

Document public

Appui aux actions SCHAPI au sein de l'arc cévenol

Rapport annuel

BRGM/RP-53027-FR
mars 2004

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2003-ARN-35

O. Cerdan, J.-F. Desprats, C. King

Mots clés : Crues éclair, Arc cévenol, Occupation du sol, Perméabilité, État de saturation du sol, Télédétection, Modélisation hydrologique, Scénarios, Prévention des inondations.

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

Cerdan O., Desprats J.F., King C. (2004) – Appui aux actions SCHAPI au sein de l'arc cévenol. BRGM/RP-53027-FR, 72 p., 7 ill., 5 ann.

© BRGM, 2004, 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 première année relatifs à la contribution du BRGM aux actions du SCHAPI.

Dans le contexte des crues cévenoles, événements récurrents et catastrophiques, la priorité des actions du SCHAPI est mise sur les bassins à crues rapides (crues éclair) sur lesquels deux graves manquements se sont avérés : peu de bassins jaugés et donc peu de données hydrologiques disponibles, et peu d'outils de modélisation/prévision à disposition dans la communauté.

Suite aux travaux de ARN sur le ruissellement**, notamment pour le compte de la DIREN, le SCHAPI s'est intéressé au modèle STREAM-TED pour décrire des ruissellements liés à des crues éclair : la description en est spatialisée à l'échelle des bassins versants et tient compte des caractéristiques physiographiques et géologiques du bassin. Ce modèle peut assimiler des données de télédétection (MNT, occupation du sol, rugosité) et offre une capacité de produire des scénarios selon les types d'événements climatiques.

Dans une première étape, deux actions conjointes sont menées :

- perméamétrie sur les différents couverts géologiques d'un bassin versant test (le Gardon d'Anduze). On démontre que l'infiltration pour les mêmes conditions initiales peut varier d'un facteur 6 selon les sols et la géologie sous-jacente ;
- l'adaptation du modèle STREAM-TED aux bassins rapides du Sud de la France est en cours de test avec l'intégration dans un Système d'Information Géographique: MNT, découpage en bassins versants élémentaires, carte de l'occupation du sol issue d'une classification d'images satellitaires SPOT, données géologiques et pédologiques, données d'infiltration relative acquises en 2002 et 2003.

Les premières simulations produites nous permettent de dialoguer d'une part avec le Service d'Annonce des Crues du secteur dit « Grand delta - Ardèche, Vaucluse, Rhône, Gard » et d'autre part avec l'École des Mines d'Alès et l'équipe Hydrosociences Montpellier.

** d'une part en Normandie avec l'INRA (CEE-FLOODGEN, MISE-DIREN simulations de scénarios, FEDER Atlas régional de l'Alea Erosion) et d'autre part sur l'Hérault (RTE-PACTES et projet KARSTEAU de N.Dorfliger pour le module ruissellement avec la DDE du Gard).

À terme sont espérés :

- la mise en place sur une grande échelle d'un protocole et d'un réseau de collecte de données sur les infiltrations potentielles et les états de saturation des terrains ;
- la définition, voire le portage dans les SPC, d'un outil adapté à la production de scénarios en appui au diagnostic des risques et à la simulation de mesures correctives possibles.

Ce rapport fait état des travaux de première année et des livrables fournis, il annonce les orientations de seconde année et le programme de travail.

Identification du donneur d'ordre	Direction de l'Eau du MEDD - SCHAPI
Besoins du donneur d'ordre	La mission de veille hydrométéorologique 24 h sur 24 du SCHAPI va s'ouvrir progressivement sur 2 ou 3 bassins versants, dont le GARD. Or les outils actuellement utilisés par le SAC 30 méritent d'être complétés. L'action que nous propose le BRGM de mettre en route leur modèle STREAM-Ted pour faire de la prévision s'insère tout à fait dans cette démarche de progrès.
Définition de l'objectif	Prise en compte des facteurs du bassin versant favorables au ralentissement dynamique dans les modèles de ruissellement/infiltration. Adaptation du modèle, prévoyant à terme une prise en compte d'une pluie distribuée de façon hétérogène au sein du bassin versant, et précisant les conditions initiales à considérer.
Description du livrable et destinataires	Rapport de faisabilité de mise en œuvre de STREAM –TED volet (1). Rapport après améliorations identifiées avec SAC-DDE et INRA volet (2). Bases de données image-MNT- pour SIG en formats utiles à DDE-SAC Gard. Bases de données de mesures infiltration. Rapport : protocole proposé pour étendre les acquisition de terrain.

Sommaire

1. Contexte et objectif	7
1.1. CONTEXTE	7
1.2. OBJECTIFS	8
2. Réalisation année 1	11
2.1. CARACTERISATION DES SURFACES ET DEFINITION DES PARAMETRES HYDROLOGIQUES	11
2.1.1. Classification de l'occupation des sols à partir de données satellitales	11
2.1.2. Cartographie du potentiel d'infiltration des sols.....	11
2.1.3. Début du protocole de calage : la campagne de mesures simulateur de pluie 1 et 10 m ² du 10 et 11 décembre	14
2.1.4. Mise en place d'un SIG inter-opérable avec celui de la DDE et du SAC concerné	15
2.2. MODELISATION HYDROLOGIQUE	16
2.2.1. Présentation du modèle STREAM	16
2.2.2. Modélisation avec STREAM	19
2.2.3. Amélioration du modèle	22
2.3. CONCLUSION	24
3. Planification année 2	25
3.1. AXES DE COLLABORATION ET DÉVELOPPEMENT	25

3.2. TACHES PLANIFIEES EN 2004 (avril 2004 à avril 2005)	25
3.2.1. Description des opérations.....	26
3.2.2. Schéma de l'organisation et des responsabilités	27
3.2.3. Les étapes du projet.....	28
3.2.4. L'équipe de projet.....	28
3.2.5. Documents à remettre aux partenaires	29

Bibliographie	31
----------------------------	-----------

Liste des illustrations

Illustration 1 - Synthèse des mesures et attribution des codes de perméabilité 2002-2003.	12
Illustration 2 - Carte du potentiel d'infiltration des sols 2003.	12
Illustration 3 - Principe général du modèle STREAM.	16
Illustration 4 - Carte des valeurs de perméabilité.	20
Illustration 5 - Accumulation du ruissellement pour un événement de 40 mm en 2 h.	20
Illustration 6 - Accumulation du ruissellement pour un événement de 50 mm en 1 h.	21
Illustration 7 - Accumulation du ruissellement pour un événement de 100 mm en 1 h.	21

Liste des annexes

Annexe 1 - Classification de l'occupation du sol	33
Annexe 2 - Protocole des mesures double anneau	43
Annexe 3 - Bilan des mesures.....	49
Annexe 4 - Classification du potentiel d'infiltration des sols.....	55
Annexe 5 - Implémentation de l'onde cinématique dans STREAM	67

1. Contexte et objectif

1.1. CONTEXTE

Le Service central hydrométéorologique en appui à l'annonce des crues (SCHAPI), service technique à compétence nationale basé à Toulouse, dépend de la Direction de l'Eau et a été créé 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.

