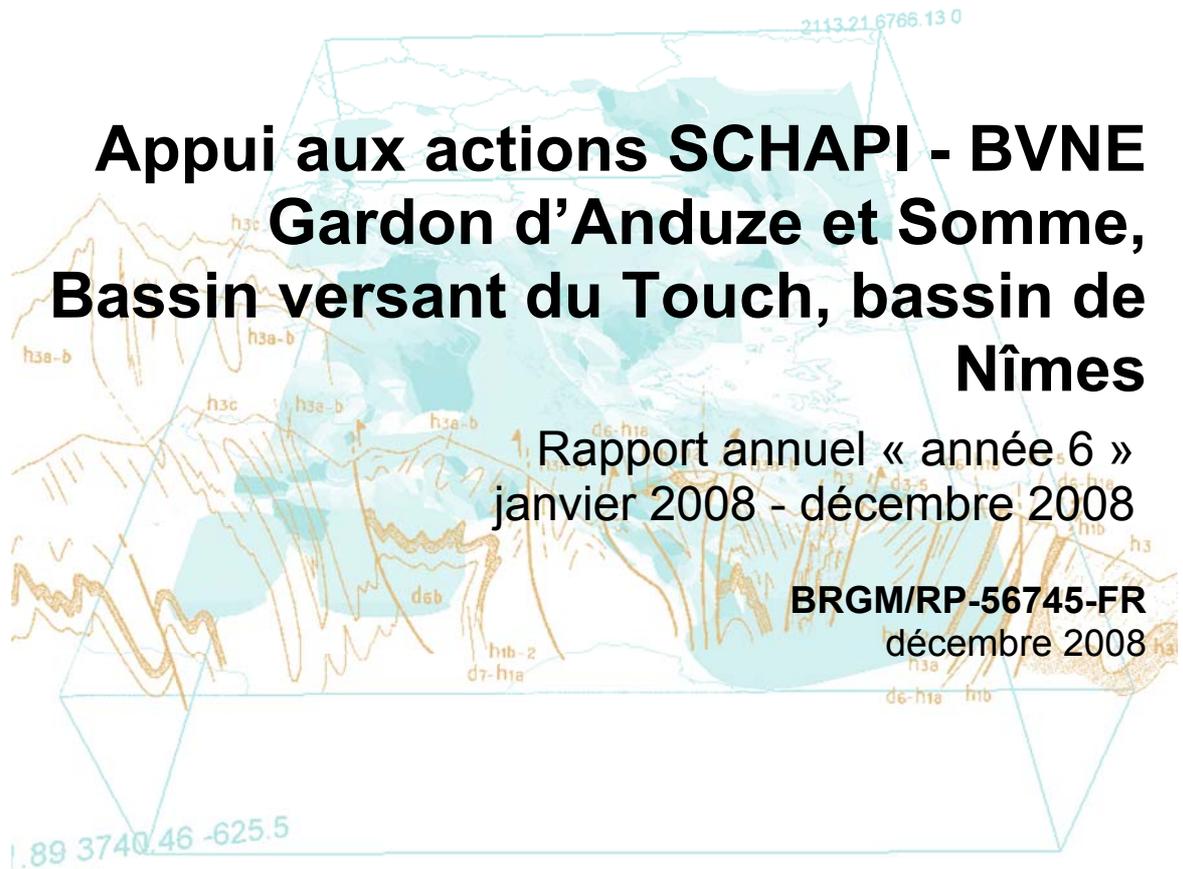




Appui aux actions SCHAPI - BVNE Gardon d'Anduze et Somme, Bassin versant du Touch, bassin de Nîmes

Rapport annuel « année 6 »
janvier 2008 - décembre 2008

BRGM/RP-56745-FR
décembre 2008



Appui aux actions SCHAPI - BVNE Gardon d'Anduze et Somme, Bassin versant du Touch, bassin de Nîmes

Rapport annuel « année 6 »
janvier 2008 - décembre 2008

BRGM/RP-56745-FR
décembre 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2008 08EAUUY02

J.F. Desprats

Avec la collaboration de

**N. Baran, O. Cerdan, P. Fleury, B. Ladouche, N. Dörfliger, M. Saplairoles,
Ph. Stollsteiner, D. Thiéry**

Vérificateur :

Nom : Th. POINTET

Date : 10/12/2007

Signature :

Approbateur :

Nom : H. MODARESSI

Date : 18/12/2007

Signature :

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

Mots clés : crues éclairs, Touch, Somme, Nîmes, karst, perméabilité, état de saturation du sol, modélisation hydrologique, prévention des inondations.

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

Desprats J-F, N., Baran N., Cerdan O., Dörfliger N., Fleury P., Ladouche B., Saplaïroles M., Ph. Stollsteiner, Thiéry, D. 2008. Appui aux actions SCHAPI : BVNE Gardon d'Anduze et Somme, Bassin versant du Touch. Rapport annuel « Année 6 » Janvier 2008 – Décembre 2008 - BRGM RP56745-FR, 133 p, 75 ill., 2 ann..

© BRGM, 2008, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

L'année 2008 marque la mi-parcours de la convention triennale 2007-2008-2009 de la fiche 7 concernant l'appui au SCHAPI, dans le cadre de la convention entre le MEEDDAT (Direction de l'Eau) et le BRGM : « Connaissance du Suivi et de la Gestion des Eaux Souterraines »

Ce rapport d'année 6 constitue un produit délivré contractuel de cette convention. Planifiée sur trois ans, elle est se situe sur 4 modules correspondants à 4 actions spécifiques, répondant aux besoins du SCHAPI :

- module 1 - Bassin versant du Gardon d'Anduze : (i) finalisation du couplage Modèle hydrologique/Stream pour la calibration de la cartographie de la perméabilité des sols, en envisageant la régionalisation de cette cartographie. (ii) validation des données pluies-débit afin d'étendre le nombre de crues modélisables (iii) modélisation à l'aide de Gardenia / Eros
 - Bassin versant de l'Avène : finalisation de la carte du potentiel d'infiltration et calibration
- module 2 - Bassin versant du Touch : fin des mesures sur le site de St-Lys et exploitation des mesures acquises depuis 2006
- module 3 - Bassin versant de la Somme : mise en place de Gardenia sur DEMETER
- module 4 - Karst de Nîmes : Contribution des eaux souterraines aux crues avec l'analyse du comportement des karsts

Sommaire

1. Contexte et objectifs	13
1.1. CONTEXTE	13
1.2. OBJECTIFS	13
1.2.1. Module 1 : Bassin versant du Gardon d'Anduze	14
1.2.2. Module 2 : Bassin versant du Touch	14
1.2.3. Module 3 : Rôle et contribution des eaux souterraines d'origine karstique aux crues (bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes).....	14
1.2.4. Module 4 : Bassin versant de la Somme	15
2. Réalisation année 6 (2008).....	17
2.1. BVNE DU GARDON D'ANDUZE	17
2.1.1. Modélisation Gardon et Avène	17
2.1.2. Calibration de la perméabilité des sols sur l'Avène	23
2.1.3. Analyse des pluies et débits sur le Gardon	27
2.1.4. Modélisation Gardénia.....	30
2.2. BASSIN VERSANT DU TOUCH.....	39
2.2.1. Suivi tensiométrique	40
2.2.2. Suivi de la teneur en eau volumique dans les sols.....	44
2.2.3. Teneurs en eau pondérale	50
2.2.4. Mesures des débits et de la pluviométrie	54
2.2.5. Conclusion.....	57
2.3. ROLE ET CONTRIBUTION DES EAUX SOUTERRAINES D'ORIGINIE KARSTIQUE AUX CRUES	58
2.3.1. Introduction et objectifs.....	58
2.3.2. Présentation du site d'étude et des données disponibles	59
2.3.3. Modélisation du débit des cadereaux	64
2.3.4. Développement méthodologique permettant de définir des seuils d'alerte.....	91
2.3.5. Conclusions et perspectives.....	100
3. Conclusion sur les travaux menés en 2008	101
4. Bilan de Production.....	103

5. Planification année 7	105
5.1. OBJECTIFS.....	105
5.2. TACHES PLANIFIEES EN 2009	105
5.2.1. Description des opérations proposées.....	105
5.2.2. Personnels impliqués.....	106
5.2.3. Schéma de l'organisation et des responsabilités :.....	107
5.2.4. Les étapes du projet :.....	107
5.2.5. Equipe de projet.....	108
5.2.6. Documents à remettre aux partenaires.....	108
6. Bibliographie	109

Liste des illustrations

Illustration 1 : Corrélation entre le ruissellement observé et le ruissellement simulé(calage sur les 4 évènements sélectionnés par le SCHAPI)	18
Illustration 2 : Corrélation entre le ruissellement observé et le ruissellement simulé(totalité des évènements).....	19
Illustration 3 : pluviométrie le 12 septembre 2006 (gauche) et géologie (droite)	20
Illustration 4 : Volumes ruisselés simulés vs observés (hors 12/09/2006).....	21
Illustration 5 : Synthèse des perméabilités	24
Illustration 6 : Avène : perméabilité des sols	24
Illustration 7 : Simulation de la crue du bassin de l'Avène(1997).....	25
Illustration 8 : Débit reconstitué à partir de témoignages (2002).....	26
Illustration 9 : Reconstitution des crues de 97 et 2002.....	26
Illustration 10 : Bassin d'Anduze : Simulation enchainée des 5 crues de 1994 à 2002	30
Illustration 11 : Bassin de Saumane : Simulation enchainée des 5 crues de 1994 à 2002	30
Illustration 12 : Bassin de Mialet : Simulation enchainée des 5 crues de 1994 à 2002	31
Illustration 13 : Critères moyens de la prévision Gardénia pour différentes portées	31
Illustration 14 : Prévision Gardénia : Carré de la corrélation par rapport à la « persistance », c'est-à-dire par rapport à une « prévision naïve » à Anduze.....	32
Illustration 15 : Prévision Gardénia : Erreur quadratique moyenne de prévision de débit pour différentes portées de prévision à Anduze.....	32
Illustration 16 : Saumane : Critères moyens de la prévision Gardénia pour différentes portées.....	33

Illustration 17 : Prévision Gardénia : Carré de la corrélation par rapport à la « persistance », c'est-à-dire par rapport à une prévision naïve � Saumane.	34
Illustration 18 : Prévision Gardénia : Erreur quadratique moyenne de prévision de débit pour différentes portées de prévision à Saumane.	34
Illustration 19 : Mialet : Critères moyens de la prévision Gardénia pour différentes portées	35
Illustration 20 : Prévision Gardénia : Carré de la corrélation par rapport à la « persistance », c'est-à-dire par rapport à une prévision naïve � Mialet.	35
Illustration 21 : Prévision Gardénia : Erreur quadratique moyenne de prévision de débit pour différentes portées de prévision à Mialet.	36
Illustration 22 : Simulation des débits de la crue de Septembre 2002 � Anduze à partir du pluviogramme � Anduze au pas de temps de 5 mn.	37
Illustration 23 : Simulation des débits de la crue d'Octobre 2006 � Anduze à partir de la lame d'eau radar au pas de temps de 5 mn.	37
Illustration 24 : Simulation des débits de la crue d'Octobre 2006 � Saumane à partir de la lame d'eau radar au pas de temps de 5 mn.....	38
Illustration 25 : Nombre de tensiomètres installés sur chacune des 2 parcelles	41
Illustration 26 : Données brutes de potentiel total enregistr�es à 20, 40, 60, 80 et 100 cm sur la parcelle Retenue (les données de pluie sont celles mesur�es par Météofrance au site de Labastidette).....	42
Illustration 27 : Données brutes de potentiel total enregistr�es à 20, 40, 60 et 80 cm sur la parcelle Souléris (les données de pluie sont celles mesur�es par Météofrance au site de Labastidette).....	43
Illustration 28 : Evolution des teneurs en eau volumique à différentes profondeurs dans les 3 fosses de la parcelle Souléris. Les pluies pr�sent�es sont mesur�es par Météofrance au site Labastidette	46
Illustration 29 : Evolution des teneurs en eau volumique à différentes profondeurs dans les 3 fosses de la parcelle Retenue. Les pluies pr�sent�es sont mesur�es par Météofrance au site Labastidette	47
Illustration 30 : Evolution des teneurs en eau volumique à différentes profondeurs dans les 3 fosses de la parcelle Retenue. Les pluies pr�sent�es sont mesur�es par Météofrance au site Labastidette	49
Illustration 31 : Evolutions au cours du temps des teneurs en eau pondérale pour les sites de Retenue et Souléris	50
Illustration 32 : Teneurs en eau volumique (TDR) vs. teneurs en eau pondérale pour les différents horizons de la parcelle Retenue.....	52
Illustration 33 : Teneurs en eau volumique (TDR) vs. teneurs en eau pondérale pour les différents horizons de la parcelle Souléris	54
Illustration 34 : Evolution des débits journaliers enregistrés à la station de la DIREN Midi-Pyrénées entre octobre 2006 et septembre 2008 et précipitations journalières enregistr�es à la station MétéoFrance de Labastidette.	55
Illustration 35 : Pluies mensuelles observ�es à la station MétéoFrance de Labastidette	55

Illustration 36 : Station de la DIREN Midi-Pyrénées lors de la visite de terrain du 24 avril 2008	56
Illustration 37 : Réseau hydrographique de la Ville de Nîmes et instrumental (station limnimétriques, pluviographiques et piézométriques)	59
Illustration 38 : 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	61
Illustration 39 : 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 »	63
Illustration 40 : Schéma conceptuel de fonctionnement des piézomètres Mas à 15 francs 1 et 2	64
Illustration 41 : 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	67
Illustration 42 : Schéma du principe du modèle de transfert à partir du logiciel Tempo	68
Illustration 43 : Réponse impulsionnelle lente et rapide des débits du cadereau d'Alès (modèle simple)	69
Illustration 44 : Résultats graphiques pour le modèle simple développé sur Anduze	70
Illustration 45 : Résultats graphiques pour le modèle simple développé sur Cimpro	71
Illustration 46 : 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)	72
Illustration 47 : Schéma de principe du modèle de transfert du piézomètre représentatif du karst	73
Illustration 48 : Réponse impulsionnelle lente et rapide de la piézométrie du site Mas à 15 fr	73
Illustration 49 : Seuil de pluie efficace Oméga et de la pluviométrie	74
Illustration 50 : Comparaison de la piézométrie simulée et mesurée du site Mas à 15 fr	74
Illustration 51 : Piézométrie reconstituée du site Mas à 15 fr	75
Illustration 52 : Information débordement du karst au site Mas à 15 fr (le seuil de débordement ici est fixé à 120 m)	76
Illustration 53. Schéma de principe des modèles de transfert prenant en considération l'information karst	77
Illustration 54 : Réponse impulsionnelle lente et rapide des débits du cadereau d'Alès avec le modèle prenant en considération l'information karst	77
Illustration 55 : Résultats graphiques pour le modèle prenant en considération l'information karst (seuil à 120 m) développé sur Anduze	78
Illustration 56 : Résultats graphiques pour le modèle prenant en considération l'information karst (seuil à 115 m) développé sur Cimpro	79
Illustration 57 : Résultats graphiques pour le modèle prenant en considération l'information karst (seuil à 120 m) développé sur Cimpro	80

Illustration 58 : 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	81
Illustration 59 : 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	82
Illustration 60 : Résultats graphiques pour les modèles simple et avec l'information karst développés sur Poudre	83
Illustration 61 : 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	84
Illustration 62 : Résultats graphiques pour le modèle simple développé sur Valdegour	84
Illustration 63 : 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	85
Illustration 64 : Résultats graphiques pour les modèles simple et avec l'information karst développé sur Camplanier	85
Illustration 65 : 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	86
Illustration 66 : Résultats graphiques pour les modèle simples et avec l'information karst développés sur Engance.....	87
Illustration 67 : Résultats graphiques pour les modèle simples et avec l'information karst développés sur Van-Dyck	88
Illustration 68 : 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	89
Illustration 69 : Résultats graphiques pour les modèle simples et avec l'information karst développés sur Valladas	90
Illustration 70 : Définition du pic de piézométrie à Mas à 15 francs à partir de l'abaque pour l'épisode du 6 septembre 2005.....	93
Illustration 71 : Définition du pic de piézométrie à Mas à 15 francs à partir de l'abaque pour l'épisode du 3 octobre 1988.....	94
Illustration 72 : Décomposition de la récession selon la méthode de Mangin (1970).	97
Illustration 73 : Coefficient de récession déduit de l'analyse de Mangin sur différents épisodes de crue.....	97
Illustration 74 : Abaque piézométrie en fonction de la durée du tarissement.....	98
Illustration 75 : Exemple d'utilisation de l'abaque pour des épisodes multiples	99

Liste des annexes

Annexe 1 Compte-rendus de réunions / Missions.....	111
Annexe 2 Journal des visites de terrain (novembre 2007 – juillet 2008).....	127

1. Contexte et objectifs

1.1. CONTEXTE

L'année 2008 marque la mi-parcours de la convention triennale 2007-2008-2009 de la fiche concernant l'appui au SCHAPI. Le rapport d'année 6 est un produit livré contractuel. Le projet comporte 4 modules correspondants à 4 actions spécifiques, répondant aux besoins du SCHAPI.

Le projet comporte 4 modules correspondent à 4 thématiques et 4 zones géographiques distinctes ont été choisies en fonction de leurs caractéristiques

- crues de nappe :
- crues rapides,
- crues en milieu karstique ;
- relation humidité des sols et crues.

... traitées à travers le BV de la Somme, le Gardon d'Anduze, Nîmes et le Touch. Le projet est à la fois méthodologique et un prélude à l'application pour un suivi optimisé des crues.

1.2. OBJECTIFS

Les lignes directrices de la collaboration BRGM – SCHAPI ont été définies fin 2006 pour les années 2007 à 2009. Cependant, en fonction des résultats, des problématiques soulevées, et des besoins émergents du SCHAPI, une adaptation est requise chaque année. Les éléments et besoins relevés lors des réunions de présentation des résultats annuels sont repris dans le rapport de fin d'année, dans la partie « Objectifs » pour l'année suivante.

A titre d'exemple, le volet « karst » qui ne figurait pas dans la convention triennale initiale a été développé à la demande du SCHAPI, afin de répondre à cette problématique particulière en s'appuyant sur les terrains expérimentaux et la compétence des équipes du BRGM dans ce domaine.

Les objectifs pour l'année 2008, définis fin 2006 ont donc été affinés lors de la réunion BRGM / SCHAPI fin 2007 à Montpellier (compte-rendu en annexe), afin de tenir compte des évolutions des besoins du SCHAPI, des contraintes de projet (fin des mesures in situ sur le Touch), ..., la finalité restant une meilleure compréhension des phénomènes expliquant les crues, afin de mieux les prévoir.

1.2.1. Module 1 : Bassin versant du Gardon d'Anduze

En 2008, les travaux sur le BVNE du Gardon d'Anduze / Avène ont porté sur les points suivants :

- mesures de perméabilité complémentaires sur les formations pédo-paysagères « sols / occupation du sol » du bassin versant de l'Avène (vignes sur argiles et alluvions ..). Absentes du Gardon d'Anduze mais très présentes en régions méditerranéennes, elles doivent permettre une généralisation ultérieure des modélisations à base physique (Althaïr, Marine, ..) aux autres bassins régionaux
- modélisation à l'aide de STREAM sur le Gardon d'Anduze des événements recensés entre 2002 et 2007, et comparaison entre la prise en compte d'une perméabilité spatialisée et homogène, afin de valider l'intérêt de la spatialisation
- modélisation à l'aide de STREAM sur l'Avène des événements d'octobre 1997 et septembre 2002 reconstitués.
- analyse des données pluies – débits en collaboration avec le SPC Grand Delta.
- modélisation GARDÉNIA sur les crues de 2002 et 2006 à la demande du SCHAPI dans le cadre d'une comparaison inter modèles (GR du CEMAGREF, Marine de l'IMFT, réseaux de neurones par l'EM Alès, ..)

1.2.2. Module 2 : Bassin versant du Touch

L'année 2008 est marquée sur la bassin versant du Touch par la fin des mesures sur le site de St-Lys et l'exploitation des mesures acquises depuis 2006.

L'état de saturation des sols constitue un élément incontournable dans la prévision des crues. Le bassin a été instrumenté en janvier 2006 (rapport BRGM/RP-54683-FR). Des problèmes techniques ont été observés durant la première année de suivi et ont conduit, en fin d'année 2006, à désinstaller le matériel en place sur les deux parcelles afin de resaturer les bougies poreuses en laboratoire. Les cannes ont été remises en place sur site début janvier 2007, à savoir 13 tensiomètres sur la parcelle « Retenue » et 7 tensiomètres sur la parcelle « Souléris » à proximité des 3 fosses où sont implantées les sondes TDR .

La modélisation des crues du Touch avec GARDÉNIA est envisagée en 2009. En effet les lames d'eau sont spatialement régulières sur ce bassin ce qui serait tout à fait dans le domaine d'application de GARDÉNIA.

1.2.3. Module 3 : Rôle et contribution des eaux souterraines d'origine karstique aux crues (bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes)

La contribution des eaux souterraines à la genèse des crues a été démontrée à partir d'une approche couplée hydrogéochimique et hydrogéologique. Les modélisations TEMPO débutées en 2007 se poursuivent sur 2008, avec en particulier l'acquisition de

données pluviométriques complémentaires (images Radar) afin d'étudier la possibilité d'intégrer la variabilité spatiale dans les modélisations.

1.2.4. Module 4 : Bassin versant de la Somme

Le SCHAPI ayant décidé d'ajourner les modélisations prévues sur le BVNE de la Meuse, ce bassin ne faisant pas suffisamment l'objet de travaux en commun de la part d'autres équipes, les actions se limiteront à l'implantation de GARDÉNIA sur DEMETER qui n'a pu être réalisée en 2007.

2. Réalisation année 6 (2008)

Les quatre zones d'étude ont été décrites dans les rapports annuels précédents (Rapports 2007 BRGM/RP-55869-FR, 2005 BRGM/RP-54240-FR, 2004 BRGM/RP-53901-FR et 2003 BRGM/RP53027-FR).

Les résultats des travaux font l'objet du présent chapitre

2.1. BVNE DU GARDON D'ANDUZE

En 2008, les travaux ont porté sur les points suivants : Les travaux sur le BVNE du Gardon d'Anduze ont porté :

- mesures de perméabilité complémentaires sur les formations « sols / occupation du sol » très présentes en régions méditerranéennes, mais peu représentées sur le Gardon d'Anduze lui-même : vignes sur argiles et alluvions, ..
- modélisation à l'aide de STREAM sur les événements recensés en 2002 et 2007 sur le Gardon, et les événements d'octobre 1997 et septembre 2002 reconstitués sur l'Avène,
- analyse des données pluies – débits en collaboration avec le SPC Grand Delta,
- modélisation GARDÉNIA pour une approche hydrologique compatible avec la demande du SCHAPI.

2.1.1. Modélisation Gardon et Avène

Modélisations des événements enregistrés entre 2004 et 2006

Suite aux travaux de modélisations réalisés en 2007 à l'aide des événements sélectionnés par le SCHAPI dans le cadre du BVNE : 21 septembre 1994, 10 novembre 1996, 19 septembre 2000 et 08 septembre 2002.

Le coefficient de corrélation entre le ruissellement observé et le ruissellement simulé à l'aide de STREAM est égal à 0,9 (Illustration 1)

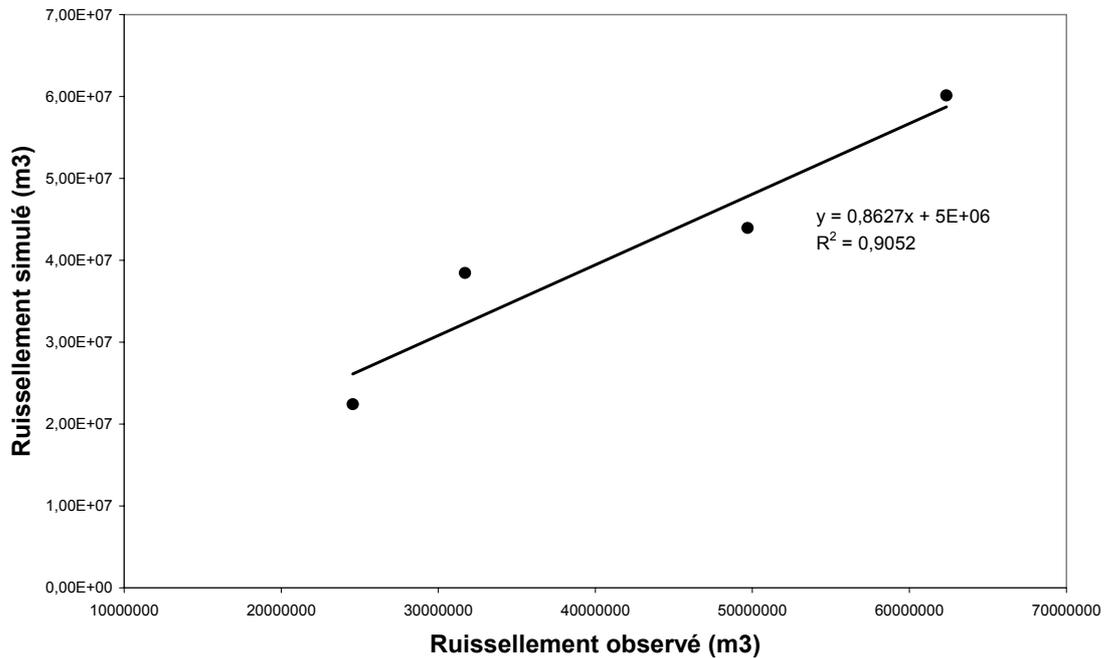


Illustration 1 : Corrélation entre le ruissellement observé et le ruissellement simulé (calage sur les 4 événements sélectionnés par le SCHAPI)

Il est alors nécessaire à partir des événements enregistrés depuis 2002 de modéliser les écoulements, pour les pluies du :

- 27 octobre 2004,
- 5 septembre 2005,
- 3 novembre 2005,
- 12 septembre 2006,
- 18 octobre 2006.

Afin d'obtenir un nombre supérieur de points, nous avons traité les bassins versants jaugés de Saumane, Mialet et Anduze. (Données manquantes pour Mialet en 2004 et 2005).

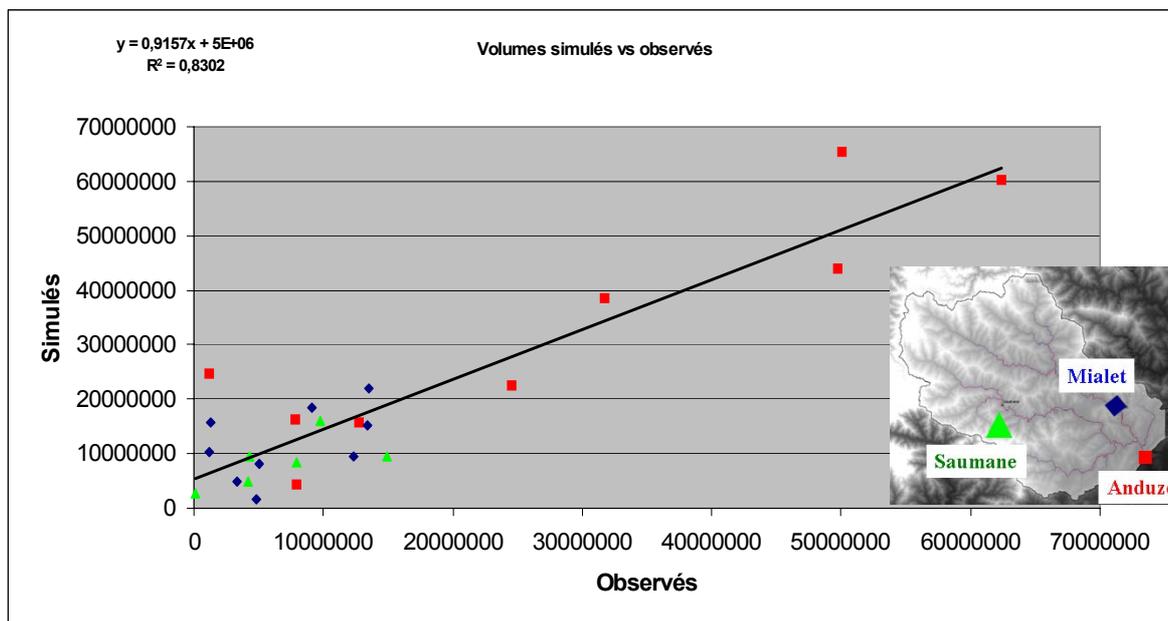


Illustration 2 : Corrélation entre le ruissellement observé et le ruissellement simulé (totalité des évènements)

Le coefficient de corrélation obtenu ($r^2 = 0,83$) démontre la bonne relation entre valeurs observées et simulées, quelque soit le bassin versant. Un point particulier est à noter : la pluie du 12 septembre 2006 pour laquelle STREAM surévalue complètement les volumes à l'exutoire, que ce soit pour Mialet, Saumane ou Anduze.

Deux hypothèses peuvent être soulevées : une première liée à l'état des sols, une seconde liée à la localisation des pluies

- (1) la première hypothèse est liée au fait que l'humidité des sols est un facteur important dans le ruissellement. Cependant ce paramètre est pris en compte dans STREAM par l'intégration des « Pluies antécédentes » (précipitations observées au cours des 10 jours précédent l'évènement étudié) visant à donner une indication sur l'état de saturation des sols.

Par ailleurs, nous avons comparé cet évènement du 12 septembre 2006 (environ 250 mm) avec celui intervenu le 5 septembre 2005 (environ 150 mm). Avant le 5 septembre 2005, il était tombé 3,5mm sur les 15 jours précédents, et 18,5 sur le mois précédent. On peut considérer que les sols étaient alors secs.

Avant le 12 septembre 2006, il était tombé 8mm au cours des 15 derniers jours, et 46mm au cours du dernier mois. Les sols étaient donc secs à très légèrement humides.

Si la pluie de septembre 2006 intervient effectivement sur un sol apte à absorber une bonne partie du fait d'une humidité faible, il en était de même un an plus tôt, dans des conditions encore plus sèches.

(2) L'autre hypothèse émise est donc la distribution des pluies, sur des formations pédologiques présentant des perméabilités très contrastées. Nous avons donc regardé comment les pluies enregistrées lors de l'évènement du 12 septembre 2006 étaient réparties. (Illustration 3).

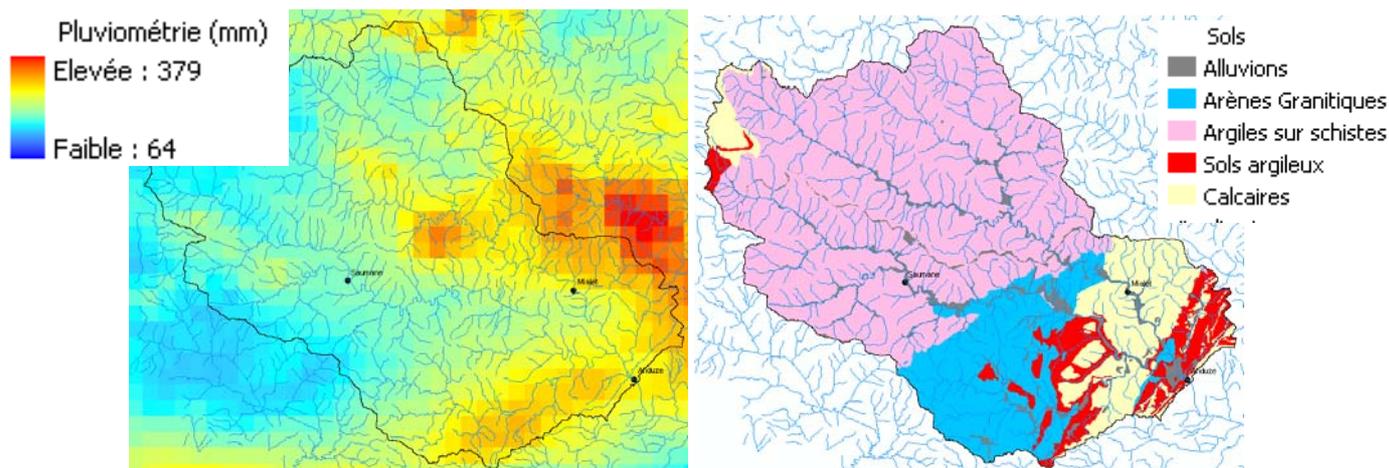


Illustration 3 : pluviosité le 12 septembre 2006 (gauche) et géologie (droite)

On constate sur l'illustration 3 que la cellule orageuse est localisée au Nord d'Anduze. Le cumul pluviométrique y atteint 379mm contre seulement 64mm sur la partie amont du bassin versant. Les plus fortes pluies correspondent à la partie karstique du bassin versant. On peut émettre l'hypothèse que les karsts, présentant très probablement un niveau piézométrique en fin d'été, aient absorbé une bonne partie de la pluie qui n'aura donc que très peu ruisselé.

Si cette hypothèse était confirmée (via la prise en compte de données piézométriques), cela validerait :

1. la nécessité de traiter particulièrement les domaines karstiques comme c'est le cas dans le programme BRGM/SCHAPI
2. la difficulté d'appliquer un niveau de perméabilité aux sols sur calcaires, perméabilités qui sont très variables : très faibles dans des dolines avec accumulations de particules fines, infinies sur des zones avec fractures ou avens.

L'illustration 4 montre qu'en écartant cet évènement particulier, le coefficient de corrélation entre volumes ruisselés estimés par STREAM et volumes ruisselés observés est de 0,88.

