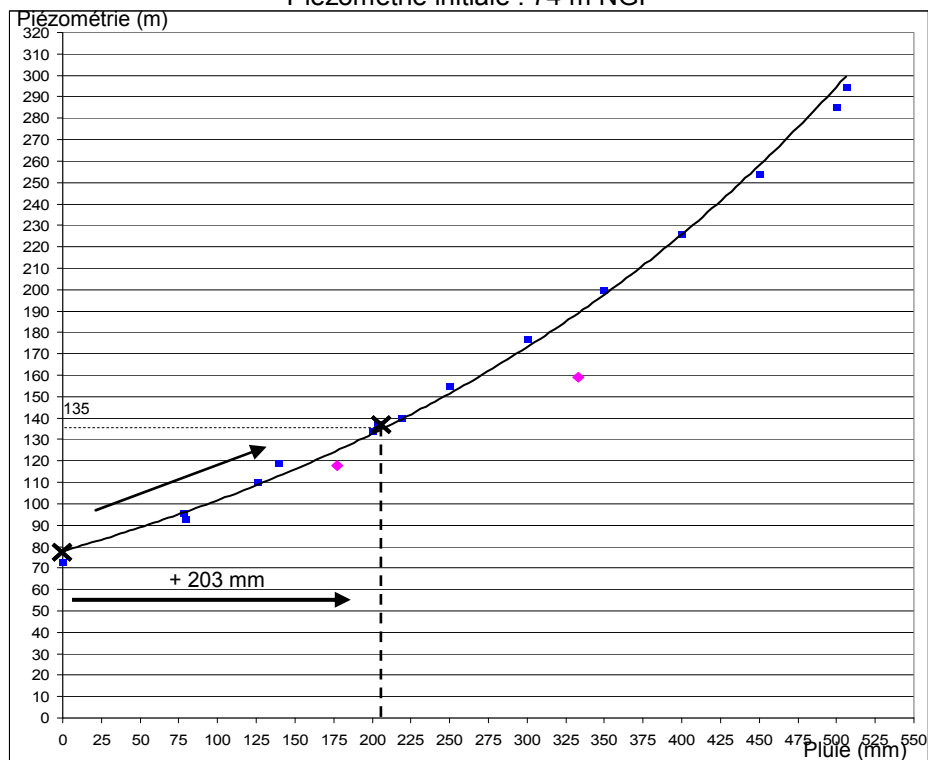
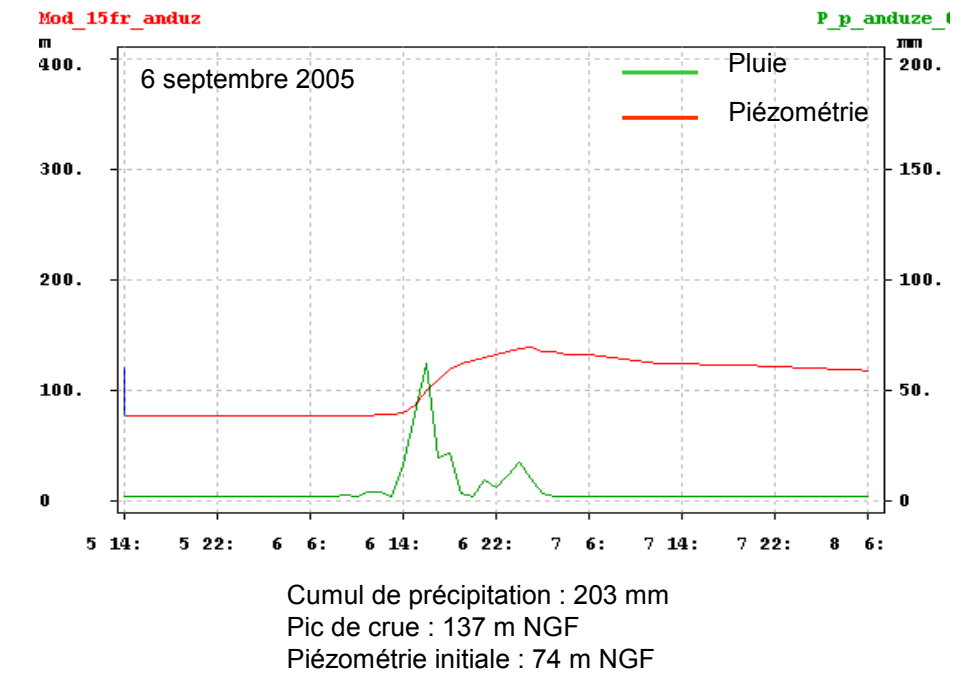