Actuellement sur ce type de bassin, seule **l'annonce de crues** est développée. Des modèles de prévision existent, comme ALHTAÏR 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 prévisions 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.

Dans le cas de ces bassins à crues rapides, un mécanisme prépondérant de formation de la crue, qui ne peut pas être négligé, est le **ruissellement superficiel**. Dans ce sens, des progrès peuvent être réalisés en développant des méthodes qui s'appuient plus sur notre connaissance des processus en jeu et qui permettent de spatialiser les propriétés de surface des bassins qui régissent le ruissellement.

C'est ce qui a été démontré dans un autre contexte géographique et climatique, les bassins à crues rapides de Haute-Normandie où le modèle STREAM, développé et calé finement par l'INRA sur des bassins expérimentaux, s'est avéré robuste pour des surfaces atteignant 1 000 à 3 000 hectares et capable de prédire des volumes d'eau ruisselés pour un événement extrême.

Ce modèle spatialisé non dynamique -STREAM- calcule le volume ruisselé en tout point d'un bassin versant agricole pour une pluie donnée. Il fonctionne donc aux échelles de l'événement pluvieux et du bassin versant. Il repose sur une approche de type système expert et prend en compte les états de surface pour le calcul de

l'infiltration et les motifs agraires et le relief pour le calcul du réseau de circulation. Jusqu'à présent, l'état de validation du modèle montre qu'il est possible de l'utiliser pour évaluer l'impact d'aménagement ou de changement d'occupation du sol sur le risque de ruissellement et ceci pour différents scénarios climatiques. Son utilisation, pour la prédiction de volumes ruisselés exprimés en absolu, n'a pas été testée en dehors de la Haute-Normandie. La précision des résultats est également dépendante de la qualité des données utilisées (MNT, couvertures satellitaires, estimation de la durée et de la quantité de pluie).

Un préalable à l'utilisation de STREAM est de fournir une carte distribuée (ou des points de référence) des capacités d'infiltration de la zone à étudier. Les travaux réalisés par le BRGM, dans PACTES sur l'Hérault et avec la DDE 30 dans le Gard, ont montré qu'on peut fournir des critères de spatialisation des caractéristiques de surface en lien avec le potentiel d'infiltration. De plus, au sein du projet de recherche du BRGM « Structure et fonctionnement des systèmes karstiques » (KARSTEAU), module « Cartographie du ruissellement et inondation », un exercice théorique a été conduit ces derniers mois dans le cadre de la transférabilité de STREAM dans un contexte de bassin rapide du Sud (le Gard) qui peut servir de base au raisonnement.

Or, c'est justement le Gard, où se déploient des activités intégratives coordonnées par la DDE du Gard, qui est choisi comme zone prioritaire pour initier les premières missions H24 du SCHAPI.

Ce rappel du contexte permet de mettre en évidence qu'une partie des données est déjà disponible et que certains acquis déjà capitalisés vont être utilisés dans ce 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 réinfiltration 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 types, 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, ALHTAÏR 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.

Plus particulièrement, les objectifs pour l'année 1 consistent en :

- une classification de l'occupation des sols à partir de données satellitales ;
- une acquisition de paramètres d'infiltration in situ sur une région du Gard. La manière de les obtenir fera l'objet d'un cahier des charges sur la métrologie retenue et les fourchettes d'erreur à associer, et sur les possibilités de systématiser ce processus ;
- la définition et la réalisation (pour partie) 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...

2. Réalisation année 1

2.1. CARACTERISATION DES SURFACES ET DEFINITION DES PARAMETRES HYDROLOGIQUES

Le bassin versant étudié est celui du Gardon d'Anduze, 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.

2.1.1. Classification de l'occupation des sols à partir de données satellitales

La classification de l'occupation des sols, à partir de données satellitales, est déjà disponible pour le Gard et l'Hérault. Elle a été réalisée respectivement sur les fonds de R & D BRGM (Gard) et du MRT (PACTES). Ces informations sont capitalisées grâce à ces acquis des mois et années antérieures.

Concrètement, la classification de l'occupation du sol a été réalisée à partir de données SPOT acquises en mai 2001 et août 2002. Elle permet de différencier en particulier la végétation naturelle des zones cultivées, qui restent très marginales dans ce type de bassin versant (moins de 5 %). L'annexe 1 détaille la méthode et les résultats.

2.1.2. Cartographie du potentiel d'infiltration des sols

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 issue des données disponibles (relief, géologie, pédologie, occupation du sol) à une quantification du potentiel d'infiltration locale.

L'idée est de fournir des informations spatialement réparties, de façon à offrir aux modélisateurs hydrologiques une information homogène et à jour sur le potentiel d'infiltration locale des sols dans les différents bassins versants de la zone d'étude. Une fois atteinte, une telle information pourrait servir d'entrée au calcul des volumes ruisselés provenant simultanément de la pluie incidente en un point ou de la production des points situés en amont du point considéré et subissant la même pluie.

De plus, ce travail veille à être complémentaire du travail de thèse réalisé par M. Ayrat (École des Mines d'Alès) pour le compte du SPC 30.

Formations superficielles	Nombres de sites utilisés	Moyenne infiltration Relative (mm/s)	Écart type	Code de perméabilité
Altérites sur granite, éboulis	15	0,25 (893 mm/h)	0,08 (306 mm/h)	1
Sols sur dolomies et calcaires + gneiss	19	0,13 (482 mm/h)	0,12 (442 mm/h)	2
Argiles - grès	6	0,13 (468 mm/h)	0,05 (176 mm/h)	3
Alluvions sur terrasses	10	0,08 (306 mm/h)	0,05 (172 mm/h)	4
Sols sur schistes	14	0,08 (292 mm/h)	0,05 (180 mm/h)	4
Sols sur marnes, calcaires marneux – argileux	6	0,05 (165 mm/h)	0,04 (140 mm/h)	5

Illustration 1 - Synthèse des mesures et attribution des codes de perméabilité 2002-2003.

