

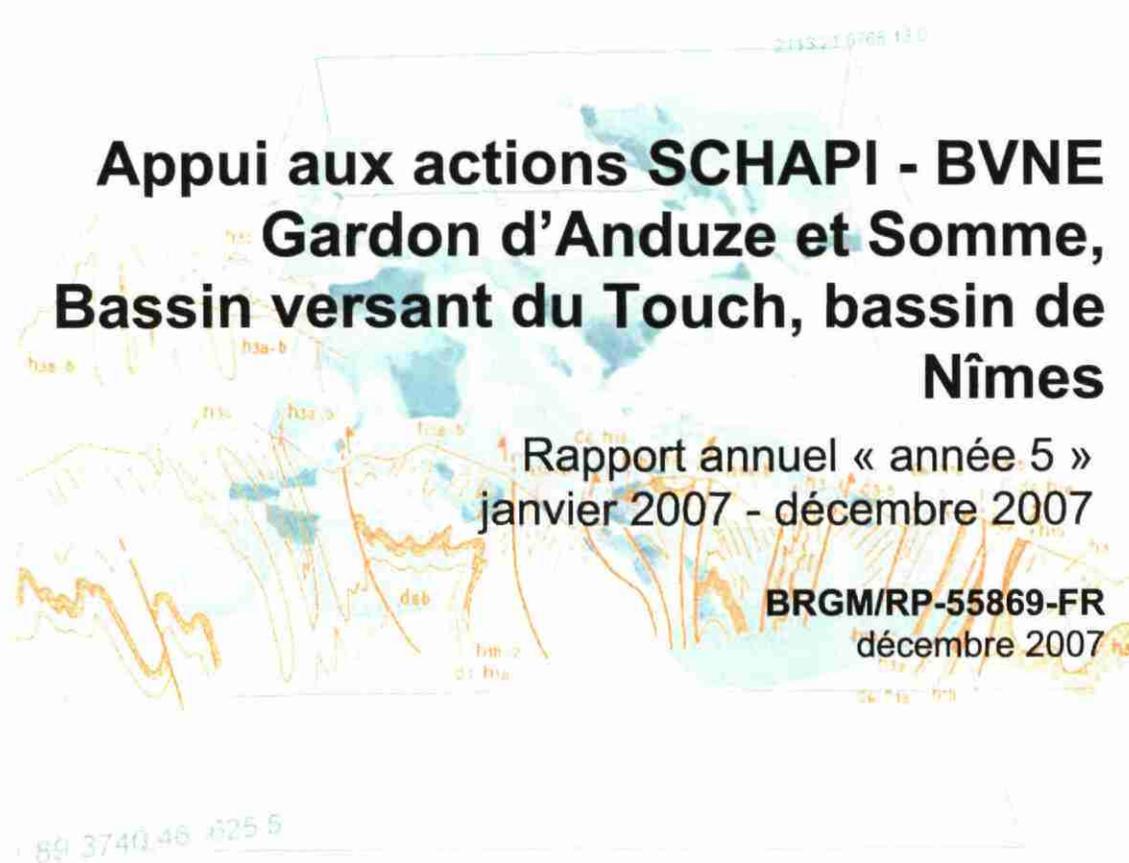
Document public



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

Rapport annuel « année 5 »  
janvier 2007 - décembre 2007

BRGM/RP-55869-FR  
décembre 2007



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**





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

Rapport annuel « année 5 »  
janvier 2007 - décembre 2007

**BRGM/RP-55869-FR**  
décembre 2007

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM 2007 07EAUUY04

**J.F. Desprats**

Avec la collaboration de

M. Aubert, N. Baghdadi, 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.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

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

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

**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, 88 ill., 3 ann..

## Synthèse

Ce rapport d'année 5 est basé sur les tâches définies à l'annexe technique de la convention entre le MEDD (Direction de l'Eau) et le BRGM : « Connaissance du Suivi et de la Gestion des Eaux Souterraines » signée début 2007. Il fait plus particulièrement référence à la fiche 7 concernant l'appui au SCHAPI, dans la cadre de cette convention triennale 2007-2008-2009.

Il constitue un livrable contractuel de cette convention, composée de 4 axes de travail :

- la modélisation (Somme, Gardon, Touch),
- la prise en compte de la perméabilité des sols (Gardon, Touch),
- la possibilité d'extraire l'état de saturation des sols de données spatiales,
- l'étude d'un bassin à forte composante karstique.

Ces 4 axes de travail se retrouvent naturellement dans les 4 modules thématiques et géographiques, initialisés en 2007 (Nîmes) ou en cours depuis une ou plusieurs années (Somme, Touch, Gardon d'Anduze) :

- module 1 - Bassin versant du Gardon d'Anduze : couplage Modèle hydrologique/Stream pour la calibration de la cartographie de la perméabilité des sols, en envisageant la régionalisation de cette cartographie,
- module 2 - Bassin versant du Touch : exploitation des sites de mesures mis en place en 2006 pour calibrer les données Radar qui seront acquises, en parallèle des données ISBA fournies par le SCHAPI,
- module 3 - Bassin versant de la Somme : poursuite de l'adaptation des codes GARDÉNIA aux normes Sandre en débutant l'extrapolation au BVNE de la Meuse,
- module 4 - Karst de Nîmes : Rôle et contribution des eaux souterraines d'origine karstique aux crues avec l'analyse du comportement des karsts.



## Sommaire

<b>1. Contexte et objectifs .....</b>	<b>13</b>
1.1. CONTEXTE .....	13
1.2. OBJECTIFS .....	13
1.2.1. Module 1 : Bassin versant du Gardon d'Anduze .....	13
1.2.2. Module 2 : Bassin versant du Touch .....	14
1.2.3. Module 3 : Bassin versant de la Somme .....	14
1.2.4. Module 4 : Rôle et contribution des eaux souterraines d'origine karstique aux crues (bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes).....	15
<b>2. Réalisation année 5 (2007).....</b>	<b>17</b>
2.1. BVNE DU GARDON D'ANDUZE .....	17
2.1.1. Perméabilité des sols : cartographie, régionalisation et modélisation .....	17
2.1.2. Modélisation hydrologique – Gardénia .....	25
2.2. BASSIN VERSANT DU TOUCH.....	35
2.2.1. Suivi in situ de l'humidité dans le sol .....	35
2.2.2. Suivi de l'humidité du sol à partir des images SAR .....	51
2.3. MODELISATION DES CRUES DE NAPPE SUR LE BVNE DE LA SOMME....	69
2.4. ROLE ET CONTRIBUTION DES EAUX SOUTERRAINES D'ORIGINIE KARSTIQUE AUX CRUES .....	70
2.4.1. Introduction et objectifs.....	70
2.4.2. Présentation du site d'étude .....	71
2.4.3. Rappel des résultats issus des études antérieures .....	76
2.4.4. Objectifs des études menées en 2007 .....	77
2.4.5. Description de l'approche méthodologique .....	78
2.4.6. Présentation des données .....	79
2.4.7. Reconstitution des hauteurs d'eau des piézomètres du karst de sub- surface .....	85
2.4.8. Reconstitution des débits du cadereau d'Alès.....	91
2.4.9. Tests méthodologiques concernant l'identification d'indicateur « eaux souterraines » .....	99
2.4.10. Conclusions et perspectives .....	106
<b>3. Conclusion sur les travaux menés en 2007 .....</b>	<b>109</b>

<b>4. Bilan de Production .....</b>	<b>111</b>
<b>5. Planification année 6.....</b>	<b>113</b>
5.1. OBJECTIFS.....	113
5.2. TACHES PLANIFIEES EN 2008 .....	113
5.2.1. Description des opérations proposées.....	113
5.2.2. Personnels impliqués .....	115
5.2.3. Schéma de l'organisation et des responsabilités : .....	115
5.2.4. Les étapes du projet :.....	116
5.2.5. Equipe de projet.....	116
5.2.6. Documents à remettre aux partenaires.....	116
<b>6. Bibliographie .....</b>	<b>117</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1 : Récapitulatif des mesures in situ .....	18
Illustration 2 : Mesures double anneau et sols .....	18
Illustration 3 : Mesures double anneau et occupation du sol .....	18
Illustration 4 : Mesures double anneau et sols X occupation du sol .....	19
Illustration 5 : Mesures Guelph et sols .....	20
Illustration 6 : Mesures Guelph et occupation du sol.....	20
Illustration 7 : Mesures Guelph et sols X occupation du sol.....	21
Illustration 8 : Relation entre les perméabilités moyennes part type principal d'occupation du sol mesurées à l'aide du double anneau et de l'infiltromètre de Guelph .....	21
Illustration 9 : Relation entre les perméabilités moyennes par formation géol/pédo principale mesurées à l'aide du double anneau et de l'infiltromètre de Guelph.....	22
Illustration 10 : Relation entre les perméabilités moyennes par combinaison Géol/occupation du sol mesurées à l'aide du double anneau et de l'infiltromètre de Guelph .....	22
Illustration 11 : Synthèse des perméabilités .....	23
Illustration 12 : Cartographie calibrée de la perméabilité des sols .....	23
Illustration 13 : Exemple de modélisation STREAM (évènement du 28/09/2000) .....	24
Illustration 14 : Corrélation entre le ruissellement observé et le ruissellement simulé.....	25
Illustration 15 : Simulation enchaînée avec le modèle GARDÉNIA des évènements 1, 3, 8, 13 et 19 du bassin d'Anduze. ....	27

Illustration 16 : Simulation enchaînée avec le modèle GARDÉNIA des évènements 1, 3, 8, 13 et 19 du bassin.....	27
Illustration 17 : Simulation avec le modèle GARDÉNIA de l'évènements n°19 du bassin d'Anduze (détail). .....	28
Illustration 18 : lame d'eau de l'évènement n°19 aux 3 bassins. Il apparaît que la lame d'eau sur le bassin de Saumane est un peu suspecte car largement plus faible que celle des 2 autres sous bassins, alors que le débit à l'exutoire est fort. ....	28
Illustration 19 : Simulation enchaînée avec le modèle GARDÉNIA des évènements 1, 8, 13, 19 du bassin de Saumane .....	29
Illustration 20 : Simulation enchaînée avec le modèle GARDÉNIA des évènements 1, 8, 13, 19 du bassin de Saumane. ....	29
Illustration 21 : Simulation enchaînée avec le modèle GARDÉNIA des 4 évènements du bassin de Saumane : évènements 1 et 8.....	30
Illustration 22 : Simulation enchaînée avec le modèle GARDÉNIA des 4 évènements du bassin de Saumane : évènements 13 et 19.....	31
Illustration 23 : Simulation enchaînée avec le modèle GARDÉNIA des évènements 1, 8, 13, 19 du bassin de Mialet. ....	32
Illustration 24 : Simulation enchaînée avec le modèle GARDÉNIA des évènements 1, 8, 13, 19 du bassin de Mialet. ....	32
Illustration 25 : Simulation enchaînée avec le modèle GARDÉNIA des 4 évènements du bassin de Mialet : évènements 1 et 8. ....	33
Illustration 26 : Simulation enchaînée avec le modèle GARDÉNIA des 4 évènements du bassin de Mialet : évènements 13 et 19. ....	33
Illustration 27 : Débits maxi instantanés stations DIREN et stations SPC.....	34
Illustration 28 : Variations des potentiels de pression sur le site Retenue (01/01/07 au 01/10/07) et pluie enregistrée à la station Météofrance Labastidette.....	37
Illustration 29 : Variations des potentiels de pression sur le site Souleris (01/01/07 au 01/10/07) et pluie enregistrée à la station Météofrance Labastidette.....	38
Illustration 30 : 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 (période 01/01/06 au 01/10/07))......	40
Illustration 31 : 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 (disponibles jusque fin mai). ....	41
Illustration 32 : Vue de la parcelle Souleris (avril 2007).....	42
Illustration 33 : Vue de la parcelle Retenue (Avril 2007).....	43
Illustration 34 : Prélèvements de sol pour la détermination des humidités pondérales.....	44
Illustration 35 : Evolutions au cours du temps et en fonction de la profondeur des teneurs en eau pondérales pour les sites de Souleris et Retenue. ....	45
Illustration 36 : Teneur en eau volumique vs. Teneur en eau pondérale pour les différents horizons des parcelles Souleris et Retenue.....	48

Illustration 37 : Evolution des débits enregistrés à la station de la DIREN Midi-Pyrénées et des précipitations journalières issues des données de MétéoFrance (station de Labastidette) entre octobre 2006 et septembre 2007 .....	50
Illustration 38 : Protocole des mesures gravimétriques: a) localisation des parcelles prélevés le 12 Mars 2007; b) prélèvements des échantillons sur le terrain ; c) pesées des échantillons ; d) mise à l'étuve.....	54
Illustration 39 : Principe de cartographie gravimétrique à l'échelle des mailles .....	55
Illustration 40 : Calibration des données TDR pour les mesures de la sonde à 10 cm de la parcelle de Souléris .....	56
Illustration 41: Principaux flux de surface et variables pronostiques modélisées par ISBA.....	58
Illustration 42 : Flux simulés et variables pronostiques d'ISBA [Goulet 2000] .....	58
Illustration 43 : Liste des paramètres nécessaires au fonctionnement d'ISBA [PELLENQ, 2002] .....	59
Illustration 44 : Paramètres de l'expression de l'humidité d'ISBA .....	60
Illustration 45 : Cartographie de l'humidité du sol sur le bassin du Touch, 12 Mars 2007 à 10 h TU.....	61
Illustration 46 : Comparaison entre humidités estimées par radar (polarisations VV et VH) et humidités mesurées par gravimétrie à l'échelle des mailles ISBA (12 Mars 2007).....	62
Illustration 47 : Humidités estimées par le radar sur les mailles ISBA.....	63
Illustration 48 : Humidités estimées par le radar sur les différentes mailles du bassin.....	64
Illustration 49 : Principe de validation de l'humidité estimée par radar sur les sols nus .....	64
Illustration 50 : Comparaison des humidités estimées par radar et celles simulées par ISBA selon les précipitations (2006).....	65
Illustration 51 : Comparaison des humidités estimées par radar et celles simulées par ISBA selon les précipitations (2007).....	66
Illustration 52 : Comparaison à l'échelle des mailles, des humidités estimées par radar, simulées par ISBA, mesurées par gravimétrie - 12 Mars 2007.....	67
Illustration 53 : Différence d'humidité radar – ISBA pour chaque maille du bassin. La zone bleutée correspond à l'intervalle où la différence d'humidité entre radar et modèle ISBA est de $\pm 7\%$ .....	68
Illustration 54 : Bassin d'alimentation proposé pour la Fontaine de Nîmes en rouge; les limites en jaune correspondent aux limites des bassins versants des cadereaux.....	73
Illustration 55 : Localisation des capteurs (pluviographes et limnigraphes) du réseau NOE – ESPADA .....	74
Illustration 56 : Pluviométrie à Courbessac et La Rouvière entre 1999 et 2004, comparée à la piézométrie mesurée (BRGM/RP-53422-FR).....	75
Illustration 57 : Evolution du débit moyen journalier maximum calculé par le modèle de transfert du cadereau d'Alès en fonction du cumul de pluie journalier.....	77
Illustration 58 : Schéma de principe du modèle de transfert de la fontaine de Nîmes.....	79
Illustration 59 : Réseau d'instrumentation de la Ville de Nîmes .....	79

Illustration 60 : Débit aux trois stations du cadereau d'Alès pour l'épisode de crue du 27 au 29 mai 1998 .....	80
Illustration 61 : Chroniques de débit aux stations de Cimpro et Anduze .....	81
Illustration 62 : Réseau d'instrumentation de la Ville de Nîmes pour les cadereaux d'Alès et Camplanier, complété des stations de mesure sur le karst, et représentation schématique des bassins versants des deux cadereaux. ....	82
Illustration 63 : Chroniques de hauteur d'eau aux piézomètres Provence, Ponges et EB4.....	83
Illustration 64 : Débit à la station Cimpro et précipitation lors de la crue du 27 au 29 mai 1998 .....	85
Illustration 65 : Calcul de l'hydrogramme unitaire normalisé (réponse impulsionnelle) de la piézométrie du site du Mas de Provence.....	86
Illustration 66 : Evolution du seuil de pluie efficace Oméga et de la pluviométrie .....	87
Illustration 67 : Comparaison de la piézométrie modélisée à la piézométrie mesurée au site du Mas de Provence.....	87
Illustration 68 : Comparaison de la piézométrie modélisée à la piézométrie mesurée au site EB4 .....	88
Illustration 69 : Reconstitution de la piézométrie à Provence pour la période 1998-2001 .....	89
Illustration 70 : Reconstitution de la piézométrie à Provence pour la période 2004-2007 .....	90
Illustration 71 : Reconstitution de la piézométrie à EB4 pour la période 1998-2001.....	90
Illustration 72 : Reconstitution de la piézométrie à EB4 pour la période 2004-2007 .....	91
Illustration 73 : Résultat de la phase de calage du modèle, les périodes utilisées pour le calage sont présentées en jaune .....	92
Illustration 74 : Débit simulé et mesuré au mois d'octobre 2001 à partir de la méthode simple.....	93
Illustration 75 : Débit simulé et mesuré lors de la crue du 27 au 29 mai 1998.....	94
Illustration 76 : Représentation du débordement à Provence et débit dans le cadereau pour l'épisode de crue du 27 au 29 mai 1998.....	95
Illustration 77 : Représentation du débordement à EB4 et débit dans le cadereau pour l'épisode de crue du 27 au 29 mai 1998.....	95
Illustration 78 : Résultat de la modélisation pour la crue du 27 au 29 mai en utilisant la fonction seuil déduite des niveaux simulés à EB4.....	96
Illustration 79 : Calcul des réponses impulsionnelles (Pluie, karst et composant non linéaire) des débits du cadereau d'Alès à la station de Cimpro.....	97
Illustration 80 : Contribution relative des composantes pour la crue du 27 au 29 mai 1998 .....	97
Illustration 81 : Débit simulé et mesuré au mois d'octobre 2001 à partir de la méthode utilisant l'information karst.....	98
Illustration 82 : Réseau hydrométrique de la ville de Nîmes et nouveaux piézomètres mis en place en août 2007 .....	99

Illustration 83 : Modèle de transfert « Provence » en mode prévisionnel : représentation des niveaux piézométriques pour différentes probabilités d'occurrence.....	102
Illustration 84 : Evolution de la piézométrie au site Provence pour différentes configurations d'épisodes de pluie testées par le modèle de transfert .....	103
Illustration 85 : Evolution de la piézométrie maximale calculée par le modèle (pic de crue) au site Mas de Provence pour différentes configurations d'épisodes de pluie testées par le modèle de transfert.....	104
Illustration 86 : Caractéristiques des doubles épisodes de pluie considérées à l'aide du modèle de transfert Provence .....	104
Illustration 87 : Evolution de la piézométrie au site Provence pour différentes configurations d'épisodes doubles de pluie testées par le modèle de transfert (P1 = 100 mm, P2 variable, compris entre 75 mm et 200 mm) .....	105
Illustration 88 : Evolution de la piézométrie maximale calculée par le modèle (pic de crue) au site Provence pour différentes configurations d'épisodes doubles de pluie testées par le modèle de transfert.....	105

## Liste des annexes

Annexe 1 Compte-rendus de réunions / Missions.....	119
Annexe 2 BV du Touch - Journalvisites de terrain (nov2006-nov2007).....	129
Annexe 3 Publication scientifique.....	139

# 1. Contexte et objectifs

## 1.1. CONTEXTE

En 2006, c'est sur un projet de travaux sur 3 ans (2007-2009) que le MEDD et le BRGM ont décidé de poursuivre la collaboration pour le SCHAPI, collaboration en cours depuis 2003.

Les actions menées sont adaptées en fonction des discussions tenues avec le SCHAPI. En 2007, les travaux ont porté en particulier sur les karsts Nîmois afin d'inclure cette problématique particulière non couverte par les autres BVNE (bassin versant numérique expérimental)

## 1.2. OBJECTIFS

Les objectifs pour l'année 2007 ont pour base commune une meilleure compréhension des phénomènes expliquant les crues, afin de mieux les prévoir. La précision dans les prévisions est un objectif majeur, sachant que les autorités doivent prévenir dans les meilleures conditions les populations en cas de catastrophes, en évitant au maximum les fausses alertes à l'effet démobilisateur.

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

#### Potentiel d'infiltration des versants : modélisation

Afin d'améliorer les résultats fournis nous proposons de passer des volumes ruisselés à des hydrogrammes de crues.

Pour cela, tout en conservant la spécificité de Stream (à savoir la prise en compte des pluies spatialisées, du potentiel d'infiltration des sols, des antécédents pluvieux, pour produire des cartographies de pluies nettes au pas de temps définis de 5 mn), nous proposons :

- d'utiliser une modélisation permettant de caler les volumes ainsi calculés aux hydrogrammes des crues observés aux droits des stations hydrométriques,
- d'intégrer dans Gardénia/Eros ces pluies nettes afin de produire en sortie des hydrogrammes de crue.

#### Potentiel d'infiltration des versants : régionalisation

La carte du potentiel d'infiltration sera finalisée par la réalisation de mesures in situ sur les formations pédologiques secondaires (argiles, marnes, ...).

Par ailleurs, il sera vérifié si les mesures de perméabilités calibrées sur le Gardon d'Anduze peuvent être extrapolées ailleurs dans le département du Gard ou de l'Hérault. En 2007, nous proposerons de débiter par la validation des formations schisteuses et granitiques, en réalisant des séries de mesures sur ces formations présentes sur l'Arc Cévenol. Ceci doit permettre de vérifier le caractère homogène de la perméabilité pour un type de sol et une occupation du sol donnée.

### **1.2.2. Module 2 : Bassin versant du Touch**

Le SCHAPI a financé en 2006 l'équipement de deux parcelles en amont et en aval du bassin versant dit « La retenue », à côté de St-Lys. La DIREN a quant à elle équipé le site d'un limnigraphe.

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.

Les équipements mis en place et testés en 2006 (Projet APIBAR CNES/BRGM) sont désormais opérationnels. Un couplage avec les données radar fournies par l'ESA devient désormais possible. Les données Radar/SAR permettent l'extraction d'un paramètre humidité, que les données in situ doivent valider.

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.

Le SCHAPI fournira au BRGM les données ISBA sur la zone d'étude

En parallèle des données radar seront acquises auprès de l'ESA.

Il conviendra alors de valider le paramètre « état hydrique des sols » obtenu par ISBA d'un côté, les données Radar/SAR d'un autre côté à l'aide des données in situ du bassin de St Lys.

### **1.2.3. Module 3 : Bassin versant de la Somme**

Pour achever de rendre totalement opérationnelle l'intégration du logiciel GARDÉNIA dans la plateforme DEMETER il est nécessaire d'adapter les fichiers reçus périodiquement et automatiquement :

- les fichiers météo (pluie, évapotranspiration potentielle) observés et prévus,
- les fichiers d'observations de débits les plus récents.

Il est aussi nécessaire de transformer les résultats de GARDÉNIA en fichiers acceptés par DEMETER avec en particulier une prévision sans pluies futures et avec les prévisions (déterministes) de pluies.

Il sera également nécessaire de recalibrer les paramètres de prévision au vu des observations les plus récentes.

En 2007 après le bassin de la Somme, on abordera également la prévision des « crues lentes » sur le bassin versant de la Meuse. Dans ce but, compte tenu de la forme étendue du bassin et des temps de propagations amont aval de l'ordre de 4 à 5 jours, on utilisera le modèle EROS du BRGM (Ensemble de Rivières Organisées en Sous bassins) mais en introduisant un temps de transfert à la sortie de chaque sous bassin.

1. Adaptation du code de calcul GARDÉNIA pour prise en compte des formats de données SANDRE étendus.
2. Adaptation pour mise sur la plate-forme DEMETER sous UNIX avec fonctionnement en temps réel automatique.
3. Actualisation du module prévision en continu des débits de la Somme et de ses affluents.
4. Analyse des possibilités d'amélioration de prévisions sur la Somme en utilisant les données météo SAFRAN spatialisées de Météo France par utilisation du code ÉROS qui associe plusieurs zones GARDÉNIA mais ne permet pas de réactualisation automatique des écarts de prévision.
5. Bassin de la Meuse (crues lentes) : Évaluation de possibilités de prévisions avec EROS ce qui nécessite un module de propagation (absent actuellement) compte tenu de la forme étendue du bassin et des temps de propagations amont aval de l'ordre de 4 à 5 jours.

#### **1.2.4. Module 4 : Rôle et contribution des eaux souterraines d'origine karstique aux crues (bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes)**

Le rôle et la contribution des eaux souterraines d'origine karstique aux crues méditerranéennes sont supposées voire démontrées dans certains cas. La quantification des eaux souterraines par rapport à des événements particuliers n'est pas systématique. De plus du point de vue de la prévision, l'interprétation de chroniques piézométriques au niveau de l'épikarst, de la zone noyée (drains et blocs fissurés) sur plusieurs cycles hydrologiques permettrait de pouvoir définir des seuils d'alerte, voir des scénarios prévisionnels pour analyser le comportement du système lors d'une succession d'événements pluvieux.

Deux bassins d'alimentation karstiques peuvent être traités dans le cadre de ce module : (i) le bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes et plus particulièrement des bassins versants de cadereaux (Uzès par exemple avec l'implantation d'un piézomètre représentatif) et (ii) le bassin d'alimentation de la source Lez, système

karstique exploité de manière active (débit d'exploitation de 1700 l/s), donnant naissance à un fleuve côtier méditerranéen traversant un milieu urbain (Montpellier).

A partir d'une approche couplée hydrogéochimique et hydrogéologique, les mécanismes d'interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines ont été mis en évidence dans le cadre d'un projet mené par le BRGM et la Ville de Nîmes entre 2004 et début 2007. La contribution des eaux souterraines à la genèse des crues a été démontrée, à l'échelle de deux bassins versants de cadereaux, cadereau d'Uzès (en partie) et d'Alès. Tous les cadereaux n'ont pas été caractérisés. Le système d'alerte ESPADA est basé notamment sur des simulations hydrologiques de type approche par modèles « réservoirs » en cascade à l'échelle des bassins versants des cadereaux de la ville. Pour certains de ces bassins, des problèmes de calage font apparaître des problématiques de métrologie, mais aussi des problèmes de représentation du comportement du karst. Ainsi il est proposé de disposer d'un piézomètre complémentaire au niveau du bassin du cadereau d'Uzès et d'effectuer un suivi de niveau d'eau en continu voir en conductivité et température sur au minimum deux cycles hydrologiques. Un échantillonnage d'une crue sur la source et le cadereau d'Uzès permettrait de confirmer les résultats de l'étude antérieure. Les chroniques du réseau BRGM et de la ville seront traitées selon les techniques du traitement du signal, afin de pouvoir déterminer les fonctions de transfert et d'effectuer des simulations en mode prédictif pour la source ou un piézomètre. L'objectif est ainsi de confirmer le rôle des eaux souterraines et l'intégration possible de seuils d'alerte au sein d'un réseau d'alerte général.

## 2. Réalisation année 5 (2007)

Les bassins versants étudiés en 2006, la Somme, le Touch et le Gardon d'Anduze ont été décrits lors des premiers travaux menés sur ces sites (Rapports 2005 BRGM/RP-54240-FR, 2004 BRGM/RP53901-FR et 2003 BRGM/RP53027-FR).

Aussi ce chapitre sera-t-il consacré aux travaux et résultats menés en 2006 sur les trois bassins.

### 2.1. BVNE DU GARDON D'ANDUZE

Les travaux sur le BVNE du Gardon d'Anduze ont porté :

- sur la caractérisation du potentiel d'infiltration des sols. Sa régionalisation avec la prise en compte du bassin versant de l'Avène et la valorisation de toutes les données in situ acquises a permis de proposer sur Anduze une carte calibrée de la perméabilité des sols,
- sur la modélisation à l'aide des modèles (1) STREAM dans un premier temps afin de valider les cartes d'infiltration, (2) GARDÉNIA à compter de cette année 2007 pour une approche plus hydrologique compatible avec la demande du SCHAPI.

#### 2.1.1. Perméabilité des sols : cartographie, régionalisation et modélisation

Les simulations ont été réalisées à partir des lames d'eau calculées au pas de temps horaires sur chaque sous bassin à partir des images radar. Les débits observés ont également transformés au pas de temps horaire.

#### *Analyse statistique des mesures in situ*

La totalité des mesures réalisées depuis 2002 a été reprise (Illustration 1), afin de confronter les mesures réalisées à l'aide du système double anneau et celles réalisées à l'aide du perméamètre de Guelph.

zone	période	système	nombre
Gardon d'Anduze	Août 2002	Double anneau	41
Gardon d'Anduze	Août 2003	Double anneau	38
Gardon d'Anduze	Octobre 2003	Double anneau	22
Avène	Juillet 2004	Double anneau	40

zone	période	système	nombre
Gardon d'Anduze	Octobre 2004	Double anneau	14
Gardon d'Anduze	Décembre 2005	Guelph	14
Gardon d'Anduze	Juillet 2006	Guelph	23
Avène	Juillet 2007	Guelph	56

Illustration 1 : Récapitulatif des mesures in situ.

Ciblées dans un premier temps sur le seul Gardon d'Anduze, la zone géographique pour les mesures de perméabilité a été élargie en 2004 au bassin versant de l'Avène, qui présente des sols (alluvions, argiles) et une occupation du sol (cultures, vignes, prairies) absents sur le Gardon, mais largement représentés au niveau régional.

- **Analyse statistique des mesures double anneau**

Geol carte ▼	Moyenne mm/h	Écartype mm/h	Nombre
alluvions	287,0	183,6	15
granite	1179,4	653,7	25
marnes	264,9	414,5	34
schistes	431,4	593,1	26
calcaires	661,6	855,4	54
Total	582,7	716,5	154

Illustration 2 : Mesures double anneau et sols

Les mesures double anneau montre une hiérarchisation des perméabilités décrite dans les rapports précédents (BRGM/RP-54240-FR). Les arènes granitiques constituent les formations les plus perméables (Illustration 2), les marnes et argiles étant les plus imperméables. La variabilité intra classe est particulièrement forte, surtout sur les formations calcaires.

occupation ▼	Moyenne mm/h	Écartype mm/h	Nombre
culture	224,0	200,5	6
forêt	717,4	779,8	115
prairie	223,9	164,7	22
vigne	88,3	92,6	11
Total	582,7	716,5	154

Illustration 3 : Mesures double anneau et occupation du sol

Sur le Gardon d'Anduze l'occupation du sol est relativement homogène, le bassin étant essentiellement forestier à l'exception des vallées (quelques cultures et prairies). Ceci explique la nécessité de mesurer la perméabilité sur un bassin versant différent, plus agricole, le bassin de l'Avène. En forêt la perméabilité est largement supérieure aux

zones agricoles). Les vignes présentent les formations les moins perméables. (Illustration 3). Un croisement est alors réalisé entre la carte d'occupation du sol et celle représentant l'occupation du sol, afin d'évaluer la perméabilité pour des classes combinant les deux paramètres (Illustration 4).

Geol carte ▼	occupation sol ▼	Moyenne mm/h	Écartype mm/h	Nombre
alluvions	culture	211,1	#DIV/0!	1
	forêt	313,3	283,6	4
	prairie	318,2	151,1	8
	vigne	147,5	125,4	2
Total alluvions		287,0	183,6	15
calcaires	forêt	740,2	890,6	47
	prairie	149,5	89,1	6
	vigne	35,6	#DIV/0!	1
Total calcaires		661,6	855,4	54
granite	forêt	1204,2	655,6	24
	prairie	583,5	#DIV/0!	1
Total granite		1179,4	653,7	25
marnes	culture	226,6	224,0	5
	forêt	430,7	547,2	16
	prairie	68,2	30,9	5
	vigne	80,1	92,3	8
Total marnes		264,9	414,5	34
schistes	forêt	444,2	616,4	24
	prairie	278,8	73,1	2
Total schistes		431,4	593,1	26
Total		582,7	716,5	154

Illustration 4 : Mesures double anneau et sols X occupation du sol

Le croisement entraîne de facto un nombre plus limité de mesures par unité. Cependant il s'avère plus représentatif de la réalité observée sur le terrain, les deux paramètres occupation du sol et nature des sols étant étroitement liés à la perméabilité.

Une hiérarchie est alors observée. Elle a permis d'établir la carte de perméabilité initiale en 2003-2004. Cette cartographie était simplement relative, les valeurs de perméabilité observée ne pouvant être utilisée directement dans un modèle hydrologique. La nécessité d'une calibration complémentaire des parcelles expérimentales de l'EMA/DDE sur Tourgueilles (schistes – forêt) et Peyroles (granites – forêt)

• **Analyse statistique des mesures Guelph**

Les 93 mesures ont été réalisées en partie sur l'Avène (56), en partie sur le Gardon (37). Une mesure a du être éliminée suite à un problème de mise en œuvre.

Geol carte ▼	Moyenne mm/h	Écartype mm/h	Nombre
alluvions	30,3	23,8	24
calcaire	53,4	42,5	8
granites	67,6	30,1	14
marnes	24,0	20,4	25
poudingue	40,5	31,2	5
schistes	42,2	26,2	14
schistes / quartzite	178,5	87,5	2
Total	41,9	37,3	92

*Illustration 5 : Mesures Guelph et sols*

Même si la variabilité intra classe reste importante sur les différentes formations de sols, on peut observer que la hiérarchie issue des mesures double anneau est conservée (Illustration 5). En retenant les formations ayant plus de 5 mesures, les arènes granitiques devancent les schistes, les alluvions et les argiles/marnes. Les calcaires présentent une perméabilité moyenne, et fortement variable.

occupation sol ▼	Moyenne mm/h	Écartype mm/h	Nombre
culture	38,5	26,8	17
Forêt	59,8	45,3	37
Prairie	30,6	24,6	29
vigne	11,2	7,3	9
Total	41,9	37,3	92

*Illustration 6 : Mesures Guelph et occupation du sol*

C'est en forêt que la perméabilité reste la plus importante (Illustration 6). Les sols cultivées viennent après, suivies des vignes. Cependant il apparaît impératif de prendre en compte ces deux paramètres qui ne sont pas du tout dissociés sur le terrain, les forêts se retrouvant sur les sols schisteux et les arènes granitiques, autant sur le Gardon d'Anduze que sur l'Avène.

Geol carte	occupation sol	Moyenne mm/h	Écartype mm/h	Nombre
alluvions	culture	35,8	24,6	6
	Foret	46,6	#DIV/0!	1
	Prairie	35,6	24,6	12
	vigne	7,8	3,8	5
Total alluvions		30,3	23,8	24
calcaire	culture	27,5	#DIV/0!	1
	Foret	93,4	48,6	3
	Prairie	29,9	8,4	4
Total calcaire		53,4	42,5	8
granites	Foret	65,8	30,5	13
	Prairie	91,8	#DIV/0!	1
Total granites		67,6	30,1	14
marnes	culture	35,6	26,0	9
	Foret	24,5	13,0	6
	Prairie	11,8	15,0	6
	vigne	15,5	9,0	4
Total marnes		24,0	20,4	25
poudingue	culture	91,7	#DIV/0!	1
	Prairie	27,8	14,4	4
Total poudingue		40,5	31,2	5
schistes	Foret	43,8	24,5	12
	Prairie	32,8	45,7	2
Total schistes		42,2	26,2	14
schistes / quartzite		178,5	87,5	2
Total schistes / quartzite		178,5	87,5	2
Total		41,9	37,3	92

Illustration 7 : Mesures Guelph et sols X occupation du sol

On retrouve la hiérarchie observée avec les mesures double anneau. La prise en compte des sols et de l'occupation du sol semble indispensable, même si ces deux paramètres sont assez corrélés. (Illustration 7).

#### • Relation entre les mesures « Double anneau » et « Guelph »

Il semblait particulièrement important de vérifier la relation des mesures entre les deux systèmes double anneau et Guelph, et ce pour l'occupation du sol (Illustration 8), les sols (Illustration 9), et la combinaison « Sols/occupation du sol (Illustration 10).

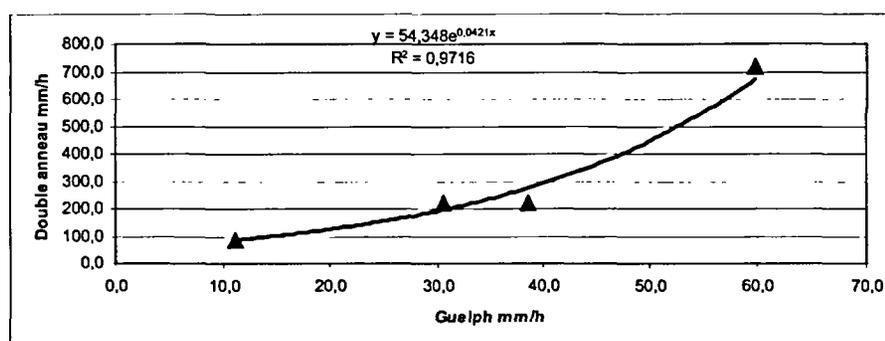


Illustration 8 : Relation entre les perméabilités moyennes par type principal d'occupation du sol mesurées à l'aide du double anneau et de l'infiltromètre de Guelph

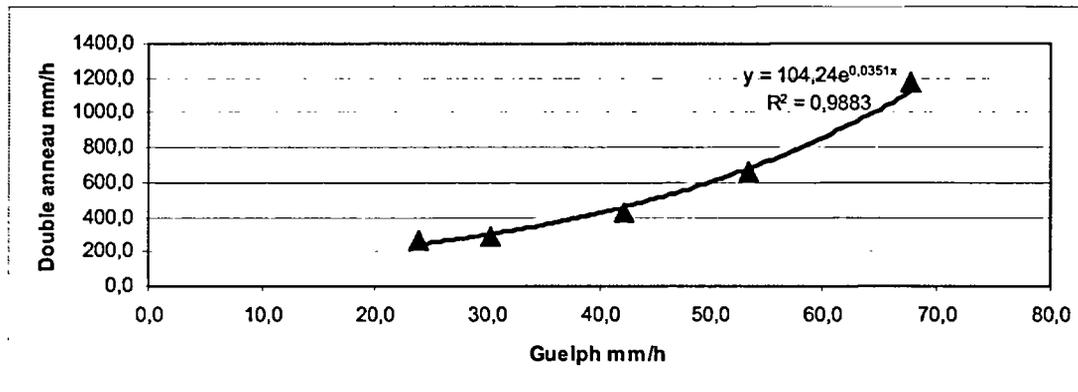


Illustration 9 : Relation entre les perméabilités moyennes par formation géol/pédo principale mesurées à l'aide du double anneau et de l'infiltromètre de Guelph

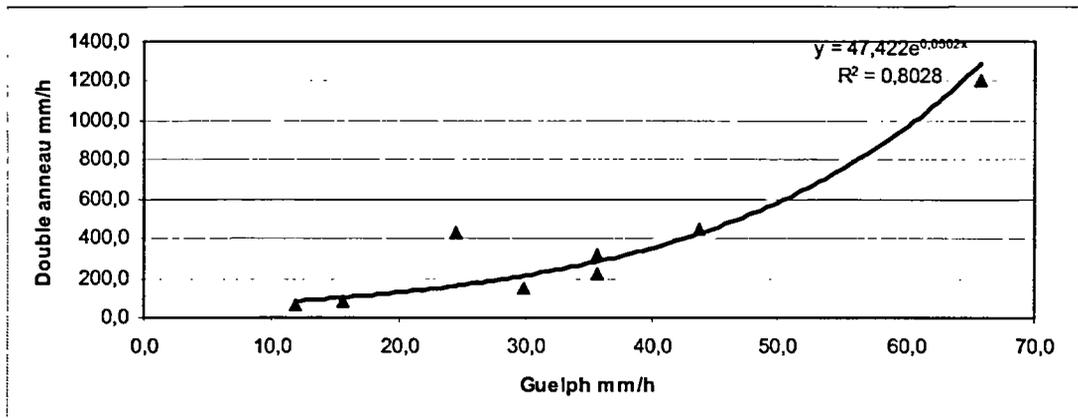


Illustration 10 : Relation entre les perméabilités moyennes par combinaison Géol/occupation du sol mesurées à l'aide du double anneau et de l'infiltromètre de Guelph

La relation est étroite entre les mesures faites avec un système ou l'autre. Le « Forêt/Marnes » s'écarte légèrement de la courbe de tendance, la perméabilité avec le double anneau étant accentuée, probablement du fait de la couche d'humus en milieu forestier. L'importance macroporosité de ce milieu accroît la perméabilité sur des sols relativement peu perméables.

#### • Synthèse

Une synthèse des perméabilités (Illustration 11) a donc été faite à l'aide des mesures réalisées avec les différents systèmes. Elle vise à proposer pour chaque classe combinée « Sols » / « Occupation du sol » une perméabilité la plus robuste possible, en fonction du nombre de mesure réalisées

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			
xxxx	Guelph		xxxx	Expertise	
xxxx	Guelph/ Double Anneau		xxxx	Double Anneau	

Illustration 11 : Synthèse des perméabilités

Les données sous SIG ont permis alors de proposer une cartographie de la perméabilité des sols qui représente la synthèse de toutes les mesures et analyses réalisées entre 2003 et 2007.

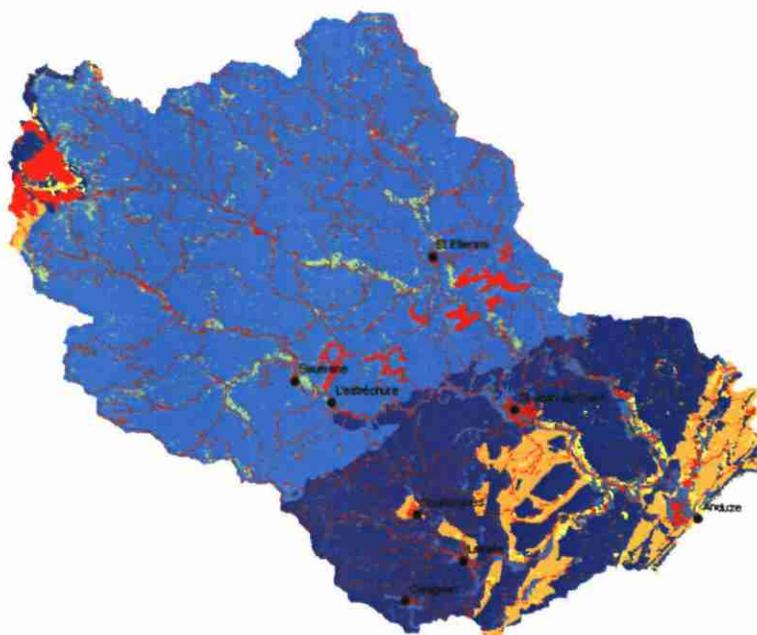
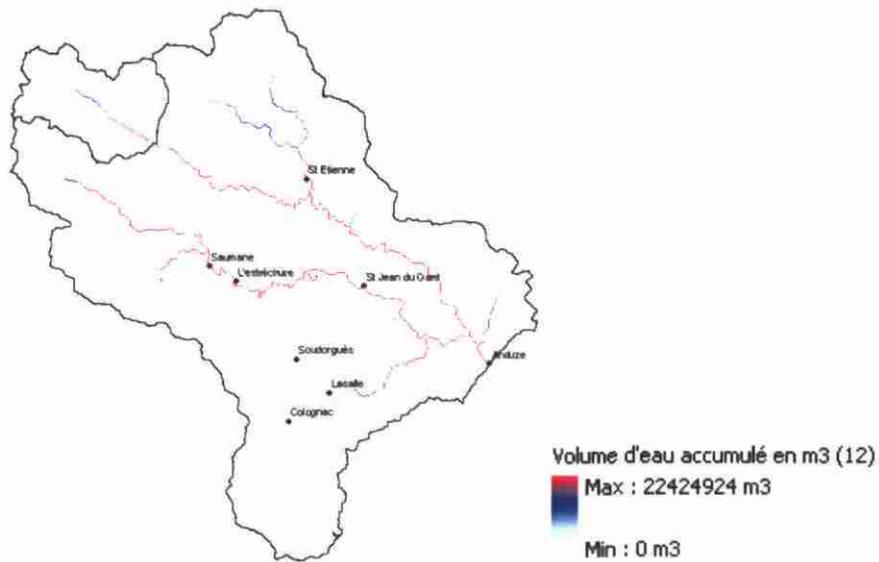


Illustration 12 : Cartographie calibrée de la perméabilité des sols

La même cartographie devra être réalisée en 2008 sur l'Avène, les analyses statistiques étant d'ores et déjà finalisées.

### **Modélisation**

Les 4 évènements validés par l'Ecole des Mines d'Alès ont été repris afin de calibrer les modélisations sur le Gardon d'Anduze. Il s'agit des évènements du 21/09/1994, du 10/11/1996, du 19/09/2000 et du 08/09/2002. Les modélisations ont donc été faites avec STREAM, avec pour exemple celle de la crue du 28/09/2000 (Illustration 13).



*Illustration 13 : Exemple de modélisation STREAM (évènement du 28/09/2000)*

Après calibration sur les 4 crues préalablement citées, on constate une bonne corrélation entre les débits mesurés et les débits simulés (Illustration 14). En 2008, il conviendra de finaliser ce volet en appliquant la modélisation sur tous les évènements acquis par les SPC Grand Delta, que ce soit ceux postérieurs à 2002, mais aussi ceux qui présentaient certaines imprécisions justifiant leur retrait pour la phase de calibration.

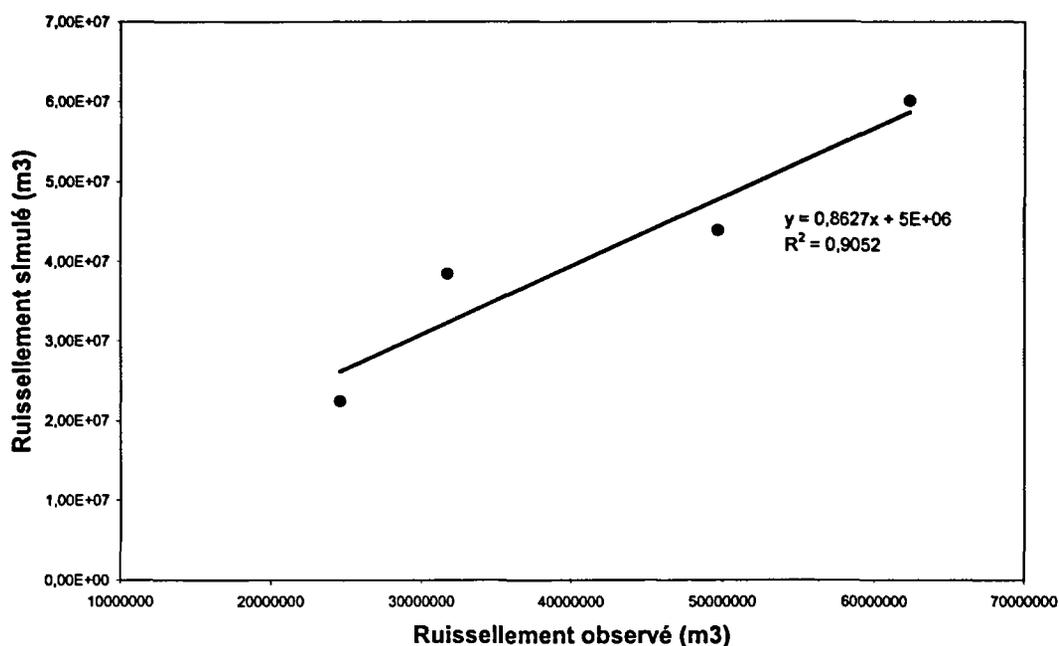


Illustration 14 : Corrélation entre le ruissellement observé et le ruissellement simulé

## Perspectives

En 2008, les travaux de modélisation seront poursuivis sur le Gardon afin d'appliquer les règles de décision définies cette année aux autres crues enregistrées par le SPC Grand Delta. De plus, les modélisations STREAM seront réalisées sur l'Avène, pour laquelle la cartographie de la perméabilité est quasiment finalisée. Ce bassin versant ne faisant pas l'objet d'une surveillance par le SPC, on cherchera à appliquer des pluies proches de celles du Gardon voisin.

Aussi afin de répondre à la demande du SCHAPI (réunion SCHAPI/BRGM 28/08/2007, - compte-rendu de réunion en annexe) les travaux seront orientés vers l'analyse et la validation des règles de décision du logiciel STREAM pour la prise en compte des pluies antécédentes dans le contexte des Gardons.

### 2.1.2. Modélisation hydrologique – Gardénia

#### Principes de modélisation

Afin d'améliorer les résultats fournis nous proposons de passer des volumes ruisselés à des hydrogrammes de crues.

Pour cela, tout en conservant la spécificité de Stream (à savoir la prise en compte des pluies spatialisées, du potentiel d'infiltration des sols, des antécédents pluvieux, pour

produire des cartographies de pluies nettes au pas de temps définis de 5 mn), nous proposons :

- d'utiliser une modélisation permettant de caler les volumes ainsi calculés aux hydrogrammes des crues observés au droit des stations hydrométriques ;
- d'intégrer dans Gardénia/Eros ces pluies nettes afin de produire en sortie des hydrogrammes de crue.

Dans un premier temps une modélisation globale pluie débit a été réalisée avec le code de calcul GARDÉNIA sur les 3 sous bassins des Gardons : Anduze (545 km<sup>2</sup>) ; Saumane (100 km<sup>2</sup>) et Mialet (220 km<sup>2</sup>)

Les crues sélectionnées sont les crues : n°1, 3, 8, 13, 19 pour Anduze et les crues : n°1, 8, 13 et 19 pour Saumane et Mialet.

Pour réaliser ces simulations deux améliorations ont été introduites dans le code Gardénia :

- on a introduit la possibilité de laisser se perdre un débit d'infiltration dès la réserve utile. cette composante du débit ne réapparaît pas à l'exutoire ;
- on a introduit un « temps de concentration » du bassin pour gérer le décalage temporelle entre l'occurrence d'une pluie efficace et l'a réaction à l'exutoire. C'est le temps nécessaire au barycentre de la pluie efficace pour parvenir à l'exutoire. Ce paramètre peut être déterminé par calage automatique du modèle.

Chaque crue de chaque bassin a d'abord été modélisée séparément de façon a bien apprécier les temps de concentration et détecter les anomalies éventuelles. On a ainsi réalisé 5 modèles GARDÉNIA pour Anduze et 4 modèles pour Saumane et Mialet, soit 13 modèles GARDÉNIA en tout. Dans un deuxième temps on a réalisé un modèle par bassin en utilisant un seul jeu de paramètre pour chacun des 3 sous-bassins. Seul le temps de concentration a parfois du être légèrement modifié d'une crue à l'autre, pour tenir compte d'éventuels décalages d'horloges. Pour réaliser la simulation enchaînée de tous les évènements d'un même bassin, on a supposé que l'état de saturation de chaque bassin était dans un état très sec avant le début de la simulation, ceci pourrait cependant être amélioré en examinant les pluies journalières des semaines précédant chaque évènement, particulièrement en automne ou en hiver. Pour chaque épisode, la simulation a démarré 48 heures avant le début de réaction du bassin.

### ***Premiers résultats des modélisations***

#### **Station d'Anduze (BV de 545 km<sup>2</sup>)**

Globalement la simulation est assez bonne, surtout pour les crues les plus fortes. Certaines crues moins importantes sont sous estimées. Le coefficient d'ajustement est égal à 0.88, soit un coefficient de Nash égal à 0.78.