Illustration 34 : Définition du pic de piézométrie à Mas à 15 francs à partir de l'abaque pour l'épisode du 6 septembre 2005

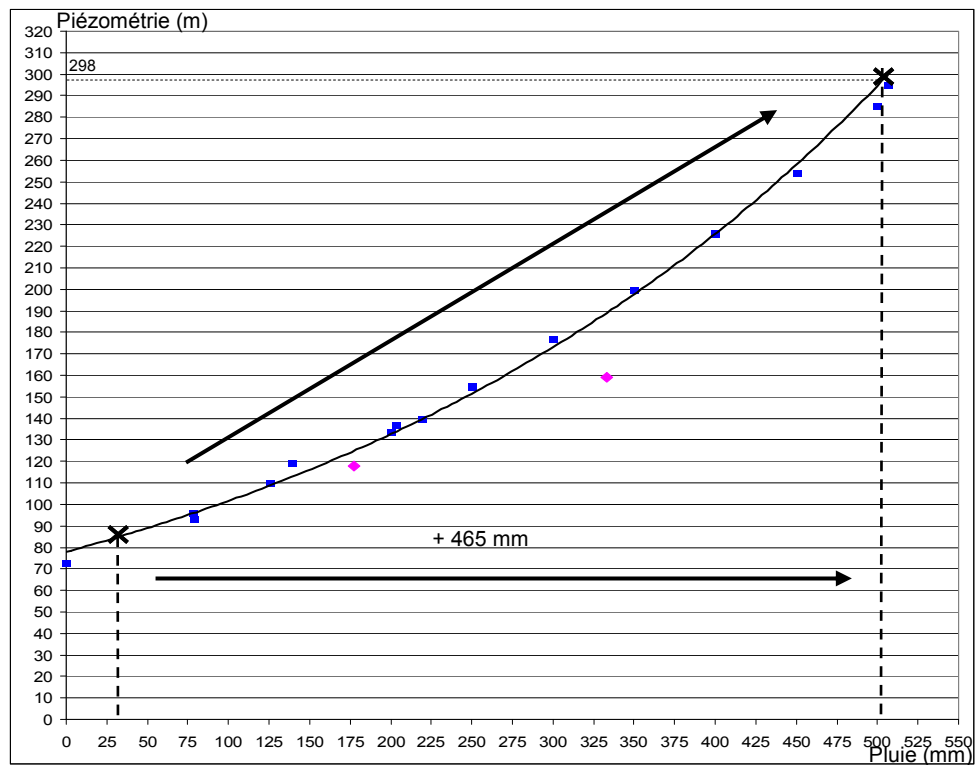
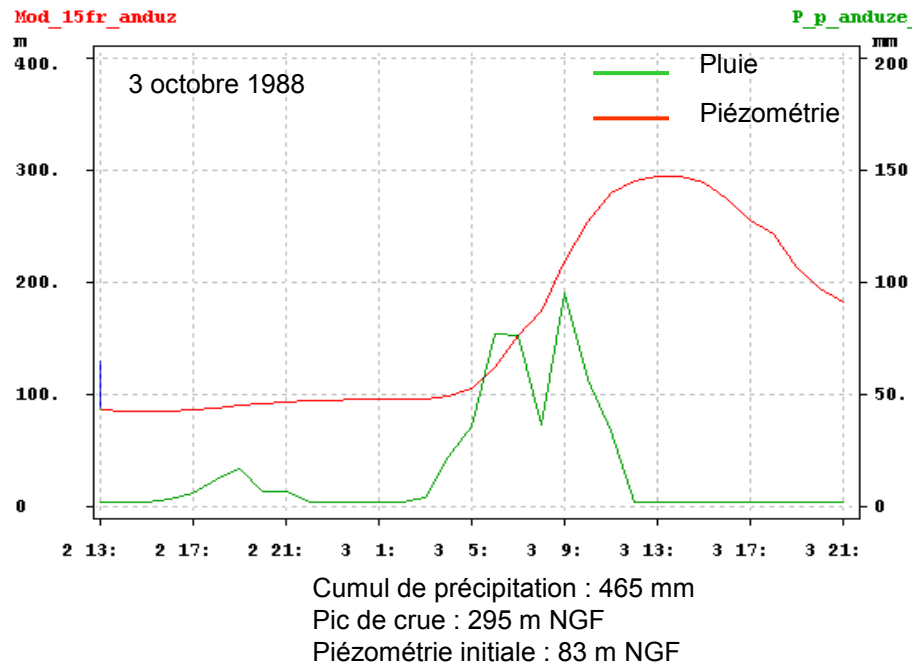


