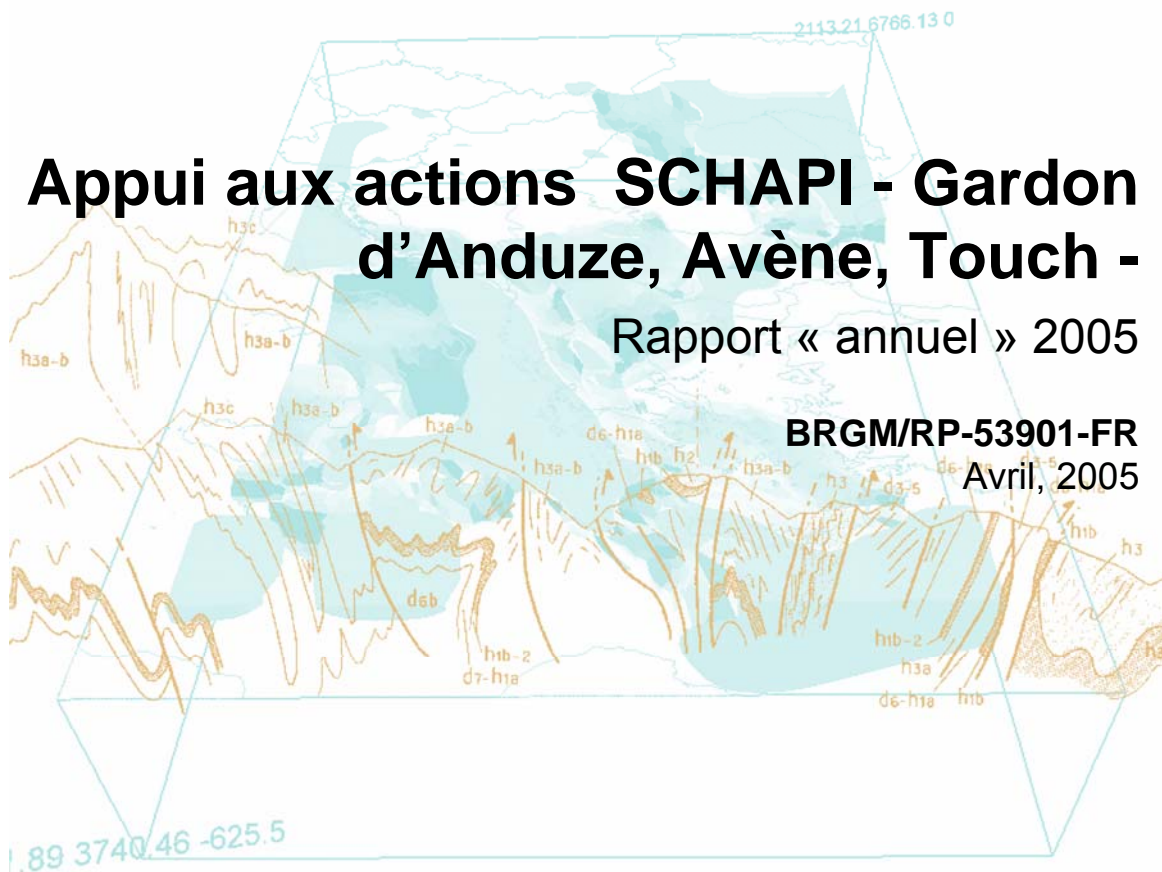




Appui aux actions SCHAPI - Gardon d'Anduze, Avène, Touch - Rapport « annuel » 2005

BRGM/RP-53901-FR
Avril, 2005



Appui aux actions SCHAPI - Gardon d'Anduze, Avène, Touch -, Rapport « annuel »

BRGM/RP-53901-FR
Avril, 2005

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2004 ARN 35

O. Cerdan
Avec la collaboration de
J.F. Desprats, N. Baran, C. King, P.A. Ayrat, E. Petelet

Vérificateur :

Nom : Th. POINTET

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : C. KING

Date :

Signature :

Mots clés : crues éclairs, arc cévenol, occupation du sol, perméabilité, état de saturation du sol, télédétection, modélisation hydrologique, scénarios, prévention des inondations, Touch.

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

Cerdan O., Desprats J-F, Baran N., King C., Ayrat P.A, Petelet E. 2005. Appui aux actions SCHAPI : Gardon d'Anduze, Avène et Touch. Rapport BRGM RP-53901-FR, 118 p, 27 ill., 7 ann...

© BRGM, 2005, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM

Synthèse

Ce rapport présente le bilan des travaux de seconde année relatifs à la contribution du BRGM aux actions du SCHAPI.

Les actions développées lors de la première année s'étaient focalisées sur l'Arc Cévenol, avec le bassin versant du Gardon d'Anduze.

Lors de la seconde année :

- une extension a été menée dans les Cévennes sur le bassin versant de l'Avène, afin d'étalonner les travaux menés sur le Gardon d'Anduze sur un bassin largement plus anthropisé ;
- le modèle STREAM a été calé pour produire des simulations du ruissellement lors d'évènements pluvieux de référence. Ces travaux sont menés en collaboration avec l'Ecole des Mines d'Alès ;
- pour introduire les informations sur les états hydriques des sols, un redéploiement de la métrologie in situ est en cours de réalisation sur le bassin versant du Touch, retenu en seconde liste par le Schapi comme BVNE .

On peut noter aussi la dynamique scientifique qui s'instaure en parallèle :

D'une part en partenariat a en outre été mis en place avec l'Ecole des Mines d'Alès, HydroSciences Montpellier et le CEMAGREF, sur le bassin d'Anduze. Ce partenariat a permis le montage d'un projet complémentaire, proposé avec succès dans le cadre de l'IFR Eau à Montpellier.

D'autre part, le bassin versant du Touch est le site d'étude du projet APIBAR, fruit d'une collaboration entre le CNES, le SCHAPI, le BRGM et l'ESA-Purpan. Les développements sur ce bassin versant tirent parti des acquis issus des projets post-PACTES de 2003-2004.

Identification du donneur d’ordre :	Direction de l’Eau du MEDD - SCHAPI
Besoins du donneur d’ordre :	La mission de veille hydrométéorologique 24 heures sur 24 du SCHAPI va s’ouvrir progressivement sur 2 ou 3 bassins versants. Le premier est le GARD. Or les outils actuellement utilisés par le SAC 30 méritent d’être complétés. L’action proposée par le BRGM est de mettre en route le modèle STREAM-Ted ce qui impose d’élargir les territoires inventoriés en termes d’infiltration potentielle, mais aussi d’aborder la métrologie de l’état de saturation des terrains.
Définition de l’objectif :	<ul style="list-style-type: none"> - Infiltration potentielle : Poursuite de la mise en place du protocole de production de cartes de potentiel d’infiltration des milieux en fonction des états initiaux, selon une méthode reproductible . - Etats de saturation des terrains : identification et mise en place d’une métrologie in situ susceptible de produire en continu des informations sur les propriétés hydrodynamiques des sols. A terme pouvoir acquérir des chroniques de données, définir des indicateurs pouvant renseigner en temps réel sur les états de saturation amplifiant les risques de ruissellement lors du déclenchement d’un évènement extrême et prévoir de les délivrer en temps réel aux utilisateurs . - Poursuite de l’adaptation du modèle STREAM de type STREAM-Sud pour à terme produire des scénarios d’estimation des volumes d’eau ruisselée pour des événements de référence de façon à fournir un début de référentiel de cartes et données simulées consultables avant et pendant la mise en vigilance météo et fournir des données et paramètres utilisables en entrée du modèle de prévision ALHTAÏR utilisé au Service de Prévision des Crues du Gard (SPC Gard, anciennement SAC 30).
Description des livrables et destinataires :	<p>Rapport d’avancement de l’adaptation de STREAM-Ted et Bilan des apports et interaction avec ALTHAIR</p> <p>Rapport d’avancement de la métrologie temps réel et de la réflexion sur les couplages d’indicateurs</p> <p>Bases de données pour SIG</p> <p>Rapport de synthèse annuel</p> <p>Rapport de sélection du type de matériel à acquérir pour le BV numérique (Rapport séparé)</p> <p>Rapport de plan d’échantillonnage et du volume effectif de matériel à acquérir (Rapport séparé)</p>

Sommaire

1	CONTEXTE ET OBJECTIF	9
1.1	CONTEXTE.....	9
1.2	OBJECTIFS	9
2	REALISATION ANNEE 2 (2004).....	11
2.1	CARACTERISATION DES BASSINS VERSANTS ETUDIES	11
2.1.1	<i>Présentation sommaire des différents bassins versants étudiés</i>	<i>11</i>
2.1.2	<i>Classification de l'occupation des sols à partir de données satellitales</i>	<i>14</i>
2.2	MESURES IN SITU ET ANALYSES.....	17
2.2.1	<i>Cartographie du potentiel d'infiltration.....</i>	<i>17</i>
2.2.2	<i>Identification des bassins versants contributeurs à la crûe par analyse isotopique</i>	<i>23</i>
2.2.3	<i>Etude préalable au suivi de la teneur en eau des sols dans les bassins du Gardon d'Anduze et du Touch.....</i>	<i>24</i>
2.3.	MODELISATION HYDROLOGIQUE.....	33
2.3.1.	<i>Simulation d'événements réels sur le Gardon d'Anduze.....</i>	<i>33</i>
2.3.2.	<i>Production de scénarios de référence.....</i>	<i>43</i>
2.3.3.	<i>Evolution du logiciel STREAM</i>	<i>44</i>
3	CONCLUSION SUR LES TRAVAUX MENES EN 2004	47
4	BILAN DE PRODUCTION.....	49
5	PLANIFICATION ANNEE 3.....	51
5.1.	AXES DE COLLABORATION ET DEVELOPPEMENT	51
5.2.	TACHES PLANIFIEES EN 2005 (AVRIL 2005 A DECEMBRE 2005) :	51
5.2.1.	<i>Description des opérations :.....</i>	<i>52</i>
5.2.2.	<i>Schéma de l'organisation et des responsabilités :</i>	<i>55</i>
	56
5.2.4.	<i>Equipe de projet.....</i>	<i>57</i>
5.2.5.	<i>Documents à remettre aux partenaires</i>	<i>57</i>
6.	BIBLIOGRAPHIE	59

Liste des annexes

Annexe 1	Données d'infiltration sur l'Avène et le Touch	63
Annexe 2	Projet scientifique amont retenu à l'IFR-LRO	67
Annexe 3	Rapport D2	73
Annexe 4	Compte-rendu	85
Annexe 5	Compte-rendu	89
Annexe 6	Compte-rendu	93
Annexe 7	Publication SFPT	99

Liste des illustrations

Illustration 1 : Anduze : un BV largement naturel (95 %) / Avène : un BV agricole et urbanisé	11
Illustration 2 : le bassin du Touch, agricole en amont (openfield), urbain en aval	12
Illustration 3 : classification 2005 de l'occupation du sol sur le Gardon d'Anduze	14
Illustration 4 : classification de l'occupation du sol sur l'Avène	15
Illustration 5 : classification de l'occupation du sol sur le Touch	16
Illustration 6 : analyse statistique de la perméabilité sur l'Avène (1)	18
Illustration 7 : analyse statistique de la perméabilité sur l'Avène (2)	18
Illustration 8 : Bassin de l'Avène : Cartographie de la perméabilité des sols	19
Illustration 9 : analyse statistique de la perméabilité sur le Touch	20
Illustration 10 : cartographie de la perméabilité sur le bassin du Touch	21
Illustration 11 : Comparaison des teneurs en eau volumique obtenues par 3 sondes pour 3 profondeurs données dans un sol agricole limoneux profond (d'après Morvan, 2004)	25
Illustration 12 : Comparaison des teneurs en eau volumique obtenues par 3 sondes pour 3 profondeurs données dans un sol agricole limoneux peu profond un peu caillouteux	26
Illustration 13 : Exemples de calibrations obtenues sur une sol avec présence ou non d'éléments grossiers (Morvan, 2004)	27
Illustration 14 : Exemple de calibration pour l'horizon 20-40 cm d'un calcosol (Morvan, 2004)	28
Illustration 15 : Présentation des événements disponibles pour la modélisation	34
Illustration 16 : Positionnement des stations de mesure du débit de Saumane, de Mialet et d'Anduze sur le modèle numérique d'altitude du bassin versant du Gardon d'Anduze	35
Illustration 17 : Indices de confiance des images radar, des mesures de débit et des événements retenus (Source : thèse P.A. Ayrat, EMA)	36
Illustration 18 : Présentation des quatre événements sélectionnés pour les simulations. Avec P48/IPA des indices de hauteur de pluie antécédente.	37
Illustration 19 : Carte des hauteurs de pluie pour l'événement numéro 1	38
Illustration 20 : Carte des hauteurs de pluie pour l'événement numéro 8	38
Illustration 21 : Carte des hauteurs de pluie pour l'événement numéro 13	39
Illustration 22 : Carte des hauteurs de pluie pour l'événement numéro 19	39
Illustration 23 : Volumes ruisselés simulés pour les quatre événements sélectionnés aux trois stations de mesure (Anduze, Mialet, Saumane) en fonction des volumes ruisselés observés.	40
Illustration 24 : Volumes ruisselés simulés pour les quatre événements sélectionnés aux trois stations de mesure (Anduze, Mialet, Saumane) en fonction des volumes ruisselés observés. Les courbes de tendance sont tracées pour chaque événement.	41
Illustration 25 : Comparaison des volumes ruisselés simulés et observés par événement et par bassin versant	42
Illustration 26 : Comparaison des coefficients de ruissellement simulés et observés par événement et par bassin versant	43
Illustration 27 : Comparaison succincte des différentes méthodes de mesure de teneur en eau des sols (à partir des données constructeurs)	81

1 Contexte et objectif

1.1 CONTEXTE

Le contexte a été précisé dans le rapport finalisant la première année (RP53027-FR). Nous rappelons ici les principaux points.

La mise en œuvre du SCHAPI, Service central d'appui à l'annonce des crues, service technique à compétence nationale basé à Toulouse sous le contrôle de la Direction de l'Eau a été effectuée en juillet 2003.

Dans ce cadre, la question de l'amélioration des méthodes existantes pour la prévision des inondations est particulièrement cruciale en ce qui concerne les bassins à crues rapides, avec en priorité le cas de l'arc Cévenol, mais aussi des bassins versants concernés par un aménagement rapide tel que le bassin versant du Touch.

Actuellement sur ce type de bassins, seule **l'annonce de crues** est développée. Des modèles de prévision existent comme ALTHAÏR, dans le cas du Gard mais leur utilisation en temps réel se heurte encore à des difficultés liées notamment aux conditions d'initialisation de l'état des sols. Le SCHAPI se préoccupe d'une part de généraliser la performance de ce modèle sur d'autres bassins et d'améliorer les méthodes existantes pour la prévision des inondations.

Pour les **prévisions**, le SCHAPI souhaite développer des méthodes de prévision complémentaires mais sans qu'elles se substituent à celles des SAC ou de Météo-France. Or on ne peut prendre comme seule stratégie les méthodes de prévision empirique basées sur une bonne connaissance de l'historique des bassins. On se heurte en effet d'une part au **manque de données historiques**, - peu de ces bassins étant bien jaugés-, et d'autre part à l'impossibilité de généraliser un calage obtenu de façon empirique sur un de ces bassins rapides, à cause de la **forte hétérogénéité** des bassins entre eux, tant du point de vue de la géométrie, du relief, de l'occupation du sol, que de la nature des sols et des formations géologiques.

Les travaux menés en 2003-2004, ciblés sur le Gardon d'Anduze, ont permis de finaliser la carte du potentiel d'infiltration des sols, critère de base caractérisant les sols pour une optimisation de la modélisation des écoulements (Althair par l'Ecole des Mines d'Alès et le SPC 30, et STREAM dans le cadre du projet).

1.2 OBJECTIFS

En s'appuyant sur ces expériences, on peut chercher à établir une méthode qui puisse tenir compte de l'hétérogénéité de surface des bassins et qui fournisse des informations sur les volumes d'eau ruisselée selon divers types d'événements de référence, sans toutefois introduire de notion dynamique.

Les objectifs à 3 ans sont de proposer une adaptation du modèle STREAM de type STREAM-Sud :

- avec prise en compte des facteurs du bassin versant favorables au ralentissement dynamique dans les modèles de ruissellement/infiltration : en particulier des méthodes pour caractériser de façon la plus exhaustive possible le potentiel d'infiltration des surfaces du bassin, de façon à clarifier une partie du comportement des sols vis à vis des événements pluvieux majeurs ;
- adaptation du modèle, incluant une prise en compte d'une pluie distribuée de façon hétérogène au sein du bassin versant, et précisant les conditions initiales à considérer ;
- comparaison des comportements de ces bassins pour un même type d'événement et de conditions initiales (aires de ré-infiltration partielle des volumes d'eau, potentiel de répartition temporaire des excédents vers des espaces peu vulnérables, volumes prédits à l'exutoire....) ;
- élaboration de scénarios d'estimation des volumes d'eau ruisselée pour des événements de référence ;
- fourniture de catalogue de cartes et données simulées consultables avant et pendant la mise en vigilance météo.

Le résultat final, à savoir des cartes de volumes ruisselés, sera associé à une gamme d'événements types et de conditions initiales type, car l'exhaustivité ne peut être de mise. De plus il devra prendre en considération un facteur d'erreur plus ou moins important selon les incertitudes intégrées dans les données.

Plus particulièrement, les objectifs pour l'année 2 consistent en :

- une finalisation de la carte du potentiel d'infiltration des sols sur l'Avène, et un redéploiement sur le Gard ;
- une acquisition de paramètres d'infiltration in situ sur une autre région ;
- la définition et la réalisation des modifications à imposer à STREAM-Ted pour approcher au mieux les contraintes identifiées en lien avec l'INRA et la DDE du Gard ; spatialisation de la pluie, itérations temporelles, calibration des données d'entrée, capacité de produire des simulations réalistes...
- l'identification des mesures à mettre en place pour le suivi des états d'humidité ou de saturation des terrains, ainsi que la sélection de la zone la plus adéquate pour cette mise en œuvre d'un suivi d'indicateurs.

2 Réalisation année 2 (2004)

2.1 CARACTERISATION DES BASSINS VERSANTS ETUDIES

2.1.1 Présentation sommaire des différents bassins versants étudiés

a) Le bassin versant du Gardon d'Anduze

Le bassin versant du Gardon d'Anduze a fait l'objet des travaux présentés dans le rapport concluant l'Année 2004.

Situé dans la partie cévenole du Département du Gard, ce bassin de référence pour le Service de Prévention des Crues du Gard est typique des bassins méditerranéens sujets aux crues rapides, suite à des événements pluvieux importants de type Cévenol.

b) Le bassin versant de l'Avène

Sa sélection (proposé par le Service de Prévention des Crues de Nîmes et par l'Ecole des Mines d'Alès) rentre dans le cadre de la généralisation des travaux menés sur le Gardon d'Anduze à d'autres bassins versants méditerranéens, présentant des caractéristiques différentes (occupation du sol, urbanisation, ..) du Gardon d'Anduze.

Le bassin versant de l'Avène, proche du Gardon d'Anduze est soumis au même régime Cévenol. Il est cependant largement anthropisé, avec une agriculture développée et un nombre d'habitant important.



Illustration 1 : Anduze : un BV largement naturel (95 %) / Avène : un BV agricole et urbanisé

c) Le bassin versant du Touch

Le bassin versant du Touch, qui doit permettre d'extrapoler les méthodes développées à un bassin océanique tout à fait représentatif des crues assez rapides, et soumis à des aménagements importants, dans le cadre de l'extension de l'agglomération toulousaine.

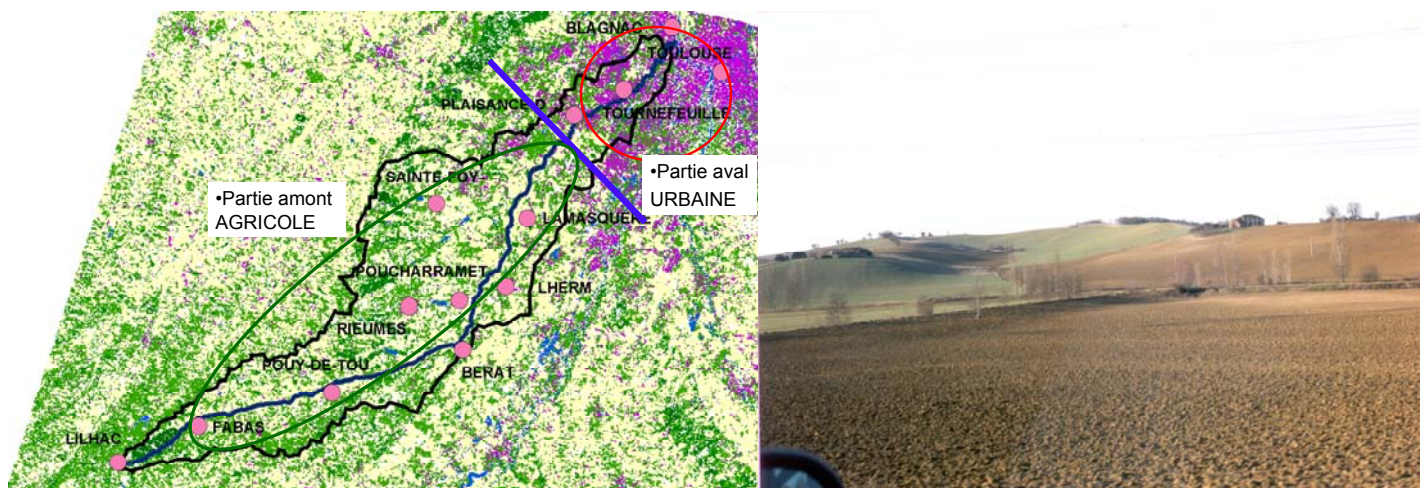


Illustration 2 : le bassin du Touch, agricole en amont (openfield), urbain en aval

La végétation naturelle est proportionnellement restreinte, exception faite sur l'extrême amont du bassin avec la forêt de Fabas. On retrouve essentiellement un paysage d'openfield (photo illustration 2) où dominent des cultures annuelles (cultures d'hiver comme le blé et le colza, et cultures d'été irriguées comme le maïs ou le tournesol).

Dans le cadre d'un projet RPI financé par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), le BRGM, le laboratoire de Télédétection et de Gestion des Territoires (LTGT) de l'Ecole Supérieure d'Agriculture de Purpan (ESAP), différentes investigations ont été réalisées afin de caractériser le bassin versant du Touch. Les informations détaillées recueillies au cours de cette étude sont portées dans le rapport BRGM RP-53526-FR (Desprats et al., 2004) ; seules les principales caractéristiques du bassin sont rappelées ci-après.

GEOLOGIE : 2 grands ensembles sont mis en évidence sur ce bassin :

- les molasse à l'amont,
- le domaine alluvial, constitué de 3 niveaux de terrasses étagées : haute terrasse, moyenne terrasse et basse terrasse.

Dans la partie aval du bassin se trouvent des limons développés sur les alluvions du quaternaire. Des colluvions de textures argilo-sableuses à argilo-graveleuses se trouvent au centre du bassin et sont réparties suivant une bande d'orientation nord-

sud. Au sud-ouest (amont du bassin), les molasses de l'oligocène-miocène sont présentes. Enfin, le quatrième ensemble correspond aux alluvions quaternaires développés dans les formations molassiques et répartis le long du Touch.

PEDOLOGIE : 4 grands ensembles sont également identifiés. A l'aval du bassin se trouvent les sols développés sur les alluvions anciennes. Les terreforts superficiels (sol argilo-calcaire bien structuré) occupent la partie amont du bassin. Entre ces deux ensembles, les boubènes (sol siliceux plus ou moins lessivé) forment une bande d'environ 5 kilomètres de large. Enfin, le long des vallées se trouvent les formations caractéristiques des vallées secondaires (colluvions argilo-sableuses à argilo-graveleuses).

HYDROGEOLOGIE : quatre entités ont été identifiées à partir de la carte géologique : la première entité correspond aux formations molassiques situées dans la partie amont du bassin, dont la richesse en argile favorise le ruissellement qui rejoint le Touch et ses affluents. La haute terrasse alluviale correspondant à la plus ancienne terrasse alluviale de la Garonne représente la deuxième entité. Plus en aval, la moyenne terrasse, moins argileuse que la précédente, lui confère des propriétés hydrodynamiques plus intéressantes pour l'exploitation des eaux souterraines. Enfin, la quatrième entité correspond à la basse terrasse de la Garonne qui reçoit les écoulements des terrasses supérieures.

2.1.2 Classification de l'occupation des sols à partir de données satellitales

La classification de l'occupation du sol réalisée sur Anduze lors de la première année du projet (cf rapport RP-53027-FR Mars 2004) a été optimisée à partir des observations in situ.

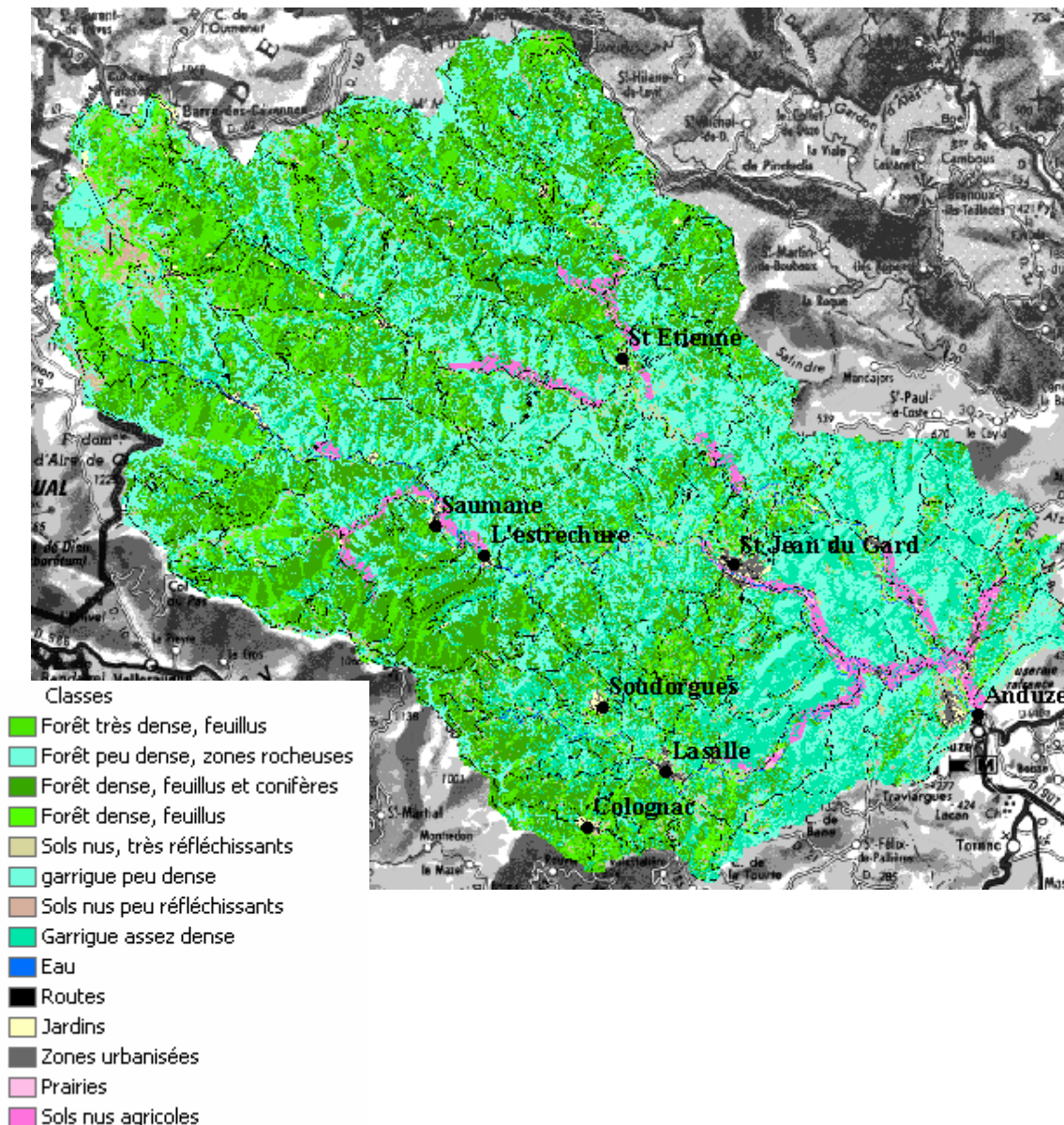


Illustration 3 : classification 2005 de l'occupation du sol sur le Gardon d'Anduze

Les mêmes données SPOT (mai et août 2002), acquises dans le cadre du projet R&D KarstEau, ont permis de réaliser cette année une classification sur le bassin versant de l'Avène.

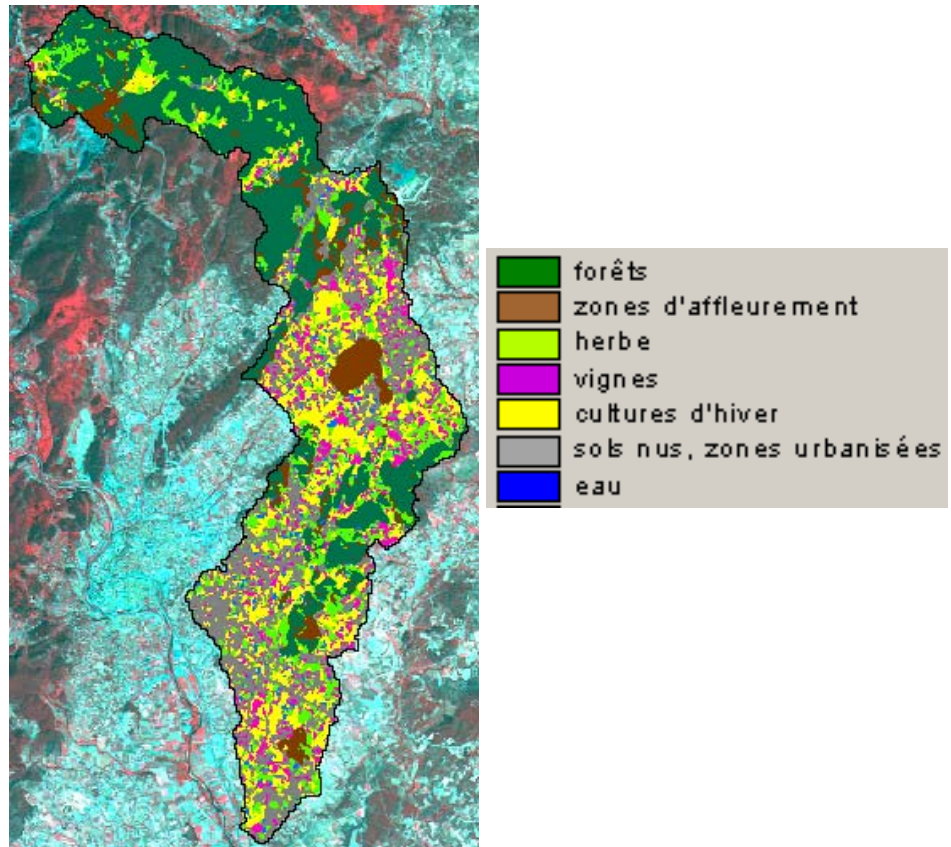


Illustration 4 : classification de l'occupation du sol sur l'Avène

Ce bassin reste largement occupé par une végétation naturelle sur sa seule partie amont. En effet, sur plus de 75% du bassin, l'agriculture est largement présente (cultures annuelles, mais aussi viticulture). L'urbanisation est largement développée, ce qui va jouer un rôle majeur au niveau de l'aléa, en accroissant le potentiel de ruissellement du fait de l'imperméabilisation des sols. La vulnérabilité sera aussi beaucoup plus forte sur un bassin comme Anduze.