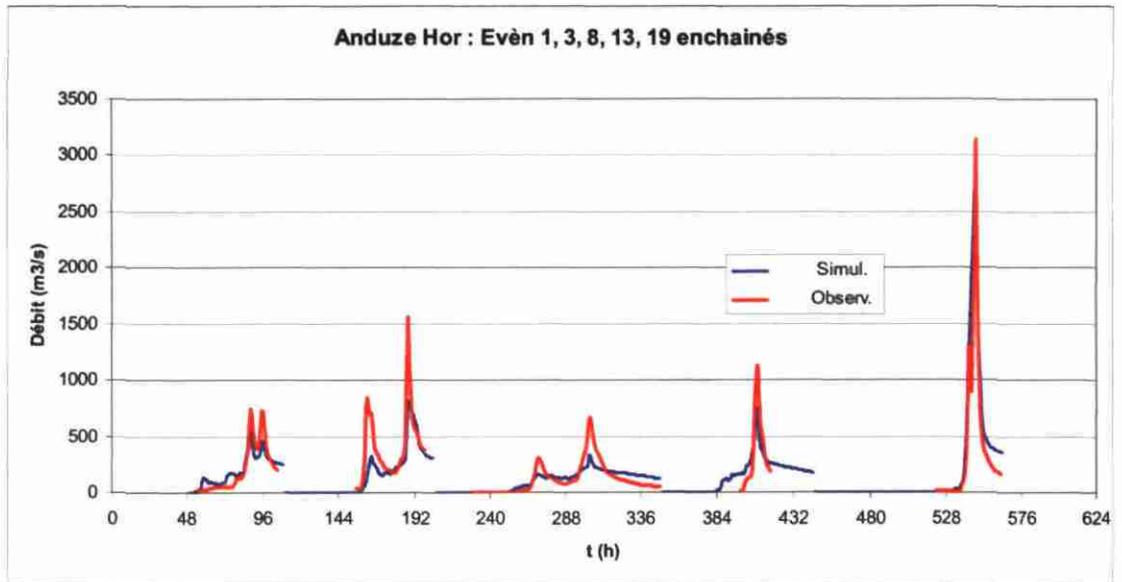


Illustration 15 : Simulation enchaînée avec le modèle GARDÉNIA des évènements 1, 3, 8, 13 et 19 du bassin d'Anduze.

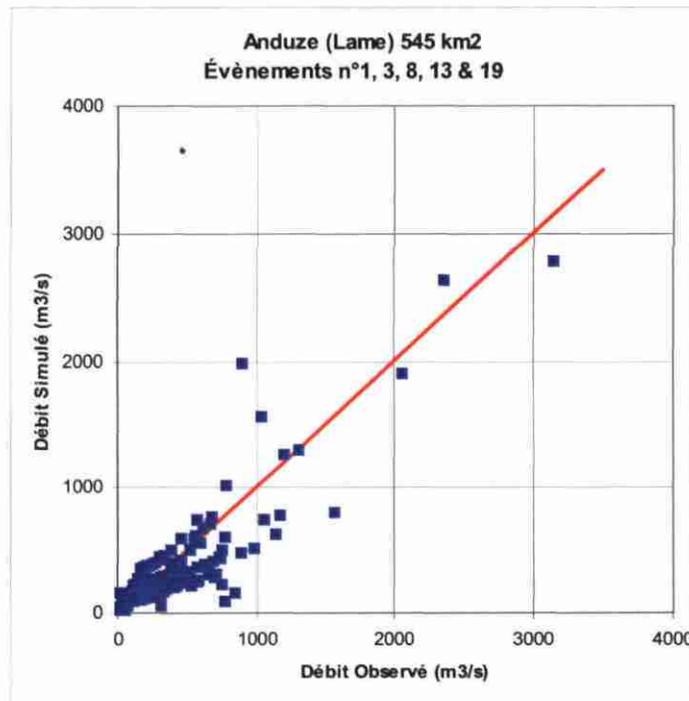


Illustration 16 : Simulation enchaînée avec le modèle GARDÉNIA des évènements 1, 3, 8, 13 et 19 du bassin.

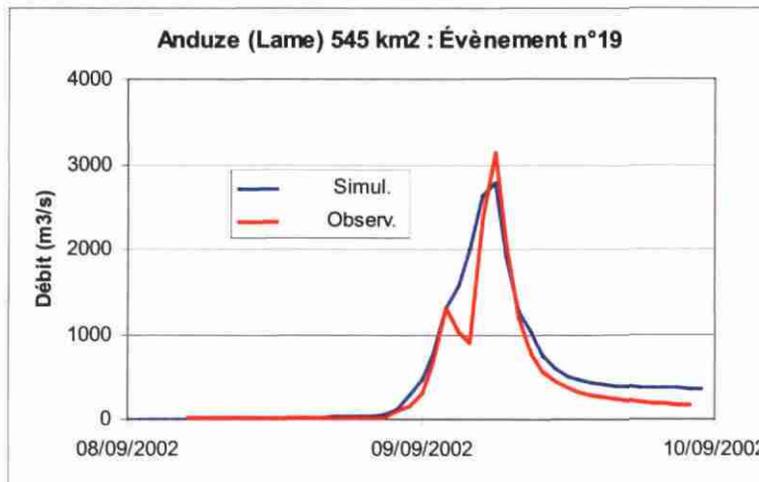


Illustration 17 : Simulation avec le modèle GARDÉNIA de l'évènements n°19 du bassin d'Anduze (détail).

### **Station de Saumane (BV de 100 km<sup>2</sup>)**

Une première simulation a donné de bons résultats, avec cependant une sous estimation de l'évènement n°19. Après analyse et comparaison avec les données voisine, il est apparu que la lame d'eau de « évènement n°19 » était suspecte, et il a été décidé d'utiliser à la place, à titre d'analyse, la lame d'eau du bassin de Mialet pour l'évènement n°19. Les résultats obtenus sont alors très bons. Le coefficient d'ajustement est égal à 0.89, soit un coefficient de Nash égal à 0.80.

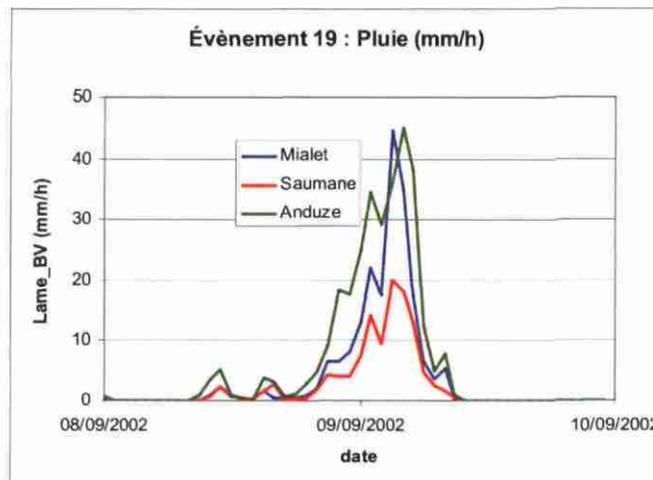


Illustration 18 : Lame d'eau de l'évènement n°19 aux 3 bassins. Il apparaît que la lame d'eau sur le bassin de Saumane est un peu suspecte car largement plus faible que celle des 2 autres sous bassins, alors que le débit à l'exutoire est fort.

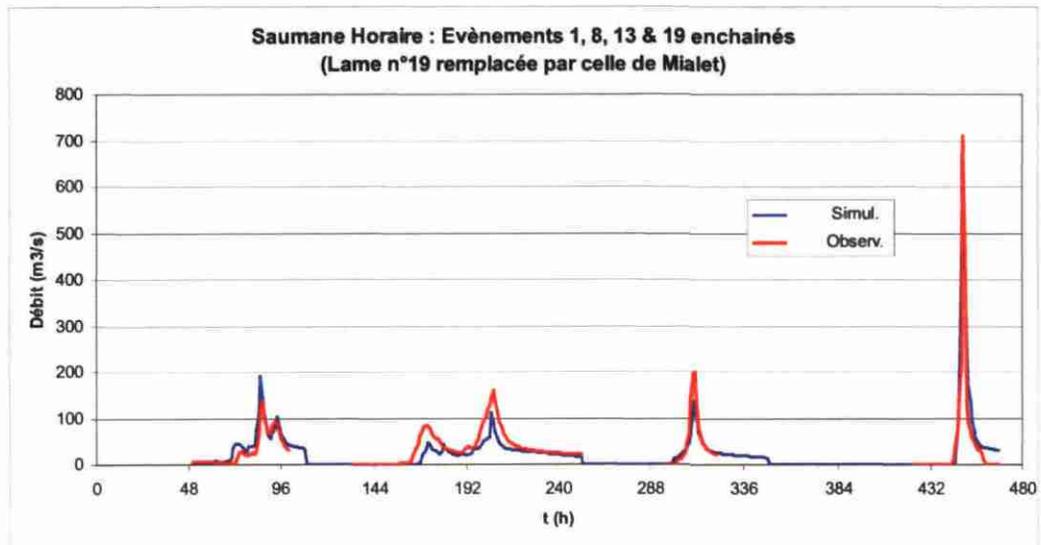


Illustration 19 : Simulation enchainée avec le modèle GARDÉNIA des évènements 1, 8, 13, 19 du bassin de Saumane

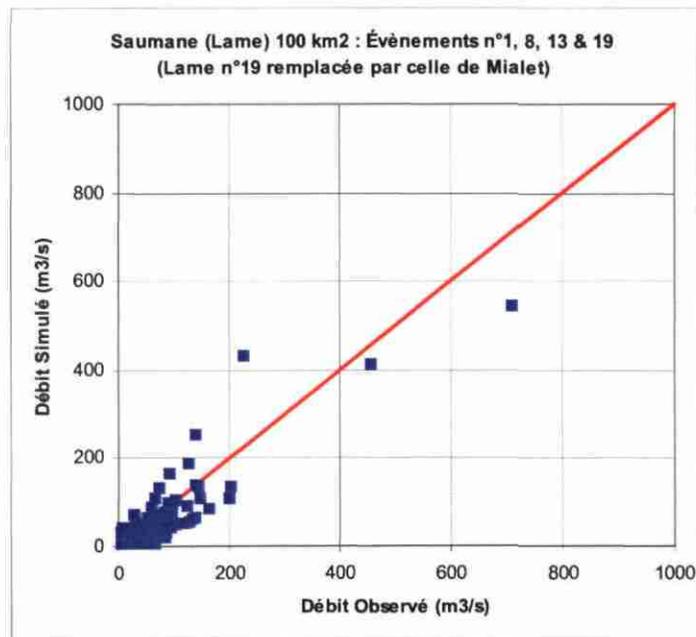


Illustration 20 : Simulation enchainée avec le modèle GARDÉNIA des évènements 1, 8, 13, 19 du bassin de Saumane.

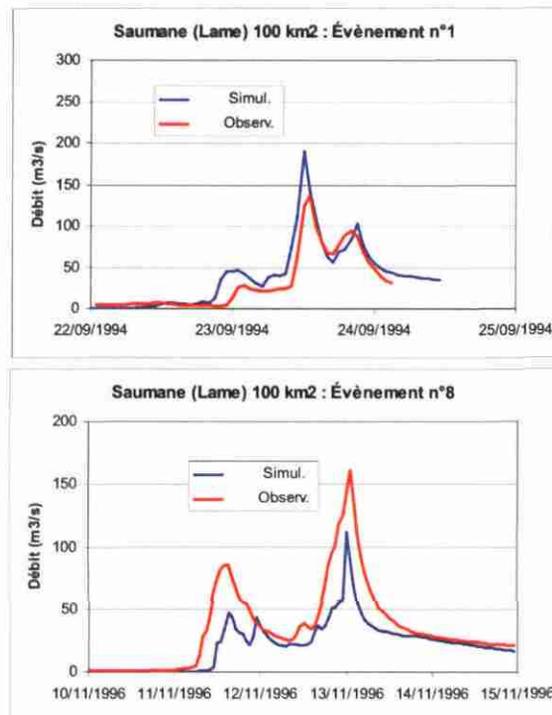


Illustration 21 : Simulation enchaînée avec le modèle GARDÉNIA des 4 évènements du bassin de Saumane : évènements 1 et 8.

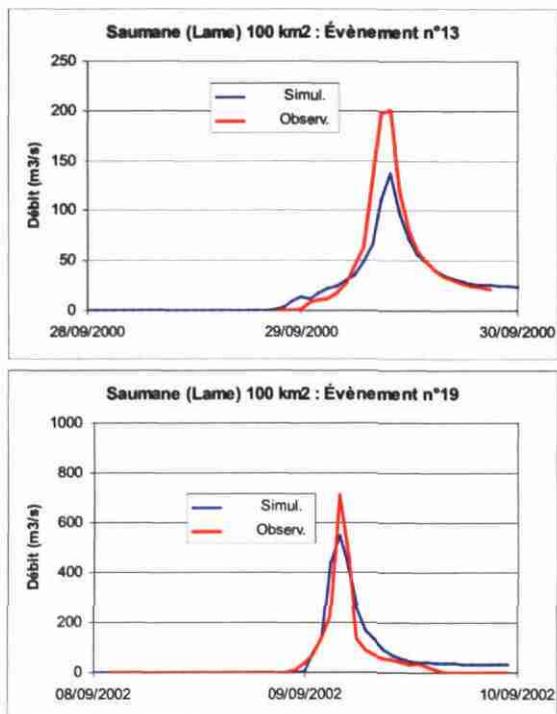


Illustration 22 : Simulation enchaînée avec le modèle GARDÉNIA des 4 évènements du bassin de Saumane : évènements 13 et 19.

### Station de Mialet (220 km<sup>2</sup>)

Les résultats obtenus à la station de Mialet sont très bons. Le coefficient d'ajustement est égal à 0.95, soit un coefficient de Nash égal à 0.90.

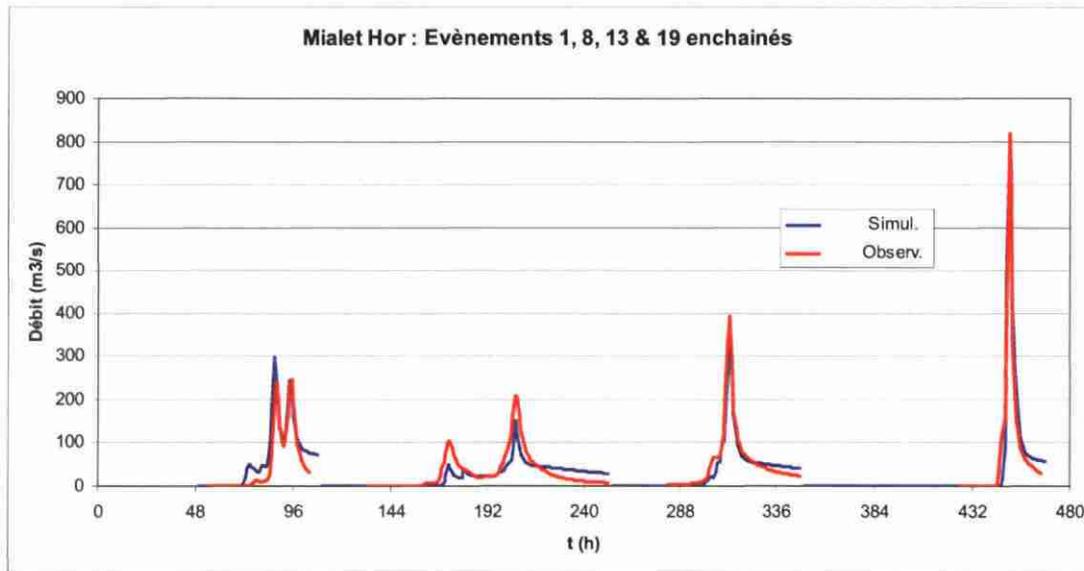


Illustration 23 : Simulation enchaînée avec le modèle GARDÉNIA des évènements 1, 8, 13, 19 du bassin de Mialet.

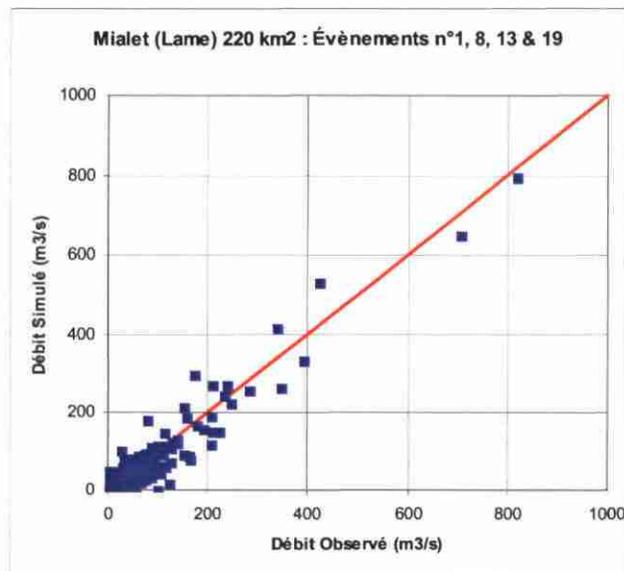


Illustration 24 : Simulation enchaînée avec le modèle GARDÉNIA des évènements 1, 8, 13, 19 du bassin de Mialet.

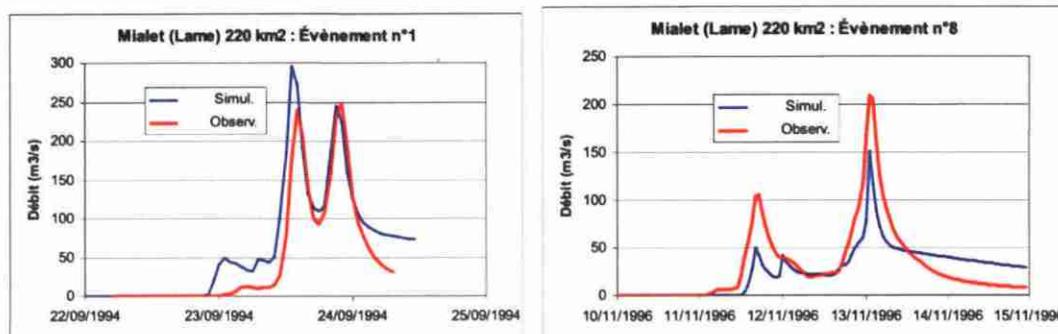


Illustration 25 : Simulation enchaînée avec le modèle GARDÉNIA des 4 événements du bassin de Mialet : événements 1 et 8.

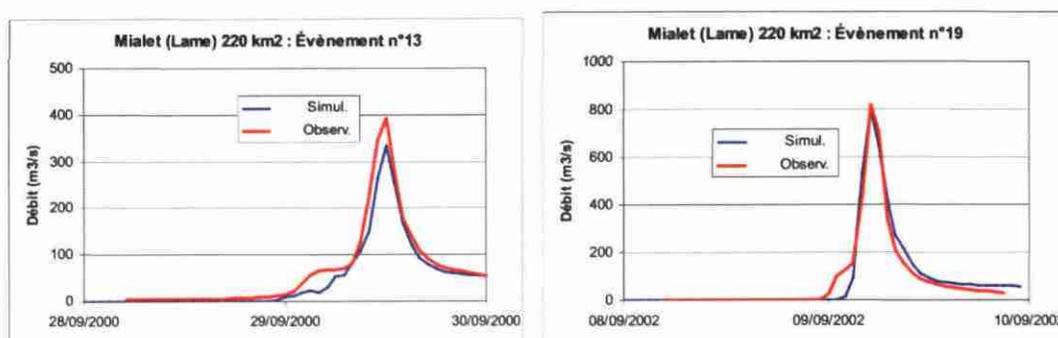


Illustration 26 : Simulation enchaînée avec le modèle GARDÉNIA des 4 événements du bassin de Mialet : événements 13 et 19.

### Analyse des résultats et développement proposé

Le remplacement de la pluie à Générargues par la pluie « radar » a permis une nette amélioration de la simulation de la crue du 08/09/2002 et du coefficient d'ajustement. Cette amélioration pourrait être poursuivie en utilisant systématiquement la pluie « radar » et/ou une pluie moyenne définie à partir de l'ensemble des postes pluviométriques du bassin versant.

Par ailleurs, une décomposition des bassins versants en sous bassin permettrait très probablement de mieux prendre en considération l'hétérogénéité des précipitations sur chaque bassin. Cette décomposition, qui peut être réalisée à l'aide du logiciel EROS, utiliserait les données de pluies et de débits des sous-bassins versants c'est-à-dire des stations de Saumane, Mialet mais également les données des stations DIREN situés sur chacun des Gardons (à Corbes et à Générargues).

Les données des stations DIREN ont, malgré une bonne cohérence sur les volumes écoulés vérifiés au moyen de modélisations GARDÉNIA au pas de temps journalier, mis en évidence une incohérence entre leurs débits maxima instantanés et ceux des stations SPC lors des crues maximales.

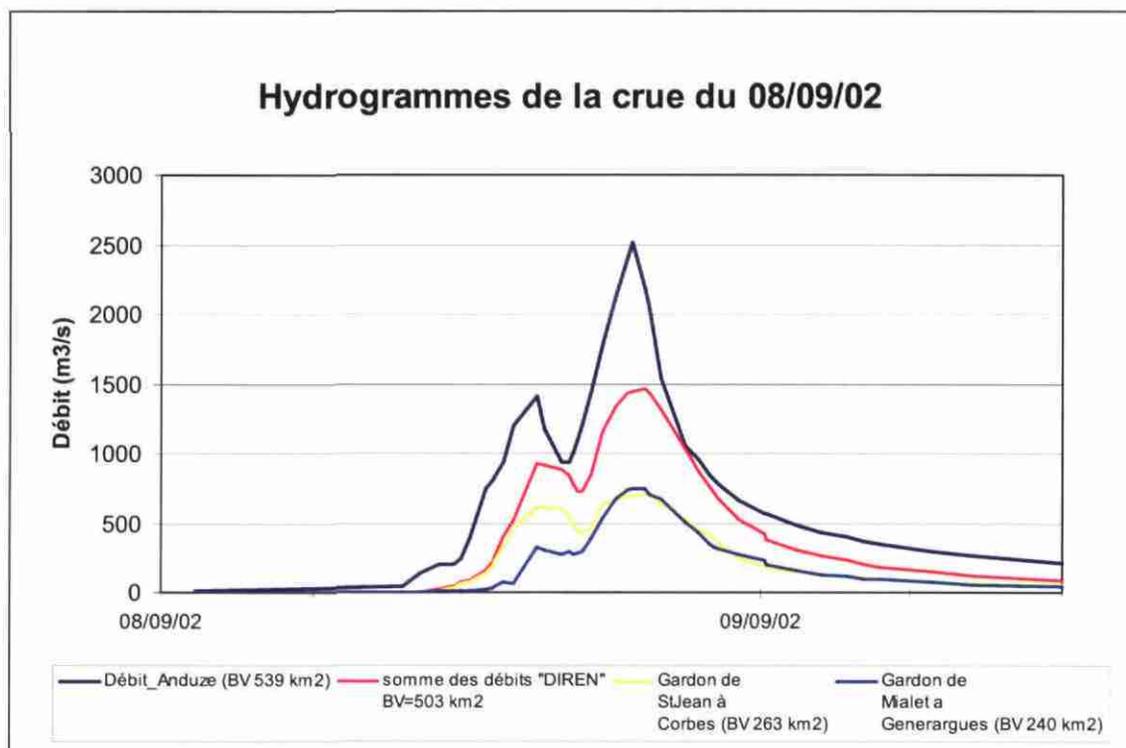


Illustration 27 : Débits maxi instantanés stations DIREN et stations SPC.

Il nous apparaît donc nécessaire de vérifier la cohérence de ces données afin de valider les différentes relation-hauteur débit de ces stations.

### Conclusion Modélisation

Ces premières modélisations vont être poursuivies, en particulier avec d'autres événements plus récents dont les données devraient être disponibles. Il est envisagé également d'utiliser le modèle ÉROS du BRGM, qui est formé d'une grappe de modèles interconnectés en un réseau palmé, de façon à prendre en compte d'une part les hétérogénéités de la répartition spatiale des précipitations, et d'autre part la variabilité spatiale des infiltrations en utilisant les zones qui ont été identifiées par les expériences d'infiltrations locales.

Un contrôle et analyse des relations hauteur débit en hautes eaux des différentes stations de la DIREN et du SPC permettrait de confirmer les valeurs extrêmes actuelles et d'utiliser les données des stations de la DIREN pour le calage des bassins versants intermédiaires.

## **2.2. BASSIN VERSANT DU TOUCH**

Le bassin versant du Touch est suivi depuis plusieurs années. Les premières études ont été réalisées par l'Ecole Supérieure d'Agriculture de Purpan (ESAP), puis par l'ESAP et le BRGM dans le cadre d'un projet avec le CNES (APIBAR) dont les objectifs étaient d'étudier l'intérêt de l'apport des données spatiales pour la modélisation hydrologique.

Depuis 2005, ce secteur est devenu stratégique pour le SCHAPI, non pas comme BVNE, mais comme bassin expérimental.

Deux parcelles en amont et en aval du sous-bassin versant dit « La retenue », à proximité de la commune de Saint-Lys ont été équipées en 2006. Parallèlement à cette instrumentation, la DIREN a mis en place une station limnimétrique et pluviométrique destinée à mesurer les débits sortants du sous-bassin versant.

L'état de saturation des sols constitue un élément incontournable dans la prévision des crues, comme ont pu le démontrer les événements des 6 et 7 puis 8 et 9 septembre 2005 observés 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.

Les équipements mis en place et testés en 2006 (Projet APIBAR CNES/BRGM) sont désormais opérationnels.

Il devient alors nécessaire d'étudier le potentiel d'extrapolation des parcelles expérimentales à l'ensemble du bassin versant du Touch. Un couplage avec les données radar fournies par l'ESA devient désormais possible. Les données Radar/SAR permettent l'extraction d'un paramètre humidité, que les données in situ doivent valider. Les données ISBA de Météo France constitueront l'autre jeu de validation disponible à l'échelle du bassin versant.

### **2.2.1. Suivi in situ de l'humidité dans le sol**

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

Il convient alors de voir comment accéder à cet indicateur « humidité » en opérationnel.

#### ***Suivi tensiométrique***

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. Ce matériel a été

installé au début de l'année 2006 mais de nombreux dysfonctionnements ont été observés au cours de cette première année de suivi.

En fin d'année 2006, il a été décidé de désinstaller le matériel en place sur les deux parcelles afin de resaturer les bougies poreuse 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, cf. 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.

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

$\Phi_t$  = potentiel total (J/mol)

$\Phi_p$  = potentiel de pression (J/mol)

$\Phi_g$  = potentiel de gravité (J/mol)

$\Phi_c$  = 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.

Les Illustration 28 et Illustration 29 permettent de visualiser les variations de potentiel de pression dans les 2 parcelles étudiées. Les données sont complétées par les mesures de précipitation faite sur le site de la Labastidette géré par Météo France. Ces données sont préférées pour la comparaison sur une grande période à celles mesurées in situ et pour lesquelles des lacunes d'observation sont constatées.

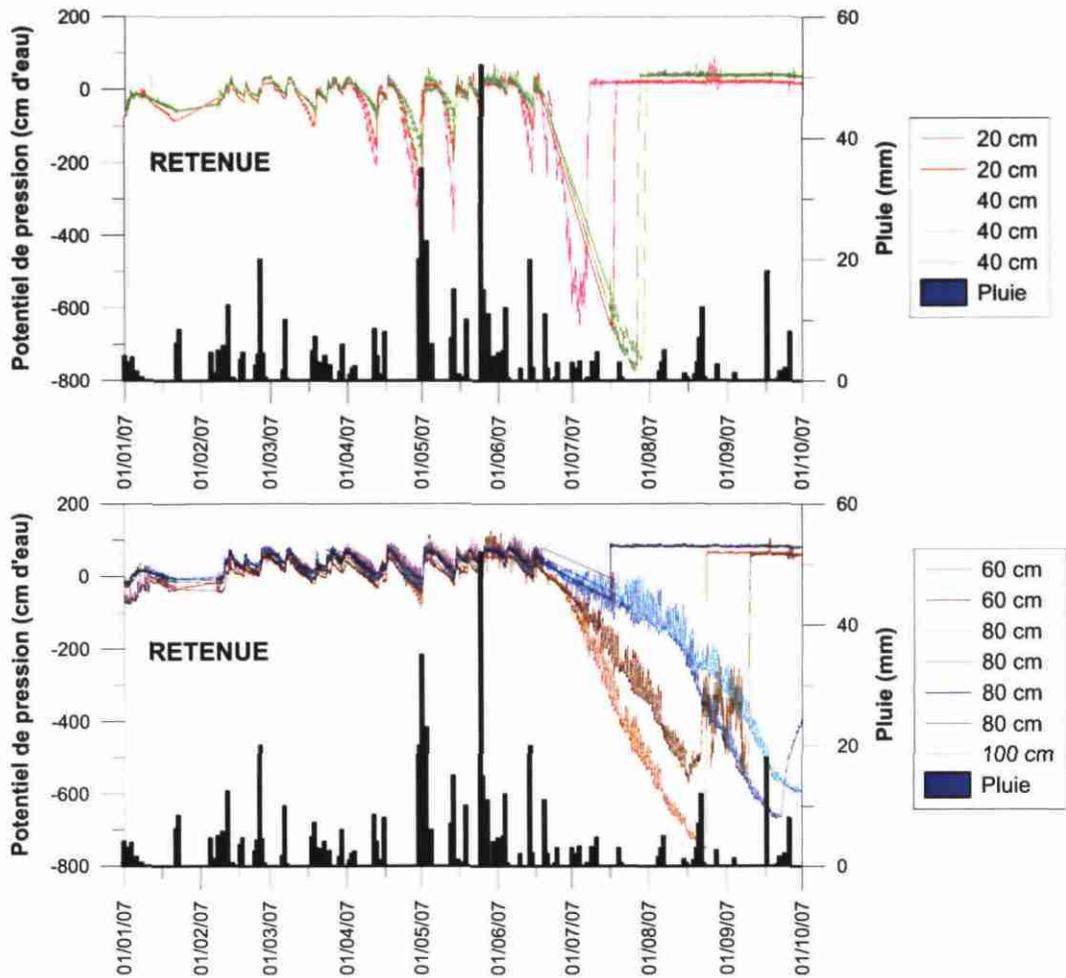


Illustration 28 : Variations des potentiels de pression sur le site Retenue (01/01/07 au 01/10/07) et pluie enregistrée à la station Météofrance Labastidette

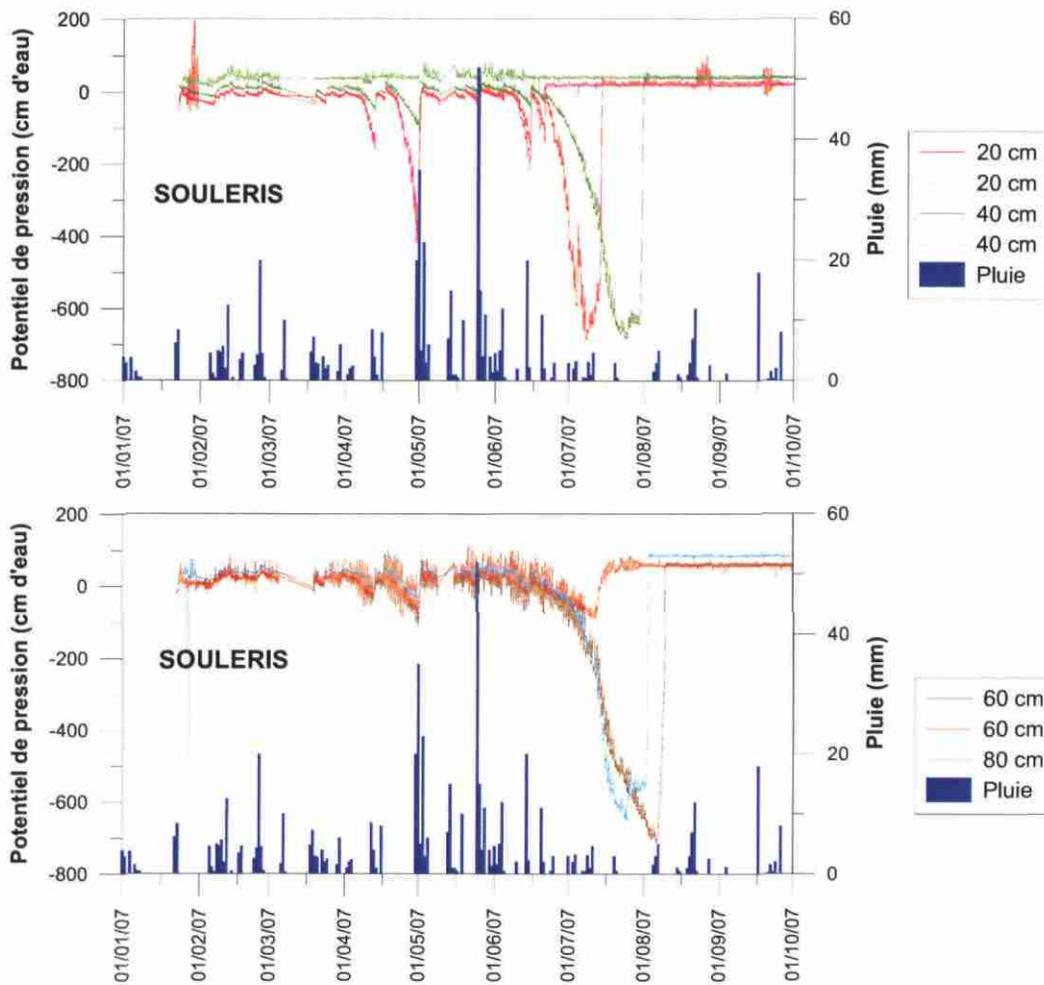


Illustration 29 : Variations des potentiels de pression sur le site Souleris (01/01/07 au 01/10/07) et pluie enregistrée à la station Météofrance Labastidette

Pour les 2 sites, les dispositifs ont parfaitement fonctionnés et il apparaît clairement que la réinstallation à l'hiver 2006 a été très profitable. Les suivis tensiométriques effectués à une même profondeur pour un site donné montrent que les valeurs enregistrées sont cohérentes entre-elles et très similaires.

Il apparaît aussi que les sols ont été proches de la saturation pendant une grande partie du suivi, globalement jusque début juillet, date à partir de laquelle la succion a augmenté (c'est-à-dire que le potentiel de pression a diminué). Cette augmentation de la succion résulte d'une diminution des pluies pendant la période estivale couplée vraisemblablement à une augmentation de la demande d'évapotranspiration. L'augmentation de la succion s'est d'abord fait ressentir aux niveaux des horizons de surface puis progressivement au niveau des horizons les plus profonds. Pour les 2 sites, la période de forte succion a été très brève et plus particulièrement pour le site

de Souléris où à partir de mi-août les valeurs de potentiel de pression sont proches de 0 pour tous les horizons. La forte diminution de la succion vers août septembre s'explique difficilement pour les 2 sites dans la mesure où il semble que les pluies (en tous cas celles mesurées à Labastidette) n'aient pas été très importantes. Pourtant, l'ordre de réactions des tensiomètres (depuis la surface vers les horizons les plus profonds) est cohérent et correspond à une réaction typique observable à la suite d'un épisode pluvieux.

### ***Suivi de la teneur en eau volumique dans les sols***

L'illustration 30 et l'illustration 31 permettent de visualiser l'évolution des teneurs en volumiques à différentes profondeurs pour les 2 sites depuis leur installation depuis 2006 jusqu'à octobre 2007. Ces données sont comparées aux pluies mesurées à la station de Météo France (Labastidette), station pour laquelle nous disposons d'une chronique continue. En effet, le pluviomètre situé au niveau de la parcelle Retenue a relevé quelques pannes depuis son installation en 2006. Les données a priori aberrantes (valeurs très élevées, supérieures à 80 ou au contraire très basses – nulles) ont été filtrées et ne sont pas représentées pour ne pas gêner la lecture des graphes.

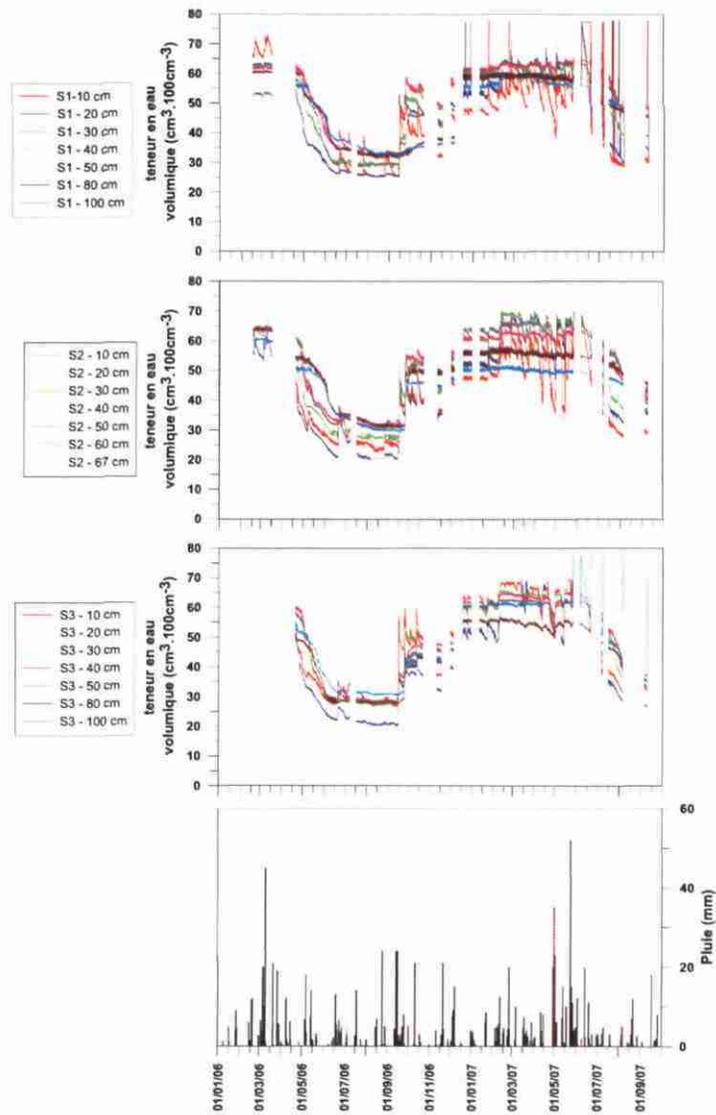
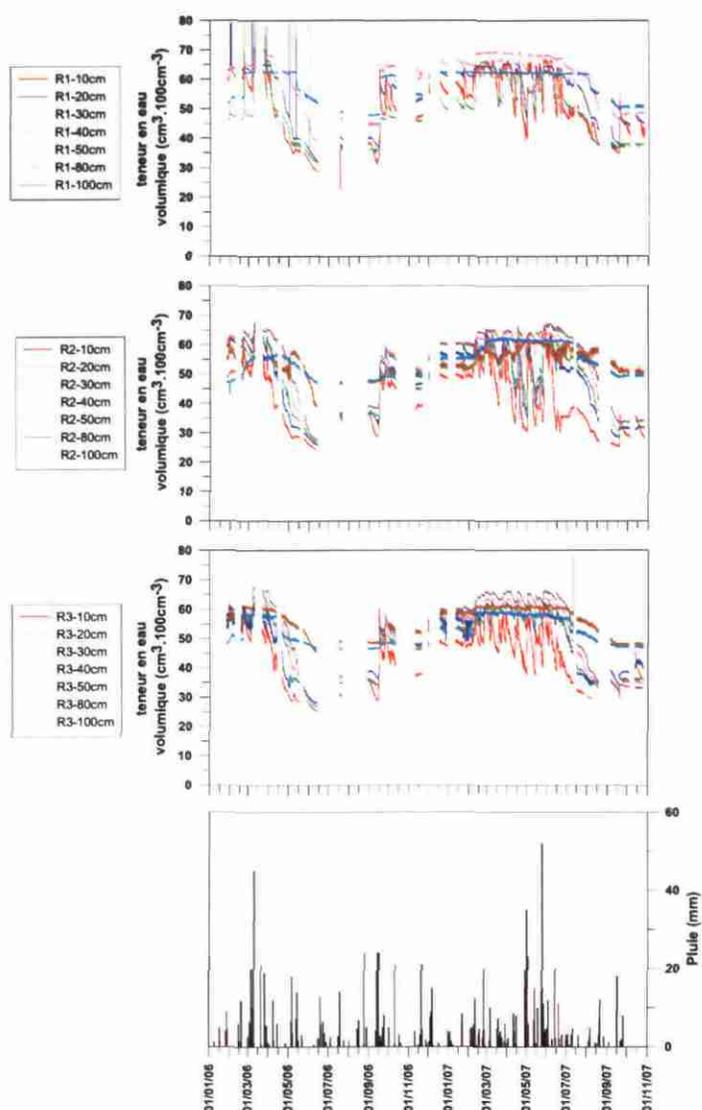


Illustration 30 : Evolution des teneurs en eau volumique à différentes profondeurs dans les 3 fosses de la parcelle Soulésris. Les pluies présentées sont mesurées par Météofrance au site Labastidetette (période 01/01/06 au 01/10/07).



*Illustration 31 : 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 (disponibles jusque fin mai).*

Depuis l'instrumentation du site en janvier 2006, le suivi des teneurs en eau volumique à l'aide des sondes TDR se poursuit sur les deux parcelles de mesures localisées à l'amont et à l'aval du sous-bassin versant. En raison de problèmes récurrents de pertes de données liées à une défaillance des batteries durant la première année d'acquisition, notamment en novembre et décembre 2006, la fréquence de visites sur

le site a été doublée, passant de 1 mois à 15 jours. Par ailleurs, les batteries des deux centrales d'acquisition TRASE ont été remplacées le 11 janvier 2007. Malgré cela, des défaillances sont encore enregistrées ponctuellement.

Concernant la parcelle « Souleris », des changements dans l'utilisation du terrain concerné par l'expérimentation sont à noter, passant d'une exploitation en blé dur à une prairie destinée au pacage des chevaux. Il a donc été convenu avec le propriétaire d'enterrer les fils reliant les sondes à la centrale de mesures afin de libérer l'espace occupé et de permettre la poursuite de l'acquisition de données sur le site. Aux alentours des dispositifs, l'occupation du sol correspond à un mélange d'herbe et de repousses de blé (Illustration 32).



*Illustration 32 : Vue de la parcelle Souleris (avril 2007)*

Pour le site Retenue, la parcelle était cultivée en colza. Malheureusement, lors de la mise en culture l'agriculteur est resté éloigné des dispositifs de mesure. Par conséquent, les alentours des dispositifs correspondent plutôt à une repousse de blé (Illustration 33).



*Illustration 33 : Vue de la parcelle Retenue (Avril 2007).*

Pour les deux sites, les teneurs en eau volumiques enregistrées depuis l'installation ont subi des variations en accord avec les données météorologiques (pluie et ETP).

Les plus fortes teneurs en eau volumique sont observées pendant les périodes hivernales et une partie du printemps. La période pendant laquelle les sols sont proches de la saturation est donc très longue au regard de la période de suivi. Pour l'année 2006, la diminution des teneurs en eau volumique s'est déroulée à partir du mois d'avril pour atteindre des valeurs minimales de mai à fin août. Ensuite les valeurs ont progressivement augmenté pour retrouver des valeurs proches de celles observées au début du suivi et qui peuvent être considérées comme très proche de la saturation. Pour l'année 2007, la diminution des teneurs en eau volumique a été plus tardive que 2006 puisqu'elle n'a réellement commencé qu'en juin pour atteindre des valeurs basses pour la période juillet-septembre. La poursuite des mesures permettra de voir à quel moment les valeurs proches de la saturation sont observées.

Globalement, les chroniques sont cohérentes avec des phénomènes susceptibles de se produire in situ si on exclue certaines valeurs jugées aberrantes (très fortement positives ou à l'inverse égales à 0) signe de dysfonctionnements très temporaires de certaines sondes. On remarquera toutefois une variabilité parfois importante des mesures enregistrées pour une profondeur donnée pour une parcelle donnée. Ces variations peuvent être liées à des phénomènes locaux (composition granulométrique du sol un peu variable, niveau de grep, proximité des racines etc.....).

La gamme de teneurs en eau volumiques enregistrées par les TDR peut paraître aberrante, en l'absence de mesures de densité apparentes du sol. L'utilisation de la

relation de Topp dite universelle pour passer de la résistivité du sol à sa teneur en eau volumique peut être remise en cause. Afin de valider les mesures réalisées, des comparaisons entre les humidités volumiques et pondérales ont été envisagées.

### ***Mesures des teneurs en eau pondérale***

Afin de valider les mesures d'humidité volumique réalisées au moyen des TDR, il a donc été décidé, fin 2006 de faire l'acquisition de données d'humidité pondérale de façon assez systématique lors des passages sur le site. Régulièrement au cours de l'année des prélèvements de sol sont donc effectués, par horizon de 10 cm d'épaisseur, pour effectuer cette mesure en laboratoire (Entreprise 2GH). La détermination se fait par comparaison des masses de sol avant et après séchage à 105°C pendant 24 heures.

Les horizons étant particulièrement compacts au delà de 50-60 cm de profondeur, les prélèvements ne sont effectués que jusque 50 cm de profondeur. L'illustration 34 permet d'illustrer ces prélèvements.



*Illustration 34 : Prélèvements de sol pour la détermination des humidités pondérales*

Les différents résultats obtenus pour les campagnes menées en 2006 et 2007 sont présentés dans l'illustration 35.

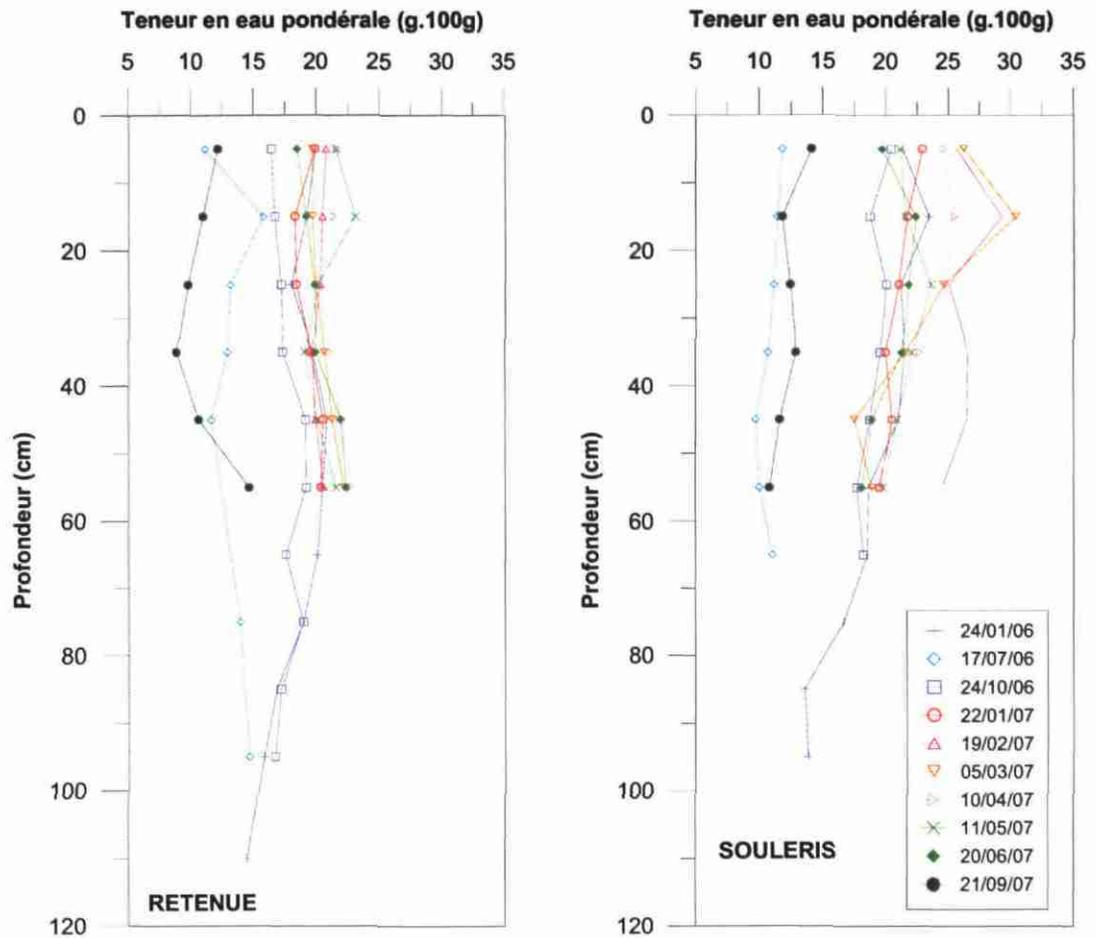


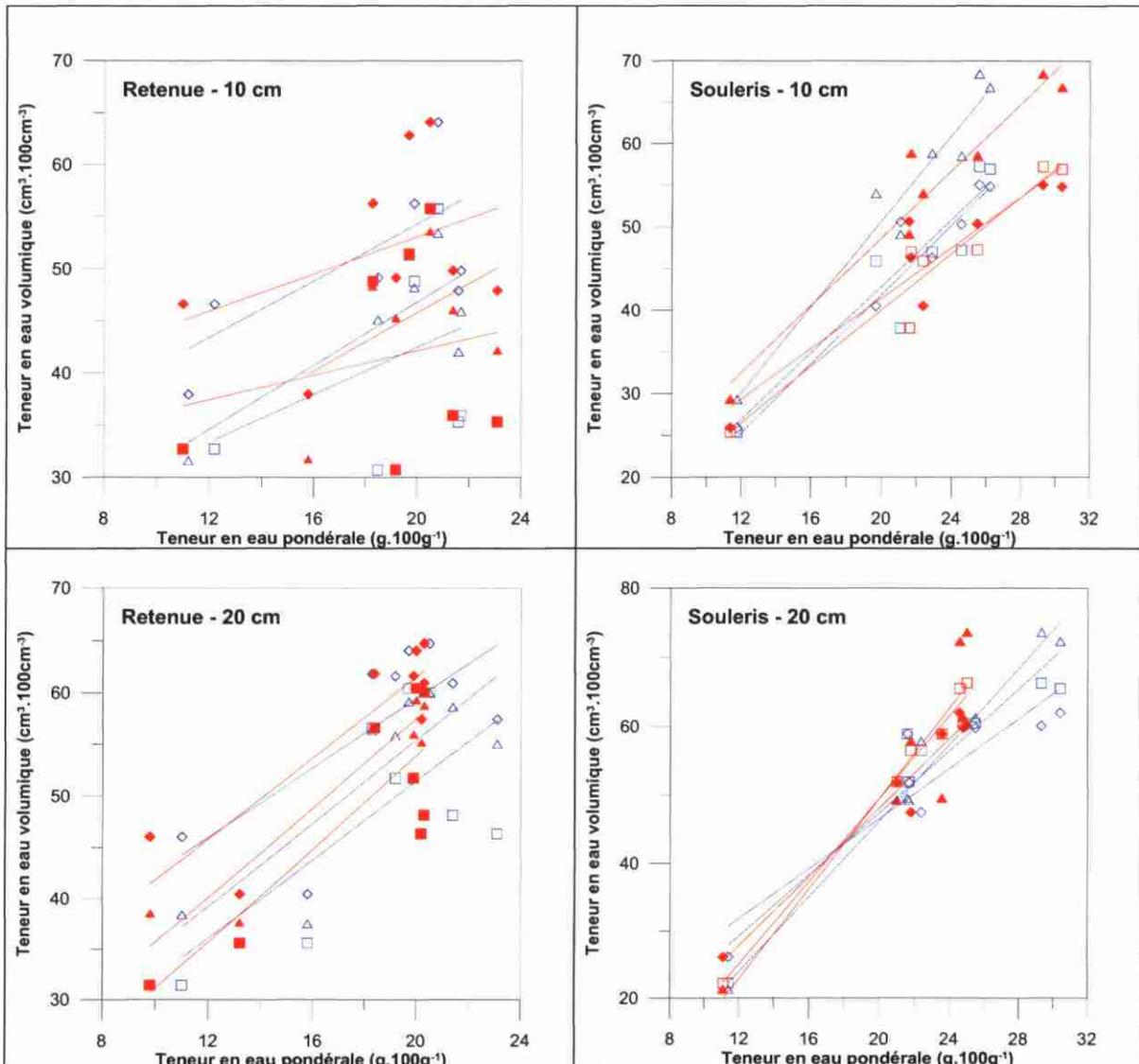
Illustration 35 : Evolutions au cours du temps et en fonction de la profondeur des teneurs en eau pondérales pour les sites de Souléris et Retenue.