Illustration 35 : Définition du pic de piézométrie à Mas à 15 francs à partir de l'abaque pour l'épisode du 3 octobre 1988

4.2. CAS DES CRUES MULTIPLES

Pour les épisodes multiples, c'est-à-dire avec une interruption d'au moins 4 heures, il est nécessaire de prendre en considération la décrue induite par l'arrêt des précipitations. En effet pour cette durée, les tarissements (vidange de l'aquifère) restent limités et les variations sont de l'ordre des incertitudes liées à la méthode. Cette décrue est appréhendée à l'aide de l'analyse des courbes de récession selon la méthode de Mangin (Mangin, 1970). L'analyse des courbes de récession consiste à étudier la partie décroissante de l'hydrogramme de crue ou des niveaux piézométriques, 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. L'étude de la récession va permettre de définir le coefficient de récession qui permet d'appréhender les diminutions de débit ou de hauteur d'eau au cours du temps.

La méthode de l'analyse des courbes de récession 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 efficaces influence la vidange du réservoir de la zone noyée,
- le tarissement non influencé, qui débute à l'instant où les débits d'infiltration 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 :

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

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 :

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

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 :

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

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 (t_i).

La formulation proposée par Ladouche et al. (2005) pour décrire le fonctionnement de la fonction d'infiltration lorsque les récessions sont particulièrement longues (> 100 jours) est la suivante. Deux fonctions homographiques distinctes $\psi_1(t)$ et $\psi_2(t)$ sont utilisées pour décrire l'infiltration rapide et l'infiltration lente ou retardée :