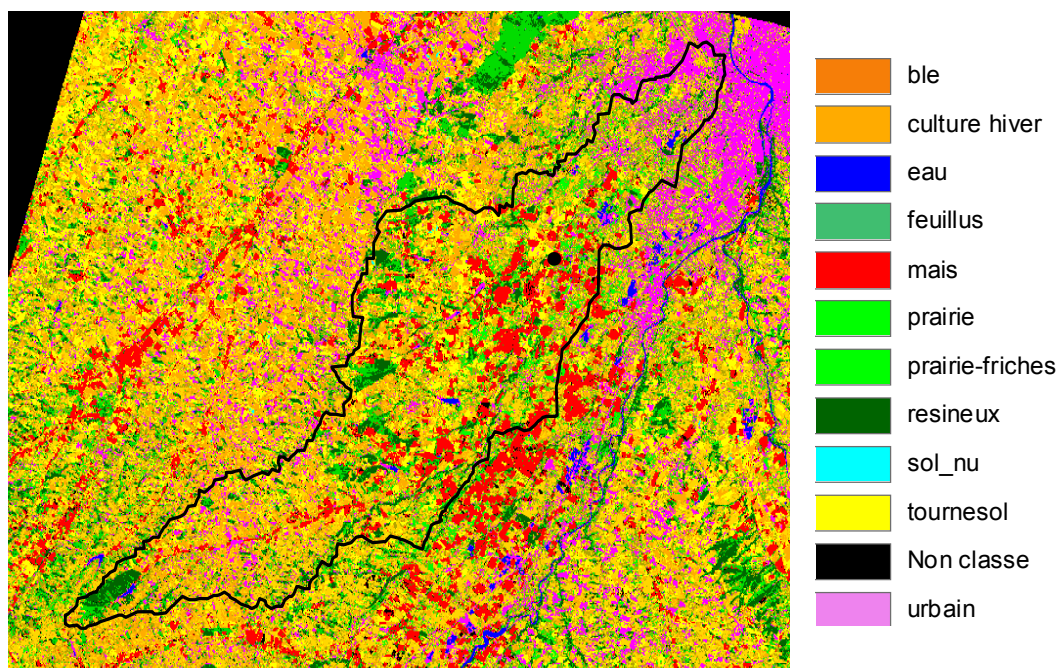


Illustration 5 : classification de l'occupation du sol sur le Touch

Le bassin versant du Touch, agricole sur ses 2/3 amont, voit un fort développement urbain sur le 1/3 aval, ce qui correspond à l'extension de l'agglomération toulousaine. Le bassin versant du Touch, d'orientation Sud-Ouest Nord-Est a une superficie d'environ 507 km².

Bien que l'urbanisation se soit développée, le bassin reste pour les 2/3 de sa superficie à vocation agricole. Le tiers aval correspond au secteur le plus urbanisé ; les forêts, friches et prairies permanentes semblent un peu plus denses dans la partie amont du bassin. L'interprétation des données SPOT a permis de différencier 4 types d'occupation des sols : les formations pérennes (forêts, friches et prairies), les cultures d'hiver (blé et colza), les cultures d'été (maïs, soja, sorgho et tournesol), les autres classes (zones urbaines, eau). La classification de l'occupation du sol a largement bénéficié de l'étude menée entre 2003 et 2004 par le BRGM et l'ESAP, sur la problématique de l'intégration de données satellitales Très Haute Résolution dans le cadre de l'aménagement de ce bassin (projet cofinancé par le CNES, le BRGM et l'ESAP).

2.2 MESURES IN SITU ET ANALYSES

2.2.1 Cartographie du potentiel d'infiltration

a) mesures de terrain in situ double anneau réalisées en 2004 (liste en annexe 1)

Les mesures in situ par la méthode double anneau ont été réalisées :

1. De juillet à octobre 2004 sur l'Avène : 60 mesures ont été acquises sur les différents types pédo-géologiques (alluvions, marnes, schistes, dolomies, calcaires marneux) d'occupation du sol (forêt, garrigue, vigne, blé).

Ces 60 points ont été complétés par 13 points d'observation, destinés à valider la classification de l'occupation du sol réalisée à partir de l'image SPOT.

2. De mars à Avril 2005 sur le Bassin versant du Touch. 26 mesures complètent les 46 réalisées lors de l'été 2003.

Il s'agit de produire des informations susceptibles d'aider à atteindre la fonction de production d'un ruissellement des surfaces des sols ou son corollaire, le potentiel d'infiltration locale.

Ces travaux tentent de faire passer la connaissance empirique issues des données disponibles (relief, géologie, pédologie, occupation du sol) à une quantification du potentiel d'infiltration locale.

Cette cartographie doit permettre la prise en compte de l'élément sol (pédologie, mais aussi occupation du sol et travail du sol) dans la modélisation des écoulements

Cartographie du potentiel d'infiltration sur l'Avène

L'analyse statistique des mesures in situ faites sur le bassin de l'Avène amène à différencier 5 classes de perméabilités :

- **perméabilité très forte** : garrigue-forêt sur granite-calcaire-dolomie-grès
- **perméabilité forte** : garrigue-forêt sur alluvions-schistes ET prairie-blé sur granite-calcaire-dolomie-grès
- **perméabilité moyenne** : garrigue-forêt sur marnes-calcaires marneux ET prairie-blé sur alluvions-schistes
- **perméabilité faible** : prairie, blé sur marnes, calcaires marneux
- **perméabilité très faible** : vignes sur marnes, calcaires marneux, alluvions schistes

Perméabilité en mm/heure			vigne	prairie blé	garrigue forêt
marnes	calcaire marneux		77	168	218
alluvions	schistes		109	260	426
granite	argile-grès	calcaire-dolomie	X	466	1019

Illustration 6 : analyse statistique de la perméabilité sur l’Avène (1)

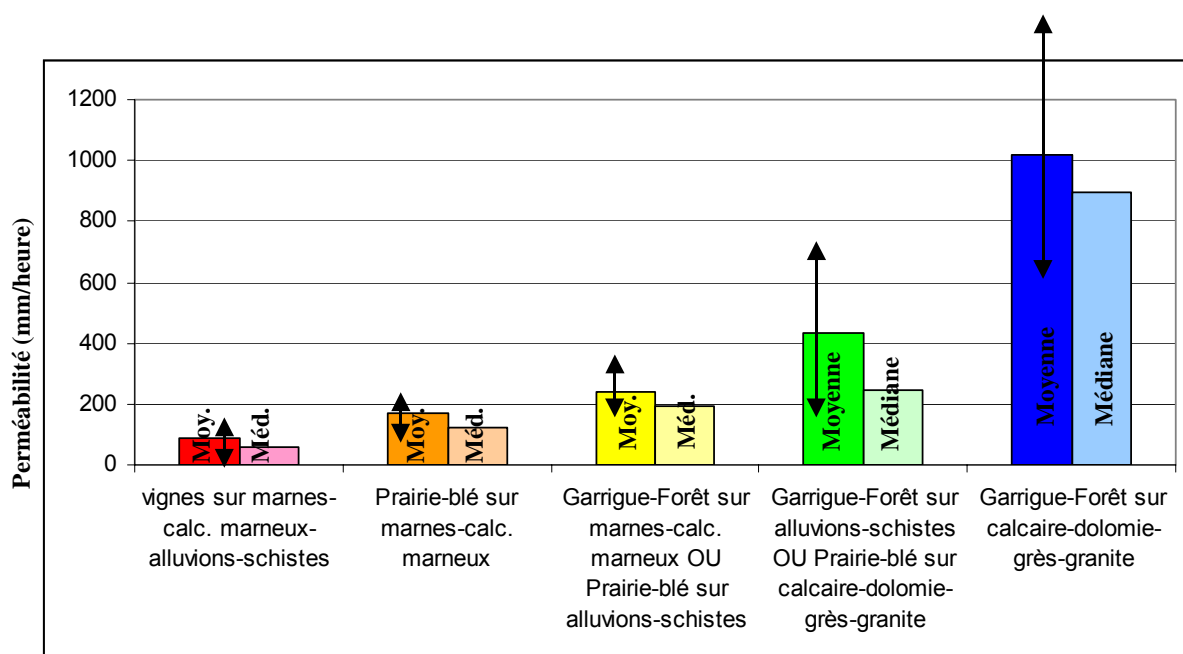


Illustration 7 : analyse statistique de la perméabilité sur l’Avène (2)

Cette illustration permet de visualiser pour chaque classe la moyenne, la médiane et l’écart-type.

La végétation naturelle sur les formations perméables (arènes granitiques, grès) conduit naturellement aux perméabilités les plus importantes.

A contrario, sur les vignes, au pouvoir ruisselant important, on observe de faibles perméabilités, en particulier sur les sols marneux ou marno calcaires.

Cette analyse statistique permet de proposer la carte du potentiel d’infiltration suivante. On observe ainsi un écart de 1 à 10 entre les formations les moins perméables et celles qui le sont le plus.

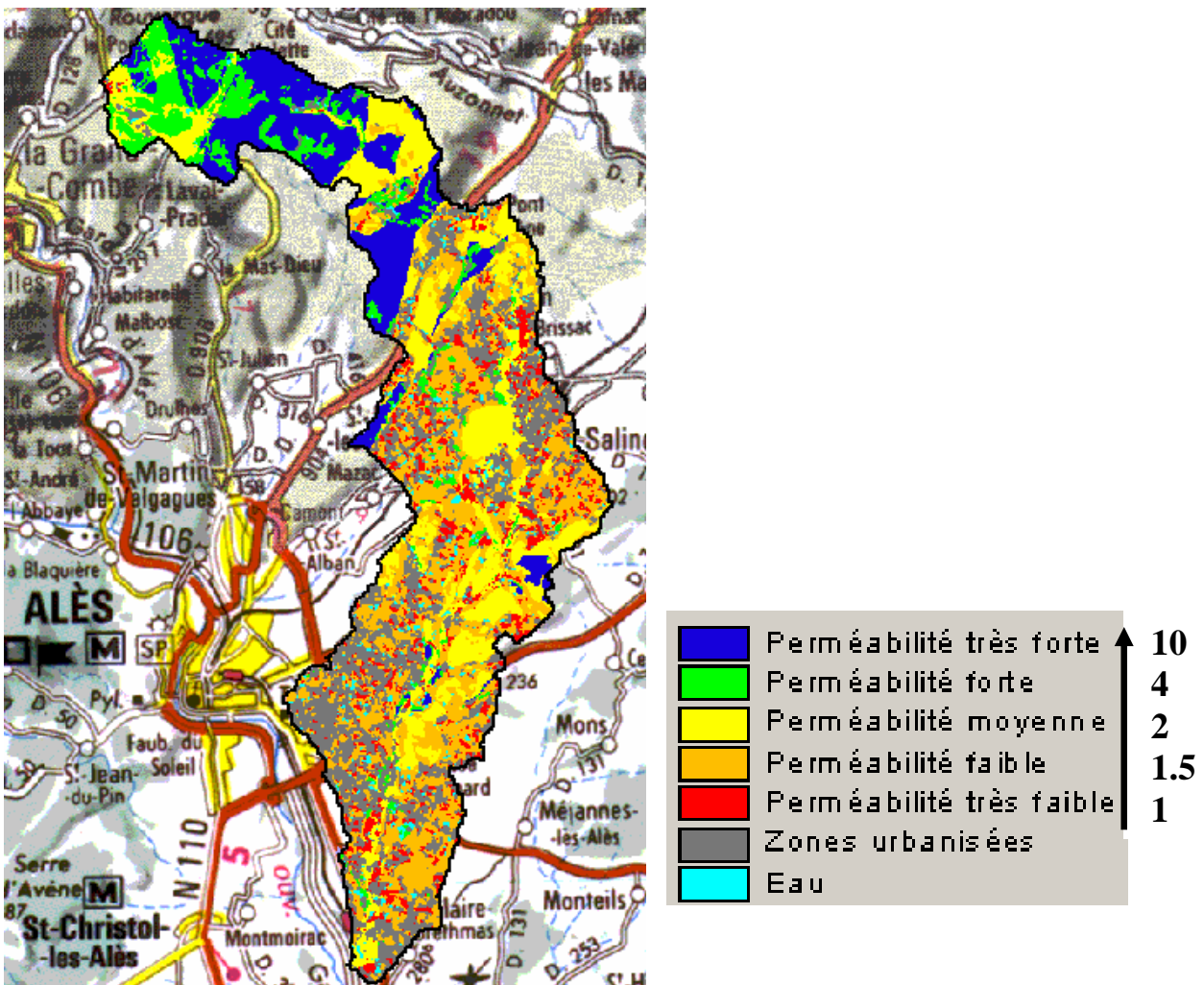


Illustration 8 : Bassin de l'Avène : Cartographie de la perméabilité des sols

Les valeurs de perméabilité indiquées résultent du système double anneau. Elles devront être calibrées préalablement à leur intégration dans un modèle.

Les formations représentées en bleu sont 10 fois plus perméables que celles représentées en rouge.

c) Cartographie du potentiel d'infiltration sur le Touch

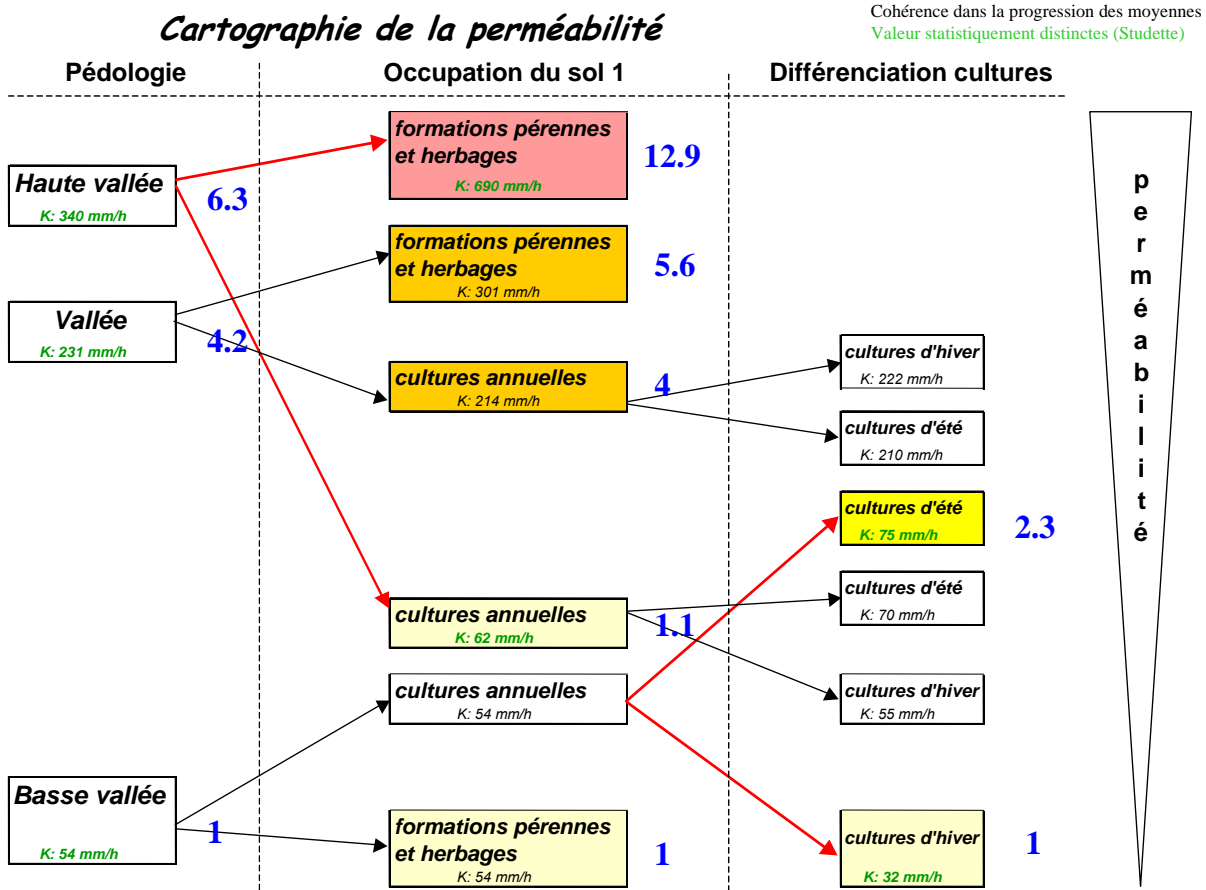


Illustration 9 : analyse statistique de la perméabilité sur le Touch

L'analyse statistique faite sur les mesures de perméabilité réalisées sur le bassin versant du Touch lors de l'été 2003 sont, comme pour l'Avène et le Gardon d'Anduze, basées sur un test de Student, afin de valiser la différenciation entre les classes.

Si l'importance de l'occupation du sol avait été limitée sur Anduze du fait d'une végétation naturelle omniprésente, on peut s'apercevoir sur le Touch, comme sur l'Avène par ailleurs de la nécessité de la prise en compte de ce paramètre.

La perméabilité des sols est représentée en 4 classes distinctes, étroitement liées aux deux paramètres que sont la pédologie et l'occupation du sol.

Des mesures de perméabilité complémentaires sont en cours de réalisation (mars et avril 2005).

Elles seront complétées par une série de mesures en juin 2005. Ceci vise à obtenir une validation des mesures faites lors d'un épisode climatique particulier : la période caniculaire de l'été 2003. Il s'avère déjà au vue des premières observations que le travail du sol est un élément majeur de la perméabilité. Lorsque ce travail est ancien, la porosité des sols est fermée, et la perméabilité est limitée. Ceci est particulièrement vrai sur les terrasses argileuses ou argilo-limoneuses sur bassin du Touch. Cette influence du travail du sol serait probablement plus limitée sur des sols à texture légère (sableux).

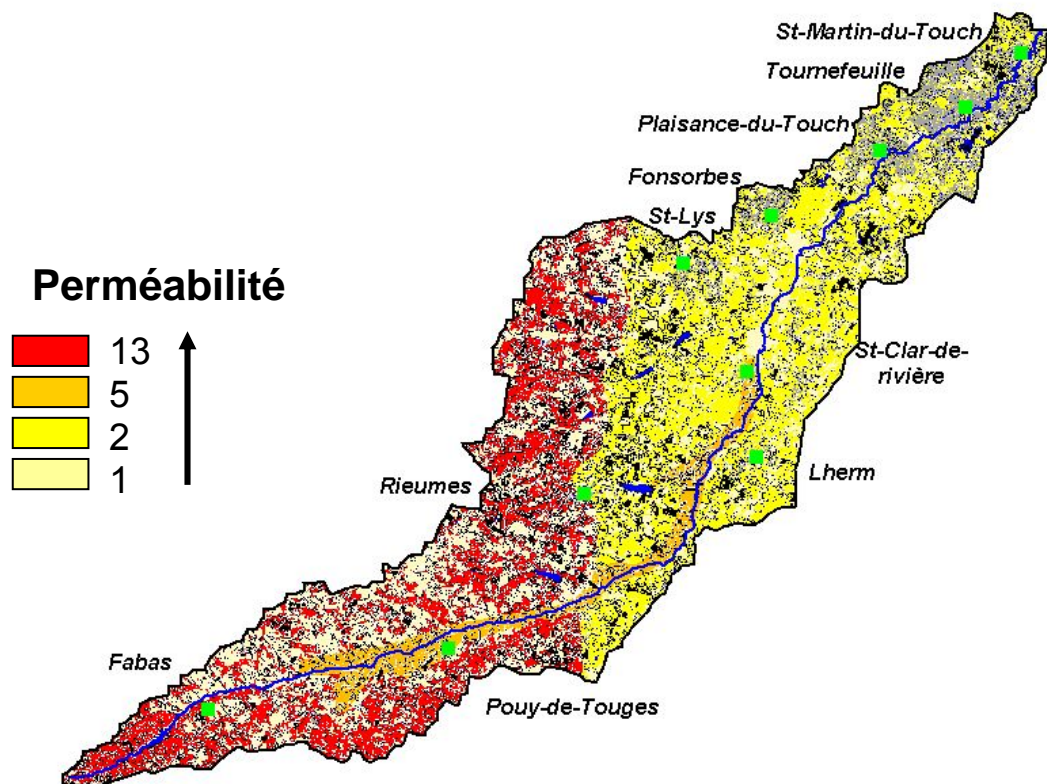


Illustration 10 : cartographie de la perméabilité sur le bassin du Touch

Les formations représentées en rouge sont 14 fois plus perméables que celles représentées en jaune clair.

d) Calibration du potentiel d'infiltration :

L'approche menée à l'aide d'un double anneau a permis de réaliser un nombre important de mesures pour cartographier les bassins du Gardon d'Anduze en 2003-2004, puis de l'Avène et du Touch en 2004-2005..

Elle permet de hiérarchiser le potentiel d'infiltration des différentes classes « sol-occupation du sol ». Il convient alors de caler ces cartographies sur des données bibliographiques ou des mesures de terrain réalisées à l'aide de simulateur de pluie.

Sur Anduze, l'Ecole des Mines d'Alès (thèse P.A. Ayrat) a réalisé une série de simulations sur :

- des sols peu épais développés sur schistes, en couvert forestier, à Tourgueilles ;
- des sols épais constitués d'arènes, développées sur des granites, en couvert forestier, à Peyrolles.

Dans le but de pouvoir passer d'une mesure in situ locale de perméabilité au double anneau à une caractérisation spatiale d'une perméabilité de zone et plus loin à une vitesse d'infiltration, une première démonstration de campagne d'infiltration par divers appareillages a été réalisée début juillet 2004 sur le site de Peyrolles sous la coordination de l'Ecole des Mines d'Alès (EMA), avec la participation du BRGM et Hydrosciences. Elle a eu lieu dans le cadre de la thèse de PA Ayrat (Ecole des Mines d'Alès)

Deux parcelles de 1 m² ont été installées à proximité du site lourd de 10 m² de Tourgueille de la DDE/EMA. Des simulations ont été effectuées en parallèle sur les deux dispositifs à 100 et 150 mm/h. Ainsi deux points de comparaison sont déjà acquis.

La représentativité de la mesure ponctuelle par rapport à celle de la caractérisation de l'état du sol au niveau de la parcelle et du sous-bassin dépendra de l'acquisition de données de calibration et n'a pas pu être encore entreprise que partiellement.

(1) A Tourgueille (11 juillet 2001) : sur forêt et sol sur schiste
avec une simulation 100 mm/h : infiltration +/- 80 mm/h

(2) A Peyrolles (juillet 2004) : sur forêt et sol sur granite
avec des simulations à 50 mm/h, 100 mm/h 150 mm/h : infiltration : 100 %
(source : Ecole des Mines Alès)

(3) A Roujean (vallée de l'Hérault - Peyne) : sur vignes et sols marneux-argileux
Infiltration : 20 mm/h (vignes)
(INRA - Bibliographie)

Les résultats sur parcelles sont totalement cohérents avec les mesures faites avec le double anneau.

Sur les sols schisteux de Tourgueilles, le ruissellement devient effectif dès lors que le pluie dépasse les 100 mm / h. Par contre, sur les arènes granitiques de Peyrolles, le ruissellement n'est jamais significatif. On retrouve les très fortes perméabilités mesurées à l'aide du double anneau, confirmées par des mesures réalisées sur ce même site par J.F. Didon (INRA-CNRS) à l'aide d'un double anneau grande taille.

Par ailleurs, la mise en place d'autres campagnes de mesures communes et l'analyse d'incertitude aux données in situ demandera soit l'accès aux données d'archive de données collectées par d'autres méthodes par EMA et Hydrosiences soit la disponibilité du simulateur de pluie de Hydrosiences .

Les premières calibrations de la cartographie de la perméabilité ont été proposées pour le paramètre f_0 retenu en entrée du modèle ALHTAÏR et ont permis des simulations ALHTAÏR en mode régionalisé et en mode bassin versant. Elles ont été publiées en commun (ref. AYRAL.P.A et al SFPT 2004 – annexe 12).

2.2.2 Identification des bassins versants contributeurs à la crûe par analyse isotopique

Les travaux réalisés ont amené à une réflexion entre Hydrosiences Montpellier, l'École des Mines d'Alès, le BRGM, et le CEMAGREF sur la nécessité de mesures au niveau d'un petit bassin versant, en prenant en compte en particulier l'humidité, les chemins de l'eau, et bien sur les variations de débit du cours d'eau.

Une réunion de travail le 30 septembre 2004 a permis de préparer une offre scientifique commune à l'IFR (Annexe 2). La problématique soulevée par le BRGM relève parfaitement de l'intérêt du SCHAPI et de la DDE-SCA 30 et dépasse le cadre des états hydriques de surface en cas d'évènements majeurs : il s'agit de **proposer une campagne de traçages géochimiques et isotopiques pour l'identification de l'origine des crues et, par déconvolution, de déterminer l'origine des flux qui composent la crue.**

Le bassin versant du Gardon d'Anduze, composé d'environ $\frac{1}{2}$ de schistes, $\frac{1}{4}$ de granite et $\frac{1}{4}$ de calcaires (kartsifiés) + marnes, se prêterait bien à une investigation pour **clarifier les modes de circulation préférentiels de l'eau entre ruissellement de surface, le ruissellement hydodermique du niveau altéré et celui du niveau de roche saine dans la zone fracturée.** C'est pourquoi cette question a été soumise à une instance de coordination de la recherche régionale (IFR). L'IFR EAU a retenue cette proposition (mars 2005); les résultats seront portés à connaissance du SCHAPI et du SPC 30.

2.2.3 Etude préalable au suivi de la teneur en eau des sols dans les bassins du Gardon d'Anduze et du Touch

L'hypothèse est faite que l'état de saturation des sols pourrait être l'un de ces indicateurs d'alerte bien qu'à ce jour aucune étude n'ait clairement mis en évidence la relation état de saturation du sol / déclenchement de crue lors d'épisodes de très fortes pluies.

Ce paragraphe vise à faire un inventaire succinct des méthodes de mesure de la teneur en eau du sol classiquement utilisées. La critique des méthodes est faite en prenant en compte les notions de suivi en continu avec transmission des données, la spatialisation de ces données ainsi que la possibilité de mettre en œuvre ces méthodes dans des bassins versants à très forte densité de végétation et dans lesquels les sols sont peu développés et caillouteux.

a) Possibilité d'équipement du BV du Gardon d'Anduze

Mise en place dans un sol remanié

Les sols représentatifs de ce bassin, qu'ils soient développés sur granite ou schistes, sont des sols peu profonds (moins de 50 cm de profondeur en moyenne) et fortement caillouteux. La mise en place des TDR directement dans le sol paraît inenvisageable. En effet, les sondes ont une longueur d'environ 15 cm et sont constituées de 3 tiges (guides d'onde) qui doivent rester parallèles et dont le diamètre est de quelques millimètres. Leur enfoncement direct dans le sol semble donc très aléatoire. Or il est nécessaire d'installer plusieurs sondes à une profondeur donnée pour essayer d'avoir une mesure représentative.

La réalisation d'un pré-trou correspondant à la taille exacte des guides d'onde pourrait être une solution pour faciliter la mise en place. Toutefois devant le faible diamètre des guides d'onde et l'obligation de garder leur parallélisme, aucune solution technique ne semble évidente pour la réalisation de ce pré-trou.

La mise en place des TDR à une profondeur donnée après décapage du sol semble la solution la plus réaliste du point de vue technique. La fosse ainsi réalisée doit ensuite être rebouchée en respectant si possible la succession des horizons pédologiques et en essayant de compacter le sol afin de retrouver des conditions les plus proches du milieu naturel. L'idéal serait probablement de réaliser la mise en place des sondes plusieurs mois avant le début des mesures, délai qui permettrait au sol de retrouver une structure relativement naturelle et plus comparable aux conditions naturelles.

Nombre de sondes par site de mesure

Les illustrations 10 et 11 donnent des exemples de suivis de la teneur en eau obtenus par les sondes TDR dans deux sols agricoles pendant une année – à l'exception d'une période pendant laquelle la centrale d'acquisition a été défailante.

Ces deux illustrations montrent que les TDR permettent de mettre en évidence des variations de teneur en eau au cours de l'année. La réaction des TDR en corrélation avec les épisodes pluvieux notamment tend à valider – au moins du point de vue qualitatif – la méthode de mesure.

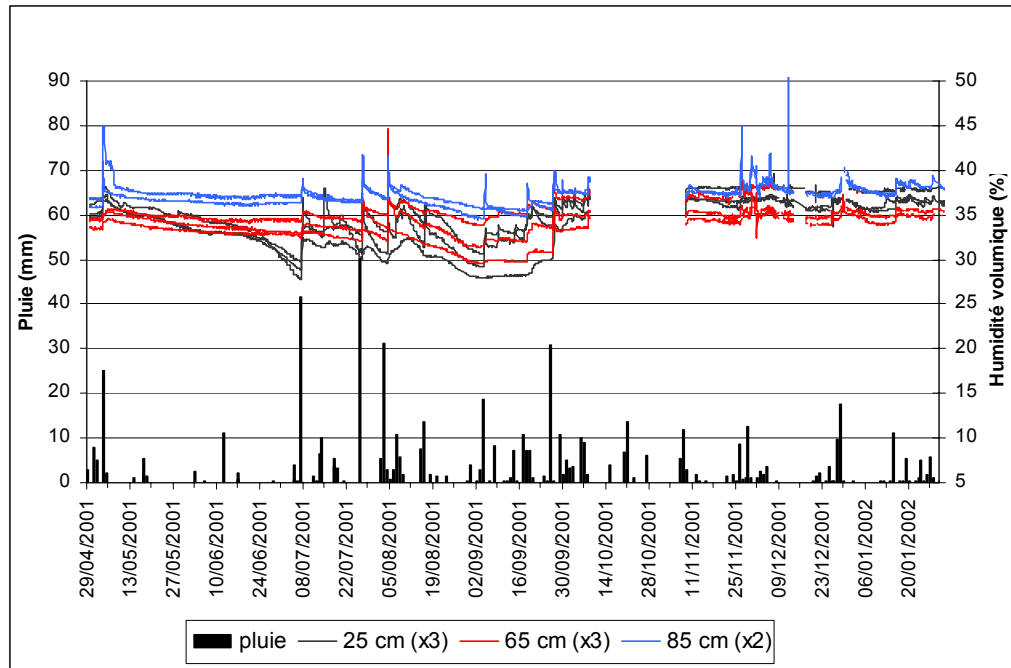


Illustration 11 : Comparaison des teneurs en eau volumique obtenues par 3 sondes pour 3 profondeurs données dans un sol agricole limoneux profond (d'après Morvan, 2004)

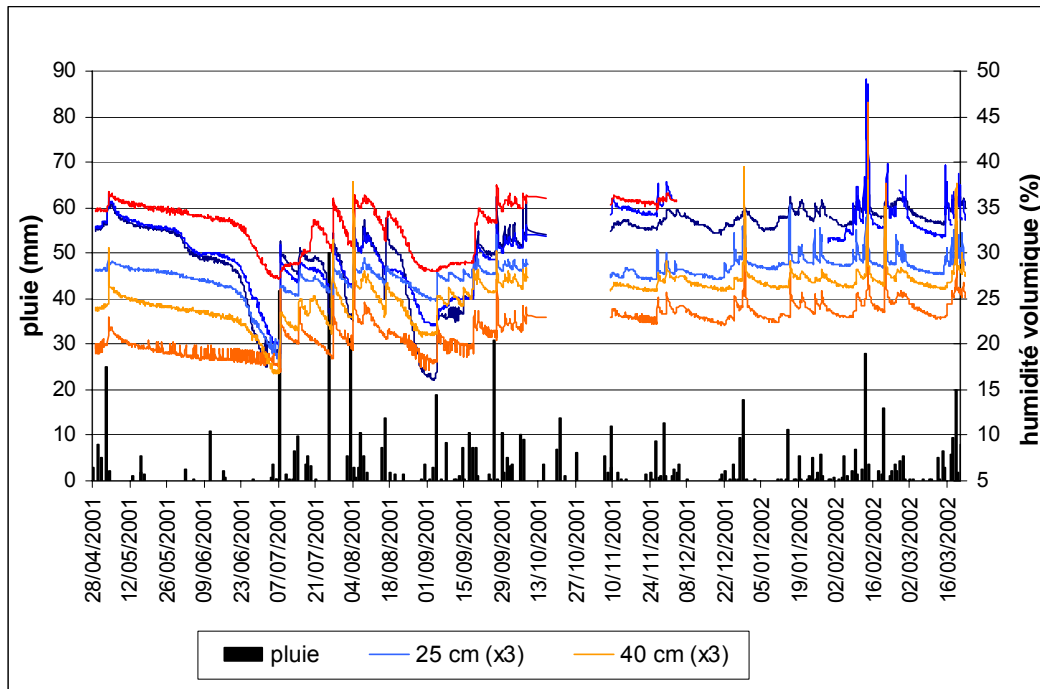


Illustration 12 : Comparaison des teneurs en eau volumique obtenues par 3 sondes pour 3 profondeurs données dans un sol agricole limoneux peu profond un peu caillouteux (d'après Morvan, 2004)

Pour chaque parcelle et chaque profondeur, trois sondes ont été installées afin de juger de la répétitivité de la mesure et de l'hétérogénéité spatiale du paramètre mesuré. Dans le cas du sol limoneux profond, quelque soit la profondeur, les écarts observés entre les 3 sondes restent relativement faibles et inférieurs à $0.04 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$. En revanche dans le sol caillouteux (dans lequel se trouvent 20 à 30 % de cailloux calcaires), les écarts de mesure entre les sondes d'une même profondeur apparaissent beaucoup plus importants (fréquemment supérieurs à $0.10 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$). Ces écarts peuvent résulter de l'hétérogénéité naturelle du sol ou d'un biais de la mesure d'une ou plusieurs sondes. Ce biais peut être lié à la présence de cailloux ou à la déformation qu'ils auraient pu causer aux guides d'onde. Devant la variabilité susceptible d'être observée, il apparaît nécessaire de multiplier les sondes à une profondeur donnée de manière à avoir une image moyenne de ce qui existe réellement dans le sol. Un nombre minimum de 3 sondes par profondeur investiguée doit être retenu.