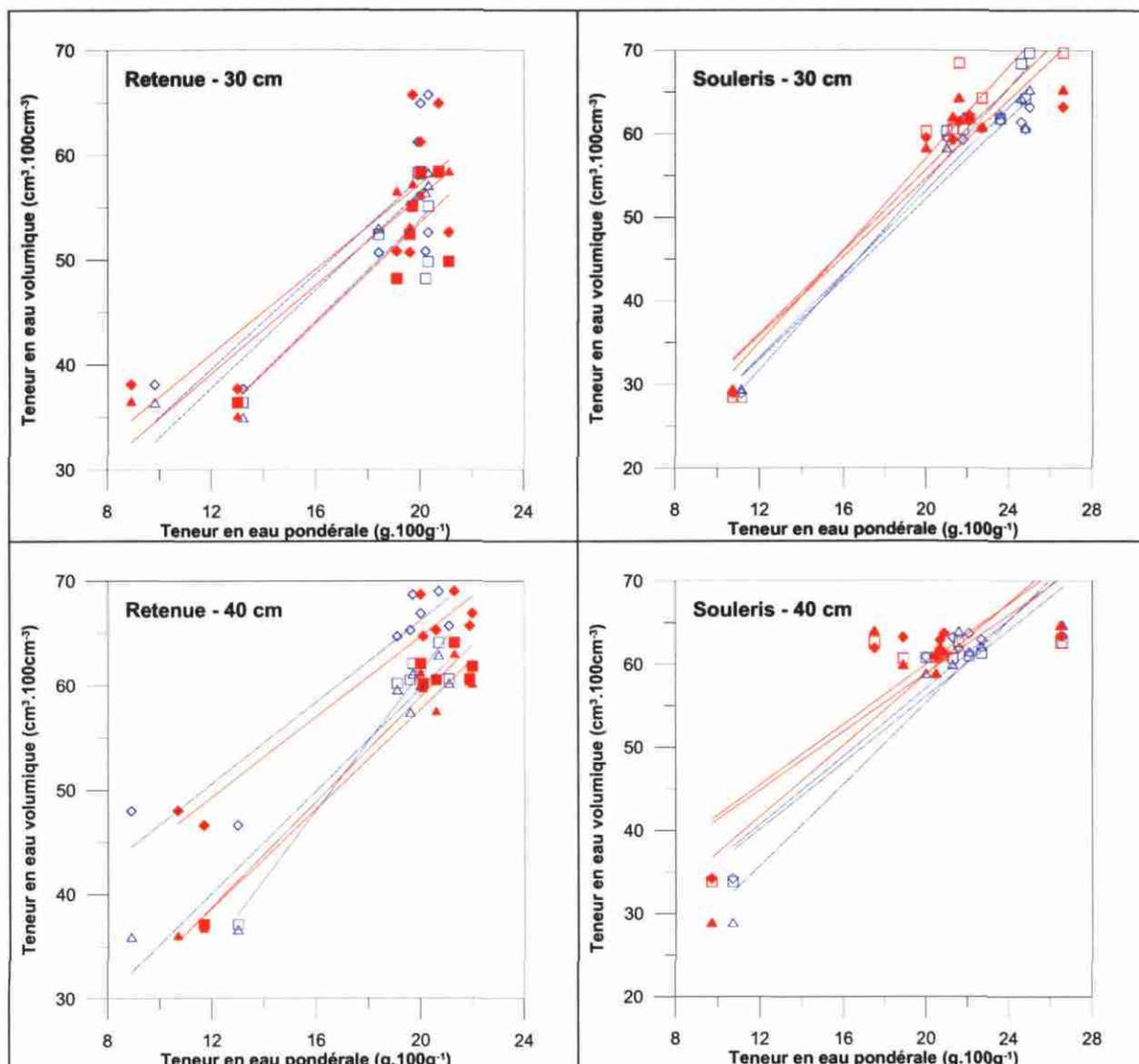
Pour les 2 sites, ce sont 10 campagnes de mesures d'humidité pondérale qui ont été réalisées en 2006 et 2007. Plusieurs constats peuvent être effectués. D'abord, pour une parcelle donnée, la plupart des valeurs mesurées fluctuent peu pour une profondeur donnée à l'exception des campagnes menées en juillet 2006 et septembre 2007, dates pour lesquelles les teneurs en eau sont nettement plus basses que les autres données, jugées proche de la saturation (période hivernale, données TDR).

Entre les 2 sites, il apparaît que les sols sont un peu différents avec des humidités pondérales plus importantes pour Souléris que pour Retenue. On notera aussi que les profils, c'est-à-dire tous les horizons les teneurs en eau sont peu variables.

### 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.





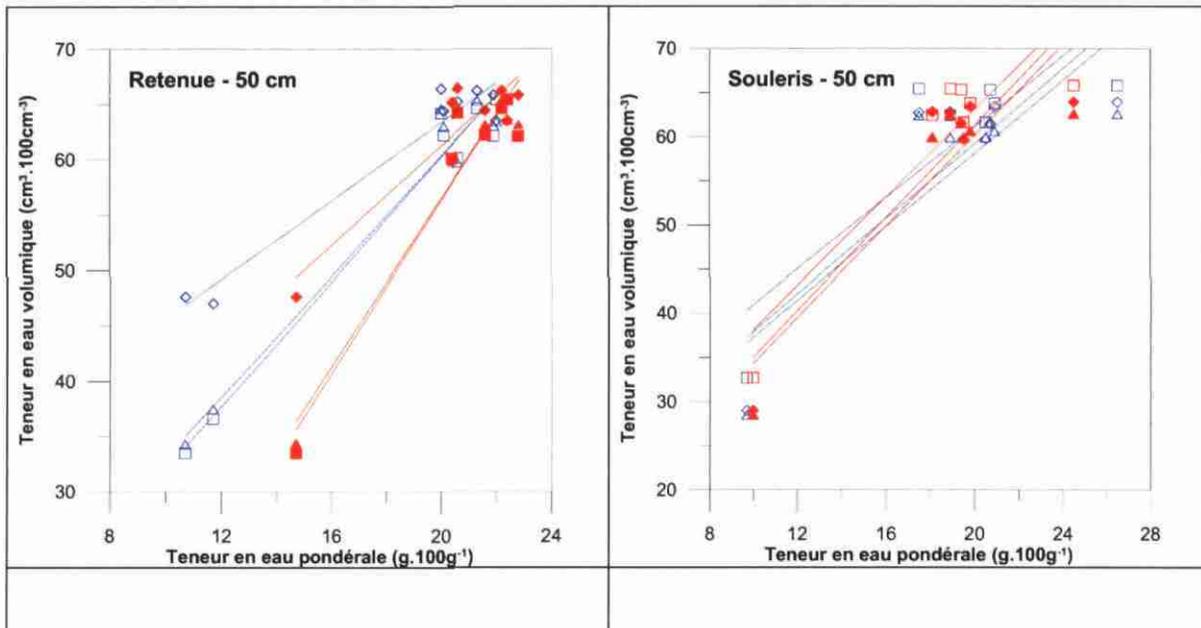


Illustration 36 : Teneur en eau volumique vs. Teneur en eau pondérale pour les différents horizons des parcelles Souleris et Retenue

L'illustration 36 permet de visualiser les relations entre les teneurs en eau pondérale et volumique pour différentes profondeurs. Dans la mesure où la TDR fait une mesure qui correspond à une sphère autour de la 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 (rouge) et les teneurs en eau pondérale de l'horizon 10-20 cm (en bleu).

D'une manière générale pour les 2 sites et tous les horizons, on peut regretter le faible nombre de mesures disponibles correspondant à des teneurs en eau faibles comparativement aux teneurs en eau élevées qui représentent la presque totalité des mesures. Ce problème découle naturellement du fait que les sols sont restés proches de la saturation une grande partie de l'année. La corrélation établie est donc sujette à caution puisque toutes les gammes de valeur susceptibles d'être rencontrées in situ, ne sont pas bien représentées.

Pour de nombreux horizons, on voit clairement que les sondes TDR placées à une même profondeur peuvent donner des résultats très différents en valeurs absolues (même si l'allure générale des variations TDR est comparable d'une sonde à une autre). Ainsi, par exemple on voit clairement que pour Retenue 50 cm, deux sondes (triangle et carré) donnent des résultats tout à fait comparables alors que la 3ème

(rectangle) diffère largement. En conséquence la relation entre les 2 grandeurs est très différente selon que l'on privilégie l'une ou l'autre des sondes.

On notera aussi la grande variabilité des teneurs en eau pondérale pour une humidité volumique assez constante, ce qui a une incidence importante sur la pente de la droite. Par exemple, pour Souléris 50 cm, les teneurs en eau pondérale varient globalement de 18 à 26 % pour une humidité volumique de l'ordre de  $65 \text{ cm}^3.100\text{cm}^3$ .

Pour les 2 sites, pour ces 2 raisons majeures, les corrélations obtenues ne sont donc pas totalement satisfaisantes. A ce stade, il n'a donc pas été réalisé de conversion systématique des teneurs en eau volumique en teneur en eau pondérale. La calibration doit se poursuivre par acquisition de données complémentaires in situ en privilégiant si les possibles les mesures dans les gammes de valeurs intermédiaires et basses. Une calibration en laboratoire pourrait aussi être envisagée même si cette technique pose aussi des problèmes de conception lié notamment à l'impact connu de la structure du sol sur la mesure de permittivité (et donc de teneur en eau volumique).

### ***Mesures des débits et de la pluviométrie***

Un problème mécanique est survenu au niveau du pluviomètre de la station de mesure à partir du mois de février 2007, occasionnant la perte de données jusqu'au mois de mai dernier. Les mesures de la station météorologique de Labastidette, située sur le bassin du Touch, gérée par Météo France ont donc été récupérées pour les besoins de l'étude.

L'acquisition des hauteurs d'eau, effectuée au niveau du seuil de contrôle à partir du capteur de type ultra-son s'est poursuivie normalement, sans problème notable.

L'illustration 37 figure l'évolution des débits enregistrés entre le 25 octobre 2006 et le 30 septembre 2007.

En raison d'un hiver 2006 – 2007 marqué par de faibles précipitations, il faut attendre le mois d'avril pour observer un pic de débit notable. Cet événement correspondant certainement à une précipitation orageuse n'a pas été enregistrée à la station de Labastidette où seulement 8 mm de pluie ont été mesurés. Pour de tels épisodes très localisés, l'absence de données à l'échelle du sous-bassin est dommageable pour l'interprétation.

Un autre événement pluvieux, enregistré cette fois ci au niveau de la station DIREN, est intervenu vers la fin du mois de mai, sur 4 jours consécutifs entre le 25 et le 28 mai, avec un maximum mesuré de 40 mm de pluie, le 26 mai. Une brutale évolution du débit est alors notée avec un jour de décalage (de 0 à environ  $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ ) et se poursuit jusqu'au 30 mai.

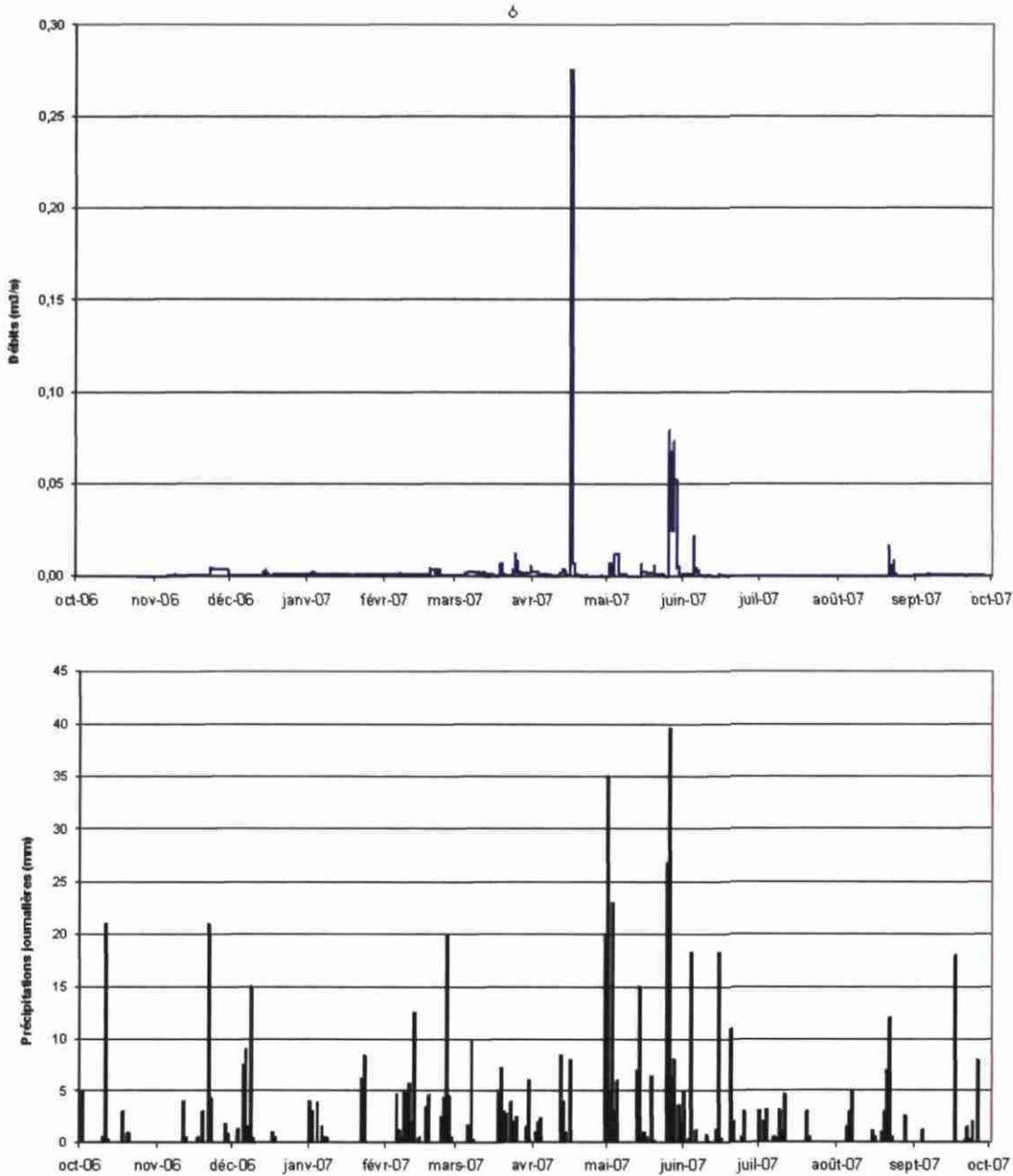


Illustration 37 : Evolution des débits enregistrés à la station de la DIREN Midi-Pyrénées et des précipitations journalières issues des données de MétéoFrance (station de Labastidette) entre octobre 2006 et septembre 2007

La période estivale 2007 (de début juin à fin août) aura été globalement humide (plus de 120 mm de pluie cumulée sur les 3 mois) mais sans épisode orageux marqué par des pics importants de précipitations (maximum d'environ 18 mm enregistré début juin). Ainsi, seules les pluies des mois de juin et de fin août ont permis d'observer une

augmentation des débits au niveau de la station. Celles-ci restent de faible ampleur (avec un maximum de seulement 0,02 m<sup>3</sup>/s).

Aucune évolution des débits n'est apparue au début de l'automne, caractérisé par de très faibles précipitations.

L'absence d'événements pluviométriques importants complique l'établissement de corrélations avec les données d'humidité des sols enregistrées dans les 2 parcelles du sous-bassin versant. L'analyse globale de l'ensemble des informations collectées, destinées à mieux comprendre les facteurs régissant les augmentations soudaines de débits et donc à pouvoir les prévoir, sera effectuée en 2008 avec la totalité des données acquises (les mesures de terrain s'interrompant début juin 2008).

### **Conclusion**

Sur les 2 sites, les dispositifs mis en place fonctionnent de manière satisfaisante et globalement beaucoup mieux en 2007 qu'en 2006 même si des dysfonctionnements sont toujours existants.

Les données tensiométriques, les mesures de teneurs en eau volumiques à l'aide des sondes TDR et les données d'humidité pondérale sont cohérentes. L'année 2007 a été marquée par une pluviosité assez importante (comparativement à 2006) ce qui a conduit à maintenir un état proche de la saturation pour les différents horizons des 2 parcelles, la parcelle Souléris étant la plus lente à atteindre les teneurs en eau les plus faibles. La corrélation entre les teneurs en eau pondérale et volumique reste toujours incertaine même si la connaissance a progressé. En plus du contexte climatique défavorable qui a conduit à peu de variabilité dans la gamme de mesures, la variabilité des teneurs en eau volumique enregistrées à une profondeur donnée pose le problème de l'établissement de cette corrélation. Cette variabilité pourrait être liée à des dysfonctionnements mais elle relève plus probablement de l'hétérogénéité naturelle des sols et des écoulements. Ces informations justifient le fait de multiplier l'acquisition à une profondeur donnée.

### **2.2.2. Suivi de l'humidité du sol à partir des images SAR**

Cette partie est présentée succinctement dans ce rapport de synthèse ; la globalité de l'étude fait l'objet d'un rapport distinct, intégrant (1) les principes de la télédétection radar, (2) la description des données optiques et radar utilisées, (3) les données ISBA intégrées pour l'intercomparaison, (4) les données in situ acquises (campagne gravimétrique d'une part, mesures des sites instrumentés d'autre part) et (5) les principes de cartographie de l'humidité par imagerie Radar.

#### ***SAR et humidité de surface***

Des changements des propriétés électriques du sol influencent la réflexion sur la cible de l'énergie des hyperfréquences émise par le système radar. En général, le signal augmente parallèlement au taux d'humidité. Aussi, la constante diélectrique détermine

la profondeur de pénétration de l'onde radar : plus elle est élevée moins l'onde radar pénètre dans le sol. Pour une surface donnée, les grandes longueurs d'onde peuvent pénétrer plus profondément que les courtes longueurs d'onde (Ulaby et al., 1982).

Sur les sols agricoles, la profondeur de pénétration de l'onde radar dans le sol ( $d$ ) est très faible (quelques centimètres en bande C). Cette profondeur dépend de la constante diélectrique du sol et de la longueur d'onde. Bruckler et al. (1988) ont trouvé, en utilisant un sol argileux-limoneux, que la profondeur de pénétration de signal radar en bande C diminue de 5 à 1 cm quand l'humidité du sol augmente de 10 à 30% (polarisation HH et angle d'incidence  $15^\circ$ ).

Avant d'extraire des données radar les valeurs d'humidité des sols, les images sont corrigées géométriquement et radiométriquement. Subséquemment, une sélection des sols nus est effectuée en associant chaque image radar à l'image optique classifiée la plus proche de la date d'acquisition. Des relations linéaires traduisant le lien entre le signal radar et l'humidité du sol sont ensuite appliquées aux images radar afin d'estimer les valeurs d'humidité. La base de données radar utilisée pour développer ces relations a été acquise entre 1994-2005.

### ***Données acquises (télédétection, modèle et in situ)***

#### **Données Radar ASAR**

Le satellite ENVISAT est équipé d'un imageur radar appelé ASAR (Advanced Synthetic Aperature Radar) pour observer la surface terrestre. Il a été lancé le 1<sup>er</sup> mars 2002. Son développement a été fait dans la continuité des satellites ERS-1 et ERS-2. Le capteur ASAR d'ENVISAT est un système « avancé » car il offre des acquisitions dans différents modes. Son antenne permet de sélectionner différentes fauchées, d'une largeur de 100 à 400km. Le radar ASAR fonctionne en bande C avec une fréquence de 5.331 GHz et une longueur d'onde de 5,66 cm. Il peut fournir des images avec des angles d'incidences allant de  $15^\circ$  à  $45^\circ$ , et deux polarisations simultanément (HH et HV ; HH et VV ; ou VV et VH). Il possède cinq modes d'acquisitions :

- a. **Image mode (IM)** : ce mode fournit des images avec une résolution spatiale de 30m, et de polarisation HH ou VV. Il contient sept fauchées et une gamme d'angles d'incidence entre  $15^\circ$  et  $45^\circ$ . La largeur de la fauchée est entre 56 km et 100 km.
- b. **Alternating polarisation mode (APM)** : Ce mode est identique au mode précédent (IM) mais il peut fournir simultanément des images avec deux polarisations : (HH et VV) ou (HH et HV) ou (VV et VH).
- c. **Wide swath mode (WSM)** : ce mode fournit des images avec une résolution spatiale de 150 m et en polarisation HH ou VV. La largeur du faisceau est de 405 km.
- d. **Global monitoring mode (GM)** : ce mode est identique au mode (WSM) mais avec une résolution spatiale de 1 km.

- e. **Wave mode (WM)** : Ce mode fournit des images avec une résolution spatiale d'environ 30 m et en polarisation HH ou VV. La largeur du faisceau est de 5 km x 5 km.

### **Données Radar ERS-2**

ERS-2 a été lancé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) en avril 1995. Ce capteur radar fonctionne en bande C, en polarisation VV, et avec un angle d'incidence de 23°. La largeur de fauchée est d'environ 100 km avec une résolution spatiale d'environ 30 m. La fréquence de visite (ou cycle) de ERS-2 est de 35 jours (ESA, <http://earth.esa.int/ers/>).

### **Données optiques SPOT**

Si les images radar en bande C fournissent une bonne description de l'état de la surface du sol (rugosité, humidité), les images optiques ont l'avantage de permettre une cartographie fiable de l'occupation du sol. Etant donné que les capteurs radar en bande C ne permettent de caractériser l'humidité que si les sols sont dépourvus de végétation, il a été nécessaire au préalable de localiser sur la surface du bassin les sols nus aux dates d'acquisition des images radar.

Ainsi, afin de limiter l'analyse aux sols nus, la base de données radar est complétée par des images optiques SPOT et ASTER. Ces images SPOT ont été fournies dans le cadre du programme ISIS avec le soutien du CNES.

### **Données in situ**

#### ***Mesures Gravimétriques***

Une campagne gravimétrique a été réalisée simultanément à l'acquisition radar du 12 Mars 2007. A cette date, on bénéficie de conditions optimales pour observer les variations spatiales d'humidité (Illustration 38). Ces mesures ont été faites simultanément à l'acquisition radar du 12 Mars 2007 afin de garantir le même état de surface et réduire ainsi le risque de modification d'état de surface.

Lors de cette campagne, 33 champs nus répartis sur l'ensemble du bassin ont pu être échantillonnés (Illustration 38). Dans un intervalle de temps de  $\pm 3h$  par rapport à l'heure d'acquisition radar, cinq cylindres de sols sont prélevés sur des parcelles présentant divers niveaux de rugosité (de lisse à rugueuse). La moyenne des 5 prélèvements est considérée comme représentative de l'humidité du champ, et peut donc être comparée à l'estimation radar ou aux simulations ISBA. Enfin, seule la couche de 0 à 10 cm a été prélevée par gravimétrie car la pénétration du signal radar est seulement de quelques centimètres en bande C [e.g. Ulaby et al, 1986 ; Brucker et al, 1988].

Chaque échantillon de sol prélevé est ensuite pesé en laboratoire. Cette pesée donne les poids humides des échantillons ( $P_h$ ). L'eau gravitaire mobilisable a été extraite par égouttage et dessiccation afin d'évaluer la masse d'eau et la masse solide du sol. Pour cela, les échantillons sont placés dans une étuve et perdent progressivement leur eau sous l'action de la chaleur. Afin d'éviter la destruction des constituants solides la température est maintenue à 105°C. L'échantillon est dit « à sec » après 24 heures ( $P_s$ ). Dès lors, l'humidité pondérale (WP) est calculée pour chacun des prélèvements :

$$WP (\%) = 100 \cdot \left( \frac{P_h - P_s}{P_s} \right) \quad (4)$$

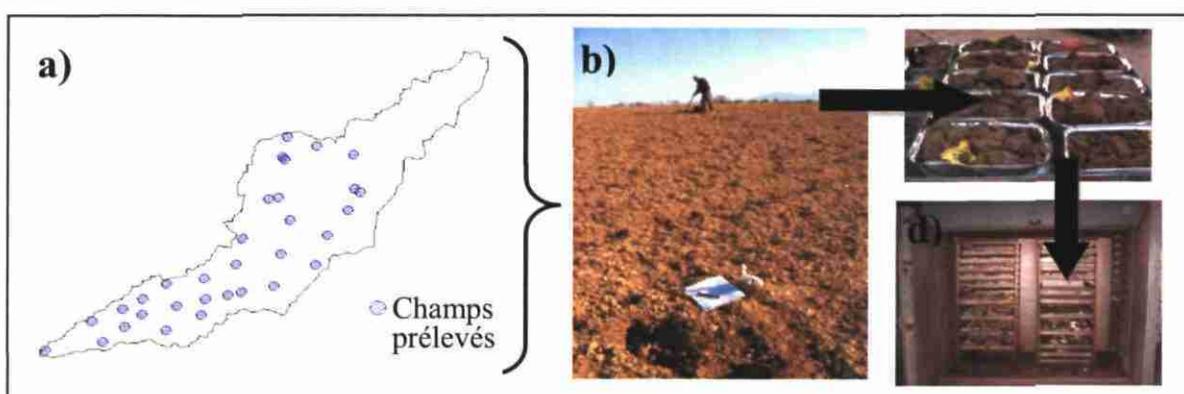


Illustration 38 : Protocole des mesures gravimétriques: a) localisation des parcelles prélevées le 12 Mars 2007; b) prélèvements des échantillons sur le terrain ; c) pesées des échantillons ; d) mise à l'étuve

L'humidité volumique est ensuite déterminée ( $m_v$ ) en utilisant la densité apparente ( $D_{appa}$ ) :

$$m_v (\%) = D_{appa} \cdot WP (\%) \quad (5)$$

Les humidités des sols, mesurées sur les parcelles, variaient entre 19% et 33%, avec un écart type moyen de 3%. La densité apparente des sols varie de 0,9 à 1,6%. L'humidité moyenne sur le bassin était de 24%.

A partir de ces données ponctuelles, on peut donc observer la variation spatiale du champ de l'humidité et valider quantitativement les estimations effectuées à partir de l'image radar et les simulations ISBA, du 12 Mars 2007.

Les données de cette campagne gravimétrique du 12 Mars 2007, étant réparties sur l'ensemble du bassin, elles peuvent nous renseigner de façon ponctuelle sur la répartition du champ d'humidité et être agrégées à différentes échelles : de l'échelle de la parcelle, à celle du bassin versant, en passant par l'échelle des mailles d'ISBA ou des zones de texture.

Aussi, les informations ponctuelles d'humidité obtenues lors de la campagne gravimétrique du 12 Mars 2007 ont été étendues à l'échelle des mailles. Le passage des données ponctuelles à des données surfaciques (mailles) a été opéré en moyennant les humidités des parcelles mesurées sur la maille. Une carte avec un maillage de 8km x 8 km a ainsi été générée, et une carte des sols nus lui a été associée (Illustration 39).

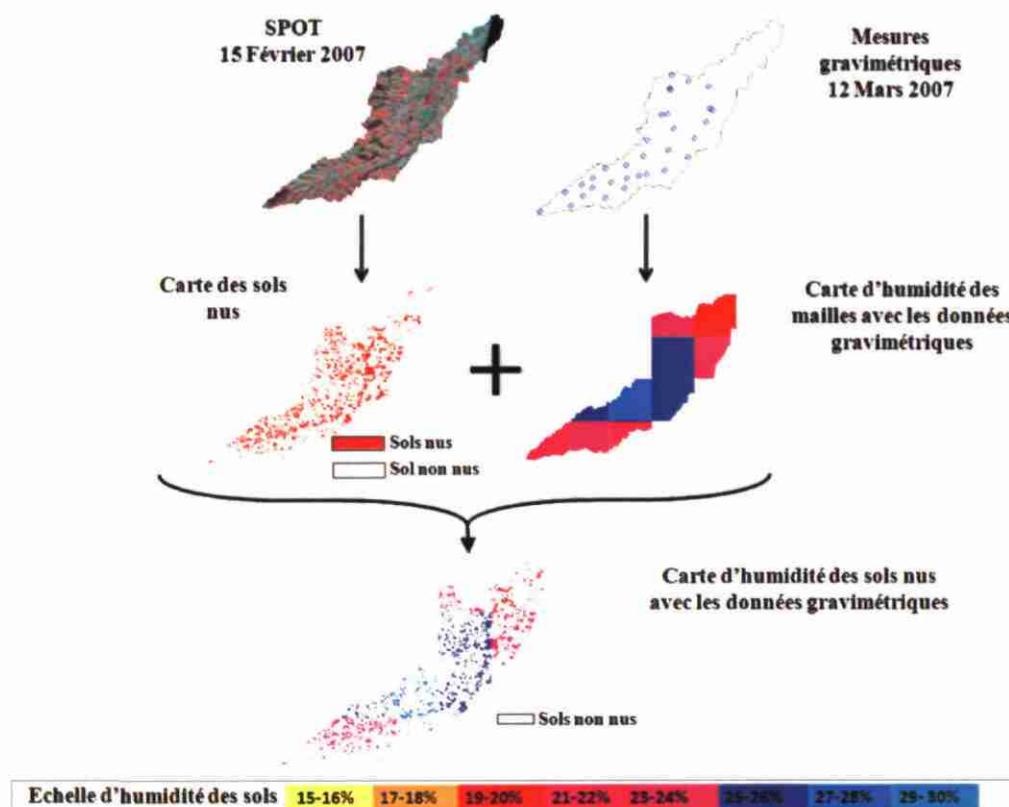


Illustration 39 : Principe de cartographie gravimétrique à l'échelle des mailles

Ainsi, les prélèvements effectués lors de la campagne gravimétrique du 12 Mars 2007, ont permis de calculer l'humidité moyenne de 10 mailles (19900, 19901, 20074, 20075, 20246, 20247, 20248, 20419, 20420, 20421) sur les 17 mailles couvrant le bassin. Sur ces 10 mailles, l'humidité moyenne mesurée par gravimétrie varie entre 19% et 27%. On observe donc des hétérogénéités spatiales d'humidité. L'écart type des valeurs entre les mailles est d'environ 2%. Par la suite, la comparaison de ces résultats avec les données radar et ISBA a été réalisée.

### Mesures TDR

Ces mesures sont donc réalisées sur les deux parcelles expérimentales situées à proximité de St Lys (paragraphe 2.1.) équipées de sondes TDR dont le pas de temps d'acquisition est de 4h.

Toutes les mesures TDR ont été calibrées à partir de 4 campagnes gravimétriques. L'illustration 40 montre que les points servant à calibrer les données restent peu nombreux et géographiquement situés sur une même partie du bassin versant du Touch. En effet, on ne dispose que d'un seul point pour les faibles valeurs d'humidité ( $\approx 12\%$ ) et de trois points à forte humidité (entre 22 et 28%).

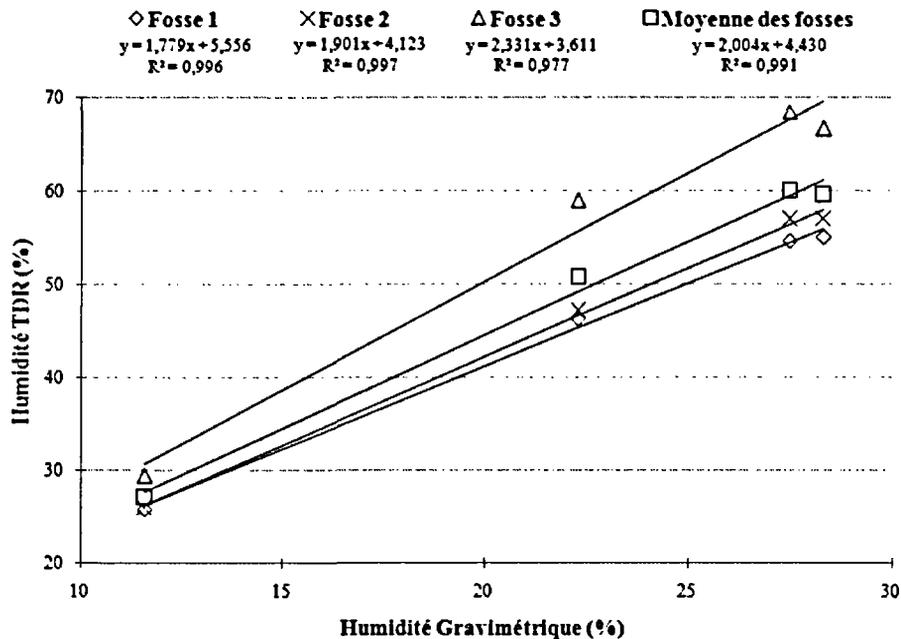


Illustration 40 : Calibration des données TDR pour les mesures de la sonde à 10 cm de la parcelle de Souléris

Afin de rendre comparable les données TDR aux données radar, les humidités pondérales préalablement calibrées ont été converties en humidité volumique. Ne disposant pas de mesure de densité pour effectuer cette conversion, la densité moyenne mesurée lors des campagnes gravimétriques du 12 Mars 2007 a été utilisée ( $\approx 1,29\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ). L'utilisation de cette valeur moyenne induit un biais sur les données TDR, et en particulier sur celles des sols de surface, car sa densité évolue sensiblement au cours de l'année en fonction de la pratique agricole (labours, semis...). Pour améliorer la calibration des données TDR, des mesures d'humidité gravimétriques sont réalisées à partir mars 2007.

- **Limite des relevés TDR pour la comparaison avec l'humidité estimée par radar**

L'objectif initial des mesures TDR était d'étudier l'incidence de l'état de saturation du sol sur la genèse des ruissellements. Les mesures de sondes situées à 10 cm de profondeur pouvaient néanmoins offrir la possibilité de valider les estimations radar. Mais l'absence de mesure de densité apparente, et le manque de robustesse dans les

processus de calibration des données TDR ne permettent pas à ce jour d'exploiter directement les données d'humidité issues de ces enregistrements, surtout en ce qui concerne les couches de surface des sols. De plus, les parcelles équipées de sondes TDR sont de trop petites tailles pour être estimées précisément par le radar.

Ainsi, compte tenu de ces éléments relatifs aux mesures TDR, la comparaison sera focalisée sur la cartographie de l'humidité à l'aide des données SAR, et les données ISBA fournies par Météo France d'autre part.

### **Données de modélisation hydrologique ISBA**

Le modèle ISBA « Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère » [Noilhan et Planton, 1989 ; Noilhan et Mahfouf, 1996] est un modèle hydrologique de surface, décrivant les transferts entre la végétation, le sol et les couches basses de l'atmosphère. Développé par le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), il est actuellement utilisé dans le modèle opérationnel de prévision météorologique de Météo-France, ainsi que dans les modèles atmosphériques de recherche (ARPEGE ALADIN ; ARPEGE CLIMAT et MESO NH).

Développé pour déterminer les conditions aux limites des modèles météorologiques, ISBA intègre la plupart des processus physiques contrôlant les interactions entre la surface du sol et l'atmosphère ainsi qu'une paramétrisation des dynamiques végétales et neigeuses. Le modèle est relativement simple et ne nécessite qu'un nombre limité de paramètres qui dépendent essentiellement du type de sol et de végétation [Noilhan et Planton, 1989].

Trois couches de sol sont définies dans le modèle ISBA, la couche de surface du sol ( $\approx 50$ cm), la couche de zone racinaire ( $\approx 1,5$  m), le sol profond étendu entre la base de la zone racinaire et la base de la colonne de sol ( $\approx 2$  m).

Enfin, pour sa simulation des flux de surface, ISBA discrétise l'espace en unité de surface de  $8 \times 8$  km, où il attribue une prévision à un pas de temps horaire. Ce maillage discrétise la surface du bassin versant du Touch en 17 mailles.

#### ▪ **Variables pronostiques :**

Dans le schéma de surface d'ISBA, des variables « pronostiques » permettent de modéliser, d'une part, les échanges de chaleur et d'humidité ainsi que la quantité de mouvement entre la surface hétérogène du sol et la couche atmosphérique qui la recouvre et, d'autre part, l'hydrologie, qui inclut la modélisation de la couverture neigeuse et des processus de gel du sol [BOONE, 2000] (Illustration 41).

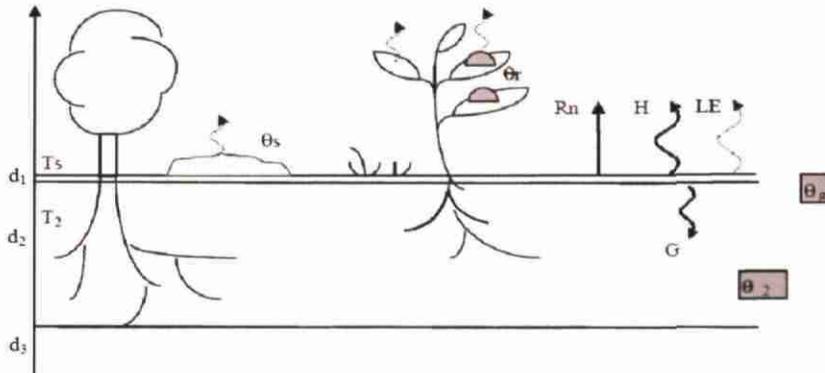


Illustration 41: Principaux flux de surface et variables pronostiques modélisées par ISBA

[PELLENQ, 2002]

Ainsi, le bilan hydrique et énergétique donné par ISBA est conditionné par le calcul de l'évolution de 9 variables dont 6 concernent le sol (Illustration 42). La variation temporelle de ces variables pronostiques est calculée pour chaque maille et indépendamment des mailles voisines.

Flux simulés à chaque pas de temps	Symbole	Unité
Flux de rayonnement net à la surface	Rn	W/m <sup>2</sup>
Flux de chaleur latente	LE	W/m <sup>2</sup>
Flux de chaleur sensible	H	W/m <sup>2</sup>
Flux de chaleur dans le sol	G	W/m <sup>2</sup>
Flux de drainage profond	D	W/m <sup>2</sup>
Flux de ruissellement	R	W/m <sup>2</sup>
Variables pronostiques	Symbole	Unité
Température de surface (sol et végétation)	T <sub>s</sub>	K
Température profonde	T <sub>2</sub>	K
Contenu en eau volumique dans la couche de surface	θ <sub>g</sub>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Contenu en eau volumique de la couche racinaire	θ <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Contenu en eau volumique de la couche profonde	θ <sub>3</sub>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
réservoir d'eau intercepté par la végétation	θ <sub>r</sub>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
contenu en eau équivalent du manteau neigeux	θ <sub>s</sub>	mm
albédo du manteau neigeux	alb <sub>s</sub>	mm
densité volumique du manteau neigeux	ρ <sub>s</sub>	kg/m <sup>3</sup>

Illustration 42 : Flux simulés et variables pronostiques d'ISBA [Goulet 2000]

▪ **Paramètres intégrés pour la prévision et forçage météorologique :**

ISBA caractérise les échanges de surfaces à l'aide de paramètres qui une fois introduits dans les expressions mathématiques des variables pronostiques, permettent de décrire la dynamique des flux du système sol-végétation-atmosphère : évapotranspiration, infiltration, drainage, ruissellement.

Le bilan d'eau et d'énergie entre le sol, la végétation, et l'atmosphère décrit par le modèle ISBA nécessite un nombre réduit de paramètres essentiellement associés au type de sol ou de végétation. Ainsi pour reproduire le fonctionnement hydrique d'un sol multicouche, seulement 19 paramètres doivent être renseignés (Illustration 43).

Enfin, diverses variables atmosphériques sont imposées au modèle ISBA (modèle de forçage atmosphérique SAFRAN). Ainsi, à chaque pas de temps, des valeurs de forçages atmosphériques sont affectées à chacune des unités de surface. Dans ce but treize autres variables doivent être renseignées. On note notamment parmi elles : la température de l'air, les précipitations (liquides et solides), le rayonnement solaire incident et la vitesse du vent.

Comme le but de cette étude est de décrire l'état de surface du sol, seules les humidités ISBA correspondant aux premiers centimètres du sol sont utilisées.

Paramètres primaires	Paramètres secondaires	Symbole
Type de végétation	Résistance stomatique minimale	$R_{smin}$
	Indice foliaire	LAI
	Fraction de végétation	veg
	Hauteur de rugosité	$Z_{0h} - Z_{0v}$
Type de sol (Pourcentage de sable et d'argile)	Contenu en eau à saturation	$\theta_{sat}$
	Contenu en eau à la capacité au champ	$\theta_{fc}$
	Contenu en eau au point de flétrissement	$\theta_{wilt}$
	Pente de la courbe de rétention	b
	Conductivité hydraulique à saturation	$K_s$
	Potentiel matriciel à saturation	$\psi_s$
	Coefficient thermique du sol à saturation	$C_{gsat}$
	Valeur de C1 à saturation	$C_{1sat}$
	Valeur de C2 à $\theta_2 = 0.5\theta_{sat}$	$C_{2sat}$
	Coefficient de drainage	$C_3$
	Coefficient intervenant dans le calcul de $\theta_{Geq}$	a et b
Couplage sol et végétation	Profondeur de sol racinaire	$d_2$
	Profondeur de sol profond	$d_3$
	Albédo de la surface	$\alpha$
	Emissivité	$\epsilon$

Illustration 43 : Liste des paramètres nécessaires au fonctionnement d'ISBA [PELLENQ, 2002]

▪ **Paramètres de la simulation de l'humidité :**

La gestion de l'eau dans le sol est effectuée par ISBA en modélisant, au pas de temps horaire, l'évolution temporelle de l'humidité de chacune des mailles.

Déterminé à partir des caractéristiques du sol, le contenu en eau est défini pour trois couches. Cependant, puisque le cadre de cette étude se limite à la couche superficielle du sol, seule l'expression de cette variable « pronostique » dans la couche de surface (~10cm) est ici détaillée (Illustration 44). L'expression de la variation du contenu en eau dans la couche de surface d'ISBA est définie comme suit

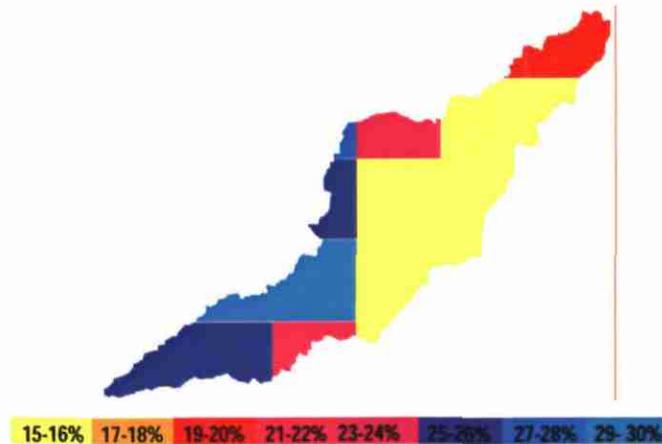
$$\frac{\delta\theta_g}{\delta t} = \frac{C_1}{\rho_w \cdot d_1} \cdot (P_g - E_g - Q_r) - \frac{C_2}{\tau} \cdot (\theta_g - \theta_{geq}) \quad (3)$$

Paramètres de variation du contenu en eau du sol	Symbole	Unité
Taux de précipitation au sol	$P_g$	kg. m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>
Taux d'évaporation à la surface du sol	$E_g$	kg. m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>
Taux de ruissellement à la surface du sol	$Q_r$	kg. m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>
Densité de l'eau liquide	$\rho_w$	kg. m <sup>-3</sup>
Profondeur de la couche de sol	$d_1$	10 cm
Paramètre hydrodynamique de forçage	$C_1, C_2$	-
Contenu en eau de la couche de surface pour lequel les forces gravitaires et les forces capillaires s'équilibrent.	$\theta_{geq}$	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Constante de temps des variations diurnes du contenu en eau	$\tau$	3600s

Illustration 44 : Paramètres de l'expression de l'humidité d'ISBA

Le modèle hydrologique ISBA a été utilisé pour simuler la teneur en eau du sol aux dates correspondant aux acquisitions d'images radar. Il faut cependant souligner que toutes les autres valeurs d'humidité de cette étude sont obtenues exclusivement sur des sols nus alors que les simulations ISBA prennent en compte l'ensemble de l'occupation du sol. Ainsi pour une maille donnée, la valeur d'humidité attribuée par ISBA correspond à une teneur en eau moyenne qui intègre l'ensemble de l'espace couvert par la maille et qui englobe donc des gammes d'humidité très hétéroclites (sols nus, végétations, zones urbaines ou encore de forêt).

L'illustration 45 illustre le type de carte d'humidité du sol produite à partir des valeurs simulées par le modèle hydrologique ISBA pour le bassin versant du Touch.



*Illustration 45 : Cartographie de l'humidité du sol sur le bassin du Touch, 12 Mars 2007 à 10 h TU.*

Les humidités du sol simulées par le modèle ISBA ont été comparées aux humidités estimées par radar. Diverses comparaisons ont été effectuées en utilisant :

- les valeurs fournies par le modèle à l'heure d'acquisition radar ;
- la moyenne des données ISBA à  $t_{\text{radar}} \pm 1h$  ;
- la moyenne des données ISBA à  $t_{\text{radar}} \pm 2h$  ;
- la moyenne des données ISBA sur la journée.

Les meilleurs résultats sont obtenus en utilisant les valeurs ISBA qui correspondent à l'heure d'acquisition radar.

Ainsi, pour toutes les comparaisons entre les humidités estimées par le radar et celles simulées par ISBA, il a été retenu d'utiliser les valeurs données par le modèle pour la couche superficielle (WG1) à l'heure d'acquisition radar.

### **Autres données**

Les autres données nécessaires pour la cartographie de l'humidité du sol ont été les :

- **Données pluviométriques :**

Les précipitations utilisées dans cette étude sont issues de 6 stations réparties sur l'ensemble du bassin : Toulouse-Blagnac, Toulouse-Franczal, Fabas, LaBasdidette, Lherm, et Rieumes.

- **Données de températures :**

Les observations utilisées dans cette étude sont des températures moyennes quotidiennes mesurées par la station de Toulouse-Blagnac.

- **Données pédologiques**

## Suivi de l'humidité par imagerie Radar sur le bassin versant

- Estimation radar de l'humidité sur les mailles isba

L'humidité a été estimée pour chaque grille ISBA (8 km x 8 km) pour l'ensemble des acquisitions radar. Pour les images ASAR, l'humidité de chaque polarisation est estimée séparément. D'après les résultats, les estimations d'humidités à partir des deux polarisations sont toujours similaires (en moyenne  $\Delta m_V (VV-VH) \approx 0,9\%$  et  $\Delta m_V (VV-HH) \approx 0,4\%$ ) (cf. Illustration 37). Ainsi, pour les images acquises par ce capteur, l'humidité attribuée à chaque maille a été assimilée à la moyenne des valeurs d'humidité estimées par les deux polarisations.

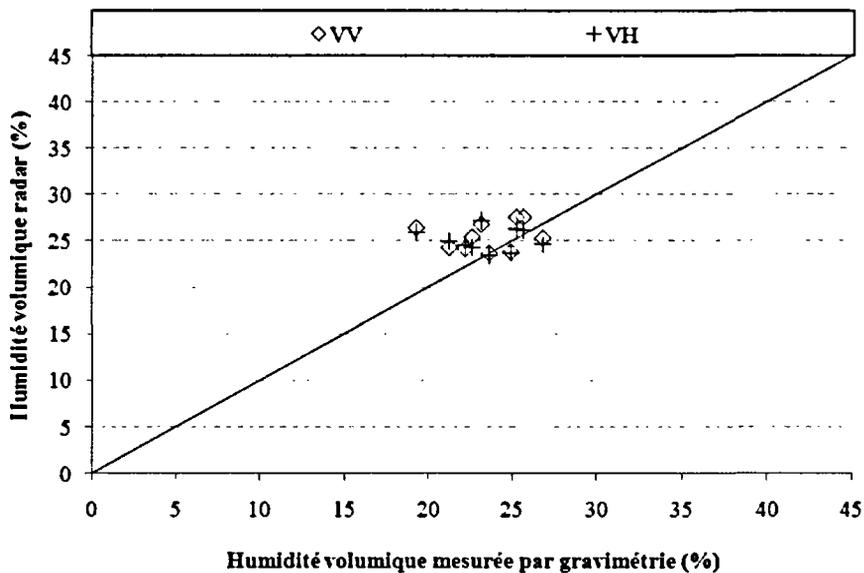


Illustration 46 : Comparaison entre humidités estimées par radar (polarisations VV et VH) et humidités mesurées par gravimétrie à l'échelle des mailles ISBA (12 Mars 2007)

Entre Mars 2006 et Mars 2007, les estimations radar couvrent une gamme d'humidité allant de 16% (10 Juillet 2006) à 33% (11 Mars 2006). Selon la date considérée, la différence entre humidité minimale et humidité maximale varie entre 2,5 (15 Avril 2006) et 8,6% (17 Mars 2006). Les contrastes d'humidité entre les mailles sont donc plus ou moins marqués selon la date (cf. Illustration 47).

En outre, sur les 18 dates étudiées les valeurs d'humidité minimales et maximales ne sont pas toujours attribuées aux mêmes mailles (cf. Illustration 47). La répartition spatiale de l'humidité n'est donc pas constante. De ce fait, seul un facteur dont l'influence sur l'humidité est temporaire peut expliquer ces variations spatiales d'humidité.

Une répartition hétérogène des précipitations pourrait expliquer les variations spatiales d'humidités estimées par le radar sur les mailles du bassin. Cependant, cette

supposition n'a pas été vérifiée avec les évènements pluvieux. En effet, l'écart moyen de mesure d'une même précipitation entre les 6 stations est seulement de 2 mm. Pour la période hivernale, la répartition des précipitations est donc globalement homogène sur l'ensemble du bassin, et ne peut expliquer les variations spatiales d'humidité observées entre les mailles.

D'autres facteurs, comme la porosité de surface liée au travail du sol, l'exposition à ensoleillement, les cellules orageuses ou le vent, sont aussi des facteurs non permanents dont l'action n'est pas toujours localisée au même endroit. La présence ou l'absence de tels facteurs pourrait non seulement expliquer les variations d'humidité observées entre les mailles du bassin à une date donnée, mais aussi expliquer le fait que les valeurs minimales et maximales d'humidité ne soient pas toujours estimées sur les mêmes mailles. Cependant, aucune donnée sur ces facteurs n'est disponible et ces hypothèses n'ont pas pu être vérifiées.

Date	$m_{vmin}$ (%)	$m_{vmax}$ (%)	$m_v$ moyen (%)
12/03/2007	23,60	27,25	25,67
17/01/2007	23,60	27,17	25,62
07/01/2007	24,06	28,69	26,52
04/01/2007	26,20	29,50	28,25
01/01/2007	23,76	26,89	25,59
14/08/2006	16,59	21,69	18,69
10/07/2006	16,38	24,43	20,75
15/04/2006 (22h)	25,18	31,21	29,77
15/04/2006 (10h)	24,58	27,12	26,11
12/04/2006	18,99	26,68	24,72
02/04/2006	17,72	24,69	23,53
30/03/2006	26,05	31,99	29,25
27/03/2006	23,18	31,61	28,53
18/03/2006	19,09	26,02	22,67
17/03/2006	22,96	31,58	27,72
11/03/2006 (22h)	28,04	32,91	30,69
11/03/2006 (10h)	28,14	31,96	30,27
08/03/2006	23,19	30,10	27,81

Illustration 47 : Humidités estimées par le radar sur les mailles ISBA

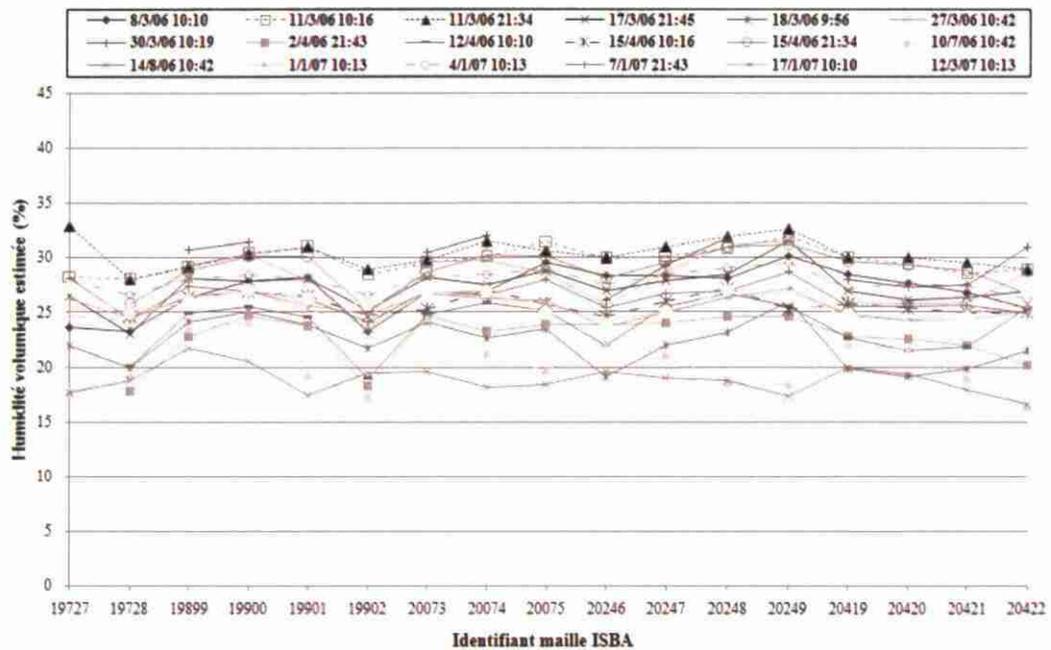


Illustration 48 : Humidités estimées par le radar sur les différentes mailles du bassin

▪ **Validation des estimations radar**

Les humidités gravimétriques moyennées sur les mailles sont comparées aux valeurs estimées par le radar (cf. Illustration 49).