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

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

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

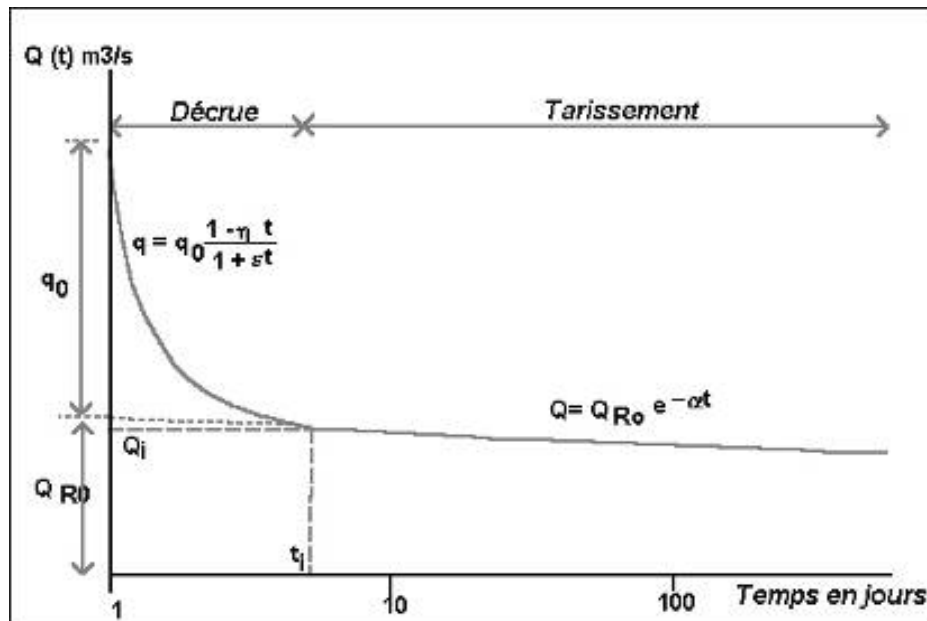


Illustration 36 : Décomposition de la récession selon la méthode de Mangin (1970).

Ainsi cette méthode va permettre de caractériser le coefficient de récession alpha sur l'ensemble des tarissements de la chronique piézométrique simulée à Mas à 15 francs, ainsi que sur le tarissement observé lors de la crue de novembre 2007. Les résultats sont donnés pour différents épisodes dans le tableau suivant :

Crue	$\alpha \text{ (h}^{-1}\text{)}$
3 octobre 1988	0,008
28 mai 1998	0,0055
9 septembre 2002	0,0055
7 septembre 2005	0,0055
8 septembre 2005	0,0075
23 novembre 2007	0,0035

Illustration 37 : Coefficient de récession déduit de l'analyse de Mangin sur différents épisodes de crue

On obtient un coefficient de récession moyen égal à $0,006 \text{ h}^{-1}$. Cette valeur est utilisée pour réaliser un abaque de la piézométrie en fonction de la durée du tarissement (Illustration 38). Un exemple est fourni pour le double épisode de crue du 6-8 septembre 2005. Le premier pic de piézométrie le 6 septembre atteignait 135 m NGF

(Illustration 34), en appliquant un tarissement de 30 heures, on aboutit à une cote piézométrique égale à 112 m NGF.

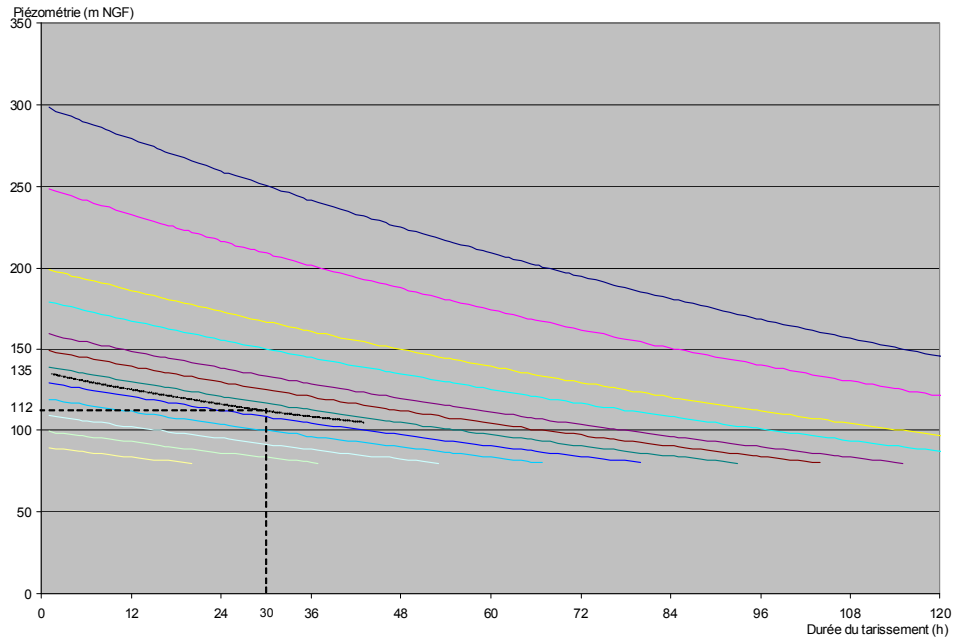


Illustration 38 : Abaque piézométrie en fonction de la durée du tarissement

Les informations déduites de cet abaque sont ensuite utilisées dans le premier abaque fourni (Illustration 34). Un exemple d'utilisation couplant les abaques est donné pour l'épisode de crue du 6 – 8 septembre 2005 (Illustration 39). On obtient alors un pic à 167 m NGF au lieu de 159 m NGF.