Représentativité de la mesure et spatialisation d'une donnée « ponctuelle »

Calibration : une méthode de calibration consisterait à prélever régulièrement sur le site d'étude des échantillons de sols (répartis dans le bassin et en profondeur) destinés à la détermination de leur humidité pondérale. L'estimation de l'humidité volumique sera réalisée par correction de la densité apparente. Dans la mesure où les sols sont très caillouteux cette méthode s'avère délicate à mettre en œuvre, d'une part parce

que le prélèvement – à la tarière à main – de nombreux échantillons à des périodes correspondant à des contextes climatiques différents, sera techniquement difficile, et d'autre part parce que la détermination de la densité apparente des sols sera délicate. Une solution intermédiaire serait de procéder à la mesure des humidités pondérales sur la matrice fine du sol et de faire une correction de la teneur en eau en prenant en compte le pourcentage de cailloux, déterminé par ailleurs. Il faudrait alors aussi s'assurer de la faible porosité des cailloux. Cette méthode de calibration s'appuie sur des observations de terrain et ne peut être réalisée que sur plusieurs mois, afin d'obtenir une gamme de teneur en eau du sol suffisamment large.

Une deuxième méthode de calibration peut être envisagée en laboratoire sur des échantillons de sols remaniés. Le sol est séché puis humecté avec un volume d'eau – et donc une masse d'eau parfaitement connue, ce qui permet de déterminer l'humidité pondérale du sol. Connaissant le volume occupé par cette masse de sol et d'eau, la teneur en eau volumique est estimée. Une mesure TDR est effectuée sur le sol à cette première teneur en eau. Un deuxième apport d'eau est ensuite effectué afin d'obtenir une deuxième teneur en eau. Après mélange du sol de manière à assurer l'homogénéisation de l'humectation, une nouvelle mesure TDR est faite et ainsi de suite pour différentes valeurs de teneurs en eau. Il est alors possible de déterminer une relation entre la permittivité mesurée par le TDR et la teneur en eau. Là encore, la présence de cailloux complique cette approche notamment parce qu'entre chaque mesure, le sol est mélangé et les cailloux déplacés. La position des cailloux autour ou à proximité des guides d'ondes est donc variable et peut entraîner une hétérogénéité dans les résultats.

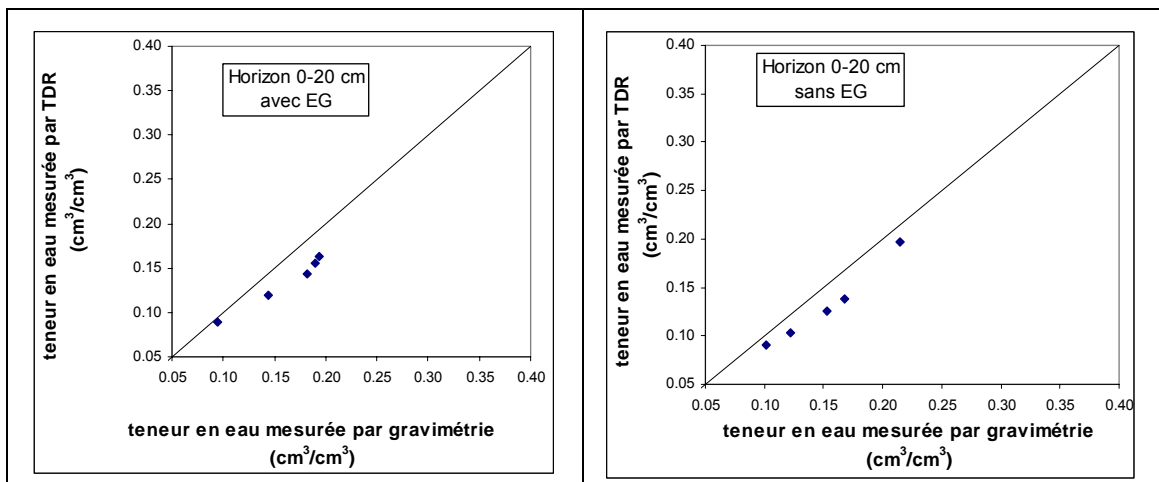


Illustration 13 : Exemples de calibrations obtenues sur une sol avec présence ou non d'éléments grossiers (Morvan, 2004)

Morvan (2004) a réalisé quelques tests préliminaires de calibration sur des sols caillouteux (environ 20 à 30 % d'éléments grossiers – illustration 4). Il apparaît, dans le cas présent, que la différence entre les teneurs en eau mesurées avec ou sans cailloux peuvent atteindre 23%.

Sur ce sol et pour la gamme de teneurs en eau testées, en présence ou non de cailloux, les valeurs obtenues par TDR sont sous-estimées par rapport à la teneur en eau mesurée par gravimétrie. Cette sous-estimation peut atteindre $0.038 \text{ cm}^3.\text{cm}^3$ (soit 20%).

Cette sous-estimation n'est pas systématique comme le montre l'illustration 13.

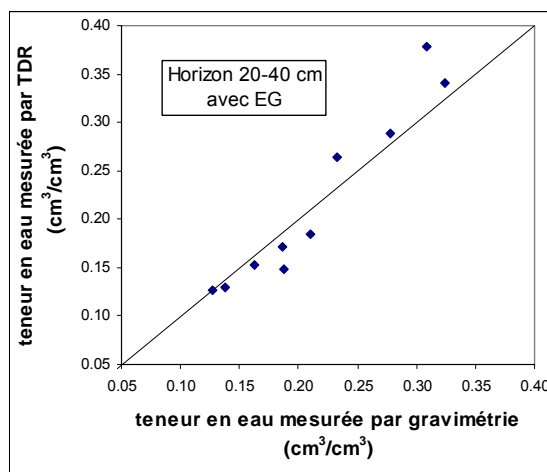


Illustration 14 : Exemple de calibration pour l'horizon 20-40 cm d'un calcosol (Morvan, 2004)

En effet, pour cet horizon, la TDR conduit pour les teneurs en eau faibles (inférieures à $0.20 \text{ cm}^3.\text{cm}^3$) à une sous-estimation alors que pour les plus fortes teneurs en eau, la TDR surestime cette valeur. Ce phénomène a déjà été montré par d'autres auteurs sans qu'aucune explication ne soit réellement avancée.

Ces exemples soulignent l'intérêt et la difficulté d'obtenir une bonne calibration, y compris en laboratoire. La difficulté est accrue par la présence de cailloux. Toutefois, peu de retour d'expériences sont disponibles car à notre connaissance peu de sites caillouteux sont instrumentés.

Des méthodes de calibration sur blocs non remaniés sont parfois décrites dans la littérature mais leur mise en œuvre semblent inenvisageable dans la mesure où elle nécessiterait le prélèvement des blocs non remaniés de plusieurs dm^3 . Cette opération paraît extrêmement difficile au vu de la nature caillouteuse des sols.

Positionnement des sondes sur les versants : il est probable que l'état de saturation d'un sol à une date donnée dépend de sa position topographique (bas – milieu ou haut de versant), abstraction faite du type de végétation qui doit cependant avoir un rôle extrêmement important.

Il apparaît donc nécessaire d'instrumenter le bassin en tenant compte des variations topographiques.

A notre connaissance, il n'existe pas de travaux portant sur l'hydrodynamique des sols du site étudié en fonction de leur position topographique. De telles études pourraient donner des orientations sur la répartition des sondes à adopter sur un versant.

Possibilité d'équipement du sous-bassin versant de Peyrolles

Devant la grande taille du bassin du Gardon d'Anduze et les problèmes évoqués pour l'instrumentation, il serait souhaitable de travailler dans un premier temps sur un sous-bassin. Cette première approche permettrait d'éprouver la technique de mesure retenue et de juger de l'intérêt ou non du suivi en continu de la teneur en eau des sols. Le sous-bassin devrait être de dimension réduite et décrit le mieux possible. Il devrait également être représentatif du bassin dans son ensemble. Le choix du sous-bassin s'appuiera sur les données disponibles (géologie, mesures de perméabilité, données d'occupation du sol, ...). Des facteurs d'accessibilité devront également être pris en compte.

En outre, l'intérêt de l'instrumentation d'un site pour la mesure en continu des teneurs en eau du sol sera accru s'il est possible de comparer ces mesures à des données hydroclimatiques. La connaissance des pluies apparaît évidemment importante pour déterminer si d'éventuelles variations de teneur en eau observées résultent d'une période humide ou sèche. Plus que la pluie elle-même, la quantité d'eau arrivant au sol est un paramètre extrêmement important à considérer au regard des chroniques de teneur en eau ; la végétation étant dense ce signal d'entrée pluie peut être modifié.

L'idéal serait également de disposer de chroniques de débit mesuré sur le sous-bassin. En effet, la confrontation des chroniques de teneur en eau du sol / débit permettrait de tester l'hypothèse selon laquelle l'état de saturation des sols influe sur le déclenchement des crues et pourrait ainsi servir d'indicateur d'alerte.

Il apparaît nécessaire de retenir un site pour lequel ces données pluie-débit pourront être acquises. Le rapprochement avec d'autres équipes travaillant sur le bassin du Gardon d'Anduze serait incontestablement un atout de valorisation du travail.

Le site de Peyrolles pourrait être pressenti. En effet, outre les travaux menés par P.A. Ayral (travaux de thèse – Ecole des Mines d'Alès) notamment sur le ruissellement, les équipes de l'UMR 6012 « Espace » du CNRS et de l'Université de Nice mènent également des actions de recherche sur ce sous-bassin.

Conclusion sur la possibilité d'équipement de Peyrolles

Bien que des efforts de recherche soient portés sur ce bassin par d'autres partenaires dont la contribution à l'étude serait sans doute très profitable, les contraintes et difficultés d'instrumentation pressenties pour ces sols – courts et caillouteux – risquent de compromettre la qualité des résultats obtenus.

En concertation avec le SCHAPI, il a donc été décidé d'abandonner ce site et de se focaliser sur un autre bassin où les sols seraient plus propices à une instrumentation.

b) Possibilité d'équipement du BV du Touch

Le bassin versant, présenté dans le paragraphe 2.1.3. a donc fait l'objet d'un projet de Recherche cofinancé par le CNES, le BRGM et l'ESAP entre 2002 et 2004.

La contribution des eaux souterraines aux crues du Touch a en particulier amené à un examen détaillé des données piézométriques, limnimétriques. Cette contribution aux crues d'inondation d'amplitude moyenne ou forte du Touch varie non seulement en fonction du point d'observation sur le bassin (St Martin du Touch, Bérat) mais aussi en fonction de l'intensité de la crue.

L'utilisation du logiciel Tempo a permis de montrer que l'intensité des pluies n'est pas le facteur déclencheur de certaines crues. L'état de saturation du sol et l'épaisseur de la zone non saturée – c'est-à-dire la hauteur du niveau piézométrique – pourrait avoir un rôle majeur dans le déclenchement des crues.

Instrumentation d'un sous-bassin du Touch

Le bassin du Touch ayant une superficie de 507 km², il n'est pas possible de l'instrumenter dans son ensemble pour assurer le suivi de la teneur en eau des sols. Un sous-bassin doit donc être sélectionné. Plusieurs critères doivent être pris en compte dans son choix.

Des aspects purement matériels sont à considérer tels que l'accessibilité des parcelles à instrumenter, l'obtention d'autorisation auprès des propriétaires des parcelles. S'il s'agit de parcelles agricoles il faudra également prévoir de demander une autorisation d'implanter des dispositifs pouvant engendrer une destruction des cultures sur une faible surface. Dans le cas de parcelles cultivées, les dispositifs devront être suffisamment enterrés pour permettre le travail du sol – environ 30 cm de profondeur – ou être implantés dans un secteur où l'agriculteur ne cultivera pas sa parcelle.

Le choix du type de sol à instrumenter se pose. En effet, plusieurs options peuvent être retenues. La basse vallée, constituée de limons sur alluvions quaternaires, est l'unité occupant la plus grande partie du bassin – environ la moitié du bassin versant. Elle pourrait être l'unité à privilégier. Par contre, les sols y présentent les plus faibles potentiels d'infiltration. En l'absence de données sur le fonctionnement des sols, il conviendra de s'assurer que les éventuelles différences d'infiltration induites par le changement de teneur en eau seront perceptibles par le type de mesures envisagées.

Les sols ayant le plus fort potentiel d'infiltration du bassin versant présenteront probablement des valeurs plus contrastées suivant l'état de saturation. Par conséquent, ces sols doivent peut-être être étudiés en priorité. Cependant, à l'inverse de la basse vallée, ils ne représentent qu'une faible surface du bassin versant – environ 25%.

Dans la mesure où dans son ensemble, le bassin présente une très forte vocation agricole, il semble nécessaire d'envisager ces parcelles. Le choix du type de cultures se pose alors.

Enfin, des aspects hydrogéologiques sont à prendre en compte. L'examen d'hydrogrammes de crues a montré que suivant le lieu dans le bassin et l'intensité de la crue, la part du ruissellement de surface et hypodermique par rapport à celle des apports d'eau souterraine variait : de l'amont vers l'aval, la contribution des eaux souterraines est croissante, puisque les bassins hydrogéologiques drainés sont plus importants. A l'inverse, la partie amont du bassin, occupée par des molasses argileuses très peu aquifères, est le siège d'un ruissellement dominant. De manière générale, l'apport direct des eaux souterraines au débit du Touch en période de crue est assez faible. Cependant, il semble que l'état de recharge des nappes alluviales ait un rôle prépondérant dans la genèse des crues. Le choix du site étudié dépend donc des objectifs fixés : si seule l'influence du degré de saturation du sol doit être étudiée, il conviendra de sélectionner un secteur où les nappes alluviales n'ont pas ou très peu d'incidence sur le développement des crues, c'est-à-dire la partie amont du bassin versant. Au contraire, si l'objectif de l'étude est d'étudier l'état de saturation des sols, couplé à l'état de recharge de la nappe (cas le plus défavorable pour la génération de crues d'inondation), le sous-bassin sélectionné devra être situé dans les terrasses alluviales.

Le choix du sous-bassin doit également être guidé par l'existence de mesures complémentaires à celles qui seraient effectuées dans le cadre de cette étude. La parfaite connaissance des débits quittant le sous-bassin retenu apparaît comme un élément de base nécessaire pour apprécier ou non l'influence de l'état de saturation des sols dans le déclenchement des crues. L'existence de piézomètres et la présence de pluviomètres sur ce sous-bassin seront autant d'éléments susceptibles de valider les interprétations.

Outre les aspects de représentativité du sous-bassin dans le bassin, de processus dominant sur ce sous-bassin, le choix du sous-bassin devra être guidé par l'existence de travaux et mesures complémentaires. Une concertation avec les différentes équipes de recherches, le SCHAPI et la DIREN Midi-Pyrénées permettra de sélectionner un ou plusieurs sous-bassins.

Les recommandations techniques relatives à l'installation, la calibration des sondes, au contrôle de la mesure au cours du temps évoqué dans le paragraphe relatif au Gardon d'Anduze restent bien évidemment valables.

d) Conclusions sur le « Teneur en humidité des sols »

L'inventaire des techniques de mesure de la teneur en eau du sol a montré qu'il n'existait pas de méthodes qui puissent être facilement mises en place à l'échelle d'un bassin et garantir l'acquisition en continu - avec transmission des données - de mesures de teneur en eau parfaitement fiables et précises.

Une tentative d'instrumentation d'un sous-bassin à sélectionner pourrait être faite à l'aide de sondes TDR (Time Domain Reflectometry), outil utilisé depuis le début des années 70 par de nombreuses équipes et dont la fiabilité est prouvée.

Les conditions d'utilisation sur un sous-bassin du Gardon d'Anduze ne seraient pas optimales notamment de part la nature extrêmement caillouteuse des sols. Ces cailloux posent des problèmes à différents niveaux et il ne paraît pas envisageable d'installer les sondes dans le sol directement par enfouissement. Le décapage du sol avant la mise en place de la sonde puis la remise en place pourrait constituer une solution de secours. La qualité de la mesure en sera toutefois probablement fortement affectée. En effet, la structure du sol est décrite comme un facteur affectant la mesure par plusieurs auteurs. Les cailloux posent également problème pour la calibration des sondes. En plus de mesures de teneurs en eau pondérales réalisées *in situ*, une calibration en laboratoire sur sol remanié devra être réalisée. Elle sera complétée par une détermination de la densité apparente du sol qui permet de convertir les teneurs en eau pondérales en teneurs en eau volumiques et réciproquement. La détermination de la densité apparente sera également compliquée par la présence des cailloux.

Devant les difficultés techniques et le risque non négligeable d'obtenir des données de qualité moyenne, un autre bassin est pressenti en accord avec le SCHAPI ; il s'agit du bassin du Touch. Les sols y sont plus profonds et moins caillouteux laissant présumer que l'installation sera plus aisée et que les mesures y seront de meilleure qualité.

L'instrumentation du bassin dans son ensemble est inenvisageable, il est donc nécessaire de choisir un sous-bassin à instrumenter. Différentes considérations seront à prendre à compte (surface occupée par le type de sol retenu, potentiel d'infiltration, occupation du sol, importance du ruissellement par rapport aux apports d'eau souterraine...). De plus, il est souhaitable de travailler sur un sous-bassin dans lesquels se trouvent des piézomètres et des pluviomètres ; ces données seront utiles dans la compréhension du développement des crues.

Le choix du sous-bassin du Touch doit donc se faire en concertation avec le SCHAPI, la DIREN Midi-Pyrénées et d'autres partenaires susceptibles de travailler sur le même site. La suite du projet et notamment la production du prochain livrable D3 « rapport de plan d'échantillonnage et du volume effectif de matériel à acquérir » ne pourront intervenir qu'après validation de la technique retenue et le choix d'un sous-bassin par le SCHAPI.

Une visite de terrain a été réalisée avec l'ESAP et la DIREN Midi-Pyrénées afin de pré-sélectionner un ou plusieurs sous-bassins. Une estimation des matériels à installer et à acquérir est en cours par le BRGM et la DIREN. Cette proposition sera soumise au SCHAPI qui devra valider le choix du site et du plan d'échantillonnage proposé.

2.3. MODELISATION HYDROLOGIQUE

Dans le cadre de la modélisation hydrologique du bassin versant du Gardon d'Anduze par le logiciel STREAM, les travaux de recherche sont menés suivant trois axes principaux : i) des études réalisées sur le logiciel afin d'améliorer et d'adapter son fonctionnement notamment dans le cadre d'une utilisation sur le Gardon d'Anduze, ii) la calibration des valeurs de perméabilité mesurées sur le terrain à l'aide d'événements pluvieux ruisselants réels et iii) la production de scénario de référence. Ces trois points étant, dans une certaine mesure, interdépendant, ils sont successivement abordés pendant les trois années du projet. Si au cours de la première année l'accent était placé sur l'adaptation et le développement du modèle, au cours de cette deuxième année, les travaux se sont concentrés sur les simulations d'événements réels en collaboration avec l'Ecole des Mines d'Alès qui a fourni les données pluviométriques sur l'ensemble du Gardon et débitométriques pour les stations d'Anduze, de Mialet et de Saumane.

2.3.1. Simulation d'événements réels sur le Gardon d'Anduze

Pour effectuer les simulations nous disposons d'une base de données d'événements pluvieux-ruisselants (Illustration 15) mesurés sur le Gardon d'Anduze et rassemblés par l'Ecole des Mines d'Alès. La base de données comprend des données pluies sous la forme d'image radar avec des techniques de calibration qui diffèrent et évoluent avec les technologies au cours du temps. Le pas de temps des images radar est de 5 ou 6 minutes. La base de données comprend également des mesures de débit au pas de temps de 10 ou 12 minutes en trois endroits du bassin (Illustration 16). Les coordonnées des exutoires (Lambert II étendu) qui ont été utilisées sont :

- bassin versant du Gardon d'Anduze à Anduze X: 732 121 Y: 1 896 959 ;
- bassin versant du Gardon de Saint-Jean à Saumane : X: 714 231 Y: 1 903 081 ;
- bassin versant du Gardon de Mialet à Mialet : X: 726 081 Y: 1 903 979 ;

N°	Date	Image Radar (coefficient de calibrage - F _C)			Anduze		Mialet		Saumane	
					P ¹	Q ²	P	Q	P	Q
1	Le 21 septembre 1994	F_C = 6³	F _C variable		243	775	264	263	242	155
2	Le 18 septembre 1995	F _C = 4	F_C = 5,4 F _C variable		199	946	220	277	216	130
3	Le 3 octobre 1995	F_C = 4	F _C variable		212	1608	168	356	145	680
4	Le 13 octobre 1995	F_C = 4	F _C variable		188	1411	164	249	107	n-c ⁴
5	Le 25 novembre 1995	F_C = 3.1	F _C variable		98	462	95	124	80	103
6	Le 10 janvier 1996	Image radar pour ALHTAÏR trop courte			n-c	650	n-c	n-c	n-c	n-c
7	Le 17 octobre 1996	F_C = n-c	F _C variable		142	164	n-c	n-c	n-c	n-c
8	Le 10 novembre 1996	F_C = 1.8	F _C variable		167	693	183	222	187	170
9	Le 6 octobre 1997	F_C = 2.5			101	n-c	97	n-c	93	n-c
10	Le 4 septembre 1998	F_C = n-c			25	n-c		n-c		n-c
11	Le 17 mai 1999	F_C = n-c			135	706	n-c	n-c	n-c	114
12	Le 19 septembre 2000	F_C variable			137	327	141	139	110	10
13	Le 28 septembre 2000	F_C variable			197	1177	194	428	205	240
14	Le 6 octobre 2001	F_C variable			27	n-c	13	n-c	7	n-c
15	Le 14 mars 2002	F_C variable			62	666	36	70	10	n-c
16	Le 3 juin 2002	F_C variable			81	25	87	20	87	2
17	Le 2 septembre 2002	F_C variable			15,3	0	12,2	0	13,3	0
18	Le 3 septembre 2002	F_C variable			1,7	20	1,2	4	3,3	1
19	Le 8 septembre 2002	F_C variable	SAC ⁵	Rhéa	273	3634 ₆	186	914	188	833
20	Le 15 novembre 2003	F_C variable			136	n-c	138,8	n-c	125,9	n-c

Illustration 15 : Présentation des événements disponibles pour la modélisation

¹ Avec P la lame d'eau moyenne sur le bassin versant en mm

² Avec Q, débit maximum en m³/s

³ En **gras** valeur du F_C utilisé en temps réel, source des données de lame d'eau moyenne

⁴ n-c : données manquantes

⁵ Image re-calibré par le SAC-30 a posteriori – Image re-calibré par Rhéa a posteriori

⁶ Les débits proposés ici sont ceux proposés par SIEE après une phase de modélisation (SIEE, 2004)

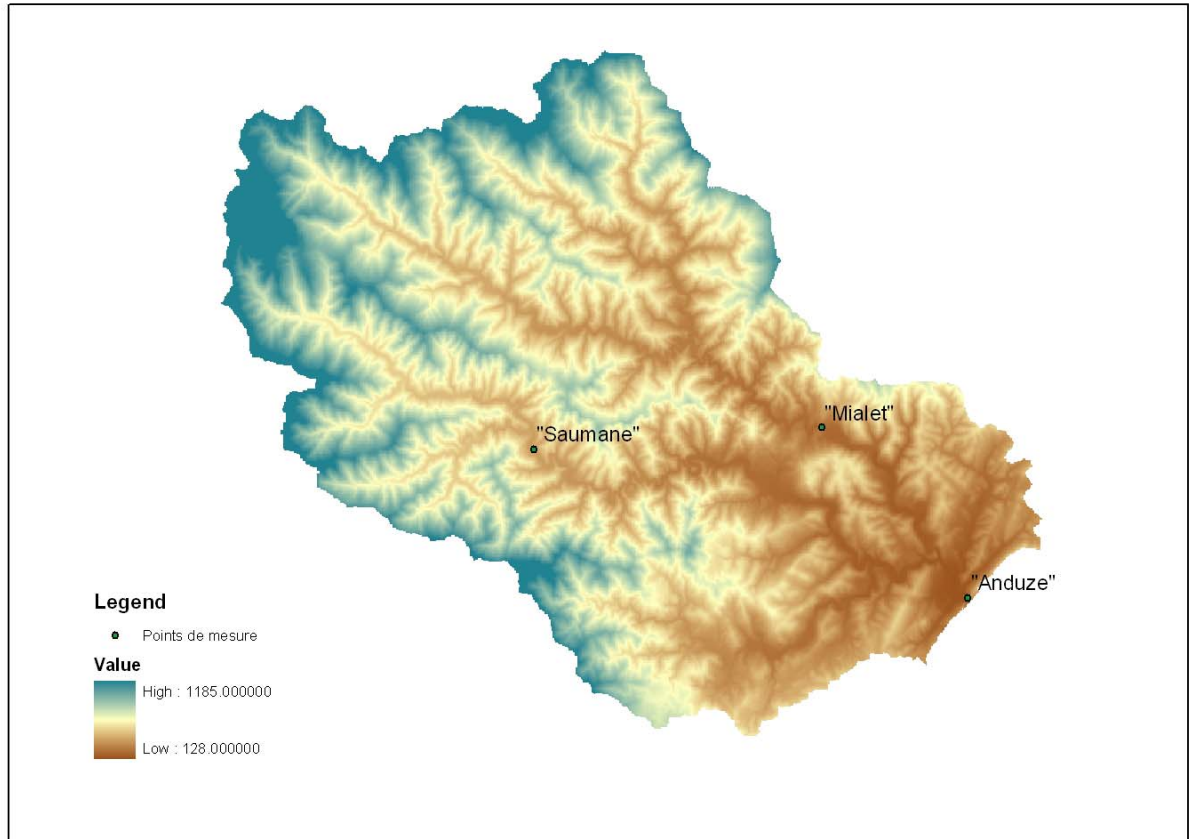


Illustration 16 : Positionnement des stations de mesure du débit de Saumane, de Mialet et d'Anduze sur le modèle numérique d'altitude du bassin versant du Gardon d'Anduze.

Les vingt événements présentés dans l'illustration 15 ne sont pas tous de qualité égale. L'École des Mines d'Alès, au cours de la thèse de P.A. Ayrat a établi une caractérisation des événements en élaborant des Indices de confiance sur les images radar et les données de débit pour arriver à un tableau synthétique qui attribue des indices de confiance pour les 20 événements (Illustration 17).

Indice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Bon	x		x	x					x									x	X	
Moyen								x					x	X		x	x			x
Faible		x			x							x			x					
Données manquantes						x	x			x	x									

Indice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Bon	x		x					x					x				x	x		
Moyen					x														X	
Faible		x		x		x	x				x	x			X	x				
Données manquantes				<i>x</i> ⁷		x	x		x	x	x			x	X					x

Indice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Très bon	x		x																X	
Bon								x	x				X				x		x	
Moyen				x										x						
Faible					x	x	x				x	x				x				
Très faible		x													x					
Données manquantes						x	x		x	x	X			x						x

Illustration 17 : Indices de confiance des images radar, des mesures de débit et des événements retenus (Source : thèse P.A. Arsal, EMA)

⁷ Les *x en italiques* traduisent le fait qu’il manque une ou plusieurs stations à l’analyse des débits réalisée

Après analyse de cette classification, nous avons sélectionné quatre événements pluvieux ruisselants (Illustration 18) dont les données nous semblaient suffisamment fiables pour effectuer les simulations. Il s'agit des événements 1, 8, 13 et 19.

N° d'événement		1	8	13	19
	Date	21/09/1994	10/11/1996	28/09/2000	8/09/2002
	Image Radar (coefficient de calibrage - FC)	FC = 6 / FC variable	FC = 1.8 / FC variable	FC variable	FC variable
	P48/IPA (mm)	3/10.1	0/4	7/17	20
Anduze	Pluie moyenne (mm)	243	167	197	273
	Volume ruisselé (m3)	31702129	49700133	24560421	62348981
	Débit maximum (m3/s)	775	693	1177	3634
	Coefficient de ruissellement (%)	24.2	55.2	23.1	42.3
Mialet	Pluie moyenne (mm)	264	183	194	186
	Volume ruisselé (m3)	9.00E+06	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07
	Débit maximum (m3/s)	263	222	428	914
	Coefficient de ruissellement (%)	15.8	33.8	29	33
Saumane	Pluie moyenne (mm)	242	187	205	188
	Volume ruisselé (m3)	4.00E+06	1.00E+07	4.00E+06	1.00E+07
	Débit maximum (m3/s)	155	170	240	833
	Coefficient de ruissellement (%)	17.7	79.7	20.4	79.3

Illustration 18 : Présentation des quatre événements sélectionnés pour les simulations. Avec P48/IPA des indices de hauteur de pluie antécédente.

Les quatre événements sélectionnés sont tous significatifs avec des hauteurs de pluie moyenne s'étalant de 167 à 273mm. On note d'ores et déjà la très grande variabilité des coefficients de ruissellement qui n'est pas en rapport avec les différences de hauteurs de pluie (de 24 à 55 % pour Anduze et de 18 à 80 % pour Saumane) et qui laisse donc présager de l'importance de tenir compte de l'hétérogénéité spatiale des pluies en fonction de l'hétérogénéité spatiale de la couche de surface et de ses propriétés hydrodynamiques (d'autant qu'il n'y a pas de changement significatif de l'occupation du sol entre les différents événements).