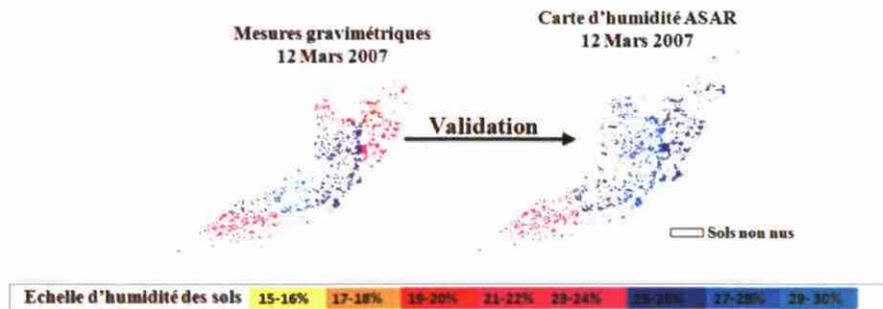


Illustration 49 : Principe de validation de l'humidité estimée par radar sur les sols nus

Les estimations radars montrent un biais de 2% par rapport aux mesures gravimétriques et un RMSE de 3%. Un maximum de différence de 7% d'humidité entre les estimations radars et les mesures gravimétriques est observé pour la maille 19901. Cependant, sur cette maille une seule parcelle a été prélevée, sa valeur n'est donc pas forcément représentative de l'ensemble des sols nus de la maille.

Ainsi, la discrétisation du bassin versant en maille a permis de mettre en évidence des variations spatiales d'humidité.

- **Estimation radar de l'humidité moyenne sur le bassin du Touch**

L'humidité moyenne de l'ensemble des sols nus du bassin versant a été estimée à partir des données radar acquises entre mars 2006 et mars 2007. L'estimation radar s'effectue donc sur l'ensemble des pixels de sols nus composant le bassin. Comme pour la cartographie de l'humidité à l'échelle des mailles, après avoir estimé l'humidité sur les deux polarisations, les valeurs d'humidité du sol sont moyennées.

Les résultats obtenus montrent que durant la période d'étude, l'humidité du bassin varie de 19% (14 août 2006) à 31% (le 11 mars 2006). La base de données couvre donc une large gamme d'humidité du sol. Néanmoins en s'abstenant des deux dates correspondantes à la période estivale (14 Août et 10 Juillet 2006), l'humidité estimée sur le bassin varie seulement de 23 à 31% en 2006 et de 26% à 28% pour les 5 acquisitions de 2007. Avec un maximum de variation d'humidité de 8% entre mars et avril 2006, la gamme d'humidité du sol du bassin estimée par le radar, durant la période hivernale est représentative des changements d'état hydrique du bassin (Illustration 47).

- **Analyse des relations entre les humidités radar et les précipitations mesurées**

Les variations temporelles de l'humidité du sol sur le bassin, estimées par les capteurs SAR entre le 8 Mars 2006 et le 12 Mars 2007, ont été analysées au regard de l'historique des précipitations mesurées par les stations météorologiques. Cette analyse conjointe de l'humidité et de la pluviométrie montre que les estimations radar sont globalement bien en accord avec les antécédents pluviométriques (cf. Illustration 50) puisque les valeurs d'humidité du bassin les plus élevées correspondent bien à des cumuls de précipitations importants.

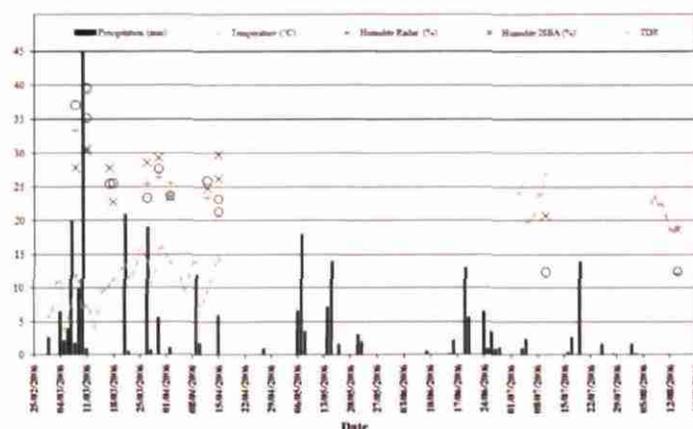


Illustration 50 : Comparaison des humidités estimées par radar et celles simulées par ISBA selon les précipitations (2006)

Par exemple, après les précipitations importantes du 10 Mars 2006 (45 mm), l'estimation radar de l'humidité du sol augmente de 28% à 30% entre le 8 et le 11 Mars 2006. A partir du 11 Mars 2006, l'humidité du sol commence à décroître jusqu'à atteindre une teneur en eau moyenne de 23% le 18 Mars 2006. Cette tendance est parfaitement cohérente étant donné qu'aucune précipitation significative n'est enregistrée par les stations météorologiques entre ces deux dates (1mm le 11 Mars 2006). En outre, parallèlement à cette interruption des précipitations, les températures augmentent. Ces conditions météorologiques sont donc effectivement favorables à l'assèchement de la surface sol.

Du 18 au 27 Mars 2006, l'humidité du bassin augmente d'environ 6% pour un cumul de précipitations de 20 mm en 7 jours. La majeure partie est due à un seul événement pluvieux (17mm le 21 Mars 2006). Du 27 au 30 Mars, les précipitations sont négligeables (cumul inférieur à 1 mm) et l'humidité du sol reste constante.

Une bonne corrélation entre l'humidité estimée par le radar et les précipitations est aussi observée avec les images radar de 2007 (cf. Illustration 51). En effet, l'humidité estimée par le radar augmente de 26% à 28% entre le 1<sup>er</sup> et le 4 Janvier 2007, puis décroît à 27% le 7 Janvier 2007. Cette évolution de la teneur en eau moyenne du bassin est cohérente avec les précipitations de 13 mm mesurées entre le 1<sup>er</sup> et le 4 Janvier, et celles de 2 mm précipitées durant la période du 4 au 7 Janvier.

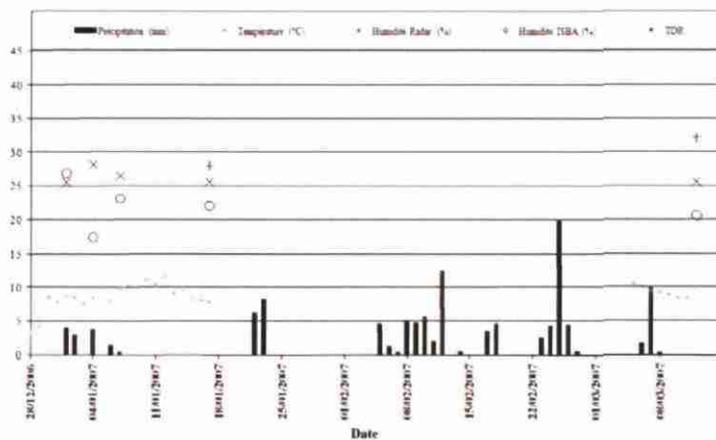


Illustration 51 : Comparaison des humidités estimées par radar et celles simulées par ISBA selon les précipitations (2007)

### Comparaison des résultats Radar et ISBA

Les résultats obtenus précédemment montrent que l'humidité radar varie de 17% à 33% entre Mars 2006 et Mars 2007 alors qu'ISBA simule des humidités allant de 10 à 45%. De plus, à une date donnée, les estimations radar montrent moins de différences d'humidités entre les mailles du bassin par rapport à ISBA : pour le radar, le maximum

de variation d'humidité est de 7% (18 Mars 2006), alors qu'à cette même date ISBA simule un contraste d'humidité de 15%.

▪ **Comparaisons des humidités radar, ISBA, et gravimétriques (12 Mars 2007)**

Sur les 17 mailles ISBA, 10 mailles sont déterminées par le radar et par ISBA à une différence de moins de 7% d'humidité volumique. Les 7 mailles présentant des différences importantes entre le radar et ISBA correspondent aux 7 mailles, situées au NE du bassin, dont les humidités simulées par ISBA sont toujours les plus faibles quelque soit la date considérée (mailles : 19901, 19902, 20074, 20075, 20248, 20249, 20422).

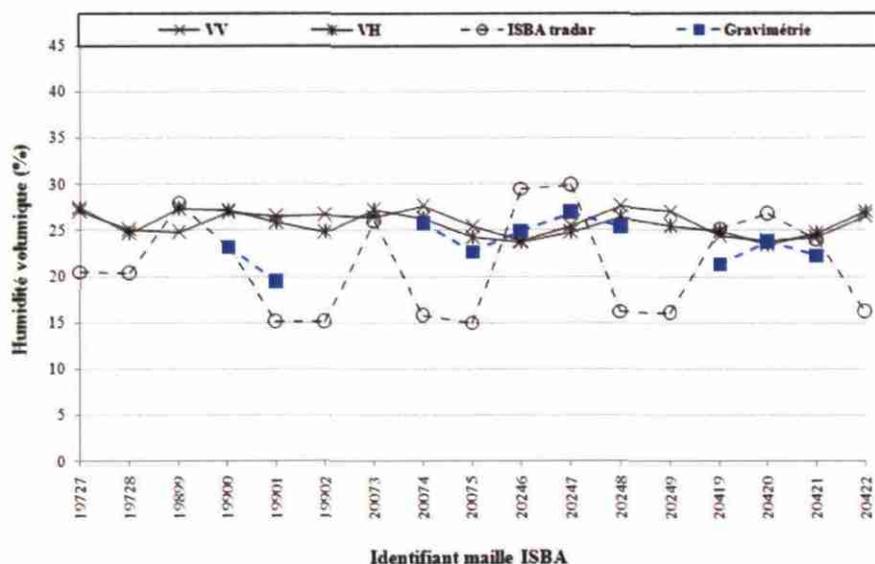


Illustration 52 : Comparaison à l'échelle des mailles, des humidités estimées par radar, simulées par ISBA, mesurées par gravimétrie - 12 Mars 2007

Parmi les 7 mailles présentant une différence d'estimation supérieure à 7%, 3 mailles n'ont pas de mesures gravimétriques associées. Sur les quatre autres mailles où la différence d'humidité entre l'estimation radar et la simulation ISBA est supérieure à 7% une maille (n°19901) apparaît être mieux déterminée par le modèle, mais les trois autres mailles (n°20074, 20075, 20248) sont mieux estimées par le radar (cf. Illustration 52). Ainsi, les différences d'humidité entre les estimations radar et les mesures gravimétriques sont moins importantes que les différences d'humidité entre les simulations ISBA et ces mêmes mesures de terrain. Pour la maille où la simulation ISBA est plus proche de la valeur mesurée in situ (n°19901), il faut émettre une réserve car la valeur gravimétrique attribuée à cette maille est basée sur la mesure d'un unique champ. En effet, bien qu'il ait été démontré que les différences observées entre les humidités in situ et celles simulées ou estimées ne sont pas corrélées aux nombres de parcelles prélevées, une seule valeur d'humidité ne peut pas refléter avec exactitude l'humidité de l'ensemble des sols nus d'une maille.

▪ **Analyse des différences d'humidité entre le radar et le modèle ISBA (Mars 2006, Mars 2007)**

Les différences d'humidité entre les estimations radar et les simulations ISBA sont comprises entre -15% et +12% (cf. Illustration 53). Excepté pour le 4 janvier 2007 où, sur 3 mailles situées dans la partie sud du bassin, la différence est de l'ordre de 23%.

Pour la plupart des dates acquises entre Mars 2006 et Mars 2007, on observe des différences moyennes d'humidité Radar-ISBA comprises dans un intervalle de  $\pm 1$  à  $\pm 7\%$  d'humidité volumique (Illustration 53). Sur les 18 journées étudiées, 4 dates ont des différences moyennes d'humidité Radar-ISBA supérieures à  $\pm 10\%$  de teneur eau volumique. Plus précisément, pour le 8 et le 11 Mars 2006 les valeurs d'humidité simulées par ISBA sont supérieures à celles estimées par le radar. A l'inverse, pour le 14 Août 2006 et le 10 Juillet 2006, les teneurs en eau simulées par ISBA sont inférieures aux estimations radar.

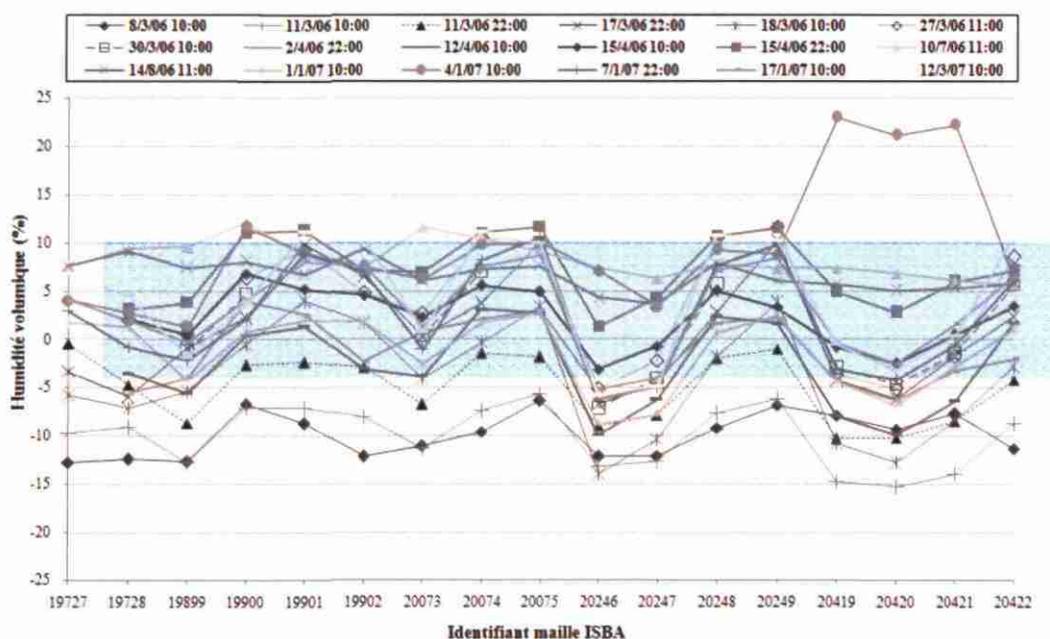


Illustration 53 : Différence d'humidité radar – ISBA pour chaque maille du bassin. La zone bleutée correspond à l'intervalle où la différence d'humidité entre radar et modèle ISBA est de  $\pm 7\%$

**Conclusion**

L'examen du potentiel des données ASAR et ERS-2 acquises entre Mars 2006 et Mars 2007 a permis d'établir des relations expérimentales reliant le coefficient de rétrodiffusion radar à l'humidité du sol.

L'un des objectifs était de calibrer la cartographie de l'humidité des sols issue des données SAR à l'aide des mesures in situ en cours d'acquisition sur le sous bassin de St Lys. Cette relation n'est à ce jour pas directement réalisable, les mesures TDR ne fournissant des données absolues calibrées. La comparaison des humidités estimées à partir des images radar avec celles simulées par le modèle ISBA de Météo-France (mais aussi celles mesurées par gravimétrie) sont convaincantes. Les résultats obtenus sont prometteurs pour le développement d'un algorithme simplifié qui cartographie l'humidité du sol à partir d'images satellitaires. En effet, la robustesse des relations expérimentales reliant le signal radar à l'humidité du sol, et la précision obtenue sur les humidités estimées par radar montrent que la surveillance de l'humidité du sol à partir d'images SAR est possible dans une phase opérationnelle.

### **2.3. MODELISATION DES CRUES DE NAPPE SUR LE BVNE DE LA SOMME**

Pour achever de rendre totalement opérationnelle l'intégration du logiciel GARDÉNIA dans la plateforme DEMETER il est nécessaire d'adapter les fichiers reçus périodiquement et automatiquement :

- les fichiers météo (pluie, évapotranspiration potentielle) observés et prévus,
- les fichiers d'observations de débits les plus récents.

Il est aussi nécessaire de transformer les résultats de GARDÉNIA en fichiers acceptés par DEMETER avec en particulier une prévision sans pluies futures et avec les prévisions (déterministes) de pluies.

Il sera également nécessaire de recalibrer les paramètres de prévision au vu des observations les plus récentes.

Après le bassin de la Somme, il est envisagé d'aborder également la prévision des « crues lentes » sur le bassin versant de la Meuse. Dans ce but, compte tenu de la forme étendue du bassin et des temps de propagations amont aval de l'ordre de 4 à 5 jours, on utilisera le modèle EROS du BRGM (Ensemble de Rivières Organisées en Sous bassins) mais en introduisant un temps de transfert à la sortie de chaque sous bassin.

Pour la finalisation du portage sur la plateforme DEMETER il a fallu adapter le code de calcul GARDÉNIA pour prendre en compte des formats de données SANDRE étendus (en entrée comme en sortie). Des procédures d'actualisation automatique des fichiers de données d'entrée ont été élaborées et devront être validées en 2008 quand les fichiers DEMETER relatifs à la Somme seront fournis par le SCHAPI

## **2.4. ROLE ET CONTRIBUTION DES EAUX SOUTERRAINES D'ORIGINIE KARSTIQUE AUX CRUES**

### **2.4.1. Introduction et objectifs**

Le rôle et la contribution des eaux souterraines d'origine karstique aux crues méditerranéennes sont supposées voire démontrées dans certains cas. La quantification des eaux souterraines par rapport à des événements particuliers n'est pas systématique. De plus du point de vue de la prévision, l'interprétation de chroniques piézométriques au niveau de l'épikarst, de la zone noyée (drains et blocs fissurés) sur plusieurs cycles hydrologiques permettrait de pouvoir définir des seuils d'alerte, voir des scénarios prévisionnels pour analyser le comportement du système lors d'une succession d'événements pluvieux.

L'analyse du fonctionnement hydrogéologique du bassin d'alimentation de la Fontaines de Nîmes (cf. rapport BRGM 2006, RP-54723-FR) a mis en évidence la participation des eaux du karst aux phénomènes d'inondations lors des épisodes pluvieux importants (septembre 2005 notamment). Les crues des cadereaux sont en effet constitués en grande partie d'eaux nouvelles ayant transitées par l'épikarst.

Suite à la réunion de projet avec le SCHAPI en mars 2007, les efforts pour l'année se sont focalisés sur le bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes et plus particulièrement sur le bassin versant du cadereau d'Alès en exploitant les données disponibles tant du point de vue hydrologique, météorologique qu'hydrogéologique, au vu des études en cours et de la proximité avec le SPC Grand Delta, même si celui-ci n'a pas la responsabilité des prévisions sur la ville de Nîmes.

A partir d'une approche couplée hydrogéochimique et hydrogéologique, les mécanismes d'interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines ont été mis en évidence dans le cadre d'un projet mené par le BRGM et la Ville de Nîmes entre 2004 et début 2007. La contribution des eaux souterraines à la genèse des crues a été démontrée, à l'échelle de deux bassins versants de cadereaux, cadereau d'Uzès (en partie) et d'Alès. Tous les cadereaux n'ont pas été caractérisés. Le système d'alerte ESPADA de la Ville de Nîmes est basé notamment sur des simulations hydrologiques de type approche par modèles « réservoirs » en cascade à l'échelle des bassins versants des cadereaux de la ville (modèle GR4 du Cemagref). Pour certains de ces bassins, des problèmes de calage font apparaître des problématiques de métrologie, mais aussi des problèmes de représentation du comportement du karst.

## 2.4.2. Présentation du site d'étude

D'un point de vue géographique, l'étude est axée principalement sur le bassin d'alimentation (= bassin hydrogéologique<sup>1</sup>) de La Fontaine de Nîmes, différent de son bassin versant<sup>2</sup> (Illustration 54).

Du point de vue hydrogéologique, deux ensembles aquifères sont ici juxtaposés et pour partie en liaison au travers de la faille de Nîmes : au N et au NW avec extension vers le SW, ce sont les systèmes karstiques des Garrigues de Nîmes, à l'Est et au Sud, c'est la nappe alluviale de la plaine de la Vistrenque dont l'extension est continue dans la dépression, marquée par un écoulement général du NE vers le SW.

Les systèmes karstiques des Garrigues nîmoises comprennent deux horizons susceptibles d'être aquifères, assez bien isolés, mais tant l'un que l'autre très compartimentés. Le plus élevé est représenté par les formations **calcaires du Barrémien supérieur à faciès urgonien (n4b)** sur la carte géologique de l'illustration 54). Il s'étend au Nord des Garrigues et se retrouve drainé par le Gardon en contribuant à l'alimentation des grosses sources reconnues en rive droite. Pratiquement inutilisé, ce réservoir peut receler des réserves en eaux importantes au-dessous de la ligne d'écoulement de la rivière. Son exploitation a été envisagée au moyen de forages autour de la résurgence des Fregeires (Poul, 1976). Entre le secteur amont où on note des pertes (vers Dions) et l'absence d'écoulements aériens, et le secteur aval des sources principales, en amont du Pont du Gard et de Collias, des relations par traçages dans ce réservoir ont démontré les écoulements karstiques tous dirigés vers le Gardon.

Le second est constitué par les **calcaires de l'Hauterivien supérieur (n3b)**, moins karstifiés que les précédents. L'extension de ce réservoir dépasse au moins vers l'Ouest (vers Parignargues) la limite du bassin versant superficiel de la Fontaine, y incluant des communications possibles avec les calcaires barutéliens (n4a2/n4aB - base de l'Urgonien). Ce karst alimente quelques sources pérennes ou temporaires, toutes situées dans la partie méridionale des Garrigues. Leur débit n'est élevé que lors des épisodes de crues. La plus importante des sources karstiques est la Fontaine de Nîmes dont les débits d'étiage sont limités entre 20 et 30 l/s. C'est ce second ensemble de formations calcaires et marneuses qui fait l'objet de cette étude.

Ces deux horizons calcaires sont isolés par les **calcaires argileux et marnes du Barrémien inférieur (n4a1/n4aM)** qui jouent probablement un rôle important dans la délimitation du bassin hydrogéologique de la Fontaine de Nîmes.

Les **marnes et les calcaires argileux de l'Hauterivien inférieur (n3a)** ne favorisent pas l'infiltration des eaux mais jouent plutôt le rôle de mur imperméable pour l'Hauterivien supérieur.

---

<sup>1</sup> Bassin hydrogéologique : domaine aquifère, simple ou complexe, dans lequel les eaux souterraines s'écoulent vers un même exutoire ou un groupe d'exutoires ; appelé également bassin d'alimentation, il est délimité par une ligne de partage des eaux souterraines.

<sup>2</sup> Bassin versant : région délimitée, drainée par un cours d'eau et ses tributaires, dont elle constitue l'aire d'alimentation.

Du point de vue hydrographique, les différents réseaux hydrographiques compris entre la latitude de Marguerittes à l'Est et de Parignargues à l'Ouest ont été regroupés en 5 secteurs principaux (Illustration 55):

- un ensemble de 6 cadereaux issus du plateau des Garrigues et rejoignant directement la plaine entre Marguerittes et Courbessac, avec pour chacun des superficies modestes, inférieures à 5 km<sup>2</sup>. Du fait de la nature du bassin versant à dominante de marnes, les cadereaux présentent un écoulement temporaire très variable ; ils sont le plus souvent à sec, et en l'absence d'émergences visibles, ils ne coulent que quelques jours par an ;
- à partir du cadereau de la route d'Uzès, les cadereaux de la route d'Alès, de Camplanier, et de Valdegour transitent par la ville de Nîmes, avec des superficies de bassins versants sensiblement plus importantes. Aux apports directs par les pluies, s'ajoutent les eaux issues des aquifères karstiques du Barrémien inférieur pour une petite partie du cadereau d'Alès, et de l'Hauterivien supérieur pour une plus grande partie des calcaires ;
- encore plus vers le SW, des cadereaux temporaires issus du plateau des Garrigues évacuent directement les eaux en direction de la plaine de la Vistrenque via le tracé masqué de la faille de Nîmes ;
- en direction du NW, à partir de la route de Sommières et jusqu'à la Calmette, puis Dions, les eaux de surface des ruisseaux de Parignargues (Font St Pierre), du Valat des Crottes, de la Vallonguette, et du Goutajon, rejoignent la bordure méridionale du bassin tertiaire de St Chaptès. Il est noté dans leur partie amont des pertes en relation supposée selon les axes des plis (WNW-ESE) vers la Fontaine de Nîmes ;
- au Nord enfin, les calcaires de l'Hauterivien supérieur, puis ceux massifs du Barrémien supérieur : les calcaires à faciès Urgonien, fracturés et karstifiés, présentent des "combes" orientées par les structures plissées et faillées. Elles forment des gorges profondes pour se raccorder à la rive droite du Gardon ; ce dernier représente le niveau de base de l'aquifère karstique urgonien.

**Du point de vue des précipitations**, les précipitations annuelles moyennes sur la région de Nîmes sont comprises entre 700 mm dans la plaine et 800 mm sur le plateau des Garrigues (moyenne sur 20 ans). Les isohyètes se répartissent parallèlement au talus de la faille de Nîmes, selon une orientation NE-SW. L'infléchissement de cette orientation vers le NNE-SSW en parallèle avec l'accroissement des précipitations en direction d'Alès prend en compte l'effet du relief des Cévennes et des entrées maritimes depuis le SE. Les pluies dépassent 1000 mm/an en amont d'Alès et 2000 mm au mont Aigoual.

La variabilité interannuelle des précipitations est aussi grande que la différence de répartition des pluies dans l'espace et au cours des mois d'une même année. Par exemple, la moyenne sur Nîmes pour l'année 1996 est de l'ordre de 1200 mm, soit 60 % supérieure à la moyenne interannuelle indiquée ci-dessus.

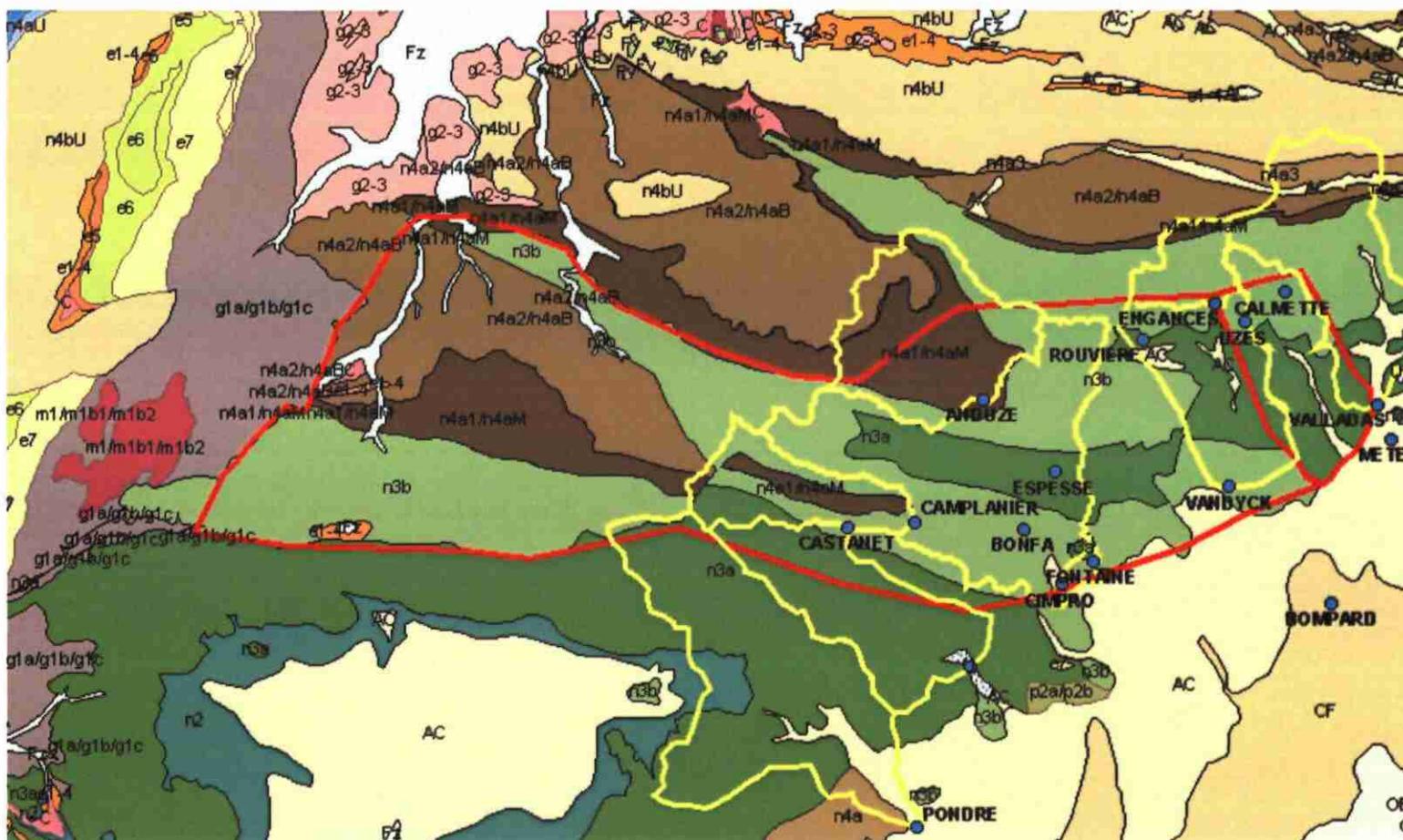


Illustration 54 : Bassin d'alimentation proposé pour la Fontaine de Nîmes en rouge; les limites en jaune correspondent aux limites des bassins versants des cadereaux

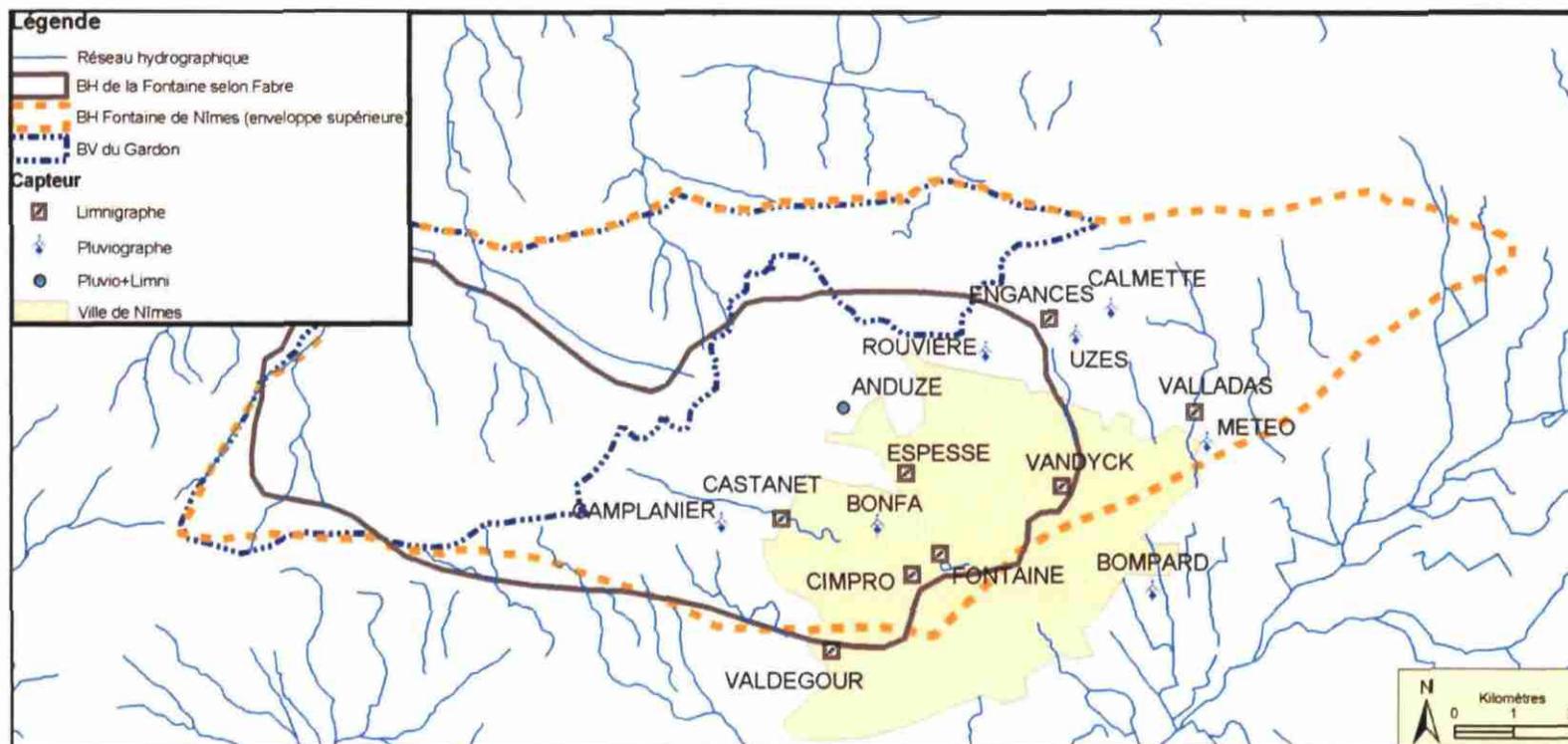


Illustration 55 : Localisation des capteurs (pluviographes et limnigraphes) du réseau NOE – ESPADA

Le climat de type méditerranéen situe les pluies les plus fortes au cours de l'automne et du printemps, avec des maxima pour les mois de septembre et d'octobre. Les averses brutales et les très fortes intensités lors des orages conditionnent la violence destructrice des crues. Lors de l'épisode du 3 octobre 1988, il est tombé plus de 400 mm d'eau en moins de 4 heures sur un secteur bien localisé au Nord de la ville de Nîmes.

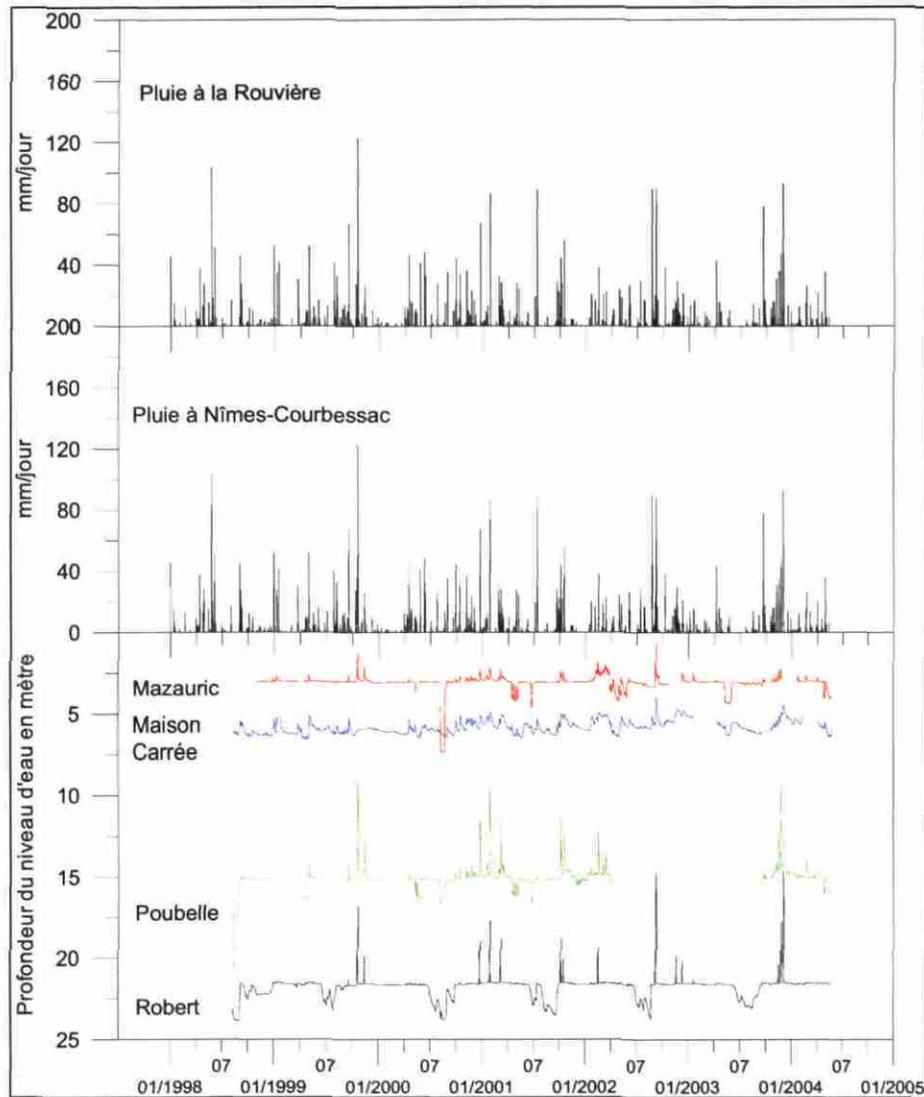


Illustration 56 : Pluviométrie à Courbessac et La Rouvière entre 1999 et 2004, comparée à la piézométrie mesurée (BRGM/RP-53422-FR)

### 2.4.3. Rappel des résultats issus des études antérieures

Les études antérieures ont permis de caractériser le fonctionnement de l'aquifère karstique de Nîmes dont la source de la Fontaine de Nîmes est l'exutoire principal (Maréchal et al., 2005 (a) et (b) ; Maréchal et Ladouche, 2006). Ces études ont permis de définir un modèle conceptuel de fonctionnement de ce système à la fois en période d'étiage et de crue. Les travaux réalisés en période de crue ont mis en évidence la participation des eaux de l'aquifère karstique aux crues de surface (Fleury et al., 2007).

Ainsi, une approche de modélisation globale au pas de temps journalier à l'aide du logiciel Tempo a été mise en œuvre sur les données journalières du cadereau d'Alès au niveau du Pont des neuf Arcades (entre les stations d'Anduze et d'Espeisses) pour l'épisode de septembre 2005. Les mesures de hauteur d'eau réalisées ont été converties en débit à l'aide de la courbe de tarage établie par le BCEOM (comm. Personnelle). L'objectif de cette analyse était d'une part de caractériser la dynamique d'écoulement du cadereau pour différentes configuration d'épisodes de pluie et d'autre part, d'évaluer le rôle joué par les eaux souterraines sur la dynamique d'écoulement des eaux de surface.

Un modèle de transfert basé sur la définition de fonctions de transfert par traitement du signal, modèle ne reposant pas sur la prise en compte de processus physiques, a été établi sur les données à un pas de temps journalier. Ce modèle permet de reproduire de manière acceptable les débits moyens journaliers mesurés pour cet épisode. Ce modèle de transfert a ensuite été utilisé en mode prévisionnel pour caractériser la relation qui relie le débit à la pluviométrie. Différentes configurations de cumul de pluie journalier ont été considérées (comprises entre 25 et 400 mm). L'évolution des débits moyens journaliers maximum en fonction de la pluviométrie est présentée sur l'illustration 57. La dynamique de l'écoulement change lorsque le cumul de pluie devient supérieur à 225 mm. Le débit se met alors à augmenter de façon nettement plus importante. Cette modification peut être liée à la contribution des eaux du karst.

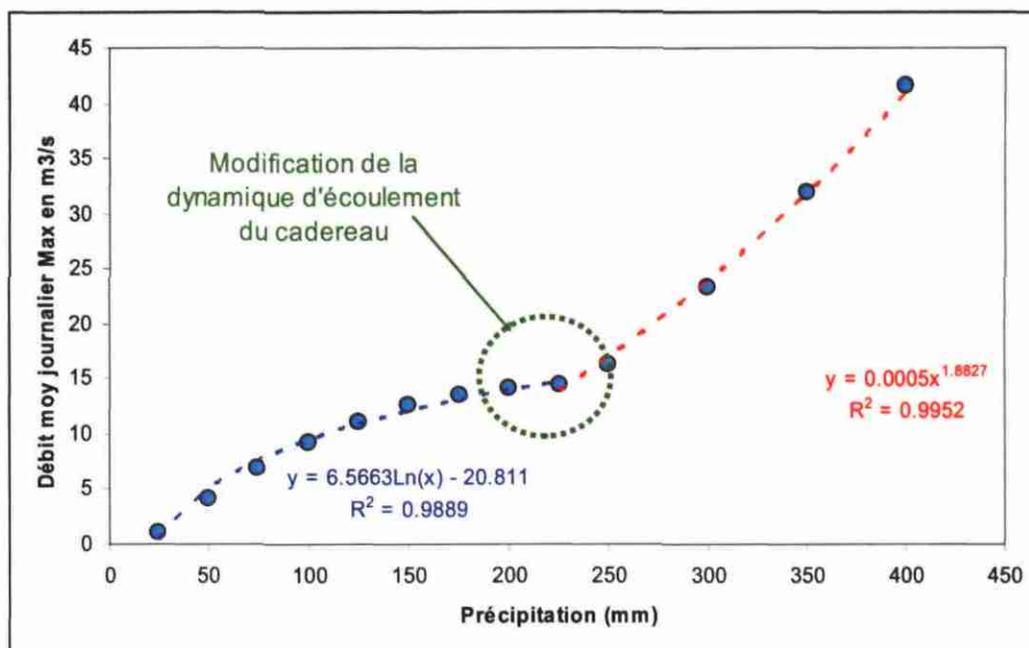


Illustration 57 : Evolution du débit moyen journalier maximum calculé par le modèle de transfert du cadereau d'Alès en fonction du cumul de pluie journalier

Pour tester cette hypothèse un modèle de transfert a été mis en place sur le site du Mas de Provence. Ce site est un point de suivi du karst situé sur le bassin versant du cadereau d'Alès, il est marqué par des débordements lors des fortes précipitations. Le modèle montre que le débordement du karst à Mas de Provence s'opère pour des précipitations comprises entre 200 et 225 mm. Il ressort de cette étude que la modification du comportement hydrologique du cadereau d'Alès pourrait correspondre au moment où le karst est susceptible de déborder au Mas de Provence.

#### 2.4.4. Objectifs des études menées en 2007

Les précédentes études ont montré l'impact du karst sur le fonctionnement du cadereau. Il semble désormais nécessaire afin de caractériser le fonctionnement du cadereau et de modéliser son comportement hydrologique, de prendre en considération l'état hydrologique du karst.

Les crues éclairées sont des phénomènes associés à de fortes précipitations, leur occurrence est limitée en général à quelques épisodes par année. Elles se produisent sur des durées très courtes de l'ordre de quelques heures, parfois de quelques jours pour des épisodes pluvieux multiples. Les débits peuvent alors être très importants de quelques centaines de l/s à plusieurs dizaines de m³/s. Ces caractéristiques imposent une étude à un pas de temps fin de ces phénomènes, en effet le pas de temps journalier est trop intégrateur par rapport aux réactions des cadereaux. Le pas de temps horaire a ainsi été choisi.

La méthode utilisée est basée sur une modélisation globale à l'aide du logiciel Tempo mise en œuvre sur les données horaire des cadereaux enregistrées de 1998 à 2004. 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.

Afin de prendre en considération l'état du karst dans cette modélisation, et faute de mesures sur des piézomètres représentatifs du karst pour la période anté 2004, une modélisation a été établie sur la période de mesures des piézomètres du karst (2004 à 2007), puis utilisée en méthode prévisionnelle sur la période 1998-2004 pour reconstituer les niveaux piézométriques du karst en certains points sur cette période.

#### **2.4.5. Description de l'approche méthodologique**

L'approche méthodologique retenue repose sur l'utilisation de l'approche de modélisation globale basée sur l'identification de fonctions de transfert ; la modélisation est effectuée à l'aide du logiciel TEMPO (Pinault, 2001). Ce type de modélisation permet outre la caractérisation du fonctionnement hydrogéologique, de simuler le comportement du système lorsqu'il est soumis à différentes conditions hydro-climatiques. La modélisation permet de reconstituer l'hydrogramme de l'exutoire d'un système (Fontaine de Nîmes par ex. ou d'un cadereau), de déterminer les fonctions de transfert traduisant notamment des processus non linéaires pris en compte (Illustration 58).

Le schéma de principe de la modélisation inverse des écoulements est présenté Illustration 58. La technique d'inversion consiste à calculer la ou des réponses impulsionnelles et une fonction « seuil » Oméga de pluie efficace de telle sorte que le modèle soit le plus proche possible du débit observé. Ce seuil Oméga est estimé par inversion à partir de la pluie et d'une variable climatique de telle façon que seule la hauteur de pluie située au-dessus de ce seuil génère un débit à l'exutoire. 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.

L'étude du fonctionnement du système karstique de Nîmes a été réalisée à l'aide des deux types d'approches possibles (réponses impulsionnelles paramétrique et non paramétrique) afin d'une part, de confronter les informations obtenues sur le fonctionnement, et d'autre part de mieux encadrer les résultats des simulations obtenues pour les épisodes de crues majeurs d'octobre 1988, septembre 2002 et décembre 2003 pour lesquels aucune mesure n'est disponible.

Au préalable à l'étude du fonctionnement hydrogéologique du système karstique par l'approche de modélisation inverse à l'aide du logiciel Tempo, il est nécessaire de déterminer « la chronique de pluie représentative » du fonctionnement du karst, c'est-à-dire la chronique de pluie du bassin d'alimentation. Cette étude a été menée à l'aide de l'option « pondération des chroniques de pluie » du logiciel « Tempo » qui 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.



La station d'Anduze est située à l'amont du cadereau d'Alès, celle d'Espeisses en position intermédiaire et Cimetière protestant (Cimpro) à l'aval, à la confluence avec le cadereau de Camplanier (Illustration 59). Dans un premier temps il fût envisagé de travailler sur ces trois stations, or l'analyse des données a révélé la présence d'erreurs sur les données de la station d'Espeisses, avec des débits plus faibles qu'ils ne devraient l'être. L'exemple de la crue du 27 au 29 mai 1998, met ainsi en évidence ce problème sur les mesures, puisque les débits à Espeisses devraient être au moins égaux à ceux d'Anduze (Illustration 60). La station d'Espeisses n'a donc pas été retenues pour les analyses.

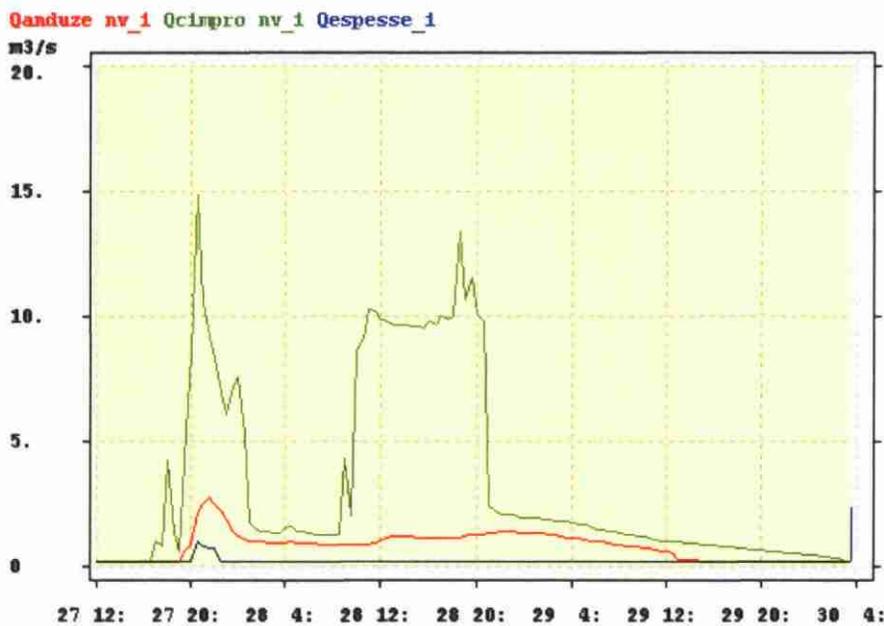


Illustration 60 : Débit aux trois stations du cadereau d'Alès pour l'épisode de crue du 27 au 29 mai 1998

Les données ont été acquises de janvier 1998 à décembre 2001 de façon ininterrompue à Anduze et avec quelques lacunes à Cimpro (Illustration 61). A partir de janvier 2002, il n'y a quasiment plus de données pour ces deux stations.

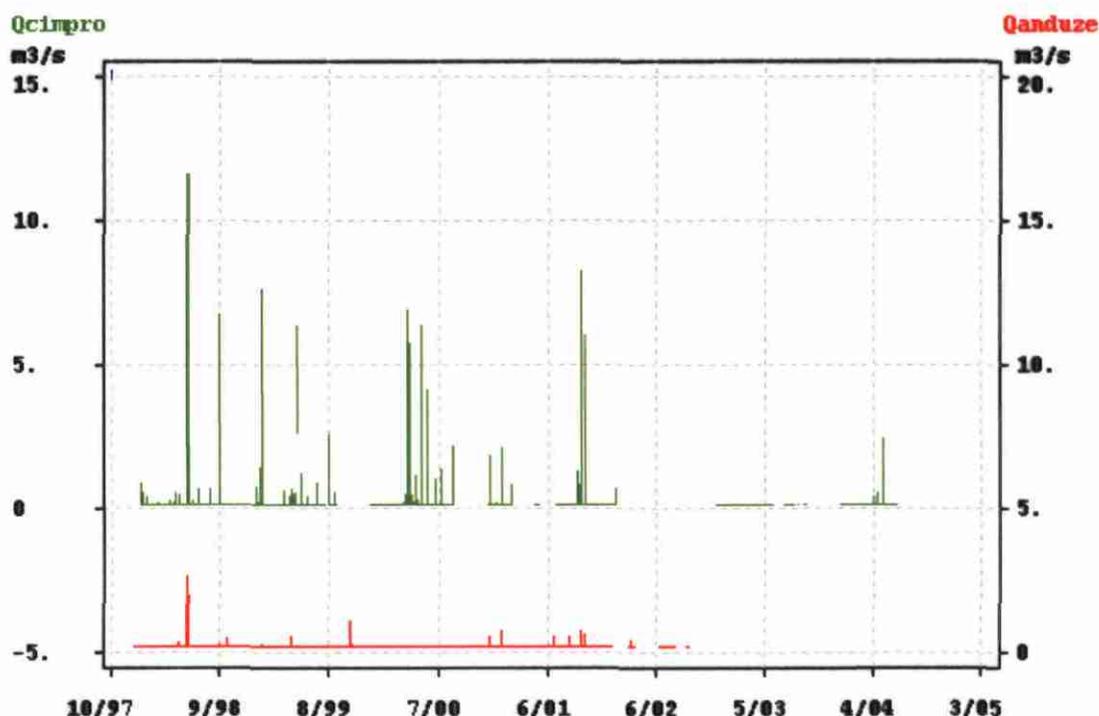


Illustration 61 : Chroniques de débit aux stations de Cimpro et Anduze

### **Piézomètres indicateurs du karst**

Trois piézomètres situés à proximité du cadereau d'Alès ont été utilisés pour caractériser le fonctionnement de la partie de sub-surface de l'aquifère karstique. Il s'agit des piézomètres Mas de Provence (Provence), Mas de Ponges (Ponges) et Eau Bouillie 4 (EB4) (Illustration 62). Le piézomètre EB4 est situé à proximité immédiate du cadereau. Ces trois sites sont soumis à des débordements. L'enregistrement débute en juin 2004 à Provence et à Ponges et en août 2006 à EB4. Les débordements ont été enregistrés sur les sites de Provence et de Ponges au cours de la crue de septembre 2005. Les côtes de débordement sont respectivement 163,5 m et 154,5 m. L'instrumentation plus récente sur le piézomètre de l'Eau Bouillie n'a pas enregistré de débordement à cause de l'absence d'épisodes de pluie importants depuis sa mise en place, toutefois le site de l'Eau Bouillie est caractérisé par des nombreux et forts débordements (présence de bouillidou dans le quartier de l'Eau Bouillie). Le niveau du sol de ce piézomètre est 84 m. Le piézomètre Mas à 15 francs est également situé dans le bassin versant du cadereau d'Alès, il a été instrumenté en septembre 2007 et ne présente donc pas à ce jour de chroniques adaptées au traitement.