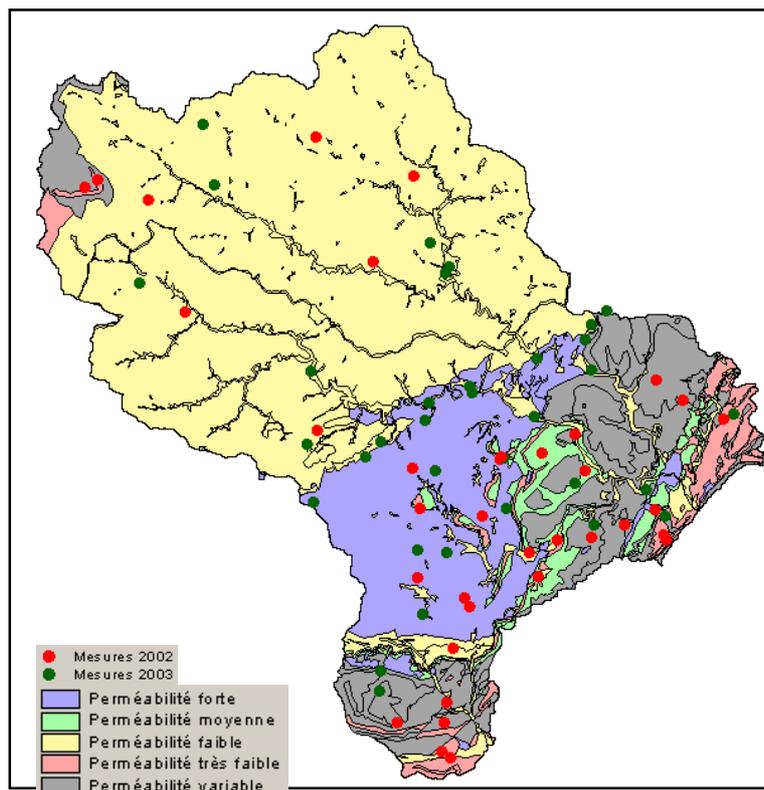


Illustration 2 - Carte du potentiel d'infiltration des sols 2003, réalisée à partir des 70 premières séries de mesures acquises. Cette carte sera affinée en 2004 sur les bases des 30 mesures acquises tardivement fin 2003.

Des travaux préliminaires ont déjà permis de capitaliser un certain nombre de données, soit déjà disponibles, soit obtenues dans les cadres suivants :

- projet RTE/PACTES sur le bassin versant de l'Hérault dont le BRGM était coordinateur ;
- différentes actions de recherche et de Service public menées par le BRGM dans le département du Gard avec le Service de Prévention de Crue (SPC) du Gard ou/et la ville de Nîmes ;
- projet « structure et fonctionnement des systèmes karstiques » KARSTEAU-BRGM ;
- une première série de travaux a permis de collecter déjà 60 sites de mesures, dont 10 non exploités pour cause d'incertitude sur la mesure, et de mettre en évidence la corrélation entre la perméabilité mesurée et les formations superficielles. La collecte s'est faite selon la méthode du double anneau selon le protocole défini par le BRGM sur le Gard pour les caractérisations des unités agro-pédo-géologiques (ann. 2). Une segmentation du bassin en unité de réponse homogène (URH) a été faite initialement en 5 URH.

Notre action pour le SCHAPI a permis de compléter ces acquis avec l'implantation d'une série de mesures supplémentaires de façon à atteindre la plupart des unités pédologiques.

Un total de cinquante sites avec, pour chacun, deux à quatre mesures indépendantes, ont été réalisés en été et automne 2003.

Exploitation des données

Ces campagnes permettent de capitaliser une centaine de mesures permettant de proposer une analyse de la perméabilité.

Pour des raisons de calendrier de réalisation du volet STREAM, qui nécessitait cette information, seules les soixante-dix premières données ont été utilisées pour estimer la variabilité de la perméabilité et donner une cartographie relative du potentiel d'infiltration des sols. On distingue en relatif cinq grands ensembles de comportements infiltrants (ill. 1). Les ordres de grandeur des valeurs obtenues ne peuvent pas pour l'instant être utilisés comme des valeurs absolues de perméabilité du fait du système de mesure qui artificialise la charge.

En 2004, la carte proposée (ill. 2), sera affinée sur la base :

- des trente dernières mesures acquises fin 2003 ;
- des simulations de pluie *in situ* donnant des coefficients d'infiltration réels ;
- des règles expertes établies avec EMA et HSM pour généraliser.

En l'état, ces types de mesures ont l'avantage d'être acquis relativement rapidement et de permettre d'échantillonner des espaces assez importants, ce qui constitue une requête du SCHAPI. Aussi cela garantit-il une représentativité spatiale impérative à obtenir pour une intégration dans un modèle. Par contre, les valeurs de perméabilité mesurées ne peuvent être intégrées en absolu (mesure de la perméabilité en charge

constante avec le double anneau, de fait largement surévaluée), mais nécessitent une correction par rapport à des mesures précises faites à partir de simulateurs de pluie, présents sur le site en nombre très limité (2 à ce jour installés par l'École des Mines d'Alès et la DDE).

Or, pour à terme proposer une cartographie régionale, il faut au préalable avoir évalué le potentiel de calage de ces mesures. Trois niveaux de comparaison sont possibles :

- échelle du m^2 : mesures quantitatives de référence. Il est possible de confronter ces mesures avec celles obtenues sur une station de mesures parfaitement dimensionnée par l'EMA. Actuellement, seul un point de comparaison est disponible (pt 607), mais l'EMA, dans le cadre de la thèse de M. Ayrat, a prévu de mettre en place d'autres stations de mesures (cf. 1.1.3.). Cette comparaison ne donnera que des indications sur l'importance des écarts entre infiltration réelle et infiltration simulée. On aura ainsi une première indication des surestimations de l'infiltration estimée sur les URH du bassin qu'on introduira dans la paramétrisation du modèle STREAM ;
- échelle du m^2 , mesures quantitatives permettant d'élargir les types de sols concernés en faisant référence aux travaux de Roose (IRD) et de son équipe sur Pradel, Corconne et Roujan. On peut relocaliser certaines cibles et retourner y faire des mesures double anneau afin de les calibrer. Cependant, il est à noter que ces données ont surtout porté sur des zones agricoles qui sont marginales sur le gardon d'Anduze ;
- des données de ruissellement en milieu de végétation naturelle ont été faites par l'équipe de F. Lelong, Duprat, P. Durand, Cosandey. Ces données bibliographiques vont aussi être examinées. Ces développements seront approfondis en 2^e année en étroite collaboration avec l'EMA et Hydrosciences.