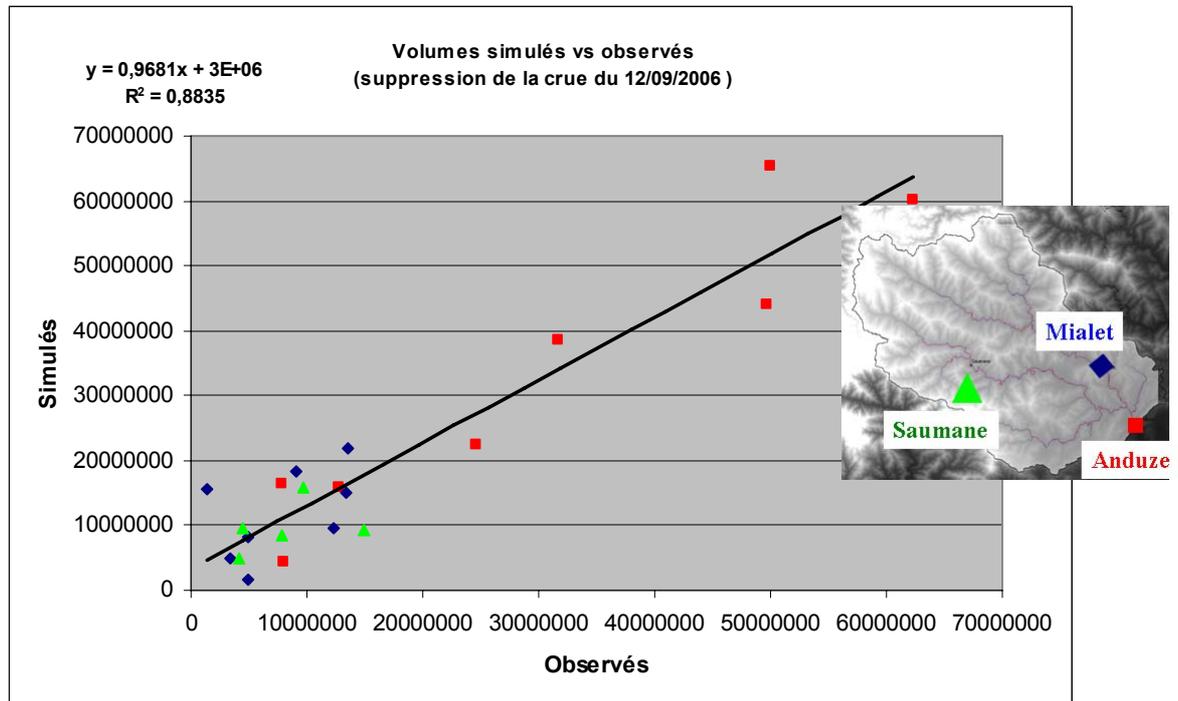
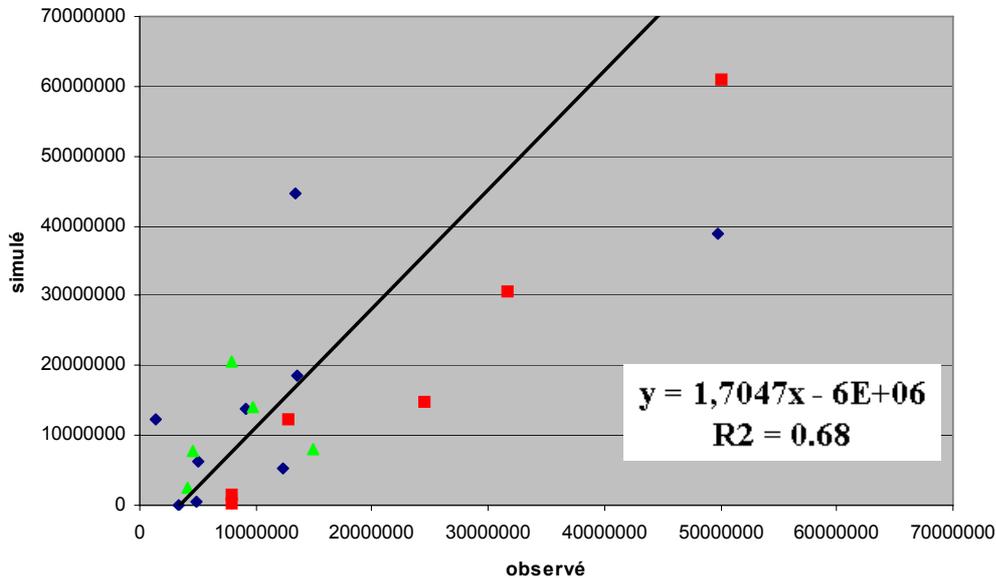


Illustration 4 : Volumes ruisselés simulés vs observés (hors 12/09/2006)

Validation de la prise en compte d'une perméabilité spatialisée.

Afin de vérifier l'intérêt de la prise en compte d'une cartographie spatialisée de la perméabilité, nous avons modélisé le ruissellement sur les huit événements retenus (événement particulier du 12/09/2006 écarté), en prenant d'un coté la perméabilité spatialisée finalisée en 2007, et d'un autre coté une valeur moyenne pondérée par la surface de chaque entité pédologique. Cette moyenne est pour le bassin versant de 30mm/h.



La corrélation qui était de 0.88 avec une perméabilité spatialisée n'est plus que de 0.68. Il semble que donc que la spatialisation de la perméabilité soit un paramètre important sur un bassin versant comme le Gardon d'Anduze, qui présente d'une part une pédologie contrastée et qui est sujet d'autre part à une répartition des pluies très variable (pluies cévenoles).

L'exemple de l'évènement intense de septembre 2002 est éloquent. Le volume estimé à l'exutoire d'Anduze est de 62 millions de m³. Le volume simulé en prenant en compte une perméabilité spatialisée est de 60 millions de m³, alors qu'il est de plus de 160 millions avec une perméabilité moyenne de 30mm/h. Lors de cet évènement majeur, les cumuls ont été moindres sur la partie amont (sols sur schistes très ruisselants) que sur la partie aval (importance des arènes granitiques relativement perméables). Attribuer une valeur globale de 30 mm/h aux deux formations modifie de façon importante le volume ruisselé estimé.

2.1.2. Calibration de la perméabilité des sols sur l'Avène

Si l'Avène n'est pas un BVNE comme le Gardon d'Anduze ou la Somme, il avait été convenu dès 2004 d'étudier son comportement. Ce bassin versant n'est certes pas réglementaire au sens SPC (pas de service de prévision), mais les études préalablement réalisées ont permis de reconstituer les crues de septembre 2002 et octobre 2007.

Il a donc été convenu en 2008 de (1) compléter la définition de la perméabilité des sols, afin de mieux prendre en compte les formations sols/ occupation du sol majeures pour les régions méditerranéennes mais mineures sur le Gardon d'Anduze, (2) mettre à jour la cartographie de la perméabilité des sols sur l'Avène, et (3) valider la perméabilité sur les événements hydrologiques reconstitués.

Perméabilité des sols sur les argiles et alluvions

La carte de perméabilité présentée dans le rapport annuel 2007 (Gardon d'Anduze) résultait d'une synthèse globale entre les mesures de perméabilité faites avec les systèmes double-anneau et Guelph sur le bassin du Gardon d'Anduze, ainsi que sur la zone de Nîmes pour l'occupation du sol « garrigue » sur des formations calcaires. Afin de prévoir une extrapolation à des bassins versants typiquement méditerranéen, mais plus agricoles que le Gardon d'Anduze, il convenait de préciser les perméabilités mesurées à ce jour (Illustration 5) à partir d'un nombre de points statistiquement trop faible sur vignes, cultures et prairies situées sur les argiles et alluvions.

En juillet/août 2008, ce sont donc 50 nouveaux points qui ont fait l'objet de mesures à l'aide d'un perméamètre de Guelph :

- 25 points sur des argiles : 10 vignes, 10 cultures, 5 prairies,
- 25 points sur des alluvions : 10 vignes, 10 cultures, 5 prairie.s

Géol/pédo	Occup. sol	infiltration mm/h	Géol/pédo	Occup. sol	infiltration mm/h
alluvions	culture	26 (*)	marnes	culture	19 (*)
	Forêt	30 (--)		Forêt	15 (*)
	Prairie	30 (**)		Prairie	7 (**)
	vigne	7 (*)		vigne	11 (**)
calcaire	culture		schistes	culture	
	Forêt	37 (--)		Forêt	30 (**)
	Prairie	19 (**)		Prairie	22 (**)
	vigne			vigne	
granites	culture		poudingue	culture	
	Forêt	49 (**)		Forêt	
	Prairie	37 (--)		Prairie	22 (*)
	vigne			vigne	
Affleurement		2 (-)			

(*) Guelph (-) Expertise
 (**) Guelph/ Double Anneau (-- Double Anneau

Illustration 5 : Synthèse des perméabilités

La cartographie de la perméabilité des sols mise à jour est présentée dans l'illustration 6

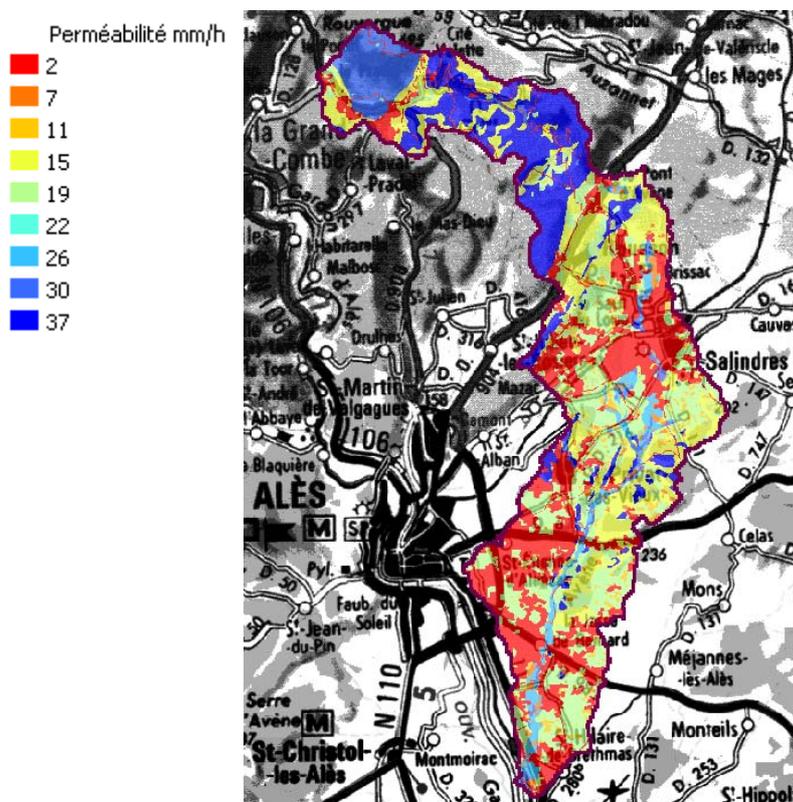


Illustration 6 : Avène : perméabilité des sols

Calibration de la perméabilité à l'aide de STREAM

Deux évènements hydrologiques ont pu être reconstitués :

- 6 octobre 1997 : E. Gaume, M. Livet : « La crue de l'Avène des 6 et 7 octobre 1997 - Compte rendu d'enquête, septembre 1999 »,
- 8/9/ septembre 2002 : E. Gaume, O. Payrastre, B. Rosa da Silva « Analyse hydrologique des crues des 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard - Convention 02000246 ».

L'étude de la crue de 1997 permet de reconstituer un volume ruisselé global de 5.5 millions de m³, avec un débit de pointe estimé entre 600 et 900 m³/sec. (Illustration 7 et Illustration 9).

En 2002 (Illustration 8 et Illustration 9), le volume reconstitué à partir de témoignages est de 20.5 millions de m³.

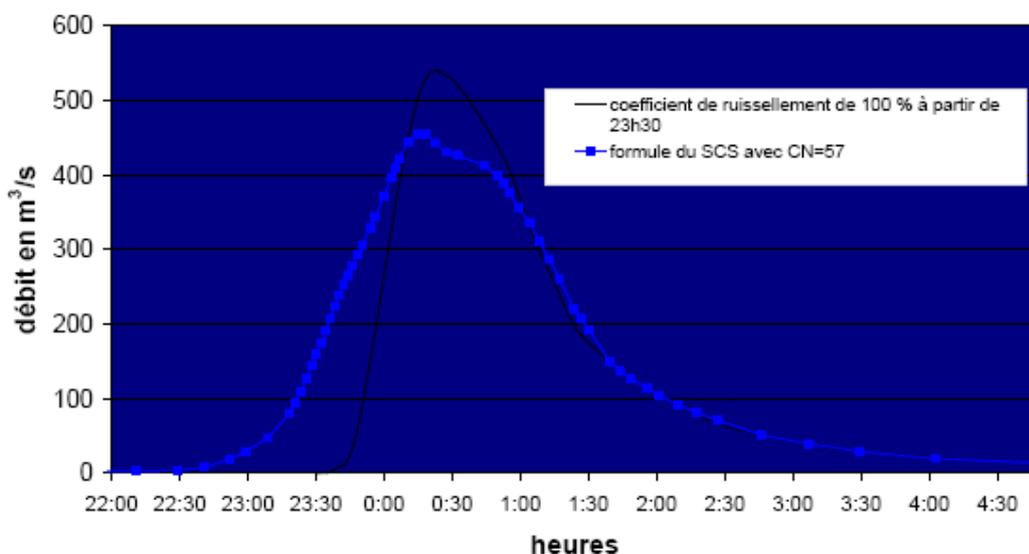


Illustration 7 : Simulation de la crue du bassin de l'Avène(1997)

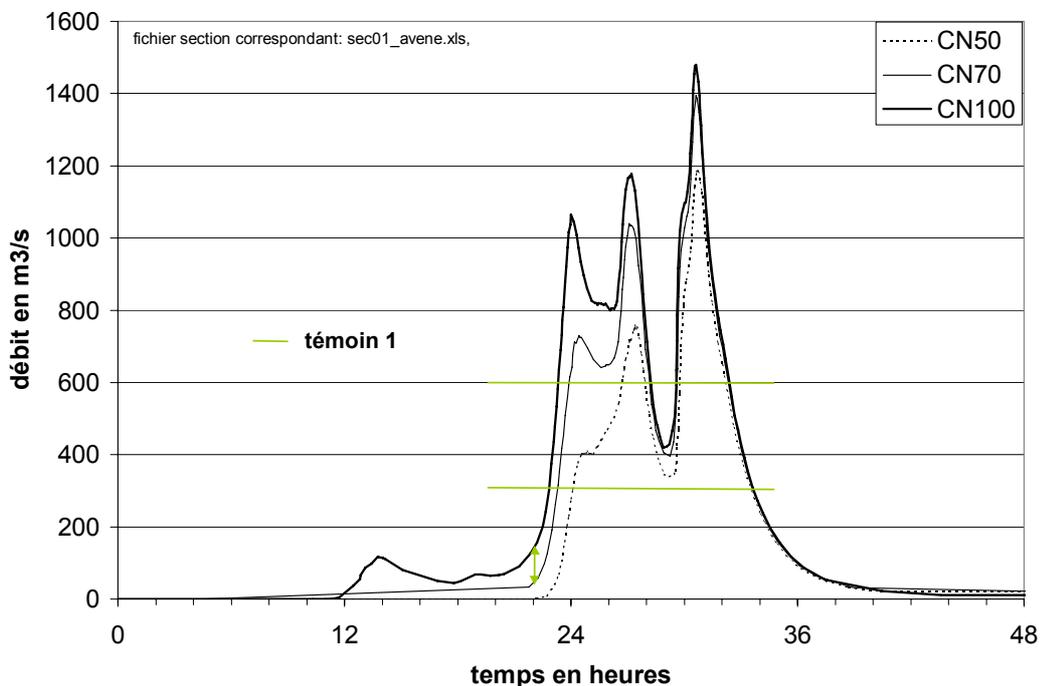


Illustration 8 : Débit reconstitué à partir de témoignages (2002)

La démarche suivie pour le BVNE du Gardon d'Anduze a donc été appliquée sur l'Avène pour ces deux crues. Les volumes estimés par STREAM à l'exutoire sont précisés dans l'illustration 9.

Evènement	Pluviométrie	Volume ruisselé reconstitué (millions m ³)	Pluie efficace (heures)	Volume simulé (millions m ³)	Ecart
Octobre 1997	240 mm	5.5	6	7,44	+34%
Septembre 2002	482 mm	20.5	10.5	17,21	-16%

Illustration 9 : Reconstitution des crues de 97 et 2002

Si la précision obtenue pour 2002 reste acceptable (sous-estimation limitée à 16%), elle est faible pour la crue de 1997 surestimée de 34%.

Si le bassin versant de l'Avène dispose dans les années à venir de mesures de débits, il sera nécessaire de valider la calibration de la perméabilité des sols.

2.1.3. Analyse des pluies et débits sur le Gardon

Visite préalable des stations hydrométriques

Sur le bassin versant du Gardon d'Anduze, on recense actuellement cinq stations hydrométriques :

- trois gérées depuis plusieurs années par la DDE/SPC du Gard,
- deux qui étaient gérées, jusqu'à l'année dernière, par la DIREN.

La comparaison des hydrogrammes des crues observés à ces différentes stations a permis de constater :

- une bonne cohérence dans la forme des hydrogrammes,
- une différence significative entre la somme des débits des stations DIREN et les débits de la station d'Anduze lors des évènements de fréquence rare.

Avant et afin de réaliser une modélisation en grappe des différents sous bassins versant à l'aide du logiciel EROS du BRGM, il est apparu nécessaire de vérifier l'exactitude des courbes de tarage de ces différentes stations, notamment en très hautes eaux.

Exploitations des informations collectées

Station du gardon de Mialet à Généragues (Roucan) : V7124010

- Bassin versant de 240 km²,
- Mise en service le 01/01/1962, altitude : 140 m,
- Seuil existant
- Hauteur maximale instantanée observée : 633 cm le 08/09/02,
- Débit maximal instantané correspondant : 749 m³/s,
- Courbe de tarage actuelle :
 - 1,88 m < h < 3,17 m : $Q = -65,084 h^2 + 513,34 h - 496,17$
 - 3,17 m < h : $Q = -4,3995 h^2 + 128,6 h + 114,83$

Vu la configuration de la station, il apparaît possible d'utiliser, en première estimation, une loi hauteur débit correspondant à un seuil épais sans pelle. Pour les très hautes eaux, les levés topographiques commandés par DDE/SPC, non encore réalisés, devraient permettre, à l'aide d'un calcul hydraulique de ligne d'eau de préciser s'il y a ou non influence d'aval et, dans ce cas de préciser la relation hauteur débit à utiliser pour les cotés supérieures.

Pour les faibles débits la courbe devra être précisée à l'aide de jaugeages.

La relation hauteur débit pour un seuil épais sans pelle est de la forme :

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} = \mu L H (2gH)^{0,5}$$

Avec : L : longueur du seuil (m) ; H : charge hydraulique (m) et μ : coefficient de débit, compris entre 0,37 et 0,39 (expérience de Bazin), souvent pris égal à 0,385.

Soit en développant : $Q = a. L H^{1.5}$ avec $1,64 < a < 1.72$

En supposant une longueur de seuil de 50 m (à vérifier et corriger à réception du relevé topographique) on obtient la formule provisoire :

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} = 82 H^{1.5}$$

Cette formule d'estimation des débits peut être considérée comme valable pour un fonctionnement normal du seuil (dénoyé).

Nota bene : D'après un levé sommaire d'une section située en aval le seuil pourrait ne pas être noyé pour la charge maximale observée si la pente de l'écoulement en aval du seuil est voisine de 2%.

Charge (m)	Débit C.T. actuelle (m ³ /s)	Débit Loi de seuil (m ³ /s)
1,88	239	211
3,17	477	463
4,48	604	778
5,36	675	1020
6,33	752	1300

Station du gardon de Saint Jean à Corbes : V7135010

- Bassin versant de 263 km²,
- Mise en service le 01/11/1966, altitude : 136 m,
- Seuil existant
- Hauteur maximale instantanée observée : 489 cm le 14/10/95,
- Débit maximal instantané calculé : 721 m³/s le 09/09/02 (h=),
- Courbe de tarage actuelle :
 - 0,87 m < h < 3,46 m : $Q = 17,927 h^2 + 122,56 h - 75,373$
 - 3,46 m < h : $Q = -80 h^2 + 800 h - 1250$

Vu la configuration de la station, il apparaît possible d'utiliser, en première estimation, une loi hauteur débit correspondant à un seuil épais sans pelle. Cette relation ne peut toutefois être considérée comme valide que lorsque le seuil est dénoyé, c'est à dire pour des débits relativement limités.

En supposant une longueur de seuil de 50 m (à vérifier lors du relevé topographique) on obtient une formule provisoire de :

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} = 90 H^{1.5}$$

Avec : L : longueur du seuil (m) ; H : charge hydraulique (m) et μ : coefficient de débit, compris entre 0,37 et 0,39 (expérience de Bazin), souvent pris égal à 0,385.

Pour les hautes eaux, la présence du pont situé à l'aval va limiter les écoulements et favoriser un niveau aval haut. Les levés topographiques commandés par DDE/SPC, non encore réalisés, devraient permettre, à l'aide d'un calcul hydraulique de ligne d'eau d'estimer la gamme des débits pour lesquels il y a fonctionnement noyé ou dénoyé.

Afin d'estimer la relation hauteur débit des hautes eaux, il apparaît nécessaire d'utiliser un logiciel permettant de modéliser au mieux les pertes de charge au droit de ce pont. Pour les très hautes eaux (débordement par-dessus le pont), le pont pourra éventuellement être considéré, s'il y a lieu, comme un seuil épais.

Charge (m)	Débit C.T. actuelle (m ³ /s)	Débit Loi de seuil (m ³ /s)
0.87	46	73
2	241	254
3	454	468

Nota bene : D'après un levé sommaire des cotes des ouvrages et de la section du pont, celui-ci devrait se mettre en charge pour un débit inférieur à 400 m³/s, ce qui impliquerait également l'envolement du seuil.

Conclusion

La visite du site et l'exploitation des observations récoltées montrent que les courbes de tarage des anciennes stations de la DIREN sont délicates à établir (notamment celle de Corbes) et nécessitent des modélisations hydrauliques d'écoulement à surface libre. Celles-ci nécessitent la réalisation de levés topographiques qui ont été commandés par la DDE/SPC et qui devraient être réalisés durant l'été.

Une évaluation rapide des courbes de tarage permet toutefois de penser que les débits de très hautes eaux ($h > 3.5$ m) ont été probablement sous estimés au droit de la station de Généragues.

La DDE/SPC va s'équiper d'un logiciel d'hydraulique à surface libre (Mascaret) afin de réaliser ces modèles. Le BRGM se propose de l'assister, si DDE/SPC en éprouve le besoin, lors de la construction et/ou exploitation de ces modèles et/ou lors de l'établissement des courbes de tarage.

Après re-calcul des débits de crue, la DDE/SPC transmettra les nouvelles données au BRGM qui pourra alors réaliser une modélisation hydrologique EROS avec les débits des cinq stations du bassin versant du Gardon d'Anduze. Cette modélisation permettra également de vérifier la cohérence globale des différentes courbes de tarage

2.1.4. Modélisation Gardénia

Modélisation des crues de la période 1994 – 2002 en mode « Préviation »

Les 5 crues de la période 1994-2002 ont été modélisées en 2007 au pas de temps horaire avec le code GARDÉNIA du BRGM **en mode simulation** et un calage correct a été obtenu. Les cinq crues ont été simulées avec le même jeu de paramètre (Illustration 10, Illustration 11, Illustration 12).

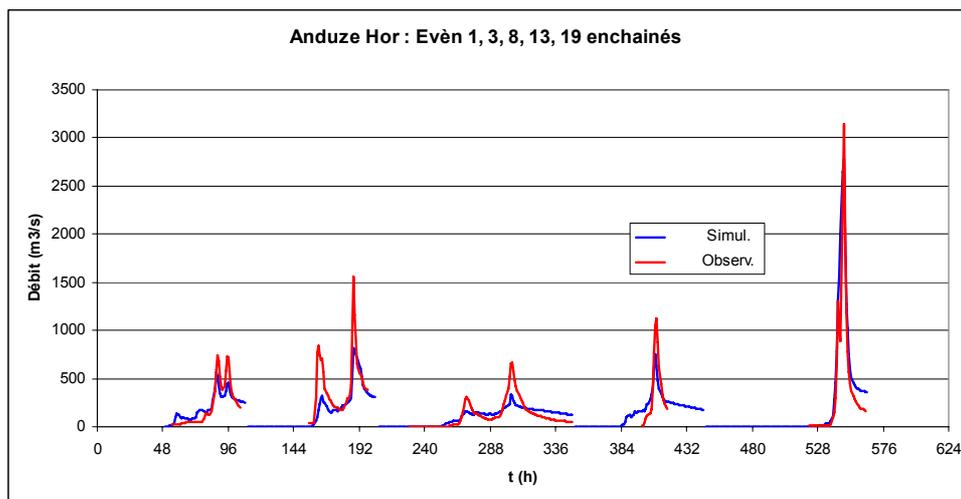


Illustration 10 : Bassin d'Anduze : Simulation enchainée des 5 crues de 1994 à 2002

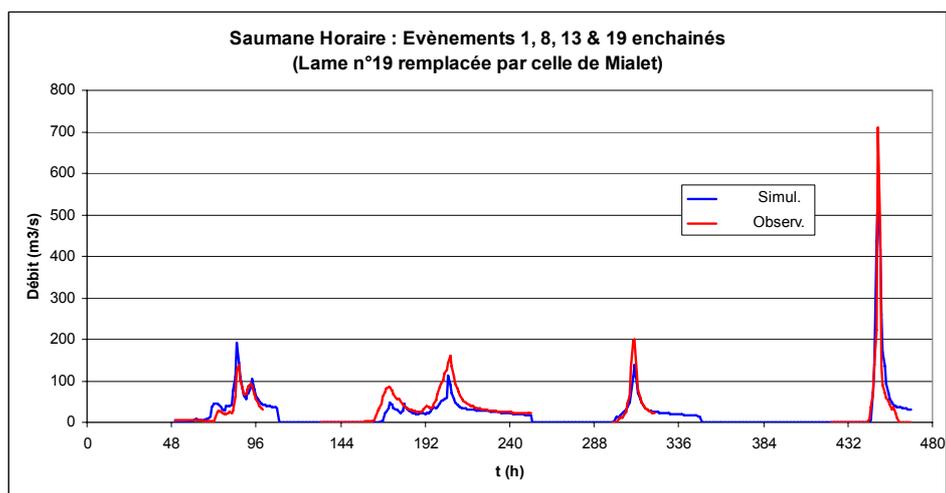


Illustration 11 : Bassin de Saumane : Simulation enchainée des 5 crues de 1994 à 2002

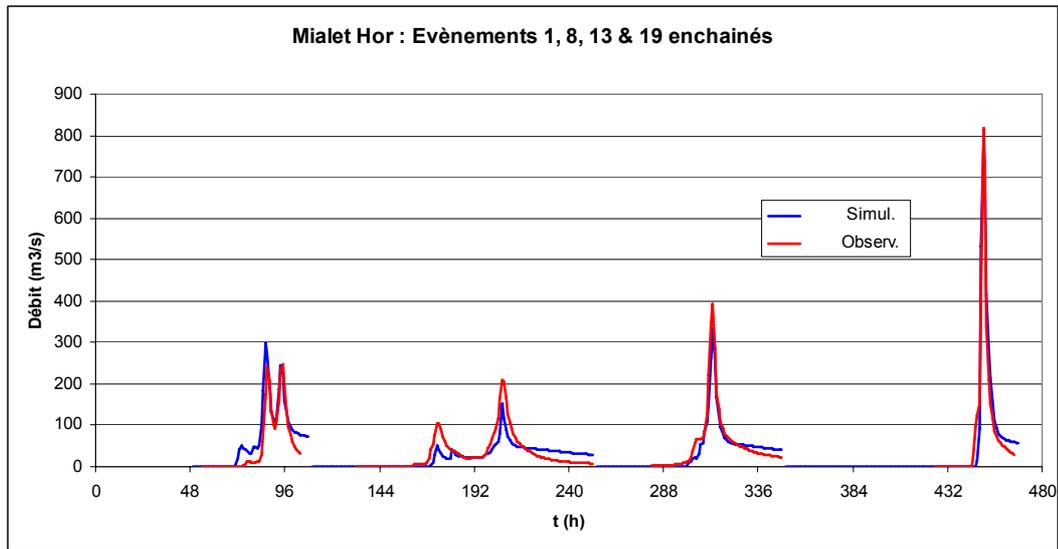


Illustration 12 : Bassin de Mialet : Simulation enchainée des 5 crues de 1994 à 2002

Ces cinq crues ont alors été modélisées en 2008 **en mode « Préviation »** avec le scénario de « Pluie future connue ». La modélisation a été réalisée en continu et on a examiné les performances pour une portée (profondeur de prévision) de 1 heure à 12 heures.

- **Bassin d'Anduze**

Portée	Coef_Réajus	Carré Correl/Persist	Ecart-Type Err_Prévis
(h)	(-)	(-)	m ³ /s
1	1	0.669	99.4
2	1	0.737	121
3	1	0.775	130.1
4	1	0.801	134.8
5	1	0.821	138.2
6	1	0.833	141.2
9	1	0.852	148.4
12	1	0.858	152

Illustration 13 : Critères moyens de la prévision Gardénia pour différentes portées

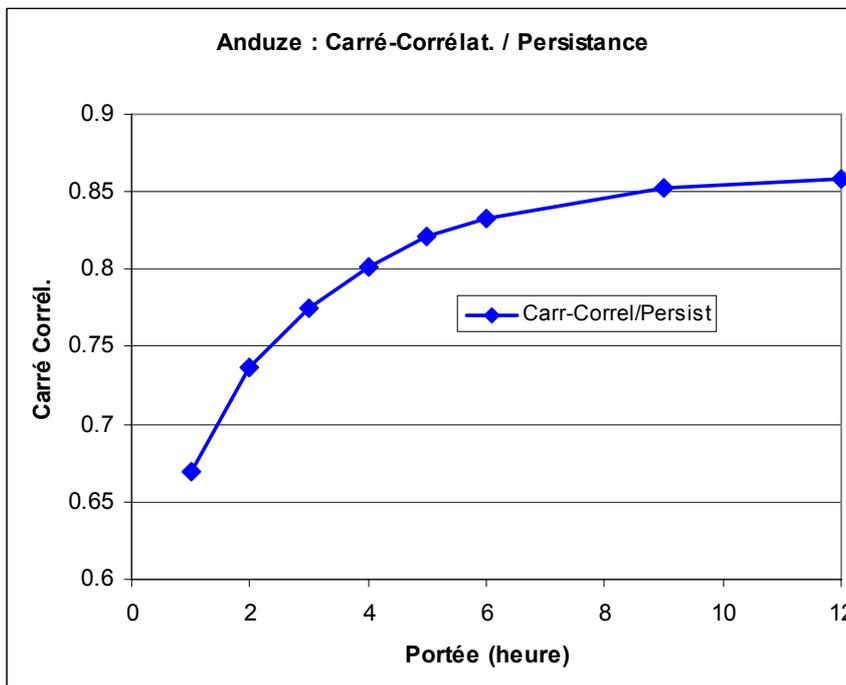


Illustration 14 : Préviation Gardénia : Carré de la corrélation par rapport à la « persistance », c'est-à-dire par rapport à une « prévision naïve » à Anduze.

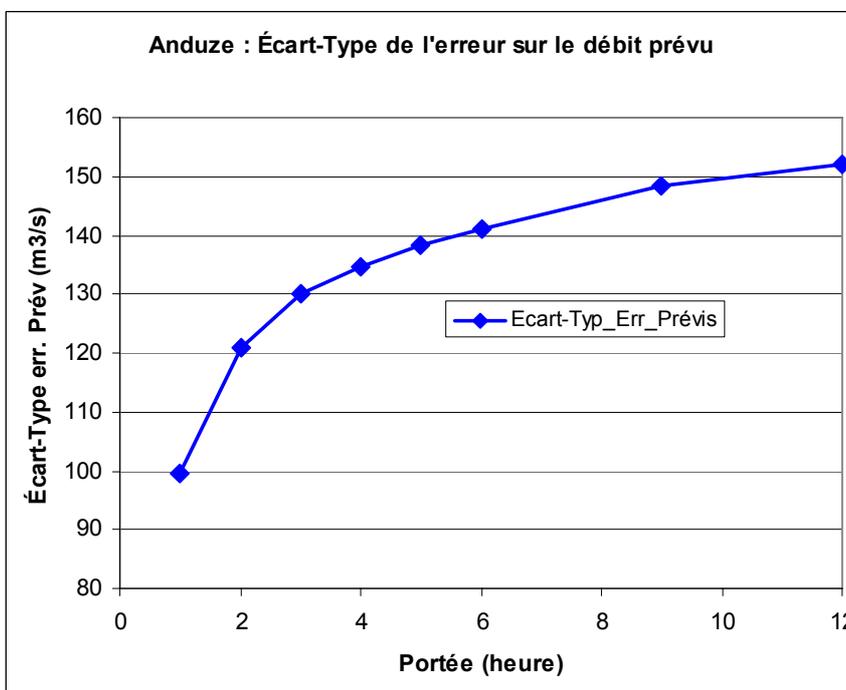


Illustration 15 : Préviation Gardénia : Erreur quadratique moyenne de prévision de débit pour différentes portées de prévision à Anduze

On remarque que l'écart-type de l'erreur augmente avec la portée de la prévision, ce qui est normal. Le coefficient de performance par rapport à une « prévision naïve » augmente cependant avec la portée, car la prévision naïve est d'autant plus mauvaise que la portée est grande.

Le coefficient R^2 de performance par rapport à une « prévision naïve » (persistance) est défini comme suit :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Q_{\text{Prévu_futur}} - Q_{\text{obs_Futur}})^2}{\sum(Q_{\text{obs_futur}} - Q_{\text{obs_Futur}})^2}.$$

Ce coefficient est :

- Égal à 1 : Pour une prévision parfaite.
- Égal à 0 : Pour une prévision naïve définie par $Q_{\text{sim_futur}} = Q_{\text{obs_Futur}}$.
- Inférieur à 0 : Pour une prévision moins bonne que la prévision naïve.

N.B. Pour chaque portée, le critère ne s'applique pas uniquement au débit prévu h heures après la date d'émission, mais à l'ensemble des débits prévus pour les h heures suivant l'émission de la prévision.

• **Bassin de Saumane**

Portée	Coef_Réajus	Carré Correl/Persist	Ecart-Type Err_Prévis
(h)	(-)	(-)	m ³ /s
1	0.38	0.68	25.3
2	0.44	0.80	25.2
3	0.46	0.84	25.4
4	0.52	0.862	25.4
5	0.58	0.876	25.4
6	0.64	0.885	25.4
9	0.64	0.896	25.8
12	0.6	0.899	26.2

Illustration 16 : Saumane : Critères moyens de la prévision Gardénia pour différentes portées

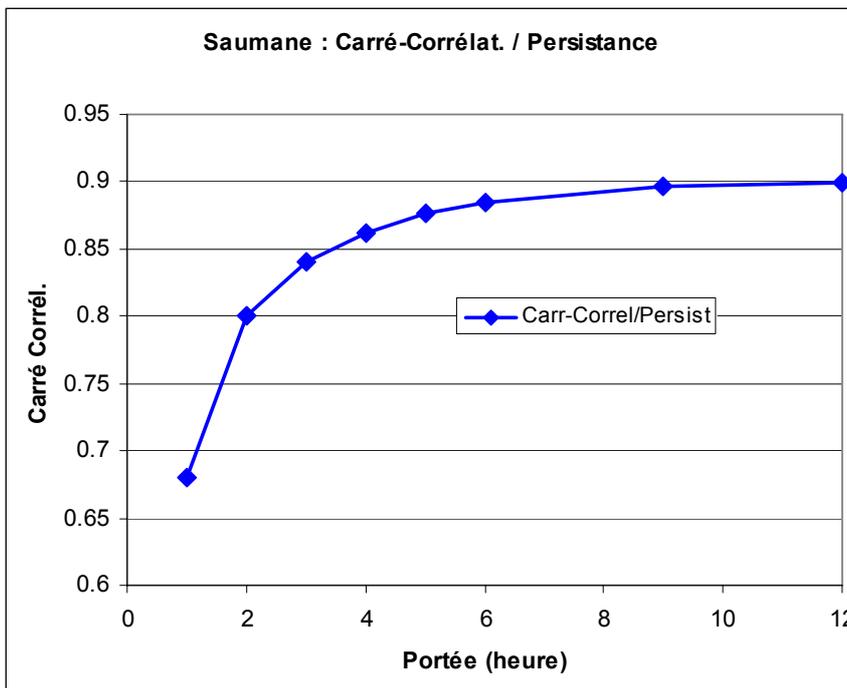


Illustration 17 : Prévission Gardénia : Carré de la corrélation par rapport à la « persistence », c'est-à-dire par rapport à une prévision naïve à Saumane.