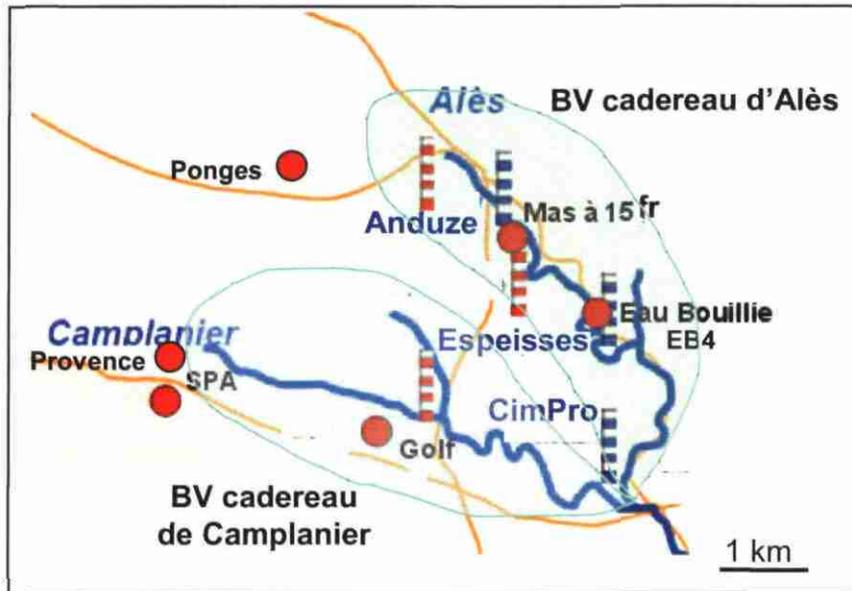
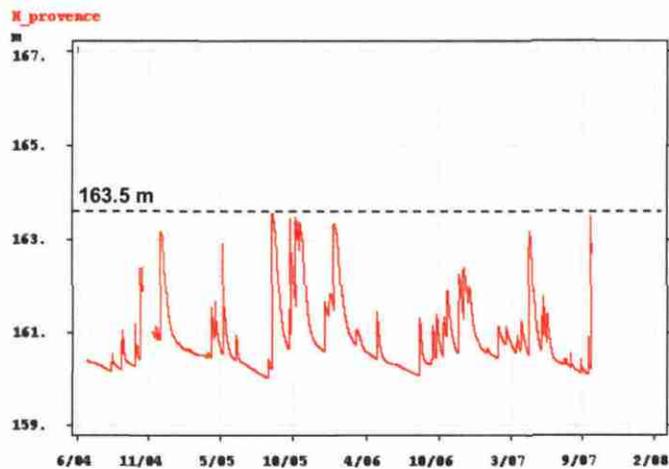


Illustration 62 : Réseau d'instrumentation de la Ville de Nîmes pour les cadereaux d'Alès et Camplanier, complété des stations de mesure sur le karst, et représentation schématique des bassin versants des deux cadereaux.

Les niveaux piézométriques mesurés sur les trois stations ainsi que les seuils de débordement pour Provence et Ponges sont présentés dans les graphiques ci-dessous.



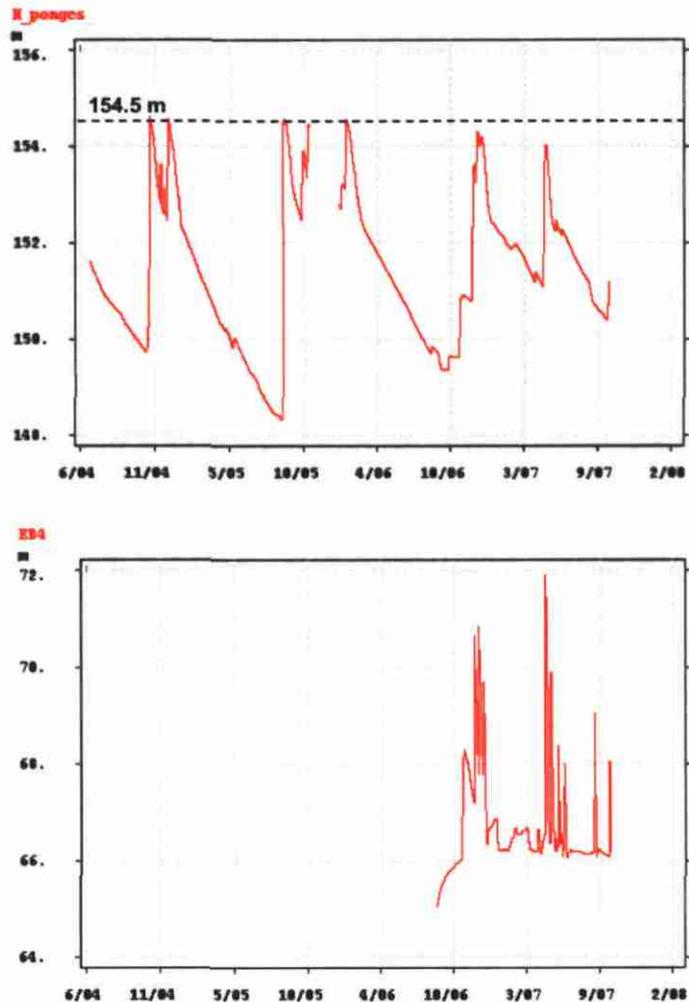


Illustration 63 : Chroniques de hauteur d'eau aux piézomètres Provence, Ponges et EB4

### Données climatiques

Les données de précipitations horaires sont acquises aux stations d'Anduze, Bonfa, Uzès, Calmette, Météo, Bompert, Rouvière, Castanet et Pondre (Illustration 60). Seule les trois premières stations présentent des chroniques dans l'ensemble complète sur la période 1997 à aujourd'hui ; elles ont ainsi été retenues pour la suite de l'étude. Il faut toutefois noter deux lacunes importantes sur ces trois stations, de juin 2003 à juillet 2004 et de janvier 2005 à juillet 2005.

Les données journalières de précipitations de la station Météo France Nîmes Courbessac acquises de 1997 à aujourd'hui seront également utilisées dans un but qualitatif. En effet la lacune sur les stations d'Anduze, Bonfa et Uzès au cours du premier semestre 2005 engendre des difficultés pour la modélisation. Des données horaires ont ainsi été reconstituées à partir des données journalières sur cette

chronique. Aussi pour la modélisation du cadereau les données d'octobre à décembre 1997 ont également été reconstituées afin de permettre l'initialisation du modèle.

L'ETP utilisée est l'ETP journalière de la station Météo France Nîmes Courbessac. Cette ETP est ensuite « discrétisée » pour donner une ETP horaire. Les 2/3 de la valeur journalière sont ainsi affectées à la plage horaire 8 h - 19 h et 1/3 à la plage 20 h - 7 h.

### ***Critique des données***

Le travail au pas de temps horaire nécessite une bonne qualité des données. Or nous avons déjà pu observer que les informations sur certaines stations de débits au niveau du cadereau pouvaient être entachées d'erreurs (cf station Espeisses). Concernant la fiabilité des données de débits, il faut également souligner que les courbes de tarage ont été établies à partir de lois hydrauliques et non à partir de mesures de débit / hauteur d'eau réalisées dans les cadereaux. De ce fait les courbes de tarage restent sujettes à discussion. Aussi de nombreux aménagements ont eu lieu sur les lits des cadereaux (redimensionnement, construction de bassins de rétention ...) depuis les dix dernières années. Ces changements induisent nécessairement des variations dans les écoulements au sein des cadereaux, entraînant des biais dans les modèles. Enfin à cette échelle de temps, l'information pluviométrique est primordiale, or nous avons pu constater l'existence d'une importante variabilité horaire à l'échelle du bassin d'alimentation du système karstique de Nîmes, mais également à l'échelle des cadereaux. Ainsi le travail au pas de temps horaire pour la caractérisation des crues des cadereaux est indispensable, mais il risque d'être complexe du fait de la qualité des données disponibles. Une information spatialisée de la pluie sur le bassin versant du cadereau améliorerait probablement la qualité du modèle.

De plus, l'étude des données de débits sur les cadereaux et de précipitations montre que sur la période d'étude (1998-2007), le nombre d'épisodes de crues est limité. Ainsi quatre épisodes de crues majeures avec des débordements du karst ont été observés, aux dates suivantes :

- 27-29 mai 1998 ;
- 21 octobre 1999 ;
- 9-10 septembre 2002 ;
- 7-9 septembre 2005.

Le suivi réalisé sur le cadereau d'Alès n'a enregistré qu'un seul épisode, il s'agit de la crue du 27 au 29 mai 1998 (Illustration 64). Cette crue est en réalité un épisode double. Le premier pic de crue d'une durée de 8 h atteint 12 m<sup>3</sup>/s, il fait suite à plus de 130 mm de précipitation en 12 h. Le second pic de débit dure 13 h, il est caractérisé par des débits comparables, il fait suite à seulement 45 mm de précipitation en 15 h. Ce comportement suggère fortement une alimentation par le karst suite à des débordements de l'aquifère.

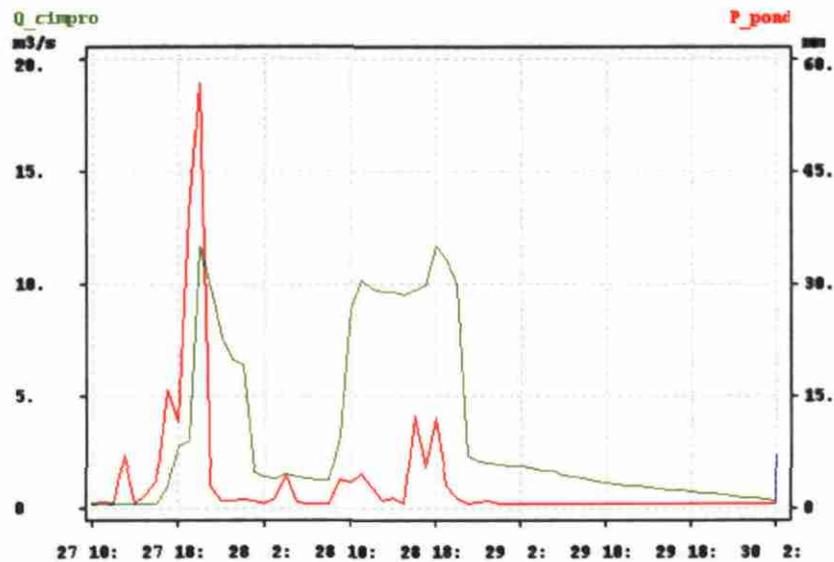


Illustration 64 : Débit à la station Cimpro et précipitation lors de la crue du 27 au 29 mai 1998

Ainsi malgré la durée des mesures (trois années) un seul événement majeur, caractérisé par une alimentation conséquente par le karst, aura été suivi sur le cadereau d'Alès. Le travail de modélisation sera d'autant plus complexe au vu des données disponibles.

#### 2.4.7. Reconstitution des hauteurs d'eau des piézomètres du karst de sub-surface

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 ;
- le modèle de transfert est ensuite utilisé pour simuler, de manière rétrospective, l'évolution de la piézométrie du système pour la période 1997 à 2004.

La caractérisation du fonctionnement par l'approche de modélisation Tempo repose en premier lieu, sur l'identification d'une ou des fonctions de transfert qui lient la pluie à la piézométrie. En raison du phénomène de débordement du karst pour les épisodes importants de pluie, la charge hydraulique lors des périodes de hautes eaux n'est pas connue. Dans l'approche de modélisation retenue, nous avons ajusté les paramètres de sorte que la piézométrie calculée par le modèle puisse dépasser la cote de débordement du karst (cote de 163,5 m NGF pour le site de Provence, 154,5 m NGF pour Ponges et 84 m pour EB4). La même méthode a été développée pour les trois sites, seuls les graphiques pour la méthode Provence sont fournis à titre d'illustration de la méthode. 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 65) et le seuil Oméga de pluie efficace (Illustration 66) de telle sorte que le modèle soit le plus proche possible de la piézométrie observée (Illustration 67). 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.

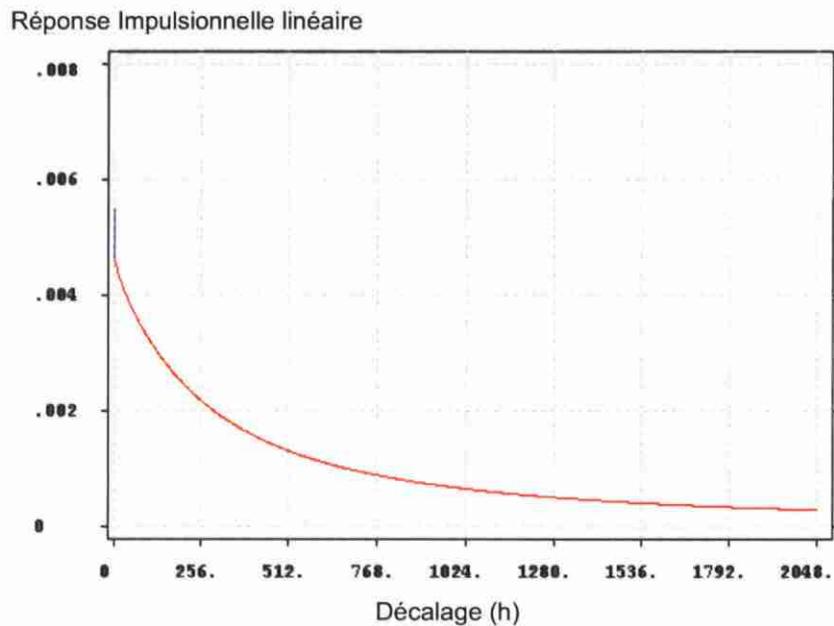


Illustration 65 : Calcul de l'hydrogrammes unitaire normalisé (réponse impulsionnelle) de la piézométrie du site du Mas de Provence

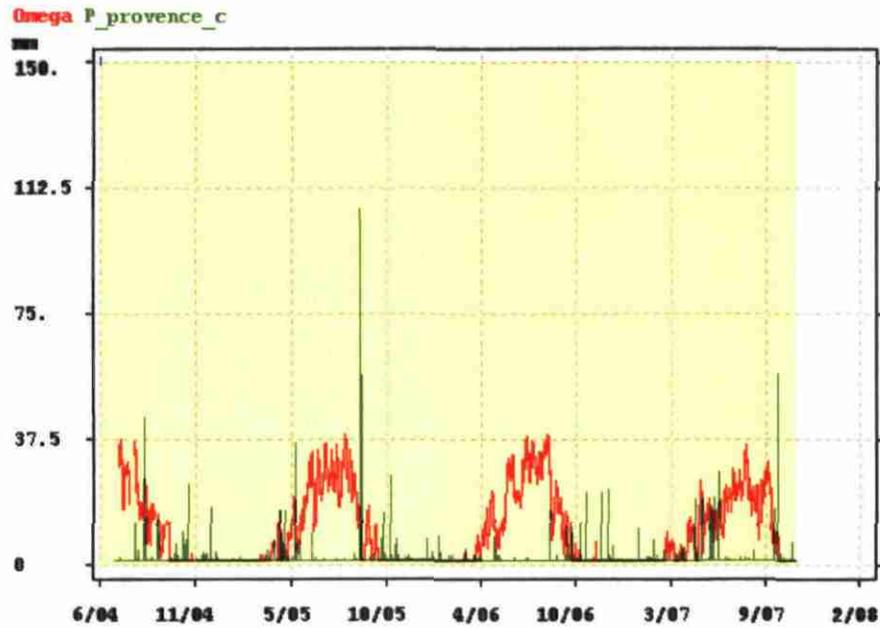


Illustration 66 : Evolution du seuil de pluie efficace Oméga et de la pluviométrie

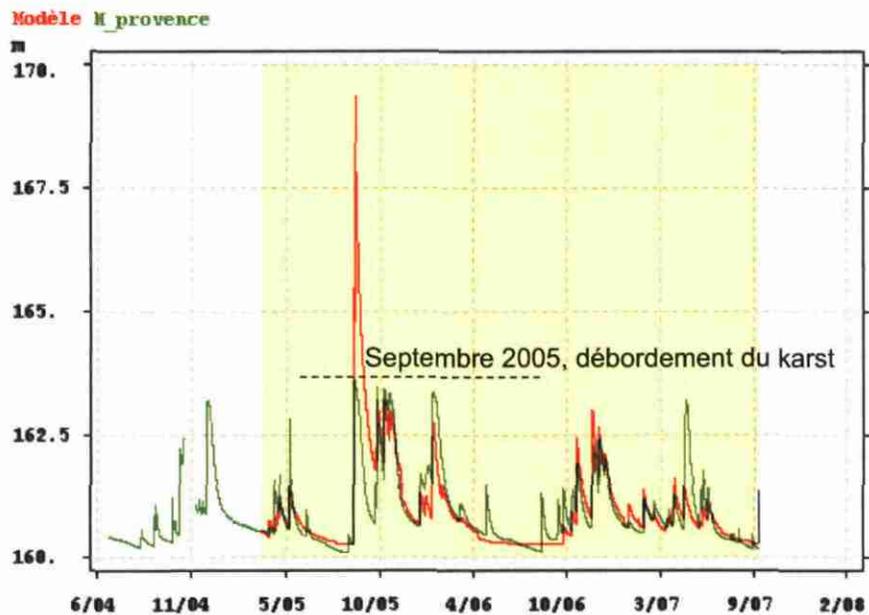


Illustration 67 : Comparaison de la piézométrie modélisée à la piézométrie mesurée au site du Mas de Provence

Seule une composante d'écoulement linéaire a été prise en compte pour expliquer l'évolution observée au Mas de Provence. Le modèle de transfert mis en œuvre permet de reproduire de manière satisfaisante l'évolution de la piézométrie observée sur la

période de 2004 à 2007 pour le site de Provence. Il reproduit correctement les évolutions observées lors des étiages ; les pics de crues sont globalement assez bien reproduits. La simulation de la forte augmentation des niveaux lors de la crue de septembre 2005 n'a pas été mesurée à cause du débordement, le modèle permet toutefois d'appréhender la gamme de variation. Le modèle permet d'expliquer 76 % de la variance totale observée, ce qui constitue un résultat satisfaisant (critère de Nash = 36 %). Ces critères qualitatifs sont nettement diminués à cause du pic de crue simulé et non observé. Les écarts sur les chroniques entre le niveau mesuré qui ne peut dépasser la cote du sol et le niveau simulé lors de la forte crue font diminuer les critères de qualité du modèle.

Les résultats de la modélisation pour le site EB4 est présenté ci-après.

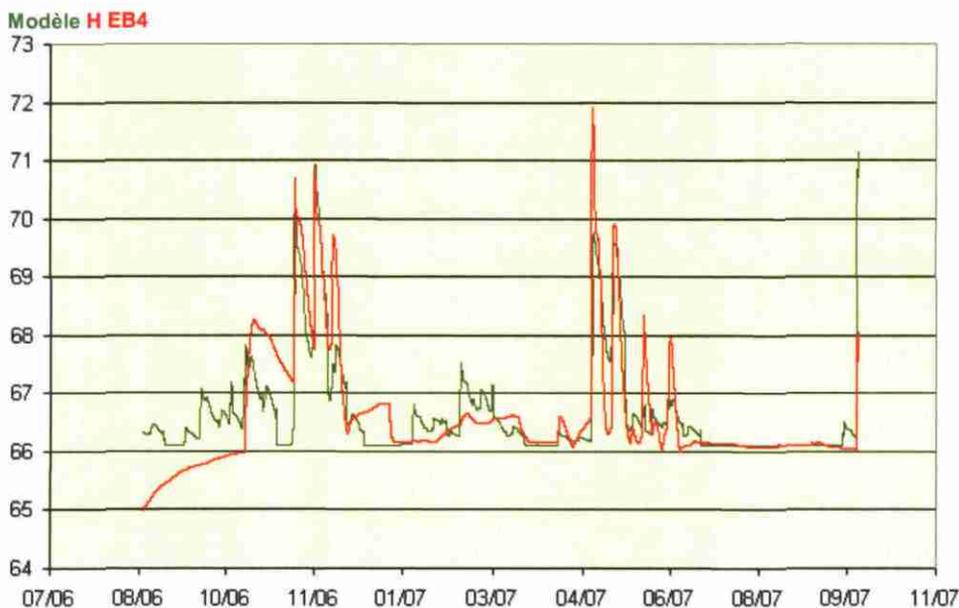


Illustration 68 : Comparaison de la piézométrie modélisée à la piézométrie mesurée au site EB4

Le modèle développé sur le site EB4 permet de reproduire la piézométrie observée pour la période comprise entre août 2006 et septembre 2007. Les pics de crue sont bien représentés, tout comme les tarissements. Le modèle est donc jugé satisfaisant sur la période de calage. Toutefois, il faut garder à l'esprit que le modèle a été calé sur une période pendant laquelle aucune crue significative ne fût observée. Or tant qu'il n'y aura pas de fortes crues, il ne sera pas possible de caractériser le comportement en période de débordement. Faute de données suffisantes, le modèle sera utilisé tel quel et pourra être mis à jour dès lors qu'une forte crue sera enregistrée.

Pour Ponges, les pics de crues sont dans l'ensemble bien représentés. Toutefois la représentation des étiages n'a pas été possible du fait d'un changement de dynamique au niveau des étiages prolongés. L'accélération de la chute des niveaux d'eau est très certainement à mettre en relation avec des pompages. L'objectif de ce travail étant la

caractérisation du système en période de crue la modélisation a tout de même été jugée satisfaisante.

Avant de poursuivre le travail de modélisation, une analyse critique des résultats a été menée aboutissant à l'exclusion de la station Ponges. En effet, ce site est caractérisé par des débordements trop fréquents et trop rapides qui ne sont pas en relation avec les débordements observés dans le cadereau. Il s'agit d'un phénomène de débordement plutôt localisé.

Dans un second temps, nous avons utilisé le modèle de transfert pour reconstituer à posteriori l'évolution de la piézométrie du site du Mas de Provence et de EB4 depuis octobre 1997. Les résultats de la simulation sont présentés sur les Illustration 69 à Illustration 72. Des phénomènes de débordement de karst sont mis en évidence pour les épisodes de fortes crues mesurées dans le cadereau (mai 1998, octobre 1999, janvier 2001 et septembre 2005).

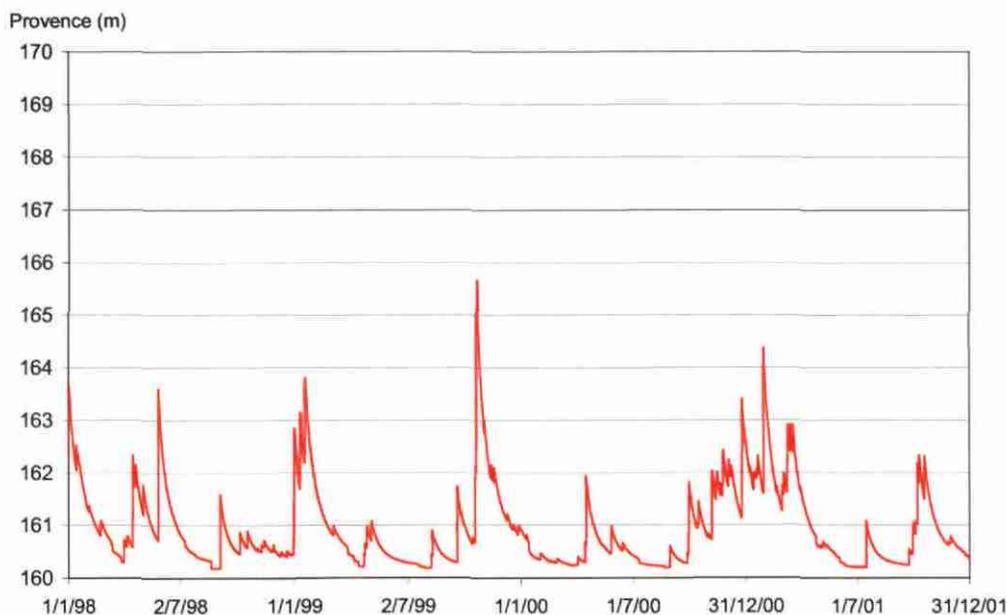


Illustration 69 : Reconstitution de la piézométrie à Provence pour la période 1998-2001

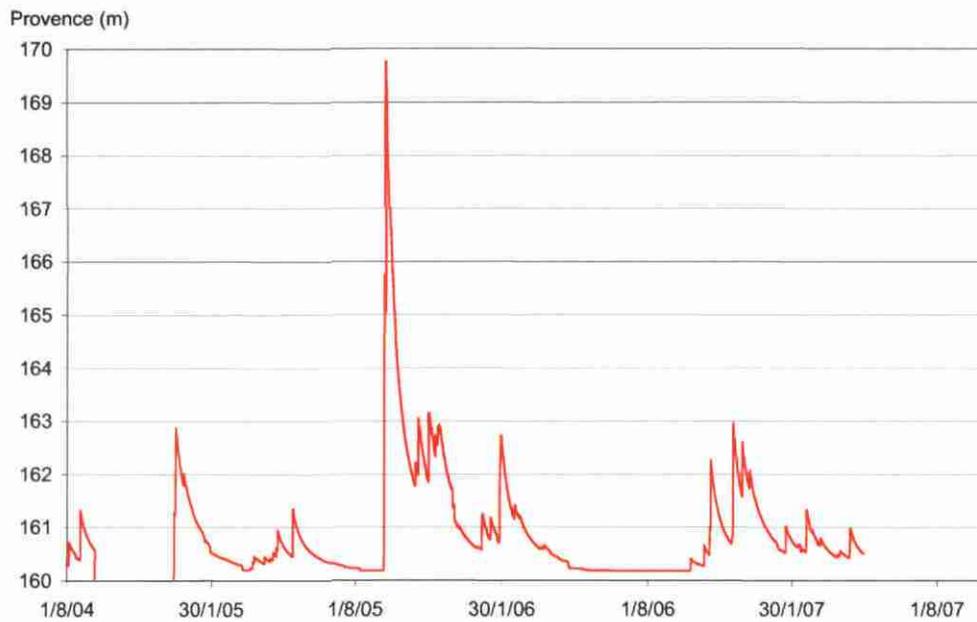


Illustration 70 : Reconstitution de la piézométrie à Provence pour la période 2004-2007

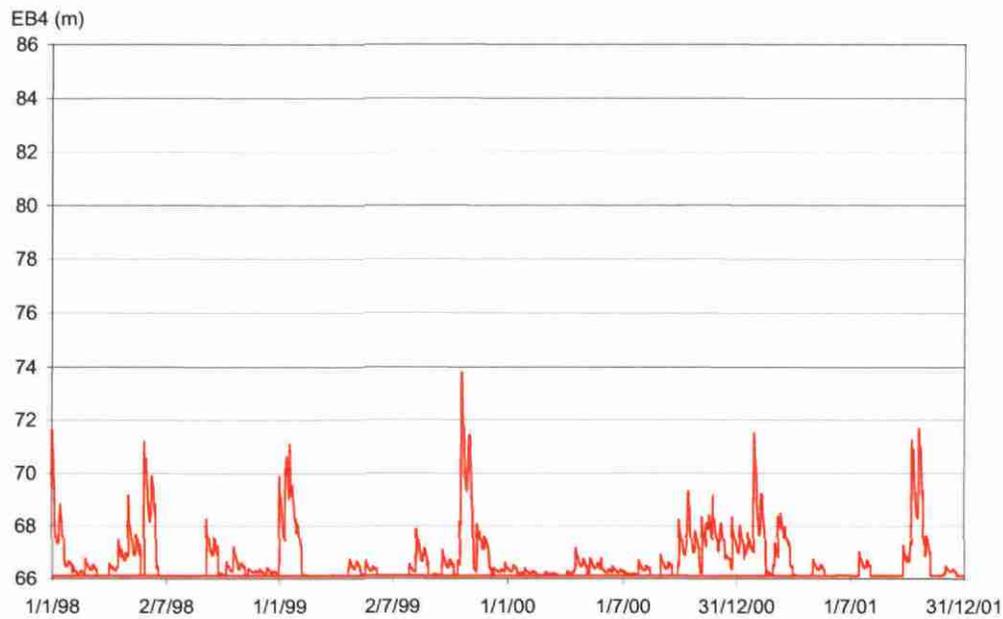


Illustration 71 : Reconstitution de la piézométrie à EB4 pour la période 1998-2001

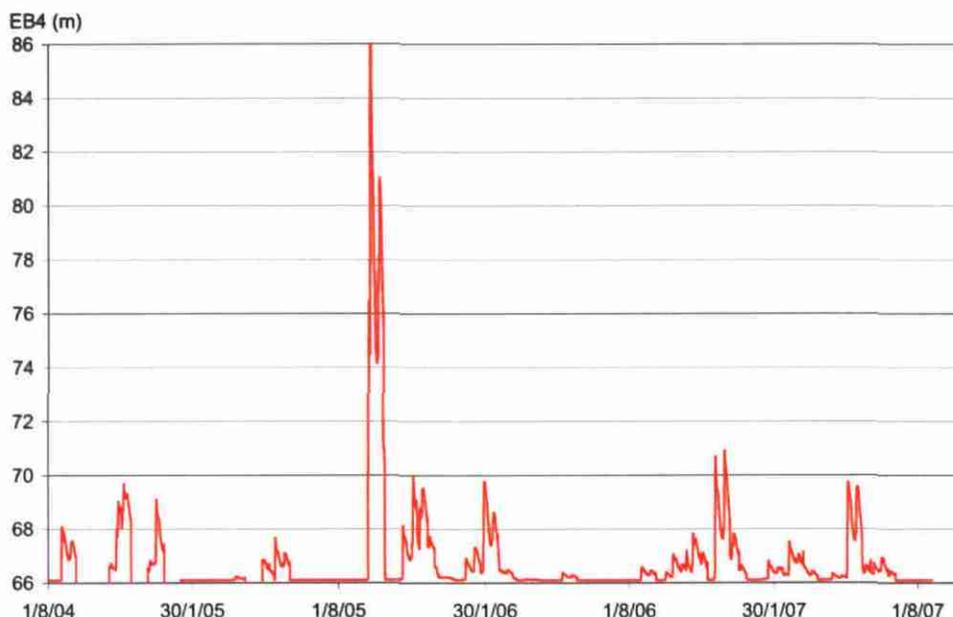


Illustration 72 : Reconstitution de la piézométrie à EB4 pour la période 2004-2007

La période 2002-2003 n'a pas été représentée, car les données reconstituées sur cette période ne sont pas utiles du fait de l'absence de mesures sur le cadereau à ce moment.

Aussi la reconstitution des débits sur EB4 (la station la plus proche du cadereau), nécessitera d'être affinée, car le modèle de transfert est établi sur une période caractérisée par l'absence de débordement, le modèle ne sera donc pas représentatif de la réalité en crue. En effet sur la chronique reconstituée seul l'épisode de septembre 2005 conduit à des niveaux simulés supérieurs à ceux du sol (84 m), soit au débordement. Bien que les amplitudes soient visiblement sous estimées, leur apparition est correcte. Ces valeurs reconstituées vont ainsi être utilisées dans le modèle de transfert du cadereau.

Ainsi pour la reconstitution des débits du cadereau, l'information karst sera déduite des reconstitutions de la piézométrie des sites de Provence et de EB4.

#### 2.4.8. Reconstitution des débits du cadereau d'Alès

Deux méthodes distinctes ont été testées. La première dite « simple » repose sur la caractérisation du fonctionnement par l'identification d'une ou des fonctions de transfert qui lient la pluie aux débits. La seconde méthode prend en compte l'effet du karst et repose ainsi sur l'identification de fonctions de transfert liant la pluie et l'information du karst au débit. Les deux stations des cadereaux vont ainsi être étudiées séparément.

### Station Anduze

La modélisation globale mise en œuvre sur la période janvier 1998 à décembre 2001 n'est pas satisfaisante. Elle ne permet pas de reproduire de façon correcte ni le nombre de crue ni les débits associés. Ceci est du à la difficulté de caler un modèle avec une faible occurrence d'évènements (Illustration 61). La modélisation n'a donc pas été poursuivie sur ce site.

### Station Cimpro

Contrairement à la station d'Anduze qui est située à l'amont du cadereau, la station Cimpro, à l'aval et à la confluence avec le cadereau de Camplanier, enregistre de nombreuses crues aux débits significatifs. Ce site semble dès lors, plus favorable à la caractérisation du fonctionnement du cadereau en période de crue.

- **Méthode simple**

La caractérisation du fonctionnement du cadereau repose en premier lieu, sur l'identification de fonctions de transfert qui lient la pluie au débit. La chronique de pluie utilisée est définie par une pondération des trois chroniques de pluie présentées précédemment. Le modèle avant d'être utilisé en mode prévisionnel est calé sur deux périodes. Les résultats sont présentés à l'illustration 73. Cette modélisation est globalement satisfaisante, le modèle explique 83 % de la variance, le critère de Nash est égal à 0,68. Les résultats peuvent également être appréciés sur l'illustration 73.

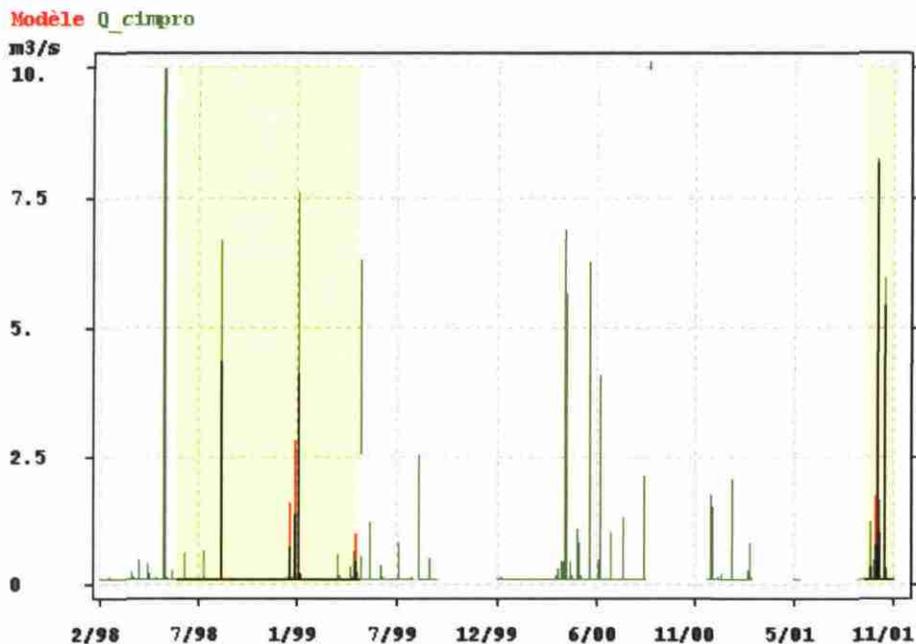


Illustration 73 : Résultat de la phase de calage du modèle, les périodes utilisées pour le calage sont présentées en jaune

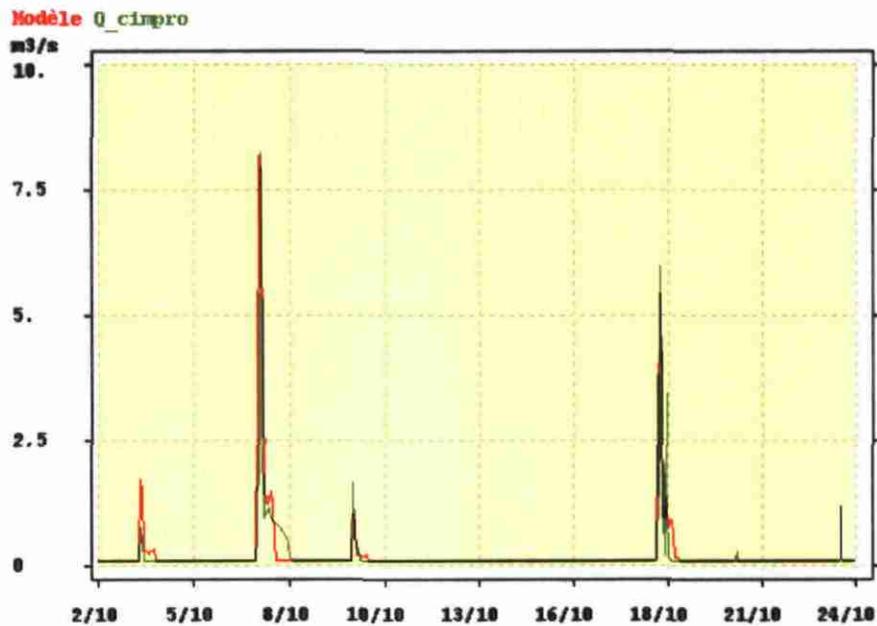


Illustration 74 : Débit simulé et mesuré au mois d'octobre 2001 à partir de la méthode simple

Le modèle a ensuite été utilisé en mode prévisionnel afin de reconstituer des débits sur l'ensemble de la chronique de précipitations, les données sont ainsi correctes dans l'ensemble, à l'exception de l'épisode de forte crue du 27 au 29 mai 2005 (Illustration 75).

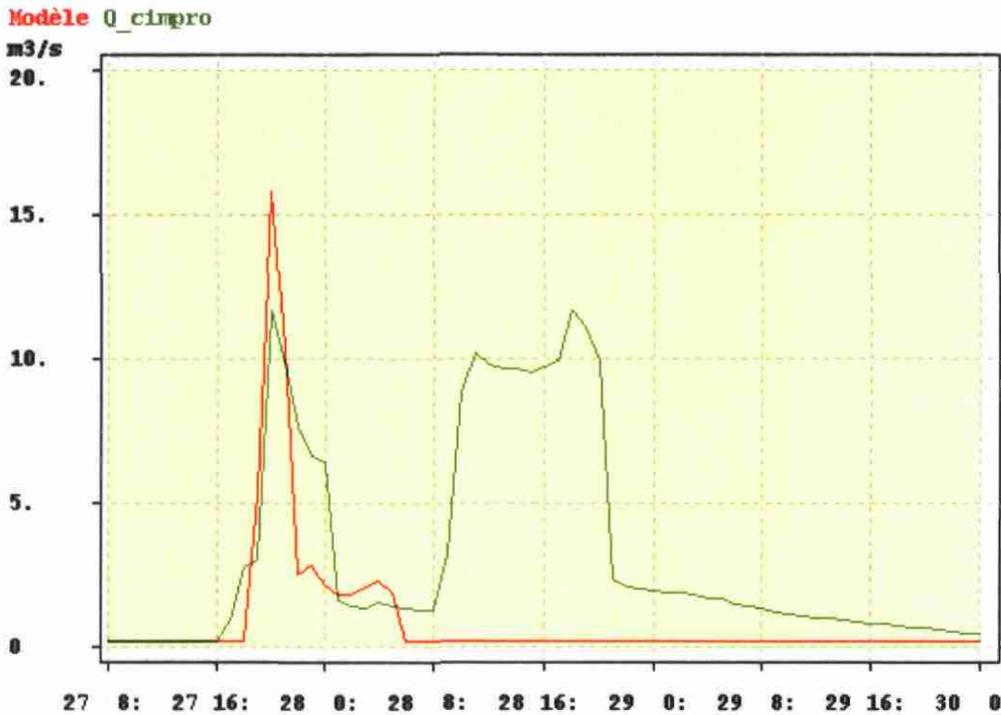


Illustration 75 : Débit simulé et mesuré lors de la crue du 27 au 29 mai 1998

Ainsi le modèle ne reproduit pas le second pic de crue de ce double événement. La composante précipitation n'est pas suffisante pour permettre au modèle de reproduire le comportement hydrologique du cadereau. Ce deuxième pic de crue apparaît vraisemblablement lié en partie à une alimentation par le karst, une nouvelle méthode est ainsi nécessaire afin de caractériser les épisodes alimentés par des débordements du karst.

#### • Méthode prenant en compte l'information karst

La prise en compte de la composante « karst » se fait à partir de la définition d'un seuil de débordement de l'aquifère karstique. Ainsi deux fonctions ont été testées, la première avec les données reconstituées de Provence et la seconde à partir des données de EB4. L'épisode de crue du 27-29 mai 1998 étant le seul exploitable, les résultats vont être focalisés sur cette période.

Ainsi pour Provence, le seuil a été fixé à 162,5 m. Pour l'épisode de 2003, le karst déborde dès le premier pic de crue, les niveaux restent alors élevés durant toute la période de pluie puis tarissent doucement (Illustration 76).

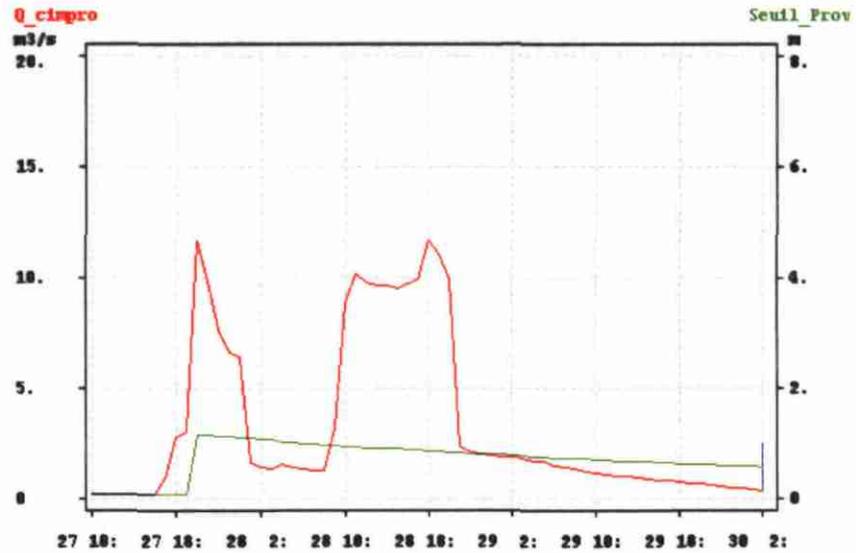


Illustration 76 : Représentation du débordement à Provence et débit dans le cadereau pour l'épisode de crue du 27 au 29 mai 1998

Le modèle a ainsi été testé en utilisant l'information issue de Provence. Malheureusement la dynamique du karst observé sur cette station n'a pas permis de reproduire le second pic de crue. Le débordement à Provence n'est donc pas adapté à ce site. Il faut impérativement une station caractérisé par un débordement unique ou principal lors du second épisode de pluie. Le site EB4 paraît correspondre à cette dynamique. En effet en choisissant un seuil à 70 m, un débordement est observé à partir du second épisode de pluie (Illustration 77).

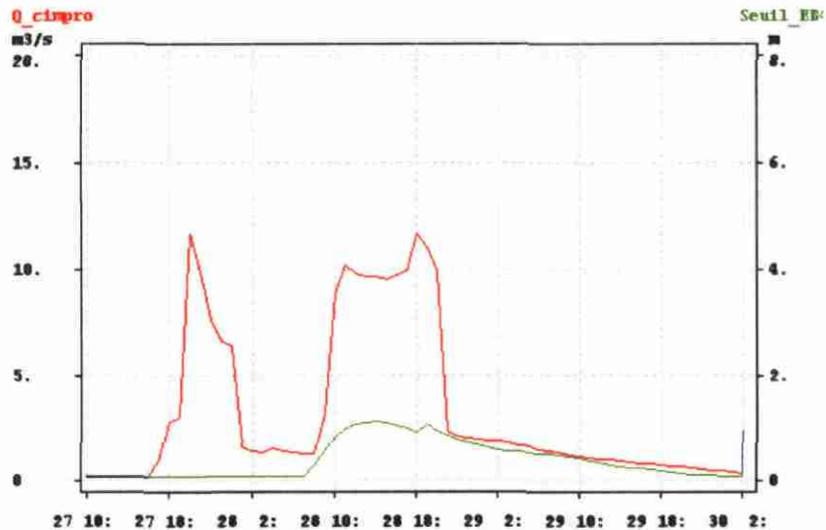
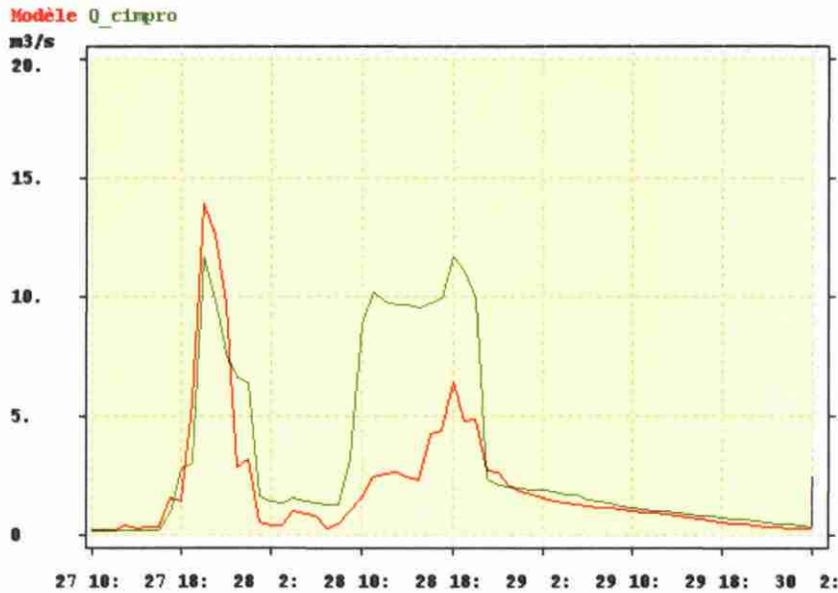


Illustration 77 : Représentation du débordement à EB4 et débit dans le cadereau pour l'épisode de crue du 27 au 29 mai 1998

Cette fois-ci, les résultats de la modélisation sont plus satisfaisants (Illustration 78). Le premier pic de crue est bien représenté, et le deuxième bien que son amplitude soit inférieure à celle mesurée est caractérisé par des impulsions concomitantes. De plus, le tarissement est particulièrement bien représenté, ces débits sont reproduits en grande partie par la composante karst.



*Illustration 78 : Résultat de la modélisation pour la crue du 27 au 29 mai en utilisant la fonction seuil déduite des niveaux simulés à EB4*

Les réponses impulsionnelles calculées par le modèle sont présentées dans l'illustration 79. La contribution relative des différentes composantes associées pour la crue de mai 1998 sont également représentées à titre indicatif (Illustration 80).

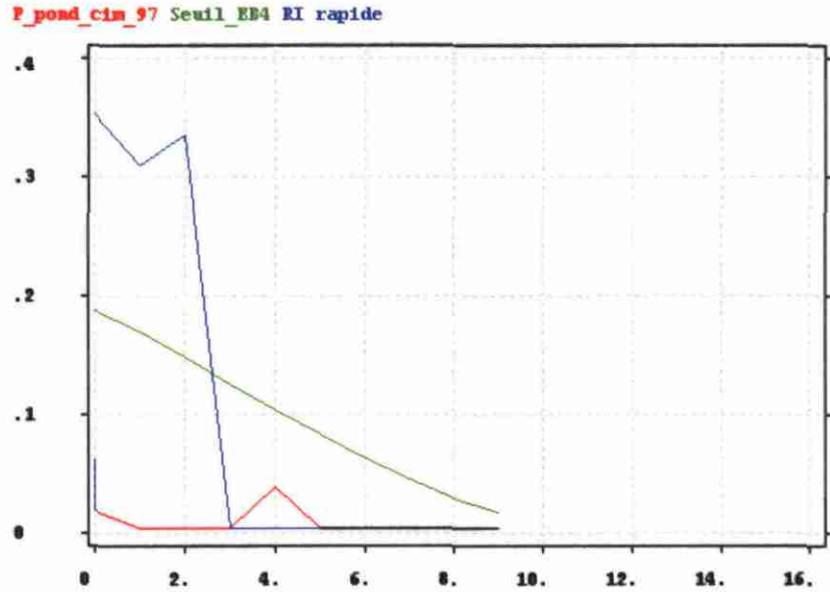


Illustration 79 : Calcul des réponses impulsionnelles (Pluie, karst et composant non linéaire) des débits du cadereau d'Alès à la station de Cimpro

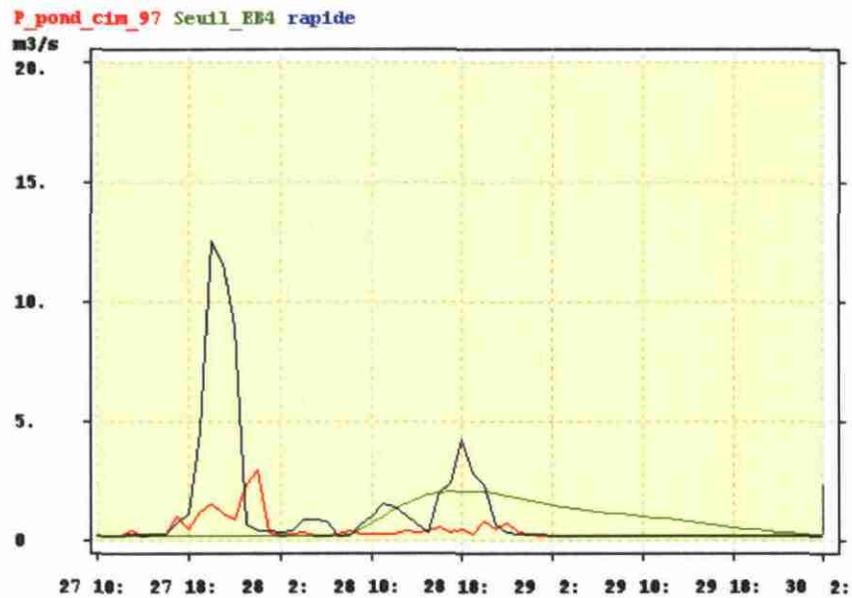


Illustration 80 : Contribution relative des composantes pour la crue du 27 au 29 mai 1998

Ce modèle permet également une représentation correcte des débits (Illustration 81), comparables à la méthode simple sur des périodes de crue aux débits moyens.