2.1.3. Début du protocole de calage : la campagne de mesures simulateur de pluie 1 et 10 m^2 du 10 et 11 décembre

La campagne de mesures avec le double anneau sur environ 70 sites, avec pour chaque site entre 3 et 4 tests d'infiltration, a permis l'obtention d'un nombre statistiquement valable (au moins 15 sites, soit environ 45 mesures) permettant une estimation de la variabilité de la perméabilité à l'intérieur de chaque classe pédo-géologique. L'extrapolation des résultats sur l'ensemble du bassin versant du Gardon d'Anduze a certes permis une cartographie de la variabilité du potentiel d'infiltration des sols, mais la méthodologie mise en place doit désormais quantifier ce potentiel, afin de le rendre intégrable dans les modèles hydrologiques.

Aussi, une campagne de mesures de ruissellement sous pluie simulée sur bac de 1 m^2 , en partenariat avec des chercheurs de l'IRD et de l'EMA sur les sols développés sur schistes (site de Tourgueille), a permis de s'assurer de la pertinence du protocole de mesures dans notre contexte d'étude. Deux parcelles de 1 m^2 ont été installées à proximité du site lourd de 10 m^2 de Tourgueille de la DDE/EMA. Des simulations ont été effectuées en parallèle sur les deux dispositifs à 100 et 150 mm/h. Les résultats sont en cours d'analyse et seront vraisemblablement présentés dans le prochain rapport d'avancement.

D'autres campagnes de mesures, utilisant un dispositif similaire, sont prévues dans le courant de l'année 2004 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 injectable dans des modèles de type Horton.

La recherche de corrélation avec des systèmes de mesures précis, mais difficilement reproductibles (entre 2 et 5 sites de mesures selon le protocole EMA/DDE, environ 10-15 sites sur l'ensemble du bassin selon le protocole IRD-Hydrosciences à finaliser), doit permettre d'affiner la carte du potentiel d'infiltration des sols, afin de la prendre en compte directement comme élément d'entrée d'ALHTAÏR ou STREAM.

C'est dans cet esprit qu'en avril seront menées :

- par l'EMA, des mesures de ruissellement sur les parcelles d'expérimentation EMA des sites de Tourgueilles et Peyrolles ;
- par Hydrosciences, des mesures sur le site de Peyrolles à l'aide du simulateur de pluie IRD.

2.1.4. Mise en place d'un SIG inter-opérable avec celui de la DDE et du SAC concerné

Le Système d'Information Géographique mis en place intègre à ce jour les données suivantes :

- données pédologiques, cartes et profils pédologiques (Chambre Régionale d'Agriculture) ;
- données de l'IFN ;
- données d'occupation du sol (dérivées des données satellitaires SPOT) ;
- MNT à 50 m (IGN) ;
- carte géologique (BRGM) ;
- mesures de perméabilité ;
- base de données cartographiques de l'IGN (réseau hydro, routier, communes...).

Ce SIG, au format ArcView, est compatible avec l'EMA et le SPC 30, et les données des couvertures suivantes (occupation du sol et perméabilité) ont été livrées.

La carte de perméabilité, optimisée à partir des mesures faites au cours de l'été 2003 a été livrée et sera intégrée dans ALHTAÏR par l'École des Mines d'Alès, afin d'apprécier la prise en compte de ce paramètre majeur lors de simulations d'inondations.

2.2. MODELISATION HYDROLOGIQUE

Les travaux de modélisation seront menés par le BRGM à l'aide du logiciel STREAM, afin d'appréhender les petits bassins versants non jaugés pour lesquels un minimum d'information est disponible.

2.2.1. Présentation du modèle STREAM

Défini, calé et validé en Normandie par l'INRA pour étudier les phénomènes d'érosion et de ruissellement hortonien sur les sols limoneux agricoles, STREAM est un modèle de type expert qui s'appuie sur une connaissance des mécanismes élémentaires de genèse du ruissellement (ill. 3). Il intègre les paramètres suivants :

- la pente dérivée du Modèle Numérique de Terrain ;
- la cartographie de l'occupation du sol ;
- la répartition des sols sensibles à la battance ;
- l'hypothèse d'une pluie homogène sur l'ensemble du bassin versant ;
- la prise en compte des antécédents pluvieux ;
- la croûte de battance ;
- la rugosité du sol ;
- le sens du travail du sol ;
- les motifs agraires.

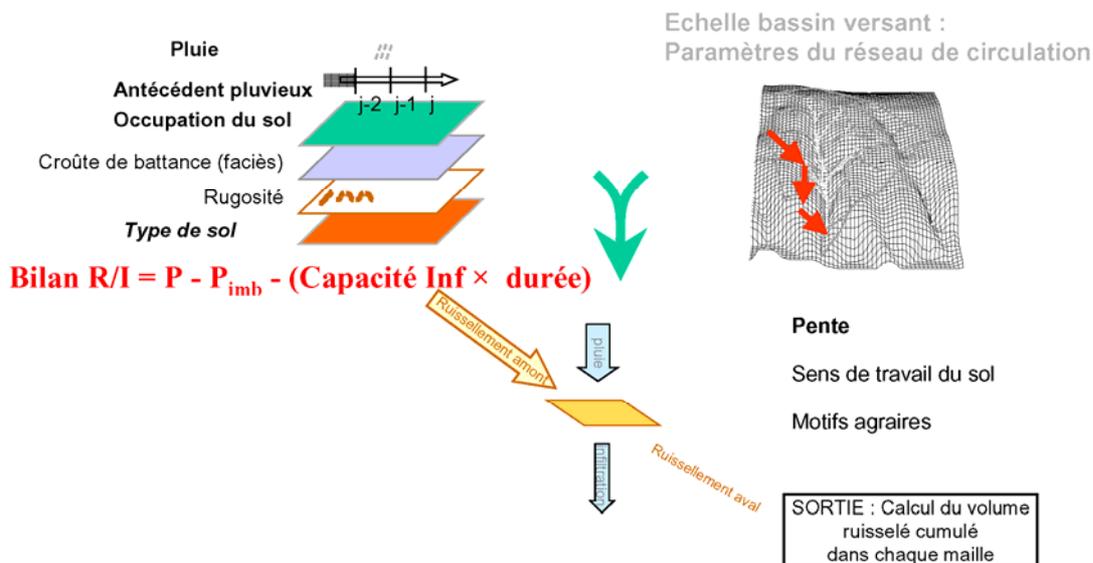


Illustration 3 - Principe général du modèle STREAM.

L'idée sous-tendant le développement du modèle STREAM est d'élaborer une approche de modélisation qui se base sur les connaissances actuelles des mécanismes de l'érosion tout en se concentrant sur les processus dominants, afin d'éviter les problèmes liés à la surparamétrisation d'une part et de rendre le modèle potentiellement utilisable par les acteurs locaux d'autre part.