A l'issue des tests des abaques réalisés sur les crues simple et multiple, il apparaît que la méthode soit consistante bien qu'il existe toutefois une incertitude évaluée à environ ± 10 mètres.

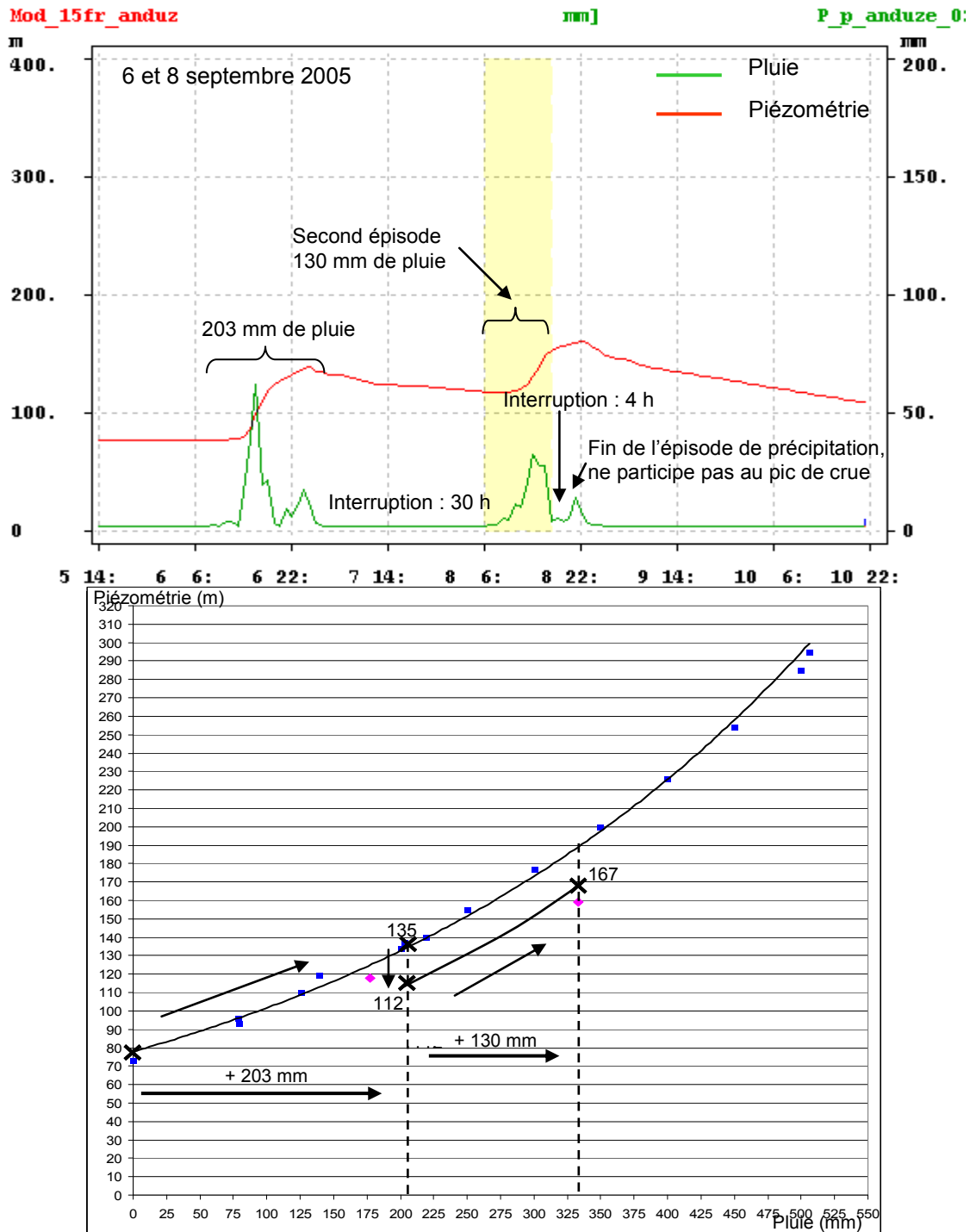


Illustration 39 : Exemple d'utilisation de l'abaque pour des épisodes multiples

5. Conclusions et perspectives

Ce travail de modélisation du débit d'un cadereau utilisant l'information de l'aquifère karstique au site du « Mas à 15 francs », a dans un premier temps, permis de reconstituer les débits des cadereaux de manière très satisfaisante. La chronique de piézométrie reconstituée permet de mettre en évidence à partir de quel moment le débordement de l'aquifère karstique devient effectif et donc pour quel épisode la composante « karst » joue un rôle dans la crue. Sur les quatre crues majeures considérées, seules les trois crues de plus forte intensité ont été alimentées par la composante « karst ».

Aussi, la modélisation réalisée sur le piézomètre retrace la saturation de l'aquifère karstique et ses débordements. Il peut ainsi être utilisé en tant qu'indicateur des débordements et donc servir pour l'alerte au moins d'un point de vue local, au niveau du sous-bassin d'alimentation Ouest de la Ville de Nîmes (cadereaux d'Alès, Pondre et Valdegour). Ce piézomètre pourra faire l'objet d'un suivi en temps réel.

Notons par ailleurs que le modèle développé a permis d'établir un abaque Piézométrie – Pluie. Cet abaque permet d'appréhender en fonction du niveau piézométrique initial et des précipitations, les réactions piézométriques et donc la saturation ou non de l'aquifère karstique. Testés sur le cadereau d'Alès, il a montré sa robustesse à la fois sur des épisodes de précipitations continus (épisodes simples) que discontinus (épisodes multiples).