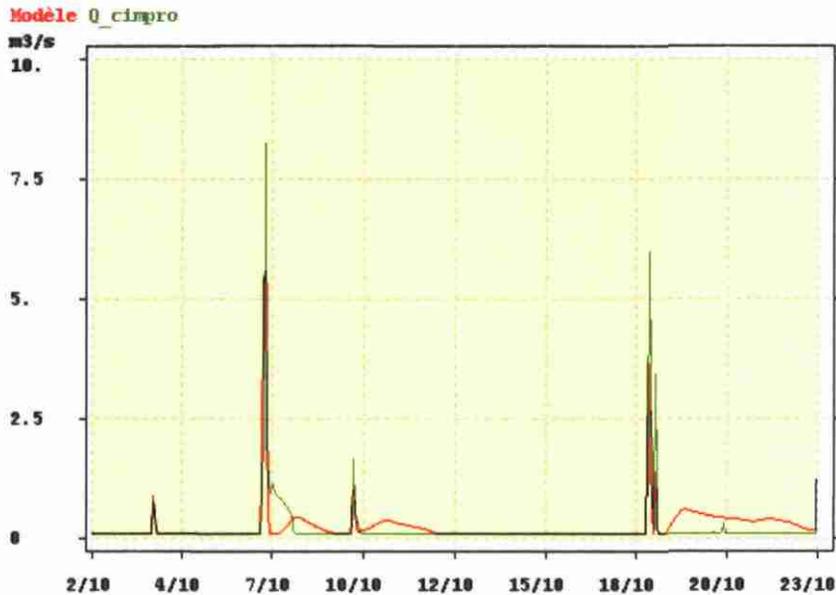


Illustration 81 : Débit simulé et mesuré au mois d'octobre 2001 à partir de la méthode utilisant l'information karst

L'information karst déduite de la station EB4 permet de reproduire en partie le fonctionnement de la crue caractérisée par des débordements (mai 1998). Toutefois, les amplitudes ne sont pas respectées. Ceci montre que bien que l'information déduite de EB4 permette d'expliquer une partie des débits, il existe une autre information non prise en compte dans cette modélisation. Ceci provient probablement du fait que la station Cimpro est située à la confluence des cadereaux d'Alès et de Camplanier, or la station EB4 est située à proximité du cadereau d'Alès. Il est probable qu'une information karst au niveau du cadereau de Camplanier améliorerait le modèle. Des essais de modélisation en couplant les informations du karst à EB4 et Provence ont été entreprises sans succès. L'information de Provence n'étant pas, comme cela fût précisé plus haut, adéquate pour cette modélisation. A ce stade aucune autre information n'est disponible pour effectuer ce travail. Toutefois dans le cadre de la convention avec la ville de Nîmes deux nouveaux piézomètres situés à proximité du cadereau de Camplanier ont été réalisés au cours de l'été 2007 (Golf et SPA, voir localisation Illustration 82). La piézométrie est suivie depuis le mois de septembre 2007. Il est possible que le comportement du karst de ces deux piézomètres fournisse une information différente de celle de Provence. Ces nouveaux points pourront alors être testés dans le modèle dès lors que les chroniques de données seront suffisamment longues (plusieurs mois) et caractérisées par des crues conséquentes.



Illustration 82 : Réseau hydrométrique de la ville de Nîmes et nouveaux piézomètres mis en place en août 2007

#### 2.4.9. Tests méthodologiques concernant l'identification d'indicateur « eaux souterraines »

Des premiers tests méthodologiques ont été effectués concernant l'identification d'indicateur « eaux souterraines » au système d'alerte à partir des suivis piézométriques réalisés depuis 2004. L'idée est de pouvoir évaluer le risque et l'importance du phénomène de débordement du karst en fonction d'une part, de l'importance du cumul de précipitation d'un épisode pluvieux à venir (estimation Météo France lors d'une alerte Orange ou Rouge par exemple) et d'autre part, en fonction de l'état hydrogéologique du karst caractérisé à l'aide de la valeur de la piézométrie le jour où est annoncée l'alerte Météo France.

Les résultats du site du Mas de Provence, caractérisé par des débordements lors des périodes de fortes précipitations, ont été retenus pour la mise en œuvre de cette méthodologie qui comporte les différentes phases successives suivantes :

- (i) La méthodologie d'analyse repose en premier lieu, sur la caractérisation du fonctionnement par l'identification d'une ou des 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 2004 à 2006 (Illustration 67).

- (ii) Le modèle de transfert a ensuite été utilisé pour simuler, de manière prévisionnelle, l'évolution de la piézométrie du système pour différentes conditions hydro-climatiques. L'étude prévisionnelle requière la connaissance de la pluie efficace, la pluie efficace étant elle-même déduite à partir de séquence de pluie et d'ETP. Pour utiliser le modèle de transfert en mode prévisionnel, il a fallu au préalable, construire des « générateurs aléatoires » de pluie et d'ETP dont les caractéristiques satisfassent un certain nombre de conditions déduites de l'analyse des séries temporelles de pluies et d'ETP observées sur la période 1998-2006. Les générateurs de pluies et d'ETP ont permis de générer de manière stochastique 1000 scénarios de pluies efficaces. Le modèle de transfert couplé aux générateurs stochastiques a donc permis d'étudier de manière statistique, les résultats de 1000 relations « pluie-piézométrie ». Sur la base des résultats, les valeurs de piézométrie pour différentes probabilités d'occurrence de contexte hydrologique ont pu être établies : années médiane= « normale », humides et sèches (période de retour de 10 et 20 ans).
- (iii) Les valeurs de piézométrie pour une année normale sont extraites et utilisées pour étudier, dans un contexte d'étiage d'année normale, l'évolution que présenterait la piézométrie du système karstique pour différentes configurations d'événement pluvieux : épisode simple de précipitation de cumul variable (de 50 mm à 250 mm), épisode pluvieux « double » se produisant à 48 heures d'intervalle caractérisés par des cumuls de pluie variables (de 50 à 225 mm, par épisode de pluie).
- (iv) Sur la base des résultats obtenus, une généralisation des résultats a été effectuée dans le but de construire un abaque « niveau piézométrique-précipitation ». Le niveau de débordement du karst pour le site Mas de Provence est représenté dans l'abaque ce qui permet de définir en fonction du niveau piézométrique avant la crue, la hauteur des précipitations nécessaire pour générer un phénomène de débordement du karst. Ce type d'abaque permet de traiter aussi bien les événements simples que doubles. Il permet ainsi de prévoir, selon différents scénarios d'alertes météorologiques, si le karst est susceptible de contribuer au phénomène de crues des cadereaux.

### **Caractérisation du fonctionnement hydrogéologique à l'aide des générateurs stochastiques de pluie et d'ETP**

Le modèle présenté précédemment permet de reproduire de manière satisfaisante les évolutions mesurées au site du Mas de Provence. Il est maintenant possible d'utiliser les caractéristiques des différentes réponses impulsionnelles ainsi individualisées afin de simuler de manière prévisionnelle l'évolution de la piézométrie en fonction des conditions hydro-climatiques.

La prévision d'un niveau piézométrique requiert de disposer de chroniques de pluie efficace, la pluie efficace étant elle-même déduite à partir de séquence de pluie et d'ETP. Pour utiliser un modèle de transfert en mode prévisionnel, il faut donc au préalable construire des « générateurs aléatoires » de pluie et d'ETP dont les caractéristiques satisfassent un certain nombre de conditions déduites de l'analyse des

séries temporelles de pluie et d'ETP observées. En effet, la prévision d'une séquence de pluie faisant directement suite à une séquence observée est relativement contrainte par le phénomène d'autocorrélation (les périodes pluvieuses présentent en générale certaines similitudes tant au niveau temporel que des hauteurs de pluie). Un comportement similaire est observé pour la variable climatique (ETP).

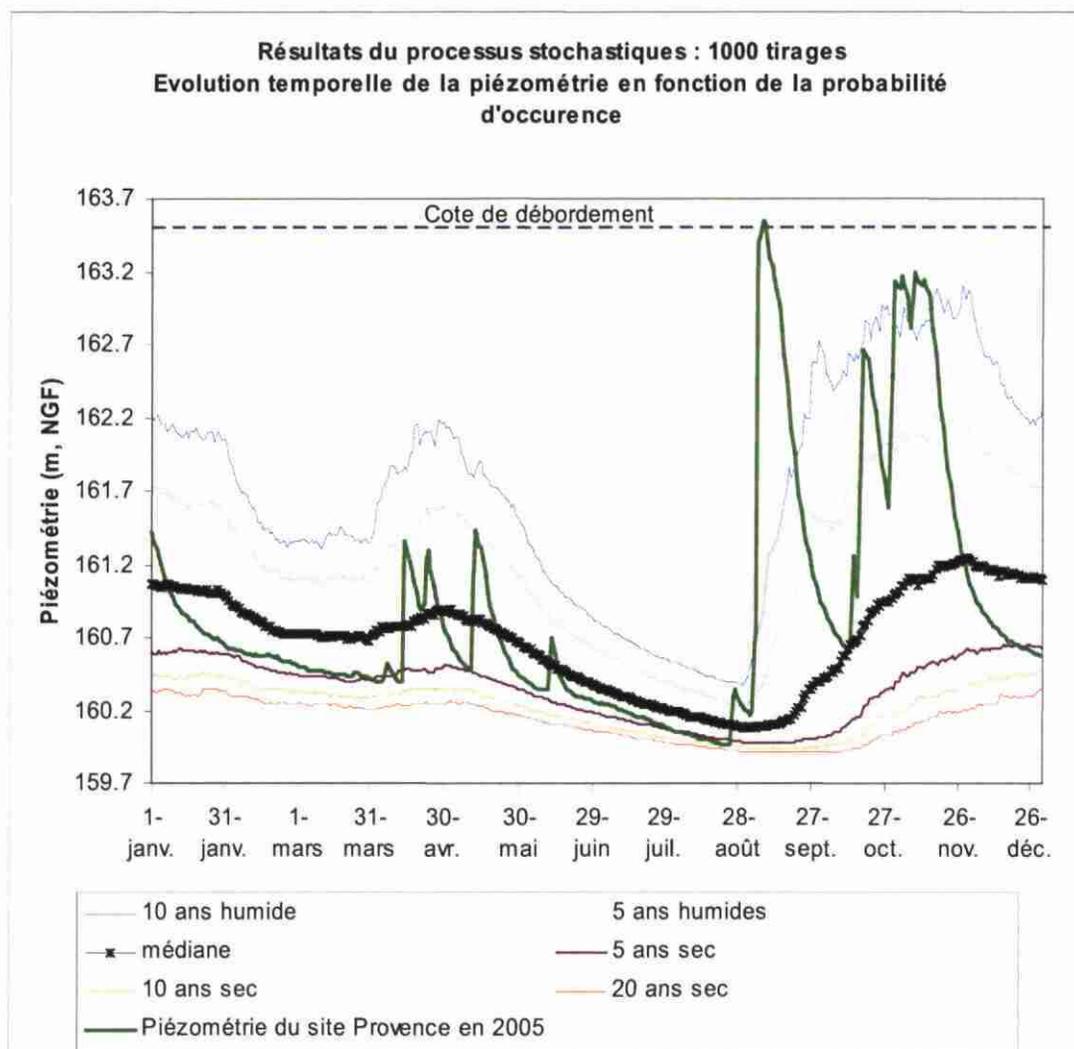
L'option « générateur de pluie » du logiciel Tempo a été utilisée dans cette étude afin de générer de manière stochastique des scénarios de pluie (qui ont les mêmes caractéristiques que la pluie observée). La chronique de pluie observée est celle déterminée à l'aide de l'option de pondération du logiciel.

Pour la période postérieure au 31/12/2006, et dans une optique d'étude d'un grand nombre de situations hydrologiques contrastées, la piézométrie a été calculée par le modèle de transfert à partir des chroniques de pluie et d'ETP générées de manière stochastique à l'aide de l'option de génération des pluies et d'ETP de l'outil Tempo. Pour ce faire, les résultats d'un grand nombre de relations pluie-piézométrie ont été étudiées de manière statistique : 1000 chroniques de piézométrie ont ainsi été calculées à partir de 1000 chroniques de pluies efficaces déterminées par l'approche stochastique (utilisation des générateurs de pluie et d'ETP).

Une manière de représenter la probabilité d'occurrence 'P' du niveau modélisé consiste à faire une partition de la population statistique constituée par l'ensemble des valeurs prises par le débit au temps t. Cette partition est opérée de telle sorte que l'effectif N (nombre de réalisations) soit divisé en deux populations de taille respective P.N et (1-P).N. Cette partition de l'effectif de la population statistique est représentée pour chaque pas de temps.

Cette représentation en fonction du temps est très utilisée pour mettre en évidence la probabilité d'occurrence de certains phénomènes tels que les crues ou les étiages. Dans le cas où  $P=0.5$ , le quantile divise la distribution statistique en deux parties d'effectifs égaux : il s'agit dans ce cas de la médiane. Lorsque P est choisi respectivement égal à 0.25 et 0.75, les quantiles divisent la population statistique en quatre parties d'effectifs égaux : ce sont les quartiles : 1<sup>er</sup> quartile 0.25 = probabilité d'occurrence = 4 ans sec ; 4<sup>ème</sup> quartile (0.75) = probabilité d'occurrence = 4 ans humide. Lorsque l'on cherche à représenter des événements exceptionnels, on choisira P proche de 0 ou de 1.

Nous présentons sur l'illustration 83, les résultats de cette analyse statistique. Il ressort notamment que la gamme de variation de niveaux piézométriques en fin de période estivale présentent peu d'amplitude de variation. Les niveaux piézométriques lors des contextes hydrologiques d'années hydrologiques « normales » (médiane) en fin de période estivale se trouve à la côte de 160.1 m, NGF environ, soit environ 20 cm au dessus des niveaux piézométriques les plus bas des contextes hydrologiques de fréquence d'occurrence 20 ans sec (159.92 m NGF). Les niveaux minimum mesurés au cours de l'été 2006 (159.96 m, NGF) apparaissent donc caractéristiques de situation hydrologique de type « sécheresse décennale » (Illustration 83).



*Illustration 83 : Modèle de transfert « Provence » en mode prévisionnel : représentation des niveaux piézométriques pour différentes probabilités d'occurrence*

Le modèle de transfert du site Mas de Provence couplé aux générateurs stochastiques de pluies et d'ETP permet de caractériser les valeurs de piézométrie pour différents contextes hydrologiques et pour différentes périodes de l'année. Les valeurs de piézométrie pour une année normale ont été extraites de la base de données constituées et utilisées pour étudier, dans un contexte d'étiage d'année normale, l'évolution que présenterait la piézométrie du système karstique pour différentes configurations d'événement pluvieux.

La première analyse a consisté d'étudier l'impact d'un épisode simple de précipitation de cumul variable (de 50 mm à 250 mm, se produisant en fin de période estivale) sur la piézométrie du site de Mas de Provence. Cette étude a été menée à l'aide du modèle de transfert Provence dont les résultats ont été présentés précédemment. La seconde analyse a porté sur l'étude du comportement du karst (au site Mas de Provence)

lorsqu'un épisode pluvieux « double » se produisant à 48 heures d'intervalle se produit en fin d'été, comme cela a déjà été observé (Septembre 2005, notamment).

Nous présentons sur l'illustration 84 les résultats obtenus par le modèle de transfert lorsque l'on considère en entrée différentes valeurs de cumul journalier de précipitation (75 mm à 225 mm). Le contexte hydrogéologique du système karstique est représentatif d'une année « normale » (médiane).

Il ressort que le phénomène de débordement du karst se produit lorsque le cumul de pluie journalière est compris en 175 mm et 200 mm (Illustration 84 et Illustration 85). Compte tenu de l'inertie du système, les niveaux piézométriques demeurent élevés et globalement situés à moins d'un mètre du seuil de débordement pendant quelques jours (2 à 7 jours) selon que l'on considère les résultats du modèle pour les cumuls de pluie compris entre 150 mm et 225 mm.

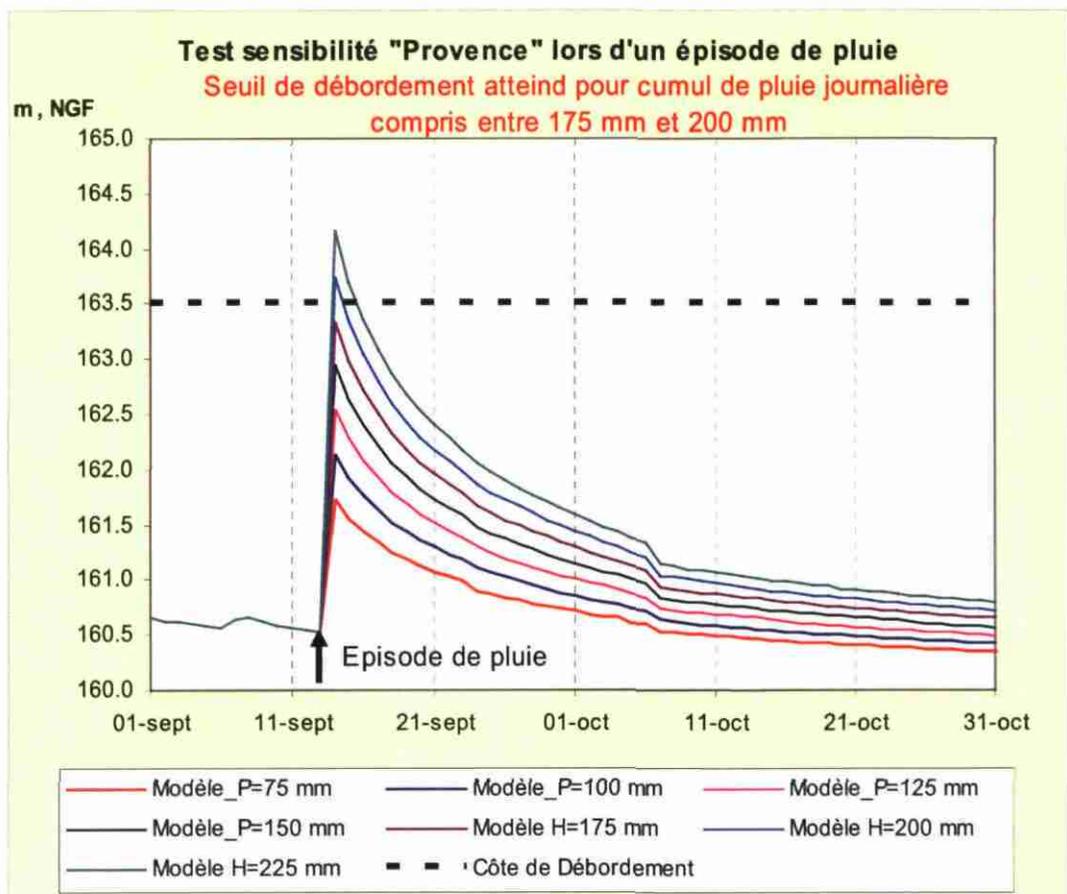


Illustration 84 : Evolution de la piézométrie au site Provence pour différentes configurations d'épisodes de pluie testées par le modèle de transfert

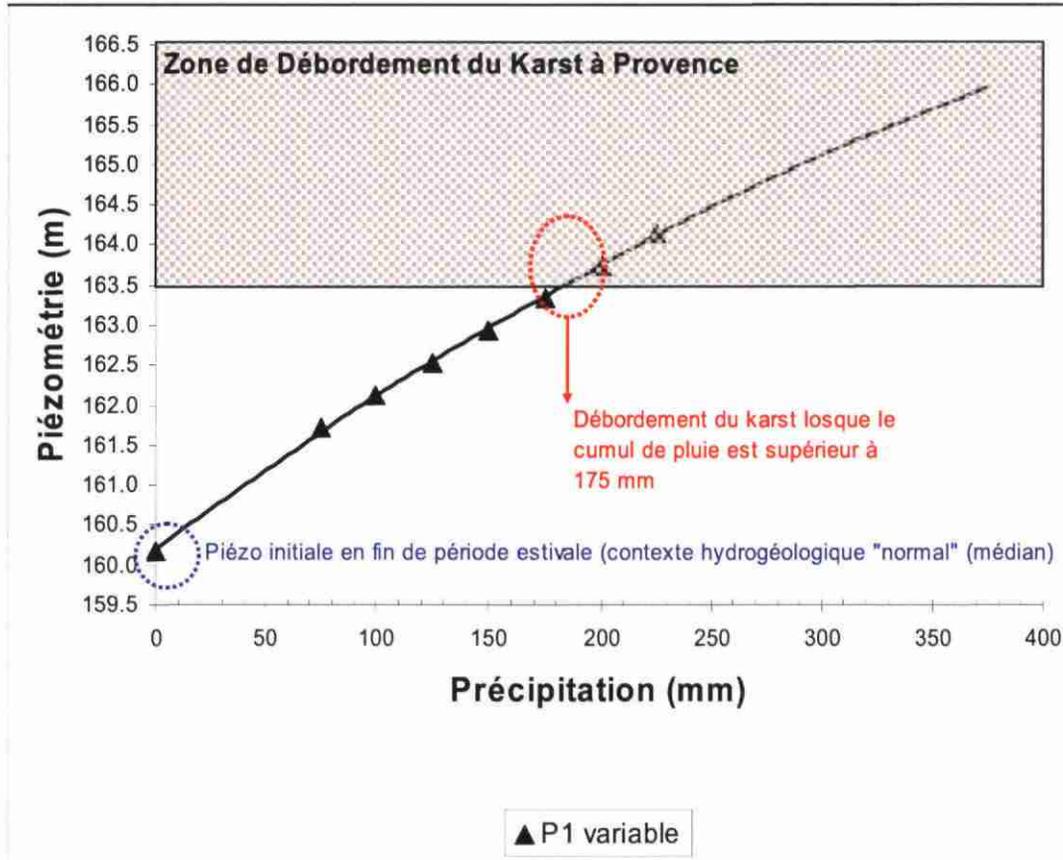


Illustration 85 : Evolution de la piézométrie maximale calculée par le modèle (pic de crue) au site Mas de Provence pour différentes configurations d'épisodes de pluie testées par le modèle de transfert

La seconde analyse a porté sur l'étude du comportement du karst (au site Provence) lors d'un épisode pluvieux « double » se produisant à 48 heures d'intervalle en fin d'été. Au total, 27 différentes configurations de scénarios de pluie ont été étudiées.

P1 (mm)	75	75	75	75	75	75	75	100	100	100	100	100	100	125
P2 (mm)	75	100	125	150	175	200	225	75	100	125	150	175	200	50
P1 (mm)	125	125	125	125	125	125	150	150	150	150	150	150	150	150
P2 (mm)	75	100	125	150	175	200	25	50	75	100	150	175	200	

Illustration 86 : Caractéristiques des doubles épisodes de pluie considérées à l'aide du modèle de transfert Provence

Un exemple de résultat obtenu par le modèle de transfert est présenté sur l'illustration 87. L'illustration 88 présente l'évolution de la piézométrie maximale calculée par le modèle lors des deux pics de crue générés respectivement par l'épisode de pluies P1 et P2.

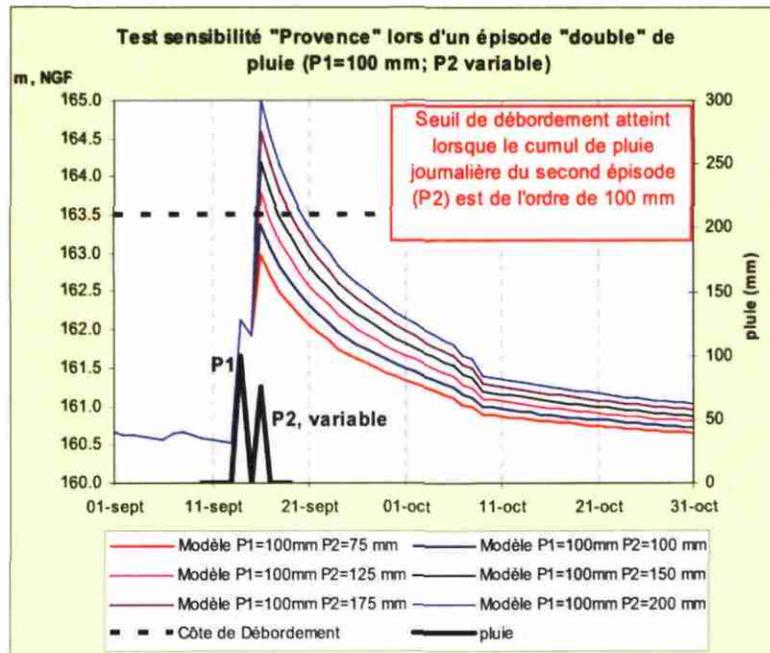


Illustration 87 : Evolution de la piézométrie au site Provence pour différentes configurations d'épisodes doubles de pluie testées par le modèle de transfert (P1 = 100 mm, P2 variable, compris entre 75 mm et 200 mm)

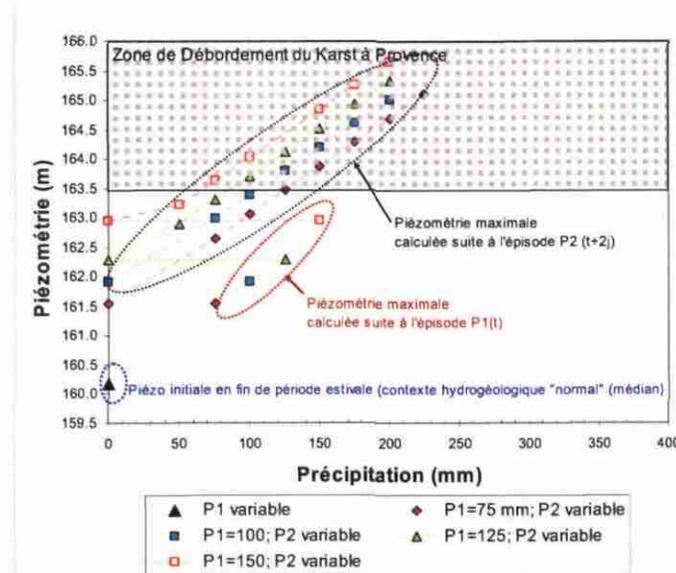


Illustration 88 : Evolution de la piézométrie maximale calculée par le modèle (pic de crue) au site Provence pour différentes configurations d'épisodes doubles de pluie testées par le modèle de transfert

Dans l'exemple présenté (Illustration 87), il ressort que le seuil de débordement du karst est atteint lorsque le cumul de pluie journalière du second épisode (P2) est de l'ordre de 100 mm, ce second épisode faisant suite à l'épisode P1 de 100 mm.

#### **2.4.10. Conclusions et perspectives**

La mise en œuvre de nouvelles méthodes visant à caractériser le débit des cadereaux en prenant en considération l'information karst ainsi qu'à définir des seuils d'alerte à l'aide d'abaques a été développée. La première a été appliquée et testée sur la station Cimpro située à l'aval du cadereau d'Alès à la confluence avec le cadereau de Camplanier. Elle est basée sur une modélisation globale à l'aide du logiciel Tempo. Le pas de temps horaire a été utilisé, le pas de temps journalier précédemment utilisé dans les anciennes études s'étant révélé trop intégrateur pour caractériser les phénomènes de crue des cadereaux. Cette méthode est caractérisée par l'identification de fonctions de transferts qui lient la pluie et l'information du karst au débit. La deuxième a été appliquée à un pas de temps journalier à l'aide du piézomètre de Mas de Provence, pour déterminer des seuils d'alerte, en utilisant une approche d'un générateur stochastique de précipitations.

Les résultats de cette simulation, utilisant l'information karst sur un point de débordement situé à proximité du Cadereau d'Alès, sont jugés satisfaisants. Ils permettent de reproduire au pas de temps horaire l'allure générale de la courbe des débits pour un épisode de forte crue caractérisé par une alimentation par les eaux de débordement du karst. Toutefois, les amplitudes simulées lors du débordement de l'aquifère ne sont pas identiques à celles mesurées. L'intégration d'une information karst au niveau du cadereau de Camplanier permettrait peut être d'améliorer le modèle. A ce jour ces données ne sont pas disponibles, les sites ayant été instrumentés au cours de l'été 2007. Ce modèle pourra ainsi être réactualisé.

Aussi le modèle s'est révélé particulièrement sensible à l'information précipitation. Le modèle pourrait probablement être amélioré en utilisant une information des précipitations spatialisées, à partir des images Radar disponibles au SPC Grand Delta.

La méthodologie développée pour le cadereau d'Alès s'est révélée adaptée à la représentation des débits du cadereau influencés par des débordements du karst. Cette méthodologie doit maintenant être validée en étant mise en application sur d'autres cadereaux. Différentes données sont disponibles. Il existe d'abord les chroniques anciennes plus ou moins complètes pour la période 1998-2004 pour les différents cadereaux (Camplanier, Pondres, Valdegour, Uzès et Valladas). De plus, les enregistrements ont été remis en fonctionnement. Concernant le suivi du karst, certains points représentatifs du karst superficiel sont suivis depuis 2004 à proximité du cadereau de Valladas et de Camplanier, d'autres ont été mis en place au cours de l'été 2007. Ces données pourront ainsi être testées afin de caractériser le fonctionnement des cadereaux en période de crue pour des épisodes caractérisés par une alimentation du cadereau par du ruissellement et par une alimentation mixte : ruissellement et débordement du karst.

La méthodologie développée pour identifier des seuils d'alerte de débordement du karst a été effectuée au pas de temps journalier. Une adaptation de la méthode est nécessaire pour travailler à un pas de temps horaire.

Dans le cadre d'un BVNE Karst, en collaboration avec d'autres organismes, dont le Cemagref, une comparaison de méthodologies et de modèles développés à partir de l'expertise du BRGM pourraient être effectuée sur des bassins versants mixtes, avec notamment une composante karstique. La prise en compte de la composante « karst » au sein de différents types de modèles dont les modèles à réservoirs de type GARDÉNIA ou GR4, à partir d'approches fonctions de transfert, seuils de débordement, ... offre des perspectives de recherche.



### 3. Conclusion sur les travaux menés en 2007

L'année 2007 a permis de lancer les travaux sur le système karstique de Nîmes avec ses cadereaux (vallées sèches), de poursuivre ceux sur le Touch et le BVNE du Gardon d'Anduze. Toutefois, les actions sur la Somme n'ont pu progresser en 2007, l'implantation de Gardénia sur DEMETER devant être finalisée dans les semaines à venir.

**Sur le Gardon d'Anduze**, les travaux de modélisation se sont poursuivis à partir des évènements historiques antérieurs à 2003. Ils permettent de caler sur les quatre évènements validés par le SCHAPI le modèle GARDÉNIA, avec de bonnes corrélations observées entre les débits simulés par Gardénia et les débits observés. Et ce dans l'attente d'un calage sur les évènements postérieurs à 2003.

La cartographie de la perméabilité a été calibrée sur les bassins du Gardon et de l'Avène, toujours à l'aide des évènements pluvieux avant 2002, (modèle d'écoulement STREAM). Cette calibration devra être finalisée sur l'Avène, puis validée sur les deux bassins à l'aide des évènements postérieurs à 2002

**Sur le bassin versant du Touch**, les travaux ont permis d'acquérir des séries de données sur les parcelles expérimentales de St Lys, ainsi que sur la station DIREN. L'année 2007 a permis une acquisition correcte comme le montre l'analyse des données. Il reste important de poursuivre l'acquisition sur au moins une des deux parcelles, et ce afin d'obtenir des données en conditions sèches, ce que n'a pas permis l'été 2007 particulièrement humide.

La cartographie de l'humidité des sols à l'aide des données SAR a pu être mise en place sur le BV du Touch, avec une précision de 3% en référence aux données terrain acquises lors de l'acquisition d'une des dates Radar. Une corrélation a été faite avec les données ISBA, afin de valider la démarche. Les précisions obtenues avec l'une ou l'autre des méthodes sont proches (précision de 3% avec Radar SAR, environ 5% avec ISBA).

Un suivi des perméabilités a été fait sur une trentaine de parcelles représentatives du Touch, afin de voir l'évolution de la perméabilité sur une année. Il s'avère qu'en forêt ou sur prairies, les évolutions sont faibles, à une exception près (perméabilité estivale faible sur forêt). Pour les parcelles cultivées, la perméabilité est très dépendante du travail du sol. Les travaux ont permis de proposer pour chaque saison une carte de perméabilité qui devra faire l'objet d'une calibration sur différents évènements pluviométriques.

**Sur le bassin versant de la Somme**, il était prévu d'intégrer GARDÉNIA à la plate forme DEMETER. Ceci n'a pu être réalisé en 2007, et fera l'objet d'une action dès le début 2008 entre le SCHAPI et le BRGM. De même la mise en application sur le bassin de la Meuse est ajournée à la demande du SCHAPI, ce bassin versant

numérique expérimental ne faisant pas l'objet d'une action prioritaire comme les autres BVNE

### **Karst de Nîmes**

L'intégration et l'analyse des données disponibles [piézométrie, débits dans le cadereau d'Alès en différentes stations, précipitations] sur le site (projets antérieurs et en cours BRGM-Ville de Nîmes) ont fait l'objet des travaux de cette première année. L'approche de modélisation de type fonctions de transfert (traitement de séries de données à l'aide du logiciel TEMPO © brgm) a été mise en œuvre, afin d'intégrer la composante « eaux souterraines » pour reconstituer les évolutions des débits dans le cadereau d'Alès. Les résultats des simulations utilisant l'information karst sur un point de débordement situé à proximité du Cadereau d'Alès, sont jugés satisfaisants. Ils permettent de reproduire au pas de temps horaire l'allure générale de la courbe des débits pour un épisode de forte crue caractérisé par une alimentation par les eaux de débordement du karst.

Le nombre de crues exploitables est à ce jour limité, mais l'équipement important de la zone du fait de la synergie de différents projets devrait permettre de remédier à cela.

La méthodologie développée pour identifier des seuils d'alerte de débordement du karst a été effectuée au pas de temps journalier. Une adaptation de la méthode est nécessaire pour travailler à un pas de temps horaire.

## 4. Bilan de Production

En 2007, les documents produits ont été :

- un rapport d'avancement en juin 2007 : Desprats J-F, M. Aubert, Baran N., Cerdan O., Dörfliger N., Saplaïroles M., Ph. Stollsteiner, Thiéry, D. Bahdadi N., 2007. Appui aux actions SCHAPI : BVNE Gardon d'Anduze et Somme, Bassin versant du Touch. Rapport d'avancement « Année 5 » BRGM RP-55738-FR, 85 p, 57 ill., 1 ann. ;
- le présent rapport technique de fin d'exercice 2007 ;
- les comptes-rendus de réunions : 15 janvier à Orléans, 25 avril à Montpellier, 29 août à Toulouse (annexe 1) ; les comptes-rendus de visite sur le terrain (annexe 2) ;
- la publication scientifique relative à l'étude de l'humidité sur le bassin du Touch à l'aide des données Radar (annexe 3) : Nicolas Baghdadi, Maelle Aubert, Olivier Cerdan, Laurent Franchistéguy, Christian Viel, Eric Martin, Mehrez Zribi and Jean François Desprats, Sensors 2007, 7, 2458-2483. Operational Mapping of Soil Moisture Using Synthetic Aperture Radar Data: Application to the Touch Basin (France) - Received: 31 August 2007 / Accepted: 21 October 2007 / Published: 22 October 2007.



## 5. Planification année 6

### 5.1. OBJECTIFS

Lors de la définition des objectifs fin 2006, il a été décidé de s'orienter vers des actions planifiées sur 3 ans, de 2007 à 2009.

1. Gardon d'Anduze. La calibration de la carte de perméabilité réalisée en 2007, c'est la modélisation basée sur STREAM / Gardénia qui sera la base des travaux menés en 2008. L'extension des modélisation sur bassin versant non jaugé de l'Avène est conditionnée à l'acceptation du projet proposé au Conseil Régional Languedoc-Roussillon et soutenu par le SPC Nîmes et le SCHAPI ;
2. sur le Bassin du Touch, les mesures seront terminées en juin 2008 et leur exploitation sera faite afin d'étudier sur le sous bassin versant de St Lys la relation entre les humidités mesurées et les débits enregistrés à l'exutoire ;
3. après l'implantation de Gardénia sur DEMETER au SCHAPI en 2007, le BRGM poursuivre l'adaptation des codes GARDÉNIA aux normes Sandre en débutant l'extrapolation au BVNE de la Meuse ;
4. l'année 2007 a permis d'intégrer les données existantes sur le site retenu pour l'étude des karsts (région Nîmoise). Les travaux de modélisation (TEMPO) entrepris en 2007 seront poursuivis en 2008, puis 2009.

### 5.2. TACHES PLANIFIEES EN 2008

Les tâches planifiées en 2008 sont donc réparties par bassin versant :

#### 5.2.1. Description des opérations proposées

##### ***Module 1. Bassin versant du Gardon d'Anduze***

Sur le BVNE d'Anduze, les évènements 2002-2007 seront pris en compte dans Gardénia, après validation. Le transfert de Gardénia sur DEMETER sera réalisé. Il faudra donc intégrer la lecture automatique, le décodage, et la mise en forme des images radar et ainsi qu'un calcul automatique des lames d'eau moyennes sur les bassins des GARDONS.

Une modélisation EROS en découpant le bassin versant en plusieurs (3 à 5) sous-bassins sera mise en œuvre.

Ces évènements 2002-2007 permettront en outre de valider la carte de perméabilité des sols paramétrée en 2007 sur les 4 évènements sélectionnés par l'École des Mines d'Alès (des mesures de perméabilité complémentaires devront être faites sur des

formations majeures comme les vignes sur argiles, statistiquement peu représentées dans la base de donnée actuelle. Les données ISBA fournies par le SCHAPI seront utilisées pour calibrer la prise en compte de l'humidité initiale dans le modèle STREAM à la suite des premiers essais commencés fin 2007 par le SCHAPI (O. Louis).

### ***Module 2. Bassin versant du Touch***

Les mesures in situ sur St Lys doivent se poursuivre jusqu'en juin 2008, voire plus sur la parcelle aval. La date de fin reste dépendante du bon vouloir des agriculteurs propriétaires parcelles. Les travaux d'analyse et de modélisation seront réalisés sur ce bassin expérimental. Il conviendra de réfléchir à la possibilité de calibration en laboratoire, afin de disposer de données pour des situations non obtenues in situ.

Les travaux sur la perméabilité des sols permettront de proposer une carte d'infiltration calibrée par saison, calibration basée sur le modèle STREAM comme pour le Gardon d'Anduze. L'objectif sera de disposer d'une cartographie par saison afin de prendre en compte l'occupation du sol, facteur n°1 de variabilité sur un contexte pédologique assez homogène. Ce volet sera complémentaire d'une action de recherche menée par le BRGM dans le cadre du projet Cadre Riscote.

Une modélisation des crues du Touch avec GARDÉNIA sera réalisée. 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.

### ***Module 3. 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.

### ***Module 4. Rôle et contribution des eaux souterraines d'origine karstique aux crues : exemples des bassins 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 poursuivront 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.

### 5.2.2. Personnels impliqués

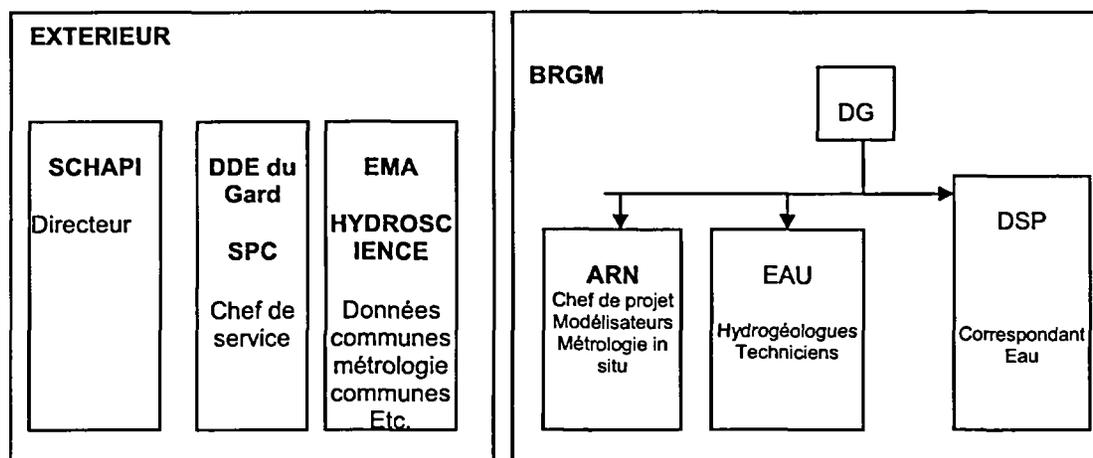
Module 1. Bassin versant du Gardon d'Anduze	Acteurs
1. Validation par STREAM de la perméabilité sur 2002-2007	O.Cerdan JF Desprats Ph. Stollsteiner
2. Modélisation Gardénia sur les évènements 2002-2007	D. Thiéry J.L. Izac N. Baghdadi

Module 2. Bassin versant du Touch Etats de saturation des terrains	Acteurs
1. Mesures in situ en lien avec la DIREN MPY et analyse	N. Baran M. Saplaïroles F. Tilloloy
2. Evolution de la perméabilité des sols et modélisation	J.F. Desprats, O. Cerdan

Module 3 . BV Meuse	Acteurs
Adaptation Gardénia de la Somme/Gardon à la Meuse	D. Thiéry

Module 4 : Rôle et contribution des karsts (Nîmes)	Acteurs
Nîmes : approche couplée hydrogéochimie/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	2007											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<b>Module 1 – GARDON</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Modélisation		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Calibration perméabilité												
Synthèse/Rapport												
<b>Module 2. TOUCH - Etats de saturation des terrains</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
acquisition de données terrain				X	X	X	X	X	X	X	X	X
Modélisation STREAM										X	X	X
Synthèse/Rapport												
<b>Module 3 - SOMME</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Module 4 – Karst Nîmes</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Modélisation									X	X	X	X
Rapport												

### 5.2.5. Equipe de projet

- **Chef de projet** : J.F. Desprats
- **Intervenants BRGM Orléans**: N. Baran, O. Cerdan, Ph. Stollsteiner, D. Thiéry
- **Intervenants BRGM en région** : J.L. Izac, F. Tilloloy, M. Saplairoles, 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
06 2008	Rapport intermédiaire	rapport		SCHAPI / SPC
09 2008		Note avancement MEDD		MEDD
12.2008	Rapport synthèse 2008	rapport		SCHAPI

## 6. Bibliographie

**Baran N.**, 2005. Suivi de la teneur en eau des sols dans les bassins du Gardon d'Anduze et du Touch. BRGM/RP-53654-FR, 38 p.

**Crampon, N., J-C. Roux., P. Bracq.** (1993). Hydrogéologie de la craie en France. Hydrogéologie, 2, pp 81 – 123.

**Desprats J-F, Baran N., Cerdan O., King C., Petelet-Giraud E., Thiéry, D.** 2005. Appui aux actions SCHAPI : Gardon d'Anduze, Avène, Touch et Somme. Rapport Annuel « Année 3 » (Avril 2005-Décembre 2005) BRGM RP-54240-FR, 96 p, 45 ill., 3 ann...

**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.

**Gaume E. et Live M.** , 1999, *La crue de l'Avène des 6 et 7 octobre 1997, compte rendu d'enquête*, rapport d'étude, Ecole nationale des ponts et chaussées, Champs-sur-Marne, France.

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

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

**Maréchal, J-Ch., Ladouche, B.** (2006). Fonctionnement hydrogéologique du système karstique de la Fontaine de Nîmes en crue, Rapport final, BRGM/RP-54723-FR, 111 p.

**Pinault J-L** (2001). Manuel utilisateur de TEMPO: Logiciel de traitement et de modélisation des séries temporelles en hydrogéologie et en hydrogéochimie. Projet Modhydro, Rep. BRGM/RP-51459-FR, 221 pp., BRGM, France.

**Pinault, J.-L., V. Plagnes, L. Aquilina, and M. Bakalowicz** (2001b), Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems: Characterization of karst system functioning, *Water Resour. Res.*, 37(8), 2191– 2204.

**Poul, X.** (1976). Alimentation en eau de la ville de Nîmes (Gard). Ressources en eaux souterraines.- *Bulletin du BRGM* (2), vol. III, 1/2, pp. 89-100.



## **Annexe 1**

### **Compte-rendus de réunions / Missions**



## COMPTE RENDU REUNIONS / MISSIONS

Réf. :JFD-SCHAPI-CR20070115

Orléans le 15/01/2007

<b>COMPTE RENDU DE RÉUNION</b>	
Rédacteur : J.F. DESPRATS	Entité : BRGM
Pour une diffusion externe : Visa et nom du responsable :	
Projet : SCHAPI / Module Gardon	Numéro : PSP07ARN72
<b>Objet : Réunion de lancement du projet SCHAPI</b>	
Date : 15/01/07	Lieu : Orléans
Participants : Ph. Stollsteiner, D. Thiéry, O. Cerdan, J.F. Desprats, M. Saplaïroles, N. Baghdadi, C.King, N. Baran	
Excusés :	
Diffusion : Participants, T. Pointet, Ph. Dutartre, F. Tilloloy, E. Poux	

## RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Introduction :

1. Gardon : Situation du module Gardon dans le projet SCHAPI - Rappel des travaux antérieurs. Bilan année 2006
2. Touch : Situation du module Touch dans le projet SCHAPI - Rappel des travaux antérieurs – Bilan année 2006

### CLOTURE PROJET 2006

Pour l'ensemble des modules timing respecté : envoi du rapport final 2006 le 20 décembre.

Taux d'avancement des imputations correct au cours de l'année.

Mise en place du site de St Lys(Touch) conforme aux prévisions

### LANCEMENT Projet 2007

GARDON : Nécessité de modéliser le volume maximum pour une crue à l'exutoire  
Choix de développement autour de Eros/ Gardénia.

O. Cerdan / J.F. Desprats : analyse des mesures de perméabilité Guelph. Possibilité de régionalisation basée sur des mesures in situ (J.L. Izac)  
Calcul de perméabilités moyennes pour des unités intégratrices sous Eros

D. Thiéry / Ph. Stollsteiner : Intégration des données mises en forme en 2006 sous Gardénia (les 4 événements sélectionnés par O. Cerdan). Modélisation. Sorties d'hydrogrammes de crue

Ph. Stollsteiner : analyse des courbes de tarage de Mialet

Objectif d'une réunion à Nîmes avec SCHAPI+DDE/SPC en juin : premiers résultats

**TOUCH :**

Discussion sur la méthodologie à suivre, sur les protocoles de mesures de terrain, sur les données nécessaires pour la cartographie des humidités

**1. Besoin de données d'humidité calibrées pour l'extrapolation au niveau Touch**

Les acquisitions 2006 ont permis de tester et d'adapter le matériel.

Il apparaît qu'un passage sur le terrain tous les 15 j est indispensable pour assurer la collecte de données de qualité.

Les mesures de teneur en eau présentées en 2006 sont relatives et nécessitent impérativement une calibration.

Deux méthodes seront mises en œuvre pour cette calibration : (1) prélèvements tous les 15 jours à compter du 20 janvier pour mesures gravimétriques en laboratoire (échantillons jusque 50 cm de profondeur puis 4-5 fois dans l'année jusque 1 m de profondeur)(2) calibration avec des volumes de sol conséquents (seaux) pour mesures avec humidification contrôlée qui permettront de couvrir de la gamme de l'état sec à saturé selon un protocole établi par N. Baran

N. Baran doit soumettre un protocole à M. Saplaïroles dès que possible. Celle-ci, en discussion avec le technicien en charge des mesures et le Directeur du SGR va mettre en place un calendrier pour 2007 indiquant clairement les jours de mesures. Les mesures doivent se faire impérativement le jour indiqué, à plus ou moins un jour. Les 23 janvier, 23 février et 23 mars seront réalisées les prélèvements.

Mi-mars, il conviendra de fournir à N. Baghdadi un abaque permettant de calibrer les données d'humidité résultant de ces deux approches. De cette façon, Nicolas pourra spatialiser les données mesurées dans les 2 parcelles expérimentales.

**2. Mesures in situ lors de l'acquisition d'une image SAR**

N. Baghdadi prendra un contact direct avec A. Marchandise, chargé du suivi du projet coté SCHAPI. Et ce afin de récupérer les données ISBA dans les meilleurs délais.

N. Baghdadi indiquera la date proposée pour des prélèvements in situ le jour de l'acquisition de la donnée SAR achetée. 3 binômes seront constitués dès que la date sera fixe. N. Baghdadi est chargé de l'organisation matérielle de la journée.

Acquisition d'une image SPOT en cours via ISIS pour cartographier les sols nus. A savoir qu'en mars ceci ne concernera que les surfaces qui seront semées en maïs ou tournesol deux mois plus tard, surface en recul depuis les sécheresses à répétition des étés précédents.

**3. autres points**

M. Saplaïroles doit contacter la DIREN dans les meilleurs délais pour résoudre les problèmes liés aux données de débits.

Objectif d'une réunion d'avancement à Toulouse avec SCHAPI+DIREN en juin : premiers résultats

<b>Actions</b>	<b>Responsable</b>	<b>Délai</b>	<b>Soldé</b>
<b><u>GARDON</u></b>			
Transmission par O. Cerdan des données pluies-débit sur Gardon	O. Cerdan	immédiat	
Question à O. Louis (SCHAPI) sur les pluies de sept/oct 2006	J.F. Desprats	15 jours	
<b>TOUCH</b>			
Protocole prélèvements	N. Baran	immédiat	
Organisation du planning terrain	M. Saplairoles	immédiat	
Sélection date terrain lors acquisition SAR + organisation	N. Baghdadi	3 semaines	
Récupération données ISBA	N. Baghdadi	3 semaines	

Réf. :JFD-SCHAPI-CR

Montpellier le 25/04/2007

<b>COMPTE RENDU DE RÉUNION</b>	
Rédacteur : J.F. DESPRATS	Entité : BRGM
Pour une diffusion externe : Visa et nom du responsable :	
Projet : SCHAPI	Numéro : PSP07ARN7 2
<b>Objet : Réunion de lancement du projet SCHAPI</b>	
Date : 24/04/2007	Lieu : Orléans
Participants : SCHAPI (A. Marchandise, C. Wittwer), SPC Grand Delta (F. Mannesiez, O. Payrastre), SPC Garonne (N. Vatrín), EMA (P.A. Ayrál), BRGM (Ph. Stollsteiner, D. Thiéry, , J.F. Desprats, M. Aubert, Ph. Dutartre, N. Dorfliger, B. Ladouche, P. Fleury)	
Excusés : O. Cerdan, N. Baghdadi, N. Baran, M. Saplairoles	
Diffusion : Participants, Excusés, T. Pointet, N. Lenotre	

## RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Objectifs :

Faire un point sur l'avancement et la définition des 4 modules de la Convention SCHAPI/BRGM

### Module 1. Gardon d'Anduze

#### 1. Perméabilité des sols

Envoi par le BRGM de la cartographie de la perméabilité des sols à l'IMFT pour faire un test avec Marine. Par ailleurs la carte calibrée sera intégrée dans GARDÉNIA/EROS lors des simulations faites par le BRGM

#### 2. Modélisation GARDÉNIA

Point fait par Ph Stollsteiner sur les données. Discussion autour des données historiques. Si la fiabilité des données récentes (post 2002) est supérieure, surtout pour les données radar (O. Payrastre), on ne peut pas laisser de côté des archives mentionnant plusieurs crues importantes (N. Vatrín), mais en gardant en tête l'importance d'une analyse critique et d'une analyse des erreurs (Ph. Stoll)

D. Thiéry présente les premières modélisations. Selon le SPC Nîmes, c'est cohérent avec les modélisations Althaïr. O. Payrastre rappelle l'importance des informations sur les BV non jaugés. O. Payrastre et C. Wittwer rappellent aussi la nécessité des prendre en compte des prévisions météo dans la modélisation, le délai de prévision étant d'environ 2 heures sur Anduze.

Nécessité pour le BRGM d'intégrer les événements post 2002. Le SPC les communiquera au SCHAPI (O. Louis) qui pourra les faire passer au BRGM, comme cela a été fait avec le CD BVNE.

PS : suite à la réunion, Ph. Stollsteiner a fait une analyse des données de débit SAC / SPC, et les a comparé à des données DIREN récupérées par ailleurs. Il s'avère que des grosses différences existent (septembre 2002) ; elles devront être expliquées par un contact direct entre SPC (O. Payrastra ?) et BRGM (Ph. Stoll)

### **Module 2. Le Touch**

Présentation par Ph. Dutartre des sites équipés sur les parcelles de St Lys : instrumentation, premiers résultats. Le SCHAPI insiste sur les efforts à faire en terme de lisibilité des graphiques et d'usage des unités couramment pratiquées en météo et prévision des crues (lames d'eau en mm).

- N. Vatrin parle de la possibilité lorsqu'il y aura un écoulement à l'exutoire de faire un jaugeage. La DIREN-Midi-Pyrénées pourra fournir un gabarit de 100 ou 200l au BRGM pour cela.
- A. Marchandise (SCHAPI) demande s'il serait possible de prévoir sur une des fosses un arrosage artificiel pour voir la réaction des sondes (réponse N. Baran), et suivre la distribution de l'eau dans le sol
- A. Marchandise demande que les interprétations des courbes d'évolution de teneur en eau dans le sol à différentes profondeurs soient effectuées en termes de vitesse de propagation verticale, à l'échelle événementielle, et à l'échelle interévénementielle. Elles doivent permettre de conclure sur la possibilité ou non d'une saturation des premiers cm de sol au cours d'un événement pluvieux. Dans l'affirmative, l'utilisation de mesures d'humidité de surface des sols sera pleinement justifié.
- A. Marchandise réfléchit à la modélisation qui pourra être mise en place par le SCHAPI sur le Touch, en parallèle des travaux menés par le BRGM avec STREAM. Les données SIG (MNT, occupation des sols) ont été envoyées au SCHAPI (J.F. Desprats)

Présentation par M. Aubert des travaux sur l'extrapolation des mesures in situ à l'ensemble du BV à l'aide des données SAR. On trouve une cohérence entre les données ISBA et la cartographie SAR.