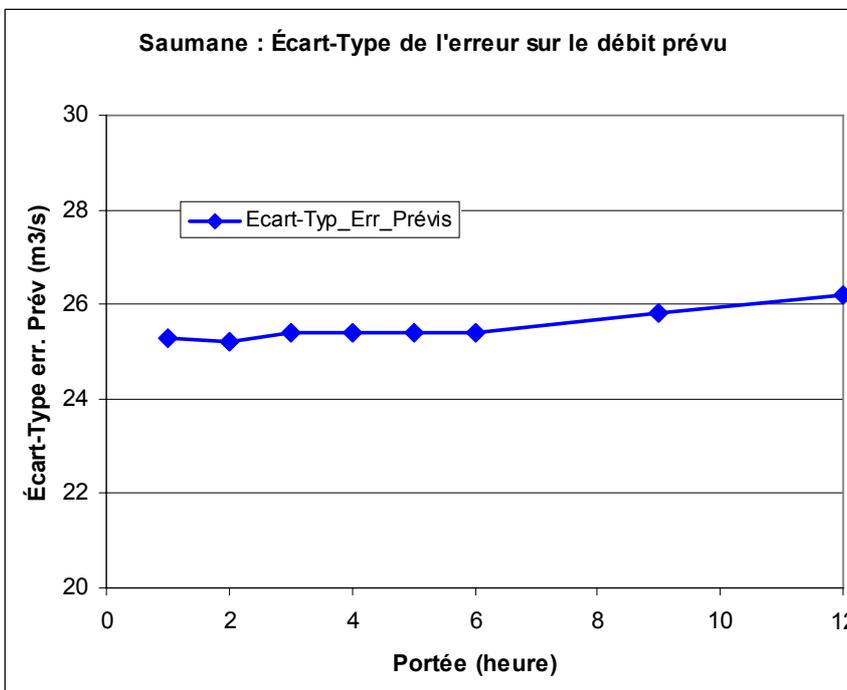


Illustration 18 : Prévission Gardénia : Erreur quadratique moyenne de prévision de débit pour différentes portées de prévision à Saumane.

- **Bassin de Mialet**

Portée	Coef_Réajus	Carré Correl/Persist	Ecart-Type Err_Prévis
(h)	(-)	(-)	m ³ /s
1	1	0.812	19.17
2	1	0.869	22.44
3	0.32	0.901	23.24
4	0.34	0.92	23.38
5	0.44	0.93	23.46
6	0.44	0.936	23.67
9	0.44	0.942	24.33
12	0.44	0.945	24.84

Illustration 19 : Mialet : Critères moyens de la prévision Gardénia pour différentes portées

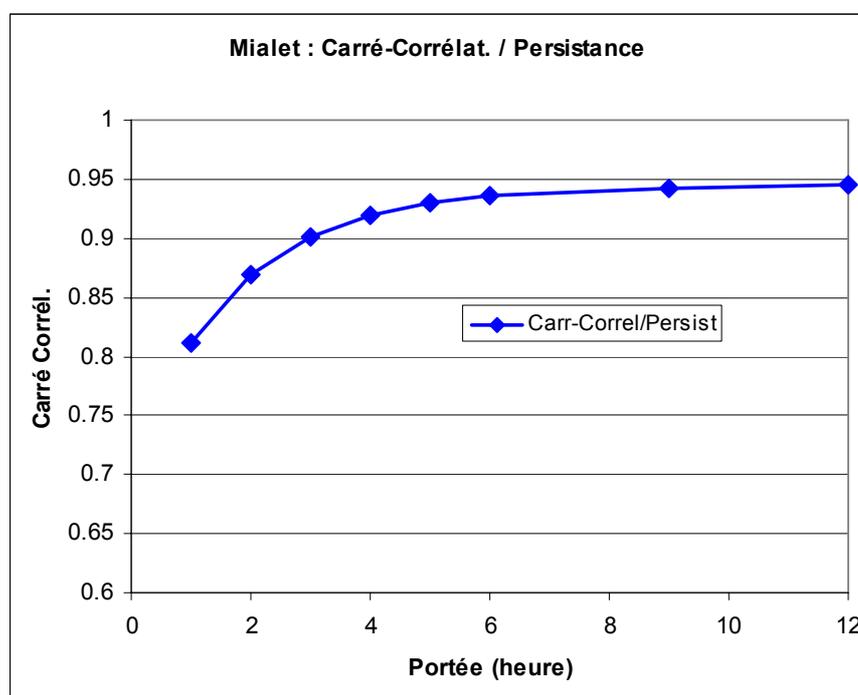


Illustration 20 : Prévision Gardénia : Carré de la corrélation par rapport à la « persistance », c'est-à-dire par rapport à une prévision naïve à Mialet.

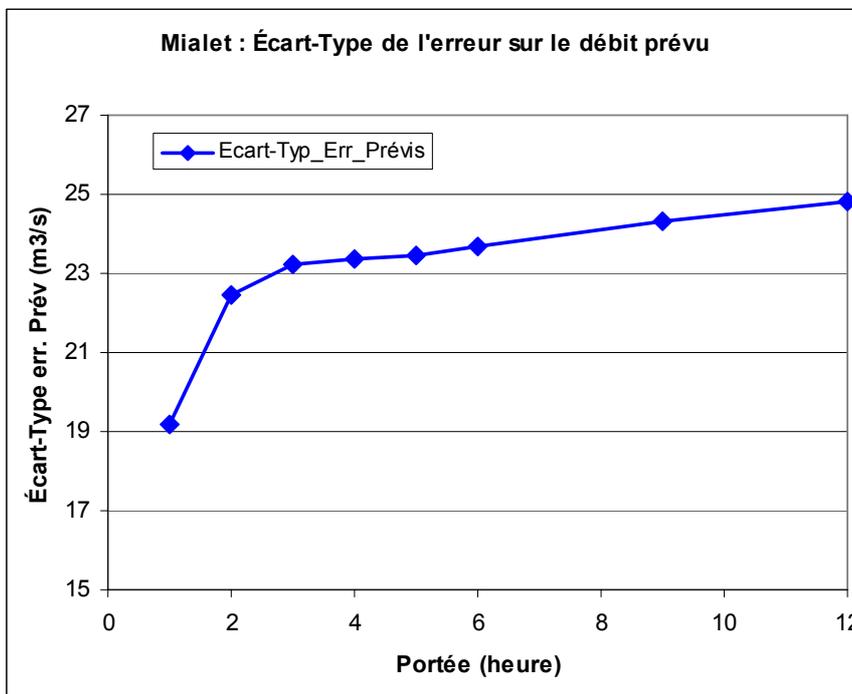


Illustration 21 : Prédiction Gardénia : Erreur quadratique moyenne de prévision de débit pour différentes portées de prévision à Mialet.

L'analyse des résultats montre que les premiers résultats en prévisions sont satisfaisant puisque les critères de performance moyens (carrés des coefficients de corrélation par rapport à une simple persistance) sont largement supérieurs à 0. Ils varient en effet de 0.7 à 0.9.

Simulation des crues de 2002 et 2006 au pas de temps de 5 mn

Les fortes crues de 2002 et 2006 ont modélisées indépendamment au pas de temps de 5 mn, qui est le pas de temps le plus fin disponible, à partir des lames d'eau radar. les résultats obtenus sont présentés dans les Illustration 22, Illustration 23 et Illustration 24.

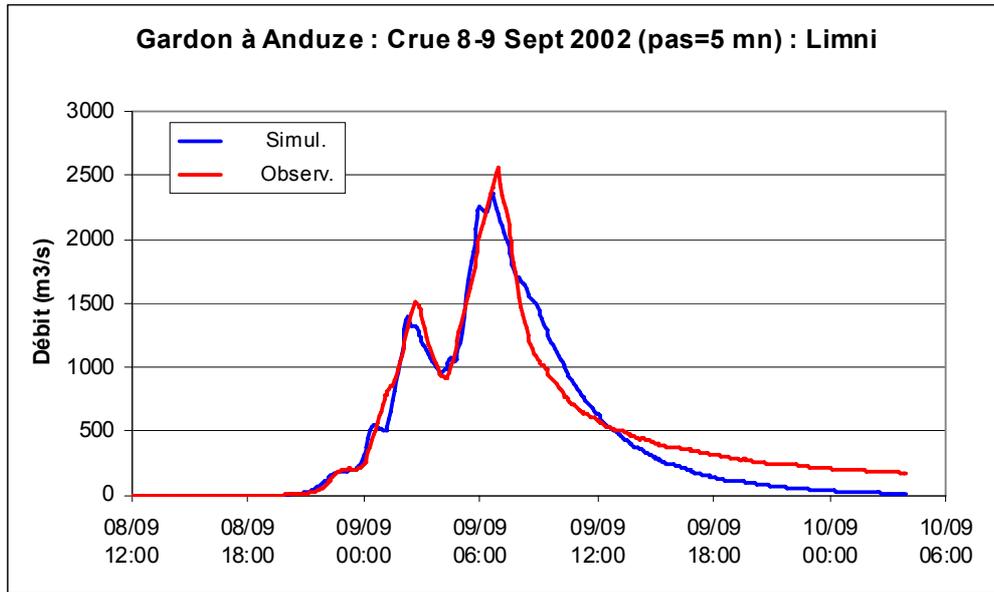


Illustration 22 : Simulation des débits de la crue de Septembre 2002 à Anduze à partir du pluviogramme à Anduze au pas de temps de 5 mn.

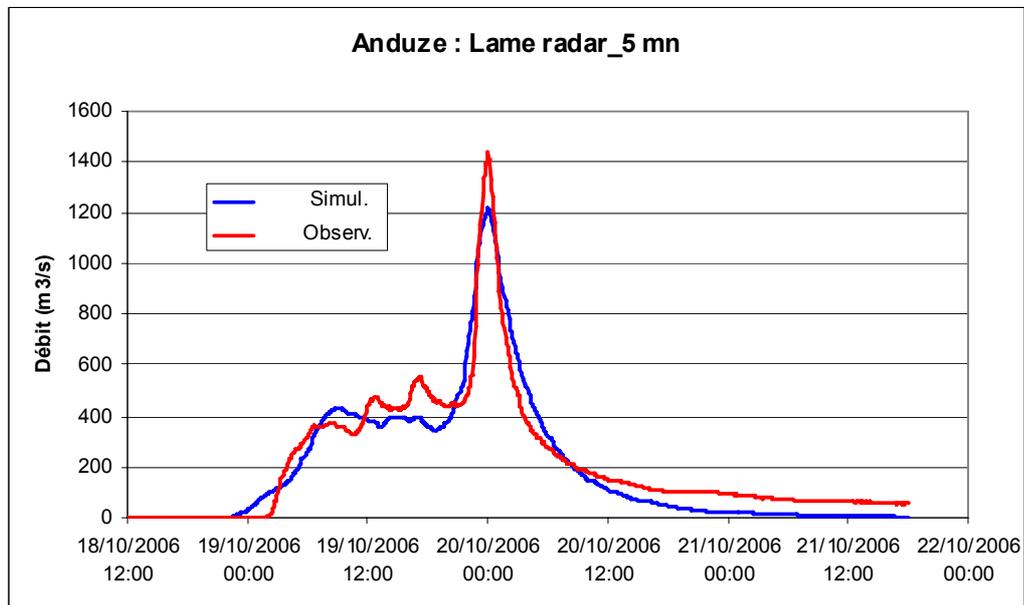


Illustration 23 : Simulation des débits de la crue d'Octobre 2006 à Anduze à partir de la lame d'eau radar au pas de temps de 5 mn.

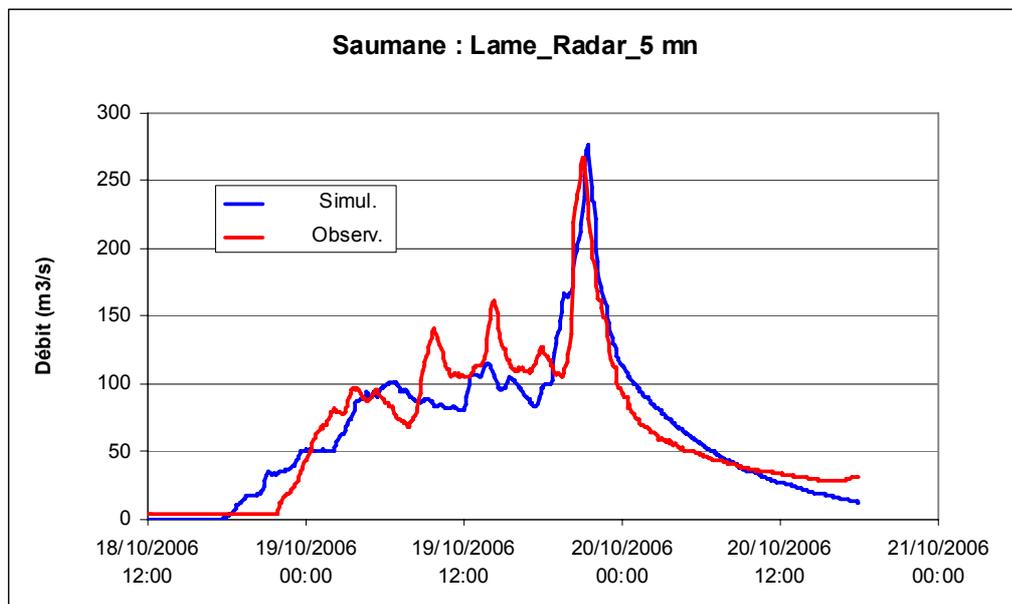


Illustration 24 : Simulation des débits de la crue d'Octobre 2006 à Saumane à partir de la lame d'eau radar au pas de temps de 5 mn.

Ces simulations au pas de temps de 5 minutes sont correctes, cependant il apparaît que les données doivent être vérifiées : La courbe de tarage à utiliser pour calculer les débits à partir des hauteurs doit être arrêtée définitivement (par exemple le pic de crue au pas horaire à Anduze en Septembre 2002 est de 3100 m³/s, alors que les données au pas de 5 mn présentent un pic de 2500 m³/s). Par ailleurs les identificateurs des stations et des lames d'eau radar devront être vérifiées car des irrégularités ont été détectées.

2.2. BASSIN VERSANT DU TOUCH

Le bassin versant du Touch est suivi depuis plusieurs années lors d'études réalisées par l'Ecole Supérieure d'Agriculture de Purpan (ESAP) dans un premier temps, puis par l'ESAP et le BRGM dans le cadre d'une étude avec le CNES (APIBAR) visant à étudier l'intérêt de l'apport des données spatiales pour la modélisation hydrologique.

Depuis 2005, il fait partie de la stratégie du SCHAPI, non pas comme BVNE, mais comme bassin expérimental.

L'état de saturation des sols constitue un élément incontournable dans la prévision des crues, comme ont pu le démontrer les événements des 6-7 puis 8-9 septembre 2005 sur Nîmes. Connaître ce paramètre et valider son importance doit permettre in fine de l'intégrer dans les modèles de prévision de crue, afin d'accroître leur précision.

Deux parcelles expérimentales ont ainsi été instrumentées en janvier 2006 afin de suivre en continu l'état de saturation des sols en surface mais aussi pour des niveaux plus profonds jusque 80-100 cm. Elles se trouvent dans la partie amont et aval du bassin dit "réservoir", d'une taille d'environ 40 ha. Les sols rencontrés sur ces 2 parcelles sont légèrement différents. La parcelle Retenue est légèrement plus argileuse que celle de Souléris notamment en surface (jusque 25 cm) mais aussi pour les niveaux les plus profonds. Les deux sites présentent des traces d'hydromorphie laissant supposer qu'ils sont saturés une partie de l'année et que l'infiltration peut y être lente. La DIREN a quant à elle équipé le site d'un limnigraphe pour en mesurer les flux d'eau sortant par ruissellement.

Pour être représentatif des conditions locales, les parcelles étudiées sont des parcelles cultivées. Lors des saisons culturales 2006-2007 et 2007-2008, la parcelle Retenue était semée en colza et en blé, respectivement. La parcelle « Souléris » était cultivée en blé en 2006 ; après la récolte 2006, la parcelle a été reconvertie en une prairie destinée au pacage des chevaux.

Le déclenchement du ruissellement peut être évalué (i) à partir des chroniques mesurées sur les sites (ii) à partir de simulations (iii) ou à l'aide de modélisations intégrant différentes hypothèses de changement de pratiques culturales.

Il convient alors de voir comment accéder à cet indicateur « humidité » en opérationnel. L'interprétation des données d'humidité des sols, tensiométriques et de débit (donc de ruissellement) devrait également permettre de caractériser le fonctionnement de ces types de sol et éventuellement de voir quels sont les moments les plus critiques par rapport au ruissellement.

2.2.1. Suivi tensiométrique

Principes et rappels

Afin de caractériser le transit de l'eau et notamment de déterminer les sens d'écoulement dans le sol, les parcelles ont été équipées de cannes tensiométriques SMS placées à des profondeurs comparables à celles des TDR.

Les tensiomètres sont équipés de capteurs de pression électroniques reliés à une station d'acquisition automatique permettant un suivi fin, au pas de temps horaire.

La dynamique de l'eau est gouvernée par la combinaison d'un ensemble de forces auxquelles l'eau est soumise (capillarité, gravité..). Le potentiel total s'exprime de la manière suivante :

$$\Phi_t = \Phi_p + \Phi_g + \Phi_c$$

Avec

Φ_t = potentiel total (J/mol)

Φ_p = potentiel de pression (J/mol)

Φ_g = potentiel de gravité (J/mol)

Φ_c = potentiel chimique (J/mol)

Lorsque le potentiel de pression prend une valeur négative, on parle de potentiel matriciel qui résulte des forces de capillarité ou d'adsorption exercées par la matrice solide. Ce terme prenant des valeurs négatives, le terme de succion a été introduit ; elle correspond à la valeur absolue du potentiel matriciel. Lorsque la teneur en eau d'un sol diminue, la succion augmente c'est-à-dire que le potentiel matriciel diminue.

Lorsque le potentiel de pression prend des valeurs positives en un point de mesure, cela signifie que ce point est situé sous une surface d'eau libre. Le potentiel de pression correspond alors au potentiel hydrostatique encore appelé potentiel de submersion. La valeur de potentiel est équivalente à la hauteur de la colonne d'eau située au dessus du point de mesure.

L'instrumentation réalisée

Instrumentée initialement en janvier 2006 (rapport BRGM/RP-54683-FR), des problèmes techniques ont été observés durant la première année de suivi et ont conduit à une réinstallation. En fin d'année 2006, il a ainsi été décidé de désinstaller le matériel en place sur les deux parcelles afin de resaturer les bougies poreuses en laboratoire. En effet, en raison d'épisodes secs prolongés durant le printemps et l'été, la plupart des tensiomètres avaient décroché, c'est-à-dire que la succion existante dans le milieu était plus importante que la gamme de mesures des capteurs. Une fois le conditionnement en laboratoire effectué (saturation en eau de la céramique poreuse, rapport BRGM/RP-54683-FR) et après avoir réglé un certain nombre de problèmes de

calibration et de connectiques observés lors de la première année du suivi, les cannes ont été réinstallées sur site début janvier 2007.

Respectivement, treize et sept tensiomètres, ont été installés sur les parcelles Retenue et Souléris à proximité des 3 fosses où sont implantées les sondes TDR (rapport BRGM/RP-54683-FR). Les différentes profondeurs caractérisées par ces appareillages sont récapitulées dans l'illustration 25.

De janvier 2007 à juillet 2008, une visite à une fréquence approximativement mensuelle a été effectuée (journal des visites en annexe 2). En période de déficit hydrique et lorsque que la succion devenait importante, les tensiomètres ont été resaturés in situ.

Profondeur (cm)	Nombre de tensiomètres	
	Retenue	Souléris
20	2	2
40	3	2
60	2	2
80	4	2
100	2	/

Illustration 25 : Nombre de tensiomètres installés sur chacune des 2 parcelles

Chroniques tensiométriques obtenues entre janvier 2007 et juillet 2008

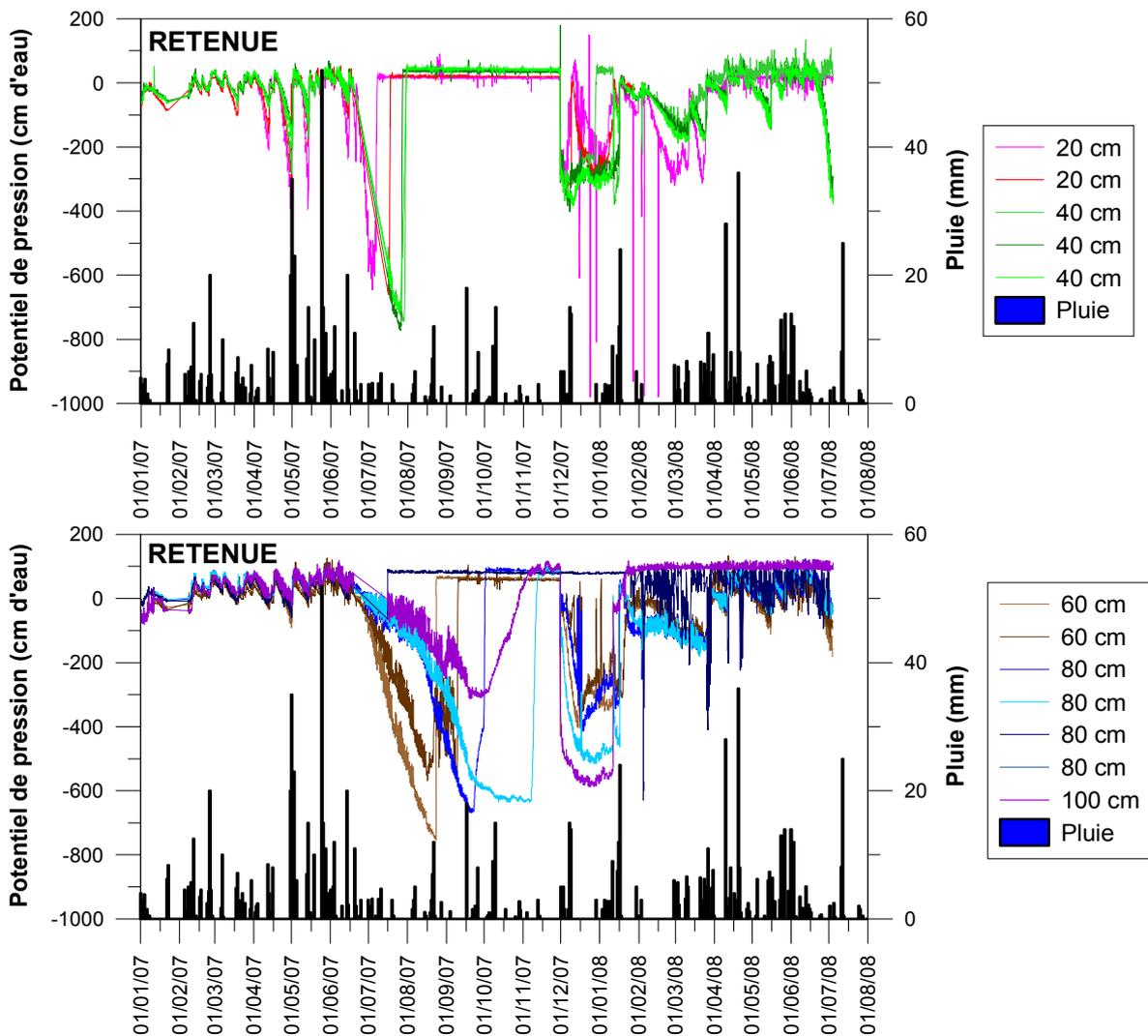


Illustration 26 : Données brutes de potentiel total enregistrées à 20, 40, 60, 80 et 100 cm sur la parcelle Retenue (les données de pluie sont celles mesurées par Météofrance au site de Labastidette)

Sur le site de la Retenue, on constate que pendant la période d'acquisition des données (janvier 2007 à juillet 2008), tous les tensiomètres ont des valeurs de potentiel de pression élevées signifiant que les teneurs en eau des différents horizons de sol sont proches de la saturation. Pendant l'été 2007, des valeurs de succion importantes sont observées (potentiel de pression fortement négatif) d'abord dans les horizons plus superficiels et enfin les horizons plus profonds. Les succions redeviennent faibles à

partir globalement du mois d'octobre mais une seconde période de succions plus importantes est également observée en novembre-décembre 2007. En mars et avril 2008, les horizons de surface montrent que la succion augmente vraisemblablement en relation avec la reprise de la végétation et donc une augmentation de la transpiration. A la fin du suivi (juin 2008), les potentiels diminuent fortement en relation probablement avec une augmentation de l'évapotranspiration.

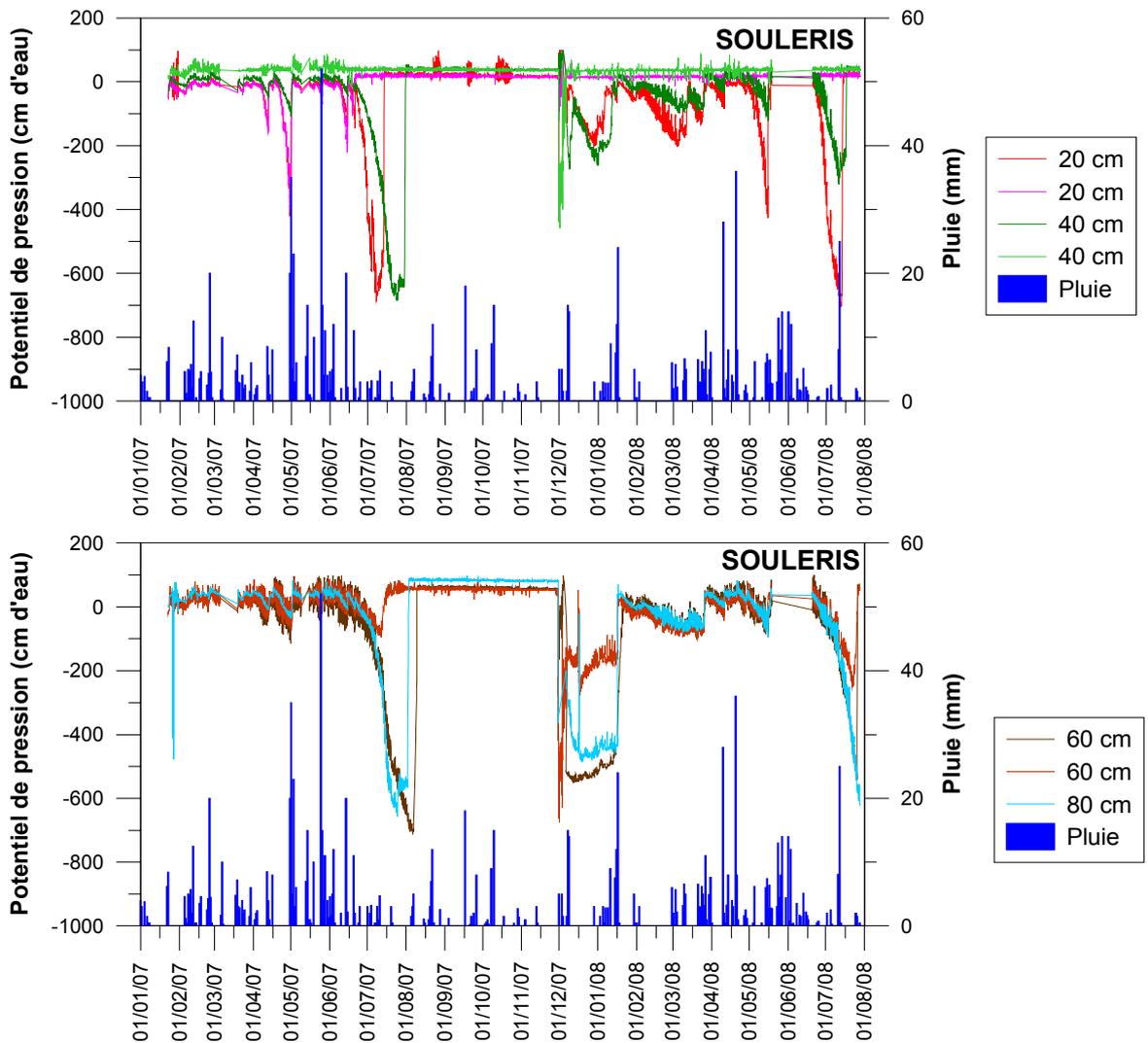


Illustration 27 : Données brutes de potentiel total enregistrées à 20, 40, 60 et 80 cm sur la parcelle Souleris (les données de pluie sont celles mesurées par Météofrance au site de Labastidette)

Concernant la parcelle Souléris, les périodes de succion importantes notées pour les différents horizons concernent les mois de juillet et août 2007, décembre 2007 et janvier 2008 et une nouvelle période semble s'amorcer en fin de suivi (juillet 2008). En période estivale, l'augmentation de l'évapotranspiration explique vraisemblablement l'accroissement de la succion. La baisse des potentiels de pression en décembre 2007 résulte probablement de faible pluviosité des mois d'octobre et novembre (et décembre) et peut être d'une demande évaporatoire liée à la prairie si les températures n'étaient pas trop négatives.

Pour les 2 parcelles, les paliers observés pour tous les tensiomètres entre août et décembre 2007 sont surprenants et ne semblent pas correspondre à une réalité physique (pas d'augmentation de la succion alors que les précipitations sont limitées). A partir de décembre 2007, les fluctuations observées sont plus plausibles et en cohérence avec les données pluviométriques. Aucune intervention spécifique n'ayant été réalisée, aucune explication ne peut être avancée pour expliquer l'absence de variations entre août et décembre.

D'une manière générale, on notera la bonne reproductivité des mesures effectuées par différents capteurs placés à la même profondeur pour une parcelle donnée. Toutefois de nombreuses mesures aberrantes apparaissent ponctuellement et semble t'il aléatoirement avec parfois de très fortes fluctuations d'une mesure à une autre ressemblant plus à un artéfact qu'à une réalité physique.

2.2.2. Suivi de la teneur en eau volumique dans les sols

Principes et rappel

Les mesures TDR (Time Domain Reflectometry ou réflectométrie dans le domaine temporel) permettent d'estimer la teneur en eau volumique des sols. L'appareil TDR est un oscilloscope numérique couplé à un générateur d'impulsions, relié via un câble coaxial et une tête de raccordement à une ligne de transmission de longueur variable, qui constitue ce qu'on appelle la sonde.

Le principe de la mesure de la teneur en eau volumique, similaire à celui des sondes capacitatives, est basé sur le contraste de permittivité électrique apparente du milieu. Il ne s'agit pas de mesurer la capacité du sol mais la vitesse de propagation de l'impulsion électrique dans le sol qui est tributaire de l'état de saturation du milieu.

Il s'agit d'une technique relativement ancienne puisque les travaux nécessaires pour développer le concept de TDR ont été menés au début des années 1970.

La calibration des sondes TDR devrait être réalisée pour chaque sol, mais dans de nombreux cas, les utilisateurs s'abstiennent d'effectuer cette opération et utilisent la relation polynomiale de Topp pour convertir la permittivité en teneur en eau. Il s'agit d'une relation souvent considérée comme universelle. Toutefois certains auteurs ont mis en évidence des limites d'utilisation (sols riches en argile et/ou en matière organique, Influence de la structure, de la porosité, de la température).

L'instrumentation

Les deux parcelles Retenue et Souléris ont été instrumentées en janvier 2006 (BRGM/RP-54683-FR) et désinstallées en juin et juillet 2008, respectivement. Les sondes TDR ont donc été installées pour toute la durée du suivi et n'ont pas été déplacées. Seules les sondes de surface ont été retirées et réimplantées pour permettre le travail du sol par l'agriculteur. Ensuite, il a été préféré de laisser le dispositif en place et de faire le travail cultural à la main, l'agriculteur contournant le matériel. De cette façon, les potentiels artefacts de mesure liés à la déstructuration du sol lors de l'installation des sondes ne sont à craindre que pour les premiers mois de suivi. A l'inverse, le matériel étant installé "à demeure", le dysfonctionnement d'une sonde ne peut que être constaté et celle-ci ne peut pas être aisément remplacée. Ce type de crainte justifiait que les sondes soient installées en triplicats pour palier aux éventuelles défaillances techniques.