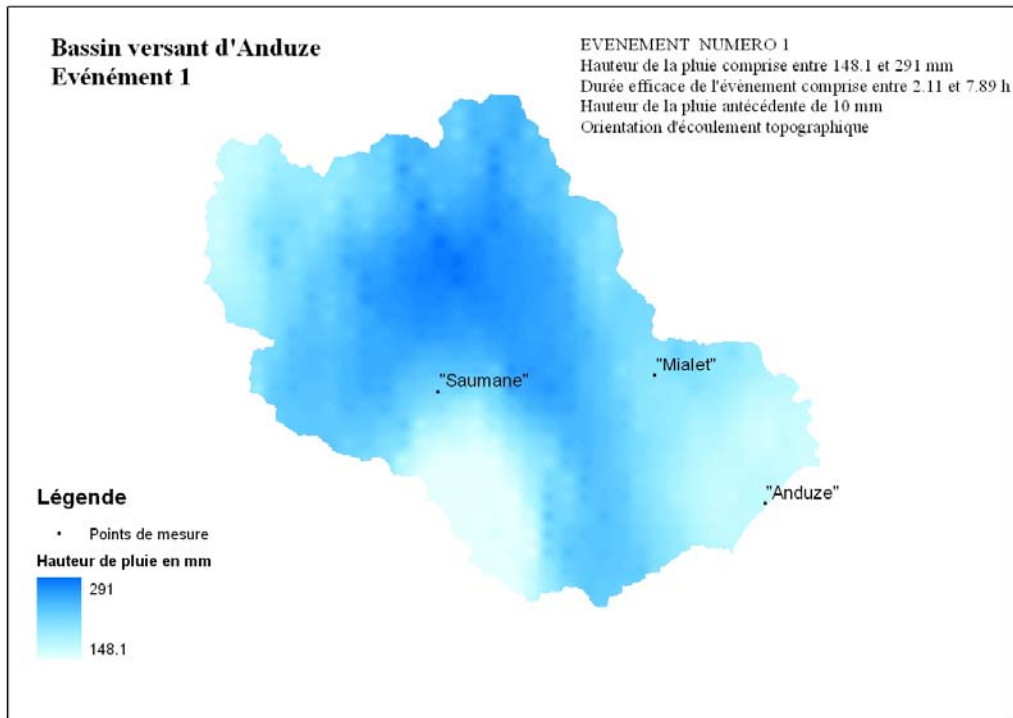


Illustration 19 : Carte des hauteurs de pluie pour l'événement numéro 1

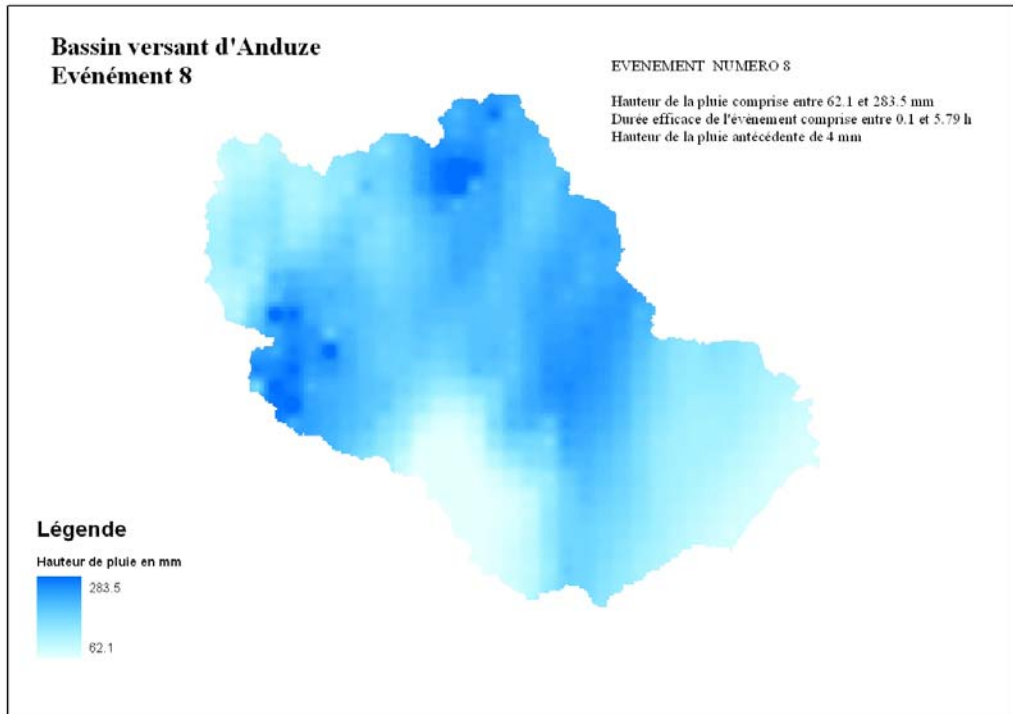


Illustration 20 : Carte des hauteurs de pluie pour l'événement numéro 8

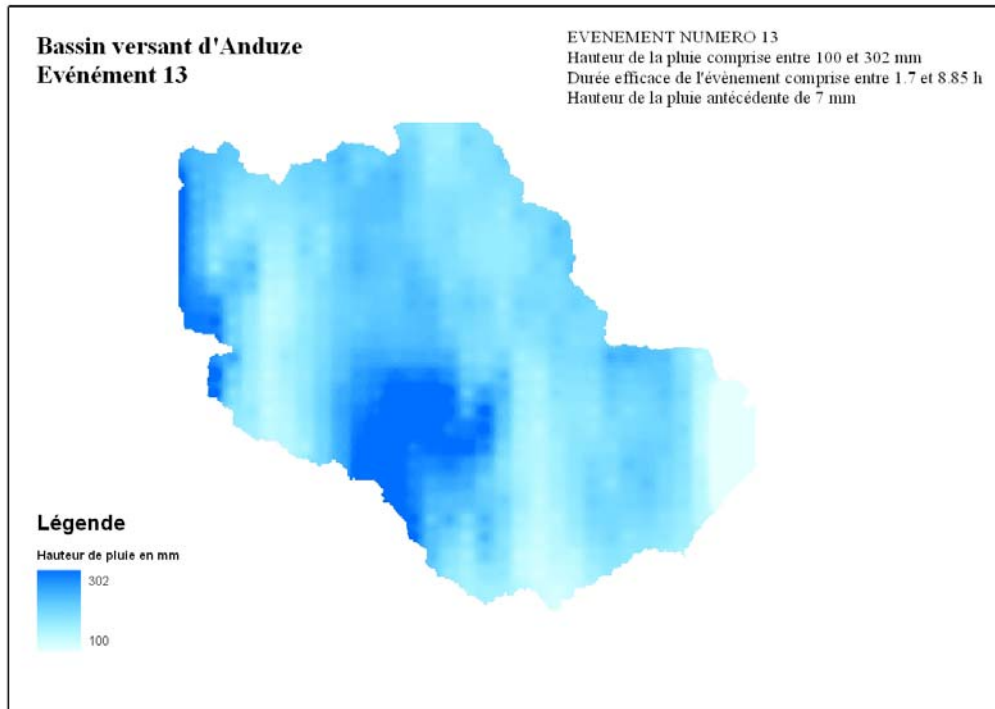


Illustration 21 : Carte des hauteurs de pluie pour l'événement numéro 13

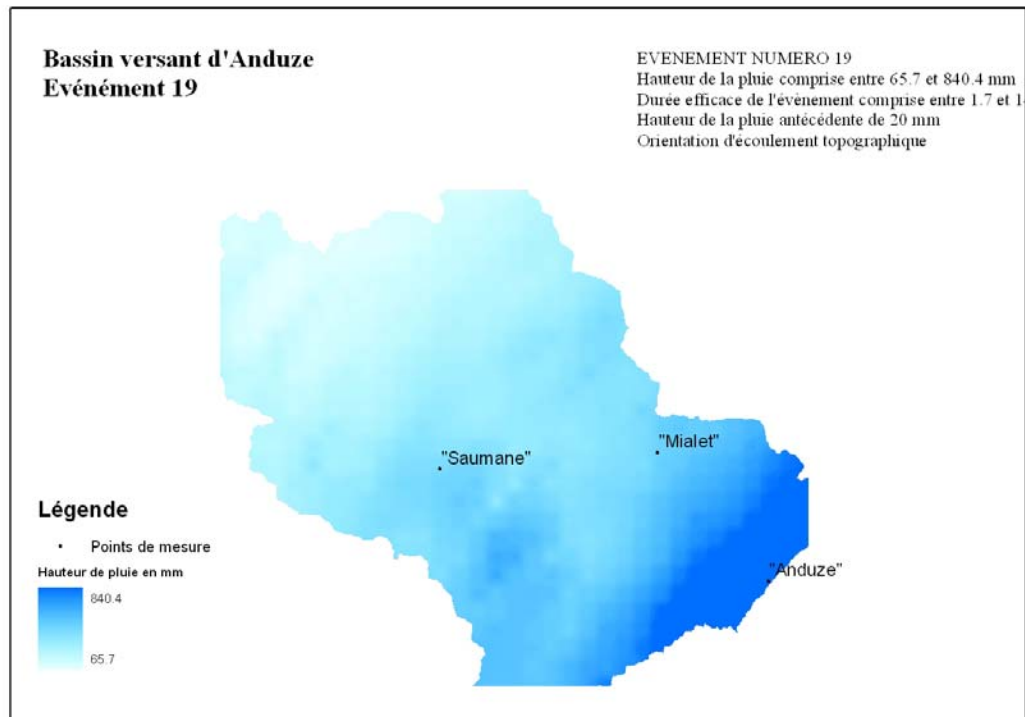


Illustration 22 : Carte des hauteurs de pluie pour l'événement numéro 19

Les illustrations 18 à 22 qui représentent les cartes de hauteurs de pluie pour les quatre événements démontrent d’ailleurs très clairement l’importance de la variabilité spatiale des pluies et donc l’intérêt de privilégier l’utilisation de modèles distribués. Outre une variation spatiale importante, les pluies cévenoles se caractérisent également par une forte dynamique temporelle, avec des intensités qui peuvent atteindre des seuils élevés. STREAM n’étant pas un modèle dynamique, il convient d’arriver à tenir compte de l’évolution des intensités au cours d’un événement pluvieux (évolution des intensités qui constitue une caractéristique importante de l’événement en terme de production de ruissellement) de manière indirecte. Pour cela, nous décrivons l’événement au travers d’une durée efficace et donc d’une intensité efficace qui tient compte des variations d’intensité intra-événement. Le calcul de ces durées efficaces s’effectue en enlevant à la durée totale les temps pendant lesquels l’intensité est inférieure à la capacité d’infiltration minimale de la surface modélisée.

Pour réaliser les simulations nous avons dans un premier temps utilisé les valeurs de perméabilités présentées lors des premiers essais de STREAM (Cerdan et al., 2004). Ces valeurs respectent les différences relatives observées par les mesures d’infiltration au double anneau et par simulation de pluie mais sont pondérées pour représenter des valeurs réalistes par rapport aux sols les plus infiltrants.

Les volumes ruisselés simulés pour les quatre événements aux trois exutoires équipés sont présentés en fonction des volumes observés sur l’Illustration 23.

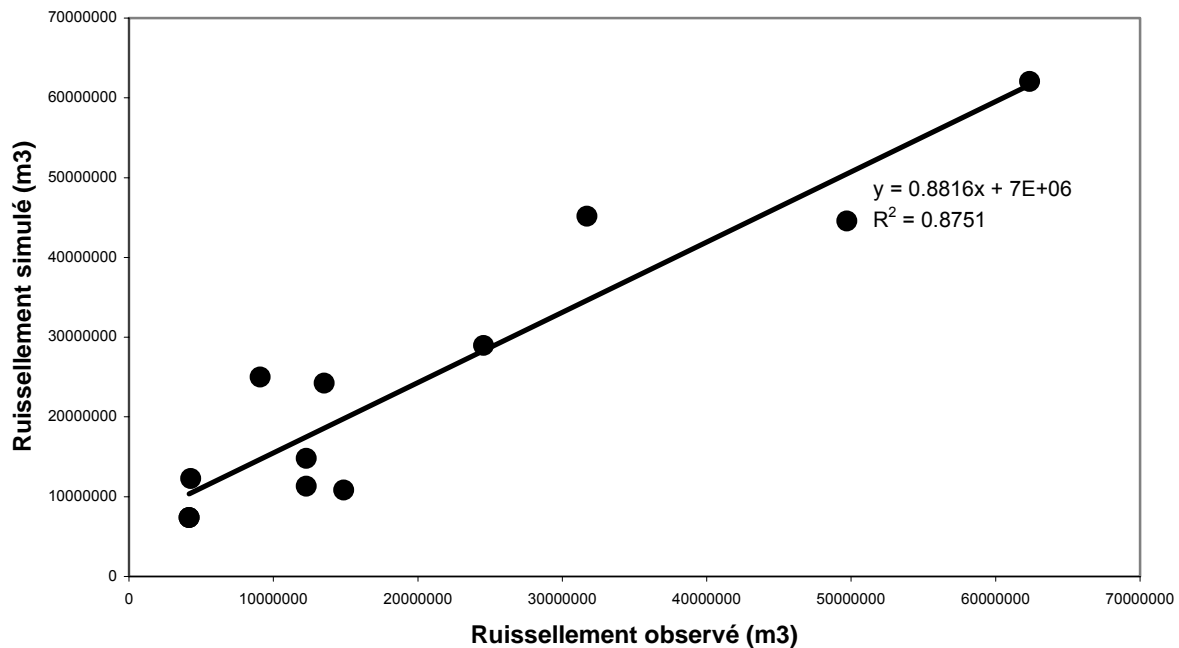


Illustration 23 : Volumes ruisselés simulés pour les quatre événements sélectionnés aux trois stations de mesure (Anduze, Mialet, Saumane) en fonction des volumes ruisselés observés.

Il en ressort que le modèle arrive à reproduire les événements ruisselant avec satisfaction. Il est à noter que ce sont les valeurs d'infiltration initiales qui ont été conservées **et que les événements ne sont pas calés individuellement, les mêmes jeux de paramètre ont été conservés pour tous les événements**. Les courbes de tendance par événement sont présentées sur l'illustration 24.

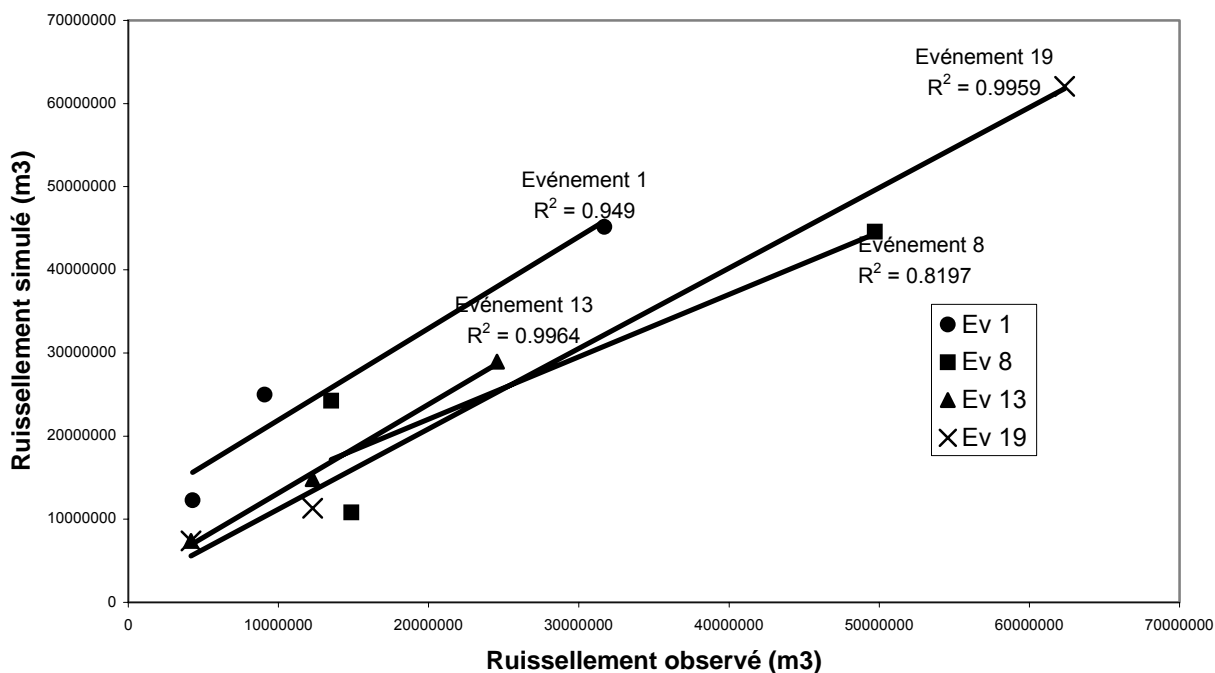


Illustration 24 : Volumes ruisselés simulés pour les quatre événements sélectionnés aux trois stations de mesure (Anduze, Mialet, Saumane) en fonction des volumes ruisselés observés. Les courbes de tendance sont tracées pour chaque événement.

Les résultats des simulations par événement ne font pas ressortir d'incohérence particulière à un événement si ce n'est une surestimation des volumes pour l'événement numéro 1. Dans ce contexte il n'est donc pas nécessaire de recalibrer les valeurs d'infiltration plus avant (pas de biais systématique pour tous les événements). Seul une recalibration événement par événement permettrait éventuellement d'améliorer les résultats, mais une telle procédure n'est pas souhaitable ici étant donné notre objectif de robustesse et de transportabilité du modèle. En effet le modèle a pour but de produire des scénarios sur des petits bassins non jaugés et donc toute étape de calibration fine par événement ou simplement basée sur des valeurs de débit est impossible. Pour pouvoir transposer un modèle dans des bassins non jaugés il est nécessaire que ses règles de productions soient élaborées et calées sur des paramètres mesurables comme la morphologie, la pédologie/géologie ou l'occupation du sol. Au vu de ces premiers résultats de validation, le modèle STREAM est donc assez robuste pour être utilisé en dehors du Gardon d'Anduze (notamment sur les surfaces où les mesures de perméabilité au double anneau ont été réalisées).

Les illustrations 25 et 26 présentent la comparaison des volumes ruisselés simulés et observés par événement et par bassin versant. On retrouve la surestimation de l’événement numéro 1, mais globalement le modèle arrive à reproduire les différences de volume et de coefficient de ruissellement existant entre les différents événements et bassins, notamment le fait que c’est l’événement 8 qui possède le coefficient de ruissellement le plus élevé mais que c’est l’événement 13 qui possède le volume ruisselé le plus important. Il est aussi intéressant de noter que les meilleurs résultats sont obtenus pour la station d’Anduze.

Maintenant que les ordres de grandeurs des valeurs de perméabilité permettant de reproduire les volumes ruisselés sont établis, les perspectives concernant la modélisation hydrologique vont surtout consister à essayer d’affiner la résolution spatiale des unités hydrologiques homogènes. Pour cela une prise en compte plus poussée de l’occupation du sol sera réalisée en tenant compte du ratio entre la variabilité des valeurs de perméabilité et la densité des unités hydrologiques.

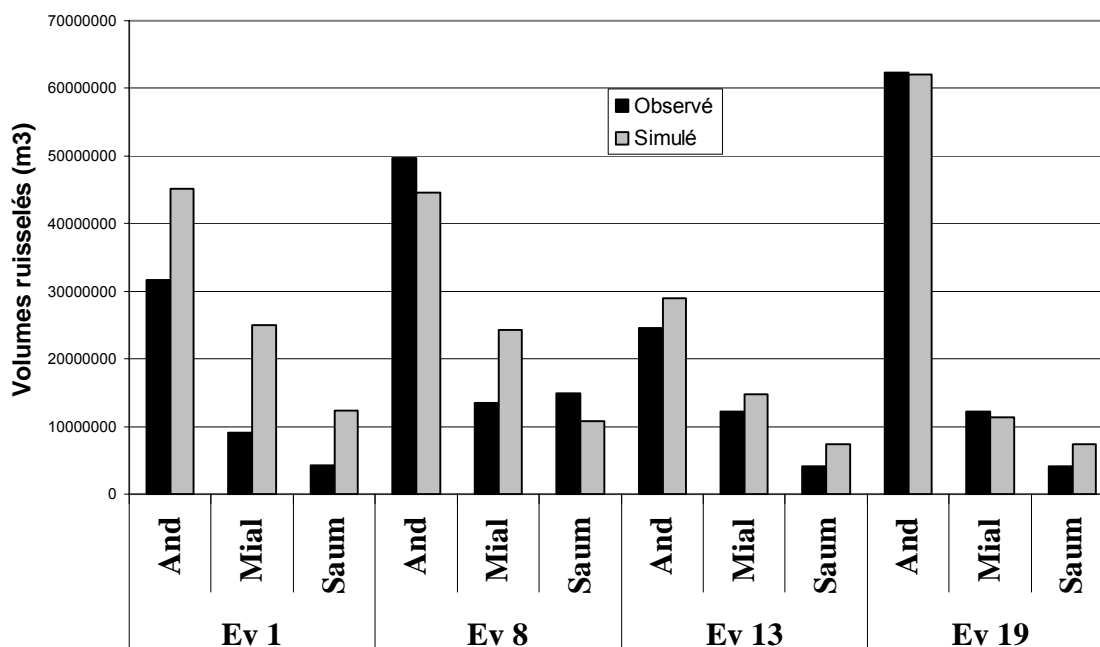


Illustration 25 : Comparaison des volumes ruisselés simulés et observés par événement et par bassin versant.

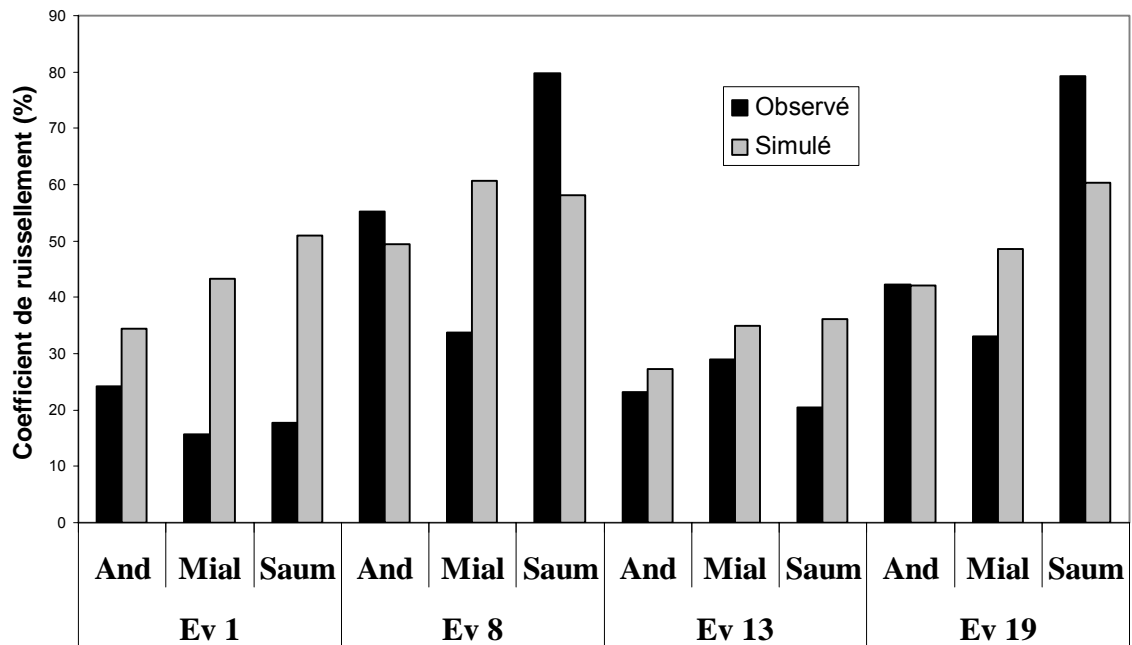


Illustration 26 : Comparaison des coefficient de ruissellement simulés et observés par événement et par bassin versant.

2.3.2. Production de scénarios de référence

Comme montré au paragraphe précédent, le modèle est désormais en place, et suffisamment robuste pour être transposé en dehors du seul Gardon d'Anduze et donc utilisé pour réaliser des scénarios de référence qui puissent servir d'indicateur. Pour être utiles, ces scénarios se doivent d'être réalistes mais aussi suffisamment génériques pour pouvoir être représentatifs et donc comparés à des situations réelles plus ou moins variées. Pour représenter la variabilité temporelle (hauteur de pluie en fonction du temps) on peut utiliser des indices classiques, tel que la période de retour d'un événement ou d'une intensité donnée. Par contre la représentation de la variabilité spatiale des événements (qui est très important pour les pluies cévenoles à l'échelle du bassin versant) est plus contextuelle et nécessite d'être adaptée en fonction de l'objectif visé. A cette fin, une réunion a été programmé entre le BRGM Orléans, le BRGM Montpellier, l'Ecole des Mines d'Alès et le SPC du Gard.

L'intérêt de cette démarche est qu'elle permet un déploiement sur des bassins versants non jaugés sur lesquels les modèles classiques ne peuvent fonctionner faute de calage. Des premiers scénarios pourraient ainsi être définis sur le bassin de l'Avène où de surcroît, les mesures de perméabilité ont été acquises pendant cette deuxième année.

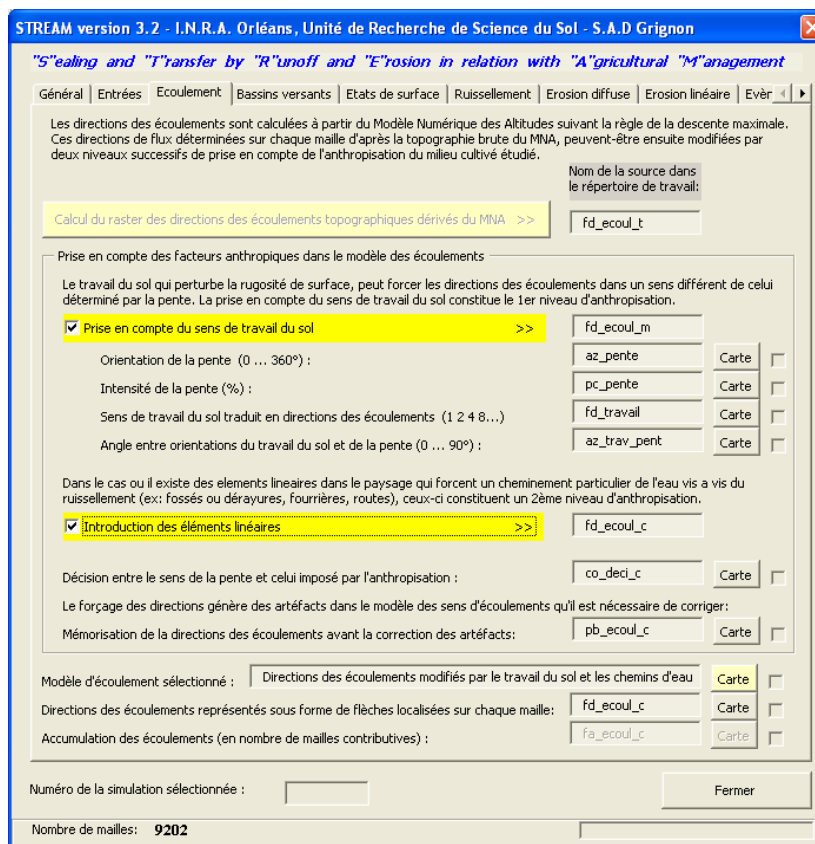
2.3.3. Evolution du logiciel STREAM

Deux voies de développement sont actuellement en cours. Ces développements sont réalisés au sein du projet parallèle CNES-APIBAR, ils sont mentionnés ici car l’évolution de STREAM bénéficiera aussi au projet SCHAPI.

D’une part l’amélioration de la version dynamique STREAM KIN (spatialisation du coefficient de Maning, spatialisation des pluies, essai d’optimisation du code) au BRGM et d’autre part l’introduction des motifs linéaires dans le calcul des sens d’écoulement à l’INRA d’Orléans.

L’introduction des motifs linéaires se base sur les travaux de Souchère et al. (1998) et permet de tenir compte de l’influence des motifs agraires (sillons de labours, dérayures, limites de parcelles) ou de motifs pouvant potentiellement rediriger les écoulements (fossés, canaux). Le développement est encore en cours car la correction automatique des artéfacts suite à l’introduction des facteurs anthropiques dans le modèle de direction des écoulements entraîne des problèmes d’intersections non corrigées par la procédure actuelle ou introduites par erreur par l’algorithme de correction.

Nouvelle version :



Les principaux développements se trouvent sur la page du modèle des directions des écoulements. Plusieurs nouvelles couches sont générées par la procédure de correction des artéfacts et peuvent être affichées :

1. un raster qui mémorise la localisation et la nature de la correction effectuées ;
2. de nouvelles sorties qui permettent de visualiser les sens d'écoulements sous forme de flèches.

De même que pour les aspects isotopiques mentionnés en 2.2.2 et financés par d'autres voies, les résultats de ces développements seront donc portés à connaissance du SCHAPI.

3 Conclusion sur les travaux menés en 2004

Ces travaux de 2e année ont été très significatifs

- des méthodes pour caractériser de façon la plus exhaustive possible le potentiel d'infiltration des surfaces du bassin sont maintenant bien établies avec l'extension des cartes produites à l'Avène et au Touch ;
- les méthodes requises pour aborder et suivre l'état de saturation des terrains ont été sélectionnées et leur implantation sur un site pertinent ont été acceptées à la satisfaction du SCHAPI, bénéficiant ainsi de l'intérêt de la DIREN et du CNES.
- l'adaptation du modèle STREAM est maintenant atteinte, avec les apports essentiels de la prise en compte d'une pluie distribuée de façon hétérogène au sein du bassin versant, la prise en compte des conditions d'infiltration des sols de ces régions cévenoles et la calibration des données utilisées en entrée du modèle.
- le stade opératoire du modèle est atteint avec la production de scénarios traduisant le comportement de ces bassins pour des conditions initiales connues et des exemples de scénarios d'estimation des volumes d'eau ruisselée sont produits pour des événements de référence.
- l'année 3 permettra la fourniture de catalogue de cartes et données simulées consultables avant et pendant la mise en vigilance météo, Le résultat final, à savoir des cartes de volumes ruisselés, sera associé à une gamme d'évènements types et de conditions initiales type, car l'exhaustivité ne peut être de mise. De plus il devra prendre en considération un facteur d'erreur plus ou moins important selon les incertitudes intégrées dans les données.

Un objectif complémentaire est, par ailleurs, qu'une partie des données et paramètres introduits pour mettre en œuvre ce modèle STREAM - Sud soient utilisables en entrée du modèle de prévision ALHTAÏR utilisé par exemple au SAC30. En effet Althaïr est basé essentiellement sur des données climatiques, morphologiques et hydrologiques, mais ne prend pas en compte l'occupation du sol, la géologie des terrains et leurs caractéristiques pédologiques, paramètres qui interviennent dans la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol. Ces informations pourraient permettre de mieux caler le modèle de production. Cette tâche peut être considérée comme facultative car elle sera certainement sous le contrôle des opérateurs d'ALHTAÏR. Il convient seulement pour le BRGM d'être vigilant à mettre à disposition des paramètres exploitables par ce modèle.

4 Bilan de Production

Ces travaux de seconde année ont donné lieu à :

- 2 comptes-rendus de réunion du 28 septembre 2004 et 20 janvier 2005 (annexes 3 et 4) ;
- 2 rapports d'avancement intermédiaires en octobre et décembre 2004 dont un rapport de sélection du type de matériel à acquérir pour le BV numérique et un rapport d'avancement des activités ;
- ce rapport technique de fin d'exercice ;
- une base de données 2004 des mesures d'infiltrométrie double anneau ;
- une cartographie de l'occupation du sol issue de la classification de données SPOT bi-date, en format compatible avec les requêtes de la DDE –Gard ;
- une carte numérique du potentiel d'infiltration des sols sur l'Avène pour intégration dans STREAM et Althair en 2005 ;
- rapport d'avancement de la métrologie temps réel et de la réflexion sur les couplages d'indicateurs fourni en parallèle.

Ils ont par ailleurs satisfait aux objectifs de seconde année et leur poursuite et évolution sont présentées dans le chapitre 3.