### **Module 3. Karst**

Présentation par N. Dörfliger des travaux menés par le BRGM sur Nîmes et sur le Lez. C. Wittwer rappelle les objectifs d'opérationnalité du SCHAPI et donc la nécessité de déboucher sur des apports méthodologiques de modélisation de bassins versants avec composante karstique. Ce module karst devra être complémentaire des autres BVNE, qui n'intègrent pas cette composante karstique. Dans un premier temps les efforts seront portés sur Nîmes, qui présente l'intérêt d'un suivi plus important, d'études en cours, et d'une proximité avec le SPC Grand Delta, même si ceux-ci n'ont pas la responsabilité des prévisions sur la ville même. Des approches de modélisation de type modèle inverse de transfert seront testées à différentes échelles spatiales et temporelles : piézomètres de zones susceptibles de déborder, bassins versants de cadereaux, sous-bassins versants de cadereaux, pas de temps journalier à horaire. Par ailleurs, il est clairement indiqué, qu'aucun piézomètre ne sera implanté et équipé dans le cadre de ce module.

Bernard Ladouche parle de la nécessité d'intégrer dans les modèles de transfert les données Radar pour une meilleure résolution temporelle et de tester ce type de modèle sur les bassins versants des cadereaux, permettant la modélisation de phénomènes non linéaires et d'intégrer une composante « eaux souterraines ».

C. Wittwer indique que le SCHAPI va effectuer une enquête auprès des différents SPC pour évaluer les problèmes auxquels ils sont confrontés pour la prévention des crues dans des bassins avec du karst. Elle tiendra informer le BRGM au sujet de cette enquête, lors de sa préparation et de son évaluation.

### **Module 4 : Somme**

En l'absence de représentants du SPC local et de O. Louis, D. Thiéry présentera l'avancement du module ultérieurement.

Actions	Responsable	Délai	Soldé
<u>GARDON</u>			
Contact direct entre Ph. Stollsteiner et O. Payrastra (possibilité d'intégrer les données DIREN, validation)	Ph. Stoll	1 mois	
Poursuite modélisations	D. Thiéry	2 mois	
<u>TOUCH</u>			
Nécessité d'un accord aec le propriétaire de la parcelle amont pour une poursuite des mesures	M. Saplairoles	Immédiat	
Possibilité d'un arrosage artificiel en cours d'été demandée par le SCHAPI	N. Baran	immédiat	

Réf. :JFD-SCHAPI-CR

Montpellier le 29/08/2007

<b>COMPTE RENDU DE RÉUNION</b>	
Rédacteur : J.F. DESPRATS, O. CERDAN	Entité : BRGM
Pour une diffusion externe : Visa et nom du responsable :	
Projet : SCHAPI	Numéro : PSP07ARN72
Objet : Réunion de lancement du projet SCHAPI	
Date : 28/08/2007	Lieu : Toulouse
Participants : SCHAPI (A. Marchandise, O. Louis), BRGM (J.F. Desprats, O. Cerdan)	
Excusés :	
Diffusion : Participants, Equipe de projet, T. Pointet, N. Lenotre	

## RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Objectifs :

Mise en place de STREAM au SCHAPI  
Point sur les modules Gardon et Touch

### Module 1. Gardon d'Anduze

#### 3. Implantation de STREAM

Le modèle STREAM a été mis en place au SCHAPI en salle de veille. Comme indiqué précédemment, l'objectif n'est pas de faire tourner STREAM sur DEMETER comme les modèles Marine ou ALHTAIR, mais de permettre au SCHAPI de réaliser des simulations d'écoulements en prenant en compte des paramètres physiques étudiés parallèlement par le BRGM (comme la perméabilité des sols) pour l'établissement d'un indicateur de prévention. L'installation du 28/08 permet la prise en compte de pluies homogènes, des difficultés subsistant pour la prise en compte de pluies spatialisées (conflit Windows 2000 / ArcGis 9.2. ?). O. Cerdan cherche à solutionner ce problème, en lien avec O. Louis.

#### 4. Modélisations GARDÉNIA

O. Louis a reçu les commentaires de Ph. Stollsteiner suite aux modélisations faites avec les données 2002-2007.

J.F. Desprats rappelle les remarques faites par P. Stollsteiner en avril 2007 à Montpellier sur la nécessité de valider les données (DIREN, SPC) hydro avant de lancer les modélisations.

Les premiers résultats obtenus avec GARDÉNIA sont intéressants. Pour la suite du programme BRGM/SCHAPI, une implantation sur DEMETER pourrait être envisagée. Ceci devra être rediscuté lors de la réunion de projet de fin d'année.

#### 5. Gardon – besoins

O. Louis a testé sur un bassin versant du Nord de la France la mise en place d'abaques avec une relation entre les débits et le cumul pluviométrique. Il sera intéressant pour 2008 de travailler sur une telle approche sur le BV du Gardon, dans la perspective de la prise en compte des pluies antécédentes (et donc de l'humidité des sols) dans la modélisation STREAM en particulier. Des campagnes de mesures d'humidité seront à prévoir, en discussion avec hydrosociences Montpellier qui a pu en réaliser dans les années passées

**Module 2. Le Touch**

Relecture par A. Marchandise du rapport intermédiaire.

Les mesures in situ doivent se poursuivre jusqu'à fin 2007. On espère pousser jusqu'en juin 2008, si les agriculteurs le permettent.

Le rapport séparé de N. Baghdadi sera remis à l'automne. Les travaux sur la cartographie des sols au niveau du bassin ont permis de démontrer une relation fiable entre l'humidité extraite des données radar SAR et les données ISBA.

**Module 4 : Somme**

O. Louis et D. Thiéry doivent convenir d'une date de rencontre en septembre ou début octobre pour se rencontrer sur Orléans, afin de finaliser la mise en place de Gardénia sur DEMETER au SCHAPI. D. Thiéry est prêt pour cela.

**Autres**

Une réunion de clôture du projet 2007 doit être organisée avant la fin novembre. Elle permettra en outre de discuter des actions à mener en 2008

Actions	Responsable	Délai	Soldé
<b><u>GARDON</u></b>			
Contact direct Ph. Stoll et O. Louis	Ph. Stoll	Immédiat	
Sujet : calibration données, modélisation Gardénia	O. Louis		
Finalisation implantation Gardénia au SCHAPI	O. Cerdan		
<b><u>SOMME</u></b>			
Contact direct D. Thiéry et O. Louis	D. Thiéry	Immédiat	
Sujet : réunion sur Orléans (idéal après le 15/09, Ph. Stoll étant à la Réunion avant)	O. Louis		
<b><u>Touch</u></b>			
Suite acquisition et interprétation mesures in situ	M. Saplaïroles N. Baran	octobre	
Mise en place réunion en novembre	J.F. Desprats	Immédiat	

## **Annexe 2**

### **BV du Touch - Journalvisites de terrain (nov2006-nov2007)**



### **30 novembre 2006**

- **Déchargements des données et lancement de nouvelles acquisitions**
  - ❖ Déchargement des données pour les 2 parcelles et programmation nouvelle (pas de temps de 1h). Fin de l'acquisition des données au 20 novembre 2006 pour « Retenue » et au 17 novembre pour « Souleris »,
  - ❖ Fonctionnement par intermittence de la sonde à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 de la parcelle « Retenue »,
  - ❖ Remplacement des batteries des centrales d'acquisition TRASE pour les 2 parcelles,
- **Relevés des niveaux piézométriques** sur les 2 puits situés sur les parcelles instrumentées,
- **Désinstallation de l'ensemble des cannes tensiométriques** sur les 2 parcelles pour resaturation des bougies poreuses et recalibration en laboratoire,
- **Déchargement des données pluviométriques** et des débits enregistrés à la station d'acquisition installée par la DIREN Midi-Pyrénées.

### **18 décembre 2006**

- **Déchargements des données et lancement de nouvelles acquisitions**
  - ❖ Déchargement des données pour les 2 parcelles et programmation nouvelle (pas de temps de 1h). Fin de l'acquisition des données au 01 décembre 2006 pour « Retenue » et au 05 décembre pour « Souleris »,
  - ❖ Remplacement des batteries des centrales d'acquisition TRASE pour les 2 parcelles.
- **Relevés des niveaux piézométriques** sur les 2 puits situés sur les parcelles instrumentées
- **Déchargement des données pluviométriques** et des débits enregistrés à la station d'acquisition installée par la DIREN Midi-Pyrénées

### **11 janvier 2007**

- **Déchargements des données et lancement de nouvelles acquisitions**
  - ❖ Déchargement des données pour les 2 parcelles et programmation nouvelle (pas de temps de 1h). Fin de l'acquisition des données au 29 décembre 2006 pour « Retenue » et au 30 décembre pour « Souleris »,
  - ❖ Fonctionnement par intermittence de la sonde à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 de la parcelle « Retenue »,
  - ❖ Remplacement des batteries des centrales d'acquisition TRASE pour les 2 parcelles. Suppression du matériel défectueux et mise en place de batteries neuves,
- **Réinstallation des cannes tensiométriques** sur les 2 parcelles :
  - Implantation de 7 cannes sur la parcelle « Souleris » aux profondeurs de 20 cm (x2) de 40 cm (x2), de 60 cm (x2) et de 80 cm (x1),
  - Implantation de 2 sites de respectivement 8 et 5 cannes sur la parcelle « Retenue » aux profondeurs de 20 cm (x2), de 40 cm (x3), de 60 cm (x2), de 80 cm (x4), de 100 cm (x2),
  - Programmation de l'acquisition des données sur les 2 parcelles à une fréquence de 1h,
- **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,

**22 janvier 2007**

- 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 les 2 parcelles,
  - ❖ Fonctionnement par intermittence de la sonde à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 de la parcelle « Retenue »,
  - ❖ Remplacement des batteries des centrales d'acquisition TRASE pour les 2 parcelles,
- 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

**07 février 2007**

- 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 les 2 parcelles,
  - ❖ Fonctionnement par intermittence de la sonde à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 de la parcelle « Retenue » et de celle à 10 cm de la fosse n°1 de la parcelle « 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,

**19 février 2007**

- 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 les 2 parcelles,
  - ❖ Fonctionnement par intermittence de la sonde à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 de la parcelle « Retenue »,
  - ❖ 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.

**05 mars 2007**

- 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 les 2 parcelles,
  - ❖ Fonctionnement par intermittence de la sonde à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 de la parcelle « Retenue »,
  - ❖ 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 mars 2007**

- 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 les 2 parcelles,
  - ❖ Fonctionnement par intermittence de la sonde à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 de la parcelle « Retenue »,
  - ❖ 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.

**05 avril 2007**

- 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 les 2 parcelles,
  - ❖ Fonctionnement par intermittence de la sonde à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 de la parcelle « Retenue »,
  - ❖ Remplacement des batteries des centrales d'acquisition TRASE pour les 2 parcelles,
- Déchargements des données des cannes tensiométriques sur les 2 parcelles,
- Débroussaillage de l'herbe et des repousses de blé 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.

**16 avril 2007**

- 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 les 2 parcelles,
  - ❖ Fonctionnement par intermittence de la sonde à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 de la parcelle « Retenue »,
  - ❖ 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.

**09 mai 2007**

- 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 les 2 parcelles,
  - ❖ Fonctionnement par intermittence de la sonde à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 de la parcelle « Retenue » et de celle à 100 cm de la fosse n°3 de la parcelle « Souléris »,
  - ❖ Remplacement des batteries des centrales d'acquisition TRASE pour les 2 parcelles,
- Déchargements des données des cannes tensiométriques sur les 2 parcelles,
- Débroussaillage de l'herbe et des repousses de blé sur les 2 parcelles,
- Enterrement des fils reliant les 3 fosses au multiplexeur sur la parcelle Souléris afin de libérer de l'espace au propriétaire. Mise en place prochaine d'un paddock et d'un enclos à chevaux,
- 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.

**15 mai 2007**

- 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 les 2 parcelles,
  - ❖ Fonctionnement par intermittence de la sonde à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 de la parcelle « Retenue » et de celle à 100 cm de la fosse n°3 de la parcelle « 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.

#### **06 juin 2007**

- 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 arrêt de l'acquisition des données au 27 mai pour « Soulésis »
  - ❖ Disfonctionnement de la sonde à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 à « Retenue » : aucune donnée disponible,
  - ❖ 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 juin 2007**

- 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 arrêt de l'acquisition des données au 07 juin pour « Soulésis »
  - ❖ Disfonctionnement de la sonde à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 à « Retenue » : aucune donnée disponible,
  - ❖ 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.

#### **02 juillet 2007**

- 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 arrêt de l'acquisition des données au 21 juin pour « Soulésis »

- ❖ Disfonctionnement de la sonde à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 à « Retenue » : aucune donnée disponible,
- ❖ Remplacement des batteries des centrales d'acquisition TRASE pour les 2 parcelles,
- Déchargements des données des cannes tensiométriques sur les 2 parcelles,
- Débroussaillage de l'herbe et des repousses de blé 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.

#### **16 juillet 2007**

- 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 11 juillet 2007 pour « Retenue » et au 08 juillet pour « Souleris »,
  - ❖ Disfonctionnement de la sonde à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 à « Retenue » : aucune donnée disponible,
  - ❖ 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.

#### **30 juillet 2007**

- 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 les 2 parcelles,
  - ❖ Fonctionnement par intermittence de la sonde à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 et de celle à 10 cm dans la fosse n°3 de la parcelle « Retenue »,
  - ❖ 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.

### **05 septembre 2007**

- 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 18 août 2007 pour « Retenue » et au 06 août pour « Souleris »,
  - ❖ Disfonctionnement de la sonde à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 à « Retenue » : aucune donnée disponible,
  - ❖ Fonctionnement par intermittence des sondes à 10 cm de profondeur dans les fosses n°1 et n°3 et de celle à 30 cm dans la fosse n°2 de la parcelle « Retenue »,
  - ❖ 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 septembre 2007**

- 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 arrêt de l'acquisition au 09 septembre pour « Souleris »,
  - ❖ Disfonctionnement de la sonde à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 à « Retenue » : aucune donnée disponible,
  - ❖ Fonctionnement par intermittence des sondes à 10 cm de profondeur dans les fosses n°1 et n°3 et de celles à 30 et 40 cm dans la fosse n°2 de la parcelle « Retenue »,
  - ❖ Remplacement des batteries des centrales d'acquisition TRASE pour les 2 parcelles,
- Déchargements des données des cannes tensiométriques sur les 2 parcelles.
- Débroussaillage de l'herbe et des repousses de blé 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.

### **12 octobre 2007**

- 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 03 octobre pour « Retenue »,

- ❖ Disfonctionnement de la sonde à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 à « Retenue » : aucune donnée disponible,
- ❖ Fonctionnement par intermittence de la sonde à 10 cm de profondeur dans la fosse n°3 et de celles à 30 et 40 cm dans la fosse n°2 de la parcelle « Retenue »,
- ❖ Disfonctionnement dans l'acquisition des données de la parcelle « Souléris » : aucune données disponible
- ❖ 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.

#### **25 octobre 2007**

- 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 »,
  - ❖ Disfonctionnement des sondes à 80 cm de profondeur dans la fosse n°1 et à 40 cm de profondeur dans la fosse n°2 à « Retenue » : aucune donnée disponible,
  - ❖ Fonctionnement par intermittence de la sonde à 10 cm de profondeur dans la fosse n°3 et de celle à 30 cm dans la fosse n°2 de la parcelle « Retenue »,
  - ❖ Disfonctionnement dans l'acquisition des données de la parcelle « Souléris » : aucune données disponible,
  - ❖ Débranchement de la centrale d'acquisition de « Souléris » pour évaluation du diagnostic de panne en laboratoire,
  - ❖ Remplacement des batteries 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,
- Relevés des niveaux piézométriques sur les 2 puits situés sur les parcelles instrumentées.

## **Annexe 3**

### **Publication scientifique**



*Sensors* 2007, 7, 2458-2483

***sensors***

ISSN 1424-8220

© 2007 by MDPI  
[www.mdpi.org/sensors](http://www.mdpi.org/sensors)

*Full Research Paper*

## **Operational Mapping of Soil Moisture Using Synthetic Aperture Radar Data: Application to the Touch Basin (France)**

Nicolas Baghdadi <sup>1\*</sup>, Maelle Aubert <sup>1</sup>, Olivier Cerdan <sup>1</sup>, Laurent Franchistéguy <sup>2</sup>,  
Christian Viel <sup>3</sup>, Eric Martin <sup>2</sup>, Mehrez Zribi <sup>4</sup> and Jean François Desprats <sup>1</sup>

1 French Geological Survey (BRGM), BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2, France; Phone: +33 238643202, Fax: +33 238643689; E-mails: [maelleaubert@wanadoo.fr](mailto:maelleaubert@wanadoo.fr), [o.cerdan@brgm.fr](mailto:o.cerdan@brgm.fr), [jf.desprats@brgm.fr](mailto:jf.desprats@brgm.fr)

2 Météo-France, 42 avenue G. Coriolis, 31057 Toulouse Cedex, France;  
E-mails: [laurent.franchisteguy@meteo.fr](mailto:laurent.franchisteguy@meteo.fr), [Eric.Martin@meteo.fr](mailto:Eric.Martin@meteo.fr)

3 SCHAPI, 42 avenue Coriolis, 31057 Toulouse Cedex, France;  
E-mail: [Christian.VIEL@schapi.ecologie.gouv.fr](mailto:Christian.VIEL@schapi.ecologie.gouv.fr)

4 CETP/CNRS, 10/12, avenue de l'Europe, 78140 Velizy, France ; E-mail: [mehrez.zribi@cetp.ipsl.fr](mailto:mehrez.zribi@cetp.ipsl.fr)

\* Author to whom correspondence should be addressed. E-mail: [n.baghdadi@brgm.fr](mailto:n.baghdadi@brgm.fr).

*Received: 31 August 2007 / Accepted: 21 October 2007 / Published: 22 October 2007*

---

**Abstract:** Soil moisture is a key parameter in different environmental applications, such as hydrology and natural risk assessment. In this paper, surface soil moisture mapping was carried out over a basin in France using satellite synthetic aperture radar (SAR) images acquired in 2006 and 2007 by C-band (5.3 GHz) sensors. The comparison between soil moisture estimated from SAR data and *in situ* measurements

shows good agreement, with a mapping accuracy better than 3%. This result shows that the monitoring of soil moisture from SAR images is possible in operational phase. Moreover, moistures simulated by the operational Météo-France ISBA soil-vegetation-atmosphere transfer model in the SIM-Safran-ISBA-Modcou chain were compared to radar moisture estimates to validate its pertinence. The difference between ISBA simulations and radar estimates fluctuates between 0.4 and 10% (RMSE). The comparison between ISBA and gravimetric measurements of the 12 March 2007 shows a RMSE of about 6%. Generally, these results are very encouraging. Results show also that the soil moisture estimated from SAR images is not correlated with the textural units defined in the European Soil Geographical Database (SGDBE) at 1:1000000 scale. However, dependence was observed between texture maps and ISBA moisture. This dependence is induced by the use of the texture map as an input parameter in the ISBA model. Even if this parameter is very important for soil moisture estimations, radar results shown that the textural map scale at 1:1000000 is not appropriate to differentiate moistures zones.

**Keywords:** SAR sensors, soil moisture, ISBA model.

---

## 1. Introduction

Soil moisture plays a crucial role in the continental water cycle, more specifically in the distribution of precipitation between surface runoff and infiltration, which is the main driver behind most hydrological and geomorphologic processes [1-3]. The retrieval of soil moisture data is of considerable importance in various applications, such as hydrology, risk prediction, agriculture, and meteorology. It is a key indicator for constraining the initial conditions of infiltration/runoff rates when modeling overland flow. The knowledge of the initial water content at the beginning of the rainfall event is a prerequisite because all infiltration models integrate this information. In the context of implementing the Water Directive and the forthcoming Soil Framework Directive in Europe, there is a need for operational tools to evaluate land management scenarios and to provide sound references for targeting land use planning and the protection of natural resources. More specifically, operational services in charge of flood prevention and forecasting, such as the SCHAPI (National Flood Forecasting Agency) in France are investing in the continuous distributed modeling of soil surface moisture.

Only spatial remote sensing allows monitoring of environmental problems over large areas at regular intervals. Moreover, radar sensors allow mapping whatever the meteorological conditions (clouds, fog, etc.), both day and night. This is not the case with optical sensors, which are difficult to operate if there is cloud cover, a frequent situation in periods where flood events occur. The Soil Surface Characteristics (SSC) can be estimated from microwave remote sensing sensors due to the sensitivity of radar signal to soil characteristics such as the soil's roughness and dielectric constant [4-6]. In addition, the radar signal depends on various radar parameters such as the polarization, incidence angle and frequency.

The SAR sensors currently operational are PALSAR/ALOS, ASAR/ENVISAT, RADARSAT-1 and ERS-2. ERS-2 and RADARSAT-1 provide data based on a single polarization (VV for ERS-2, and HH for RADARSAT-1) whereas ASAR allows the scientific community to acquire images in dual-polarization mode (HH/HV, HH/VV, VV/VH). The radar incidence angle is 23° for

ERS-2, between 20° and 50° for RADARSAT-1, and ranges from 14° to 45° for ASAR. The nominal swath width for ASAR and ERS-2 is greater or equal to 100 km, with a spatial resolution of, at best, 25 m (12.5 m pixel size). For RADARSAT-1, the nominal swath width is greater than or equal to 50 km, with a spatial resolution of, at best, 10 m (6.25 m pixel size). These three radar sensors operating in C-band (~5.3 GHz), have been widely used for retrieving soil moisture [e.g. 4, 7-15]. The SAR data are more and more used to derive soil parameters. Although many improvements have been achieved, this field is still not fully operational.

When using ERS-1/2, RADARSAT-1 and ASAR, a better estimate of soil moisture is obtained with a radar configuration that minimizes the effects of other soil surface characteristics (mainly surface roughness). Several studies have shown that the best C-band estimates of soil moisture when using only one radar channel are obtained with SAR images acquired at low and medium incidence angles [13, 15, 16]. These optimal configurations of incidence angle ( $\leq 37^\circ$ ) can be attained with current SAR sensors (ERS-2, RADARSAT-1, ASAR, and ALOS) about 10 times per month on a study site in Europe. The arrival of new sensors (TerraSAR-X, COSMO-SkyMed, and RADARSAT-2) should improve this temporal frequency.

The use of two SAR images acquired at both low and high incidence angles markedly improves the precision of the moisture estimate because the backscattering coefficients ratio eliminates the effects of roughness and thus permits linking of the radar backscattering coefficients to only the moisture [13, 15, 16]. This solution is not possible with current SAR sensors and will not be possible either with the sensors planned for the near future (ALOS, RADARSAT-2 and Terra SAR-X). Indeed, the time separating two SAR images acquired by the same sensor at two selected incidence angles (20° and 40°) is of the order of a few days (about 7 days with ASAR over the Touch basin), which limits the use of this possibility because the soil surface characteristics could change rapidly between the two acquisitions. Only the single incidence case is thus possible. The use of SAR images with two polarizations (case of ASAR sensor) does not provide a significant improvement in estimating soil moisture (improvement <1%, [15, 17]) when compared with the results obtained with a single polarization.

Soil moisture can be measured (*in situ* or using remote sensors) and also modeled. *In situ* soil moisture measurements are performed using two techniques: TDR (Time Domain Reflectometry) probes and gravimetry. TDR measurements are quicker to carry out, but less precise than those stemming from the gravimetric method. A drift in TDR measurements is often observed, and it is for this reason that the calibration of probes by several gravimetric measurements is often recommended. In practice, the volumetric water content on a field scale is assumed to be equal to the mean value estimated from several representative samples collected from the top layer of soil.

Estimation of soil moisture by inversion of SAR data can be performed in using physical or semi-empirical approaches. The physical approach uses backscattering models capable of reproducing the radar backscattering coefficient from the sensor configuration (wavelength, polarization, and incidence angle) and soil parameters (soil moisture and surface roughness for bare soils). However, several studies have reported a poor agreement between measured radar signals and those predicted by the models [18-21]. Differences between simulations and measurements may reach several decibels, rendering the inversion results inaccurate. The second approach consists of establishing experimental calibration relationships linking the signal radar to soil parameters (surface roughness and soil moisture of bare soils) and to sensor parameters (frequency, polarization, and incidence). This approach requires an important experimental database, acquired from several study sites and representative of possible physical soil conditions. The validity of these relationships for use in operational mode depends

on the quality of the database and its representativeness. With current SAR sensors, the cartography in operational mode of the surface moisture of bare soils is carried out on images with one channel (one incidence and one polarization), which leads to the elaboration of experimental relationships between the signal radar and the soil moisture whatever the surface roughness [11, 15, 16]. Using this technology the precision on the prediction of soil surface moisture varies between 3 and 10 % of moisture depending on the incidence angle. Uncertainty analyses carried out with the Green and Ampt infiltration/runoff model showed that this degree of accuracy is adapted to the use of this kind of hydrological models [22].

Another approach for the estimation of soil moisture is to use a Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer model (SVAT). In this case, the SVAT is forced by analyzed or observed meteorological data to estimate mesoscale soil moisture over large areas. Such an approach is used within the SAFRAN-ISBA-MODCOU chain in France, which is composed of a meteorological analysis system (SAFRAN), a SVAT (ISBA) and a hydrological model (MODCOU, [23]). This system is able to simulate the water and energy budget at the surface, the soil moisture and the discharge of the main French rivers. It is run on an operational mode to evaluate the soil moisture at the scale of France. The typical scale of application of the SAFRAN-ISBA-MODCOU model is 8 km x 8 km over all of France. A comparison with satellite data is of great interest to validate the variables simulated by the system.

The objective of the present paper is to test the applicability of experimental relationships established between the C-band radar backscattering coefficient (ERS-2, RADARSAT-1, and ASAR sensors) and the soil moisture from a great experimental database collected between 1995 and 2005 at several study sites. Next, in the soil moisture mapping process, these relationships will be inverted and applied to ERS-2 and ASAR images, acquired in 2006 and 2007 over the Touch catchment basin (located near Toulouse in France) to provide additional key indicators to improve flood forecasting over the Touch catchment basin. The correlation between textural units and soil moisture will also be studied. Moreover, the soil moisture maps estimated from SAR images will be compared with simulations obtained by the ISBA soil-vegetation-atmosphere transfer model. This model, developed by Météo-France models the main surface processes and is currently coupled to atmospheric prediction model. As the soil moisture is prognostic variable of ISBA, it is thus necessary to quantify its quality. Soil moisture *in situ* data, measured by gravimetry, will be used to validate obtained results. Given that the presence of dense and high vegetation cover prevents C-band radar signal (wavelength ~ 6 cm) from reaching the ground, the soil moisture mapping from ERS and ASAR sensors is focused on bare soils or zones with little vegetation cover.

## 2. Description of Databases

### 2.1. Database 1995-2005

An extensive experimental database collected at seven study sites was used for building relationships between radar backscattering coefficient and soil moisture. This database is composed of SAR images acquired between 1995 and 2005, and *in situ* soil moisture measurements (bare soils only) carried out jointly with radar acquisitions:

- Touch site, near Toulouse, France (long. 01°02' E, lat. 43°27' N). Soil composition is about 55% silt, 21% clay, and 24% sand. Data were acquired in 2004 and 2005.
- Villamblain site, near Orléans, France (long. 01°34' E, lat. 48°00' N). Soils composed of about 60% silt, 30% clay, and 10% sand. Data were acquired in 2003, 2004, and 2005.

- Châteauguay site, near Montreal, Canada (long. 73°46' W, lat. 45°19' N). Soil composition at both sites is about 42% silt, 36% clay, and 20% sand. Fieldwork was carried out in 1999.
- Brochets site, near Montreal, Canada (long. 72°54' W, lat. 45°08' N). Soil composition at both sites is about 42% silt, 36% clay, and 20% sand. Fieldwork was carried out in 1999.
- Alpilles site, Rhône valley, France (long. 4°45' E, lat. 43°47' N). Soil composition is 54% silt, 40% clay, and 6% sand. Fieldwork was carried out in 1997.
- Orgeval site, near Paris, France (long. 3°07' E, lat. 48°51' N). Soil composition is about 78% silt, 17% clay, and 5% sand. Fieldwork was carried out in 1995 to measure soil moisture and surface roughness.
- Pays de Caux site, Normandy, France (long. 0°50' W, lat. 49°47' N). Soil composition is approximately 67% silt, 13% clay, and 17% sand. Fieldwork was carried out in 1994, 1998, and 1999 to measure soil moisture and surface roughness.

These sites are characterized by agricultural fields intended for growing wheat and corn. The measurements of volumetric soil moisture have been carried out on the first top 10 cm using two techniques: a TDR probe and gravimetry. The soil moisture ranges from 5.4% to 47.3%. SAR images used were acquired by ERS-2, RADARSAT-1 and ASAR, with a great range of incidence angles (20° to 48°), and at HH/HV/VV polarizations.

The database available for this study consists of about 400 doublets of backscattering coefficients and soil moisture. Each point of this database corresponds to the mean radar signal over a reference plot and the corresponding *in situ* soil moisture. The reference plots were chosen with a low local topography (generally flat).

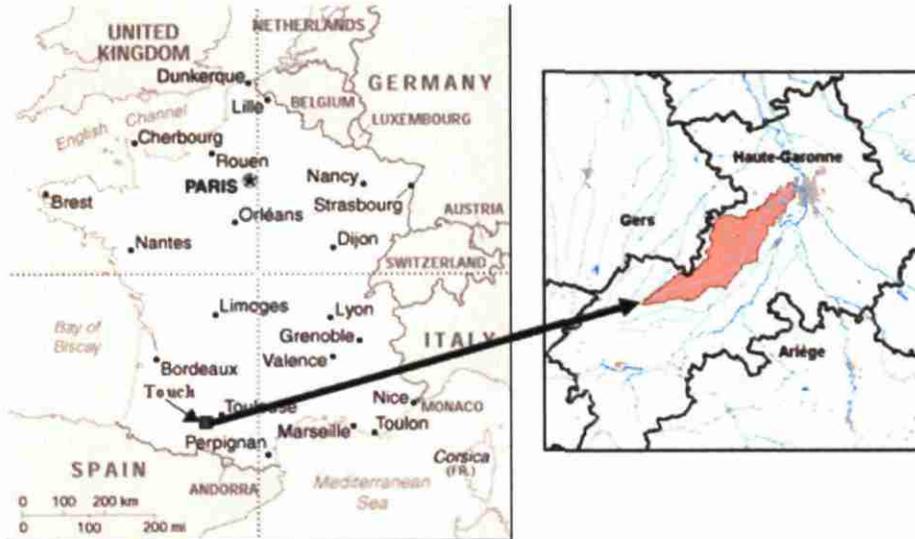
Soil roughness measurements were also carried out, using a 1 or 2 m long profilometer with a 1 or 2 cm sampling interval (pinmeter or laser). For radar applications, the surface roughness of a given bare soil is defined statistically by two variables, determined from the surface height profiles: the standard deviation of surface height (*rms*), which specifies the vertical scale of the roughness, and the correlation length (*L*), representing the horizontal scale. The *rms* values vary in our database between 0.25 cm and 5.29 cm; the lowest ones correspond mainly to sown fields and the highest ones to ploughed fields. The correlation length ranges from 2 to 20 cm for 95% of measurements. Recent investigations have indicated that roughness variables estimated on the basis of field measurement data and simulations are very sensitive to profile length [e.g. 24-26]. The limited length of conventional profilers (one or two metres long) leads to large uncertainties in the estimated roughness variables. In a theoretical study based on simulated profiles, Oh and Kay [24] demonstrated that in order to measure *rms* surface height and correlation length with a precision of  $\pm 5\%$  of their mean values, the length of the roughness profiles had to be at least  $100L$  and  $270L$  respectively. Measurement precision can be improved by averaging multiple profiles. For a correlation length that ranges from 2 to 20 cm, and for 10 averaged profiles, we deduce that the 2 m profiles provide a precision better than  $\pm 5\%$  for *rms* surface height and between  $\pm 5\%$  and  $\pm 15\%$  for correlation length. At 1 m profile length, the precision can reach 10% for *rms* height and 20% for correlation length.

## 2.2. Database 2006-2007

### Study site

Our study site is the Touch catchment basin, located at the south-west of Toulouse in France (latitude: 43°17' N to 43°37' N, longitude: 0°48' E to 01°24' E; Figure 1). It covers a total area of about 500 km<sup>2</sup>. The site is composed mainly of agricultural fields intended for growing wheat and corn. It is flat or slightly undulated with altitudes varying between 135 and 377 m. The Touch basin was selected as it is a site representative of the region where several catchments suffer from excessive runoff due to the conjunction of fragile soils and intensive agricultural practices, responsible for many damages. It is now selected as reference basin for several official authorities of flood forecasting and prevention, such as DIREN (Regional Direction of the Environment) and SCHAPI (National Flood Forecasting Agency).

Figure 1 . Location of Touch basin.



### Radar and optical images

Images used in this study were acquired by the ERS-2 and ASAR SARs between 08 March 2006 and 12 March 2007. Fifteen ASAR images and three ERS-2 images were obtained with incidence angles between  $18^\circ$  and  $44^\circ$ , and at HH/VV/VH polarizations (Table 1). Optical images obtained from SPOT and ASTER sensors were also used to allow a reliable mapping of bare soils. Before analyzing the SAR images, the data were radiometrically calibrated, which enables extraction of the backscattering coefficient ( $\sigma^\circ$ ) from the signal intensity of each pixel (BestW software, [27]). The radiometric calibration of SAR images allows converting the raw digital numbers (DN) to backscattering coefficients ( $\sigma^\circ$ ):

$$\sigma^\circ = \frac{DN^2 \sin \theta}{K} \quad (1)$$

where  $\theta$  is the radar incidence angle, and  $K$  the calibration constant given in the image header. The backscattering coefficients are then expressed in decibels (dB):

$$\sigma^\circ_{dB} = 10 \log_{10}(\sigma^\circ) \quad (2)$$

This calibration makes it possible to carry out multi-temporal analysis of different images (with same incidence and polarization). All SAR and optical images were then georeferenced using topographic maps with a root mean square error of the control points of about 30 m. The registration error of SAR images is taken into account by selecting areas of interest (AOI) within each training site and the border pixels were removed (defined by GPS control points).

Speckle noise, due to the coherent interference of waves reflected from many elementary scatterers, is present on SAR images and makes the pixel-by-pixel interpretation of SAR images extremely difficult. This explains why the estimation of soil characteristics is generally carried

out on homogeneous sectors with several pixels or at field scale (which helps reducing speckle). In practice, the mean backscattering coefficients are calculated from calibrated SAR images by averaging the linear  $\sigma^0$  values of all pixels within the field (or sub-field). A reduction in speckle and an improvement in the quality of our estimations are highly dependent on the size of the fields [e.g. 28, 29]. Consequently, parcels with a homogeneous surface of 200 pixels or more are often used to study the behaviour of the signal as a function of SSC. In the case of ERS and ASAR sensors, this corresponds to fields of around two hectares or more.

## ISBA data

The soil moistures simulated by the ISBA (Interactions between Soil Biosphere and Atmosphere) SVAT [30, 31] were also used. The simulations were compared to the soil moistures estimated from SAR images and measured by gravimetry on March 12, 2007. ISBA is a SVAT designed to run in stand alone mode or in atmospheric models. The version used in the SAFRAN-ISBA-MODCOU is the force restore version of ISBA. The temperature evolution is described using two temperatures (surface temperature and deep soil). Three layers are used to describe the hydrological processes: the surface layer (one centimeter), the root zone layer (~1.50 m, depending of the vegetation type in the grid), the sub-root zone (usually down to 2 m below the surface). The hydrological processes which influence the liquid water content of the surface layer are precipitation (except the part intercepted by the vegetation) and evaporation from bare ground. In addition, it is relaxed to an equilibrium value which account for the balance between gravity and capillary forces (this value depends on the soil texture). The second layer accounts for the root depth zone. It is in relation with the surface layer via the relaxation term and with the sub-root zone via the gravitational drainage and the diffusion term (capillary versus gravitational drainage). The surface runoff occurs on the saturated part of the ISBA grid, which depends on the root zone wetness. It is calculated using the Variable infiltration capacity scheme [23]. Since the purpose of this study was to depict the state of surface moisture, only the surface level soil moisture was used in this study. For temperature, a force restore approach is used. The soil and vegetation parameters are derived from the ECOCLIMAP database [32] and from textural information (clay and sand fractions).

The surface water and energy budget were calculated by ISBA using the SAFRAN [33, 34] meteorological data as input. SAFRAN used meteorological model outputs and meteorological observations to derive the variables used to force ISBA (near surface air temperature, wind and humidity, precipitation and incoming long wave and short wave radiation). The analysis is produced for climatologically homogeneous regions (approximately 30 km x 30 km), then interpolated on the 8 km x 8 km grid used to run ISBA. The data used in this paper are the data produced on an operational mode by Météo-France and used for soil moisture and drought monitoring.

It is important to underline that in this study the radar soil moisture estimates are obtained exclusively for bare soils or for soils with little vegetation, whereas ISBA simulations are carried out whatever the landuse (bare soils, forest, cultures ...). A preliminary study has shown the absence of correlation between the ISBA moisture values and the percentage of bare soil in ISBA grids. Comparisons between radar moisture estimated on only bare soil and ISBA moisture calculated on 8 km x 8 km grids regardless of land use can therefore be carried out.

**Table 1.** Main characteristics of SAR images used for soil moisture mapping. Images are acquired over the Touch basin in 2006-2007. For each SAR date, there are the optical images used for mapping bare soils. 33 gravimetric measurements were performed on March 12, 2007.

Date (dd/mm/yy)	SAR sensor	Acquisition Time (TU)	Polarization	Incidence angle	Optical image Date	Percentage of bare soil
12/03/2007	ASAR	10 :13	VV , VH	IS2 : 23°	SPOT 15/02/2007	10.9
17/01/2007	ASAR	10 :10	VV , VH	IS3 : 28°	SPOT 15/02/2007	19.9
07/01/2007	ASAR	21 :43	VV , VH	IS3 : 28°	SPOT 15/02/2007	19.9
04/01/2007	ASAR	10 :13	VV , VH	IS2 : 23°	SPOT 15/02/2007	19.9
01/01/2007	ASAR	10 :13	VV , VH	IS2 : 23°	SPOT 15/02/2007	19.9
14/08/2006	ERS-2	10 :42	VV	23°	ASTER 01/07/2006	20.9
10/07/2006	ERS-2	10 :42	VV	23°	ASTER 01/07/2006	20.9
15/04/2006	ASAR	21 :34	VV , HH	IS1 : 18°	SPOT 07/04/2006	16.1
15/04/2006	ASAR	10 :16	VV , HH	IS1 : 18°	SPOT 07/04/2006	16.1
12/04/2006	ASAR	10 :10	VV , HH	IS3 : 28°	SPOT 07/04/2006	16.1
02/04/2006	ASAR	21 :43	VV , HH	IS3 : 28°	SPOT 07/04/2006	16.1
30/03/2006	ASAR	10 :19	VV , HH	IS1 : 18°	SPOT 07/04/2006	8.7
27/03/2006	ERS-2	10 :42	VV	23°	SPOT 07/04/2006	16.0
18/03/2006	ASAR	09 :56	VV , HH	IS7 : 44°	SPOT 15/03/2006	24.1
17/03/2006	ASAR	21 :45	VV , HH	IS4 : 33°	SPOT 15/03/2006	24.1
11/03/2006	ASAR	21 :34	VV , HH	IS1 : 18°	SPOT 15/03/2006	24.1
11/03/2006	ASAR	10 :16	VV , HH	IS1 : 18°	SPOT 15/03/2006	24.1
08/03/2006	ASAR	10 :10	VV , HH	IS3 : 28°	SPOT 15/03/2006	24.1

### In situ measurements

Simultaneously with the acquisition of the SAR image of 12 March 2007, true ground measurements of soil moisture were performed on several test fields. Gravimetric moisture measurements on 33 test fields of bare soil well distributed on the whole of the catchment basin within  $\pm 3$  h of the SAR overpass were carried out. Gravimetric measurements were carried out on the upper 0-10cm soil layer because the radar signal penetration depth is only of few centimetres at C-band [e.g. 5, 35]. The soil moisture on a field scale is assumed to be equal to the mean value estimated from 5 samples collected from the top layer of soil. The gravimetric soil moisture content is then transformed into volumetric moisture content by multiplying it by the bulk density of the soil. The volumetric soil moisture measurements range from 19.4% to 32.6% (standard deviation on the field scale about  $\pm 3\%$ ), and the soil bulk density ranges from 0.9 g/cm<sup>3</sup> to 1.6 g/cm<sup>3</sup> (standard deviation on the field scale about  $\pm 0.15$  g/cm<sup>3</sup>). During the ground campaign of 12 March 2007, the surface roughness of test fields varied from smooth (wheat and

corn sown fields) to rough (ploughed fields). No roughness measurement was taken on March 12, 2007.

The lack of in situ moisture data encourages the analysis of radar and ISBA moistures using climatic and pedologic factors. For climatic factors, daily precipitation and temperature data recorded on six meteorological stations installed on the basin (Toulouse Blagnac, Toulouse Francazal, Fabas, La Bastidette, Lhern, and Rieumes) were used. Concerning pedologic factors, soil texture was used as its influence on soil moisture has already been demonstrated in numerous studies [36]. Other pedological factors are usually used to determine moisture, as organic carbon content, density, and depth of root zone [37, 38]. These factors were not considered in this study because they show little variation within the basin.

### Textural map

The textural map of the Touch basin, extracted from the Europe map at 1:1000000, has been thus used (Soil Geographical Database of Europe, SGBDE, [39]). This database contains information on soil texture (Figure 2) and it was possible to define four textural units on the Touch basin. The South-western part of the basin is mainly composed of clayey material. In the center of the basin, the majority formation is the clayey-sandy soils. Silty soils are primarily present in the North-East of the catchment.

## 3. Soil moisture mapping

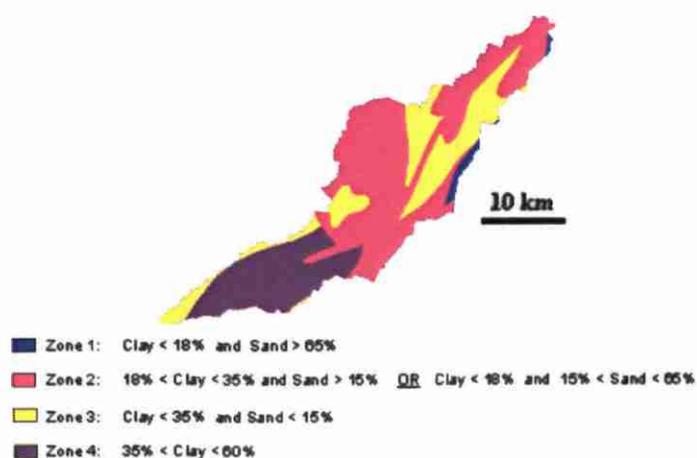
### 3.1. Relationship between radar signal and soil moisture

For bare soils, the radar backscattering coefficient in decibels can be written as the sum of two functions : the first one,  $f$  (linear), describes the dependence of radar signal on volumetric surface soil moisture, while the second,  $g$  (exponential), illustrates the dependence of  $\sigma^0$  on surface roughness [13, 15]:

$$\sigma_{dB}^0 = a m_v + b e^{-krms} + c \quad (3)$$

where  $k$  is the wave number ( $\approx 1.11 \text{ cm}^{-1}$  for C-band), and  $rms$  is the root mean square surface height (characteristic parameter of surface roughness). For a given radar wavelength, the coefficients  $a$ ,  $b$ , and  $c$  are observed to be dependent on both radar incidence angle and polarization [15, 16, 17]. In this equation, the correlation length is not taken into account.

**Figure 2.** Soil textural zones of the Touch catchment defined according to the 1:1000000 Soil Geographical database.



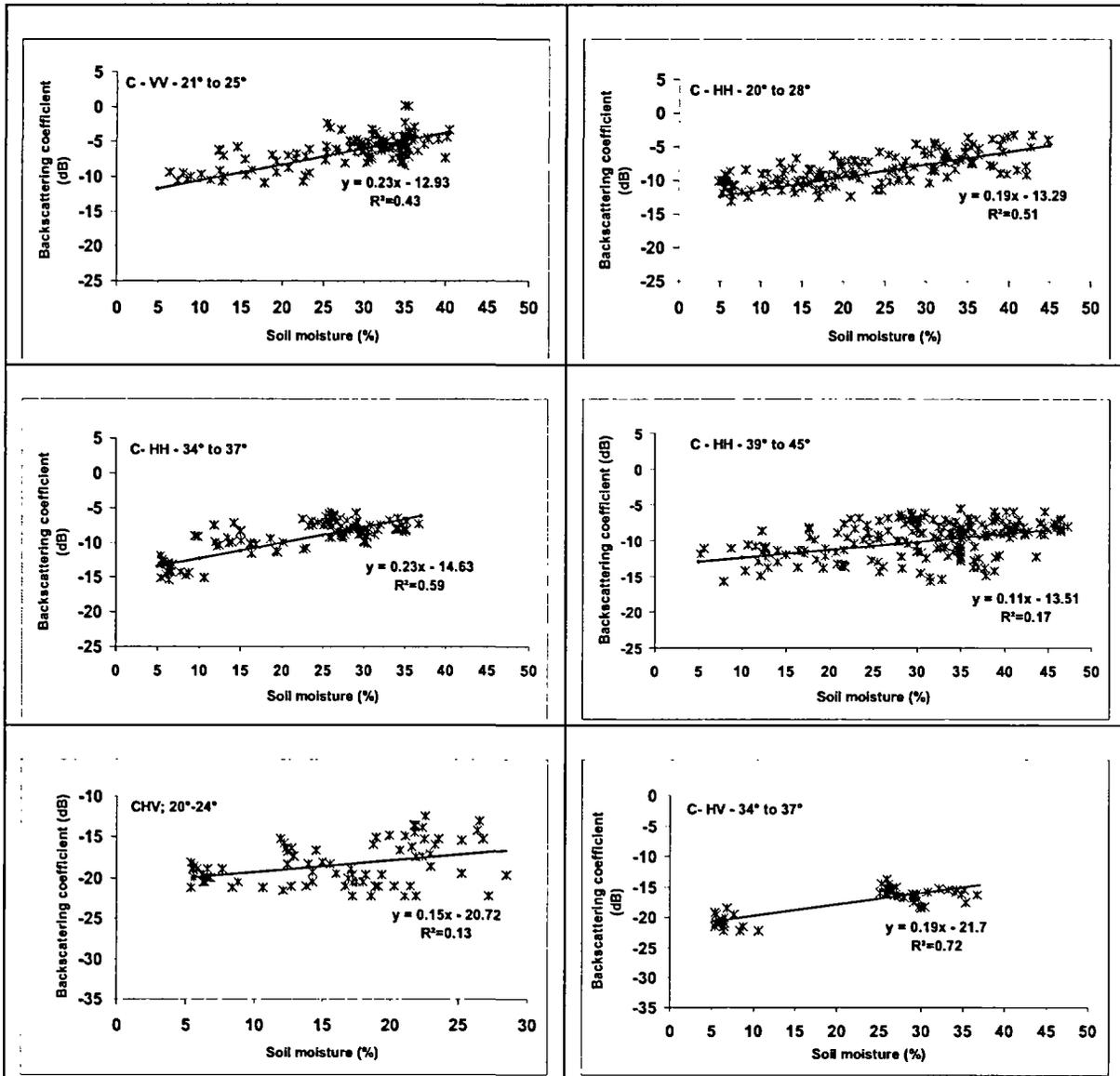
To retrieve soil moisture ( $m_v$ ) from a single radar configuration, it is necessary to establish a relationship between the radar backscattering coefficient ( $\sigma^0$ ) and  $m_v$  alone, without having any knowledge of the rms surface height. As a first approximation, the radar backscattering coefficient (in dB) may be expressed as follows [15, 40]:

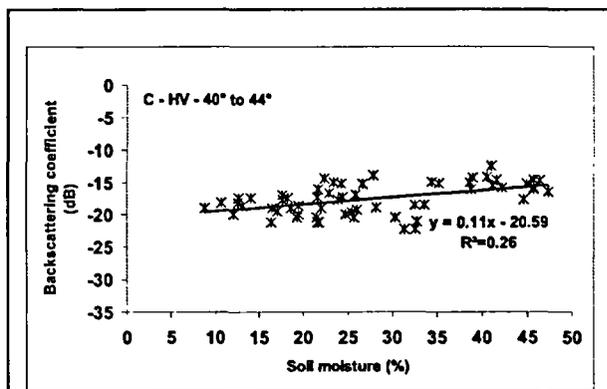
$$\sigma_{dB}^0 = a m_v + d \quad (4)$$

This simplified relationship ignores the surface roughness. The coefficient  $a$  is dependent on both incidence angle and polarization. The coefficient  $d$  is primarily controlled by incidence angle, polarization and surface roughness. However, the coefficients describing the linear relationship between radar signal and soil moisture can be different from one catchment to another and also from one year to the next, and sometimes need to be calibrated. This difference is mainly due to the effects of roughness variation [41].

The coefficients  $a$  and  $d$  of the equation (4) were calculated using the database of 1995-2005 for 7 radar configurations defined by one polarization and a range of incidence angle (Figure 3): (VV 21°-25°), (HH 20°-28°), (HH 34°-37°), (HH 39°-45°), (HV 20°-24°), (HV 34°-37°), and (HV 40°-44°). These coefficients were established for radar configurations in C-band, as a function of polarization and incidence angle, regardless of soil roughness. They are valid only for the same ranges of soil texture and surface roughness. The large database acquired over the last twelve years from study sites in France and Canada shows that the sensitivity of the radar signal to soil moisture is important for low and medium incidence angles ( $\leq 37^\circ$ ). The sensitivity of radar signal to soil moisture is slightly different with polarization (for low incidences, 0.23 dB/% in VV compared to 0.19dB/% in HH and 0.15 dB/% in HV). It is of the same order of magnitude for incidences between 20° and 37° (between 0.19 dB/% for HH20°-28° and 0.23 dB/% for HH 34°-37°) and seems to decrease for incidences greater than 39° (0.11 dB/%). These results therefore show that moisture mapping is optimal at low and medium incidences ( $\leq 37^\circ$ ).

**Figure 3.** Sensitivity of radar signal in C-band (~5.6 GHz) to surface soil Moisture as a function of incidence angle and polarization. Results were obtained from ERS, RADARSAT-1 and ASAR data for clay loam sites (silt: 42 to 78%, clay: 13 to 40%, sand: 5 to 24%). Each point corresponds to the average backscattering coefficient in decibels for one test field.





These results are comparable with the observed sensitivities by various studies [11, 16, 17, 42]. Next, the inversion procedure was applied to the database of 2006-2007 for the estimation of soil moisture. The validity of this procedure was verified by comparing the inversion output with experimental data of soil moisture.

### 3.2. Methodology

Based on single SAR images (one polarization and one incidence), a simple procedure was used for mapping the surface soil moisture over bare soils [equation (4)]. The mapping of soil moisture was carried out on the Touch catchment using SAR data acquired in 2006 and 2007. For each SAR image, the relationship  $\sigma^{\circ}$  dB(mv) corresponding to the same radar configuration (incidence and polarization) was used (equation (4), Figure 3). All images were used, even those which correspond to low sensitivities of radar signal to soil moisture (18 March 2006 – IS7), except the VV-33° and VV-44° configurations because the relationships between  $\sigma^{\circ}$  and mv could not be established for lack of data. Three soil moisture mapping scales estimates were carried out: an estimate for each ISBA cell (8 km x 8 km), an estimate for each textural unit, and an average estimate on the basin. For each SAR image, the bare soils map used corresponds to the one obtaining from the nearest optical image (SPOT and ASTER). The surface of bare soil covered between 8.7% (30 March 2006) and 24.1% (08 to 18 March 2006) of the basin's total area (cf. Table 1).