Les chroniques de teneur en eau volumiques

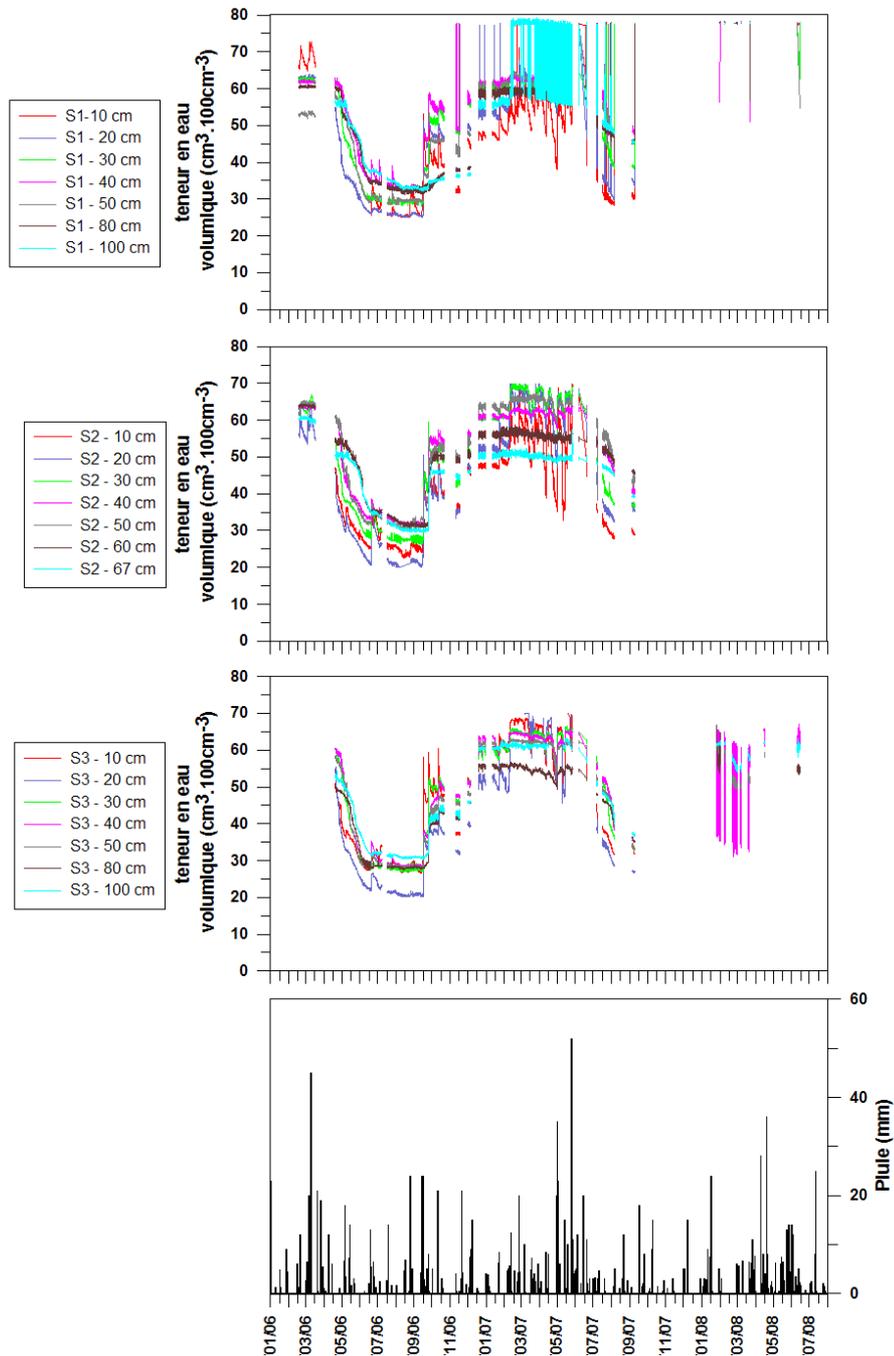


Illustration 28 : Evolution des teneurs en eau volumique à différentes profondeurs dans les 3 fosses de la parcelle Souleris. Les pluies présentées sont mesurées par Météofrance au site Labastidette

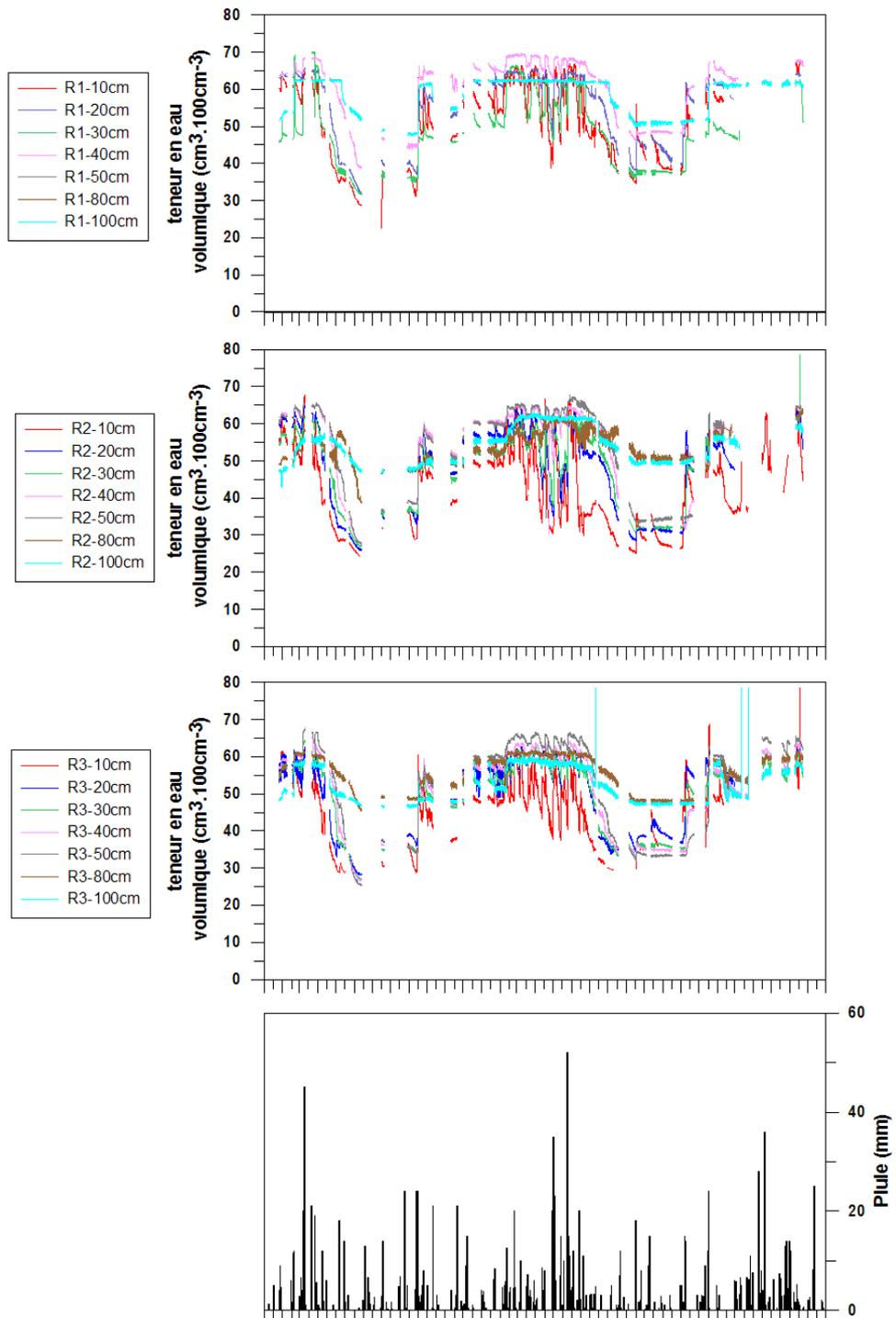


Illustration 29 : Evolution des teneurs en eau volumique à différentes profondeurs dans les 3 fosses de la parcelle Retenue. Les pluies présentées sont mesurées par Météofrance au site Labastidette

L'illustration 28 permet de visualiser l'évolution des teneurs en eau volumiques à différentes profondeurs sur le site de Souléris. Bien que la fréquence de passages sur le terrain ait été élevée de nombreuses défaillances techniques, d'origine inconnue, ont conduit à une acquisition très discontinue. Aucune interprétation ne peut donc être réalisée pour l'année 2008. Pour ce qui concerne les données précédentes, il est possible de se référer au rapport BRGM/RP- 55869-FR.

Pour le site de Retenue, l'acquisition des données a été moins problématique que sur la parcelle Souléris même si quelques défaillances sont quand même à souligner.

Alors que les teneurs en eau restent élevées une grande partie de l'année, en accord avec les données tensiométriques, deux périodes avec une diminution notable des teneurs en eau sont observées entre avril et septembre 2006 et entre juillet et décembre 2007. La période d'assèchement des sols a donc été plus tardive en 2007 qu'en 2006 vraisemblablement à cause des précipitations importantes de mai et juin 2007 ; cette période d'assèchement a également été un peu plus longue.

Les sondes de surface (10 cm) réagissent bien aux précipitations de l'été 2007 avec des valeurs proches de la saturation en relation avec les épisodes pluvieux puis une succion qui augmente dans des périodes sans pluie. Les fluctuations sont ensuite tamponnées avec la profondeur avec des fluctuations de plus grande amplitude pour les sondes placées à 100 cm de profondeur.

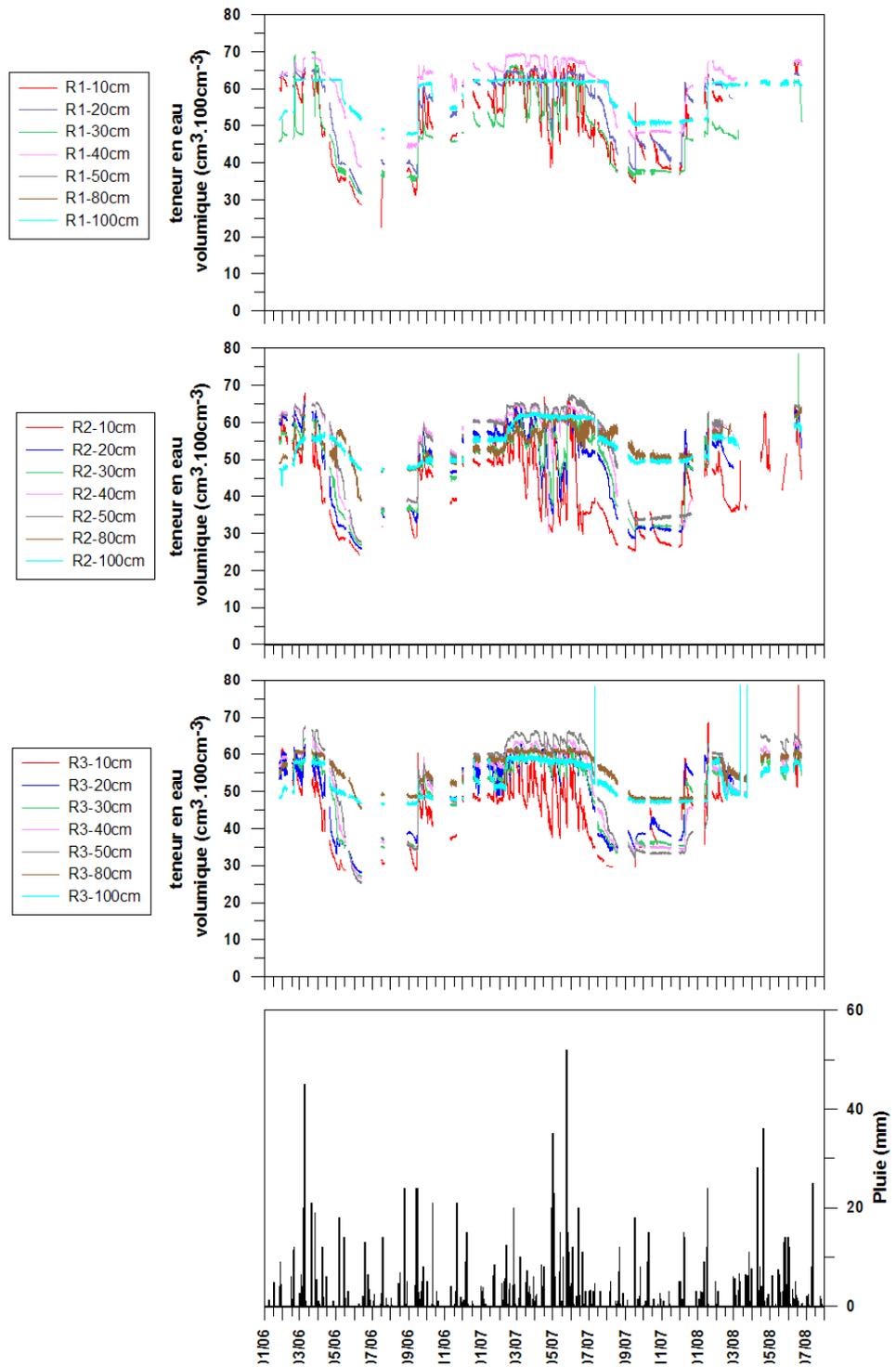


Illustration 30 : Evolution des teneurs en eau volumique à différentes profondeurs dans les 3 fosses de la parcelle Retenue. Les pluies présentées sont mesurées par Météofrance au site Labastidette

2.2.3. Teneurs en eau pondérale

Depuis fin 2006, des mesures d'humidité pondérale sont effectuées à une fréquence environ mensuelle par horizon de 10 cm d'épaisseur jusque 50 cm de profondeur, les prélèvements au-delà de cette profondeur étant particulièrement difficiles du fait de l'existence d'un niveau compact. Les mesures en laboratoire (pesée avant et après séchage à 105°C) sont réalisées au laboratoire 2GH.

L'acquisition de telles données est destinée à compléter les chroniques TDR et notamment d'en permettre la calibration et la validation des données. Les résultats obtenus depuis 2006 sont présentés dans l'illustration 31.

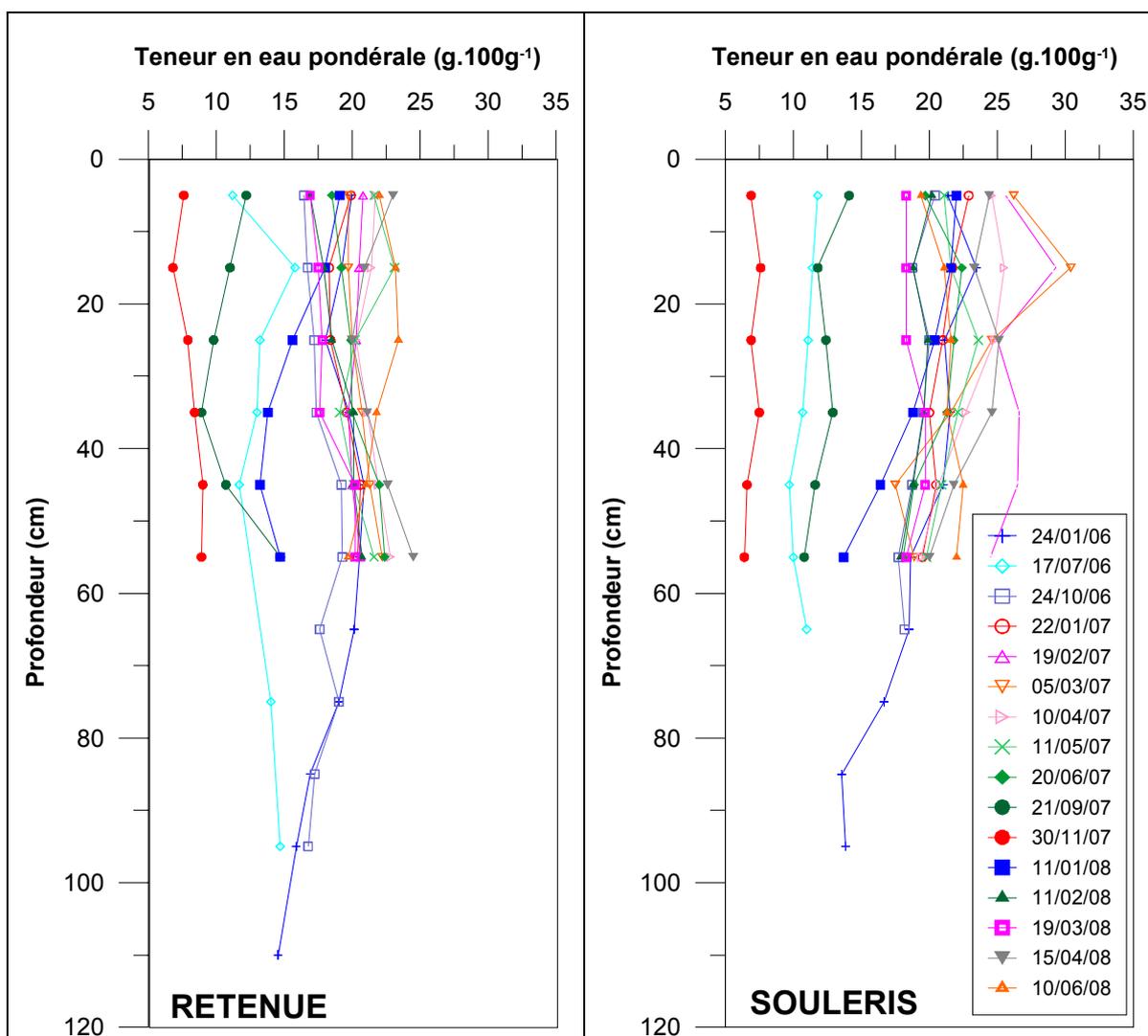


Illustration 31 : Evolutions au cours du temps des teneurs en eau pondérale pour les sites de Retenue et Souleris

Ce sont 16 campagnes qui ont été réalisées à différentes périodes de l'année de manière à essayer d'obtenir la gamme de valeur la plus large possible allant des états proches de la saturation à des périodes de déficit hydrique prolongé.

Pour chacun des sites, bien que les campagnes de prélèvement aient été réalisées tout au long de l'année, les gammes de valeurs sont assez restreintes à l'exception des données de juillet 2006, septembre 2007, novembre 2007 et dans une moindre mesure janvier 2008 pour lesquelles les valeurs mesurées sont plus basses que pour les autres dates. Quelle que soit la date, les variations de teneurs en eau sont limitées sur l'ensemble du profil jusqu'à 50 cm de profondeur.

Comparaison des teneurs en eau volumique et pondérale

Le passage d'une humidité pondérale à une humidité volumique s'effectue à l'aide de la densité apparente du sol. En l'absence de mesures de densité, la représentation de la teneur en eau volumique vs. teneur en eau pondérale permet de définir une relation entre les 2 grandeurs, relation qui devrait être constante au cours du temps si la densité ne change pas. Cette hypothèse est sujette à caution pour les horizons les plus proches de la surface pour lesquels le travail du sol, les précipitations etc. peuvent modifier les états de surface et par conséquent la densité.

L'illustration 32 et l'illustration 33 permettent de visualiser les relations entre les teneurs en eau pondérale et volumique pour différentes profondeurs. Dans la mesure où la sonde TDR correspond à une mesure portant sur une sphère autour de sonde, sphère dont la taille dépend de la taille de la sonde mais aussi de la teneur en eau des sols, il est difficile de savoir avec précision quel est l'épaisseur de sol « échantillonné ». Lors des prélèvements de sol pour mesure d'humidité pondérale, les échantillons sont prélevés par tranche de 10 cm d'épaisseur (0-10, 10-20 etc.). Sur chaque graphe, le parti a donc été pris de comparer la teneur en eau volumique à 2 teneurs en eau pondérale correspondant à deux échantillons consécutifs. Par exemple, pour les 3 sondes TDR placées à 10 cm, la comparaison est faite avec les teneurs en eau pondérale de l'horizon 0-10 cm (séries rose, rouge et orange) et les teneurs en eau pondérale de l'horizon 10-20 cm (séries en bleu clair, foncé et très foncé).

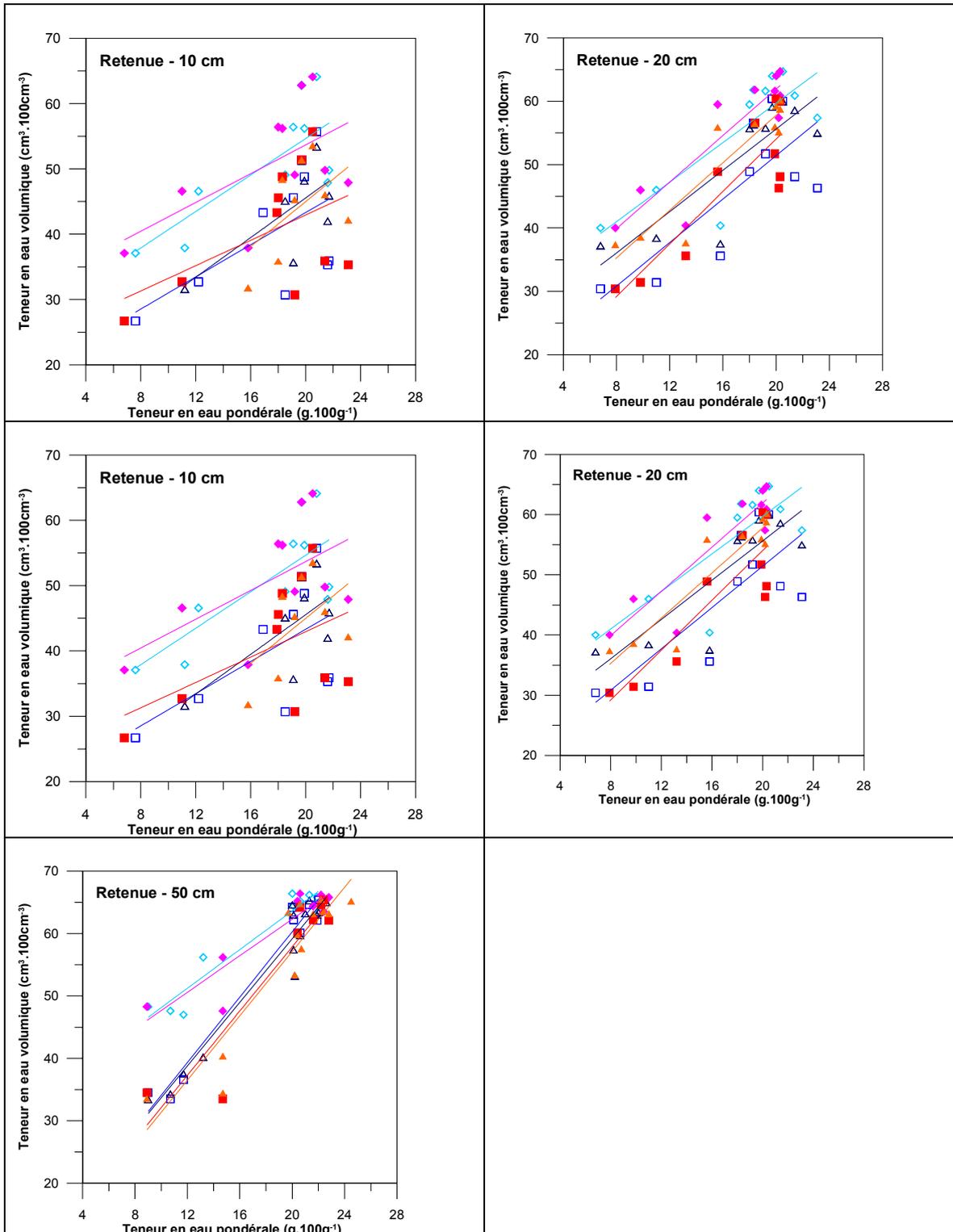
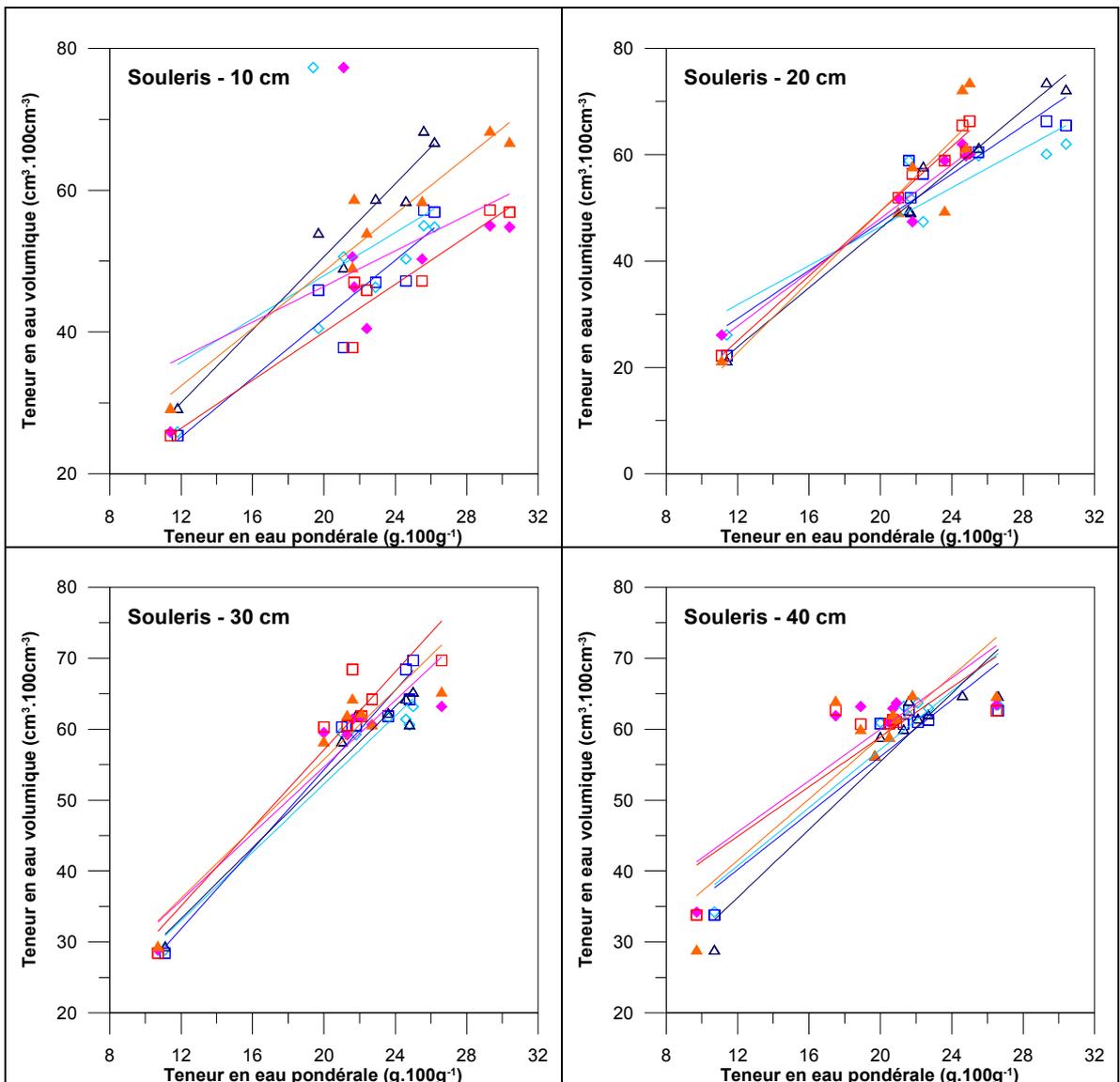


Illustration 32 : Teneurs en eau volumique (TDR) vs. teneurs en eau pondérale pour les différents horizons de la parcelle Retenue

Pour la parcelle Retenue, les teneurs en eau pondérales mesurées couvrent relativement bien la gamme de valeurs. Toutefois, il convient de noter que les données relatives aux fortes teneurs en eau sont beaucoup plus nombreuses que les données pour les faibles valeurs ce qui peut biaiser la corrélation. Pour l'horizon de surface, la corrélation entre les teneurs en eau pondérales et volumiques est peu satisfaisante par rapport aux autres horizons avec de fortes fluctuations pour les teneurs en eau les plus élevées. Ces écarts pourraient être liés à la variabilité de la densité apparente au cours du temps de l'horizon de surface. A 30, 40 et 50 cm de profondeur, les corrélations sont meilleures même si une des trois répétitions donne une corrélation différente des 2 autres.



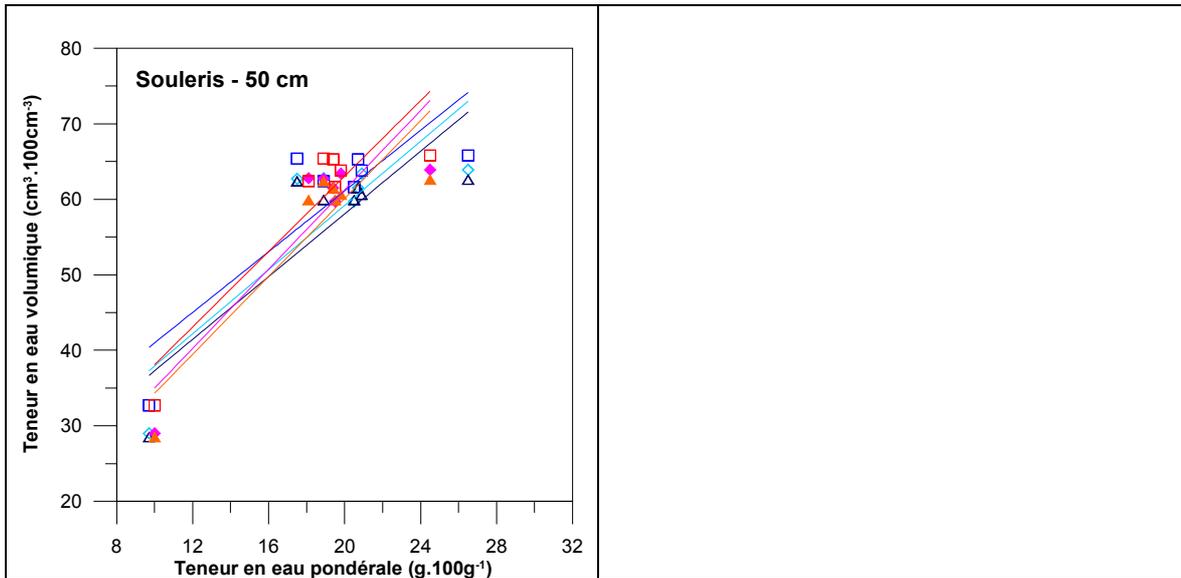


Illustration 33 : Teneurs en eau volumique (TDR) vs. teneurs en eau pondérale pour les différents horizons de la parcelle Souleris

Pour la parcelle Souleris, du fait de nombreux dysfonctionnements dans l'acquisition des données TDR, les couples teneur en eau volumique/teneur en eau pondérale sont moins nombreux que pour la parcelle Retenue. Des corrélations peuvent être établies mais doivent être prises avec prudence dans la mesure où les données relatives aux faibles teneurs en eau sont peu nombreuses et qu'il n'y a pas de données pour les valeurs intermédiaires. Comme pour la parcelle Retenue, l'horizon de surface est le plus problématique alors que les 4 horizons plus profonds donnent des résultats moins dispersés tant au niveau des 3 répétitions que des couples teneur en eau pondérale/teneur en eau volumique.

2.2.4. Mesures des débits et de la pluviométrie

Pour pallier aux lacunes de données engendrées par différents problèmes techniques, les données de pluie considérées sont celles obtenues pour la station météorologique de Labastidette gérée par MétéoFrance et qui est située sur le bassin du Touch.

Pour les débits, l'acquisition des hauteurs d'eau est effectuée au niveau du seuil de contrôle installé par la Diren en avril 2006 à partir d'un capteur de type ultra-son. Un retraitement important des données a été réalisé pour obtenir une chronique exploitable. En effet, le radar a été déplacé et recalé à plusieurs reprises changeant ainsi le niveau de référence. L'illustration 34 permet de visualiser les épisodes de ruissellement sur la période octobre 2006 à septembre 2008. Les épisodes de ruissellement sont relativement limités sur cette période. L'événement le plus important a été observé en juin 2007 consécutivement à plusieurs épisodes moins marqués qui se sont déroulés entre mars et fin mai. En 2008, les événements les plus significatifs ont également été observés au printemps globalement entre mars et juin.

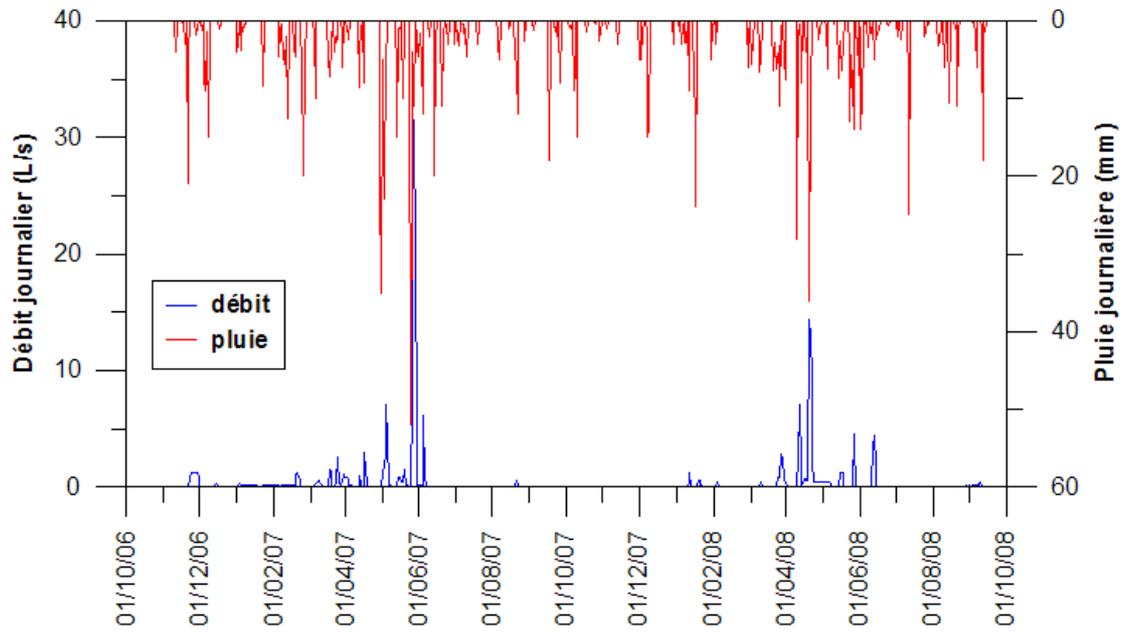


Illustration 34 : Evolution des débits journaliers enregistrés à la station de la DIREN Midi-Pyrénées entre octobre 2006 et septembre 2008 et précipitations journalières enregistrées à la station MétéoFrance de Labastidette.

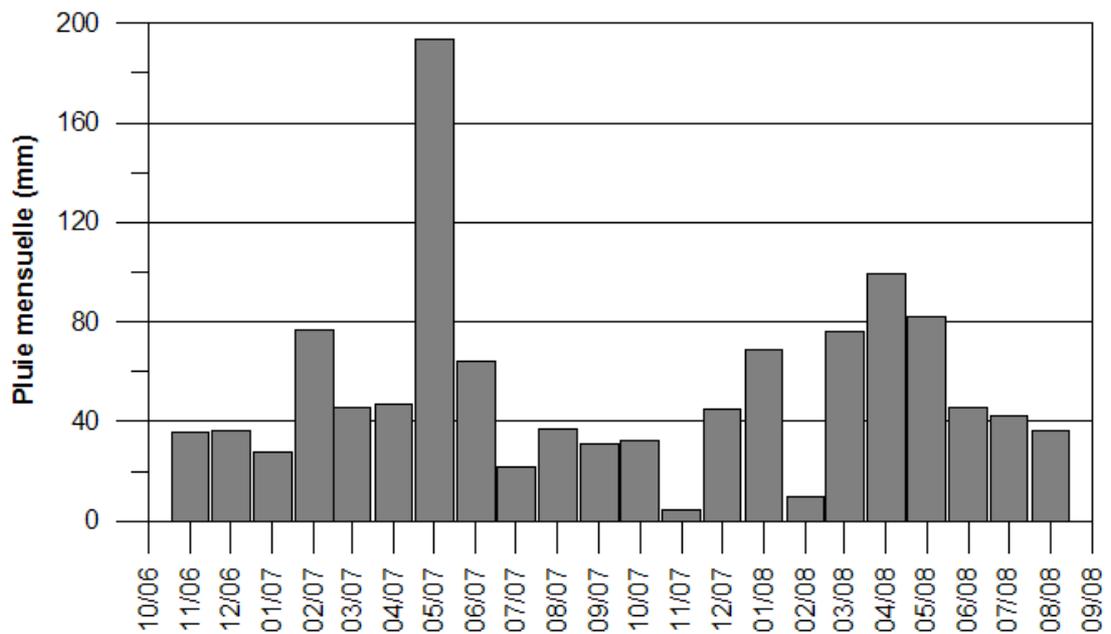


Illustration 35 : Pluies mensuelles observées à la station MétéoFrance de Labastidette

L'examen des pluies mensuelles montre très clairement que mai 2007 a été le mois le plus pluvieux, mois pour lequel le débit de ruissellement a été le plus important. Cet épisode important intervient après 3 mois relativement pluvieux. Alors que février 2007 a été fortement arrosé, les épisodes de ruissellement ont été limités tant dans le temps que en débit de ruissellement. En 2008, mars, avril et mai ont été les mois les plus pluvieux et ont généré des épisodes de ruissellement.