5 Planification Année 3

5.1. AXES DE COLLABORATION ET DEVELOPPEMENT

Les objectifs à 3 ans sont de tester d'autres outils pour venir en appui à ALTHAÏR et de préparer une capacité de production opérationnelle d'informations: avec la contribution du BRGM, à terme sont espérés : (1) la possibilité de mise en place sur une grande échelle d'un protocole et d'un réseau de collecte de données sur les infiltrations potentielles et des états de saturation des terrains, (2) la définition, voire le portage dans les Services de Prévision des Crues, d'un outil adapté à la production de données d'entrée à Althair et de scénarios en appui au diagnostic des risques et à la simulation de mesures correctives possibles.

Cette opération correspond à la poursuite de la mise en place de systèmes de mesures in situ et de l'adaptation du modèle STREAM-Ted au cas des bassins du Sud de la France, débutée en 2003, pour, à terme, produire des indicateurs utiles à la compréhension des mécanismes d'écoulement et à l'élargissement de l'accès à des indicateurs d'alerte.

La philosophie est de concourir à la mise en place de méthodes de suivi de bassins versants numériques expérimentaux pour apporter des indicateurs en appui à la prévision.

5.2. TACHES PLANIFIEES EN 2005 (AVRIL 2005 A DECEMBRE 2005) :

Infiltration potentielle : Poursuite de la mise en place du protocole de production de cartes de potentiel d'infiltration des milieux en fonction des états initiaux, selon une méthode reproductible. Reflexion sur l'intercomparaison des mesures aux différentes échelles et suivant les différents protocoles

Mesures in situ avec l'EMA et Hydrosociences (protocole EMA + simulateur de pluie)

Comparaison des résultats de mesures obtenus avec les différents protocoles (parcelle 10 m² EMA, parcelle m² IRD, double anneau), avec une représentativité spatiale variable (faible pour les deux à 5 sites EMA, importante pour les 70 sites double anneau)

- **Etats de saturation des terrains** : identification et mise en place d'une métrologie in situ susceptible de produire en continu des informations sur les propriétés hydrodynamiques des sols. Acquérir des chroniques de données, définir des indicateurs pouvant renseigner en temps réel sur les états de saturation amplifiant les risques de ruissellement lors du déclenchement d'un évènement extrême et

prévoir de les délivrer en temps réel aux utilisateurs : il s’agit de voir si de tels indicateurs peuvent améliorer la mise en vigilance dans l’utilisation des modèles de prévision. En cas d’indicateurs pertinents, un protocole sera proposé pour une extension sur des zones critiques. Mise en place d’un démonstrateur temps réel

- **Poursuite de l’adaptation du modèle** STREAM de type STREAM-Sud pour produire des scénarios d’estimation des volumes d’eau ruisselée pour des événements de référence de façon à fournir un début de référentiel de cartes et données simulées consultables avant et pendant la mise en vigilance météo et fournir des données et paramètres utilisables en entrée du modèle de prévision ALHTAÏR utilisé au Service de Prévision des Crues du Gard (SPC Gard, anciennement SAC 30).

5.2.1. Description des opérations :

Module 1. Potentiel d’infiltration	Acteurs
1. Acquisition de mesures d’infiltration Poursuite de l’acquisition de mesures in situ par la méthode double anneau Nouveau bassin concerné : Touch (avril puis juin 2005)	JL Izac, JFDesprats,
2. Calibration du potentiel d’infiltration mesuré par double anneau à l’aide d’appareillages différents, mesures acquises par Ecole des Mines d’Alès (EMA) et Hydrosciences, au cours de campagne de mesures communes et analyse d’incertitude aux données in situ collectées par d’autres méthodes par EMA et Hydrosciences	JFDesprats, O.Cerdan
3. Cartographie du potentiel d’infiltration des sols Construction des cartes de potentiel d’infiltration calibré sur le bassin du Touch	JFDesprats, O.Cerdan C.King

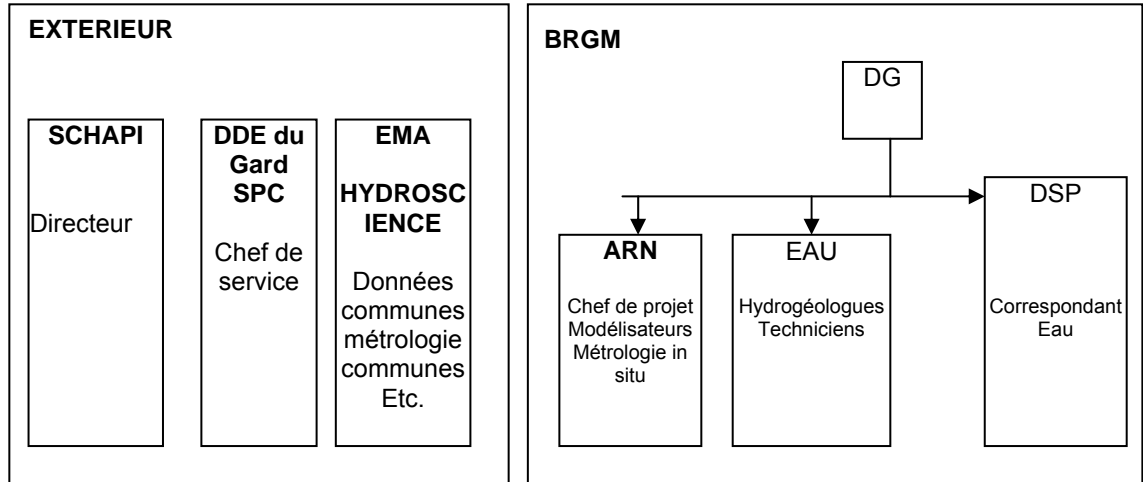
Module 2. Etats de saturation des terrains : instrumentation surfacique visant une approche en temps réel des états hydriques	
1. Sélection du bassin versant à instrumenter en lien avec le SCHAPI, l’ESAP et la DIREN MPY	N. Baran
2. en concertation avec le SCHAPI Sélection des matériels ad hoc proposition d’un plan d’échantillonnage et protocole de mesures et de transmission. Un chiffrage des coûts d’investissement et de fonctionnement sera fourni au SCHAPI pour orienter sa décision.	E. Petelet N. Baran
3. définition des clauses de responsabilité (propriétés, maintenance, fonctionnement, suivi) en lien avec le SCHAPI	N. Baran E. Petelet
4. Achat	SCHAPI

5. mise en place des matériels (à choisir de type sondes capacitives, TDR, tensiomètre, humitube, perméamètre de Guelph... et logiciels de pilotage d'acquisition et de transfert de données et choix de centrale d'acquisition type Osiris ou autre)	N. Baran JL Izac, E. Poux
6.Mise en fonctionnement des acquisitions 7. Mise en place d'une transmission en temps réel par GSM proposition d'une maquette conceptuelle de la consultation d'indicateurs issus de ces séries Bilan de la première série et mise en confrontation avec des séries météo de la même période Début d'analyse sur des indicateurs et réflexion croisée avec les autres fournisseurs d'indicateurs au SPC Gard	Valérie Bretteville N.Baran et JF Desprats,

Module 3 . volet STREAM-Sud adaptation	
Affinement des modifications à imposer à STREAM-Ted pour approcher au mieux les contraintes identifiées dans ce contexte cévenol en cohérence avec les besoins d'ALTHAÏR calage de STREAM avec les mesures d'infiltrométrie : l'analyse des données pluie/débit en différents points du Gardon d'Anduze permettra d'utiliser le modèle STREAM pour vérifier les relations établies entre les mesures double-anneaux et les mesures sous simulateur de pluie et de calibrer les valeurs de perméabilités pour les zones où on ne dispose pas suffisamment de mesures.	O.Cerdan C.King JF Desprats
Mise en application sur une fraction du Gard : définition de scénarios pluviométriques caractéristiques du bassin, et individualisation d'événements pluvieux pour lesquels on possède les mesures de débit afin de caler les valeurs d'infiltration à l'aide du modèle STREAM Mise en application sur le Gard : réponses hydrologiques de petits bassins versants du Gardon d'Anduze selon événements types (nombre de BV 3, nombre d'évènements types 5) Analyse critique des scénarios produits	O.Cerdan JF Desprats
Mise en bases de données des scénarios calculés ALTHAÏR Introduction des données requises en entrée et Analyse des avancées mesurables	JFDesprats O.Cerdan

Module 4 . volet BV Somme	
Adaptation du code de calcul GARDENIA pour prise en compte des formats de données SANDRE étendus.	D. Thiery
Adaptation pour mise sur la plate-forme DEMETER sous UNIX avec fonctionnement en temps réel automatique.	D. Thiery
Actualisation du module prévision en continu des débits de la Somme et de ses affluents.	D. Thiery
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 GARDENIA mais ne permet pas de réactualisation automatique des écarts de prévision.	D. Thiery
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.	D. Thiery

5.2.2. Schéma de l'organisation et des responsabilités :



Les services généraux du BRGM seront chargés de l'édition et de la diffusion.
Des sous-traitances seront envisagées pour les prestations de télétransmission.

Nota: le coûts des équipements de mesure du volet "états de saturation des terrains n'est pas compris". Le matériel sélectionné par le SCHAPI sur proposition du BRGM, sera pris directement en charge par le SCHAPI selon des modalités qui seront précisées par le SCHAPI à réception

Principales étapes	année n-2 2003-2004					année n-1 2004-2005												
	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	
Module 1. Potentiel d’infiltration	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
Acquisition de paramètres d’infiltration volet in situ																		
Calibration du potentiel d’infiltration			x	x		x	x	x										
Cartographie du potentiel d’infiltration								x	x	x	x							
Module 2.																		
Etats de saturation des terrains																		
Sélection du bassin versant						X												
Sélection des matériels						X	X											
Définition plan d’échantillonnage						X	X											
Achat des matériels								x										
Mise en place des matériels								x										
Mise en fonctionnement									x									
Acquisition									x	x	X	X	X					
Transmission en temps réel												x	x	x	X	X	x	
Maquette conceptuelle															X	X		
Bilan de la première série															x	x		
Réflexion croisée															x	x	x	
Module 3.																		
Adaptation de STREAM																		
Modifications calage				x	x	X	X	x										
Mise en application sur le Gard										x	x	x	x	x	x			
Analyse critique des scénarios produits																		
Mise en bases de données des scénarios calculés													x	x	x	x		
Introduction des données intermédiaires en entrée de ALTHAÏR et analyse des avancées mesurables													X	X	X			
												x	x	x	x	x		

5.2.3. Les étapes du projet :

5.2.4. Equipe de projet

- Chef de projet : J.François Desprats
- Intervenants BRGM Orléans: Olivier Cerdan,
Nadia Amraoui
Valérie Bretteville
Christine KING
- Intervenants BRGM en région :
Nathalie Dorfliger
Mélanie Ghyselinck
J.Louis Izac
E. Poux

5.2.5. Documents à remettre aux partenaires

Date prévue	Nature du document	Consistance	Nombre d'exemplaires	Destinataire principal
Mai 2005	D1.Rapport de synthèse annuel "année 2"	faisabilité de mise en œuvre de STREAM –TED volet (1)	5 2	SCHAPI DDE-Gard
Octobre 2005	D2. Rapport d'avancement de la métrologie temps réel et de la réflexion sur les couplages d'indicateurs Rapport T2 + 6	Liste , intérêts respectifs, argumentaire	1 1	SCHAPI DDE-Gard
Décembre 2005	D3. Rapport final	Synthèse globale des actions menées	5 2	SCHAPI DDE-Gard

6. Bibliographie

- Amato, M.;** Ritchie, J. T. Small Spatial Scale Soil Water Content Measurement With Time Domain Reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (1995), *59*, 325-329.
- Cerdan O.,** Desprats J-F., King C. (2004). Appui aux actions SCHAPI au sein de l'arc cévenol. Rapport BRGM/RP-53027-FR, 72p., 7 ill., 5 ann.
- Cerdan O.,** Le Bissonnais Y., Couturier A., Saby N. (2002b). Modelling interrill erosion in small cultivated catchments. Hydrological Processes in press.
- Cerdan O.,** Le Bissonnais Y., Govers G., King C., lecomte V., Dubreuil N., van Oost K., Couturier A. (2004). Scale effect on runoff from experimental plots to catchments in agricultural areas in Normandy in press *Journal of Hydrology*.
- Cerdan O.,** Le Bissonnais Y., Souchère V., Couturier A., Bourennane H. (2002c). 'Rilling development on cultivated hillslopes during two extreme events'. *Soil & tillage Research* 67 (1), 99-108.
- Cerdan O.,** Le Bissonnais Y., Souchère V., Lecomte V., Couturier A. (2000). 'The elementary process of runoff: the STREAM model, a tool of understanding and simulation'. Performances and results. FLOODGEN final Session. 20/01/(2000), Ispra, Italy.
- Cerdan, O.,** Le Bissonnais, Y., Souchère, V., Martin, P. and Lecomte, V. (2002a). 'Concentration of suspended particles in interrill flow', *Earth Surface Processes and Landforms*, 27 (2), 193-205.
- Cerdan, O.,** Souchère, V., Lecomte, V., Couturier, A. and Le Bissonnais, Y. (2002). 'Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff and erosion model STREAM (Sealing Transfer Runoff Erosion Agricultural Modification)', *Catena*, 46, 189-205.
- Desprats J.F,** Sidgwick J., Ghyselinck M., Gay M., Cerdon O., Linardon F., Kind C. Etude de l'évolution du bassin versant du Touch, cartographie du potentiel d'infiltration des sols et simulations liées aux aménagements actuels et futurs. Rapport BRGM RP-53526-FR, (2004), 100 p., 73 ill.
- Dirksen, C.;** Dasberg, S. Improved Calibration of Time Domain Reflectometry Soil Water Content Measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (1993), *57*, 660-667.
- Gallien E,** Le Bissonnais Y, Eimberck M, Benkhadra H, Ligneau L, Ouvry JF, Martin P. 1995. Influence des couverts végétaux de jachère sur le ruissellement et l'érosion diffuse en sol limoneux cultivé. *Cahiers Agricultures* 4: 171-183.
- Huisman, J. A.,** Hubbard, S. S., Redman, J. D., and Annan, A. P. Measuring soil water content with ground penetrating radar: a review. *Vadose zone journal* (2003), *2*, 476-491.
- Huisman, J. A.,** Snepvangers, J. J. J. C., Bouten, W., and Heuvelink, G. B. M. Monitoring temporel development of spatial soil water content variation: comparison of ground penetrating radar and time domain reflectometry. *Vadose zone Journal* (2004), *2*, 519-529.

- Huisman, J. A.**, Sperl, C., Bouten, W., and Verstraten, J. M. Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar. *Journal of Hydrology* (2001), 245, 48-58.
- King C.**, Lecomte V., Le Bissonnais Y., Baghdadi N., Souchère V, Cerdan O. (2003). Use of remote sensing data as alternative inputs in the "STREAM" runoff model. *Catena* (in press).
- Knight, J. H.** Sensivity of Time Domain Reflectometry Measurements to Lateral Variations in Soil Water Content. *Water Resour. Res.* (1992), 28, 2345-2352.
- Le Bissonnais Y.**, Cerdan O., Lecomte V., Benkhadra H., Souchère V., Martin P. (2002). Spatial and temporal variability of soil surface characteristics influencing infiltration, runoff and interrill erosion of cultivated fields (accepted for publication *Catena*).
- Lecomte V.** 1999. Transfert de produits phytosanitaires par le ruissellement et l'érosion de la parcelle au bassin versant - Processus, déterminisme et modélisation spatiale. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Spécialité Science de l'Eau, 212 pp. + annexes.
- Lecomte V.**, Le Bissonnais Y, Renaux B, Couturier A, Ligneau L. (1997). Erosion Hydrique et transfert de produits phytosanitaires dans les eaux de ruissellement. *Cahiers Agricultures* 6: 157-183.
- Lecomte V.**, Le Bissonnais Y., Cerdan O. (2003). Effect of vegetated filter strips on runoff and erosion *Agronomie*.
- Martin P.** 1997.Reducing flood risk from sediment-laden agricultural runoff using intercrop management techniques in northern France. *Soil & Tillage Research* 52: 233-245.
- Morvan X.**, Influence de la variabilité spatiale de différentes caractéristiques du milieu aux échelles de la parcelle expérimentale et du bassin versant hydrogéologique sur la contamination d'un aquifère sableux par les phytosanitaires. (2004). Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans, 527p.
- Peirera Dos Santos, L.A.** (1997). Développement d'une nouvelle méthode de détermination des profils de teneur en eau dans les sols par inversion d'un signal TDR. Thèse de l'Université Joseph Fournier, Grenoble I, 144p.
- Ponizovsky, A. A.**, Chudinova, S. M., and Pachepsky, Y. A. Performance of TDR calibration models as affected by soil texture. *Journal of hydrology* (1999), 218, 35-43.
- Schaap, M. G.**, de Lange, L., and Heimovaara, T. J. TDR calibration of organic forest floor media. *Soil Technology* (1996), II, 205-217.
- Souchère V.**, Cerdan O., Ludwig B., Le Bissonnais Y., Couturier A., Papy F. (2002). Assessment of potential ephemeral gully erosion in small agricultural catchments using a GIS-based model. *Catena* in press.
- Starks, P. J.**, Heathman, G. C., Ahuja, L. R., and Ma, L Use of limited soil property data and modeling to estimate root zone soil water content. *Journal of Hydrology* (2003), 272, 131-147.
- Topp, G. C.**, Davis, J. L., and Annan, A. P. The early development of TDR for soil measurements. *Vadose Zone Journal* (2003), 2, 492-499.

- Topp, G. C.;** Davis, J. L. Measurement of Soil Water Content Using Time-Domain Reflectometry (TDR) : a Field Evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (1985), 49, 19-24.
- Walker, J. P.,** Willgose, G. R., and Kalma, J. D. In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques. *Journal of Hydrology* (2004), 293, 85-99.
- Weitz, A. M.;** Grauel, W. T.; Keller, M.; Veldkamp, E. Calibration of Time Domain Reflectometry Technique Using Undisturbed Soil Samples From Humid Tropical Soils of Volcanic Origin. *Water Resour. Res.* (1997), 33, 1241-1249.
- Wraith, J. M.** and Baker, J. M. High-resolution measurement of root water uptake using automated time-domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (1991), 55, 928-932.
- Zakri, T.** (1997) . Contribution à l'étude des propriétés diélectriques de matériaux poreux en vue de l'estimation de leur teneur en eau : modèles de mélange et résultats expérimentaux. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble. 202p.

Annexe 1

Données d'infiltration sur l'Avène et le Touch

A ce jour 60 mesures d'infiltration ont été réalisées sur le bassin versant de l'Avène.

Ces 60 points ont été complétés par 13 points d'observation, destinés à valider la classification de l'occupation du sol réalisée à partir d'une l'image SPOT

Numéro	Zone	X	Y	Geol_carte	occupation sol	sols	infiltration	mm/h
1	Avene 07-2004	742592	199338	argile	friche	légèrement lir	0,0240	86
2	Avene 07-2004	743337	200520	argile	vigne	argileux, mott	0,0801	288
5	Avene 07-2004	742721	200910	alluvions	vigne		0,0656	236
8	Avene 07-2004	743158	202796	calcaire marn	friche	mottes	0,0035	13
10	Avene 07-2004	743875	209479	calcaire marn	prairie		0,0342	123
13	Avene 07-2004	742756	208984	calcaire	garrigue	caillouteux, te	0,0596	215
15	Avene 07-2004	743260	210419	marnes	prairie	marron clair	0,0181	65
16	Avene 07-2004	743870	212092	calcaires mar	forêt - garrigue	marron clair	0,0170	61
17	Avene 07-2004	745569	207772	alluvions	prairie	limono-argileu	0,0330	119
18	Avene 07-2004	746313	208033	marnes	prairie		0,0269	97
19	Avene 07-2004	746842	207233	calcaire marn	prairie	marron clair	0,0550	198
21	Avene 07-2004	738146	215361	schiste	forêt	sol souple, m	0,1206	434
22	Avene 07-2004	739446	216086	schiste	forêt	caillouteux, te	0,0031	11
24	Avene 07-2004	739954	214694	dolomie	forêt - garrigue	cailloteux, terr	0,3375	1215
25	Avene 07-2004	740503	216439	dolomie	forêt	caillouteux	0,6004	2161
26	Avene 07-2004	741150	215729	dolomie	forêt	caillouteux, te	0,4973	1790
29	Avene 07-2004	738642	217139	schiste	forêt	sol terre de br	0,1298	467
30	Avene 07-2004	742247	215394	calcaire	forêt	sol marron cl	2,2416	8070
31	Avene 07-2004	742802	214528	calcaire	forêt - garrigue	sol marron br	0,9386	3379
32	Avene 07-2004	743560	214110	marne schist	forêt - garrigue	sol marron cl	0,0228	82
33	Avene 07-2004	741259	214551	calcaire	forêt - garrigue		0,0244	88
34	Avene 07-2004	741714	214185	calcaire	forêt	sol marron, hu	0,5602	2017
36	Avene 07-2004	743653	213544	calcaire	forêt	terre rouge, c	0,0080	29
37	Avene 07-2004	743257	213200	calcaire	garrigue	terre marron t	0,1681	605
38	Avene 07-2004	743637	212819	calcaire marn	garrigue		0,0287	103
39	Avene 07-2004	744561	212313	calcaire	forêt - garrigue	terre marron t	0,2956	1064
40	Avene 07-2004	743686	213407	calcaire	forêt	terre rouge, c	0,0200	72
41	Avene 07-2004	742665	203751	argile	blé	terre marron d	0,0445	160
42	Avene 07-2004	742752	203815	argile	prairie	terre marron d	0,0193	69
43	Avene 07-2004	744508	203472	marnes	prairie		0,0052	19
44	Avene 07-2004	744628	205212	calcaire marn	forêt - garrigue		0,0669	241
45	Avene 07-2004	744400	206541	marnes	blé		0,1694	610
46	Avene 07-2004	745024	211763	calcaire marn	forêt - garrigue	terre jaune cl	0,0084	30
47	Avene 07-2004	745808	212533	calcaire marn	garrigue	terre marron d	0,1374	495
48	Avene 07-2004	745481	211354	alluvions	vigne	limoneux	0,0163	59
49	Avene 07-2004	743870	207110	calcaire marn	garrigue	terre épaisse,	0,0079	29
50	Avene 07-2004	746098	206793	calcaire	garrigue	terre marron d	0,6957	2505
51	Avene 07-2004	745543	207829	alluvions	blé	limoneux	0,0092	33
52	Avene 07-2004	745194	208053	marnes	blé	terre souple	0,0587	211
53	Avene 07-2004	743856	206712	calcaire marn	prairie		0,0426	153
54	Avene 07-2004	744127	210843	marnes	blé	terre souple	0,0329	118
55	Avene 10-2004	742356	199812	alluvions limo	vigne	terre souple, j	0,0103	37
56	Avene 10-2004	742823	200024	alluvions	blé	terre brune gr	0,0586	211
58	Avene 10-2004	743006	200600	alluvions, coll	vigne	terre jaune ro	0,0056	20
59	Avene 10-2004	745643	210921	marnes calca	vigne	couleur claire	0,0355	128
60	Avene 10-2004	744310	211076	marnes	vigne	marne, caillou	0,0202	73
61	Avene 10-2004	742781	202027	alluvions	vigne	alluvions limo	0,0033	12
62	Avene 10-2004	743499	205556	marne	prairie	marne limone	0,0254	91
63	Avene 10-2004	744170	210836	marnes	blé	terre souple	0,1653	595
64	Avene 10-2004	743790	211107	calcaires mar	forêt	sol couleur br	0,0146	52
65	Avene 10-2004	743841	207945	calcaires mar	prairie	terre grossièr	0,0268	97
71	Avene 10-2004	739750	214417	dolomie	forêt	terre marron,	0,2494	898
72	Avene 10-2004	740433	215716	dolomie	forêt	terre rouge br	0,1328	478
73	Avene 10-2004	745429	207192	calcaire marn	garrigue	terre marron d	0,0545	196
74	Avene 10-2004	743700	208150	marnes	prairie	marnes alluvi	0,3208	1155
75	Avene 10-2004	742225	207353	marnes	vigne	marnes, peu d	0,0172	62
76	Avene 10-2004	744930	207554	alluvions	prairie	terre marron d	0,2777	1000
77	Avene 10-2004	745676	205609	marnes	blé	terre souple, r	0,3330	1199
78	Avene 10-2004	743750	200909	marnes	blé	argileuse, sou	0,2778	1000
79	Avene 10-2004	743483	200848	marnes	vigne	argilo-marneu	0,0058	21

Sur le Touch 42 mesures (mars 2005) complètent les 46 réalisées lors de l'été 2003.

numéro	Date	x	y	géologie	couverture du sol	pédologie	perméabilité m/sec	perméabilité mm/h
21	juil-03	498303	3120368	AQM	culture d'été (haricot)	HTD	0,0010	3,6
24	juil-03	509118	3127540	AQM	culture d'été (maïs)	VRS-TPD	0,0072	26,1
11	juil-03	495713	3117332	AQM	culture d'été (soja)	VRS-TPD	0,0025	9,2
45	juil-03	485710	3114495	AQM	culture d'été (tournesol)	CA	0,0504	181,3
46	juil-03	487836	3115075	AQM	culture d'été (tournesol)	CA	0,0088	31,5
10	juil-03	498137	3130652	LAQ	culture d'été (tournesol)	HTD	0,0035	12,6
22	juil-03	493431	3120674	CAS-AGQ	culture d'été (tournesol)	HTD	0,0145	52,3
41	juil-03	498146	3128406	LAQ	culture d'été (tournesol)	HTD	0,0150	54,0
42	juil-03	498161	3128798	LAQ	culture d'été (tournesol)	HTD	0,0373	134,2
27	juil-03	510652	3134904	LAQ	culture d'été (tournesol)	PAGR-TPA	0,0111	39,8
31	juil-03	513521	3136770	LAQ	culture d'été (tournesol)	PAGR-TPA	0,0267	96,2
32	juil-03	512352	3136967	LAQ	culture d'été (tournesol)	PAGR-TPA	0,0245	88,4
8	juil-03	504246	3120586	AQM	culture d'été (tournesol)	VRS-TPD	0,1595	574,1
20	juil-03	500977	3119053	AQM	culture d'été (tournesol)	VRS-TPD	0,0377	135,9
44	juil-03	488016	3115802	CAS-AGQ	culture d'été (tournesol)	VRS-TPD	0,0750	270,0
33	juil-03	489822	3113687	MOM	culture d'hiver	VRS-TPD	0,0533	192,0
23	juil-03	493820	3118873	CAS-AGQ	culture d'hiver (blé)	CA	0,0136	49,0
30	juil-03	479311	3111514	AQM	culture d'hiver (blé)	CA	0,0056	20,1
7	juil-03	504498	3119352	CAS-AGQ	culture d'hiver (blé)	HTD	0,0010	3,6
9	juil-03	499313	3133040	LAQ	culture d'hiver (blé)	HTD	0,0052	18,8
43	juil-03	501315	3126577	LAQ	culture d'hiver (blé)	HTD	0,0061	22,0
28	juil-03	510367	3135836	AQM	culture d'hiver (blé)	PAGR-TPA	0,0142	51,1
29	juil-03	517469	3139528	AQM	culture d'hiver (blé)	PAGR-TPA	0,0129	46,3
12	juil-03	494442	3116845	CAS-AGQ	culture d'hiver (blé)	VRS-TPD	0,0208	75,0
19	juil-03	500275	3116304	LAQ	culture d'hiver (colza)	HTD	0,0017	6,0
3	juil-03	499518	3125241	LAQ	culture d'hiver (colza)	PAGR-TPA	0,0010	3,6
15	juil-03	487987	3115528	CAS-AGQ	culture d'hiver (colza)	VRS-TPD	0,1114	400,9
17	juil-03	497112	3121676	LAQ	culture hiver (blé)	HTD	0,0606	218,3
39	juil-03	478651	3112157	FRSA-Q	foret	CA	0,0788	283,6
40	juil-03	497901	3125715	CAS-AGQ	foret	HTD	0,0747	269,0
38	juil-03	479517	3112597		foret		0,1681	605,2
34	juil-03	489840	3113664	MOM	prairie	CA	0,1251	450,5
16	juil-03	487674	3116587	MOM	prairie	CA	0,0102	36,6
14	juil-03	488789	3113783	FRSA-Q	prairie	CA	0,4488	1615,7
18	juil-03	496899	3121135	CAS-AGQ	prairie	HTD	0,0329	118,6
26	juil-03	497154	3126226	CAS-AGQ	prairie	HTD	0,7248	2609,1
36	juil-03	499218	3119604	CAS-AGQ	prairie	HTD	0,2116	761,6
35	juil-03	499611	3116995	LAQ	prairie	HTD	0,2155	775,9
2	juil-03	499520	3125251	LAQ	prairie	HTD	0,0075	27,0
1	juil-03	506237	3129048	LAQ	prairie	PAGR-TPA	0,0128	46,1
4	juil-03	506620	3134918	LAQ	prairie	PAGR-TPA	0,0051	18,2
6	juil-03	502760	3116871	LAQ	prairie	PAGR-TPA	0,0082	29,4
37	juil-03	501590	3116123	CAS-AGQ	prairie	PAGR-TPA	0,0034	12,2
5	juil-03	508572	3133252	LAQ	prairie	PAGR-TPA	0,0455	163,6
13	juil-03	494225	3117391	AQM	prairie	VRS-TPD	0,1111	400,1
25	juil-03	506466	3125634	CAS-AGQ	prairie	VRS-TPD	0,0564	203,0
16b	mars-05	487668	3116601		blé	CA	0,1077	387,8
45	mars-05	485796	3114910		blé	CA	0,1323	476,2
46	mars-05	497930	3115200		blé	HTD	0,1899	683,8
22	mars-05	493465	3120712		blé	HTD	0,3370	1213,2
37	mars-05	501573	3116118		blé	PAGR-TPA	0,0157	56,6
S11	mars-05	505347	3136270		blé	PAGR-TPA	0,7345	2644,2
13	mars-05	494228	3117385		blé	VRS-TPD	0,0676	243,5
25bis	mars-05	506452	3125619		blé	VRS-TPD	0,1020	367,1
39	mars-05	478634	3112194		foret	CA	0,2939	1057,9
40	mars-05	497932	3125745		foret	HTD	0,0233	84,0
A	mars-05	505702	3127370		foret	PAGR-TPA	0,1024	368,7
16	mars-05	487790	3116532		prairie	CA	0,0022	7,8
14	mars-05	488691	3113745		prairie	CA	0,0125	45,1
S16	mars-05	499122	3135550		prairie	HTD	0,0034	12,3
B	mars-05	498982	3125334		prairie	HTD	0,0067	24,0
35	mars-05	498938	3117027		prairie	HTD	0,0092	33,2
S14	mars-05	501936	3137168		prairie	HTD	0,0421	151,5
6	mars-05	502827	3116814		prairie	PAGR-TPA	0,0044	15,7
5	mars-05	508858	3133090		prairie	PAGR-TPA	0,0149	53,6
13b	mars-05	494163	3117434		prairie	VRS-TPD	0,0139	49,9
S13	mars-05	501885	3137047		sol nu non labouré	HTD	0,0176	63,5
S19	mars-05	503314	3136662		sol nu non labouré	HTD	0,0314	113,0
2	mars-05	499646	3125306		sol nu non labouré	HTD	0,4799	1727,7
S15	mars-05	498730	3135966		sol nu non labouré	HTD	0,5011	1804,1
25	mars-05	506452	3125619		sol nu non labouré	VRS-TPD	0,0038	13,6
100	mars-05	502847	3135383		sol nu non labouré		0,0166	59,7
101	mars-05	502549	3135550		blé		0,0033	11,9

Annexe 2

Projet scientifique amont retenu à l'IFR-LRO

**Proposition de travail à l'IFR EAU Montpellier (éléments techniques) sélectionné
par l'IFR en mars 2005**

et

Venant en appui aux préoccupations du SCHAPI

ILEE - Appel d'offres 2005

Type de demande : Soutien de programme / Equipement

Titre du projet : Caractérisation multi-échelle des transferts hydriques dans un bassin versant. Application à la modélisation et à la prévision des crues "éclair"

Nom du porteur :

Sophie **SAUVAGNARGUES LESAGE**

Enseignant-Chercheur, Responsable pédagogique de l'Option "Management des risques majeurs" ECOLE DES MINES D'ALES - LGEI

6, Avenue de Clavières F-30319 Alès cedex

Tél : 04 66 78 27 91

Christophe **BOUVIER**

Directeur de Recherche IRD, Responsable Equipe "Aléas hydrologiques liés aux Evénements Extrêmes"

UMR 5569, HydroSciences Montpellier

300 av. Emile Jeanbrau, 34090 Montpellier

Tel : 04 67 14 90 73

Unités Participantes :

EMA : S. Sauvagnargues-Lesage (MC), P.-A. Ayrat (Doc.)