Un autre piézomètre du réseau de suivi piézométrique, localisé cette fois-ci à l'Est du bassin versant, sera envisagé pour caractériser la composante « karst » alimentant les cadereaux d'Uzès et Valladas. Ce point de contrôle sera intégré à la modélisation du débit des deux cadereaux, dès lors que l'analyse des chroniques aura confirmée la pertinence de ce point pour la caractérisation de la saturation de l'aquifère karstique.

La modélisation mise en œuvre reste toutefois globale et ne peut être utilisée telle quelle dans le modèle à réservoir ESPADA, utilisé par la Ville de Nîmes pour le système d'alerte de la ville. Il conviendra ainsi par la suite de reprendre la modélisation, selon la même méthodologie développée, en simulant uniquement la composante « karst ». Pour ce faire, le modèle ESPADA sera utilisé afin d'établir pour les quatre crues majeures considérées, les hydrogrammes associés à la composante « karst ». Ce travail sera réalisé suite à une mise à jour de l'actuel modèle ESPADA, par Egis BCEOM. L'hydrogramme associé à la composante « karst » sera obtenue par déduction de l'hydrogramme associé à la composante « ruissellement » de l'hydrogramme total.

6. Bibliographie

Fleury, P., Ladouche, B., Courtois, N. (2007). Aléas inondations de la ville de Nîmes par contribution des eaux souterraines, Rapport final, BRGM/RP55558-FR, 152p.

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

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.



Centre scientifique et technique

3 avenue Claude-Guillemin

BP 60009

45060 Orléans Cedex 2 – France

Tel. : 02 38 64 34 34

Service Géologique Régional

Languedoc Roussillon

1039 rue de Pinville,

34 000 Montpellier – France

Tél. : 04 67 15 79 90