A titre indicatif parce qu'il est parfois difficile de séparer l'effet de plusieurs épisodes pluvieux assez rapprochés, la pluie tombée entre le 25 et le 29 mai 2007 correspondait à 82 mm et a généré un volume ruisselé d'environ 8132 m³. Entre le 10 et le 14 avril 2008, la pluie a été de 41.8 mm pour un volume ruisselé de 987 m³ et entre le 19 et le 23 avril 2008, pour une pluie équivalente (45 mm), le volume ruisselé a été de 3400 m³ soit plus de 3 fois supérieur. Malheureusement, les données TDR sont manquantes pour ces 2 dernières périodes et il n'est pas possible d'aller plus loin dans l'exploitation des données, mais il est très probable que le 1^{er} épisode d'avril 2008 ait contribué à resaturer (au moins partiellement les sols) ce qui a favorisé le ruissellement lors du 2^{eme} épisode qui s'est produit 5 jours après. Cette hypothèse semble tout à fait en accord avec les données tensiométriques.



Illustration 36 : Station de la DIREN Midi-Pyrénées lors de la visite de terrain du 24 avril 2008

2.2.5. Conclusion

Sur les 2 sites sur la période allant de janvier 2006 à juin-juillet 2008 (date de désinstallation), les dispositifs mis en place ont fonctionné de manière plus ou moins satisfaisante avec régulièrement des pannes conduisant à des lacunes de données sur des périodes plus ou moins longues et avec des périodes de retour plus ou moins rapprochées. Un travail d'épuration des données (quelques valeurs aberrantes pour les TDR ou encore des fluctuations à très court pas de temps pour les tensiomètres sans relation apparente avec la pluviométrie) reste à faire si une interprétation fine de différents épisodes est envisagée.

En revanche, lorsque les appareils ont fonctionné correctement, les données TDR et tensiométriques sont cohérentes. Les différents horizons restent saturés ou proches de la saturation une grande partie de l'année. Ces données sont confirmées par les mesures d'humidité pondérales effectuées très régulièrement. Ces faibles variations au cours de l'année rendent la calibration des données TDR par les humidités pondérales un peu délicate dans la mesure où il est difficile d'obtenir des couples de mesure répondant à toute la gamme observée. Toutefois, pour le site de Retenue la corrélation semble acceptable à l'exception de l'horizon de surface pour lequel la densité apparente (donnée nécessaire pour convertir les humidités pondérales en humidités volumiques) doit fluctuer fortement au cours du temps notamment en fonction du travail du sol et qu'aucune mesure de densité n'a été effectuée. Pour Souléris, la gamme de valeurs est moins bien couverte d'une part parce que les TDR ont très mal fonctionné en 2008 et d'autre part parce qu'il n'y a pas eu de prélèvements permettant de décrire les valeurs intermédiaires de teneurs en eau. Comme pour Retenue, l'horizon de surface est le plus problématique.

Sur la période d'étude, les épisodes de ruissellement sont assez peu nombreux et les événements majeurs se sont produits au printemps 2007 et au printemps 2008. Le débit le plus important a été mesuré le 27 mai 2007. Ces périodes de ruissellement correspondent aux périodes les plus pluvieuses et également à des périodes pendant lesquelles les différents horizons étaient à une teneur en eau proches de la saturation.

2.3. ROLE ET CONTRIBUTION DES EAUX SOUTERRAINES D'ORIGINIE KARSTIQUE AUX CRUES

2.3.1. Introduction et objectifs

Le rôle et la contribution des eaux souterraines d'origine karstique aux crues méditerranéennes ont été démontrés dans le cas de l'aquifère karstique Nîmois qui se développe au sein des calcaires et marno-calcaires du Crétacé. Le climat méditerranéen se caractérise par des précipitations irrégulières mais pouvant être de forte intensité. Les cumuls de pluies peuvent être très importants sur de courtes périodes (jour) ; on parle alors d'épisodes cévenols. La Ville de Nîmes, est exposée à ce type d'épisodes pluvieux. L'aquifère est caractérisé, d'une part, par la présence d'un système de type karstique dont l'exutoire principal, la Fontaine de Nîmes, est située au centre ville, et d'autre part l'existence d'un réseau de cours d'eau temporaires traversant la ville, appelés cadereaux. Lorsque les cumuls de précipitation sont forts, des inondations éclaires catastrophiques sont générées au sein de ces cadereaux. Ce fut le cas le 3 octobre 1988, où 400 mm d'eau se sont abattus sur la région Nîmoise en quelques heures, provoquant l'inondation de l'ensemble du centre ville et causant la mort de 9 personnes. Ces crues sont issues d'un apport d'eau provenant du ruissellement accrue suite à la saturation de l'aquifère karstique. Par ailleurs ce ruissellement est amplifié par les débordements généralisés du système karstique. Ces deux composantes (ruissellement lié au refus à l'infiltration et débordement du karst) seront par la suite identifiés sous l'appellation « composante karstique ».

Le fonctionnement du système karstique de la Ville de Nîmes a été caractérisé (Ladouche et al., 2006) donnant lieu à un modèle conceptuel de fonctionnement aussi bien pour des conditions hydrologiques de hautes eaux et de basses eaux. A l'issue de ce travail, il a été mis en évidence à partir d'une approche couplée hydrogéochimique et hydrogéologique, la contribution des eaux du karst aux crues dans les cadereaux (Fleury et al., 2007). Par la suite dans le cadre des travaux réalisés pour le SCHAPI en 2007, une méthodologie fut développée sur le bassin versant du cadereau d'Alès (cadereau responsable des plus fortes inondations) pour la crue de mai 1998, afin d'y simuler les débits tout en prenant en considération l'information « karst » (Desprats et al., 2007). Cette méthodologie est reprise et adaptée à l'ensemble des cadereaux traversant la Ville de Nîmes pour l'ensemble des fortes crues, dans le cadre du programme 2008.

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, couplée à la modélisation du comportement de la zone noyée du karst. Les résultats de ce travail de modélisation sont ensuite intégrés à un développement méthodologique qui permet alors d'aboutir à la définition de seuils d'alerte.

2.3.2. Présentation du site d'étude et 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 Pondre (Illustration 37).



Illustration 37 : 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 (anciennement BCEOM) 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 :

Débit dans les cadereaux

Les hauteurs d'eau ont été mesurées sur les sites suivant (Illustration 37) : 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 38) 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 38 : 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.

Pluviométrie 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 37). 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 37). 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.

Piézométrie 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 des récessions 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 37) 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 39).

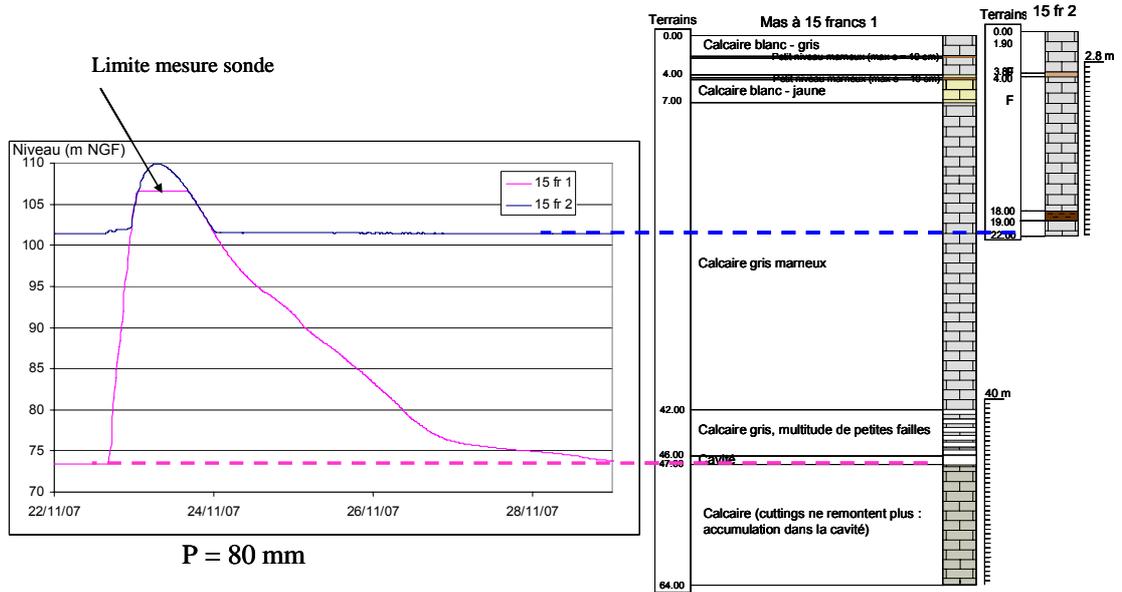


Illustration 39 : Variations piézométriques lors de la crue de novembre 2007 associée à environ 80 mm de précipitation et log stratigraphique des piézomètres Mas à 15 francs-« 1 » et « 2 ».

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 40.

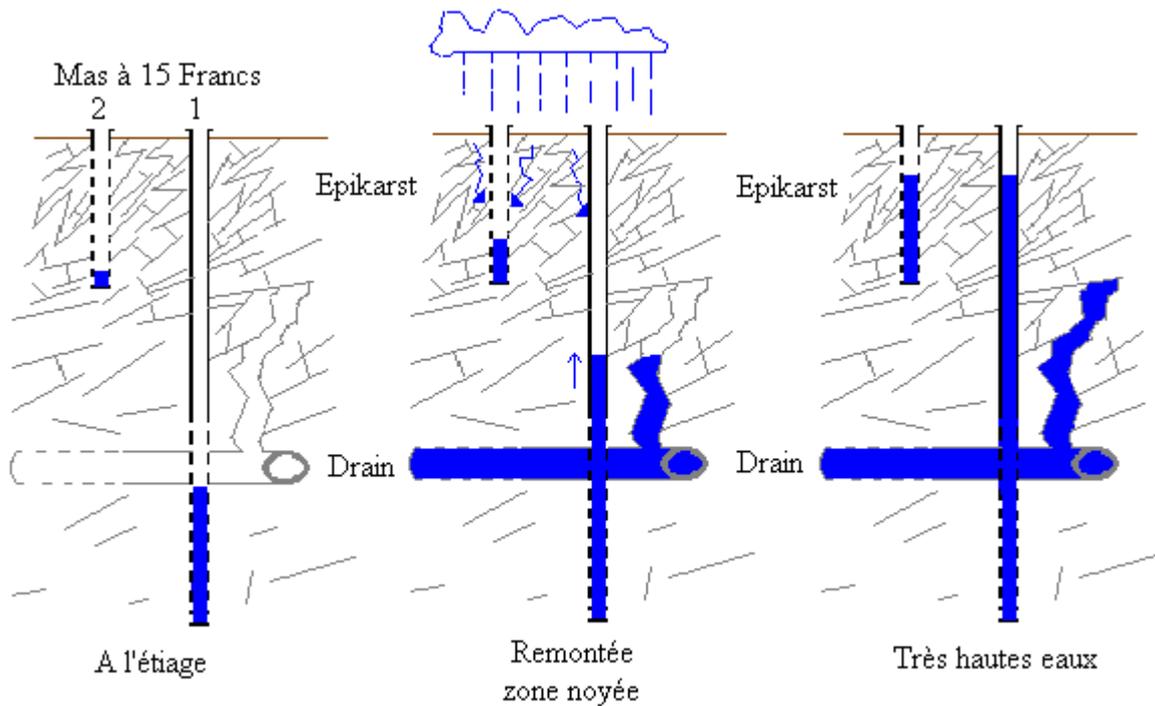


Illustration 40 : Schéma conceptuel de fonctionnement des piézomètres Mas à 15 francs 1 et 2

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 du projet SP BRGM Ville de Nîmes.

2.3.3. 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 piézométrique 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.

Application au cadereau d'Alès

- **Réalisation d'un modèle simple**

Les données de débit sont présentées sur l'illustration 41. 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 Roquemaière. La pluie du 8 septembre 2005 intervient alors que ces bassins sont pleins sans pouvoir alors jouer leur rôle écrêteur.

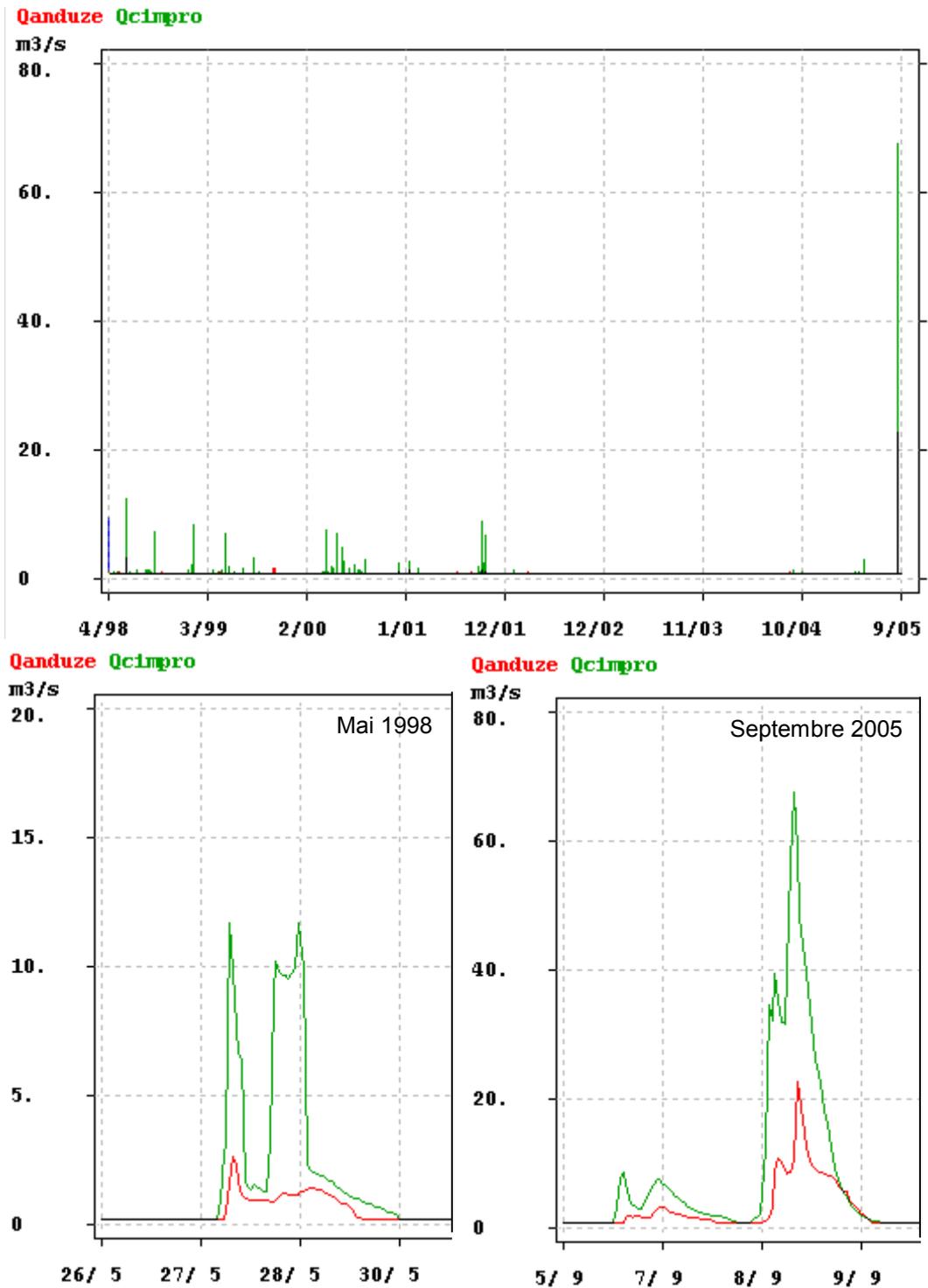


Illustration 41 : Débits pour la période 1998 - 2005 et pour les crues de mai 1998 et septembre 2005 aux station d'Anduze et CimPro – Cadereau d'Alès

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 42. La technique d'inversion consiste à calculer la ou des réponses impulsionnelles (Illustration 43) 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 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 a un sens.

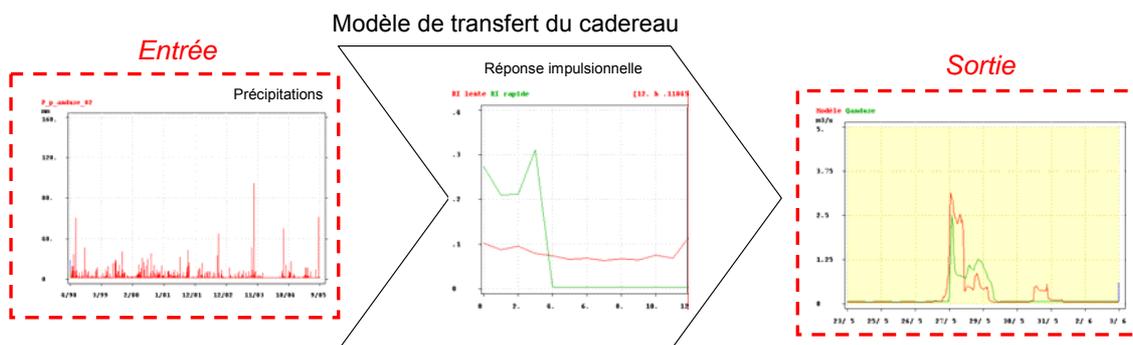


Illustration 42 : Schéma du principe du modèle de transfert à partir du logiciel Tempo

Ainsi, les réponses impulsionnelles calculées pour les modèles simples d'Anduze et Cimpro sont présentées ci-dessous (Illustration 43) :

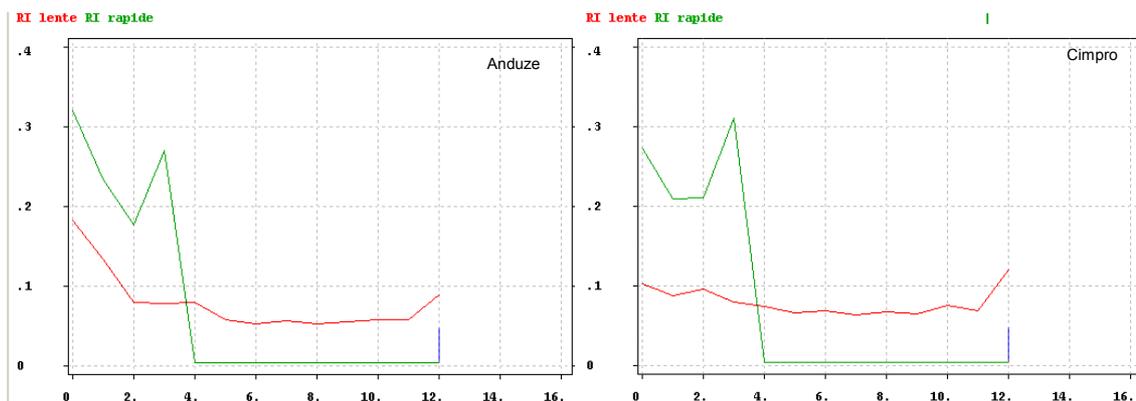


Illustration 43 : Réponse impulsionnelle lente et rapide des débits du cadereau d'Alès (modèle simple)

Les résultats graphiques de ces modèles sur les stations d'Anduze et Cimpro sont donnés ci-dessous (Illustration 44 et Illustration 45) :

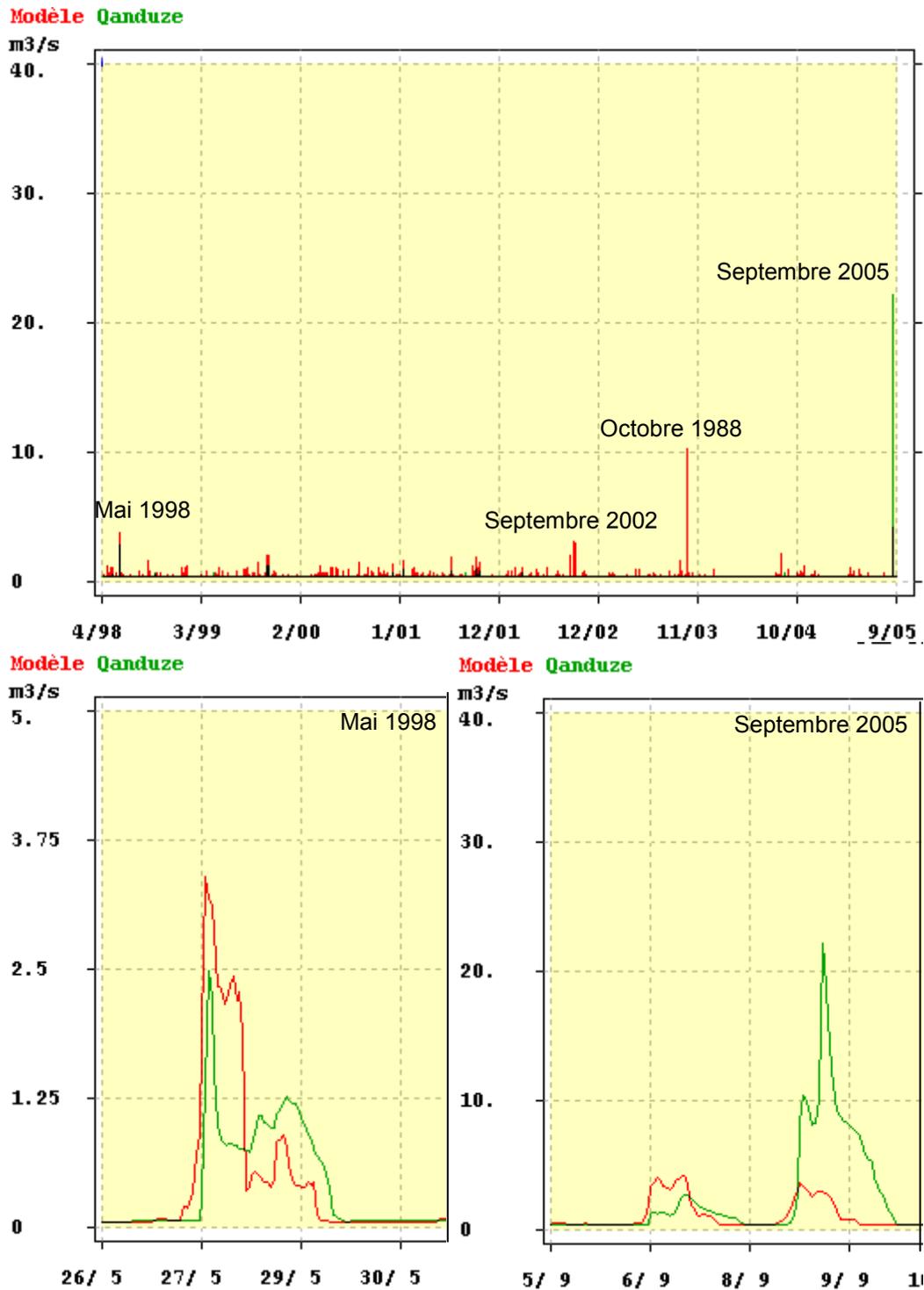


Illustration 44 : Résultats graphiques pour le modèle simple développé sur Anduze

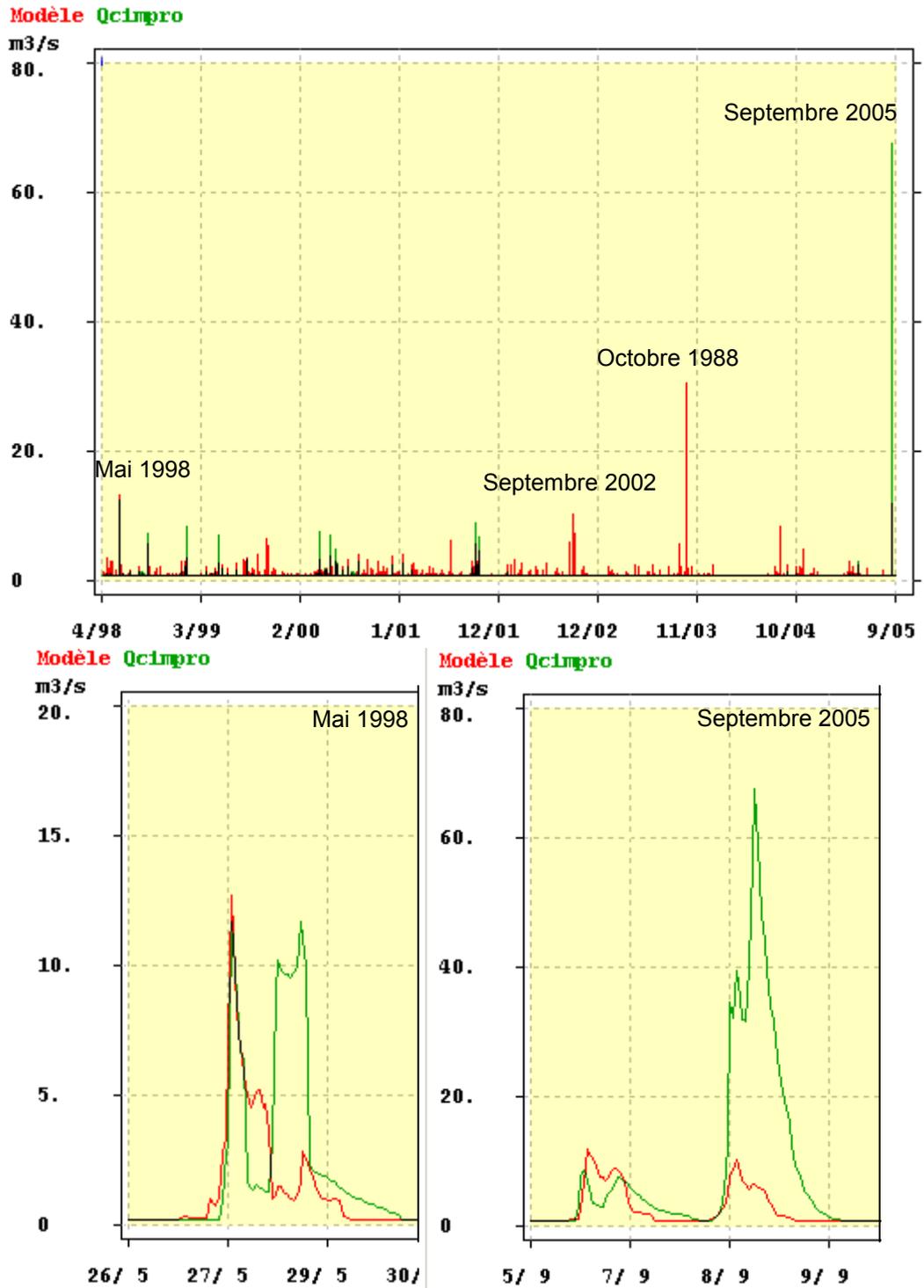


Illustration 45 : Résultats graphiques pour le modèle simple développé sur Cimpro

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 46 : Tableau récapitulatif des débits maximaux en m³/s mesurés horaires (en jaune), et simulés à partir du modèle simple, et maximums instantannés 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.

• 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 Mas à 15 francs 1 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 47 ;
- 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 48) et le seuil Oméga de pluie efficace (Illustration 49) de telle sorte que le modèle soit le plus proche possible de la piézométrie observée (Illustration 50). 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.

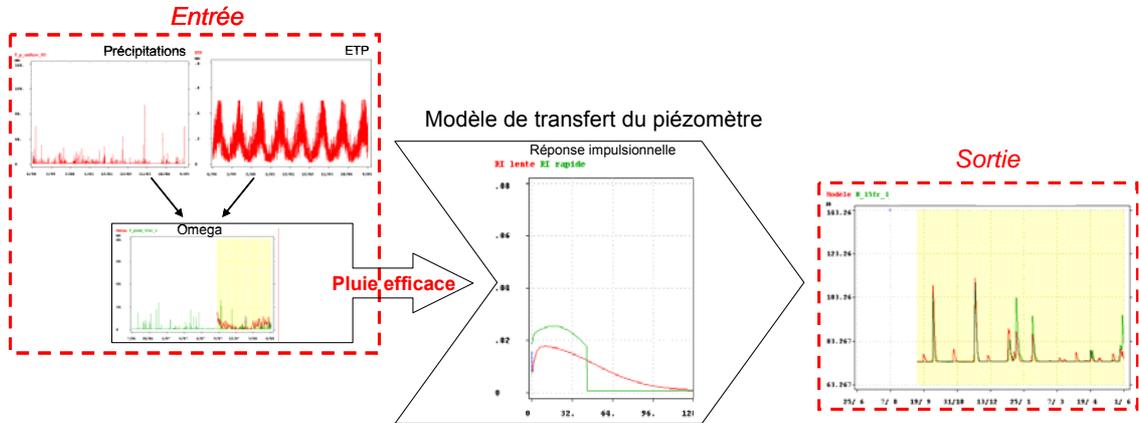


Illustration 47 : Schéma de principe du modèle de transfert du piézomètre représentatif du karst

La pluie pondérée calculée donne :

$$P_{\text{pond_15fr}} = 1 * P_{\text{anduze}}$$

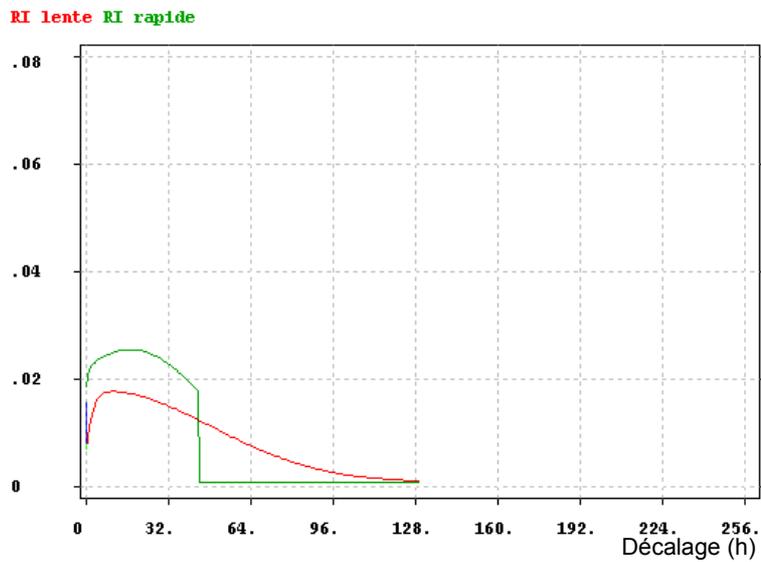


Illustration 48 : Réponse impulsionnelle lente et rapide de la piézométrie du site Mas à 15 fr

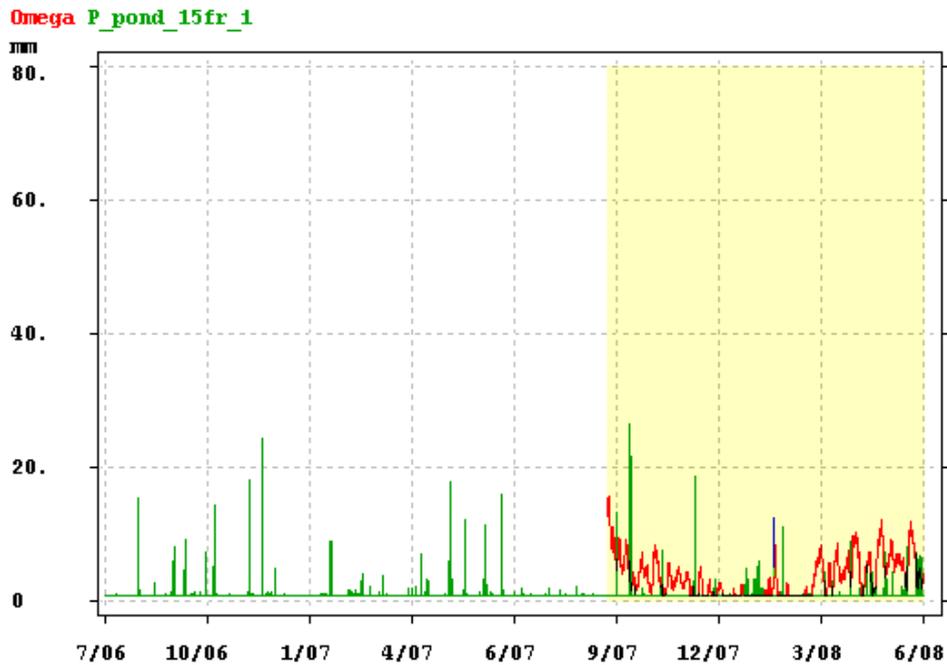


Illustration 49 : Seuil de pluie efficace Oméga et de la pluviométrie

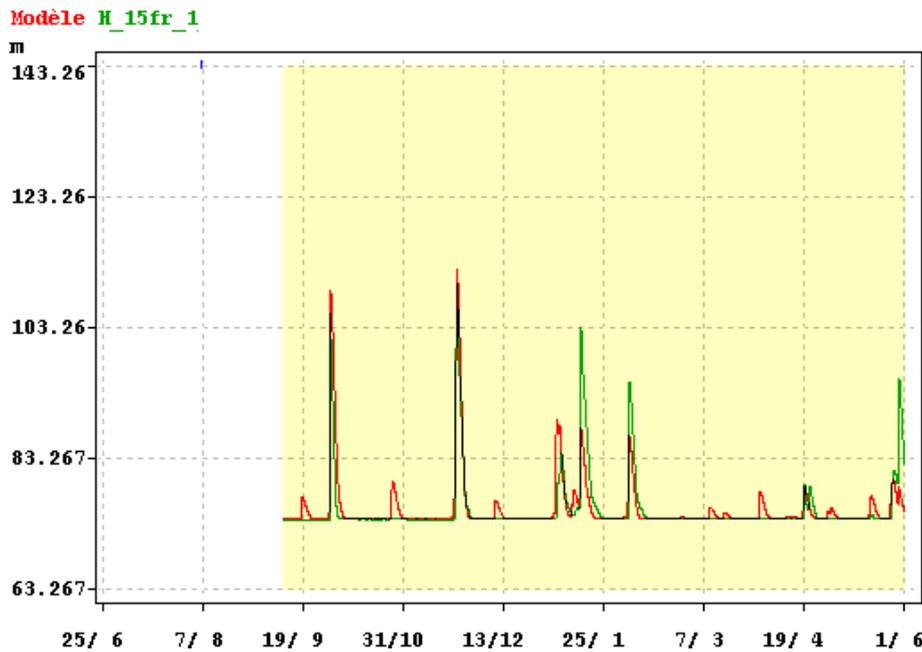


Illustration 50 : Comparaison de la piézométrie simulée et mesurée du site Mas à 15 fr

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 de Mas

à 15fr. 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 51.