HSM : C. Bouvier (DR), P. Brunet (IE), J.-L. Perrin (CR), A. Marchandise (Doc.)

BRGM : J.-F. Desprats, E. Petelet Giraud (IR, Orléans)

UMR3S : C. Puech (DR), S. Bailly

INRA : ?

Argumentaire scientifique

Les crues "éclair" (IAHS-UNESCO-WMO, 1974 in Gaume, 2002) sont définies comme des « *Crues dont l'apparition est soudaine, souvent difficilement prévisible, de temps de montée rapide et de débit spécifique relativement important. Ces crues sont donc généralement liées à des épisodes pluvieux intenses et se manifestent sur des bassins de taille modérée* ». Du mois de juillet 1997 au mois de juin 2001, 31 catastrophes provoquées par des crues éclair ont été recensées dans le monde (Montz et Grunfest, 2002). Plusieurs zones géographiques ont été touchées, dont notamment le domaine méditerranéen (Italie en septembre 2000, France en novembre 1999 et en septembre 2002).

La protection contre ces crues, tant par la prévention que par la prévision, passe par une meilleure connaissance des transferts de l'eau dans le bassin. Divers processus élémentaires, éventuellement combinés, peuvent en effet être à l'origine de ces crues : ruissellement par excès

d'infiltration ou par excès de saturation, écoulements préférentiels dans les macro-pores des horizons superficiels des sols ou dans les roches fracturées, effet piston, exfiltration, intumescence de nappe (Ambroise, 1998; Bouvier, 2004). Chacun de ces processus induit une dynamique très différente en ce qui concerne les volumes produits et les temps de réponse, et il importe d'identifier ces processus et leur combinaison pour obtenir une prévision hydrologique de qualité (Perrin et al., 2001).

Fondamentalement, l'identification de ces processus ne peut être dissociée des échelles spatiales considérées (Puech, 2000). Ainsi, les temps de transfert sub-superficiels peuvent être déterminants à l'échelle de la parcelle, et tout à fait négligeables à l'échelle de bassins de plusieurs dizaines ou centaines de km². Le cas inverse peut également se produire. En d'autres termes, il s'agit donc d'identifier les échelles spatiales sur lesquelles on va baser le découpage du bassin, représenter les processus dominants, et définir les indicateurs pertinents.

Le bassin retenu est le Gardon en amont d'Anduze (545 km²), qui a déjà fait l'objet de différents travaux de modélisation (Moussa, 1991; Moussa, 2003; Marchandise et al., 2004; Ayrat, 2005), dont l'interprétation physique reste difficile. Dans ce contexte, les processus seront analysés selon 3 échelles spatiales :

- échelle locale ;
- échelle versant ;
- échelle du bassin.

Echelle locale (du cm à quelques mètres)

En ce qui concerne les flux hydriques, c'est le domaine du mesurable. On procédera notamment à des mesures d'écoulements à différentes profondeurs (en surface, dans les horizons superficiels, puis profonds, des sols), sous pluies naturelles et artificielles. Outre la mesure directe des écoulements, on utilisera différents dispositifs de mesures électriques (TDR, multi-électrodes) et chimiques (injection de traceurs) pour suivre la dynamique des écoulements dans le sol.

En parallèle, on caractérisera finement les propriétés hydrodynamiques des sols (porosité, conductivité, rétention), et on cherchera à interpréter les résultats expérimentaux, à l'aide de simulation numérique.

On s'intéressera également à la dynamique de l'humidité des sols à différentes profondeurs, par couplage de mesures multi-temporelles réalisées par TDR et par sondages électriques.

Echelle versant (~ hectométrique)

Les questions posées à l'échelle du versant portent sur :

- le développement de nappes et de zones saturées liées aux flux latéraux et verticaux .
- le rôle des drains superficiels, susceptibles par leur densité et leur profondeur de capturer les écoulements sub-superficiels, et de les mettre en écoulement gravitaire .
- la variabilité des caractéristiques des sols, et les conséquences sur la paramétrisation, voire la continuité, des processus hydrologiques.

En ce qui concerne le développement des zones saturées, on combinera approches expérimentale et numérique. D'un point de vue expérimental, on disposera des piézomètres pour suivre le développement des nappes et des zones saturées. Sur ces ouvrages, en domaine de

granite et/ou de schistes, des analyses chimiques et isotopiques seront réalisées pour caractériser les différentes venues d'eau (zone altérée, zone saine fracturée). On analysera également la composition chimique des eaux de ruissellement en aval du versant pour caractériser la signature et la provenance des écoulements. D'un point de vue numérique, on procédera à des simulations des flux à des échelles hectométriques le long des versants à l'aide de modèles bi-dimensionnels (ARC DYNAS; thèse Esclaffer en cours au CEREVE; Guinot 2004).

La densité et la géométrie des drains superficiels sera caractérisée par des relevés de terrain, en remontant les ravines ou en quadrillant différents secteurs d'intérêt. On cherchera à dégager une typologie des drains en fonction des unités topographiques et géologiques. Les indicateurs topographiques seront déduits de MNT qu'il faudra obtenir avec précision à l'échelle des versants. On procédera également à des reconnaissances systématiques après les épisodes de pluie intenses (retours d'expérience) pour apprécier la mise en eau de ces drains et contribuer à valider les modèles d'écoulement.

On intégrera à cette réflexion les travaux menés sur un petit bassin de 3 km² sur substrat granitique par le CNRS (UMR Espaces)

Echelle bassin (quelques kilomètres ou dizaines de kilomètres)

On cherchera à caractériser la signature des eaux issues des sous-bassins à géologie contrastée, et à quantifier leur contribution au cours des épisodes de crue. On procédera à l'exutoire principal et à l'exutoire de différents sous-bassins à des analyses chimiques des écoulements portant sur les ions majeurs, sur les teneurs en strontium et rubidium et sur les rapports ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr (Petelet et al, 1998 ; 1999 ; Petelet-Giraud et al., 2003a, b; Petelet-Giraud et al., 2004).

Résultats attendus et applications

D'un point de vue scientifique, ce projet vise à apporter des connaissances sur différents thèmes comme :

- hydrologie et changement d'échelle ;
- caractéristiques et organisations des sols : variabilité 3D ;
- caractéristiques et évolution temporelle des teneurs en eau ;
- caractérisation des flux latéraux et répartition à différentes profondeurs ;
- typologie des versants au regard du drainage hydrographique ;
- circulations profondes et impact sur les épisodes de crue.

Ces travaux feront l'objet de publications scientifiques, relatives à chacun des thèmes cités.

D'un point de vue opérationnel, ces connaissances conduiront à proposer des modèles plus performants pour la prévention et la prévision des crues en zone méditerranéenne, intégrant des échelles et des indicateurs pertinents. De même, ce travail de recherche devrait permettre d'élaborer et de tester des protocoles expérimentaux pertinents pour le suivi des bassins versants en vue d'y pratiquer une prévision efficace. Ces objectifs satisfont à la demande des services nationaux (SCHAPI, SPC).

Les contributions des différentes unités participantes sont complémentaires :
BRGM : analyses chimiques et isotopiques, fonctionnement du bassin,

UMR 3S : imagerie spatiale, MNT et typologie du drainage,

EMA : parcelles expérimentales Tourgueille et Peyrolles,

HSM : parcelles expérimentales Sumène, hydrodynamique et humidité des sols, modélisation numérique

UMR Espaces : bassin expérimental Peyrolles

INRA : caractérisation des sols, approches fractales ?

Phase 1 : Mise en place des protocoles expérimentaux, mise en cohérence des démarches de chaque organisme, premières sorties terrain

Phase 2 : Premiers tests des essais précédemment définis et éventuellement redéfinition des protocoles (premier rapport)

Phase 3 : Observations et expérimentations intenses durant la fin de l'été et l'automne 2005

Phase 4 : Analyse des résultats, retour d'expérience et modélisation numérique (second rapport à mi-parcours de l'axe 4, faisant état des premiers résultats et de la démarche de modélisation numérique entreprise).

Phase 5 : Synthèse de ce travail de recherche : avancés, limites & perspectives

Annexe 3

Rapport D2

Suivi de la teneur en eau des sols dans les bassins du Gardon d'Anduze et du Touch

- les matériels existants -

(N. Baran, septembre 2004, rapport BRGM RP-53654-FR)

Depuis plusieurs décennies, des techniques de mesure automatique de l'humidité des sols ont été développées qu'il s'agisse de matériel destiné à une expérimentation en laboratoire (e.g. colonnes de sol remanié ou non pour suivre le transfert d'eau et de solutés) ou des suivis *in situ* à l'échelle du m² ou du bassin versant.

L'inventaire des techniques de mesures réalisé ci-après s'appuie essentiellement sur le travail de Pereira Dos Santos (1997). La critique des différentes techniques s'appuie sur des références bibliographiques plus récentes.

1. teneur en eau pondérale

La mesure consiste à prélever un échantillon de sol qui est pesé une première fois, alors qu'il est humide, dans un délai très bref après son échantillonnage. Après un séchage à 105°C pendant 48 heures, l'échantillon est à nouveau pesé. La comparaison des masses humides et sèches permet d'estimer la teneur en eau pondérale des sols.

Il s'agit d'une méthode directe de mesure très fiable mais destructive puisqu'elle nécessite à chaque fois un prélèvement de sol. Cette technique ne permet pas d'obtenir des données en temps réel (délai d'au moins 48 heures).

La détermination de la teneur en eau volumique du sol – grandeur aisément comparable à la porosité du sol et permettant ainsi d'apprécier l'état de saturation du sol – nécessite la connaissance de la densité apparente du sol. L'incertitude sur ce paramètre – d'autant plus élevée que le sol est caillouteux – détermine par conséquent la précision de la détermination de la teneur en eau volumique par cette méthode.

La spatialisation de la mesure est en théorie possible ; elle nécessite toutefois le prélèvement de nombreux échantillons et peut donc rendre l'acquisition des données longue et fastidieuse.

Le suivi dans le temps est par définition lourd car il nécessite de nombreux passages sur le terrain.

2. Les tensiomètres

Les tensiomètres permettent d'estimer de manière indirecte la teneur en eau volumique du sol. Les tensiomètres enregistrent une valeur de potentiel de pression qui grâce à l'établissement en laboratoire d'une courbe de calibration permet de déterminer la teneur en eau volumique du sol.

Il s'agit d'une méthode assez peu précise dans la mesure où la relation entre le potentiel de pression et la teneur en eau n'est pas unique pour un sol donné. La

courbe « potentiel de pression vs. teneur en eau » fluctue notamment suivant que le sol se trouve en phase de dessiccation ou d'humectation.

Les tensiomètres ne sont généralement pas utilisés pour déterminer une teneur en eau mais sont plus classiquement utilisés pour déterminer le sens de déplacement des flux d'eau (infiltration – remontées capillaires). Bien que l'estimation de la teneur en eau ne soit pas très précise, les suivis tensiométriques sont utiles pour estimer des flux d'infiltration.

Les tensiomètres peuvent être installés à différentes profondeurs. Leur installation nécessite la réalisation d'un trou, généralement à la tarière à main. Cette opération devient donc difficile pour des profondeurs supérieures à 1 ou 2 m, notamment dans des sols caillouteux.

L'acquisition automatique des données se fait classiquement.

3. humidité neutronique

Fortement développée aux Etats Unis puis en France dans les années 1950-70, l'humidité neutronique est maintenant peu utilisée du fait notamment de fortes contraintes réglementaires de sécurité.

La sonde à neutrons, constituée d'une source radioactive et d'un détecteur, est placée à différentes profondeurs, le long d'un tube d'accès placé à demeure dans le sol. Les neutrons émis par la source sont rétrodiffusés par les atomes d'hydrogène de l'eau présents dans un certain volume, appelé, sphère d'influence. Le taux de comptage est proportionnel à la densité volumique de ces atomes ce qui revient à dire qu'il existe une relation entre le taux de comptage et la teneur en eau volumique. Une calibration effectuée dans un laboratoire spécialisé permet de définir la loi reliant ces deux grandeurs.

La nécessité de mettre en place un tube d'accès pour réaliser la mesure rend difficile la spatialisation de la mesure. L'automatisation des mesures n'est pas possible.

4. sondes capacitives

L'introduction d'électrodes dans le sol conduit à la formation d'un condensateur dont la capacité C est liée à la constante diélectrique du vide, la permittivité électrique relative du sol et à un coefficient lié à la géométrie de la sonde capacitive utilisée.

Du fait du fort contraste existant entre la permittivité électrique de la plupart des minéraux (comprise entre 2 et 12 – grandeur sans unité) et celle de l'eau (≈ 80), la capacité est donc fortement dépendante de la teneur en eau du sol.

Différents prototypes ou appareils du commerce existent (e.g. Thetaprobe ou Humicap). Ils se différencient généralement par leur électronique et par le choix de la fréquence de fonctionnement (10 à 100 MHz généralement). Quelque soit l'appareil retenu, une calibration préalable à l'utilisation est indispensable.

La spatialisation nécessite l'installation de nombreuses sondes capacitives ; l'automatisation de la mesure nécessite l'installation de plusieurs centrales d'acquisition à répartir en fonction du nombre de sondes installées et de la distance les séparant.

Les sondes capacitives restent, semble t-il, assez peu utilisées sans que de réelles limites d'utilisation soient clairement avancées. Ce manque de généralisation de

l'utilisation pourrait être lié à un défaut de précision de la mesure. Robinson et al. (2003) rappellent que les sondes de capacité sont moins précises que les TDR en terme de mesure de teneur en eau ; elles sont en revanche assez performantes pour suivre les variations de salinité du sol.

5. Réflectométrie dans le domaine temporel : TDR (Time Domain Reflectometry)

5.1. Principe de la mesure

L'appareil TDR est un oscilloscope numérique couplé à un générateur d'impulsions, relié via un câble coaxial et une tête de raccordement à une ligne de transmission de longueur variable, qui constitue ce qu'on appelle la sonde.

Plusieurs sociétés ont développé ce type de matériel (Tektronic 1502C, Trase de Soil Moisture, Trime de la société IMKO GmbH).

Le principe de la mesure de la teneur en eau volumique est assez similaire à celui des sondes capacitives puisqu'il est basé sur le contraste de permittivité électrique apparente du milieu. Par contre dans le cas présent, il ne s'agit pas de mesurer la capacité du sol mais la vitesse de propagation de l'impulsion électrique dans le sol.

Il s'agit d'une technique relativement ancienne puisque les travaux nécessaires pour développer le concept de TDR ont été menés au début des années 1970. Les premières expérimentations *in situ* ont eu lieu en 1979 dans trois sols à granulométries contrastées (un sol limoneux, un sol limono-argileux et un sol argileux - Topp et al., 2003). Par la suite, cette technique a vu naître de nombreuses applications au laboratoire ou sur le terrain.

5.2. Calibration des sondes TDR

La calibration des sondes TDR devrait être réalisée pour chaque sol, mais dans de nombreux cas, les utilisateurs s'abstiennent d'effectuer cette opération et utilisent la relation polynomiale de Topp pour convertir la permittivité en teneur en eau. Il s'agit d'une relation souvent considérée comme universelle. Toutefois certains auteurs ont mis en évidence des limites d'utilisation, par exemple pour les sols riches en argile et/ou en matière organique. Ainsi, Wreitz et al. (1997) en travaillant sur deux sols tropicaux caractérisés par des fortes teneurs en matière organique (7% en surface et 4 % à 30 cm de profondeur) ont montré que d'utiliser la loi de Topp conduisait à une sous-estimation des teneurs en eau volumiques variant entre 0.05 et 0.15 m³.m⁻³.

De plus, ces auteurs ont montré que la structure du sol – et donc sa porosité et la distribution de cette porosité – avait une influence sur la mesure : la création de macropores artificiels a en effet modifié les résultats obtenus. L'influence observée des macropores est plus ou moins importante suivant la position des ceux-ci par rapport à la sonde. A l'inverse, Amato et Ritchie (1995) ont montré que la porosité du sol a une faible influence sur la permittivité mesurée. Ces auteurs précisent néanmoins que la surface spécifique du sol – autrement dit sa texture et donc sa teneur en argile – a une forte influence sur la permittivité. Dirksen et Dasberg (1993), en travaillant sur 11 sols

présentant une gamme de texture large (loëss à bentonite) avaient déjà montré que l'équation de Topp était acceptable pour des sols à granulométrie « classique », mais qu'elle n'était pas applicable pour des sols riches en argile.

Ponizosky et al. (1999) ont également montré en travaillant sur 4 sols différents que la texture a une influence sur l'ajustement de modèles de calibration. Il y a souvent – notamment pour les sols à texture fine – une rupture de pente dans la relation permittivité/teneur en eau ; cette rupture de pente se produit à des valeurs de teneur en eau d'autant plus élevées que le sol est argileux. L'argile semble être un paramètre influant sur la calibration et le type de calibration utilisable.

En plus des paramètres de porosité et de teneur en argile, la teneur en eau du sol est un facteur limitant l'utilisation de la loi de Topp : pour les fortes teneurs en eau, l'équation n'apparaît pas entièrement satisfaisante et Dirksen et Dasberg (1993) lui préfèrent un autre modèle, celui de Maxwell- De Loor.

La température est parfois considérée comme un paramètre influençant la relation permittivité/teneur en eau. Amato et Ritchie (1995) n'ont pas noté d'influence de la température du sol sur la mesure alors que Robinson et al. (2003) signalent cet inconvénient.

Schaap et al. (1996) ont utilisé les TDR dans des litières forestières. Ils suggèrent qu'une relation peut être trouvée entre la permittivité et la teneur en eau ; la calibration s'avère alors absolument indispensable. Toutefois, ils précisent qu'une correction doit être effectuée de manière à prendre en compte les effets de retrait de la matière organique sous peine de sous estimer fortement les teneurs en eau. Dans ce cas, l'obtention d'une valeur de teneur eau via la TDR n'apparaît pas simple et directe.

Un certain nombre de paramètres est donc susceptible de limiter la validité de la loi de Topp et donc restreindre son utilisation. Les paramètres fréquemment évoqués sont la teneur en argile, la porosité (notamment la distribution des pores – ce qui revient à parler de structure du sol), la température, la gamme de teneur en eau.

Dans le cas où la relation de Topp ne serait pas adaptée ou qu'une calibration spécifique aux sols étudiés voudrait être réalisée, plusieurs méthodes de calibration sont envisageables. Les protocoles les plus simples à mettre en œuvre portent sur l'utilisation de sols remaniés en laboratoire. Après avoir séché un sol, l'avoir tamisé, il s'agit de placer le sol dans un volume donné. Afin de se rapprocher des conditions naturelles de terrain, le sol est recompacté de manière à avoir une densité apparente proche de la densité mesurée *in situ*. Ensuite, par saturation puis dessiccation progressive ou à l'inverse, par saturation progressive, des mesures TDR sont effectuées pour différentes humidités, connues par ailleurs via la pesée de l'échantillon.

Cette méthode nécessite de travailler sur un sol broyé et tamisé et ne prend pas en compte les hétérogénéités de structure du sol. Or, certains auteurs ont montré que la structure de sol pouvait avoir une influence non négligeable sur les résultats (Weitz et al., 1997).

Afin de pallier à ce problème d'influence de la structure du sol sur la mesure, Weitz et al. (1997) décrivent une méthode de calibration par prélèvements de blocs de sols non remaniés. Les sondes TDR sont installées dans ces blocs avant que les sols ne soient saturés progressivement. Ils sont ensuite soumis à une lente dessiccation,

généralement à l'air libre. La pesée journalière de l'échantillon permet d'en déterminer la teneur en eau gravimétrique (ou encore appelée pondérale). Cette valeur est comparée aux données TDR et permet donc d'effectuer une calibration spécifique aux sols étudiés. La difficulté majeure d'utilisation consiste à effectuer le prélèvement d'un bloc de sol sans engendrer sa déstructuration. Dans le cas présent, Weitz et al. (1997) ont prélevé des blocs de 13 x 35 x 7 cm de manière à avoir un volume de sol supérieur au volume « échantillonné » par la sonde.

Cette notion de volume de sol « échantillonné » a souvent été discutée. Elle varie non seulement en fonction de la sonde (géométrie, dimensions), du type de matériau, mais aussi de la teneur en eau au moment de la mesure si bien qu'il est souvent difficile d'apprécier avec précision le volume réellement échantillonné (Robinson et al., 2003). Bien que certains auteurs proposent des méthodes de calcul pour caractériser ce volume et permettent donc d'avoir une idée de ce qu'il représente, il semble encore difficile de le déterminer très précisément. Dans tous les cas, ce volume est assez restreint et représente quelques cm^3 à dm^3 .

5.3. Type de sondes – automatisation – transmission des données

La spatialisation de la mesure nécessite l'installation de nombreuses sondes et la multiplication des stations d'acquisition à répartir en fonction du nombre de sondes et de la distance les séparant.

Plusieurs types de sondes sont disponibles dans le commerce et utilisables :

- les sondes « bi-tiges » sont généralement utilisées sur le terrain car elles sont relativement simples d'installation. Toutefois, elles ne permettent que des mesures ponctuelles et n'autorisent pas l'acquisition en continu et donc la transmission à distance des données ;
- les sondes « tri-tiges » ont une géométrie qui conduit à une meilleure définition du volume de mesure que les « bi-tiges ». Elles autorisent les mesures en continu et le système TRASE de Soil Moisture permet la transmission à distance des données après ajout d'un modem téléphonique et sous réserve de l'existence d'une ligne téléphonique dans le secteur étudié ;
- les sondes « coaxiales » ont un volume de mesure bien défini mais ne sont généralement utilisées que dans un laboratoire.

5.4. Installation des sondes TDR

Deux principes s'affrontent généralement pour l'installation des sondes. L'installation généralement considérée comme la plus simple est l'installation verticale à partir de la surface du sol. L'utilisation de sondes de différentes longueurs permet, par comparaison des résultats obtenus pour chaque sonde, d'estimer un profil de teneur en eau. L'installation de sondes de plus d'un mètre de longueur est généralement considérée comme très difficile. Les sondes utilisées dans ce cas ne peuvent être reliées à une centrale d'acquisition automatique.

La deuxième technique consiste à installer les sondes horizontalement à partir d'une fosse. La sonde permet alors de déterminer la teneur en eau à une profondeur donnée contrairement à la sonde installée verticalement qui intègre les mesures sur une hauteur de sol donnée. Robinson et al. (2003) préconisent l'installation horizontale des sondes par rapport à une installation verticale, de manière à obtenir une meilleure résolution spatiale – en fonction de la profondeur – de la teneur en eau.

En revanche, la création d'une fosse – rebouchée après la mise en place des sondes – nécessaire à l'installation horizontale peut engendrer des perturbations et une déstructuration du sol. Même si ces phénomènes ne surviennent pas au droit des sondes, elles pourraient modifier les conditions hydrauliques, donc les écoulements, et par conséquent les teneurs en eau. L'idéal est donc d'installer la sonde plusieurs mois avant la période intéressante pour les mesures, de manière à ce que le sol ait repris une structure voisine de ce qu'il aurait naturellement.

Robinson et al. (2003) rappellent également que l'installation des sondes doit être réalisée avec le maximum de précaution pour éviter les perturbations du sol. Dans certains cas où le diamètre des guides d'onde est important (12.7 mm), un pré-trou peut être réalisé pour faciliter l'insertion des sondes. Pour des sondes de plus petit diamètre (6 ou 3 mm), ces pré-trous ne semblent pas nécessaires. Les auteurs précisent que si des pré-trous devaient être effectués, ils ne devront pas être trop longs. En effet, l'existence d'une poche d'air en bout de sonde pourrait considérablement influencer et fausser les mesures.

En effet, Knight (1992) a montré que des hétérogénéités autour des sondes – et notamment la présence d'air – pouvait fortement perturber la mesure de teneur en eau. Pour réduire de ce problème, il suggère que le diamètre de la sonde soit le plus large possible comparativement à l'espacement des guides d'onde. Il rappelle également que les sondes installées horizontalement perturbent les écoulements verticaux car elles constituent un obstacle à l'écoulement vertical. Pour réduire cette perturbation Knight (1992) suggère donc que des guides d'onde de petits diamètres soient utilisés. Il conclue donc sur l'intérêt d'utiliser des guides d'onde dont la taille est un compromis prenant en compte ces 2 aspects.

6. Ground penetrating radar (GPR)

Robinson et al. (2003) rappellent que la mesure de la permittivité diélectrique d'un milieu est une méthode séduisante pour estimer à différentes échelles la teneur en eau d'un milieu poreux. Trois techniques basées sur le même concept ont été développées. La première méthode, évoquée précédemment, est la méthode TDR qui permet d'estimer les teneurs en eau en continu mais qui constitue une mesure très localisée (quelques cm³ « échantillonnés » par chaque sonde). Les deux autres méthodes électromagnétiques ground penetrating radar (GPR – mesures en 2D) et active microwave remote sensing (surface) sont basées sur le même concept mais permettent d'avoir une information spatialisée.

Huisman et al. (2003) précisent que le GPR peut être utilisé de 4 manières différentes (teneur en eau déterminée par la vitesse de l'onde réfléchi, par la vitesse de l'onde souterraine, par la vitesse de l'onde transmise entre deux sondages, ou en

considérant un coefficient de réflexion de surface). Les auteurs concluent que le GPR n'est pas aussi fiable et robuste que les autres techniques TDR et qu'il s'agit encore d'un domaine de recherche. Toutefois ils soulignent l'intérêt de cette méthode qui permet de travailler à une échelle plus importante (bassin versant par exemple) que la mesure ponctuelle type TDR.

Le suivi en continu n'est pas possible.

Huisman et al. (2004) ont utilisé avec succès le GPR – ground wave – dans une pâture de 60 x 60 m. L'irrigation apportée non uniformément sur le sol sablo-limoneux (60% de sable, 30% de limon) a permis de créer des variations spatiales et temporelles de la teneur en eau dans la parcelle. Les résultats obtenus avec les TDR et le GPR sont très similaires. La différence existant entre les mesures pourrait être liée au fait que la profondeur investiguée par le GPR ne correspond pas exactement à la profondeur investiguée via les TDR. Ils concluent sur l'intérêt du GPR pour un travail sur des surfaces assez importantes mais préconisent l'usage de TDR pour des suivis plus fins à des échelles de moins de 1,5 m.

L'embarquement nécessaire sur des véhicules motorisés de ce type de matériel apparaît comme un facteur limitant pour l'accès à des parcelles cultivées ou boisées.

7. Comparaison des méthodes de mesure de teneur en eau

7.1. Tableau comparatif

Caractéristiques	Gravimétrie	Sonde neutron	TDR (type Trase)	Sonde capacitive (thetaprobe)
Précision	Précision de la mesure de densité	Fonction du temps de comptage et de l'étalonnage (+/- 0.002 g/cm ³)	# 2 %	# 2 %
Volume de mesure	= volume du prélèvement	Sphères de rayon 10 à 25 cm	Sphère d'environ 2 fois l'espacement entre les guides d'onde (8 cm * 2.5 cm)	
Calibration	Non	Oui	Souhaitable	Oui
Reproductibilité	Destructif	Oui	Oui	Oui
Profondeur de mesures	Pas de mesure en proche surface (inférieure à 5-10 cm) – quelques centimètres à plusieurs suivant la nature du sol (cailloux) : contraintes d'installation			
Remarque	Mesures ponctuelles - Peu coûteux – moyen de contrôle	Forte contrainte réglementaire (source neutron)	Mesure en continu – difficultés d'installation	Mesure en continu – difficultés d'installation

Illustration 27: Comparaison succincte des différentes méthodes de mesure de teneur en eau des sols (à partir des données constructeurs)

Les sites <http://www.sols-mesures.com/produits/produits.htm> ou <http://www.sdec-france.com/index.php?lg=an&numprod=35> peuvent être consultés à titre d'exemple afin de visualiser un certain nombre de matériels disponibles pour la mesure de la teneur en eau du sol.

7.2. Exemples de résultats obtenus avec différentes méthodes

Certains auteurs ont entrepris de comparer au laboratoire ou *in situ* les différentes techniques de mesure de teneur en eau.

Walker et al. (2004) ont ainsi comparé entre elles mais aussi par rapport aux mesures d'humidités pondérales effectuées régulièrement, les données acquises par 4 types de matériel (Virrib, réflectomètre Campbell CS615, TRASE sondes enterrables (buriable) ou sondes de surface (connector) pendant deux années sur un site expérimental, en plein champ, dans 4 types de sol (Australie). Les auteurs ont montré que la précision des sondes TDR de surface est de l'ordre de 2.5 % v/v par rapport aux humidités pondérales. Le Virrib (2 sondes concentriques en inox qui nécessitent une excavation et recompaction du sol pour leur installation) et les sondes TDR enterrables semblent surestimer les valeurs de teneur en eau suite à des événements pluvieux importants. De la même façon dans certains cas, le réflectomètre CS615 semble donner des valeurs aberrantes de teneur en eau puisqu'elles sont supérieures à la porosité du sol. Dans le contexte de l'étude, les auteurs précisent que les TDR de surface donnent les résultats les plus satisfaisants.

Robinson et al. (2003), sur la base d'une revue bibliographique, affirment que les sondes de capacité sont moins précises que les TDR en terme de mesure de teneur en eau ; elles sont en revanche assez performantes pour suivre les variations de salinité du sol.

Topp et Davis (1985) ont montré que les mesures TDR et gravimétriques étaient similaires avec un écart de $0.02 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ si la mesure est faite au même endroit ; l'écart entre les deux mesures peut augmenter si elles sont pas réalisées strictement au même endroit. Dans ce cas c'est la variabilité spatiale du sol qui intervient plus que la précision de la technique de mesure.

Wraith et Baker (1991), en travaillant sur un lysimètre rempli de limon, ont montré que les données TDR acquises de façon automatique étaient en adéquation avec la balance d'eau (pesée du lysimètre dans sa globalité). Ils valident donc de cette manière les données TDR.

Huisman et al. (2001) en comparant des mesures gravimétriques à des TDR installées verticalement depuis la surface (longueur 10 cm) montrent que la différence de teneur en eau est de l'ordre de $0.0243 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ entre les mesures TDR et les humidités pondérales. Ils s'appuient sur un jeu de 1000 mesures effectuées dans des sols présentant une large gamme de textures allant des sables aux limons.

7.3. Spatialisation des données de teneur en eau

L'estimation de la teneur en eau à l'échelle d'un bassin est une problématique intéressante à différents points de vue, de la gestion des ressources en eau à la production agricole.

Starks et al. (2003) propose une méthode de spatialisation des données de teneur en eau. Ils utilisent une base de données « sol » – incluant des informations texturales – comme donnée d'entrée d'un modèle (RZWQM Root Zone Water Quality Model) pour estimer les teneurs en eau dans l'horizon 0-60 cm. Les valeurs obtenues à l'aide du modèle sont comparées à des données obtenues *in situ* par des TDR et des mesures gravimétriques (humidités pondérales). Pour affiner les prédictions, des mesures en laboratoire ont été réalisées (mesures de conductivités hydrauliques à saturation, loi de rétention). Sur leur site d'étude présentant 5 grands types de sol allant de sables limoneux à des argiles, le calage du modèle et l'ajustement des lois descriptives des sols permet d'obtenir une prédiction satisfaisante de la teneur en eau, en adéquation avec ce qui est observé *in situ* dans son ensemble.