La démarche suivie pour l'élaboration du modèle a consisté en l'identification et la paramétrisation des facteurs dominants à l'échelle locale sur la base de résultats expérimentaux, puis une spatialisation à l'échelle du bassin versant en prenant en compte les paramètres propres à ce niveau d'investigation.

a) Analyse et paramétrisation des processus à l'échelle de la parcelle

Pour une grande partie des sols à texture limoneuse (de faible stabilité structurale), le ruissellement et l'érosion résultent de la diminution de l'infiltrabilité consécutive à la dégradation structurale de la surface des sols (formation de croûtes de battance par désagrégation des mottes de terre) sous l'action des pluies. La capacité d'infiltration peut, dans certains cas, être réduite jusqu'à des valeurs de quelques mm/h. En territoire agricole s'ajoute l'influence de la rugosité (modifiée par les techniques culturales) et du couvert végétal (Le Bissonnais *et al.*, 2002). Sur la base de nombreux travaux expérimentaux réalisés sous pluie simulée ou en condition naturelle (Gallien *et al.*, 1995 ; Lecomte *et al.*, 1997 ; Le Bissonnais *et al.*, 1998 ; Lecomte, 1999 ; Chaplot et Le Bissonnais, 1999 ; Martin, 1997 ; Cerdan *et al.*, 2002c ; Lecomte *et al.*, 2004), nous avons évalué l'importance de ces trois facteurs en fonction de leur influence sur le ruissellement et l'érosion.

Pour ce faire, nous avons établi une typologie combinant ces trois facteurs (Cerdan *et al.*, 2002 ; 2002a ; Le Bissonnais *et al.*, 2002) qui soit à même de reproduire leurs influences sur l'infiltrabilité, sur la concentration potentielle en sédiment du ruissellement et sur l'érosivité du flux et la cohésion de la surface du sol dans le but de formaliser les processus de ruissellement ou d'érosion correspondants.

Pour l'infiltrabilité, un quatrième facteur a été intégré sous la forme d'un indice des pluies antécédentes, afin de rendre compte de l'état hydrique initial. Sur la base de références expérimentales, une capacité d'infiltration potentielle a pu être associée à chaque combinaison de ces facteurs. Cinq classes ont été définies qui s'étalent de 2 mm/h pour une surface nue complètement dégradée à 50 mm/h pour une surface fraîchement travaillée ou une prairie (Cerdan *et al.*, 2002).

Ces classifications de combinaisons de classes (ou typologies) de facteurs ont donc permis de caractériser des situations en fonction de leur sensibilité au mécanisme étudié. Ils ont l'avantage d'intégrer non seulement des lois bien quantifiées, mais aussi des résultats évalués de manière qualitative. Ils permettent, en outre, de tenir compte de manière simple des interactions entre facteurs ; l'effet d'un paramètre pouvant être catalysé ou, au contraire, inhibé en fonction du degré d'expression des autres. Ceci est, par exemple, illustré par l'importance de l'effet de la rugosité sur la concentration potentielle en sédiment qui varie en fonction du degré de développement du couvert végétal (Cerdan *et al.*, 2002a). La validité de ces typologies est limitée aux zones

cultivées de la ceinture loessique du Nord de l'Europe, par contre la démarche reste transposable à tout contexte.

b) Intégration des processus à l'échelle du bassin versant

Les classifications de combinaisons de facteurs ont donc été établies pour caractériser les processus de ruissellement et d'érosion. Ces classifications sont basées sur des connaissances acquises à l'échelle locale (bac – parcelle). Elles sont reprises pour établir la modélisation à l'échelle du bassin versant. Pour permettre cette spatialisation, la première étape est le calcul du réseau de circulation des écoulements. Pour faciliter la prise en compte des caractéristiques topographiques et la visualisation des résultats, le modèle a été intégré dans le SIG (Système d'Information Géographique) ARC/INFO.

Pour la simulation de la hauteur d'eau ruisselée en tout point du bassin versant, une fonction calcule l'accumulation des flux en permettant à chaque pixel de pouvoir infiltrer en plus de la pluie, la totalité ou une partie du ruissellement provenant des zones situées en amont (Cerdan *et al.*, 2002).

Une première évaluation des modules de ruissellement et d'érosion diffuse à l'aide de données provenant de bassins versants expérimentaux, a démontré la capacité de cette approche à reproduire les valeurs observées avec satisfaction (Cerdan *et al.*, 2000 ; 2002 ; 2002b).

Bien que STREAM ait été développé pour l'étude du ruissellement sur des sols limoneux en zone agricole, il est apparu intéressant à ce stade du projet de tester le principe de ce modèle sur le bassin versant méditerranéen et forestier du Gardon d'Anduze.

c) Transfert du modèle STREAM sur un bassin versant cévenol

Le modèle simule un ruissellement de type hortonien. En effet, dans les conditions de mise au point du modèle, le ruissellement par saturation du sol est inexistant. Sur le Gardon d'Anduze, la couche superficielle est généralement très perméable, mais aucune expérimentation rigoureuse n'a jusqu'à aujourd'hui permis de déterminer et de quantifier l'existence de flux « retardés » ou la présence de ruissellement par débordement de zone de stockage. On sait, par contre, que les crues sont de type « crue éclair », à réponse rapide, on peut donc émettre l'hypothèse que l'infiltration est assez rapidement limitée. Une approche du type ruissellement hortonien peut donc représenter une première approximation en attendant que des expérimentations mettant en évidence le cheminement des écoulements le long des versants (c'est-à-dire expérience de traçage) soient réalisées. Par ailleurs, compte tenu des sols en présence, nous faisons l'hypothèse que la variation de rugosité induite par les pratiques agricoles est peu importante à l'échelle du bassin ; de même, compte tenu de la faible extension du parcellaire agricole, le sens du travail et les motifs agraires seront négligés à ce stade de l'étude.

Par ailleurs, différentes hypothèses doivent être effectuées.

- 1) Les valeurs de perméabilité (et de pluie d'imbibition) données par la carte finale doivent être étalonnées par rapport à différentes mesures précises d'un point de vue quantitatif. Seules des mesures à partir d'un simulateur de pluie permettent d'accéder à cette information. Or à ce jour, seule la zone de schistes (Tourgueille) bénéficie d'un simulateur, avant l'équipement en 2003/2004 par l'École des Mines d'Alès de systèmes supplémentaires.