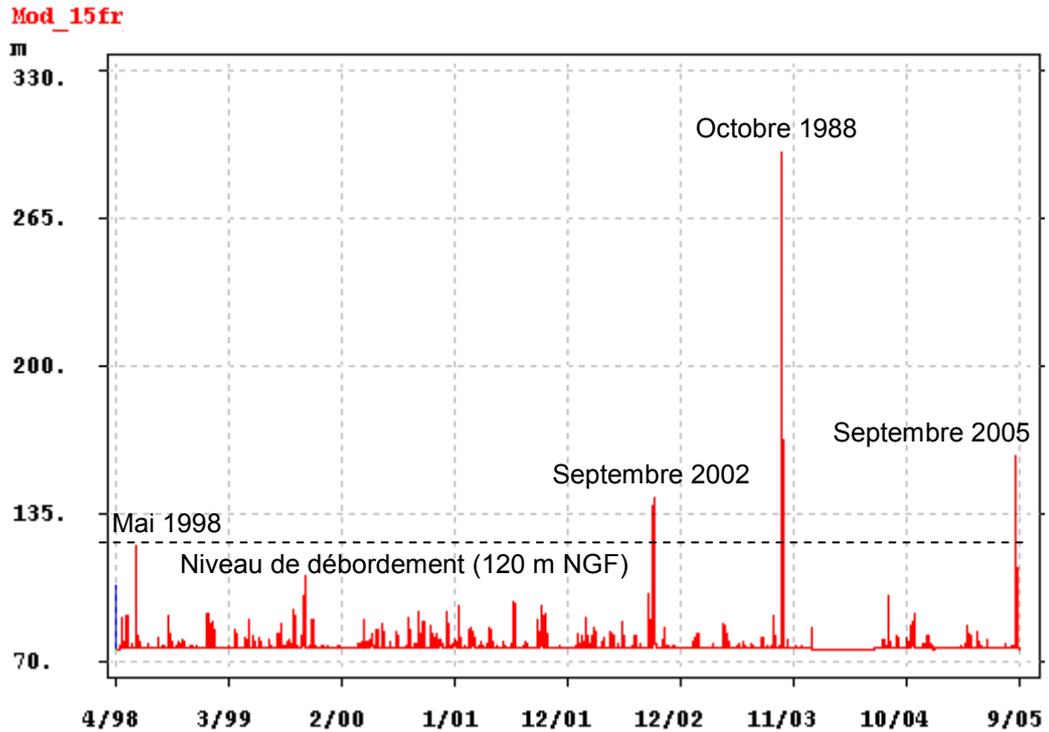


Illustration 51 : Piézométrie reconstituée du site Mas à 15 fr

Enfin, 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 fr 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 52), 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 52).

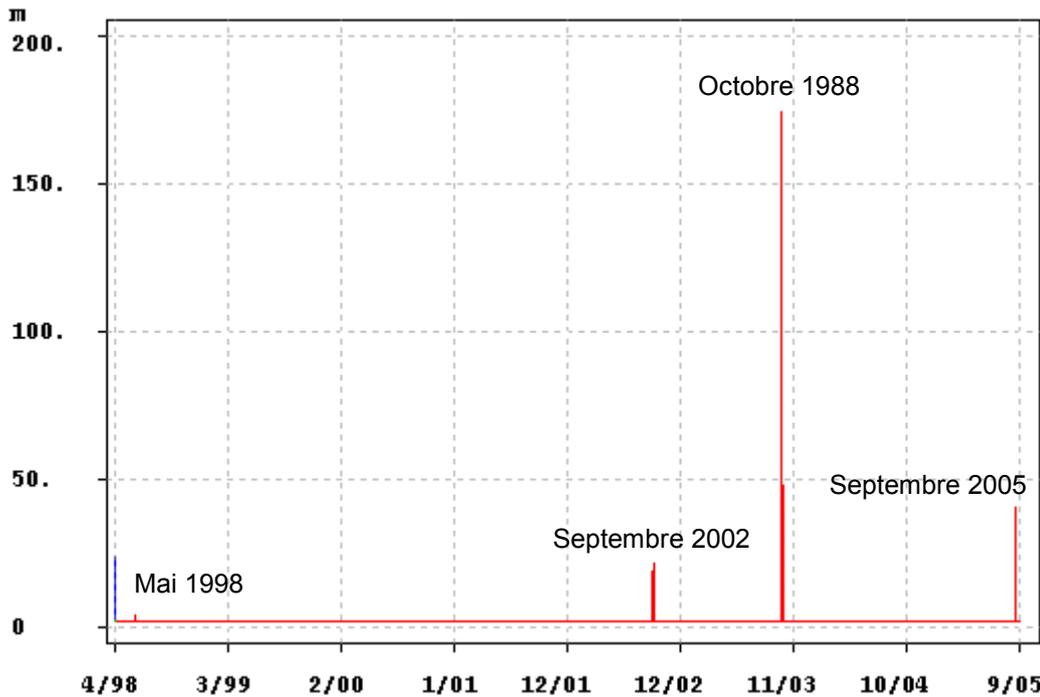


Illustration 52 : Information débordement du karst au site Mas à 15 fr (le seuil de débordement ici est fixé à 120 m)

Modèle couplant l'information karst à la pluie

Dans un premier temps la chronique 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 53 et les réponses impulsionnelles associées sont données Illustration 54.

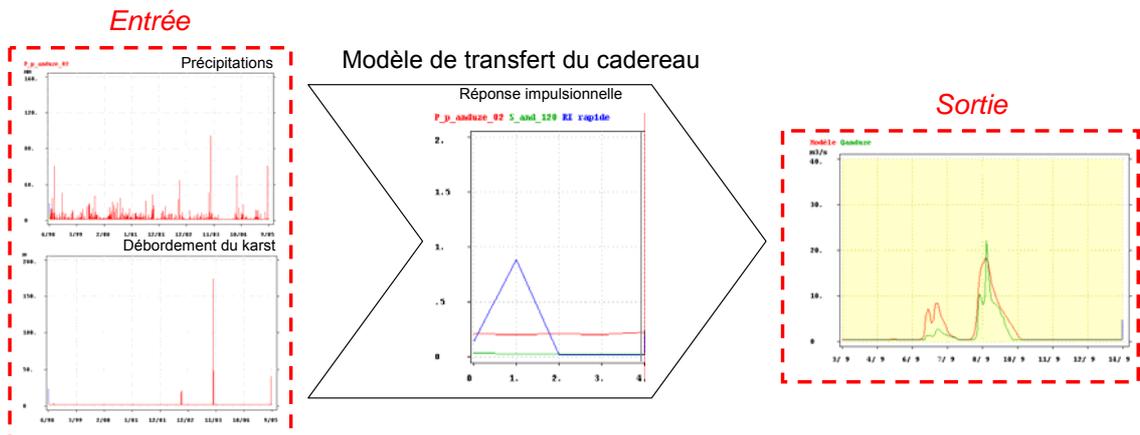


Illustration 53. Schéma de principe des modèles de transfert prenant en considération l'information karst

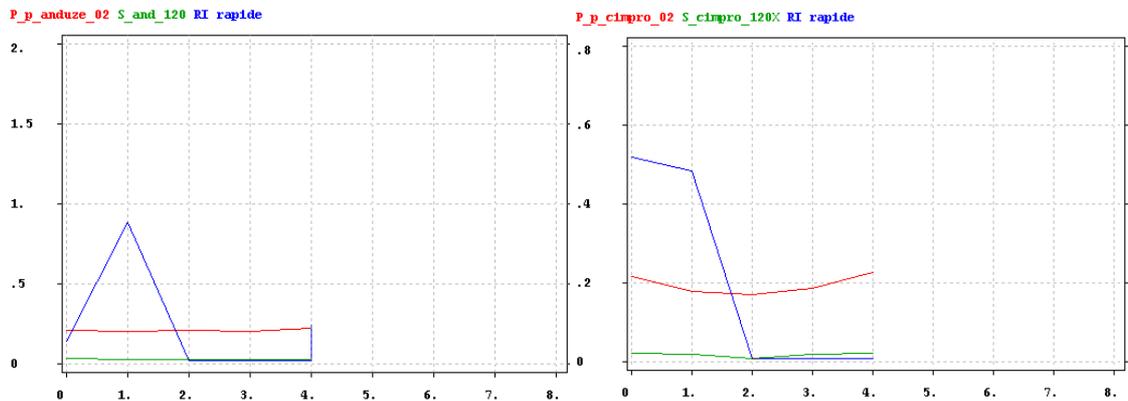


Illustration 54 : Réponse impulsionnelle lente et rapide des débits du cadereau d'Alès avec le modèle prenant en considération l'information karst

Les résultats graphiques sont donnés pour les stations d'Anduze et Cimpro dans les Illustration 55 à Illustration 57. 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.

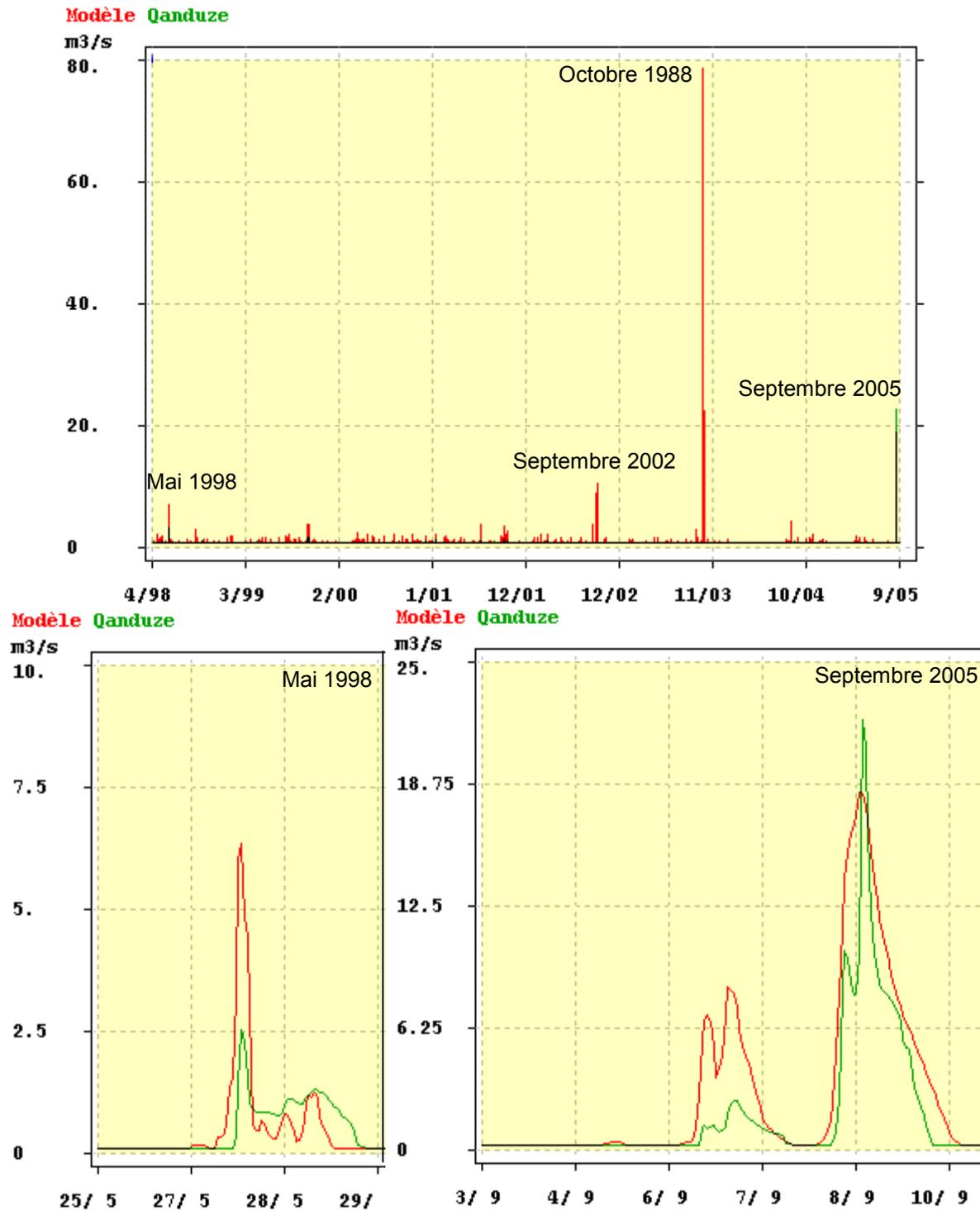


Illustration 55 : Résultats graphiques pour le modèle prenant en considération l'information karst (seuil à 120 m) développé sur Anduze

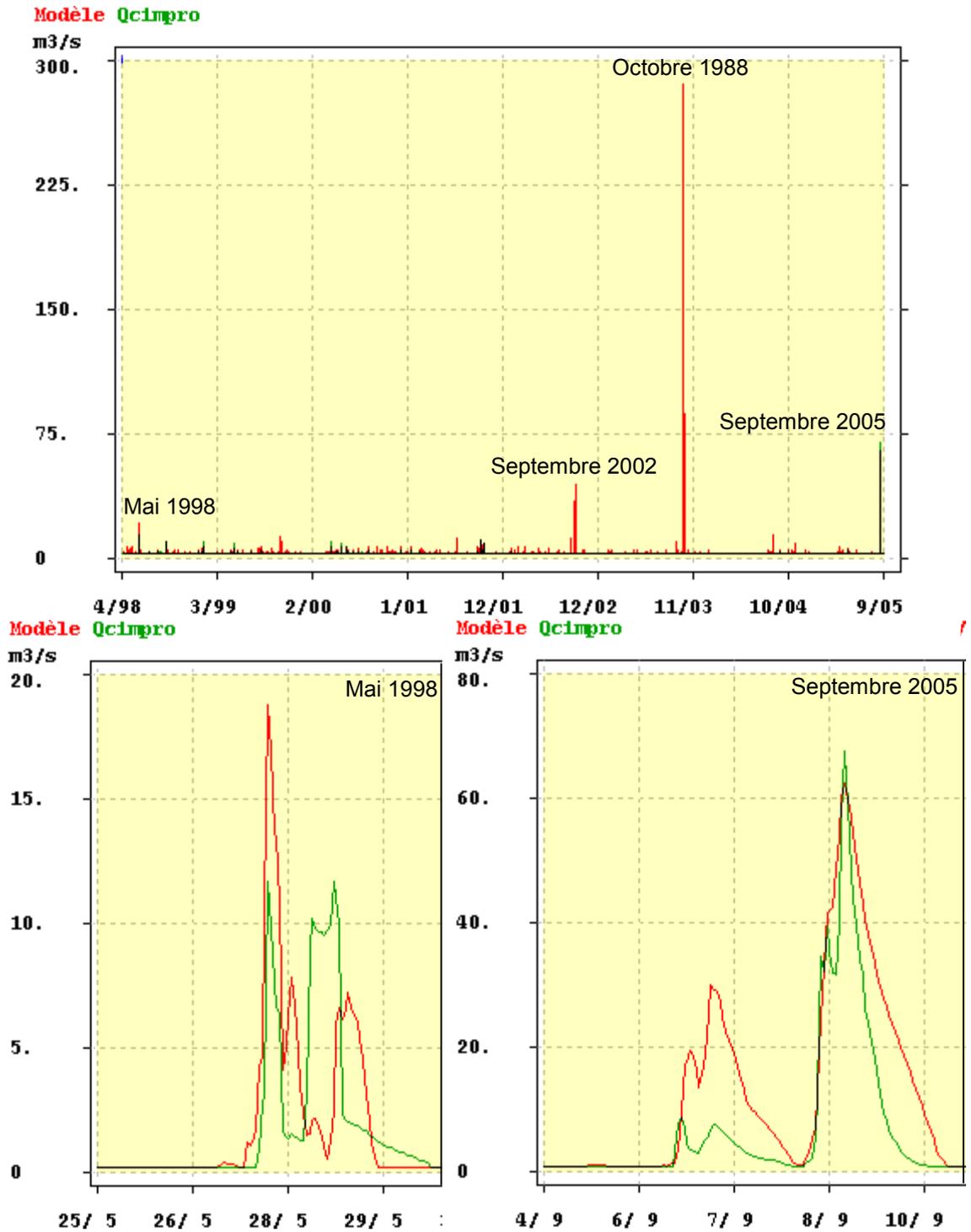


Illustration 56 : Résultats graphiques pour le modèle prenant en considération l'information karst (seuil à 115 m) développé sur Cimpro

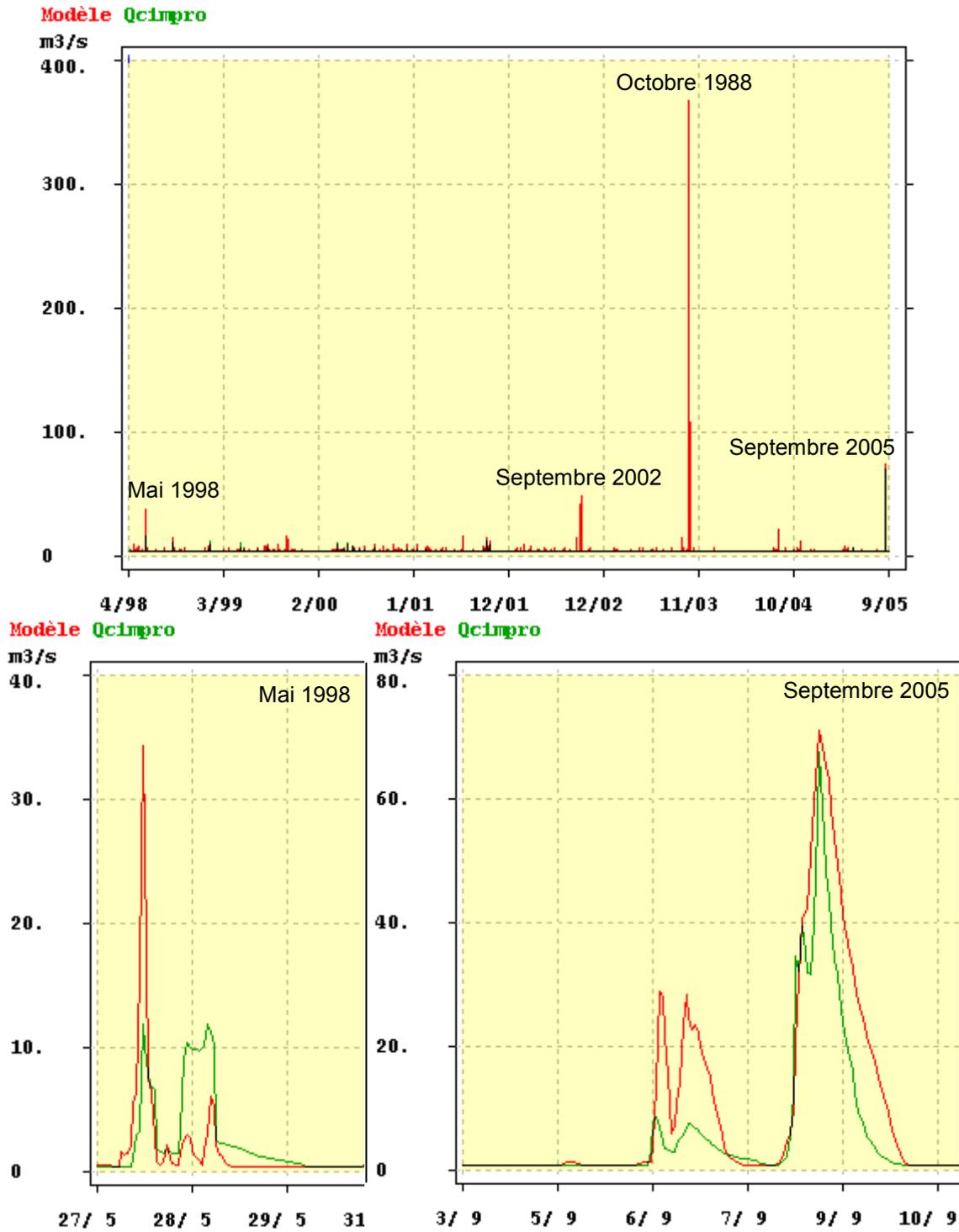


Illustration 57 : Résultats graphiques pour le modèle prenant en considération l'information karst (seuil à 120 m) développé sur Cimpro

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 58 : 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 46 et Illustration 58) 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.

Résultat de la modélisation 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.

- **Pondre**

Au vu des résultats (Illustration 59 et Illustration 60), le comportement du cadereau de 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 59 : 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

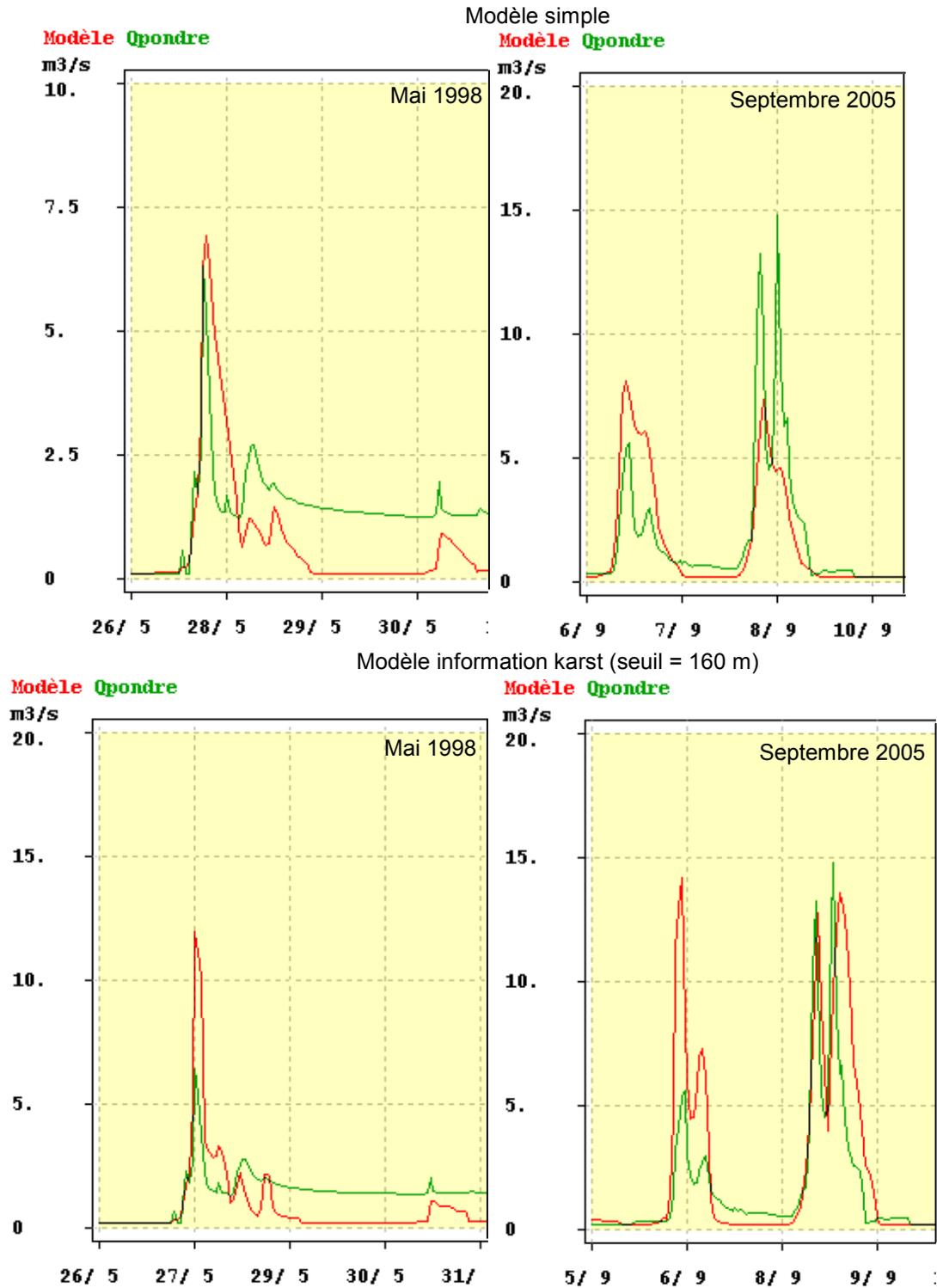


Illustration 60 : Résultats graphiques pour les modèles simple et avec l'information karst développés sur Pondre

• **Valdegour**

Le modèle simple développé sur Valdegour permet de reproduire convenablement les crues de mai 1998 et septembre 2005 (Illustration 62). 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 61 : 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

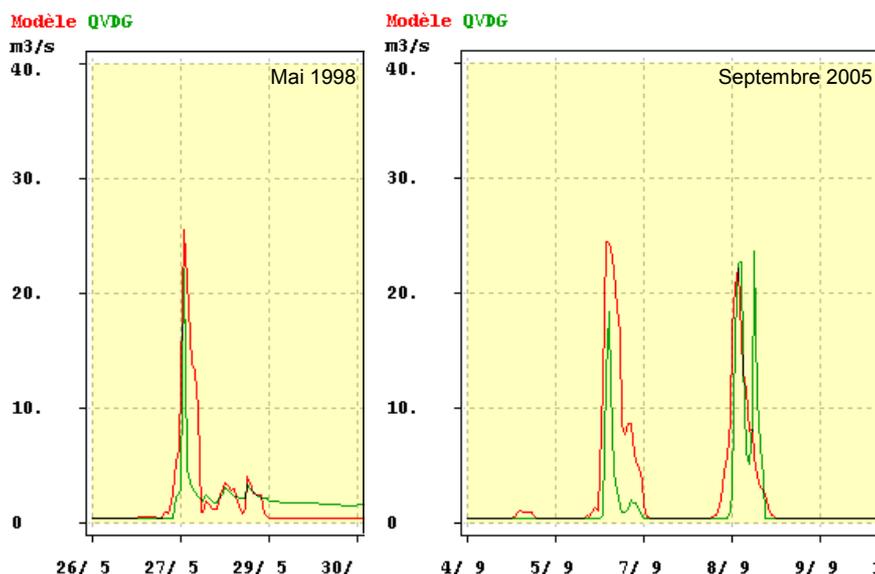


Illustration 62 : Résultats graphiques pour le modèle simple développé sur Valdegour

• **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 64), mais que ce modèle ne soit pas adapté aux plus fortes crues (Illustration 63). 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 63 : 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.

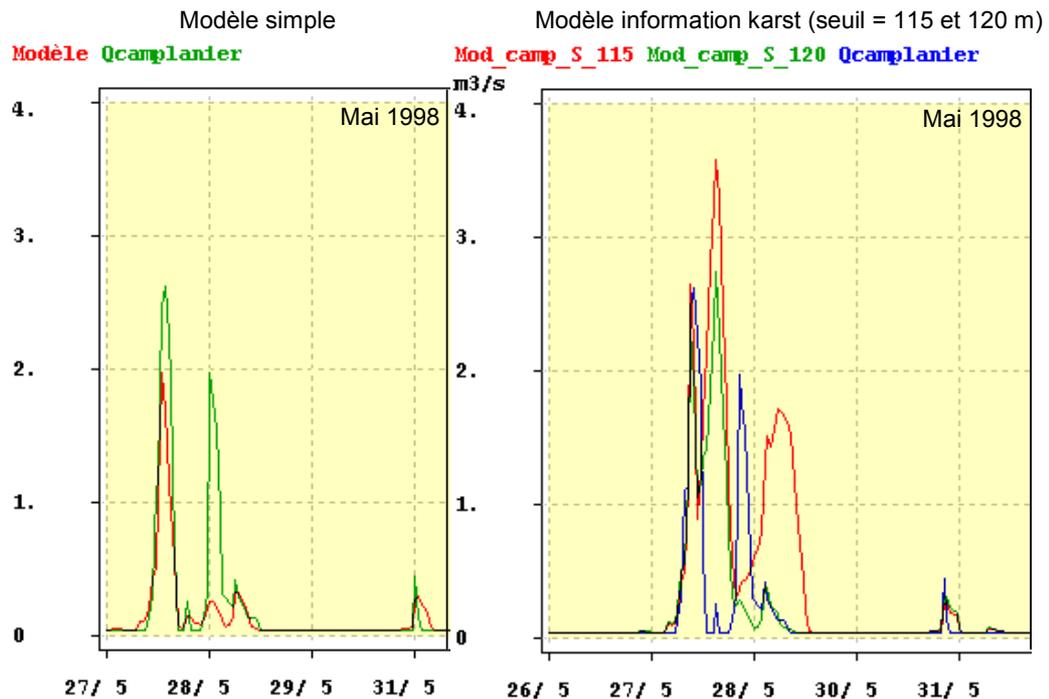


Illustration 64 : Résultats graphiques pour les modèles simple et avec l'information karst développé sur Camplanier

- **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 66 et Illustration 67) 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 37) 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 65). Un modèle faisant intervenir l'information « karst » est alors nécessaire (Illustration 66).

A Van-Dyck, le modèle simple n'est pas satisfaisant pour aucun des épisodes de crue majeurs (Illustration 67), 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 65). 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 65 : 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 m³/s.

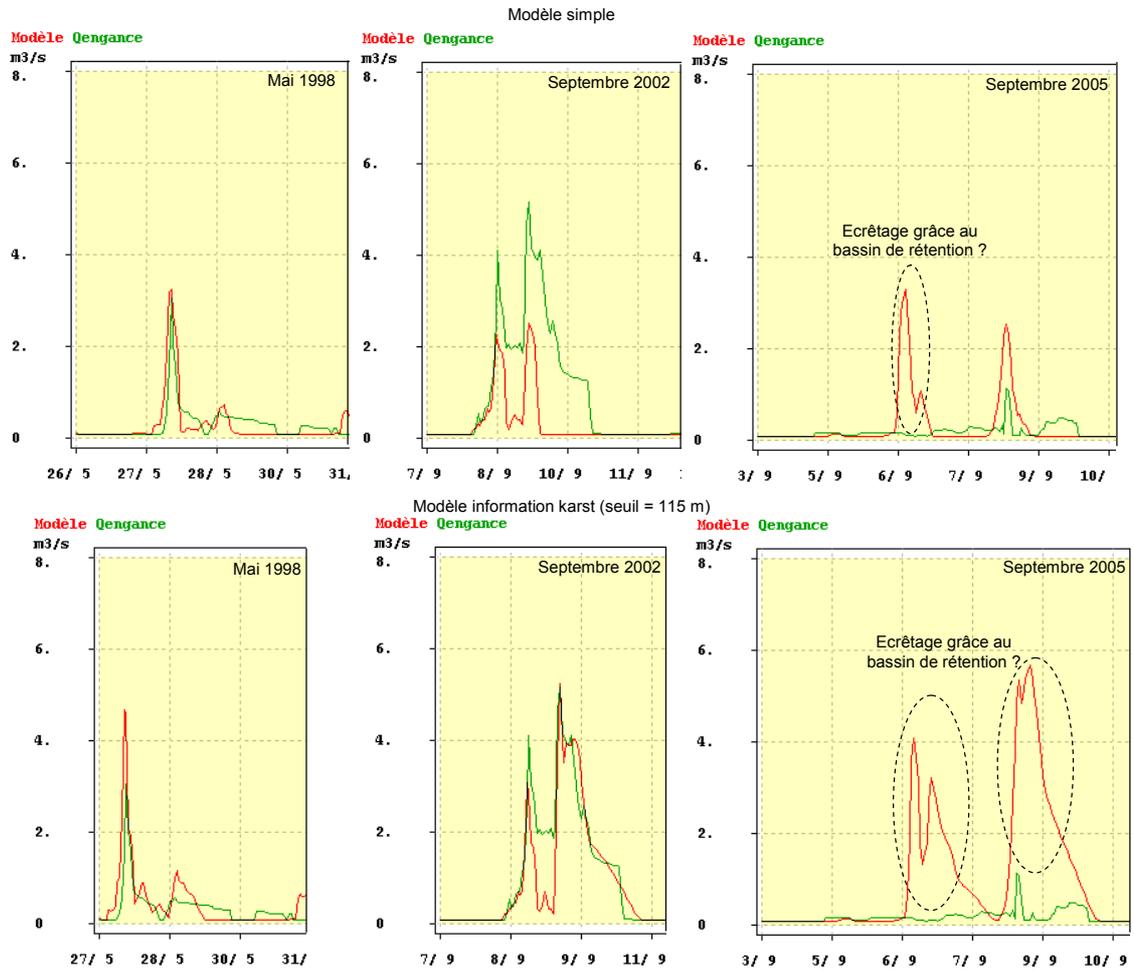


Illustration 66 : Résultats graphiques pour les modèle simples et avec l'information karst développés sur Engance

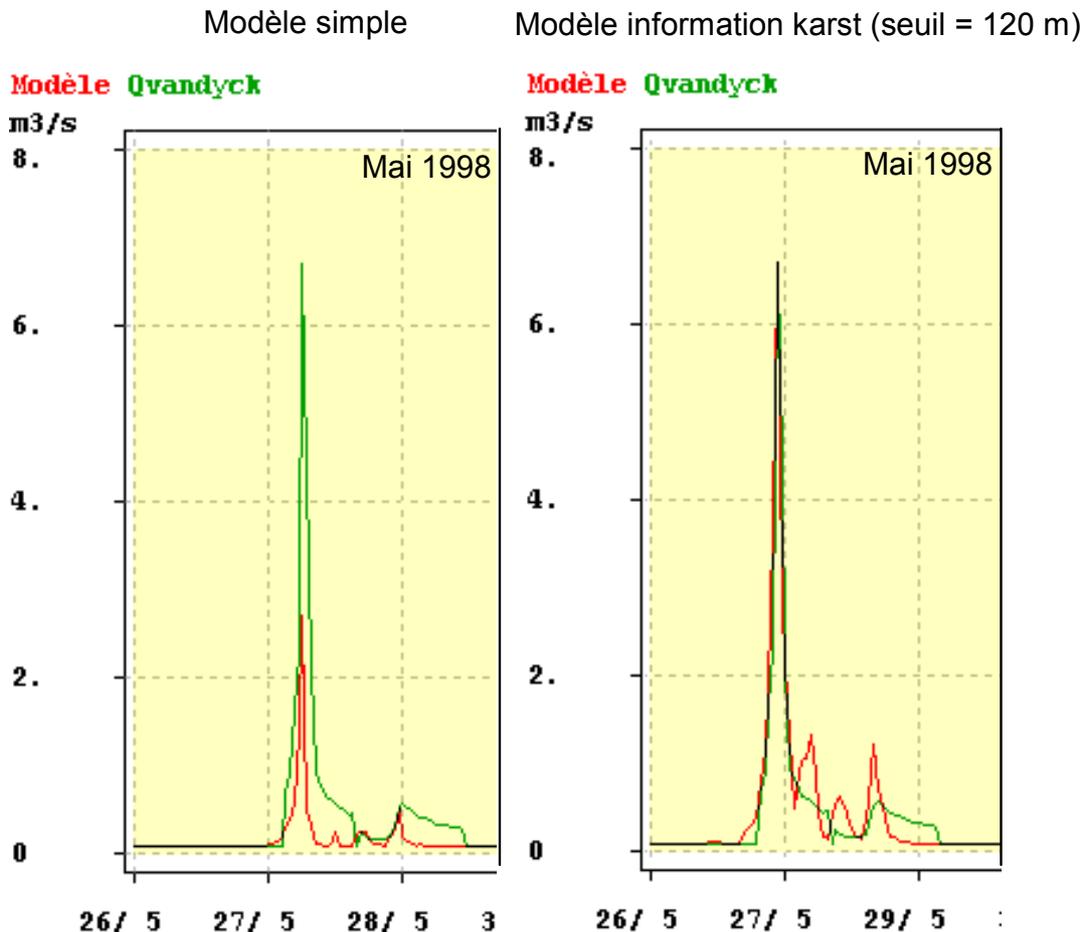


Illustration 67 : Résultats graphiques pour les modèle simples et avec l'information karst développés sur Van-Dyck

- **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 68 : 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.