A notre connaissance, il existe peu de tentatives de spatialisation de mesures ponctuelles obtenues par exemple par TDR. La spatialisation se fait généralement via un modèle discrétisé, validé par quelques mesures ponctuelles.

8. Méthode pressentie

L'inventaire des méthodes existantes pour la mesure de la teneur en eau montre qu'il n'existe pas de méthode dont la mise en place serait aisée et garantissant la qualité de la mesure à l'échelle d'un bassin versant.

Les mesures d'humidité pondérales ne peuvent suffire pour atteindre l'objectif fixé car il s'agit d'une mesure ponctuelle et non immédiate (délai de séchage de 24 heures au mieux).

La nécessité d'installer des tubes d'accès rendent la spatialisation de la mesure par sonde neutron assez difficile. La mesure ne peut être automatisée et les fortes contraintes de sécurité tendent à écarter cette technique.

Le GPR semble offrir de bonnes perspectives et potentialités en terme de spatialisation des données mais il semble que cette technique ne puisse être utilisée que dans des sites accessibles à des engins motorisés. La forte densité de végétation et les fortes pentes rendent probablement cette technique inappropriée dans le cas présent.

Les sondes capacitatives peuvent en théorie être utilisées et autoriser une mesure en continu de la teneur en eau du sol ; la multiplication des sondes peut permettre de spatialiser dans une certaine mesure la donnée. Toutefois cette technique semble peu usitée même si aucun inconvénient majeur n'est clairement exprimé par les différents utilisateurs de matériel de mesure de teneur en eau.

Les sondes TDR – développées depuis le début des années 70 sont plus fréquemment utilisées et offrent dans certains cas de bons résultats, validés notamment par des mesures d'humidité pondérale. La mise en œuvre de cette technique pourrait donc être envisagée.

Annexe 4

Compte-rendu

COMPTE-RENDU DE REUNION	
Project : SCHAPI	Numéro : PSP04ARN35
Objet : Comité de pilotage thèse PA Ayrat et formalisation des relations entre les différents acteurs travaillant sur la problématique crue éclair sur le bassin versant du Gardon d'Anduze	
Date de la réunion: 6 juillet 2004	Lieu : EMA - ALES
Participants : SPC Delta du Rhône : Bressand - EMA : Ayrat – Sauvagnargues-Lesage - BRGM : Cerdan, Baran, Desprats - CNRS : Didon-Lescot – Martin – Joulie - LTHE : Vandervaere - CEMAGREF : Puech - Société Rhéa : Jacquet - Hydrosociences Montpellier : Marchandise	
Diffusion : C. Wittwer, C. Fouillac, T. Pointet, J. Varet, C. King, N. Lenotre, P. Lachassagne, N. Dorfliger, N. Baran, O. Cerdan, JF. Desprats.	

1. A six mois de la soutenance P.A. Ayrat a présenté ses travaux de thèse et les perspectives qui en découlent. Plusieurs références sont faites à la collaboration avec les autres acteurs, entre autre BRGM (carte du potentiel d'infiltration) ou Hydrosociences (simulateur de pluie)
2. Après quelques observations de F. Bressand, responsable du Service de Prévision des Crues Delta du Rhône, Sophie Sauvagnargues-Lesage (EMA) parle de la nécessité de formaliser les collaborations en place depuis 2002 sur le BV d'Anduze (30).

Les travaux des équipes à ce jour ont été :

- mesures in situ de ruissellement sur des sites installés par l'EMA et la DDE du Gard, avec la participation lors des journées d'essai du BRGM, d'Hydrosociences, ...
- mesures double anneau par le BRGM pour la réalisation d'une carte du potentiel d'infiltration (réalisation en 3 phases) (projet Karsteau BRGM 2002-2003, puis SCHAPI 2003-2005 en deux phases) ;
- mesures simulateur de pluie par Hydrosociences sur les sites de Tourgueilles et Peyrolles ;
- réalisation d'une publication BRGM – EMA sur les travaux et modélisation en cours.

Il conviendrait de formaliser cette entente, qui pourrait également permettre une mise en commun et une capitalisation (dans des conditions à préciser) des données acquises par les différents partenaires.

Il faudrait au moins établir une convention de recherche, mais la mise en place d'un Groupement d'Intérêt Scientifique est évoquée et encouragée par le SPC du Gard (F. Bressand). L'intérêt sous-jacent est une meilleure lisibilité pour une recherche de financement (Ministère, SCHAPI, Agence de bassin). Sophie Sauvagnargues-Lesage proposera une première rédaction au cours de l'été, qu'elle fera circuler entre les différents partenaires potentiels.

Par ailleurs une discussion a pris part pour une proposition de l'IFR « eau » (EMA, BRGM, Cemagref, hydroscience...) sur le thème : Améliorer la connaissance du risque hydrologique en réponse à des systèmes pluvio-orageux intenses. S. Sauvagnargues-Lesage centralisera les propositions pendant le cours de l'été.

L'intérêt du BRGM apparaît ainsi :

- meilleure intégration avec les acteurs scientifiques de la problématique crue éclair en région méditerranéenne, en collaboration avec un SPC majeur dans le Sud-Est ;
- meilleure lisibilité de notre action vis-à-vis du SCHAPI, qui s'appuie clairement sur ce SPC ;
- nécessaire collaboration avec les partenaires, afin de bénéficier de données nécessaires pour mener à bien des actions en cours avec le SCHAPI (modélisation des écoulements sur de petits BV).

J.F. Desprats, O. Cerdan.

Annexe 5

Compte-rendu

Réf. : SCHP0904	
COMPTE RENDU DE RÉUNION Orléans, le 29/09/2004	
Rédacteur : O. Cerdan	
Projet : Appui SCHAPI	Numéro : PSP04ARN35
Objet : Suivi du projet	
Date : 28/09/2004	Lieu : SCHAPI, Tlse
Participants :	J.M. Tanguy, P. Corvaisier, C. Wittwer, C. King, JF. Desprats, O. Cerdan
Absents :	
Diffusion :	Présents + N. Baran

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS
<p>1. <u>Propositions pour la valorisation des résultats du projet STREAM-Touch réalisé dans le cadre du RPI-CNES –BRGM entre 2003 et 2004:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - une proposition qui intégrera le SCHAPI (contribution étudiant + données météorologiques temps réel) et l’ESAP sera élaborée par le BRGM auprès du CNES (projet R&T) ; - les passerelles identifiées entre les préoccupations du CNES et les intérêts du SCHAPI portent principalement sur la recherche d’indicateurs aussi bien au niveau conceptuel que métrologique (carte de perméabilité selon la saison et l’évènement, état de saturation des sols, outil de simulation...). (action 1) ; - à noter la DIREN va intégrer ce bassin dans son réseau d’Alerte de Crue, ce qui est un avantage pour poursuivre des travaux sur ce bassin ; - d’autres aspects complémentaires pourraient aussi être envisagés : Prise de contact à effectuer entre le SCHAPI et l’antenne BRGM régionale, en premier lieu pour l’identification et le dimensionnement d’une soumission au CPER (action 2).
<p>2. <u>Réflexion sur l’utilisation des techniques de télédétection spatiale pour la détermination des caractéristiques hydrologiques et la saturation des sols (projet envisageable en partenariat avec le CNES) :</u></p> <p>cette reflexion touche au volet satellitaire , elle est complémentaire des centres d’interet CNEs et SCHAPI et sera incluse dans l’action 1</p>
<p>3. <u>Etat d’avancement des actions en cours sur le BV des Gardons et principaux résultats :</u></p> <p>Pour l’année 2, les mesures de perméabilité sont bien avancées. Il reste à</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Affiner la carte de perméabilité sur le bv du gardon d’Anduze en fonction de l’occupation du sol

- Calibrer les valeurs de perméabilité
- Définir des événements climatiques types (en relation avec l'EMA et DDE30)
- Effectuer les simulations de scénario sur des sous bassins

4. Actions envisageables en fin 2004- puis 2005 dans le cadre de la convention DE en cours :

Remise du rapport préliminaire de N. Baran sur la faisabilité du suivi de la teneur en eau des sols dans le bassin du Gardon d'Anduze :

Suite aux réserves émises dans ce document quant à la faisabilité du suivi du degré de saturation des sols sur le Gardon d'Anduze :

- Sols très caillouteux, peu profonds et très hétérogènes peu propices à l'installation de dispositifs de suivi
- Mesure du débit éventuellement possible dans les zones à arène granitique mais qui sont les plus filtrantes et qui a priori participent le moins aux crues !
- Mauvaise connaissance de l'hydrologie du bassin (il faudrait au moins attendre les résultats de l'étude isotopique prévues dans le cadre de l'IFR eau pour avoir une idée sur les contributions relatives des différentes unités du BV aux crues)
- Mauvaise accessibilité du site

Il est proposé de reporter l'étude du suivi de la saturation des sols sur le BV du Touch qui présente des caractéristiques pédologiques plus favorables et qui présenterait des coefficients de ruissellement plus importants en saison humide (d'où l'idée d'une influence, même indirecte de la zone non saturée).


Cette proposition ne pourrait être active qu'avec un accord formel de SCHAPI, et une analyse des implications sur le cahier des charges de la convention en cours actuel. Du point de vue du BRGM, ce transfert de l'activité sur ce BV devrait permettre une mise en place expérimentale avec le même dimensionnement de ressources (action 4), il serait préférable d'instrumenter sur les terrains de l'ESAP avec leur accord.

Par contre le Touch ne possède pas non plus de petits sous bassins équipés de mesures de débit ce qui permettrait de répondre directement à la question de l'influence de l'état de saturation sur les crues). Le SCHAPI prend l'action de voir comment intéresser la DIREN à cette ou ces instrumentations

Action	Responsable	Dél	Sol
1. Proposition au CNES avec validation du SCHAPI	BRGM/ARN	1m	
2. Commentaires sur livrable	SCHAPI	8	
3. identification de proposition complémentaire au CPER	BRGM :SGR MPY- SCHAPI	3	
4. confirmation du changement de bassin pour instrumenter le suivi d’état hydrique des sols	SCHAPI	8	

Annexe 6

Compte-rendu

 <p>MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE</p>	<p>PROJET TOUCH</p> <p>Compte rendu réunion du 20 janvier 2005</p>	<p>Statut : Provisoire Date : 23/06/05</p>
<p>Rédacteurs : Wittwer & Corvaisier</p>		

Participants

BRGM : Mmes Baran, Ghyselinck, MM Baghdadi, Cerdan, Dutartre,
CNES : Mme Lafaye
Diren Midi-Pyrénées : M. Vidal
ESAP : M. Gay
SCHAPI : Mme Wittwer, MM Tanguy, Corvaisier, Gouin et Hébrard
Excusée : Mme C.King, BRGM

Actions et objectifs de chaque organisation

SCHAPI

- Le programme « carte de vigilance » est prioritaire. Il sera nécessaire de mettre en place des indicateurs du niveau de risque à échéance 24h. Cette démarche, qui pourrait prendre en compte la saturation des sols comme indicateur sur certains bassins, sera étudiée dans le cadre du Projet Touch SCHAPI.
- Le programme Bassins Versants Numériques Expérimentaux (BVNE) vise à tester et à qualifier des modèles opérationnels avant de les étendre aux SPC. Une dizaine de bassins sera retenue dans une première étape. Le Schapi souhaite mettre en place une telle expérimentation sur le Touch.

Diren Midi-Pyrénées

- Le Touch fait partie du nouveau territoire du SPC. La Diren devra faire de la prévision de crues sur le secteur aval du Touch, fortement urbanisé. A cette occasion, deux stations (limnimètre + pluviomètre) seront installées (Bérat et Plaisance du Touch). Les modèles de prévision qui seront installés dans un premier temps sont ceux présents dans Sophie (relations Q-Q).
- Dans le cadre du projet Touch SCHAPI, la Diren installera 1 station limnimétrique à l'exutoire du petit bassin expérimental et au moins un pluviomètre. Elle demande que le projet produise notamment des résultats utilisables par l'opérationnel (notamment des indicateurs de risque).
- Des études sur le Touch permettraient d'obtenir des informations sur 2 enjeux de la prévision des crues en Midi-Pyrénées : les indicateurs de crues à court terme et les phénomènes de nappes.

CNES

- D'une manière générale, le CNES soutient les projets qui utilisent l'information satellite pour la connaissance de l'environnement et notamment dans le domaine des risques naturels.
- Pour le risque inondations, plusieurs actions sont conduites en partenariat. (Projet Touch 2004 avec le BRGM et l'ESAP, intégration de données spatiales dans Marine avec l'IMFT, cartographie des zones inondables avec le CEMAGREF, APIBAR,...)
- Dans le cadre du projet Touch Schapi, le CNES souhaiterait qu'un accord de partenariat avec le SCHAPI soit mis en place notamment sur l'échange des données et l'utilisation de données. Cet accord permettrait également de communiquer sur des résultats d'études qui sont menées dans le cadre d'autres conventions, indépendamment du SCHAPI (CEMAGREF, LTHE,...)

BRGM

- Cet organisme conduit des études sur le Touch dans le cadre de la R&D du CNES, du BRGM et de l'ESAP.
- Dans le cadre de sa convention avec la DE du MEDD, il intervient pour le SCHAPI sur les Gardons et sur le Touch (notamment productions de cartes sur l'occupation du sol, la capacité d'infiltration du sol, et production de simulations du ruissellement consultables à terme avant et pendant la mise en vigilance météo, avec en sus sur le Touch une métrologie de l'état de saturation des sols à mettre en place).

ESAP

- Cette école intervient en partenaire sur les projets Touch CNES-BRGM. Elle a mis en place et gère une base de données sur le Touch (ponctuelles ou spatialisées).
- Elle participerait au projet Touch SCHAPI et peut mettre à disposition des étudiants sur l'ensemble de l'année (recueil de données, suivi des sites de mesure,...).

Présentations des études sur le Touch

Apibar

Le partenariat CNES-BRGM-ESAP a déjà conduit une étude qui visait à démontrer l'intérêt des données spatiales dans les outils de simulation hydrologique. Un rapport a été remis au CNES.

Dans sa suite, le projet APIBAR a été monté et regroupe les mêmes organismes. Il est cofinancé par le CNES, le BRGM et l'ESAP dans le cadre de leur R&D respectives, et reçoit des données satellitaires de l'ESA – Dragon (A-SAR). Il s'agit d'accéder aux états hydriques par radar, de caractériser les états de surface- in situ et par voie satellitaire optique, et d'intégrer ces informations dans une modélisation d'aide à la prévision.

Projet Touch du SCHAPI

Instrumenter un petit bassin du Touch (quelques km²) pour réaliser un suivi hydrologique et produire, en continu, des informations sur les précipitations, les niveaux d'eau et les propriétés hydrodynamiques des sols avec des instruments qui pourraient ensuite permettre le suivi en temps réel.

- Les objectifs immédiats sont : vérifier la possibilité de faire des mesures de teneurs en eau in situ et en continu et étudier la variabilité de l'état de saturation des sols au cours d'une année et son implication sur la réponse hydrologique du bassin (relation saturation/hauteur d'eau).
- Deux objectifs à plus long terme touchent à la construction d'indicateurs de risques pouvant s'appuyer sur une estimation de l'état de saturation amplifiant les risques de ruissellement et la validation des mesures indirectes de l'état de saturation du sol (mesure satellitaires, modèles Isba de Météo-France, ...)
- L'instrumentation et les données comprendront notamment :
 - Potentiel d'infiltration des sols
 - Humidité du sol : sondes TDR et 2 stations d'acquisition
 - Position de la nappe : piézomètres
 - Occupation du sol
 - La pluie : mise en place d'un pluviomètre
(*l'ESAP avait signalé l'existence de pluviomètres*)
 - Hauteur d'eau : mise en place d'un limnimètre

BRGM
BRGM
BRGM
ESAP- BRGM
DIREN

DIREN

BVNE : sur l'ensemble du bassin, des modèles hydrologiques seraient installés. Le but est de tester des modèles dans les conditions de l'opérationnel.

Suites à donner

Identification du bassin à instrumenter. Le BRGM fera 1 ou 2 propositions. Une visite de site sera effectuée avec la Diren afin d'étudier la faisabilité de mise en place des limnimètres. Le SCHAPI sera informé de la visite.

Le BRGM devra se positionner sur la possibilité de faire évoluer le BV vers un BVNE, ce qui impliquerait une mise à disposition des données à tous les partenaires du BVNE Touch et la participation du BRGM dans le programme BVNE.

La démarche BVNE pourrait intégrer le BRGM, l'IMFT et Météo France (ceci permettrait une mise à disposition des données ISBA notamment)

Intégration du SCHAPI dans le comité de suivi du projet Apibar (action SCHAPI-CNES)

Annexe 7

Publication SFPT

INTEGRATION DE LA VARIABILITE SPATIALE DE L'INFILTRATION DES SOLS DANS UN MODELE DE PREVISION DES CRUES OPERATIONNEL : ALHTAÏR - ZONE TEST DU BASSIN VERSANT DU GARDON D'ANDUZE -

Ayral P.A.*, Desprats J.F.**, Bressand F.***, Pinel D.**, Sauvagnargues-Lesage S.**,
King C.**, Dorfliger N.**

* Ecole des Mines d'Alès, 6 Av. de Clavières, 30319 Alès - 0466782758 - 0466782701
- pierre-alain.ayral@ema.fr

** BRGM, 1039 rue de Pinville, 34000 Montpellier - 0467596449 - 0467645851 -
jf.desprats@brgm.fr

*** DDE/SAC 30, 89 rue Weber, 30907 Nîmes - 0466626200 - 0466626480 -
francois.Bressand@equipement.gouv.fr

Résumé

Le modèle de prévision des crues ALHTAÏR est développé depuis bientôt 5 ans par le Service d'Annonce des Crues du Gard (SAC-30). Ce modèle, à vocation opérationnelle, a pour finalité la production d'un hydrogramme de crue en temps réel en tout point choisi comme exutoire de la zone sous surveillance du SAC-30. Deux versions de ce modèle de prévision de crue existent. La première version, ALHTAÏR en mode « bassin versant », permet un calage des paramètres du modèle par bassin versant étudié. La seconde, ALHTAÏR en mode « spatialisé », permet de réaliser un calage en fonction de caractéristiques telle que la capacité d'infiltration des sols. Une cartographie de la perméabilité des sols sur le bassin versant test du Gardon d'Anduze a été réalisée. Les premiers tests présentés d'ALHTAÏR en mode spatialisé montrent l'intérêt d'une telle démarche, sous réserve d'affiner la méthodologie mise en place pour réaliser cette spatialisation et la calibration du modèle. Ces compléments de recherche sont indispensables pour envisager d'étendre l'utilisation d'ALHTAÏR en mode spatialisé à l'ensemble de la zone de compétence du SAC-30.

Mots Clés : prévision de crue, crue éclair, spatialisation, capacité d'infiltration du sol, service de prévision des crues

Abstract

The flood forecasting model ALHTAÏR is developed for five years by the flood-warning service: Service d'Annonce des Crues du Gard (SAC-30). This model, with an operational orientation, aims at a flood hydrograph for each location of the rivers for the supervision area of the SAC-30, in a real time processing. Two versions of this flood forecasting model exist. The first one, ALHTAÏR in "watershed" mode, allows to affect the model parameters by catchment area. The second version, ALHTAÏR in "spatialised" mode, allows to realize a model calibration according to the catchment area characteristics such as the infiltration capacity. A cartography of the permeability on Gardon d'Anduze watershed was realized. First tests of this cartography with ALHTAÏR in "spatialised" mode show the interest of this approach provided that the methodology is refined to realize the cartography of the permeability and the model

calibration. Further researches are required to consider an expansion of the use of ALHTAÏR in "spatialised" mode to the whole area under supervision of the SAC-30.

Keywords: flood forecasting, flash flood, spatialisation, infiltration capacity, flood warning service

Introduction

Les inondations du 8 et 9 septembre 2002 témoignent, une nouvelle fois, de l'intensité et de la rapidité des phénomènes de crues générés par les épisodes climatiques dit "Cévenols". Les fortes précipitations qui se sont abattues sur les contreforts des Cévennes durant 24 heures ont atteint des cumuls très importants voire exceptionnels, jusqu'à 650 mm sur Anduze. Un des facteurs explicatifs de l'ampleur de cette catastrophe est la conjugaison de l'étendue et de la durée de l'événement orageux. Ainsi, c'est l'ensemble des cours d'eau qui s'est retrouvé en crue et qui a provoqué de gros dommages, notamment en vies humaines.

Le Service d'Annonce des Crues du Gard (Futur Service de Prévision des Crues Grand-Delta) a la charge de surveiller les principaux cours d'eau de son département. Pour ce faire il dispose d'un réseau de stations de télémessures implantées aux points stratégiques de ces rivières. Il est cependant difficile, pour des événements comme celui du 8 et 9 septembre dernier, de surveiller l'ensemble des cours d'eau gardois qui ont été contributifs; de plus pour répondre aux caractéristiques d'extrême rapidité et de forte intensité de ces crues éclairs, il est nécessaire de

pouvoir anticiper cette annonce. C'est donc pour répondre au mieux à ces caractéristiques que le SAC-30 développe un système de prévision des crues permettant une gestion spatialisée et anticipée des événements pluvieux intenses.

Après une présentation d'ALHTAÏR et de ses fonctionnalités, c'est le volet du projet de recherche concernant la spatialisation de ce modèle de prévision de crue qui sera développé.

1. Contexte et problématique

Le Service d'Annonce des Crues du Gard (SAC-30) développe depuis bientôt 5 ans le modèle de prévision de crue ALHTAÏR (**AL**arme **H**ydrologique **T**erritoriale **A**utomatisée par **I**ndicateur de **R**isque) [Bressand, 2002]. Ce modèle, à vocation opérationnelle, a pour objectif la production d'un hydrogramme de crue en temps réel sur des bassins versants dont la surface reste inférieure à 500 km².

1.1. Structure d'ALHTAÏR

Le système ALHTAÏR se compose de 3 "outils" :

- Le système CALAMAR, développé par la société Rhéa®, permet au pas de temps de 5 minutes une mesure de la lame d'eau tombant sur la zone d'étude par exploitation des images radar. Après correction avec les données issues des pluviographes au sol, le fichier matriciel géoréférencé obtenu donne l'intensité des précipitations pour chaque pixel (1 km²) de la zone étudiée.
- Le logiciel HYDROKIT, développé par la société Strategis®, permet de délimiter l'ensemble des bassins versants et sous bassins versants de la zone sous surveillance du SAC-30. Grâce à un Modèle Numérique de Terrain (MNT), HYDROKIT génère un fichier matriciel géoréférencé qui détermine pour chaque pixel (1km²) les paramètres hydrographiques permettant le calcul du temps de transfert (distance hydrographique, pente,...).
- Le logiciel ALHTAÏR proprement dit, est un modèle de prévision pluie/débit distribué intégrant un module de production et un module de propagation. Le module de production, inspiré de la loi de Horton [Horton, 1933], permet de déterminer la part des précipitations qui ruissellent en fonction de la capacité d'infiltration du sol retenue. Puis, le module de propagation transfère le ruissellement à l'exutoire grâce aux données d'HYDROKIT.

Ce modèle fonctionne actuellement en temps réel au SAC-30, ce qui permet d'acquérir des données permettant l'analyse du système en terme de retour d'expérience. Il est ainsi possible de rejouer les événements pluvieux enregistrés en temps différé. L'interface d'ALHTAÏR est présentée dans la figure suivante (Figure 1).

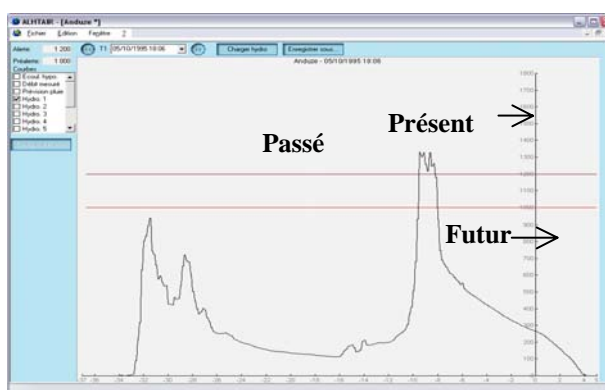


Figure 1 : interface d'ALHTAÏR

Dans sa phase actuelle de développement, le modèle ALHTAÏR existe en deux versions. La première fonctionne en mode "bassin versant", le module de production peut être calé par bassin versant tandis que le second fonctionne en mode "spatialisé" et permet de réaliser un calage en fonction de caractéristiques propres à la zone de compétence du SAC-30 comme par exemple la géologie ou l'occupation du sol.

1.2. ALHTAÏR en mode "bassin versant"

Dans sa version initiale, le module de production d'ALHTAÏR fonctionne avec un calage de ses paramètres (au nombre de 6) par bassins versants. Toutefois, l'objectif d'ALHTAÏR étant de faire de la prévision de crue sur des bassins versant non jaugés, un calage unique pour la zone de compétence du SAC-30 a été privilégié [Bressand, 2001]. Le schéma de fonctionnement du module de production est présenté ci-dessous (Figure 2).

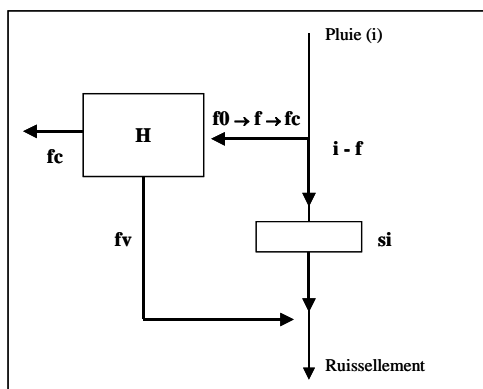


Figure 2 : schématisation du fonctionnement du module de production d'ALHTAÏR

La pluie brute (i) est soustraite à la capacité d'infiltration initiale (f_0) en début d'évènement puis à la capacité d'infiltration réévaluée (f). En effet, la capacité d'infiltration initiale diminue au cours de l'évènement pour tendre vers l'infiltration profonde (f_c). La pluie efficace (qui « ruisselle » au sens hortonien, $i-f$) doit remplir le volume que représente la pluie d'imbibition (s_i) avant de participer activement à l'écoulement de crue. L'écoulement hypodermique (f_v) est généré par la vidange du stockage hortonien (H) et participe à « retardement » aux écoulements générateurs de la crue. A la fin de l'évènement, le volume d'imbibition (s_i) se vide au travers du stockage hortonien. Le calcul s'effectue au droit de chaque pixel au pas de temps de 5 minutes.

Les quatre paramètres fondamentaux du module présentés dans le schéma précédent (f_0 , f_c , f_v et s_i) sont susceptibles d'être calés par bassin versant. Les deux autres paramètres de ce module, k (coefficient de décroissance exponentielle jusqu'à saturation) et α (coefficient d'ajustement pour la décrue) ont des fonctions d'ajustement et sont, en l'état actuel des recherches, considérés comme des constantes.

Les résultats d'ALHTAÏR en mode "bassin versant" [Bressand, 2001] tendent à montrer qu'ALHTAÏR donne de bons résultats en terme de synchronisation des pics de crue, mais a tendance à surestimer le débit de pointe. D'autre part, des reconstitutions incomplètes apparaissent sur des zones où la loi de Horton ne semble pas rendre compte de la genèse de la crue, comme le montre les hydrogrammes présentés ci-dessous (Figure 3). En particulier, l'hydrogramme et la simulation de Saint Hippolyte du Fort, relatif à l'évènement du 3 octobre 1995 (dont le bassin versant est fortement karstique) montre qu'ALHTAÏR ne retranscrit pas le 1^{er} pic de crue mesuré.

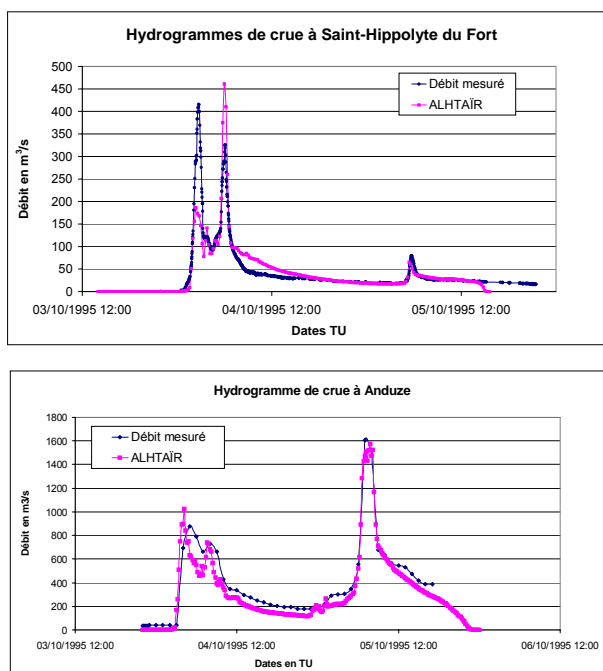


Figure 3 : hydrogrammes de crue de l'évènement du 3 octobre 1995 à Saint-Hippolyte du Fort et à Anduze

De manière à parfaire les résultats du modèle et plus particulièrement du module de production qui surestime les débits de pointe, une seconde version d'ALHTAÏR a été développée. Cette version fonctionne en mode spatialisé, ce qui permet un calage des paramètres du module de production par zones homogènes.

1.3. ALHTAÏR en mode "spatialisé"

L'idée directrice qui a conduit le SAC-30 à développer cette version d'ALHTAÏR était de répondre à l'hétérogénéité forte du comportement des sols en terme d'infiltration au sein d'un même bassin versant. La partie centrale de ce travail se situe donc dans la mise au point d'une couche d'information permettant de rendre compte de cette hétérogénéité et dans l'attribution de paramètres différenciés du module de production d'ALHTAÏR en fonction de la cartographie réalisée.

La problématique de ce travail consiste en la discrétisation du territoire en fonction de la capacité d'infiltration de l'eau dans les sols (paramètre majeur du modèle) lors des épisodes pluvieux majeurs (événements entraînant une crue). Cette typologie des sols est réalisée en tenant compte des paramètres intrinsèques des sols (propriétés du sol : structure, rugosité, teneur en eau,...) au travers de mesures expérimentales mais aussi de paramètres exogènes (extérieurs à l'élément sol, comme l'occupation du sol ou la géologie) grâce à une démarche d'analyse spatiale à l'aide des Systèmes d'Information Géographique (SIG). L'attribution de coefficients spécifiques à chaque zone ainsi déterminée doit permettre au modèle ALHTAÏR de pondérer ses analyses de production. La figure suivante (Figure 4) schématise la problématique du projet.

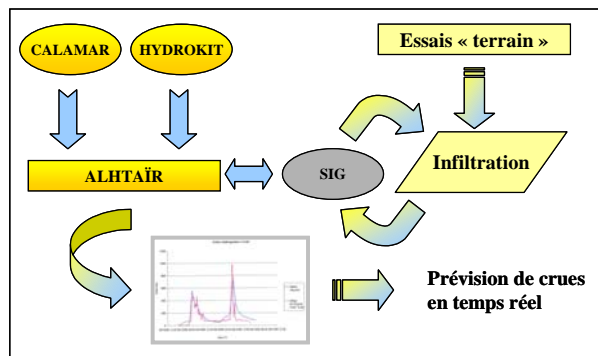


Figure 4 : intégration dans Alhtair d'une couche d'information sur la capacité d'infiltration du sol

Les résultats présentés, dans cet article, font état du premier volet de ce projet de recherche qui s'appuie sur une zone test qui est le bassin versant du Gardon d'Anduze. L'ensemble des étapes qui ont conduit aux premières simulations d'ALHTAÏR en mode spatialisé sont développées, à savoir la constitution d'une base de données SIG, la réalisation de la carte de perméabilité et enfin l'analyse de ces premiers résultats. Ce projet de recherche a mobilisé des équipes de recherche du BRGM Montpellier, de l'Ecole des Mines d'Alès et du SAC-30.