Ce site de Tourgueille a permis de fournir à la carte du potentiel d'infiltration une valeur quantitative, selon une règle de linéarité qu'il convient de valider par la mise en place de nouveaux sites dans la suite du protocole de mesures communes avec EMAD et IRD.

- 2) Le modèle STREAM, développé sur de petits bassins versants, fait l'hypothèse que la répartition de la pluie est homogène. Or, sur le bassin d'Anduze (640 km²), l'hétérogénéité des pluies peut être très forte, lorsque celui-ci est soumis à des orages méditerranéens. À titre d'exemple, lors des événements de septembre 2002, il est tombé environ 650 mm à Anduze, mais moins de 100 mm sur les versants situés à l'ouest du bassin. Si les essais mis en place à ce jour ne peuvent prendre en compte qu'une pluie homogène, il sera impératif d'incorporer dans STREAM les grilles de pluie kilométriques CALAMAR.

2.2.2. Modélisation avec STREAM

a) Adaptation du modèle et des règles de décision

Comme spécifié dans le paragraphe 2.1., si la démarche concernant le STREAM est transposable à d'autres contextes, il n'en reste pas moins qu'il est nécessaire de rétablir les typologies de caractéristiques de surface des sols en fonction de la nature de l'environnement simulé d'une part et de la nature des données disponibles d'autre part.

La classification du potentiel d'infiltration des sols, établie en cinq catégories, fera l'objet d'une intégration dans STREAM pour délimiter des unités spatiales de réponse hydrologique homogène (cf. ill. 2). Par contre, les valeurs de capacité d'infiltration sont difficilement exploitables directement.

Si elles permettent une hiérarchisation des surfaces, elles nécessitent avant d'être intégrées dans le modèle d'être calibrées. En l'absence de mesure complémentaire de calibration à l'aide d'appareillages différents, nous avons étalé les valeurs en partant d'une valeur minimale de 12 mm/h, qui correspond à la valeur minimale des sols sur marnes.

On obtient donc quatre classes d'infiltration (en faisant l'hypothèse d'un modèle linéaire) de 12, 21, 34 et 65 mm/h plus une classe « variable » qui a été également fixée à 34 mm/h (ill. 4). Ce sont ces valeurs que nous utiliserons pour les simulations.

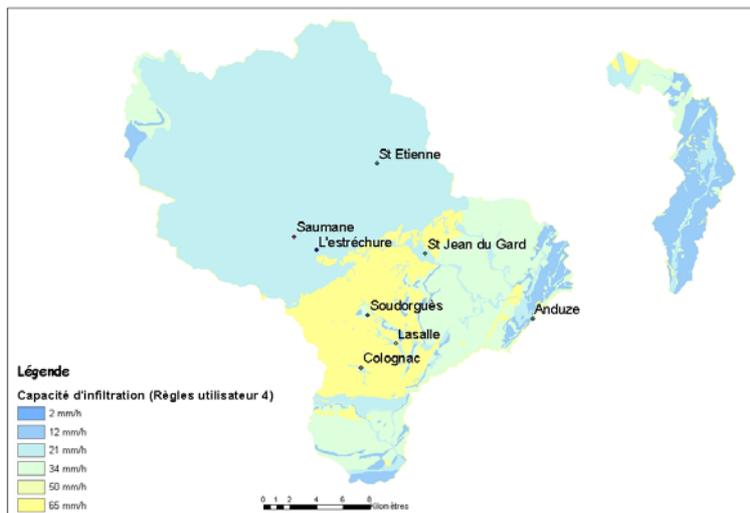


Illustration 4 - Carte des valeurs de perméabilité.

b) Résultats des simulations

Trois événements d'intensité et de hauteur croissantes sont sélectionnés pour réaliser les simulations : 40 mm en 2 h ; 50 mm en 1 h et 100 mm en 1 h. Les illustrations 5, 6 et 7 présentent les cartes d'accumulation du ruissellement pour ces trois événements (les légendes sont optimisées pour chaque événement).

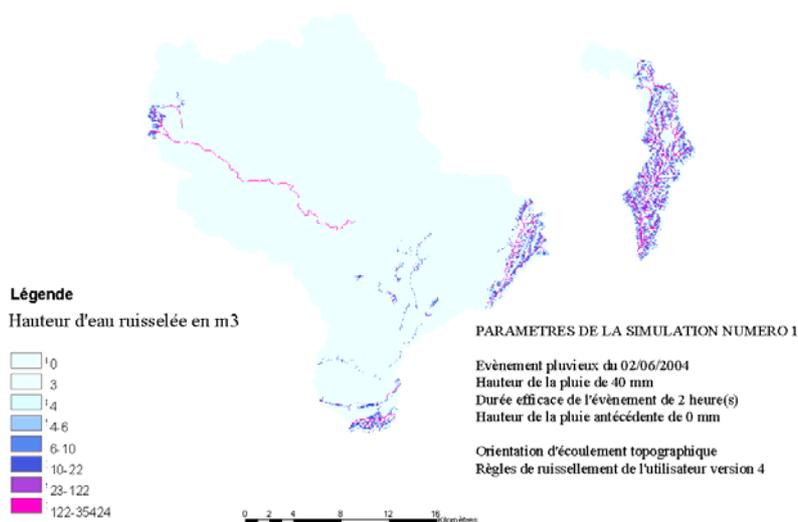


Illustration 5 - Accumulation du ruissellement pour un événement de 40 mm en 2 h.

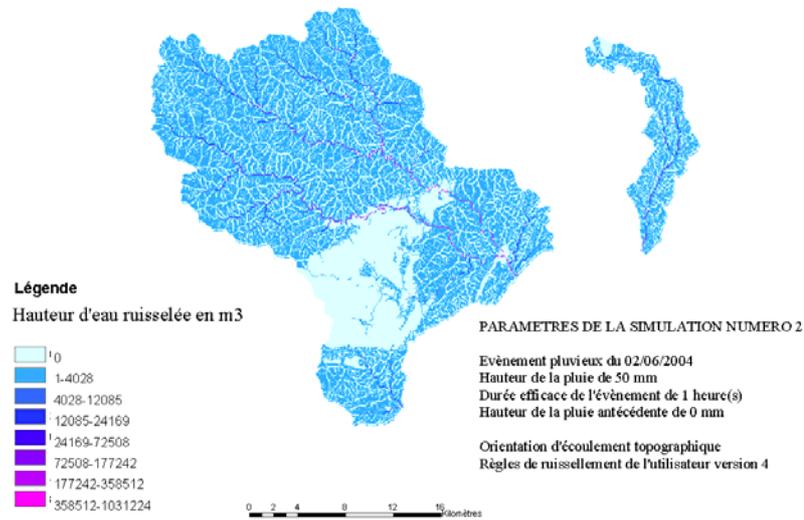


Illustration 6 - Accumulation du ruissellement pour un événement de 50 mm en 1 h.