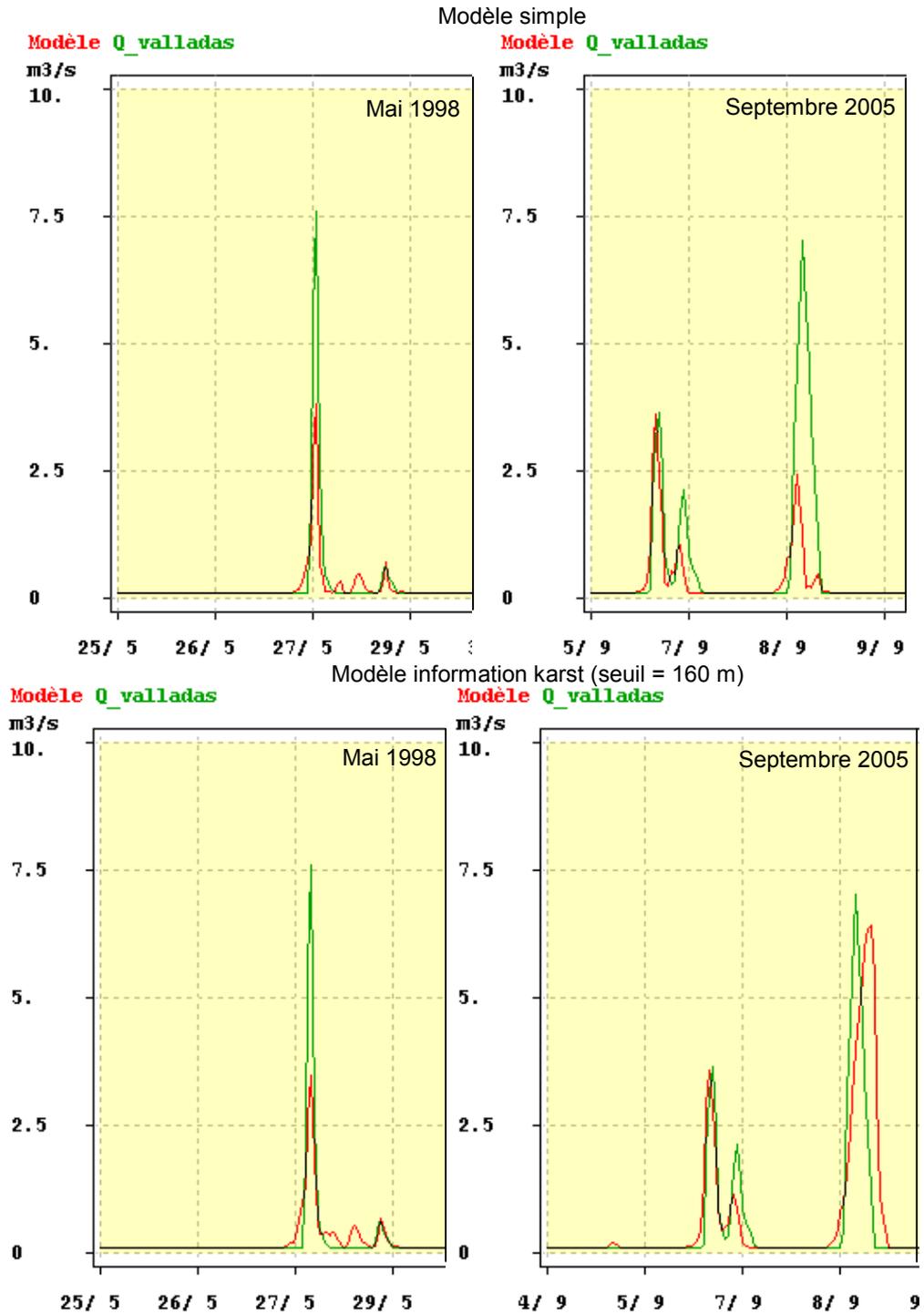


Illustration 69 : Résultats graphiques pour les modèle simples et avec l'information karst développés sur Valladas

Conclusion concernant la modélisation du débit 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 37) 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.

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

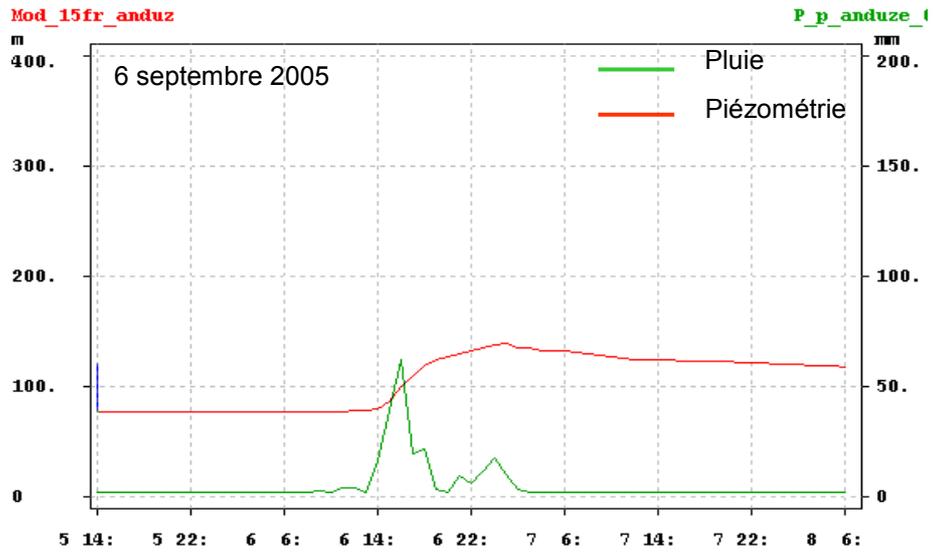
Le piézomètre Mas à 15 francs s'est révélé adapté pour caractériser la saturation de l'aquifère karstique et ses débordements. Il est ainsi intéressant de pouvoir évaluer sa réponse aux précipitations en fonction de son état initial. Aussi, lorsque l'aquifère est peu saturé, il existe un délai de quelques 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 70). 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.

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 le 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.



Cumul de précipitation : 203 mm

Pic de crue : 137 m NGF

Piézométrie initiale : 74 m NGF

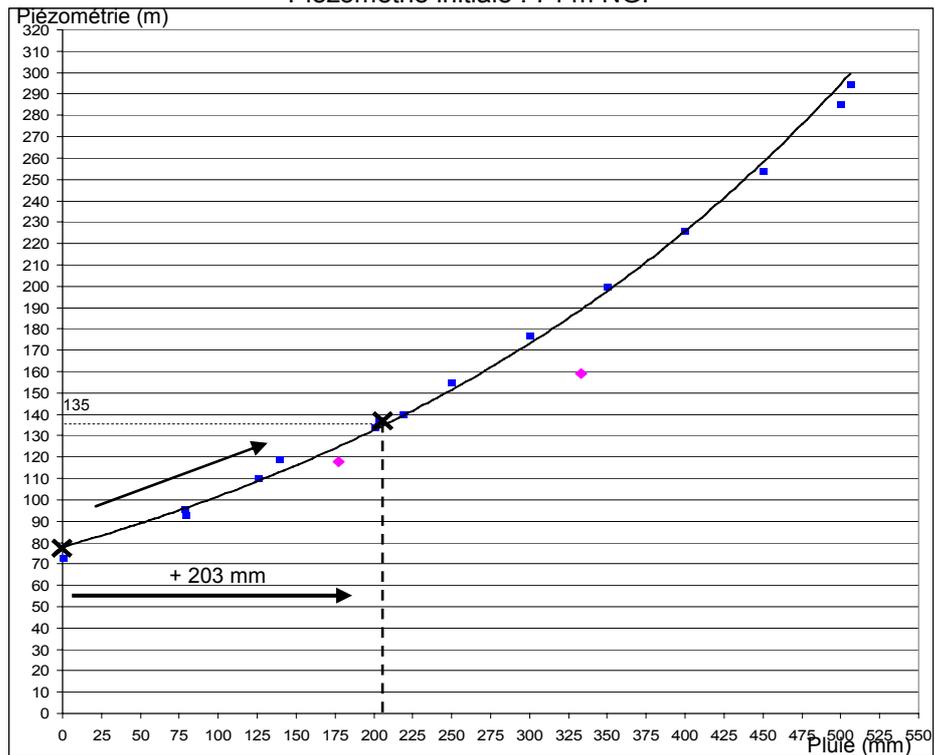


Illustration 70 : Définition du pic de piézométrie à Mas à 15 francs à partir de l'abaque pour l'épisode du 6 septembre 2005

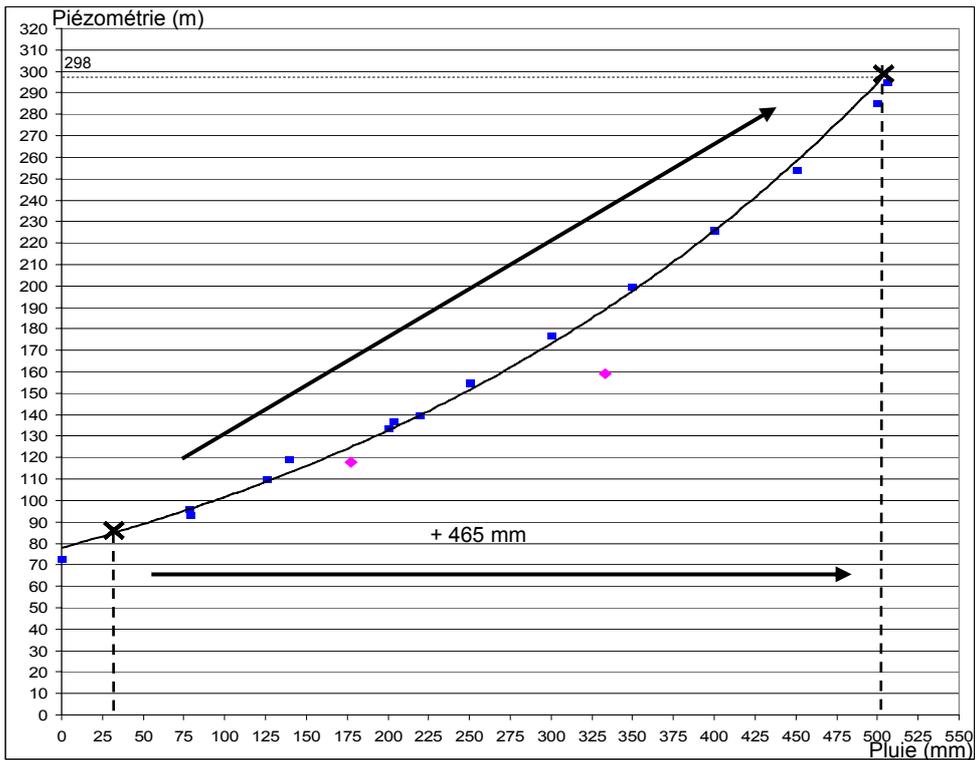
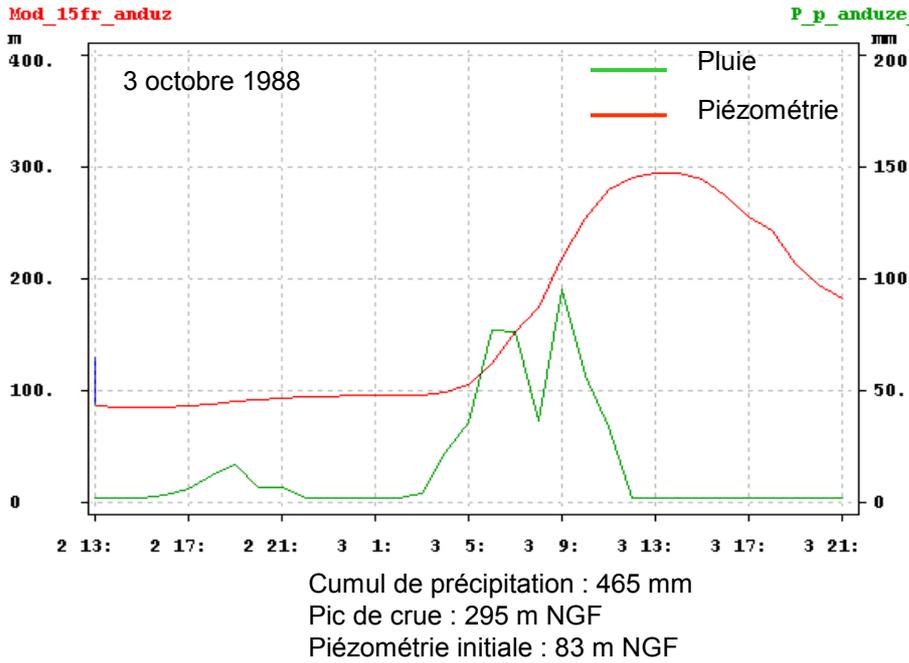


Illustration 71 : Définition du pic de piézométrie à Mas à 15 francs à partir de l'abaque pour l'épisode du 3 octobre 1988

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 :

$$\varphi(t) = Q_{R_0} * e^{-\alpha t}$$

avec α coefficient de tarissement. Le débit Q_{R_0} 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 :

$$\psi(t) = q_0 \frac{1 - \eta t}{1 - \varepsilon t}$$

avec q_0 : débit d'infiltration à l'instant t_0 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.

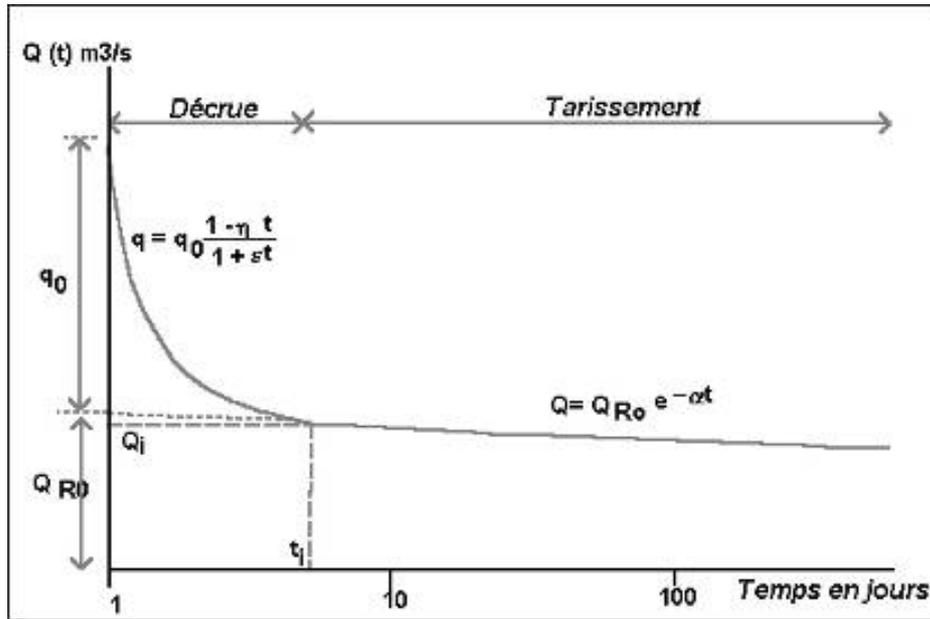


Illustration 72 : Décomposition de la récession selon la méthode de Mangin (1970).

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

Crue	α (h^{-1})
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 73 : Coefficient de récession déduit de l'analyse de Mangin sur différents épisodes de crue

On obtient un coefficient de récession moyen égal à $0,006 h^{-1}$. Cette valeur est utilisée pour réaliser un abaque piézométrie en fonction de la durée du tardissement (Illustration 74). 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 70), en

appliquant un tarissement de 30 heures, on aboutit à une cote piézométrique égale à 112 m NGF.

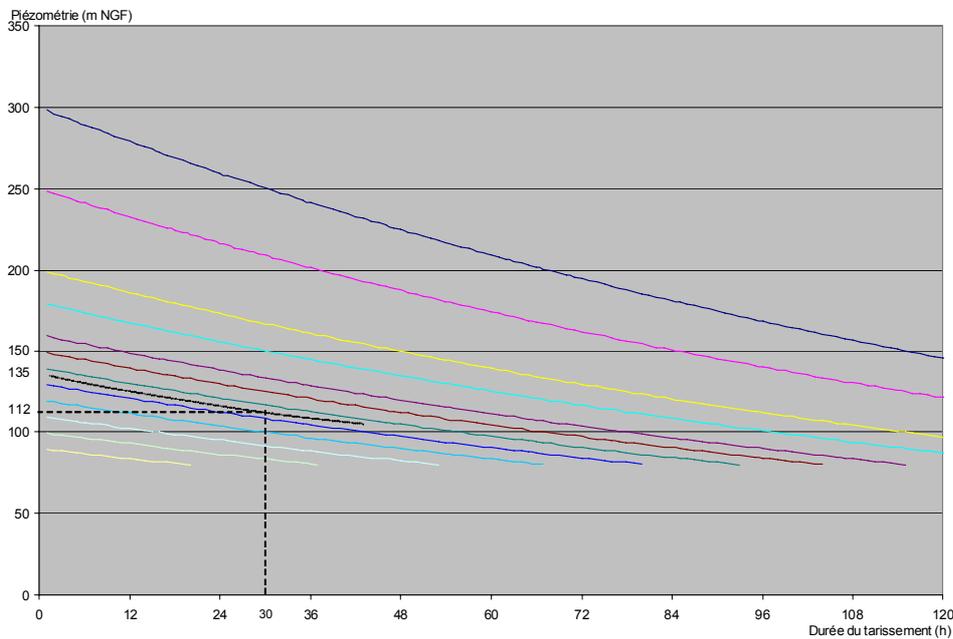


Illustration 74 : Abaque piézométrie en fonction de la durée du tarissement

Les informations déduites de cet abaque sont ensuite utilisées dans le premier abaque fourni (Illustration 70). Un exemple d'utilisation couplant les abaques est donné pour l'épisode de crue du 6 – 8 septembre 2005 (Illustration 75). 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.

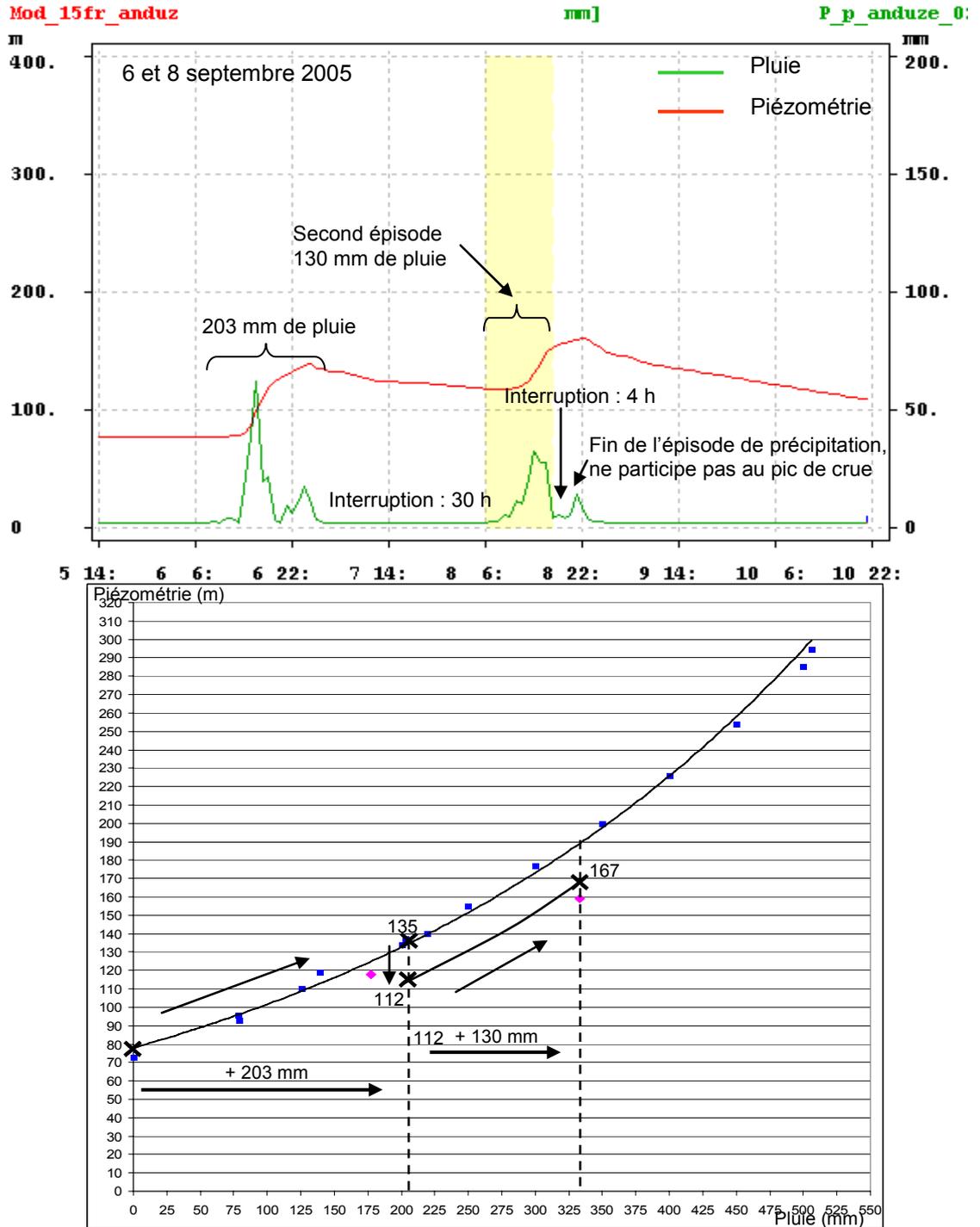


Illustration 75 : Exemple d'utilisation de l'abaque pour des épisodes multiples

2.3.5. Conclusions et perspectives

Ce travail de modélisation a permis d'aboutir à une méthodologie permettant de définir des seuils d'alerte après avoir modélisé le comportement de l'ensemble des cadereaux et mis en évidence l'importance de la composante « karst » aux débits des crues principales. Or cette composante est directement fonction du remplissage de l'aquifère et des hauteurs d'eau précipitées. Ces deux paramètres ont ainsi été utilisés afin de définir des seuils d'alerte. Des abaques piézométrie en fonction des précipitations ont ainsi été réalisés, ils permettent ainsi 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, ils ont montrés leur robustesse à la fois sur des épisodes de précipitations continus (épisodes simples) que discontinus (épisodes multiples).

3. Conclusion sur les travaux menés en 2008

Les travaux sur le BVNE du Gardon d'Anduze ont permis la calibration de la carte de perméabilité, et son extension sur l'Avène afin de prendre en compte des types d'occupation agricole absents du Gardon, mais largement développés en région méditerranéenne. La calibration réalisée à l'aide du modèle STREAM s'est basée sur les crues observées entre 2002 et 2006. La prise en compte d'une perméabilité spatialisée permet d'accroître significativement la corrélation entre volumes observés et volumes simulés (r^2 de 0.68 sans spatialisation à 0.88 avec spatialisation).

Les modélisations sur le BVNE se sont poursuivies avec Gardénia sur les bassins du Gardon d'Anduze avec les crues de septembre 2002 et octobre 2006, dans le cadre de la mise en place de DEMETER. Par ailleurs les crues de la période 1995-2002 ont été modélisées en « mode prévision » et les performances du modèle en mode prévision ont été évaluées.

Sur le bassin versant du Touch (sous-bassin de St-Lys), les mesures in situ se sont achevées en juillet 2008. Les chroniques de mesures ont été analysées (humidité et débits sur la station DIREN) et feront l'objet d'une étude comparative avec les données ISBA en 2009

Par ailleurs les données hydrologiques ont été intégrées suite au travail de modélisation réalisé par le SCHAPI sur le Touch. Il conviendra en 2009 de modéliser ces événements avec Gardénia

L'implantation de Gardénia sur le **BVNE de la Somme** n'a pu être finalisée en 2008. Cette tâche est en cours entre le BRGM et le SCHAPI afin de prendre en compte les contraintes liées à l'intégration des données de pluie dans Gardénia et la restitution des résultats sous DEMETER.

Sur Nîmes, la prise en compte de la composante « karst » aux débits des crues principales, directement fonction du remplissage de l'aquifère et des hauteurs d'eau précipitées, a permis d'aboutir à une méthodologie permettant de définir des seuils d'alerte.

Des abaques piézométrie en fonction des précipitations permettent d'appréhender en fonction du niveau piézométrique initial et des précipitations, les réactions piézométriques et donc la saturation ou non de l'aquifère karstique. Ils ont montrés leur robustesse à la fois sur des épisodes de précipitations continus (épisodes simples) que discontinus (épisodes multiples).

4. Bilan de Production

En 2008, les documents produits ont été :

- une contribution au rapport d'avancement en septembre 2008 pour le compte du MEEDDAT ;
- le présent rapport technique de fin d'exercice 2008 ;
- les comptes-rendus de réunions : 15 janvier à Orléans, 25 avril à Montpellier, 29 août à Toulouse (annexe 1).

5. Planification année 7

5.1. OBJECTIFS

La réunion de présentation des résultats tenue le 17 novembre 2008 à Montpellier (Compte-rendu en annexe) a permis de préciser les objectifs pour l'année 2009, dernière année du programme de travail sur trois ans 2007-2009.

5.2. TACHES PLANIFIEES EN 2009

Les tâches planifiées en 2009 sont réparties par bassin versant :

5.2.1. Description des opérations proposées

Module 1. Bassin versant du Gardon d'Anduze

L'implantation de Gardénia sur DEMETER en liaison avec le SCHAPI sera finalisée début 2009. Suite au travail de validation des différents événements jusqu'ici non pris en compte, les modélisations seront poursuivies.

Des tests de simulation de pluie seront mis en place sur les formations pédopaysagères principales afin de valider le lien entre perméabilité mesurée avec le système de Guelph et ruissellement tel qu'il est mesuré avec le simulateur ORSTOM par exemple.

Module 2. Bassin versant du Touch

Les différents événements sélectionnés par le SCHAPI (A. Marchandise) feront l'objet d'une modélisation à l'aide de Gardénia. Une convention BRGM/SCHAPI pourrait être définie pour une mise à disposition des données radar pour 2002 et 2005.

Par ailleurs les données ISABA correspondant au bassin de St Lys seront demandées au SCHAPI pour être analysées conjointement aux mesures TDR réalisées depuis début 2006 jusqu'à juillet 2008 sur les deux parcelles expérimentales de Retenue et Souléris.

Module 3. Rôle et contribution des eaux souterraines d'origine karstique aux crues : karst de Nîmes.

La définition des seuils d'alerte sera mise en œuvre pour l'ensemble des stations des cadereaux. Pour ce faire, il sera nécessaire de déterminer un piézomètre représentatif de l'aquifère karstique pour le sous-bassin versant oriental de la ville de Nîmes.

Aussi les seuils d'alerte étant définis, il restera à évaluer en 2009 le débit des cadereaux provenant de la composante « karst ». Sa réalisation nécessitera dans un premier temps de séparer pour chaque épisode de crues majoritaires la part du flux provenant du « ruissellement pur » de la part provenant de la composante karst (augmentation du ruissellement induit par la saturation de l'aquifère karstique et débordement du karst). Ce travail sera réalisé suite à une mise à jour de l'actuel modèle à réservoir, ESPADA, utilisé par la Ville de Nîmes, par Egis-BCEOM dans le cadre du projet SP avec la Ville de Nîmes. Une fois la part d'eau provenant de la composante karst connue, une relation avec les débordements du karst sera alors définie, ce qui permettra d'évaluer le débit de la composante karst en fonction des précipitations.

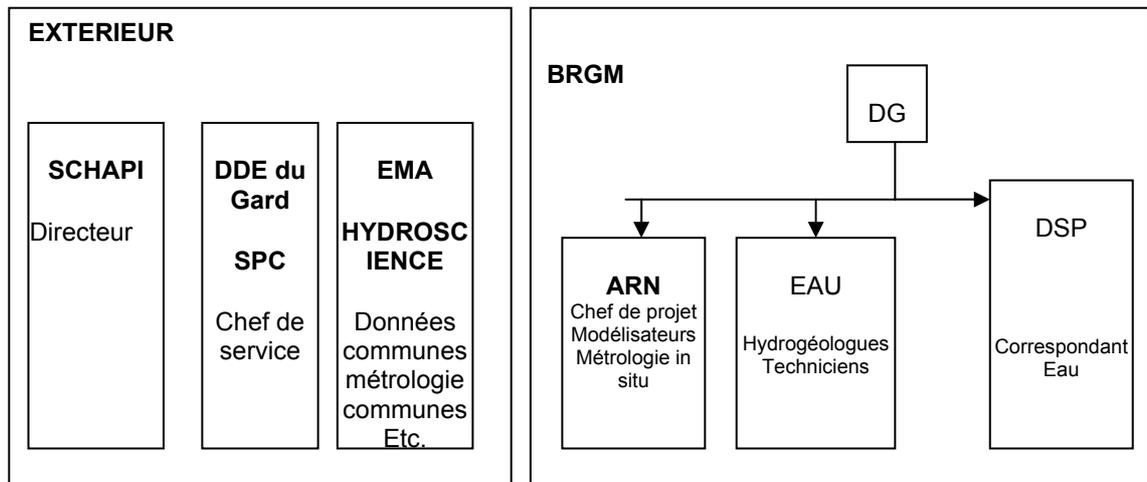
5.2.2. Personnels impliqués

Module 1. Bassin versant du Gardon d'Anduze	Acteurs
1. 2007 Modélisation Gardénia / Implantation Gardénia	Ph. Stollsteiner D. Thiéry O.Cerdan
2. Validation par STREAM de la perméabilité sur 2002-	JF Desprats J.L. Izac

Module 2. Bassin versant du Touch Etats de saturation des terrains	Acteurs
1. Analyse ISBA / Mesures in situ	M. Saplaïroles J.F. Desprats, O. Cerdan
2. Modélisation Gardénia	Ph. Stollsteiner D. Thiéry

Module 3 : Rôle et contribution des karsts (Nîmes)	Acteurs
Nîmes : approche couplée hydrogéochemie/hydrogéologie / impact du karst sur les crues	N. Dorfliger B. Ladouche P. Fleury

5.2.3. Schéma de l'organisation et des responsabilités :



5.2.4. Les étapes du projet :

Principales étapes	2009											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Module 1 – GARDON Modélisation Analyse perméabilité. / Ruissellement Synthèse/Rapport	X	X X		X X								
Module 2. TOUCH ISBA / données humidité Modélisation STREAM Synthèse/Rapport	X	X	X	X X	X X	X X	X	X	X		X	X X
Module 3 – Karst Nîmes Modélisation Rapport	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X X

5.2.5. Equipe de projet

- **Chef de projet** : J.F. Desprats
- **Intervenants BRGM Orléans** : O. Cerdan, Ph. Stollsteiner, D. Thiéry, N. Baran
- **Intervenants BRGM en région** : J.L. Izac, M. Saplaïroles, N. Dorfliger, B. Ladouche, P. Fleury

5.2.6. Documents à remettre aux partenaires

Date prévue	Nature du document	Consistance	Nombre d'exemplaires	Destinataire principal
09 2009		Note avancement MEDD		MEEDDAT
12.2009	Rapport synthèse 2009	Rapport		SCHAPI

6. Bibliographie

Desprats J-F, M. Aubert, Baghdadi N., Baran N., Cerdan O., Dörfliger N., Fleury P., Ladouche B., Saplaïroles M., Ph. Stollsteiner, Thiéry, D. (2007). Appui aux actions SCHAPI : BVNE Gardon d'Anduze et Somme, Bassin versant du Touch. Rapport annuel « Année 5 » Janvier 2007 – Décembre 2007 - BRGM RP55869-FR, 169 p.

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.

Annexe 1

Compte-rendus de réunions / Missions

Réf. :

Montpellier, le 31-01-08

COMPTE RENDU DE RÉUNION	
Rédacteur : J.F. Desprats ARN/ESL	Entité :
Pour une diffusion externe : Visa et nom du responsable :	
Projet : Appui au SCHAPI	Numéro : PSP08ARN60
Objet : Réunion de projet SCHAPI, modules Gardon et Touch	
Date : 29 à Orléans (Gardon) et 30 /01/2008 (Touch)	Lieu : Orléans / Toulouse
Participants : Ph. Stollsteiner, D. Thiéry, O. Cerdan, M. Saplaïroles, J.F. Desprats	
Absents / Excusés : N. Baran	
Diffusion : Equipe de projet + T. Pointet	

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

1 Gardon d'Anduze

les discussions font suite au compte-rendu envoyé par T. Pointet suite à la réunion SCHAPI du 6/12/2007, puis à une discussion informelle qu'il a eu avec C. Wittwer et J.M. Tanguy

La validation des données d'entrée doit permettre la prise en compte d'un nombre d'évènements beaucoup plus important que les 4 évènements utilisés jusqu'ici. Cette phase nécessite l'accord du SCHAPI (C. Wittwer). P. Stollsteiner propose une réunion de travail à Nîmes avec O. Payrastré + DIREN LRO (gestionnaire de plusieurs stations) pour préparer une visite des différentes stations. Il sera alors à même de retravailler les courbes de tarage de ces différentes stations SPC + DIREN.

Un découpage en sous-bassins versants sera proposé avec EROS. La nécessité d'un nombre supérieur de stations justifie la prise en compte des stations DIREN.

Ensuite le travail de modélisation Gardenia sera entrepris par D. Thiéry,

<p>2. Touch Mesures humidité des sols Les mesures se poursuivront jusqu'à début juillet (moisson du blé sur parcelle Retenue) M. Saplaïroles et N. Baran analyseront les données depuis le début 2006 pour l'analyse de la relation entre humidité et débit. A quel stade le ruissellement est-il déclenché ? Quand s'arrête – t-il ? Peut-on faire un lien avec les informations de la cellule ISBA correspondant au site (M. Saplaïroles va voir avec SCHAPI comment obtenir les données ISBA sur ce secteur / contact avec A. Marchandise) Réflexion sur une publication pour 2009 sur la manip</p> <p>La manip de modélisation Gardenia proposée sur Gardon sera reprise sur le Touch afin de finaliser les travaux sur ce BV. Une analyse critique des données d'entrée pluie-débit sera faite par P. Stollsteiner, après discussion avec N. Vatrïn (réunion à prévoir par M. Saplaïroles, puis visite des 2 stations limni) Puis modélisation Gardenia par D. Thiery</p> <p>Juillet 2008 : récupération du matériel sur les 2 parcelles</p>
<p>3 – Somme</p> <p>Gardenia doit être implanté au plus tôt sur DEMETER, après contact entre D. Thiéry et R. Sarralde, remplaçant d'O. Louis au SCHAPI</p>

Action	Responsable	Délai	Soldé
Contact avec C. Wittwer pour l'accord sur l'analyse des données SPC+DIREN afin d'intégrer le plus grand nombre d'évènements possible	JF Desprats	février.	
Contact avec R. Sarralde pour implémenter Gardenia sur DEMETER	D. Thiéry	février	
Récupération des rapports d'étude CEMAGREF / IMFT sur Gardon	J.F. Desprats	février	
Mise en place réunion Ph. Stoll / N. Vatrïn / M. Saplaïroles / Analyse critiques données pluies/débits	M. Saplaïroles	mars	
Suivi des sites	M. Saplaïroles	Février à juillet	
Analyse données	N. Baran / M. Saplaïroles	juillet	

Réf. :

Montpellier, le 28-03-08

COMPTE RENDU DE RÉUNION	
Rédacteur : J.F. Desprats ARN/ESL	Entité :
Pour une diffusion externe : Visa et nom du responsable :	
Projet : Appui au SCHAPI	Numéro : PSP08ARN60
Objet : Réunion de projet SCHAPI, module Karst	
Date : 27 mars à Montpellier	Lieu : Montpellier
Participants : C. Wittwer, A. Marchandise, B. Jannet (SCHAPI), V. Montel (SPC Méditerranée Ouest), S. Pistre, C. Bouvier, V. Borrel Estupina (HSM Montpellier), P.A. Ayrat, A. Johannet (Ecole Mines Alès), N. Dorfliger, B. Ladouche, P. Fleury, J.F. Desprats (BRGM)	
Absents / Excusés : CEMAGREF Anthony, SPC Nîmes	
Diffusion : Présents + T. Pointet + N. Lenotre + M. Audibert	

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Fin 2007, lors d'une réunion BVNE à Toulouse le SCHAPI a demandé à T. Pointet l'organisation d'une réunion avec les différents acteurs sur la modélisation en milieu karstique, l'idée étant d'avancer vers un BVNE karst, en complément des 3 BVNE existants : Somme (crués de nappe), Gardon d'Anduze (Crués rapides), Meuse (Crués de plaine)

1 Présentations par BRGM, HSM, EMA et CEMAGREF (PowerPoint envoyé à C. Wittwer) des travaux en cours ou réalisés

BRGM (N. Dorfliger, B. Ladouche, P. Fleury)

Présentation des travaux en cours sur Nîmes, puis sur le bassin du Lez : modèles imbriqués avec fonctions de transfert, mais aussi modèle à réservoir (développé sous VENSIM). Existence de débordement au niveau des systèmes karstiques, provenant soit de mises en charge de la zone saturée en eau, soit de saturation en eau au niveau d'un épikarst (celui-ci peut être discontinu spatialement).