2. Elaboration d'une base SIG

Le bassin versant test du Gardon d'Anduze se situe dans la partie Nord Est du Languedoc méditerranéen, principalement dans le département du Gard mais aussi dans le Sud de la Lozère. Son exutoire se situe au niveau de la ville d'Anduze. A l'exutoire, l'altitude est de 131 m et le sommet du bassin versant se trouve à 1036 m. La surface de ce bassin versant est de 540 km² et la pente moyenne est de 10%. L'exutoire est équipé d'une station limnimétrique de télémessure gérée par le SAC du Gard. Deux sous bassins versants présentent un intérêt pour cette étude dans la mesure où ils sont également équipés d'une station limnimétrique gérée par le SAC-30, à savoir : le bassin versant du Gardon de Saint-Jean à Saumane et le bassin versant du Gardon de Mialet à Mialet. Le bassin versant du Gardon de Saint-Jean a une surface de 100 km² et des pentes moyennes de l'ordre de 36 %, celui du Gardon de Mialet, a une surface de 230 km² et des pentes moyennes de 20 %.

2.1. Cartographie de l'occupation du sol par télédétection

La classification de l'occupation des sols a été élaborée à partir de l'étude de deux images satellitales SPOT, acquises en mai et en août 2001.

La classification de l'occupation des sols selon le maximum de vraisemblance permet de différencier 8 catégories : garrigue, forêt, sol nu, eau, urbain, cultures hiver, vigne et jardins. Elle a fait l'objet d'une validation sur le terrain. Ce bassin versant est couvert à plus de 95 % par la forêt (forêt dense de châtaigniers et forêt arbustive de chênes, avec un gradient de densification vers l'ouest), sur des terrains assez à très accidentés. Cette homogénéité constatée, a conduit, pour ce premier travail de cartographie, à privilégier la géologie et la pédologie pour la détermination des zones homogènes.

2.2. Cartographie des formations géologiques

Réalisée à partir d'une synthèse des fonds géologiques existants, de la carte de la vulnérabilité des eaux souterraines et des fonds topographiques de l'IGN, la carte géologique montre que la partie Nord du bassin versant est essentiellement schisteuse (58 % de la superficie), la partie centrale est granitique, le Sud et l'Est concentrent les formations calcaires, dolomitiques, marneuses et argilo-gréseuses. Les deux sous bassins versants sont plus homogènes d'un point de vue des formations géologiques. Le bassin versant de Saumane est quasiment constitué que de schistes, seule une petite surface en amont est composée pour moitié de granite et de formations calcaires. Le bassin versant de Mialet est lui aussi constitué pour sa plus grande partie de schiste, avec toutefois une zone amont et aval granitique et calcaire plus importante que sur le bassin versant de Saumane.

2.3. Cartographie des formations pédologiques

La BDSols (unités pédopaysagères) réalisée par l'INRA, a été acquise auprès de la Chambre Régionale de l'Agriculture. Le bassin versant est divisé en unités pédologiques cartographiques (UCS). Chaque UCS est composée d'une ou plusieurs unités de sol (US) auxquelles sont affectées les caractéristiques suivantes : la description du type de sol, la profondeur (minimum, moyenne, maximum), le type de végétation en place, l'épaisseur et les pourcentages de pierrosité, de sable, de limon et d'argile. Ces US représentent une proportion statistique des UCS dans laquelle elles sont contenues. Après analyse, l'US la plus représentative est associée à l'UCS à laquelle elle est rattachée.

Enfin, le Modèle Numérique de Terrain (MNT de l'IGN), et les données de la BD Carto (IGN) constituent les autres éléments de base du SIG.

L'ensemble de ces données a permis de dégager des unités aux caractéristiques proches sur lesquelles des mesures expérimentales sont conduites de manière à les caractériser du point de vue de leur perméabilité.

3. Cartographie du potentiel d'infiltration

Les méthodes de mesure de l'infiltration caractérisent la capacité du sol à absorber l'eau à travers la croûte terrestre [Youngs, 1991]. Lors de l'emploi de ces méthodes, le sol est généralement considéré comme uniforme sur la parcelle étudiée. Les méthodes de mesure expérimentales de l'infiltrabilité sont nombreuses. Il est possible de les classer en 3 grandes familles de dispositifs expérimentaux qui se distinguent de part leurs échelles de mesure. Il existe (i) des dispositifs en laboratoire, (ii) des dispositifs de mesure "in-situ" à l'échelle ponctuelle (dont la surface de mesure n'excède pas 1 m²) tels que le double anneau et (iii) des dispositifs "in-situ" à l'échelle parcellaire (dont la surface de mesure est supérieure ou égale à 1m²) sous pluie réelle ou sous pluie simulée. Après une étude bibliographique [Ayrat et Sauvagnargues-Lesage, 2003], les approches "in-situ" ont été privilégiées car elles permettent une analyse spatiale (multiplication des points de mesure) tout en conservant au mieux l'état de surface du sol (méthodes non destructrices), du moins en ce qui concerne les simulateurs de pluie.

3.1. Mesures "in-situ"

Les mesures "in-situ" à l'échelle parcellaire ($\geq 1 \text{ m}^2$) réalisées à l'aide d'un simulateur de pluie présentent les avantages d'être proches d'une pluie réelle et de pouvoir analyser une surface importante (à partir de 10m²). Elles s'avèrent difficiles à mettre en œuvre dans un temps restreint et sur un nombre relativement élevé de points [Desprats *et al.*, 2003].

L'infiltromètre double anneau CERAS à réglette (type Müntz) est donc utilisé en parallèle car il permet un nombre de mesures conséquent (4 à 5 sites par jour, 82 réalisés) nécessaire compte tenu du caractère hétérogène du bassin versant. Cet appareil donne directement une lecture en hauteur d'eau dans la

cellule de mesure. Le principe est de suivre l'évolution du niveau d'eau en fonction du temps dans l'anneau interne pour connaître la vitesse d'infiltration sur chaque pas de temps.

Trois à cinq mesures sont réalisées sur chaque site afin d'accroître la représentativité de la mesure. Cet infiltromètre permet de déterminer l'infiltration de l'eau dans le sol de façon très locale (diamètre de l'appareil : environ 40 cm) et devra être complété par des mesures avec simulateurs de pluie sur des sites judicieusement choisis à partir des résultats de cette étude.

Parallèlement à cette approche, des essais expérimentaux de simulation de pluie sur une parcelle de 10 m² ont été entrepris [Ayrat et Sauvagnargues-Lesage, 2003]. Ces essais ne peuvent en l'état actuel être corrélés avec les mesures précédemment décrites, car elles n'ont été effectuées que sur un seul site (Tourgueille, sur le bassin versant de Saumane sur substrat schisteux). Cependant, la localisation et la construction de nouveaux sites a débuté à partir de la cartographie établie à l'aide des mesures au double anneau. Ces travaux expérimentaux devraient permettre en sus de prendre la mesure de la variabilité temporelle de la capacité d'infiltration.

Il sera alors nécessaire d'établir une relation entre les résultats qualitatifs de cette approche, et les mesures précises mais ponctuelles devant être réalisées à l'aide de simulateurs de pluie en différents points.

3.2. Analyse des résultats

L'analyse des mesures de perméabilité faites sur le terrain montre une relation avec les formations géologiques, et plus précisément avec les sols développés sur chaque type géologique ; le sol constitue naturellement une interface majeure entre la pluie et les formations profondes, par sa nature (plus ou moins argileux, compact ou caillouteux, filtrant) et son importance (plus ou moins épais). Par exemple, les granites, selon leur niveau de fracturation sont considérés comme des formations géologiques peu perméables. Cependant, les arènes granitiques, formations sableuses développées par altération des granites, présentent une plus forte porosité et vont constituer un sol particulièrement perméable, ce qui a été confirmé par les mesures d'infiltration in situ. A l'inverse, les sols argileux ou marneux développés sur les formations calcaires (karstifiées) vont plutôt favoriser le ruissellement, ce qui se traduit au niveau des mesures par de faibles perméabilités.

Pour chacune des six classes de formations superficielles basées sur le regroupement des différentes formations géologiques, une moyenne d'infiltration est calculée et un code de perméabilité leur est affecté (perméabilité décroissante de 1 à 6) (Tableau 1).

Formations superficielles (Nombres de sites utilisés)	Infiltration moyenne (mm/s-mm/h)	Code de perméabilité
Altérites sur granite, éboulis	0,248 (893 mm/h)	1
Sols sur dolomies et calcaires + gneiss	0,134 (482 mm/h)	2
Argiles – grès	0,130 (468 mm/h)	3
Alluvions sur terrasses	0,085 (306 mm/h)	4
Sols sur schistes	0,081 (292 mm/h)	5
Sols sur marnes, calcaires marneux – argileux	0,046 (165 mm/h)	6

Tableau 1 : synthèse des mesures et attribution des codes de perméabilité

Les formations superficielles des codes 1, 3, 4, 5 et 6 pour lesquelles l'écart type est acceptable (Figure 5) représentent 84 % de la surface du bassin versant étudié.

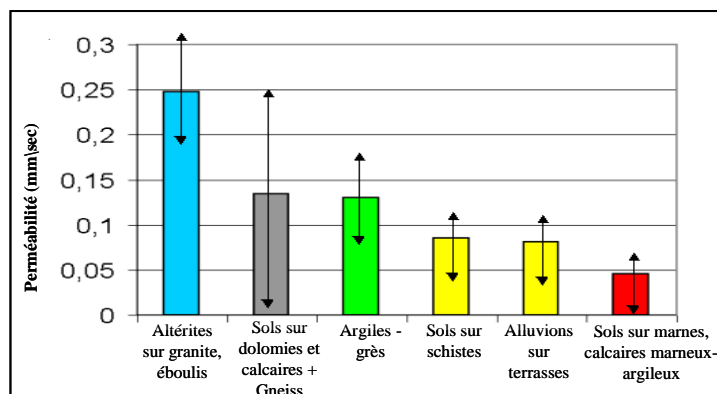


Figure 5 : visualisation des 5 classes de perméabilité (moyenne – écart-type)

L'écart type, important au niveau de la formation superficielle « sols sur dolomies et calcaires » (2), peut s'expliquer par la variabilité de développement du sol sur ces formations qui freinent l'infiltration (cf. paragraphe précédent).

3.3. Cartographie de la perméabilité

La carte obtenue présentée ci-dessous (Figure 6) est la résultante de l'analyse SIG et des essais expérimentaux menés avec l'infiltromètre double anneau. C'est cette cartographie qui va servir de base à la régionalisation du module de production d'ALHTAÏR. Les classes 4 et 5 qui présentent des perméabilités moyennes proches sont représentées dans la même catégorie (jaune).

A l'aide de l'outil HYDROKIT, des grilles sont générées à partir de cette cartographie de la perméabilité. L'information contenue associera la zone de perméabilité avec la valeur du coefficient du module de

production choisie. Ainsi, Hydrokit est en mesure de générer 6 grilles (une par paramètres du module de production), la valeur du pixel variant en fonction du zonage de la perméabilité.

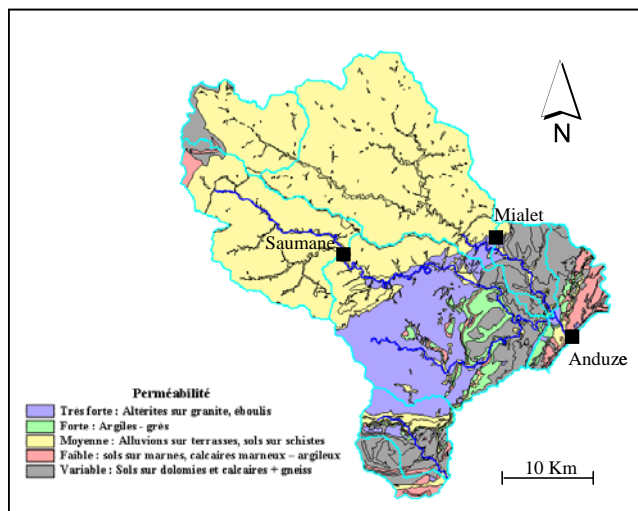


Figure 6 : cartographie de la perméabilité

Les premiers essais réalisés à partir de cette cartographie sont présentés ci-dessous.

4. Premiers tests en mode spatialisé

Deux évènements pluvieux ont été sélectionnés pour réaliser ces premières simulations en mode spatialisé: l'évènement du 3 octobre 1995 et l'évènement du 28 septembre 2000.

4.1. Principe et méthode

La version spatialisée du modèle ALHTAÏR permet de faire varier l'ensemble des paramètres de son module de production, dans ce développement seule la capacité d'infiltration (f_0) a été testée. En effet, la capacité d'infiltration est le paramètre le plus influent en terme de "production" (débit de pointe) sur l'hydrogramme simulé.

Le postulat de départ pour réaliser ces simulations, est que si la perméabilité d'une zone est forte alors sa capacité d'infiltration (f_0) doit être importante de manière à limiter le ruissellement. 15 essais mettant en jeu des paramètres distincts pour chaque classe de perméabilité ont été réalisés. Le test dont les résultats sont présentés dans le chapitre suivant est décrit dans le tableau ci-dessous (Tableau 2).

Paramètres d'ALHTAÏR	f0	fv	f _c	k	α	si
En mode Bassin Versant	90	15	4	0.575	3	0
En mode "Spatialisé"						
1. Perméabilité très forte	120	15	4	0.575	3	0
2. Perméabilité forte	110	15	4	0.575	3	0
3. Perméabilité moyenne	100	15	4	0.575	3	0
4. Perméabilité faible et variable	70	15	4	0.575	3	0

Tableau 2 : paramètres d'Alhtaïr retenus associés à la cartographie de la perméabilité

En l'état actuel d'avancement des travaux, il n'est pas possible d'établir un rapport direct entre les mesures expérimentales et les paramètres ayant une représentation physique du module de production d'ALHTAÏR. De plus, bien qu'inspiré de la loi de Horton, ce modèle se classe dans la catégorie des modèles conceptuels ce qui fait perdre tout sens "physique" à ses paramètres [Cosandey et Robinson, 2002]. La mise au point du processus de calage a donc été effectuée à partir d'une étude de sensibilité des paramètres du module de production et plus particulièrement de la capacité d'infiltration (f0).

Ce test a été réalisé sur les 3 bassins versants précédemment évoqués : le bassin versant du Gardon d'Anduze, le bassin versant du Gardon de Saint-Jean à Saumane et le bassin versant du Gardon de Mialet à Mialet (Cf. localisation Figure 6).

4.2. Résultats

Les résultats ci-dessous présentent les simulations ALHTAÏR en mode spatialisé, en mode bassin versant et les débits mesurés aux exutoires des bassins versants d'Anduze, de Mialet et de Saumane. Les paramètres du module de production sont ceux présentés dans le tableau 2 pour les deux événements étudiés : le 3 octobre 1995 et le 28 septembre 2000.

Les résultats concernant le 3 octobre 1995 sont présentés ci-dessous (Figure 7).

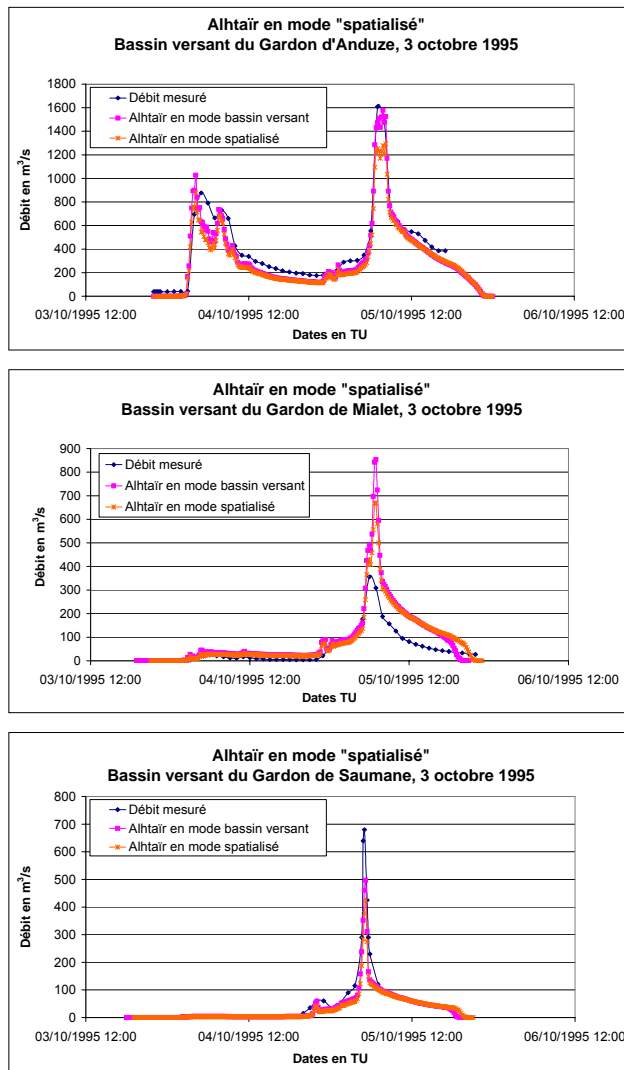


Figure 7 : simulations de la crue du 3 octobre 1995 sur les bassins versants d'Anduze de Mialet et de Saumane

Les résultats sont contrastés sur ces trois bassins versants. Sur Anduze, ALHTAÏR en mode spatialisé retranscrit bien la première pointe de crue en terme de production (878 m³/s simulé contre 877 m³/s mesuré), a contrario le second et le troisième pics de crue sont sous-estimés (de 54 m³/s pour le deuxième pic et de 328 m³/s pour le troisième). La reconstitution en mode spatialisé de l'hydrogramme mesuré à Mialet est améliorée en terme de production par rapport à ALHTAÏR en mode bassin versant (moins 183 m³/s). Cependant, la surestimation du débit par rapport à l'hydrogramme mesuré reste importante (314 m³/s). Le cas du bassin versant de Saumane est atypique pour ALHTAÏR en mode bassin versant comme en mode spatialisé, avec une sous estimation importante du débit par rapport aux débits mesurés dans les deux cas (respectivement 183 m³/s et 256 m³/s).

Les résultats concernant le 28 septembre 2002 sont présentés ci-dessous (Figure 8).

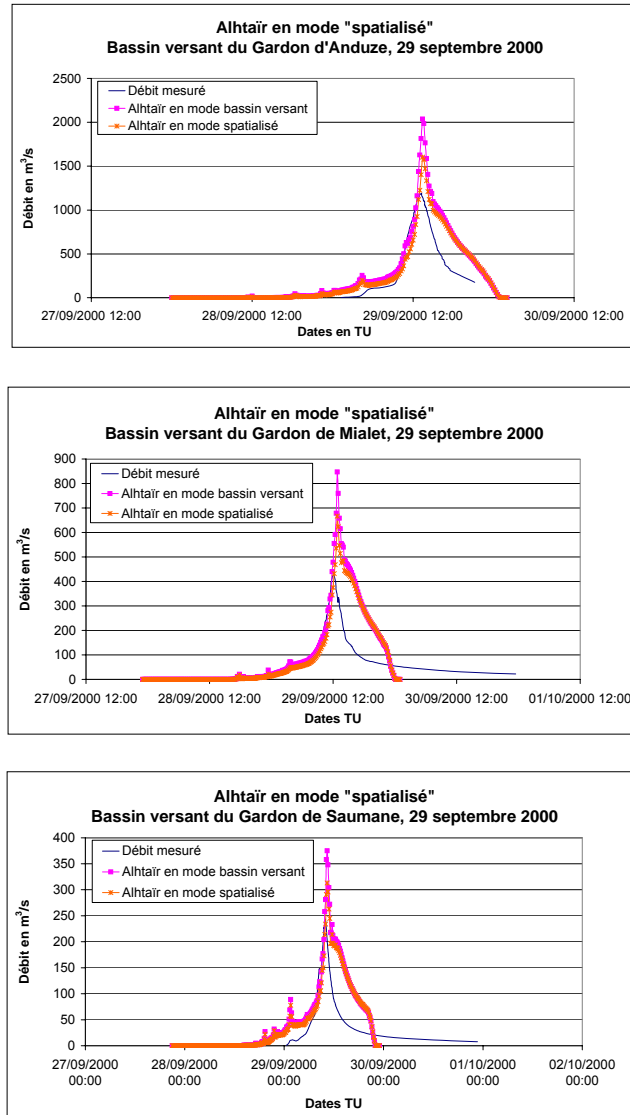


Figure 8 : simulations de la crue du 28 septembre 2000 sur les bassins versants d'Anduze de Mialet et de Saumane

Les résultats sont pour cet évènement plus homogènes sur les trois bassins versants. D'une manière générale, les débits de pointe des pics de crue simulés par ALHTAÏR en mode spatialisé sont inférieurs à ceux générés par ALHTAÏR en mode bassin versant (de 434 m³/s pour Anduze, de 180 m³/s pour Mialet et de 62 m³/s pour Saumane). Toutefois, malgré la spatialisation de la capacité d'infiltration du sol, la surestimation du débit de pointe par rapport aux débits mesurés reste importante (413 m³/s pour Anduze, 183 m³/s pour Mialet et 74 m³/s pour Saumane).

4.3. Analyses

A partir d'une analyse visuelle des hydrogrammes simulés et mesurés, trois catégories de réponses peuvent être identifiées :

- La spatialisation du module de production d'ALHTAÏR apporte une amélioration de la reconstitution de l'hydrogramme mesuré par rapport à ALHTAÏR en mode bassin versant. C'est le cas sur le bassin versant de Mialet pour l'épisode pluvieux du 3 octobre 1995 et sur les trois bassins versants (Anduze, Mialet et Saumane) lors de l'épisode du 28 septembre 2000.
- La spatialisation du module de production d'ALHTAÏR apporte une amélioration de la reconstitution d'une partie de l'hydrogramme mesuré par rapport à ALHTAÏR en mode bassin versant. C'est le cas sur le bassin versant du Gardon d'Anduze lors de l'évènement pluvieux du 3 octobre 1995.
- La spatialisation du module de production d'ALHTAÏR n'apporte aucune amélioration dans la reconstitution du débit mesuré par rapport à ALHTAÏR en mode bassin versant. C'est le cas sur le bassin versant de Saumane lors de l'épisode du 3 octobre 1995.

Dans le premier cas, les améliorations entre la version spatialisée du modèle et la version non spatialisée portent sur le débit de pointe du pic de crue. Cette situation s'explique par l'augmentation de la capacité d'infiltration sur les zones de formations superficielles ayant une forte capacité d'infiltration et réciproquement par une diminution de cette capacité d'infiltration sur les formations superficielles ayant été identifiées comme plus perméables.

Le cas observé sur le bassin versant du Gardon d'Anduze lors de l'épisode du 3 octobre 1995 est différent dans la mesure où la spatialisation du module de production n'a pas entraîné d'amélioration sur l'ensemble de l'hydrogramme mais uniquement sur le premier pic de crue. Cet état de fait amène à s'interroger sur la donnée d'entrée (calibrage de l'image radar) mais aussi sur la pertinence des valeurs de capacité d'infiltration des sols affectées à chaque zone de perméabilité et plus précisément sur la relation entre la "mesure terrain" et son intégration dans le modèle.

Enfin, le troisième cas est atypique dans la mesure où les simulations effectuées par le modèle de prévision de crue, en mode bassin versant aussi bien qu'en mode spatialisé sous-estiment le débit du pic de crue. Dans ce cas et compte tenu de la tendance forte du modèle à surestimer le débit de pointe [Ayrat et Sauvagnargues-Lesage, 2003], un défaut localisé de calibration de l'image radar ayant entraîné une sous-estimation de la lame d'eau est fort probable.

Ce premier calage de la capacité d'infiltration des sols en fonction des zones de perméabilité n'est sûrement pas optimum dans la mesure où il n'a été testé que sur deux évènements pluvieux. D'autre part, ces résultats mettent en évidence la difficulté de réaliser un calage des paramètres sans expertise au niveau de la donnée d'entrée du modèle à savoir l'image radar. La société Rhéa [Rhéa, 1998] a effectué un travail de validation des données radars de nombreux évènements antérieurs à 2000. Un processus d'expertise doit être donc mis en place pour pouvoir tester sur ces évènements ALHTAÏR en mode spatialisé.

Enfin, l'ensemble des hydrogrammes présentés (Figure 6 & Figure 7) ne doit pas être analysé uniquement en terme de production. Il est nécessaire de s'attacher aussi à la synchronisation de ces pics. Pour l'évènement du 28 septembre 2000, les pics de crues ont de 7 minutes (Anduze) à 36 minutes (Mialet) de retard et pour l'évènement du 3 octobre 1995 le retard se situe entre 12 minutes (Saumane) et 1 heure (Mialet). Une manière de travailler en mode spatialisé sur cette synchronisation est d'envisager de spatialiser les autres paramètres du module de production d'ALHTAÏR et notamment l'écoulement hypodermique et la pluie d'imbibition qui ont un effet sur la synchronisation de l'hydrogramme. Pour ce faire, des compléments méthodologiques doivent être mis en place.

5. Discussions

Les résultats issus de ces premiers tests sont encourageants et même s'ils soulèvent de nombreux problèmes, ils ne remettent pas en cause la méthodologie choisie.

5.1. La cartographie de la perméabilité

L'amélioration de cette démarche est nécessaire et elle passe en premier lieu par la caractérisation plus fine de la perméabilité des classes de formations superficielles identifiées. La mise en place à venir de mesures de ruissellement, notamment à l'aide d'un simulateur de pluie (type ORSTOM) (Asseline et al., 1993), doit permettre de mieux préciser les différentes classes obtenues.

Les premiers résultats le montrent bien, il est nécessaire de travailler sur la spatialisation d'autres paramètres du module de production tels que l'écoulement hypodermique (fv) ou encore la pluie d'imbibition (si). Ces paramètres ne peuvent être caractérisés par les mesures réalisées par l'infiltromètre double anneau. Il est donc souhaitable de développer les essais sous pluie simulée de manière à caractériser ces paramètres. L'installation de sites expérimentaux sur les zones identifiées par la carte de perméabilité (Figure 5) a débutée.

5.2. La calibration d'ALHTAÏR en mode spatialisé

L'analyse des premiers résultats montre la nécessité de tester ALHTAÏR en mode spatialisé sur un panel d'évènements pluvieux plus importants que les deux évènements choisis pour ces premiers essais. Un ensemble de 19 évènements depuis 1995 a été sélectionné pour réaliser ces tests. Ces travaux devraient permettre de s'affranchir au mieux de l'influence de l'image radar sur le résultat des simulations et de pouvoir ainsi prendre la mesure de l'apport entraîné par la spatialisation du modèle ALHTAÏR.

Enfin, la poursuite de la démarche de cartographie de la perméabilité permettra de réaliser de nouvelles cartes. Ces différentes cartes seront testées de manière à prendre la mesure des améliorations qu'elles produisent sur les reconstitutions d'hydrogrammes. Cette évaluation est importante car elle permettra d'estimer la précision à attendre en fonction des moyens mis en œuvre, pour éventuellement organiser la spatialisation d'ALHTAÏR sur l'ensemble de la zone sous surveillance du SAC-30.

Conclusions et perspectives

La spatialisation de la capacité d'infiltration du sol pour le modèle ALHTAÏR est une étape importante en vue d'utiliser ce modèle à vocation opérationnelle sur des bassins versants non jaugés. Les premiers essais présentés ici, permettent d'être optimiste sur l'utilité d'une telle démarche. Cependant, de nombreuses pistes de recherche doivent être suivies pour réaliser une spatialisation efficace de ce modèle de prévision de crue. Il faut tout d'abord dépasser l'analyse en terme de perméabilité et essayer de caractériser des zones homogènes en fonction des autres flux hydriques (écoulement hypodermique,...). La combinaison d'essais au double anneau et d'essais "in-situ" avec simulation de pluie devrait apporter des éléments pour effectuer cette caractérisation. Dans un second temps, il est nécessaire de s'affranchir au maximum de l'incertitude qui pèse sur la donnée d'entrée, à savoir l'imagerie radar ; incertitude qui pèse sur un calage spatial qui ne peut se permettre de compenser les problèmes de calibration locale de l'imagerie radar.

Les inondations du 8 et 9 septembre 2002 dans le département du Gard ont donné lieu à une collecte de données en terme de débits de pointe et d'entretiens avec des riverains. Au total, ce sont plus de 100 sections et 150 entretiens qui ont été réalisés sur les affluents du Gardon, de la Cèze et du Vidourle [Gaume *et al.*, 2003]. Cette méthodologie construite et initiée par Eric Gaume [Gaume, 2002] a permis de dégager à l'occasion de cet évènement majeur une quantité de données qui permettent de travailler, en terme de retour d'expérience, avec ALHTAÏR sur des bassins versants non jaugés. La version d'ALHTAÏR en mode bassin versant a été confronté à ces données [Gay, 2003]. C'est maintenant en mode

spatialisé que ce travail doit être réalisé de manière à constituer au même titre que le panel d'épisodes pluvieux sélectionné un outil de calage et de régionalisation intéressant.

Que ce soit au travers d'une cartographie de la perméabilité ou encore au travers de données issues du retour d'expérience suite à des événements récents, l'objectif attendu de ce projet de recherche est de contribuer à la spatialisation du modèle de prévision de crue ALHTAÏR de manière à le rendre opérationnel pour qu'il puisse devenir un outil d'aide à la décision en matière de gestion de crise inondation.

Références

- Asseline J., De Noni G., Nouvelot J-F., Roose E.**, (1993), « Note sur la conception et l'utilisation d'un simulateur de ruissellement », *Cahiers de l'Orstom*, série Pédologie, vol. XXVIII, n°2, pp.405-411.
- Ayral P-A., Sauvagnargues-Lesage S.**, (2003), *Elaboration par SIG d'une couche d'information sur les capacités d'infiltration d'eau dans le sol permettant l'établissement d'un indicateur pour l'annonce des crues*, Rapport Intermédiaire 1 & 2, Ecole des Mines d'Alès, 115p.
- Bressand F.**, (2001), « Le projet ALTHAIR du service d'annonce des crues », *Atelier "utilisation des radars météorologiques pour l'annonce des crues et la gestion des réseaux d'assainissement"*, Toulouse, Météopole, 15 et 16 mars 2001, 10p.
- Bressand F.**, (2002), « Le projet ALTHAIR du service d'annonce des crues », *La Houille Blanche*, n°2, pp.64-68.
- Cosandey C., Robinson M.**, (2000), *Hydrologie continentale*, Armand Colin, Coll. U, Géographie, Paris, p. 360.
- Desprats J-F, Pinel D., Ayral P-A., Sauvagnargues-Lesage S., Bressand F., King C., Dorfliger N.**, (2003) Cartographie du potentiel d'infiltration des sols du Bassin Versant du Gardon d'Anduze comme élément d'amélioration du modèle de prévision de crue du Gard, *Conférences SIRNAT*, Orléans, 29 et 30 janvier 2003, 6p.
- Gaume E.**, (2002), *Eléments d'analyse des crues éclair*, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 359 p.
- Gaume E., Payrastra O., Rosa da Silva B.**, (2003), *Analyse hydrologique des crues des 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard*, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 94p.
- Gay S.**, (2003) Etude de la réaction d'un modèle de prévision de crues "ALHTAÏR" au travers des données des inondations du 8 & 9 septembre 2002 dans le Gard, Rapport de Stage, ISIM, 91p.
- Horton R.E.**, (1933). "The role of infiltration in the hydrological cycle", *Trans. Am. Geophys. Union*, 14, pp.446-460.
- Rhéa**, (1998), *Construction et validation d'un outil intégré "Mesures-Modélisation-Radar pour la prévision des crues éclairs*, Tache 6, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 50p.
- Youngs E.G.**, (1991), "Infiltration measurement – A review", *Hydrological processes*, vol.5, pp.309-320.



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