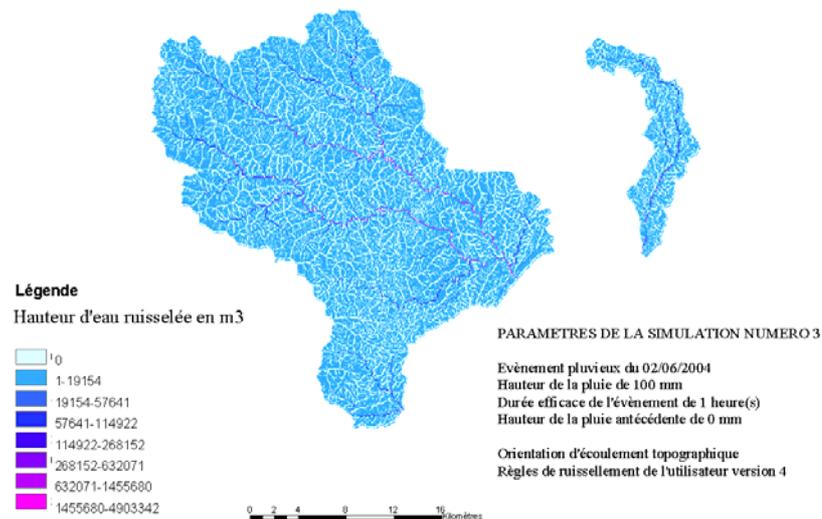


Illustration 7 - Accumulation du ruissellement pour un événement de 100 mm en 1 h.

Ce travail reste une étude préliminaire mais qui ouvre de nombreuses pistes extrêmement intéressantes qui seront d'ailleurs poursuivies dans de futurs projets qui ont été acquis sur la base de ce travail. Les perspectives sont de trois ordres :

- amélioration de l'adaptation du modèle STREAM au contexte du Gardon d'Anduze ;
- l'amélioration de la prise en compte de l'infiltration ;

- l'établissement d'un catalogue de réponses hydrologiques du Gardon d'Anduze à différents scénarios préétablis.

Comme spécifié dans le paragraphe précédent, les valeurs de capacité d'infiltration déduites des mesures de doubles anneaux sont difficilement exploitables telles quelles. Si elles permettent une hiérarchisation des surfaces, elles nécessitent avant d'être intégrées dans le modèle d'être calibrées. Pour réaliser cette calibration, deux étapes vont être effectuées. Tout d'abord une campagne de mesures de ruissellement sous pluie simulée sur bac de 1 m² en partenariat avec des chercheurs de l'IRD et de l'EMA (les premières mesures ont eu lieu début décembre sur les sols développés sur schiste pour s'assurer de la pertinence du protocole de mesure dans notre contexte d'étude). Ensuite, 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 anneau 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.

Après les étapes d'amélioration du modèle par rapport au contexte d'étude et de calibration de la cartographie des valeurs d'infiltrations, nous serons en mesure de proposer un catalogue de réponses hydrologiques des petits sous-bassins du Gardon d'Anduze, à différents scénarios climatiques qui seront établis sur la base de l'analyse de l'historique des données pluviométriques dans la zone étudiée.

2.2.3. Amélioration du modèle

Suite à la réunion du 28/10/2003, il est apparu la nécessité de recadrer la contribution BRGM au SCHAPI, afin de rester bien en phase avec les besoins futurs du SPC d'une part et les objectifs scientifiques du programme général du SCHAPI d'autre part.

Les améliorations effectuées ou en cours sur le modèle lui-même sont de deux ordres :

- Tout d'abord, par rapport à la nature de l'aléa climatique qui peut montrer une grande hétérogénéité spatiale sur une surface comme le bassin versant du Gardon d'Anduze, il était nécessaire de modifier les codes du modèle, afin qu'il puisse accepter une information spatialisée pour les pluies (voir ci-après).
- La deuxième amélioration pouvant être apportée au modèle concerne la prise en compte de la dynamique temporelle de la réponse du ruissellement. Pour cela, des tests vont être effectués avec une procédure de calcul des flux dynamiques (type onde cinématique), afin de déterminer les apports éventuels de l'implémentation d'une telle procédure. Un stage de fin d'étude de 6 mois a été proposé dans ce sens et le code correspondant à l'intégration de l'onde cinématique est en cours d'écriture (cf. ann. 1, 1^{er} rapport intermédiaire du stagiaire).

- **Caractérisation de l'évènement pluvieux à simuler : prise en compte d'une information spatialisée pour les pluies**

Un évènement pluvieux est défini pour une date donnée (par défaut, il s'agit de la date du relevé des états de surface), avec une hauteur totale de pluie tombée lors de cet évènement. Celui-ci dure pendant un certain temps, on parle de durée efficace. Enfin, il peut être précédé d'autres évènements pluvieux survenus au cours des 48 heures qui précèdent celui étudié, et qui peuvent totaliser une certaine hauteur d'eau (pluie antécédente), qui doit être prise en compte lors du calcul de la pluie d'imbibition.

L'intensité maximale de la pluie n'est renseignée que si la prise en compte de l'érosion diffuse dans la simulation est active.

STREAM est à l'origine un modèle qui tourne à grande échelle sur des secteurs de quelques centaines d'hectares au plus. Sur ce type d'étendue géographique, on peut considérer la pluie comme homogène sur l'ensemble de la surface, dans ce cas, on se doit de remplir la partie supérieure sur cet onglet.

Pour permettre une utilisation de STREAM à petite échelle, sur de grands secteurs d'étude, vous disposez, dans la partie basse de cet onglet, d'outils qui vous permettent d'ouvrir des rasters qui traduisent la répartition des caractéristiques de l'évènement pluvieux sur votre secteur. Ces rasters doivent être élaborés par vos propres soins en utilisant notamment le module « Spatial Analyst » qui vous permet de faire de l'interpolation à partir d'un jeu de données ponctuelles par exemple. La taille de la maille des rasters que vous élaborerez, n'est pas forcément celle des rasters générés par STREAM. Si la taille diffère, un échantillonnage est effectué par la procédure d'importation de ces rasters dans le répertoire de travail de STREAM.

À l'occasion, on vous rappelle que la taille des mailles de tous les rasters créés par STREAM, correspond à celle des mailles du raster des altitudes que vous entrez dans le système à l'aide de l'outil qui figure sur le deuxième onglet. Si vous créez ces objets spécifiquement pour une utilisation dans STREAM, il vous est conseillé de choisir une taille de maille conforme à celle du MNA.