En 2008 test de méthodologie d'intégration des données radar dans les modèles à fonction de transfert. Prise en compte de données à un pas de temps < 1 jour, indispensable.

Objectif : fournir sur Nîmes des seuils d'alerte à la ville en (i) assimilant les données spatiales, (ii) intégrant les notions de seuils de débordement, (iii) intégrant les fonctions de transfert du karst.

Les débits de la source mais aussi de cadereaux sont reconstitués en intégrant en plus des pluies optimisées, des niveaux piézométriques avec débordement en tête de bassins versants.

Hydrosciences (C. Bouvier, V. Estupina, S. Pistre)

Présentation des travaux sur le Coulazou et le Lez

Prise en compte d'un BV amont classique, avec traversée d'un système karstique (Arboras)

Sur le Lez, travaux commun avec le BRGM dans le cadre de l'IFR ILEE, mise en évidence du rôle de l'état de saturation du karst sur les crues. Des questions restent posées : quels sont les seuils de débordement du karst, quelle en est la variabilité spatiale ? Le rôle de l'humidité des sols. HSM dispose de la plateforme ATHYS qui est déjà utilisé sur d'autres BVNE (Anduze), notamment.

Présentation par S. Pistre d'une étude sur la prédétermination des crues souterraines extrêmes en milieu karstique, par remontée de niveaux d'eau souterraine sous un bâtiment.

EMA (A. Johannet, PA Ayrat)

Présentation des travaux de modélisation des systèmes karstiques à l'aide des modèles issus de la théorie des systèmes (neurones) – application au karst du Buget (Pyrénées)

CEMAGREF (par l'intermédiaire de C. Wittwer)

Présentation des travaux menés sur le système karstique de la Rochefoucaud, modélisation à l'aide du modèle GR4 (développé au CEMAGREF), avec prise en compte des débits de cours d'eau à l'amont de pertes, vu que le système karstique de la Touvre est un système binaire (alimentation par les pertes et par les précipitations).

2 vers un BVNE karst

C. Wittwer : Comment identifier un BVNE « karst » tel que les BVNE Gardon, Somme ou Meuse ? Le BV choisi doit intéresser les SPC, être le terrain d'expérimentation de plusieurs équipes (terrain et modélisation), disposer de données météo, ETP, hydro, piézo.. ,

V. Montel : les données SPC seront mises à dispo sur site en zone Méditerranée Ouest (pas de temps 5', envoi en temps réel possible). Idem données radar. V. Montel propose 4 bassins sur sa région : Vis (affluent de l'Hérault à Ganges), Hérault (station de Valleraugue), Lez et Cesse (affluent de l'Aude, St Pons-de-Tommières). Les attentes du SPC sont de pouvoir disposer de modèles en temps réel pour la prévision, prenant en considération les caractéristiques du karst.

C. Wittwer précise les besoins du SPC Grand Delta, en termes de méthodologie de modélisation pour des BV avec la présence de karst.

Le BV du Lez (à Lavalette) semble faire l'unanimité pour différentes raisons : plusieurs équipes ont des travaux en cours ou futur (projet sur 3 ans à partir de 2009 dans le cadre du CPER) qui seront complémentaires en termes de moyens. Des données sont disponibles, le SPC est prêt à mettre à disposition les données nécessaires qu'il a.

Le Schapi nommera un correspondant BVNE karst – Lez.

Action	Responsable	Délai	Soldé
Validation du BVNE karst-Lez en concertation avec SPC + acteurs	SCHAPI		

Orléans, le 08 juillet 2008

COMPTE RENDU DE VISITE	
Rédacteur : STOLLSTEINER P . EAU-ADM	Entité :
Pour une diffusion externe : oui Visa et nom du responsable :	
Projet :SCHAPI – GARDON D'ANDUZE	Numéro : PSP07REU32
Objet : Visite des stations hydrométriques	
Date : 19 juin 2008	Lieu : GARD
Participants : DDE /SPC (BAMBAGIOTTI Bernard), BRGM (STOLLSTEINER Philippe.)	
Absents : -	
Diffusion : DDE /SPC, BRGM, SCHAPI	

1 – Objet de la visite

Sur le bassin versant du Gardon d'Anduze, on recense actuellement cinq stations hydrométriques :

- trois gérées depuis plusieurs années par la DDE/SPC du Gard,
- deux qui étaient gérées, jusqu'à l'année dernière, par la DIREN.

La comparaison des hydrogrammes des crues observées à ces différentes stations ont permis de constater :

- une bonne cohérence dans la forme des hydrogrammes,
- une différence significative entre la somme des débits des stations DIREN et les débits de la station d'Anduze lors des événements de fréquence rare.

Avant et afin de réaliser une modélisation en grappe des différents sous bassins versant à l'aide du logiciel EROS du BRGM, il est apparu nécessaire de vérifier l'exactitude des courbes de tarage de ces différentes stations, notamment en très hautes eaux : c'est l'objet de cette visite.

2 – Stations visitées et informations collectées :

2.1 Station DDE/SPC de Mialet

- Localisation (GPS) : N 44° 07,552 mn – E 03° 54,569 mn
- Levé topographique et modélisation hydraulique d'écoulement à surface libre réalisés par SIEE (2004)
- prise de pression située sous gros rocher (section P19 du levé)
- pont situé en aval de la station (profil P9) : possibilité de jaugeage de moyennes eaux

2.2 Ancienne station « historique » du pont de

- Localisation (GPS) : N 44° 06,706 mn – E 03° 56,343 mn
- Pas de courbe de tarage
- Photographie des échelles

2.3 Station DIREN : Gardon de Mialet à Generargues (Roucan) :

- Localisation (GPS) : N 44° 04,780 mn – E 03° 57,982 mn
- Pas de levé topographique
- prise de pression et échelle en amont RG du seuil avec armoire situé contre la paroi rocheuse
- Seuil épais sans pelle avec hauteur de chute d'environ 3 m (moins en rive droite) et longueur de la crête du seuil voisine de 50 m.
- Prise d'eau d'irrigation en RG.
- Photographies du seuil

2.4 Station DIREN Gardon de Saint Jean à Corbes (Roc Courbe):

- Localisation (GPS) Enregistreur : N 44° 04,407 mn – E 03° 57,659 mn
- Pas de levé topographique
- prise de pression et échelle 170 m en amont RD du seuil avec armoire situé contre la paroi rocheuse
- Seuil épais avec très peu de pelle, hauteur de chute d'environ 1,3 m et longueur de la crête du seuil voisine de 55 m. (N 44° 04,479 mn – E 03° 57,726 mn)
- Photographies du seuil
- Pont comportant 7 arches situé en aval du seuil, longueur voisine de 54 m.

2.5 Station DDE/SPC d'ANDUZE :

- Localisation (GPS) Enregistreur : N 44° 03,610 mn – E 03° 59,094 mn
- Limni bulle à bulle, échelle, enregistreur en RG de la nationale
- Levé topographique et modélisation hydraulique d'écoulement à surface libre réalisés par SIEE
- Photographies de la section P16 (sous pont SNCF)
- Il y a également, en aval, une batterie d'échelles de crue située au droit du pont routier d'Anduze (section P9)

3 – Exploitations des informations collectées:

3.1. Station du gardon de Mialet à Généragues (Roucan) : V7124010

- Bassin versant de 240 km²
- Mise en service le 01/01/1962, altitude : 140 m
- Seuil existant réalisé le :
- Hauteur maximale instantanée observée : 633 cm le 08/09/02
- Débit maximal instantané correspondant : 749 m³/s
- Courbe de tarage actuelle :
 - 1,88 m < h < 3,17 m : $Q = -65,084 h^2 + 513,34 h - 496,17$
 - 3,17 m < h : $Q = -4,3995 h^2 + 128,6 h + 114,83$

Vu la configuration de la station, il apparaît possible d'utiliser, en première estimation, une loi hauteur débit

correspondant à un seuil épais sans pelle. Pour les très hautes eaux, les levés topographiques commandés par DDE/SPC, non encore réalisés, devraient permettre, à l'aide d'un calcul hydraulique de ligne d'eau de préciser s'il y a ou non influence d'aval et, dans ce cas de préciser la relation hauteur débit à utiliser pour les cotés supérieures.

Pour les faibles débits la courbe devra être précisée à l'aide de jaugeages.

La relation hauteur débit pour un seuil épais sans pelle est de la forme :

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} = \mu L H (2gH)^{0,5}$$

Avec :

L : longueur du seuil (m) ; H : charge hydraulique (m) et

μ : coefficient de débit, compris entre 0,37 et 0,39 (expérience de Bazin), souvent pris égal à 0,385.

Soit en développant : $Q = a. L H^{1.5}$ avec $1,64 < a < 1,72$

En supposant une longueur de seuil de 50 m (à vérifier et corriger à réception du relevé topographique) on obtient la formule provisoire :

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} = 82 H^{1.5}$$

Cette formule d'estimation des débits peut être considérée comme valable pour un fonctionnement normal du seuil (dénoyé).

Nota bene : D'après un levé sommaire d'une section située en aval le seuil pourrait ne pas être noyé pour la charge maximale observée si la pente de l'écoulement en aval du seuil est voisine de 2%.

Charge (m)	Débit C.T. actuelle (m ³ /s)	Débit Loi de seuil (m ³ /s)
1,88	239	211
3,17	477	463
4,48	604	778
5,36	675	1020
6,33	752	1300

3.2. Station du gardon de Saint Jean à Corbes : V7135010

- Bassin versant de 263 km²
- Mise en service le 01/11/1966, altitude : 136 m
- Seuil existant réalisé le :
- Hauteur maximale instantanée observée : 489 cm le 14/10/95
- Débit maximal instantané calculé : 721 m³/s le 09/09/02 (h=)
- Courbe de tarage actuelle :
 - 0,87 m < h < 3,46 m : $Q = 17,927 h^2 + 122,56 h - 75,373$
 - 3,46 m < h : $Q = -80 h^2 + 800 h - 1250$

Vu la configuration de la station, il apparaît possible d'utiliser, en première estimation, une loi hauteur débit correspondant à un seuil épais sans pelle. Cette relation ne peut toutefois être considérée comme valide que lorsque le seuil est dénoyé, c'est à dire pour des débits relativement limités.

En supposant une longueur de seuil de 50 m (à vérifier lors du relevé topographique) on obtient une formule provisoire de :

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} = 90 H^{1.5}$$

Avec :

L : longueur du seuil (m) ; H : charge hydraulique (m) et

μ : coefficient de débit, compris entre 0,37 et 0,39 (expérience de Bazin), souvent pris égal à 0,385.

Pour les hautes eaux, la présence du pont situé à l'aval va limiter les écoulements et favoriser un niveau aval haut. Les levés topographiques commandés par DDE/SPC, non encore réalisés, devraient permettre, à l'aide d'un calcul hydraulique de ligne d'eau d'estimer la gamme des débits pour lesquels il y a fonctionnement noyé ou dénoyé.

Afin d'estimer la relation hauteur débit des hautes eaux, il apparaît nécessaire d'utiliser un logiciel permettant de modéliser au mieux les pertes de charge au droit de ce pont. Pour les très hautes eaux (débordement par-dessus le pont), le pont pourra éventuellement être considéré, s'il y a lieu, comme un seuil épais.

Charge (m)	Débit C.T. actuelle (m ³ /s)	Débit Loi de seuil (m ³ /s)
0.87	46	73
2	241	254
3	454	468

Nota bene : D'après un levé sommaire des cotes des ouvrages et de la section du pont, celui-ci devrait se mettre en charge pour un débit inférieur à 400 m³/s, ce qui impliquerait également l'enneigement du seuil.

4 Conclusion

La visite du site et l'exploitation des observations récoltées montrent que les courbes de tarage des anciennes stations de la DIREN sont délicates à établir (notamment celle de Corbes) et nécessitent des modélisations hydrauliques d'écoulement à surface libre. Celles-ci nécessitent la réalisation de levés topographiques qui ont été commandés par la DDE/SPC et qui devraient être réalisés durant l'été.

Une évaluation rapide des courbes de tarage permet toutefois de penser que les débits de très hautes eaux ($h > 3.5$ m) ont été probablement sous estimés au droit de la station de Généragues.

La DDE/SPC va s'équiper d'un logiciel d'hydraulique à surface libre (Mascaret) afin de réaliser ces modèles. Le BRGM se propose de l'assister, si DDE/SPC en éprouve le besoin, lors de la construction et/ou exploitation de ces modèles et/ou lors de l'établissement des courbes de tarage.

Après re-calcul des débits de crue, la DDE/SPC transmettra les nouvelles données au BRGM qui pourra alors réaliser une modélisation hydrologique EROS avec les débits des cinq stations du bassin versant du Gardon d'Anduze. Cette modélisation permettra également de vérifier la cohérence globale des différentes courbes de tarage.

5 – Actions à venir :

- Réalisation des levés topographiques (prestations externes commandées par DDE/SPC).
- Construction et exploitation des modèles (DDE/SPC avec assistance éventuelle du BRGM),
- Elaboration des courbes de tarage (DDE/SPC avec assistance éventuelle du BRGM),
- Modélisation EROS des différents bassins versants (BRGM)

Montpellier, le 24 septembre 2008

COMPTE RENDU DE REUNION	
Rédacteur : J.F. Desprats . ARN/ESL	Entité :
Pour une diffusion externe : oui Visa et nom du responsable :	
Projet :SCHAPI – Touch	Numéro : PSP08ARN60
Objet : Réunion avancement module Touch	
Date : 22 septembre 2008	Lieu : Orléans
Participants : Stollsteiner Philippe, Baran Nicole, Desprats J.François, M. Saplaïroles	
Diffusion : participants	

1 – BV Touch

Compte-rendu de la visite de P. Stollsteiner sur le BV du Touch. Contrairement aux stations du Gardon d'Anduze, PhS explique que les données de débit (Berat / St Martin) sont parfaitement exploitables pour les modélisations Gardenia. Demande à faite par J.F.D et M. Saplaïroles à N. Watrin (SCHAPI) des données de pluie pour la série d'évènements suivante (sélectionnés par A. Marchandise):

1. 12 mars 88 au 20 mars 1988
2. 17 avril 88 au 25 avril 88
3. 2 mai 91 au 11 mai 91
4. 4 juin 92 au 13 juin 92
5. 18 septembre 93 au 26 septembre 93
6. 19 décembre 93 au 26 décembre 93
7. 15 février 96 au 26 février 96

8. 4 juin 2000 au 13 juin 2000

9. 29 mai 2002 au 6 juin 2002

10. 20 janvier 2003 au 5 février 2003

12. 20 mai 2007 au 27 mai 2007

plus les évènements de 2008 (si c'est plus simple toutes les données de janvier 2008 à juillet).

Station limni du site de St Lys : récupération des données par Ph. Stoll. Nécessité d'une calibration qui s'appuiera sur les photos de terrain prises à intervalle régulier, afin de prendre en compte en particulier les différents aménagements.

Ph.S. précise qu'un aménagement doit être fait en septembre (suppression de la plaque)

2 – Mesures in situ sur St Lys :

Les sites ont été désinstallés en juillet. Les mesures doivent être validées par M. Saplaïroles, afin de permettre une évaluation pour la fin de l'année. Point noir : très peu d'évènements pluvio majeur au cours de la dernière année (sauf peut être au printemps 2008)

L'objectif est d'arriver en 2009 à analyser conjointement les pluies-débits avec l'évolution de l'humidité et de finaliser ces travaux St Lys par une publi à caractère technique (N. Baran, M. Saplaïroles) (relation avec les données ISBA ?)

Réf. :

Montpellier, le 17/11/08

COMPTE RENDU DE RÉUNION	
Rédacteur : J.F. Desprats ARN/ESL	Entité :
Pour une diffusion externe : Visa et nom du responsable :	
Projet : Appui au SCHAPI	Numéro : PSP08ARN60
Objet : Réunion de projet SCHAPI, modules Karst et Touch	
Date : 17 novembre	Lieu : Montpellier
Participants : C. Wittwer, A. Marchandise (SCHAPI), N. Dorfliger, B. Ladouche, P. Fleury, J.F. Desprats, M. Saplaïroles (BRGM)	
Absents / Excusés : SPC Garonne, SPC Nîmes , Ph. Stollsteiner, D. Thiery, N. Baran	
Diffusion : Présents + T. Pointet + N. Lenotre + M. Audibert + Ph. Roubichou	

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

L'objectif de cette réunion de projet est d'une part la présentation des travaux 2008 sur les modules Touch et Karst, d'autre part la définition des objectifs pour 2009, 3^{ème} année de la convention triennale 2007-2009 entre le BRGM et le MEEDDAT.

Le module Gardon sera traité lors de la réunion BVNE organisée au SCHAPI le 25 novembre 2008.

Par rapport à l'implantation de Gardenia concernant les modules Gardon et Somme, rappel des contacts en cours entre D. Thiéry (BRGM) et I. Tonnelier (SCHAPI).

1 Module Touch

1.1. Présentation travaux BRGM « indicateur d'humidité » sur St Lys

M. Saplaïroles présente le suivi de l'humidité des sols sur les deux sites du bassin de St-Lys, « Retenue » et « Souléris ». La chronique sur « Retenue » va de février 2006 à juillet 2008. Sur Souléris, les acquisitions ont été très perturbées en 2008. Si les humidités en surface diffèrent entre les deux sites, elles sont relativement homogènes en profondeur.

Le bassin du Touch est devenu un bassin réglementaire donc contrôlé par le SPC.

La porosité, évaluée à 55-60% apparaît comme élevée, mais reste cohérente par rapport aux mesures d'humidité faites sur les prélèvements. Question sur la calibration à valider par N. Baran. La relation entre humidités pondérale et volumique est plus solide en profondeur qu'en surface.

Les sites de mesure ont été enlevés en juillet 2008. C. Wittwer juge nécessaire le maintien de la station DIREN à l'exutoire du BV de St Lys pour la poursuite des modélisations. Lorsque Ph. Stollsteiner aura fini la validation de ces mesures, le fichier sera transmis à A. Marchandise pour des tests de modélisations avec GR.

Pour 2009, les pistes de travail envisagées sont les suivantes :

1. confronter les chroniques de mesures d'humidité aux valeurs ISBA superficielles et profondes (WG2 1,5m). Les données ISBA seront récupérées auprès du SCHAPI (JFD) pour être transmis à M. Saplaïroles.
2. modélisation pluie/débit sur St Lys avec Gardenia (Ph. Stoll) et GR ((A. Marchandise)
3. Mesures in situ de ruissellement (simulateur à louer auprès de l'INRA Orléans) pour évaluer la variabilité des coefficients de ruissellement.
4. Modélisation Gardenia sur le bassin du Touch, sur les événements précisés par A. Marchandise.

1.2. Présentation des modélisations GR sur le Touch (A. Marchandise)

Etude de l'influence de l'humidité des sols (prise en compte des données SIM Safran-ISBA-Modcou) avec 12 événements sur St Martin et 10 événements sur Bérat. (crues essentiellement en hiver et printemps)

2 Module karst

Présentation des travaux 2008 par P. Fleury autour de 2 axes : la modélisation avec Tempo des débits dans les cadreaux de l'aquifère nîmois et la définition d'un seuil d'alerte basé sur la piézométrie. Ces travaux sont réalisés dans le double contexte SCHAPI / Mairie de Nîmes. (le SPC ne gère pas le secteur de Nîmes, mais le Vistre, qui « récupère » les écoulements amont venant de Nîmes).

Les 4 crues majeures utilisées sont 1988, 1998, 2002 et 2005.

Utilisation de la relation Pluie – Piézométrie en tant que seuil d'alerte, donc possibilité de donner un ordre de grandeur « Débit issu de la composante karst » qui pourrait être rentré dans ESPADA, pour les gros événements, afin de tenir compte de l'apport des karsts.

Le SCHAPI souhaiterait disposer des BV hydrogéologiques sur les zones d'intérêt. N. Dörfliger précise qu'il n'existe pas une telle donnée au niveau national, mais des limites au cas par cas en fonction des études. Le référentiel hydrogéologique existe à l'échelle nationale, avec plusieurs niveaux, dont un niveau 3 détaillé à l'échelle régionale, où des limites des bassins versants hydrogéologiques karstiques peuvent être intégrés. L'avancement de ce travail se fait au niveau des bassins des agences de l'eau, avec des harmonisations d'une région à l'autre. Le BRGM se renseigne auprès du responsable de la coordination de ce travail pour connaître les échéances prévues et les avancements de ce travail.

Pour 2009, les pistes de travail sont :

Prises en compte des pluies spatialisées. A. Marchandise précise que MétéoFrance est en train de calibrer ces données pour les événements passés. Les données CALAMAR sont cependant disponibles pour la crue de 2005. Une convention BRGM/SCHAPI pourrait être définie pour une mise à disposition des données radar pour 2002 et 2005.

Sur le Gardon d'Anduze, la pluie du 12 septembre 2006 semble montrer un fort impact du karst situé au nord d'Anduze (le piézomètre Pont Saint Nicolas confirme que le karst initialement dessaturé s'est rempli, expliquant les faibles débits enregistrés à l'exutoire). Ceci demande à être confirmé à partir de crues de septembre, sur sols tout aussi secs, mais plutôt localisés en zone de socle. Une analyse détaillée est nécessaire concernant les limites des bv hydrogéologiques sur la zone karstique, le rôle du karst, etc.. à partir des techniques d'analyse développées sur le site de Nîmes à l'aide de TEMPO, notamment.

Reprise des discussions autour du projet de BVNE Karst –Lez évoqué lors de la réunion en mars dernier. N. Dörfliger rappelle que le projet CPER sur le Lez avec la ville de Montpellier débute en 2009. Le SPC

Méditerranée Ouest sera invité aux réunions du projet tout comme le SCHAPI. Il pourra être défini en cours du deuxième semestre 2009, des axes de recherche pour la convention future SCHAPI BRGM pourront être définis.

Actions 2009 envisagées

Les discussions entre le SPC Méditerranée Ouest et le BRGM quant à la demande du SPC (V. Montel) relative à un indicateur sur la perméabilité des sols sont évoquées.

La possibilité serait un montage de projet type SUDOE porté par le SCHAPI, où le BRGM interviendrait en tant que prestataire pour le SPC Méditerranée Ouest. Le SCHAPI dispose de partenaires potentiels coté espagnol.

Le SCHAPI est intéressé par les travaux de V. Mardhel sur la définition d'un indicateur global de perméabilité (IDPR) à partir d'une analyse géomorphologique prenant en compte le MNT, la géologie, la BV Carthage, ...

Une réunion début 2009 au SPC Carcassonne pourrait être organisée autour des deux thèmes que sont :

- Le BVNE karst
- La perméabilité des sols sur l'ensemble de la zone couverte par le SPC

Actions : J.F. Desprats / C. Wittwer avec V. Montel

Action	Responsable	Délai	Soldé
Validation des objectifs 2009	C. Wittwer	Fin nov 08	
Reprise des objectifs dans le rapport annuel	J.F. Desprats	Fin déc. 08	

Annexe 2

Journal des visites de terrain (novembre 2007 – juillet 2008)

30 novembre 2007

- Déchargements des données et lancement de nouvelles acquisitions
 - Déchargement des données pour la parcelle « Retenue » et programmation nouvelle (pas de temps de 2h). Fin de l'acquisition des données au 16 novembre 2007.
 - Disfonctionnement des sondes à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1, à 40 cm de profondeur dans la fosse n°2 et à 10 cm dans la fosse n°3 : aucune donnée disponible,
 - Fonctionnement par intermittence de la sonde à 30 cm de profondeur dans la fosse n°2 de la parcelle « Retenue »,
 - Remplacement de la batterie de la centrale d'acquisition TRASE pour « Retenue »
- Relevés des niveaux piézométriques sur les 2 puits situés sur les parcelles instrumentées,
- Déchargements des données des cannes tensiométriques sur les 2 parcelles
- Déchargement des données pluviométriques et des débits enregistrés à la station d'acquisition installée par la DIREN Midi-Pyrénées.
- Prélèvements d'échantillons de sols tous les 10 cm et jusqu'à 60 cm de profondeur à l'aide d'une tarière à main dans chacune des 2 parcelles destinés à des mesures de teneurs en eau pondérales,

11 janvier 2008

- Déchargements des données et lancement de nouvelles acquisitions
 - Déchargement des données pour la parcelle « Retenue » et programmation nouvelle (pas de temps de 2h). Fin de l'acquisition des données au 22 décembre 2007.
 - Problèmes analogues à ceux constatés le 30 novembre 2007 : disfonctionnement des mêmes sondes.
 - Remplacement de la batterie de la centrale d'acquisition TRASE pour « Retenue »
- Déchargements des données des cannes tensiométriques sur les 2 parcelles
- Déchargement des données pluviométriques et des débits enregistrés à la station d'acquisition installée par la DIREN Midi-Pyrénées,
- Prélèvements d'échantillons de sols tous les 10 cm et jusqu'à 60 cm de profondeur à l'aide d'une tarière à main dans chacune des 2 parcelles destinés à des mesures de teneurs en eau pondérales,

25 janvier 2008

- Déchargements des données et lancement de nouvelles acquisitions
 - Déchargement des données pour la parcelle « Retenue » et programmation nouvelle (pas de temps de 2h). Fin de l'acquisition des données au 19 janvier 2008.
 - Disfonctionnement des sondes à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 et à 40 et 50 cm de profondeur dans la fosse n°2 : aucune donnée disponible,
 - Remplacement de la batterie de la centrale d'acquisition TRASE pour « Retenue »

- Réinstallation de la centrale d'acquisition de « Souleris » : après nettoyage des différents composants, une série de test a été réalisée afin de contrôler son fonctionnement. Aucune anomalie n'a été identifiée, les différents tests donnant des résultats cohérents.
- Déchargements des données des cannes tensiométriques sur les 2 parcelles
- Déchargement des données pluviométriques et des débits enregistrés à la station d'acquisition installée par la DIREN Midi-Pyrénées

08 février 2008

- Déchargements des données et lancement de nouvelles acquisitions
 - Déchargement des données pour les 2 parcelles et programmation nouvelle (pas de temps de 2h). Récupération complète des données pour la parcelle « Retenue » et fin de l'acquisition le 01 février 2008 pour Souleris.
 - Disfonctionnement de 2 sondes à Retenue, à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 et à 40 cm de profondeur dans la fosse n°2 : aucune donnée disponible,
 - Fonctionnement très aléatoire des différentes sondes de Souleris : peu de données ont pu être récupérées,
 - Remplacement des batteries des centrales d'acquisition TRASE pour les 2 parcelles,
- Déchargements des données des cannes tensiométriques sur les 2 parcelles
- Déchargement des données pluviométriques et des débits enregistrés à la station d'acquisition installée par la DIREN Midi-Pyrénées,
- Prélèvements d'échantillons de sols tous les 10 cm et jusqu'à 60 cm de profondeur à l'aide d'une tarière à main dans chacune des 2 parcelles destinés à des mesures de teneurs en eau pondérales,
- Relevés des niveaux piézométriques sur les 2 puits situés sur les parcelles instrumentées,

21 février 2008

- Déchargements des données et lancement de nouvelles acquisitions
 - Déchargement des données pour les 2 parcelles et programmation nouvelle (pas de temps de 2h). Récupération complète des données pour Retenue et fin de l'acquisition le 10 février 2008 pour Souleris.
 - Disfonctionnement notable de la quasi-totalité des sondes de Retenue à partir du 10 février : peu de données cohérentes (valeur zéro affichée),
 - Fonctionnement très aléatoire des différentes sondes de Souleris : peu de données ont pu être récupérées,
 - Remplacement des batteries des centrales d'acquisition TRASE pour les 2 parcelles,
- Déchargements des données des cannes tensiométriques sur les 2 parcelles.

- Déchargement des données pluviométriques et des débits enregistrés à la station d'acquisition installée par la DIREN Midi-Pyrénées,

06 mars 2008

- Déchargements des données et lancement de nouvelles acquisitions
 - Déchargement des données pour les 2 parcelles et programmation nouvelle (pas de temps de 2h). Récupération complète des données pour Retenue et fin de l'acquisition le 01 mars 2008 pour Souléris.
 - Disfonctionnement notable de la quasi-totalité des sondes de Retenue : peu de données cohérentes (valeur zéro affichée),
 - Fonctionnement très aléatoire des différentes sondes de Souléris : peu de données ont pu être récupérées,
 - Remplacement des batteries des centrales d'acquisition TRASE pour les 2 parcelles,
- Déchargements des données des cannes tensiométriques sur les 2 parcelles.
- Déchargement des données pluviométriques et des débits enregistrés à la station d'acquisition installée par la DIREN Midi-Pyrénées,
- Relevés des niveaux piézométriques sur les 2 puits situés sur les parcelles instrumentées.

19 mars 2008

- Déchargements des données et lancement de nouvelles acquisitions
 - Déchargement des données pour les 2 parcelles et programmation nouvelle (pas de temps de 2h). Récupération complète des données pour Retenue et fin de l'acquisition le 08 mars 2008 pour Souléris.
 - Fonctionnement très aléatoire des différentes sondes de Souléris : peu de données ont pu être récupérées,
 - Remplacement des batteries des centrales d'acquisition TRASE pour les 2 parcelles,
- Déchargements des données des cannes tensiométriques sur les 2 parcelles.
- Déchargement des données pluviométriques et des débits enregistrés à la station d'acquisition installée par la DIREN Midi-Pyrénées,
- Prélèvements d'échantillons de sols tous les 10 cm et jusqu'à 60 cm de profondeur à l'aide d'une tarière à main dans chacune des 2 parcelles destinés à des mesures de teneurs en eau pondérales,

15 avril 2008

- Déchargements des données et lancement de nouvelles acquisitions
 - Déchargement des données pour les 2 parcelles et programmation nouvelle (pas de temps de 2h). Arrêt de l'acquisition des données au 24 mars pour « Retenue » et au 22 mars pour « Souléris ».
 - Disfonctionnement notable de la quasi-totalité des sondes de Retenue : peu de données cohérentes (valeur zéro affichée),
 - Fonctionnement très aléatoire des différentes sondes de Souléris : peu de données ont pu être récupérées,
 - Remplacement des batteries des centrales d'acquisition TRASE pour les 2 parcelles,
- Déchargements des données des cannes tensiométriques sur les 2 parcelles.
- Déchargement des données pluviométriques et des débits enregistrés à la station d'acquisition installée par la DIREN Midi-Pyrénées,
- Prélèvements d'échantillons de sols tous les 10 cm et jusqu'à 60 cm de profondeur à l'aide d'une tarière à main dans chacune des 2 parcelles destinés à des mesures de teneurs en eau pondérales,
- Relevés des niveaux piézométriques sur les 2 puits situés sur les parcelles instrumentées.

19 mai 2008

- Déchargements des données et lancement de nouvelles acquisitions
 - Déchargement des données pour les 2 parcelles et programmation nouvelle (pas de temps de 2h). Arrêt de l'acquisition des données au 01 mai pour « Retenue ».
 - Seules les sondes de Retenue situées entre 30 et 100 cm de profondeur dans la fosse n°3 et celle implantée à 100 cm dans la fosse n°1 ont fonctionné,
 - Disfonctionnement quasi-général des sondes implantées dans les différentes fosses de Souléris,
 - Remplacement des batteries des centrales d'acquisition TRASE pour les 2 parcelles,
- Déchargements des données des cannes tensiométriques sur les 2 parcelles.
- Déchargement des données pluviométriques et des débits enregistrés à la station d'acquisition installée par la DIREN Midi-Pyrénées,
- Relevés des niveaux piézométriques sur les 2 puits situés sur les parcelles instrumentées.

10 juin 2008

- Déchargements des données et lancement de nouvelles acquisitions
 - Déchargement des données pour les 2 parcelles et programmation nouvelle (pas de temps de 2h). Arrêt de l'acquisition des données au 01 juin pour « Retenue ».
 - Seules les sondes de Retenue situées entre 30 et 100 cm de profondeur dans la fosse n°3 et celle implantée à 100 cm dans la fosse n°1 ont fonctionné,
 - Disfonctionnement quasi-général des sondes implantées dans les différentes fosses de Souléris,
 - Remplacement des batteries des centrales d'acquisition TRASE pour les 2 parcelles,
- Déchargements des données des cannes tensiométriques sur les 2 parcelles.
- Déchargement des données pluviométriques et des débits enregistrés à la station d'acquisition installée par la DIREN Midi-Pyrénées,
- Prélèvements d'échantillons de sols tous les 10 cm et jusqu'à 60 cm de profondeur à l'aide d'une tarière à main dans chacune des 2 parcelles destinés à des mesures de teneurs en eau pondérales,

04 juillet 2008

- Déchargements des données et lancement de nouvelles acquisitions
 - Déchargement des données pour les 2 parcelles. Arrêt de l'acquisition des données au 23 juin pour « Retenue » et au 15 juin pour Souléris
 - Disfonctionnement notable des sondes de Retenue : peu de données cohérentes (valeur zéro affichée). Seules les sondes situées entre 30 et 100 cm de profondeur dans la fosse n°3 et celle implantée à 100 cm dans la fosse n°1 ont fonctionné en continue
 - Fonctionnement très aléatoire des différentes sondes de Souléris : peu de données ont pu être récupérées,
 - Remplacement des batteries des centrales d'acquisition TRASE pour les 2 parcelles,
- Déchargements des données des cannes tensiométriques sur les 2 parcelles.
- Déchargement des données pluviométriques et des débits enregistrés à la station d'acquisition installée par la DIREN Midi-Pyrénées,
- Désinstallation de l'ensemble du matériel de mesure (TDR + cannes tensiométriques) sur les 2 parcelles



Centre scientifique et technique
Service Aménagement et Risques Naturels
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34