For mapping soil moisture on the ISBA grid (8 km x 8 km), the basin was divided into contiguous windows before calculating the mean backscattering coefficient on the whole of bare soil pixels of each cell. For the mapping according to textural units, the mean radar signal is calculated for each textural unit (Figure 2). The estimation of mean soil moisture on the scale of catchment basin uses the mean backscattering coefficient of all bare soils pixels present on the basin. Finally, soil moisture estimates are obtained by inverting the relationship between radar signal and the soil moisture [equation (4)]. The gravimetric soil moisture on ISBA grid scale is assumed to be equal to the mean value of all gravimetric measurements carried out in each grid. On the scale of catchment basin, the gravimetric soil moisture is obtained in averaging all in situ measurements.

The inversion performance of radar signal for retrieving soil moisture is evaluated to show the robustness of the presented technique. The ground truth measurements of soil moisture carried out the March 12, 2007 allow comparing effectively estimated soil moisture by SAR image and observed soil moisture. As suggested by Willmott [43], three statistical indexes were used:

Mean Absolute Error:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Pi - Oi| \quad (5)$$

Root Mean Square Error:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Pi - Oi)^2} \quad (6)$$

Index of agreement:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Pi - Oi)^2}{\sum_{i=1}^N \left( \left| Pi - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Oi \right| + \left| Oi - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Oi \right| \right)^2}, \quad 0 \leq d \leq 1 \quad (7)$$

where P is the field or simulated variable, O the estimated variable, and N the data number. MAE and RMSE are expressed in %, while d is dimensionless.

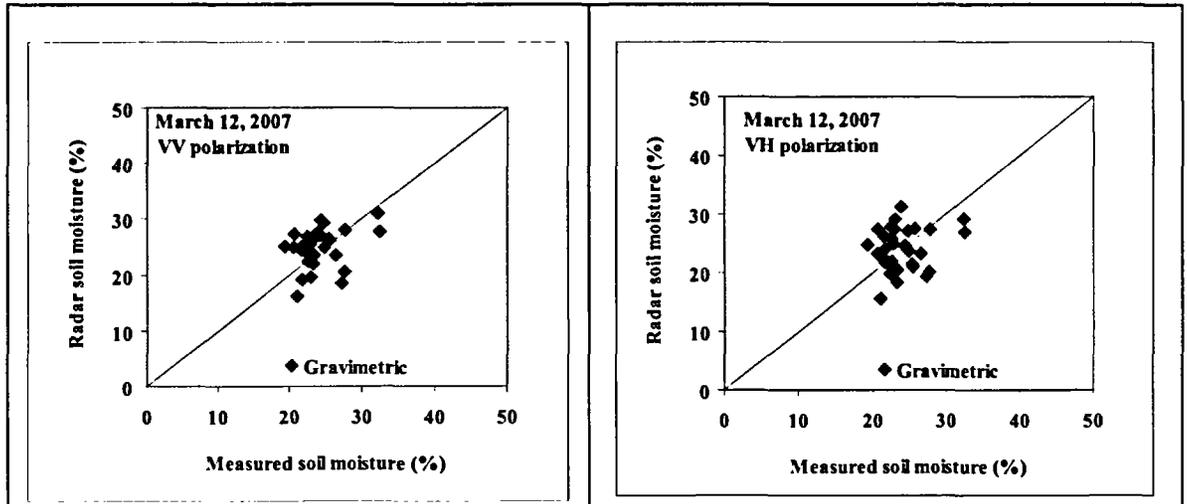
### 3.3. Results and discussion

#### Comparison between radar estimates and gravimetric data

The comparison between soil moistures estimated from SAR images of March 12, 2007 and gravimetric moistures shows a good agreement between estimated and measured soil moistures, with a bias about 2% and a RMSE of the order of 3% (Figure 4, Table 2). VV and VH polarizations give similar performances. According to the radiometric accuracy of ASAR and ERS sensors, typically of  $\pm 1$ dB, the accuracy on the soil moisture estimation will be about  $\pm 5\%$  (for a sensitivity of radar signal to soil moisture of 0.20 dB/%). This value is consistent with results presented in Table 2. The relationships between radar signal and soil moisture are then robust and can be used in the mapping process of soil moisture.

Figure 5 shows the procedure applied for soil moisture mapping on the SAR image acquired the 12 March 2007 (VV polarization; incidence angle  $\sim 23^\circ$ ). The map of bare soils was recognized by SPOT 5 image acquired the 15 February 2007. The soil moisture estimated was next compared to in situ soil moisture measurements.

**Figure 4.** Comparison between soil moisture estimated by ASAR image acquired the March 12, 2007 and soil moisture measured by gravimetry (at the field scale).  
Bias "Radar-Gravimetry"=0.34%; standard deviation=3.78%;  
MAE=3.06%; RMSE=3.74%; d=0.58.



**Table 2. Comparison between soil moistures measured by gravimetry, simulated by ISBA model, and estimated from ASAR images of March 12, 2007 (scale of ISBA grids). "RadMean" corresponds to radar soil moisture obtained by the mean estimate of VV and VH polarizations.**

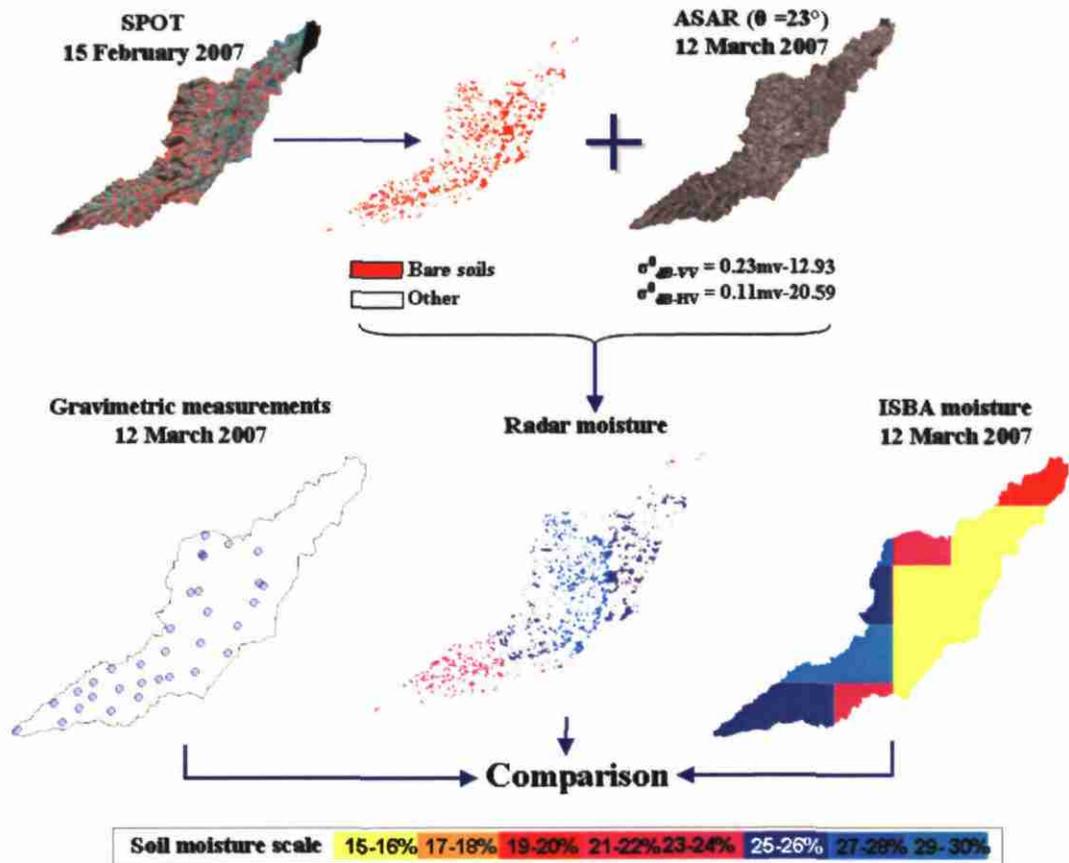
Id ISBA grid	Measured soil moisture by gravimetry (%)		Rad <sup>VV</sup> – Gravi	Rad <sup>VH</sup> – Gravi	Rad <sup>Mean</sup> – Gravi	ISBA – Gravi	Rad <sup>Mean</sup> – ISBA
	Test field number	Mean <i>mv</i>					
19727	-	-	-	-	-	-	6.75
19728	-	-	-	-	-	-	4.51
19899	-	-	-	-	-	-	-1.77
19900	4	23.2	3.66	4.02	3.84	0	3.84
19901	1	19.35	7.14	6.56	6.85	-4.25	11.10
19902	-	-	-	-	-	-	10.58
20073	-	-	-	-	-	-	0.77
20074	3	25.72	1.82	0.53	1.17	-10.02	11.19
20075	3	22.67	2.81	1.62	2.21	-7.67	9.88
20246	1	24.93	-1.08	-1.2	-1.14	4.57	-5.71
20247	5	26.88	-1.5	-2.11	-1.80	3.02	-4.82
20248	4	25.32	2.28	1.03	1.65	-9.12	10.77
20249	-	-	-	-	-	-	10.27
20419	3	21.29	3.02	3.67	3.35	3.91	-0.56
20420	6	23.7	0.07	-0.27	-0.10	3.1	-3.20
20421	2	22.24	2.01	2.35	2.18	1.76	0.42
20422	-	-	-	-	-	-	10.70
<b>Bias</b>			<b>2.42</b>	<b>1.62</b>	<b>1.82</b>	<b>-1.47</b>	<b>4.40</b>
<b>Standard deviation</b>			<b>2.31</b>	<b>2.62</b>	<b>2.54</b>	<b>5.74</b>	<b>6.21</b>
<b>MAE</b>			<b>1.55</b>	<b>2.02</b>	<b>1.86</b>	<b>5.03</b>	<b>5.43</b>
<b>RMSE</b>			<b>3.25</b>	<b>2.97</b>	<b>3.02</b>	<b>5.64</b>	<b>7.46</b>
<b>d</b>			<b>0.49</b>	<b>0.41</b>	<b>0.46</b>	<b>0.48</b>	<b>0.39</b>

### Analysis of ISBA simulations

ISBA moisture values were analyzed spatially according to the ISBA grid (Figures 6a and 6b). For very wet soil conditions (approximately 35%), the soil moistures simulated by ISBA show a maximum variation between ISBA cells of about 8%. For moistures about 25%, the ISBA moistures vary strongly between grids to reach 15%. For low moistures (approximately 15%), the maximum variation between grids is about

5% except for January 04, 2007 where a strong difference between some grids is observed (about 23%). Indeed, for January 04, 2007, ISBA simulates curiously low moistures on grids 20419, 20420 and 20421 (moistures 5% approximately whereas the other grids are about 20%). These comparisons are made at radar acquisition time (T\_radar). Only ISBA moistures obtained by the average of ISBA simulations over all the day of January 04 showed moisture values of the same order for all grids. The three grids having an atypical behavior (20419 to 20421) are located in the SW part of the catchment basin.

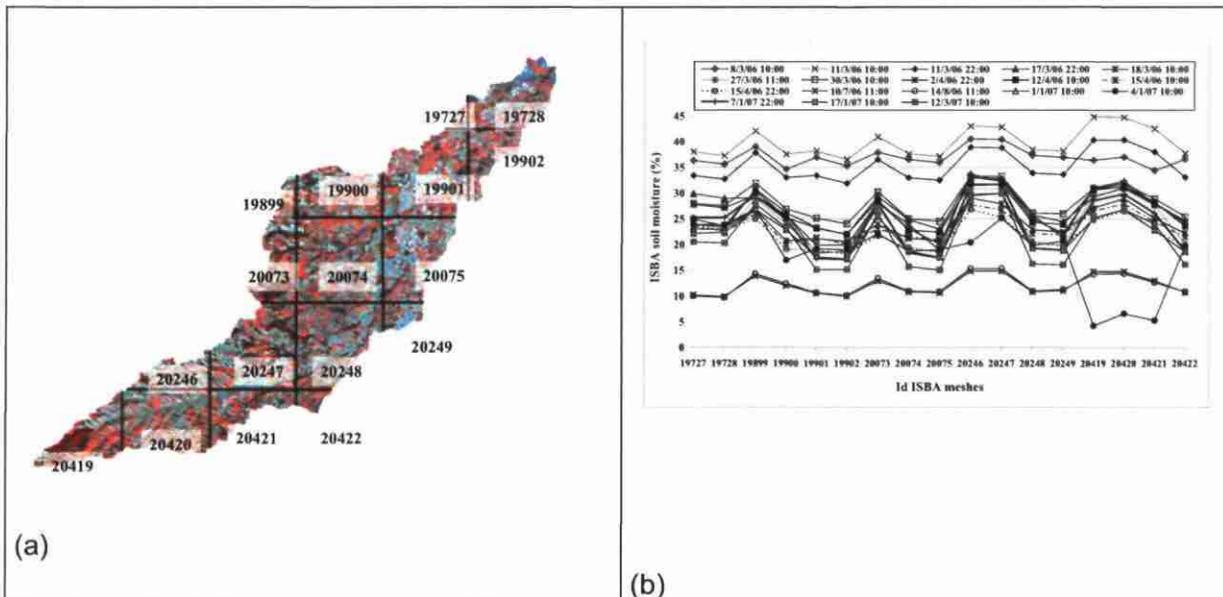
**Figure 5.** Procedure for mapping soil moisture from SAR images. Optical images are used for bare soils mapping. Radar soil moisture is estimated only over bare soils. The class denominated "other" includes forests, soils covered with vegetation, etc. For the date of March 12, 2007 a comparison between radar soil moisture, in situ soil moisture measurements (gravimetric measurements), and ISBA simulations is realized.



The precipitations measured in the basin by the six meteorological stations show that it rained as much in December on the various stations. Indeed, the total amount of rainfall over December varies from 26 to 37 mm according to station. The nearest station to the three grids (20419 to 20421), located at the SW of the basin (Fabas station), had recorded a total amount

of rainfall over December about 35 mm, while the station located at the centre of the basin (Rieumes station) indicated approximately 37 mm. The analysis of precipitations over the period January 01-04, 2007 shows a total rainfall which varied between 04 and 11 mm, according to stations, with a total rainfall of 7 mm on the Fabas station (situated to the SW of basin). Moreover, according to meteorological stations and Safran previsions, there no was rain on January 04, 2007 in the basin before the acquisition time of the radar image (10 h). In conclusion, the precipitations data measured on the stations do not explain the atypical behavior of ISBA model on January 04, 2007 on the 3 grids (20419 to 20421). The analysis of ISBA input parameters for January 04, 2007 at 10 h (T\_radar) shows that the soil was frozen. Freezing was much more marked on the three grids 20419 to 20421 than on the other grids because they are in another meteorological zone. By adding the frozen bulk soil water content, the total soil water content in the superficial reservoir becomes about 35% on the three grids 20419 to 20421. With the use of the total soil water content instead of the liquid soil water content only, the difference between radar and ISBA moistures becomes lower than 5%.

**Figure 6.** Comparison between radar estimations and ISBA simulations for each ISBA grid (grids size 8km x 8km). (a) Id ISBA grids, (b) ISBA simulations, (c) Radar estimations, and (d) Difference (Radar – ISBA). The standard deviation of radar moisture values estimated on ISBA grid scale varies between 3% and 6% except for March 18, 2006 where the standard deviation varies between 5% and 9%.



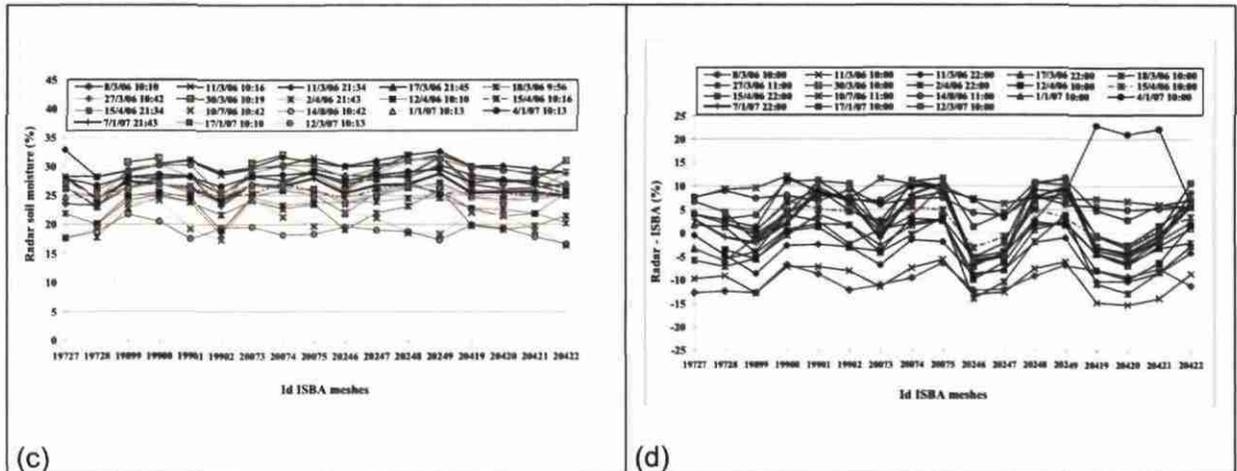


Figure 6b shows also that moistures simulated by ISBA are distributed according to two groups. Indeed, cells located at the North-East of the basin correspond to ISBA moistures lower than those of other cells. Moreover, moistures of each group are similar for a given date (variation inter group inferior to 5%). The comparison between ISBA simulations and textural map (Figure 2) shows that ISBA moistures are correlated with the soils texture, due to the fact that infiltration and runoff processes are driven in ISBA by the texture characteristics of the soil.

### Comparison between ISBA and radar moistures

The radar moisture estimation was aggregated to produce moisture estimation for each ISBA cell. It shows that the maximum variations between grids are of 7% (18 March 2006, Figure 6c) for the radar, while they are around 15% with the ISBA model. For radar acquisitions dates (March 2006 to March 2007), the moisture estimated by radar on ISBA cells shows values ranging from 17% to 33%, whereas ISBA simulations varied between 10 and 45%. The comparison carried out between radar and ISBA soil moistures in using the same ISBA cells show that the difference between radar and ISBA moistures vary from -15% to +12%, except for January 04, 2007 where the difference reaches 23% (Figure 6d). Results show also that ISBA simulations averaged on the basin are well comparables to radar estimates with a mean difference lower than 5% for 12 dates among the 18 examined dates. For the six remaining dates, differences between 5% and 10% are observed (Figure 7).

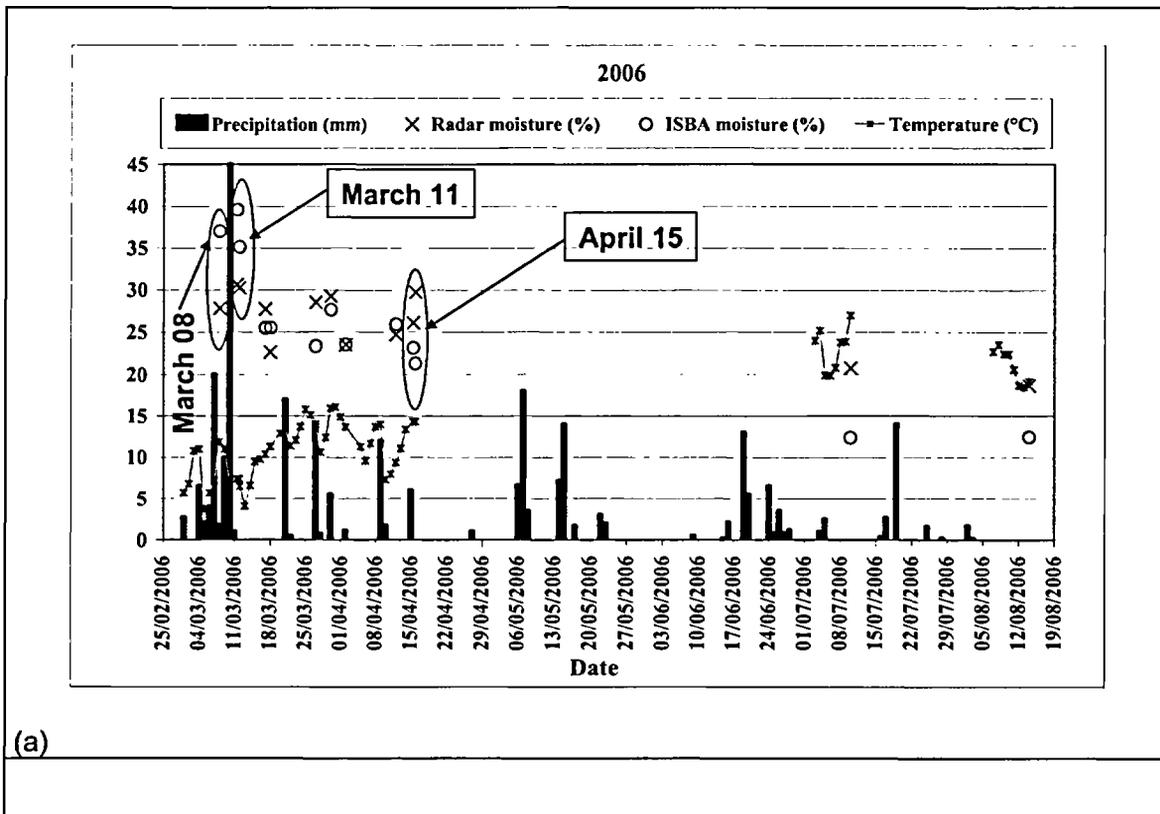
### Correlation analysis between precipitations and soil moistures (ISBA and radar)

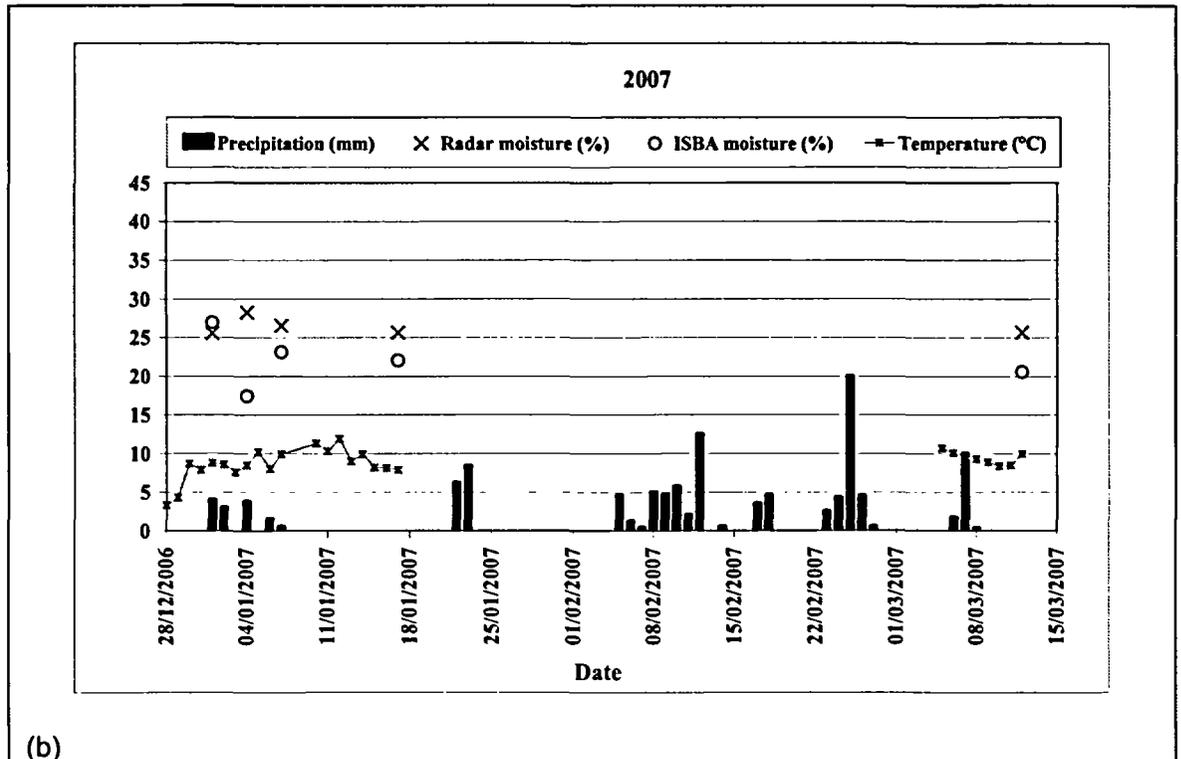
The lack of in situ moisture data on the basin at the time of radar acquisitions (except for March 12, 2007) encouraged the analysis of radar moistures according to daily precipitations. Precipitations were given by six stations installed in the basin. Figure 7 shows the temporal variation of soil moisture estimated by SAR sensors between March 08, 2006 and March 12, 2007. This variation correlated with precipitations, which confirms that radar estimates are qualitatively coherent. For example, after important precipitations on March 10, 2006 (45 mm) the radar soil moisture increased from 28% on March 08, 2006 to 31% on March 11, 2006. From March 11, 2006 the radar soil moisture starts to decrease to reach 23% on March 18, 2006. This tendency is completely coherent because there no were precipitations between these two dates and the soil has thus dried. A good correlation between radar moisture and precipitations is also observed on the database of 2007. The radar moisture increased from 26% on January 01 to 28% on January 04, and decreases then to 27% on January 07, 2007. This behavior is coherent with precipitations about 13 mm between 01 and 04 January, and 2

mm between 04 and 07 January. The mean temperature during the first fortnight of January was of approximately 10°C.

ISBA simulations follow well the distribution of precipitations. Figure 7 shows ISBA moistures varying between 35 and 40% for the period of 08 to 11 March 2006. These high moisture values correspond to important precipitations between 07 and 10 March 2006 (20mm for 07 March and 45mm for 10 March 2006). Moistures simulated by ISBA decrease after the 11 March to reach soil moisture of 25%. This value is coherent with the absence of precipitations between the 10 and 18 March 2006. The strong values simulated by ISBA on March 08, 2006 at 10h and on March 11, 2006 at 10 h (time of radar acquisitions) are higher than radar moistures from approximately 9%. This strong over-estimate of moisture by ISBA for these two dates does not seem to correspond to meteorological conditions. Indeed, simulations ISBA from March 11, 2006 at 10 h is about 40%, against 35% at 21 h. It would seem that the strong ISBA value on March 11, 2006 at 10 h is relates well to strong precipitations of March 10, 2006 (45 mm) whereas that of March 08 at 10 h seems to over-estimate the soil moisture. The decrease of ISBA soil moisture between 10 h and 21 h on March 11, 2006 is well justified, since there no was rain between 10 h and 21 h.

**Figure 7.** Soil moistures obtained from radar images, ISBA model, and in situ measurements (Gravimetry) according to daily precipitation. Each soil moisture value corresponds to the average soil moisture on the catchment basin (one soil moisture value for the whole of the basin). The standard deviation of basin average soil moisture values is around 4.5% except for March 18, 2006 where the standard deviation is 9%.





From 17 March to 15 April 2006, ISBA moistures fluctuated between 28% and 21%, with values close to radar moistures (difference inferior to 5%). Radar and ISBA moistures of April 15, 2006 are very close for the 10 h radar acquisition time (difference about 3%), but they are very different for the 21h radar acquisition (difference about 9%). According to meteorological data, it rained 0.6 mm between 0 h and 10 h and 4.8 mm between 10 h and 21 h on April 15, 2006. The precipitation of April 15 explains the increase of the soil moisture observed on the radar image acquired at 21 h (increase of 4% between 10 h and 21 h), and shows that the decrease of moisture in the ISBA simulations (3%) is not coherent. This wrong simulation of soil moisture by the ISBA model on April 15 at 21 h can be explained by the wrong precipitation distribution used in the input of the ISBA model (Safran model). For some meteorological situations, the hourly interpolation of precipitations carried out by Safran gives sometimes values which are wrongly distributed by the hourly resolution. Indeed, in the ISBA model, it was predicted and then used precipitations of 0.8 mm between 7 h and 10 h and 0 mm between 10 h and 21 h. Radar estimates are superior to ISBA simulations of about 9% on July 10 and 7% on August 14, 2006. However, it is difficult to know if radar or the ISBA model better estimates the soil moisture for these two dates.

From 01 to 04 January 2007, it rained approximately 11 mm (Figure 7b). The soil moistures estimated by radar increases of 3% between 01 and 04 January, whereas ISBA moistures decrease approximately of 10% (from 27 to 17%). This decrease of ISBA moisture is not correlated with meteorological conditions of this period. From 04 to 17 January 2007, the behavior of radar moisture is coherent with the weak precipitations recorded between these dates. For March 12, 2007 the soil moisture is of 25.7% with radar, 20.6% with ISBA, and 23.4% with gravimetric measurements.

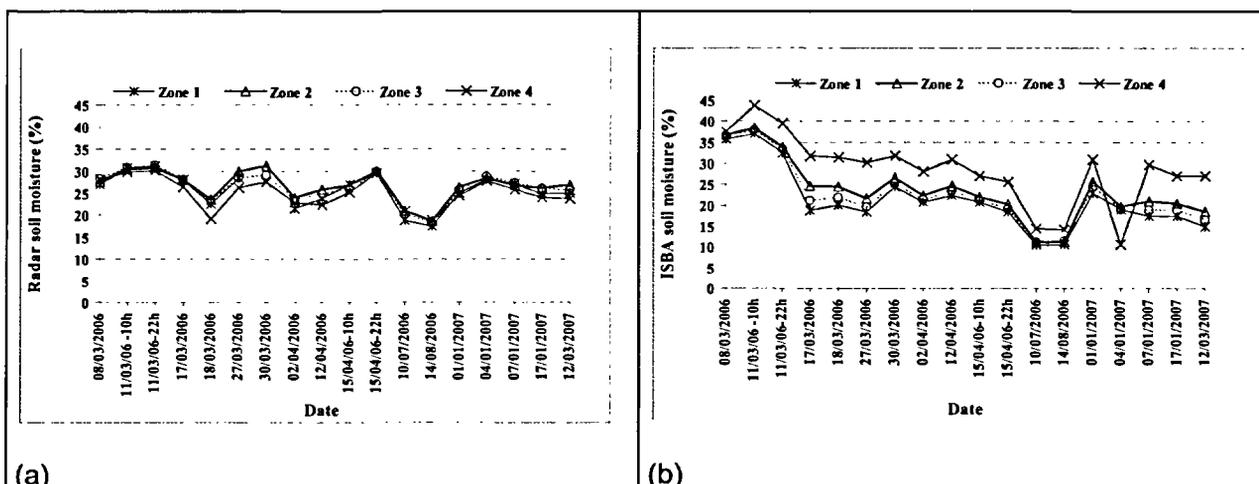
### Soil moisture mapping according to soil surface texture of the SGBDE

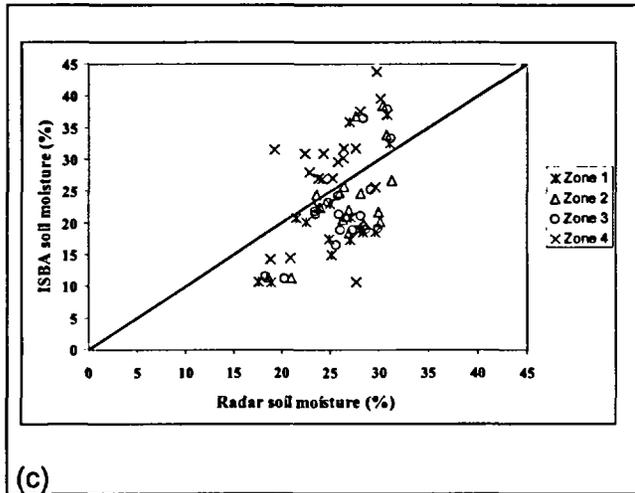
Spatial variations of soil moisture obtained by gravimetry, radar images, and ISBA simulations were studied at textural zones scale. The textural zones (Figure 2) were defined according to the textural information contained in the 1:1000000 Soil Geographical database. The gravimetric data, measured on 33 test fields, were classified according to their textural zones. Concerning radar data, the mean soil moisture was calculated for each date and each textural zone in using the mean radar signal of all bare soil pixels presents inside each zone (Figure 8a). For ISBA moistures, moisture values corresponding to bare soils were averaged on each textural zone (Figure 8b).

The behavior of the soil moisture calculated for textural zones is different for ISBA, radar, and gravimetric data. Figure 8a shows that there is no dependence between soil moistures estimated by radar images and the textural zones. However, an important dependence is obtained between ISBA soil moisture and textural zones (Figure 8b). Indeed, the ISBA soil moisture for zone 4, mainly composed of clayey material, is stronger than that for the other textural zones. The mean difference between radar estimates and ISBA simulations at textural class scale varies from -3.27% for zone 4 to +4.58 for zone 1 (bias=3.27% for zone 2 and 4.16 for zone 3). The standard deviation varies from 5.57% to 5.98% except for zone 4 where the value is 7.45% (Figure 8c).

Moreover, spatial distribution of moisture heterogeneities was displayed at textural zone scale, using box plots (Figure 9). For gravimetric database, 33 data points were used. For both radar and ISBA databases, 72 moisture values were used (18 dates x 4 textural zones). Results obtained between gravimetric or radar moistures do not show dependence with soil texture. On the contrary, ISBA data are well correlated to textural units.

**Figure 8.** Correlation between textural zones and surface soil moisture simulated from ISBA model, and estimated from ASAR images. Each symbol corresponds to the mean soil moisture on each textural zone. Zone 1 is mainly sandy and zone 2 is mainly composed of clay (cf. Figure 2).



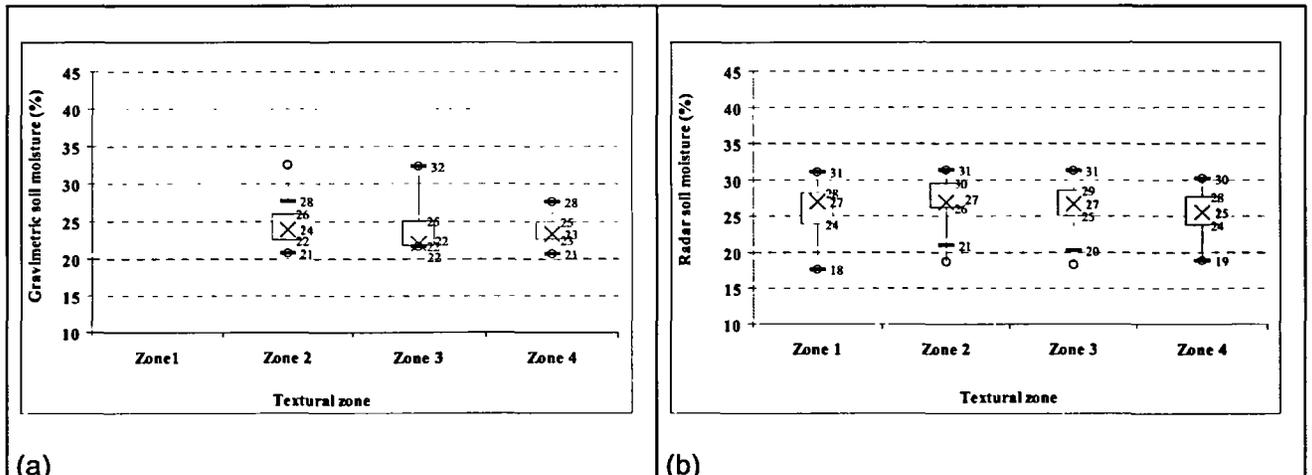


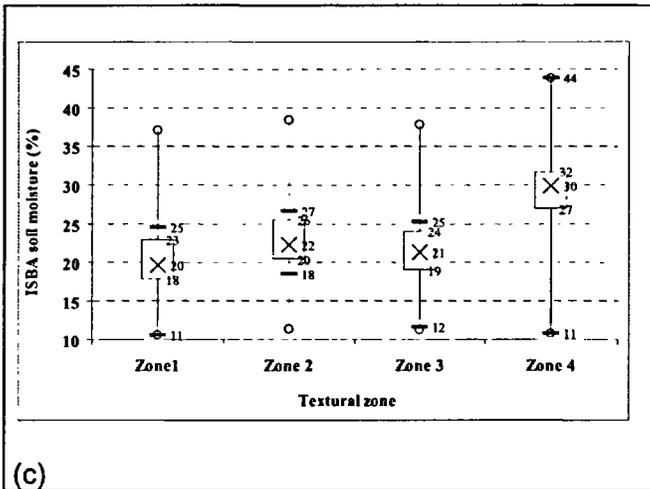
Concerning gravimetry and radar data, the differences between the main quartiles (median, first and third quartiles) of 4 textural zones do not exceed 2% (Figures 9a and 9b). Indeed, moisture would have had to be higher for zone 4 (mainly clay) and to decrease while going towards zone 1 (rather sandy).

As the ISBA model uses the pedological characteristics among input parameters, it would be evident that the soil moisture is dependent of soil texture. In fact, ISBA database shows that zone 4, mainly composed of clay, is well differentiable of other zones (1, 2, and 3). Indeed, the difference between the quartiles of zone 4 and other zones varies between 6% and 10% (Figure 9c). Results show also that pedological zones 1, 2 and 3 differ only of about 2%.

In order to consolidate these results, a nonparametric Kruskal Wallis test was carried out with a confidence threshold of 5%. This test confirms that for radar and gravimetric data, the difference between soil moistures of textural zones is not significant. For ISBA moistures, a significant dependence was observed between the textural zones and soil moisture.

Figure 9. Box plot comparing the results obtained for soil moistures according to textural zones. (a) Gravimetric, (b) Radar, (c) ISBA.





Radar estimations and gravimetric measurements of March 12, 2007 have shown that the differences of moisture observed between textural zones are not significant. The low spatial resolution of the textural map (1:1000000 scale) is not adapted to illustrate the moisture variations inside the basin. Indeed, in situ gravimetric data of 12 March 2007 show a moisture variation between the 33 test fields around 12% (moisture values between 21% and 33%), whereas at the textural zones scale the moisture variation is very weak (2%). It is then probable that the textural zones defined by the 1:1000000 map are not homogeneous and thus contain a mixture of textures. However, following the comparison between gravimetric moistures and the soil texture at the SGBDE textural zones scale, it was concluded that this scale is not adapted to explain the moisture variations on the basin. It would be thus more judicious to use in ISBA model a finer textural grid, at least on the scale of ISBA grids. Nevertheless, many studies concerning pedotransfer functions showed the importance of texture on the moisture estimation [36]. The hypothesis of dependence between moisture and soil texture is not excluded, but with the low spatial resolution of SGBDE map, this is not possible to quantify. In fact, textural spatial heterogeneities determining moisture values not appear at this scale. Thus, ISBA simulations based on textural criteria is legitimate but texture variations must be more precisely determined for obtain good moisture simulation.

#### 4. Conclusions

This study examined the potential of ASAR and ERS-2 data for estimating volumetric soil moisture ( $m_v$ ) over bare soils. Soil moisture estimates obtained from SAR acquisitions were compared to those obtained by the operational Météo-France ISBA model and by in situ measurements. These results appear promising for the development of simplified algorithms for retrieving soil moisture from SAR data, and for monitoring multi-temporal moisture changes. The mapping algorithm of soil moisture from SAR data performed very well. The results on the soil moisture estimates may be summarized as follows:

- The comparison between radar soil moisture and in situ measurements shows a RMSE for the soil moisture estimate of the order of 3% (in comparison with gravimetric moistures of March 12, 2007). Other SAR images with a wide range of soil moisture (<20% and >35%) are required to better validate the linear regressions established between radar signal and soil moisture.
- The mean difference between ISBA simulations and radar estimates is lower than 5% for 12 dates among the 18 examined dates. The 6 remaining dates show a mean difference between 5% and 10%. The comparison between ISBA and gravimetric measurements of the 12 March 2007 shows a RMSE of about 6%. Generally, these results are very encouraging.
- An important difference between ISBA and radar moistures is observed for some grids when the soil is frozen. The use of both liquid and frozen bulk soil water contents improves the results of the comparison between radar and ISBA model.
- No dependence was observed between gravimetric or radar moistures and textural zones according to 1:1000000 textural map. The soil moisture mapping from SAR images at the textural scale shown a weak variation between textural units. The correlation observed between texture map and ISBA moisture is induced by the use of the texture map as an input parameter in the ISBA model. Even if this parameter is very important for soil moisture estimation, radar and gravimetric results shown that the scale at 1:1000000 of the used textural map is not appropriate to differentiate moistures zones. Finally, additional studies on the sensibility of soil moisture to each pedological parameter (texture, density, ...) would be necessary in using higher resolution texture data.

Moreover, radar measurements are acquired with a given periodicity (some days) and cannot describe the continuous variations of moisture, whereas ISBA model provides moisture simulations every hour. Thus, it would be important to associate the radar remote sensing in the hydrological modelling. Assimilation of soil moisture data estimated from radar images could be used as calibration data to improve the forecast models (ISBA model for example).

The recent radar sensor (PALSAR/ALOS) and those that will come into operation early (TerraSAR-X, COSMO-SkyMed, RADARSAT-2) should provide us with polarimetric data (all polarizations), with the possibility of better characterising the soil surface. Polarimetry plays an important role as it allows a separation of soil moisture and surface roughness effects. Several inversion models are based on the use of fully polarimetric SAR images [14]. Polarimetric parameters such as, for example, the entropy, the  $\alpha$  angle and the anisotropy should allow us to map two soil surface characteristics simultaneously [44]. Finally, the very high spatial resolution (metric) of future SAR sensors offers great potential in terms of improving the quality of SSC mapping. These new SAR sensors will provide a diagnosis suited to catchment areas where the parcels are of small size.

Currently it is difficult to map the moisture of soils covered by vegetation using C-band data. The arrival of L-band (ALOS) will enable to extend the soil moisture mapping from SAR data of bare soils only to soils with vegetation (depending on the density and height of the vegetation). Indeed, the penetration depth of radar wave in vegetable cover is more important at L-band than at C-band. Moreover, the use of L-band enables to map soils with vegetation without using optical images, which is not currently the case with C-band because an optical image is always used for this purpose. Dubois et al. [9] showed that the ratio of two polarizations HV/VV in L-band is strongly correlated with the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). If this information is confirmed, the cartography of soil moisture could be carried out directly from radar images without the use of optical data.

## Acknowledgements

This work was carried out within the framework of a project supported by MEDD (French Environmental Ministry) and BRGM (French Geological Survey) in the frame of SCHAPI (National Flood Forecasting Agency) activities. The authors wish to thank ESA (European Space Agency) for kindly providing the SAR images under Dragon project n° 2551 and ENVISAT/ASAR project n° 351. The SPOT images were obtained at special rates through the CNES (French spatial agency) ISIS program. Authors are grateful for R. Malosti and H. Yesou, who very kindly helped for SAR data ordering and INRA-Orléans for providing the soil texture data. The authors thank M. Saplaïroles, J.L. Izac, and N. Baran for their participation in ground measurements during the field campaigns. We would also like to acknowledge Ms Florence Habets which helped to clarify us the ISBA model.

## References

1. Beven, K.J.; Fisher, J. Remote sensing and scaling in hydrology. In *Scaling up hydrology using remote sensing*; Stewart, J.B., Engman, E.T., Fedes, R.A., Kerr, Y., Eds.; Wiley Press: Chichester, UK, 1996; pp 1-18.
2. Le Bissonnais, Y.; Jamagne, M.; Lambert, J.J.; Le Bas, C.; Daroussin, J.; King, D.; Cerdan, O.; Léonard, J.; Bresson, L.M.; Jones, R. Pan-European soil crusting and erodibility assessment from the European Soil Geographical Database using pedotransfer rules. *Adv. Environ. Monitor. Model.* **2005**, *2*, 1-15.
3. Valentin, C.; Poesen, J.; Li, Y. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena* **2005**, *63*, 132-153.
4. Dobson, M.C.; Ulaby, F.T. Active microwave soil moisture research. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1986, *24*, 23-36.
5. Ulaby, F.T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. *Microwave Remote Sensing, Active and Passive, From Theory to Applications*; Artech House, Inc.: Norwood, MA, USA, 1986; Vol.
6. Fung, A.K. *Microwave scattering and emission models and their applications*; Artech House, Inc., Boston, London, 1994.
7. Ulaby, F.T.; Batlivala, P.P.; Dobson, M.C. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture: Part I – Bare soil. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1978, *GE-16*, 286-295.
8. Fung, A.K.; Chen, K.S. Dependence of the surface backscattering coefficients on roughness, frequency and polarization states. *Int. J. Remote Sens.* 1992, *13*, 1663-1680.
9. Dubois, P.; Van Zyl, J.J.; Engman, T. Measuring of soil moisture with imaging radars. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1995, *33*, 915-926.
10. Shi, J.; Wang, J.; Hsu, A.Y.; O'Neill, P.E. Engman, E.T. Estimation of bare surface soil moisture and surface roughness parameter using L-band SAR image data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1997, *35*, 1254-1266.

11. Le Hégarat, S.; Zribi, M.; Alem, F.; Weisse, A.; Loumagne, C. Soil moisture estimation from ERS/SAR data: Toward an operational methodology. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2002, 40, 2647-2658.
12. Baghdadi, N.; Gaultier, S.; King, C. Retrieving surface roughness and soil moisture from synthetic aperture radar (SAR) data using neural networks. *Can. J. Remote Sens.* 2002, 5, 701-711.
13. Zribi, M.; Dechambre, M. A new empirical model to retrieve soil moisture and roughness from C-band radar data. *Remote Sens. Environ.* 2002, 84, 42-52.
14. Oh, Y. Quantitative retrieval of soil moisture content and surface roughness from multipolarized radar observations of bare soil surfaces. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2004, 42, 596-601.
15. Baghdadi, N.; Holah, N.; Zribi, M. Soil moisture estimation using multi-incidence and multi-polarization ASAR SAR data. *Int. J. Remote Sens.* 2006, 27, 1907-1920.
16. Srivastava, H.S.; Patel, P.; Manchanda, M.L.; Adiga, S. Use of multi-incidence angle RADARSAT-1 SAR data to incorporate the effect of surface roughness in soil moisture estimation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2003, 41, 1638-1640.
17. Holah, H.; Baghdadi, N.; Zribi, M.; Bruand, A.; King, C. Potential of ASAR/ENVISAT for the characterisation of soil surface parameters over bare agricultural fields. *Remote Sens. Environ.* 2005, 96, 78-86.
18. Mattia, F.; Le Toan, T.; Souyris, J.C.; De Carolis, G.; Floury, N.; Posa, F.; Pasquariello, G. The effect of surface roughness on multifrequency polarimetric SAR data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1997, 33, 915-926.
19. Zribi, M.; Taconet, O.; Le Hégarat-Masclé, S.; Vidal-Madjar, D.; Emblanch, C.; Loumagne, C.; Normand, M. Backscattering behavior and simulation: Comparison over bare soils using SIR-C/X-SAR and ERASME 1994 data over Orgeval. *Remote Sens. Environ.* 1997, 59, 308-320.
20. Baghdadi, N.; Holah, N.; Zribi, M. Calibration of the Integral Equation Model for SAR data in C-band and HH and VV polarizations. *Int. J. Remote Sens.* 2006, 27, 805-816.
21. Baghdadi, N.; Zribi, M. Evaluation of Radar Backscatter Models IEM, OH and Dubois Using Experimental Observations. *Int. J. Remote Sens.* 2006, 27, 3831-3852.
22. Cerdan, O.; Baghdadi, N.; Denux, J.P.; Desprats, J.F.; Gay, M.; Albergel, C.; Dubus, I.; Dupros, F.; Holah, N.; El Hajj, M. APIBAR: Appui à la Prévision des Inondations. Cas des Bassins Rapides du Sud de la France. Final Report BRGM/RP-54218-FR, 2006,
23. Habets, F.; Boone, A.; Champeaux, J.L.; Etchevers, P.; Franchistéguy, L.; Leblois, E.; Ledoux, E.; Le Moigne, P.; Martin, E.; Morel, S.; Noilhan, J.; Quintana Segui, P.; Rousset-Regimbeau, F.; Viennot, P. The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *J. Geophys. Res.* 2007, submitted.
24. Oh, Y.; Kay, Y. Condition for precise measurement of soil surface roughness. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1998, 36, 691-695.

25. Baghdadi, N.; Paillou, P.; Davidson, M.; Grandjean, G.; Dubois, P. Relationship between profile length and roughness parameters for natural surfaces. *Int. J. Remote Sens.* 2000, 21, 3375-3381.
26. Davidson, M.; Le Toan, T.; Marria, F.; Satalino, G.; Maninnen, T.; Borgeaud, M. On the characterisation of agricultural soil roughness for radar remote sensing studies. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2000, 38, 630-640.
27. *BEST - Basic Envisat SAR Toolbox, Version 4.0.3*; European Space Agency (ESA), July 2005; <http://envisat.esa.int/>.
28. Joughin, I.; Percival, D.; Winebrenner, D. Maximum Likelihood Estimation of K Distribution Parameters for SAR Data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1993, 31, 989-999.
29. Lee, J.S.; Jurkevich, I.; Dewaele, P.; Wambacq, P.; Oosterlinck, A. Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A Review. *Remote Sens. Rev.* 1994, 8, 313-340.
30. Noilhan, J.; Mahfouf, J.F. The ISBA land surface parameterization scheme. *Global Planet. Change* 1996, 13, 145-159.
31. Noilhan, J.; Planton, S. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Month. Weath. Rev.* 1989, 117, 536-549.
32. Masson, V.; Champeaux, J.L.; Chauvin, F.; Méringuet, C.; Lacaze, R. A global database of land surface parameters at 1 km resolution for use in meteorological and climate models. *J. Clim.* 2003, 16, 1261-1282.
33. Durand, Y.; Brun, E.; Méringuet, L.; Guyomarc'h, G.; Lesaffre, B.; Martin, E. A meteorological estimation of relevant parameters for snow schemes used with atmospheric models. *Ann. Glaciol.* 1993, 18, 65-71.
34. Quintana Seguí, P.; Le Moigne, P.; Durand, Y.; Martin, E.; Habets, F.; Baillon, M.; Franchisteguy, L.; Morel, S.; Noilhan, J. Analysis of near surface atmospheric variables: validation of the SAFRAN analysis over France. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2007, in press.
35. Bruckler, L.; Wittono, H.; Stengel, P. Near surface moisture estimation from microwave measurements. *Remote Sens. Environ.* 1988, 26, 101-121.
36. Bruand, A.; Pérez-Fernandez, P.; Duval, O.; Quélin, P.; Nicoullaud, B.; Gaillard, H.; Razison, L.; Pessaud, J.F.; Prudhomme, L. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols : Utilisation de classes de pédotransfert après stratification texturale et texturo-structurale. *Etude Gest. Sols* 2002, 9, 105-125.
37. Gupta, S.C.; Larson, W.E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent and bulk density. *Water Resour. Res.* 1979, 15, 1633-1635.
38. Puckett, W.E.; Dane, J.H.; Hajeh, B.F. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1985, 49, 831-836.
39. *Soil Geographical Database of Europe at scale 1:1,000,000 (SGDBE)*, Version 2; <http://eussoils.jrc.it/ESDB%5FArchive/ESDBv2/>.

40. Weimann, A.; Von Schönemark, M.; Schumann, A.; Jörn, P.; Günther, R. Soil moisture estimation with ERS-1 SAR data in the East-German loess soil area. *Int. J. Remote Sens.* 1998, *19*, 237-243.
41. Zribi, M.; Baghdadi, N.; Holah, N.; Fafin, O. New methodology for soil surface moisture estimation and its application to ENVISAT-ASAR multi-incidence data inversion. *Remote Sens. Environ.* 2005, *96*, 485-496.
42. Beaudoin, A.; Gwyn, Q.H.J.; Le Toan, T. SAR observation and modelling of the C-band backscatter variability due to multi-scale geometry and soil moisture. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1990, *28*, 886-894.
43. Willmott, C.J. Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1982, *63*, 1309-1313.
44. Hajnsek, I.; Pottier, E.; Cloude, S. Inversion of surface parameters from polarimetric SAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2003, *41*, 727-744.

© 2007 by MDPI (<http://www.mdpi.org>). Reproduction is permitted for noncommercial purposes.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**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**