L'onglet « Simulation » est activé dès lors que vous avez informé les champs de l'évènement pluvieux de façon correcte. Un évènement est opérationnel, lorsqu'il comporte une date valide sur 10 caractères, une hauteur de pluie ainsi qu'une durée efficace non nulle. La pluie antécédente peut être nulle, par contre l'intensité maximale de la pluie doit être renseignée dès lors que la modélisation de l'érosion diffuse est active.

2.3. CONCLUSION

Ces travaux de première année ont donné lieu à :

- un compte rendu de réunion du 28 octobre 2003 ;
- deux rapports d'avancement intermédiaires en octobre et décembre 2003 ;
- ce rapport technique de fin d'exercice,

et les délivrants suivants :

- une base de données 2003 des mesures d'infiltrométrie double anneau ;
- une base de données de l'occupation du sol 2002 issue de la classification de données SPOT-bidate en format compatible avec les requêtes de la DDE-Gard ;
- une carte numérique du potentiel d'infiltration des sols (format idem).

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

3. Planification année 2

3.1. AXES DE COLLABORATION ET DÉVELOPPEMENT

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 :

- 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 ;
- la définition, voire le portage dans les Services de Prévision des Crues, d'un outil adapté à la production de données d'entrée à ALTHAÏR 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.

3.2. TACHES PLANIFIEES EN 2004 (avril 2004 à avril 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. Réflexion sur l'intercomparaison des mesures aux différentes échelles et suivant les différents protocoles.

Mesures *in situ* avec l'EMA et Hydrosociétés (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).

- **États 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 événement 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 ALHTAIR utilisé au Service de Prévision des Crues du Gard (SPC Gard, anciennement SAC 30).

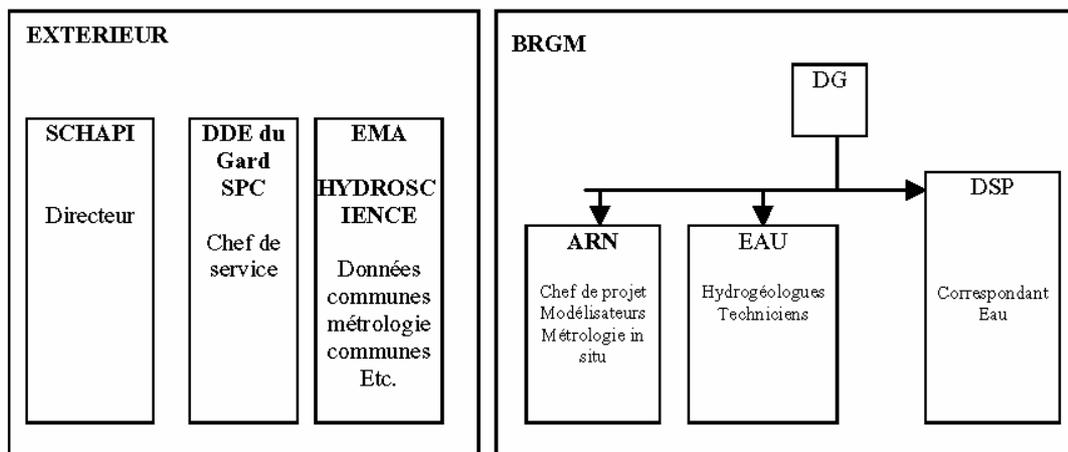
3.2.1. Description des opérations

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 : Alès (à valider par le SPC Gard).	J.F. Desprats, J.P. Izac
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 Hydrosociences, au cours de campagne de mesures communes et analyse d'incertitude aux données in situ collectées par d'autres méthodes par EMA et Hydrosociences.	J.F. Desprats, O. Cerdan
3. Cartographie du potentiel d'infiltration des sols 3.1. Construction des cartes de potentiel d'infiltration calibré sur les bassins du Gardon d'Anduze déjà documentés. 3.2. Établissement d'un cahier des charges sur la métrologie retenue, les fourchettes d'erreur à associer, leur actualisation, leur intégration dans la base de données, et sur les possibilités de systématiser ce processus et protocole proposé pour étendre ce type de mesure. 3.3. Représentativité de la mesure ponctuelle à celle de la caractérisation de l'état du sol au niveau de la parcelle et du sous-bassin.	J.F. Desprats, O. Cerdan C. King

Module 2. États 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, SPC Gard, EMA et Hydrosociences.	J.F. Desprats, O. Cerdan,
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.	N. Amraoui, F. Leberre J.F. Desprats
3. Définition des clauses de responsabilité (propriétés, maintenance, fonctionnement, suivi) en lien avec le SCHAPI.	N. Amraoui, F. Leberre J.F. Desprats
4. Achat.	SCHAPI
5. Mise en place des matériels (à choisir type de 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).	F. Leberre J.P. Izac, Joel Cubizolle

<p>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.</p>	<p>Valérie Bretteville N. Amraoui et J.F. Desprats, J. Cubizolle Idem</p>
<p>Module 3 . volet STREAM-Sud adaptation</p>	
<p>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 anneau 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.</p>	<p>O. Cerdan C. King J.F. Desprats</p>
<p>Mise en application sur une fraction du Gard : Définition de scénarios pluviométriques caractéristiques du bassin, et individualisation d'évènements 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 évènements types (nombre de BV 3, nombre d'évènements types 5). Analyse critique des scénarios produits.</p>	<p>O. Cerdan J.F. Desprats</p>
<p>Mise en bases de données des scénarios calculés. ALTHAÏR Introduction des données requises en entrée et analyse des avancées mesurables</p>	<p>J.F. Desprats O. Cerdan</p>

3.2.2. 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 coût 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.

3.2.3. Les étapes du projet

Principales étapes	Année n-1 2003-2004					Année de l'opération 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 <i>in situ</i>																	
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										
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				x	x	X	X										
Calage						x	x	x									
Mise en application sur le Gard									x	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

3.2.4. L'équipe de projet

- Chef de projet : Christine KING.
- Intervenants BRGM Orléans : Olivier Cerdan, Nadia Amraoui, Valérie Bretteville, François Le Berre.
- Intervenants BRGM en région : Jean-François Desprats, Nathalie Dorfliger, Jean-Pierre Izac, Joel Cubizolle.

3.2.5. Documents à remettre aux partenaires

Date prévue	Nature du document	Consistance	Nombre d'exemplaires	Destinataire principal
Avril 2004	D1. Rapport clôture de l'année 1	Faisabilité de mise en œuvre de STREAM –TED volet (1)	5 2	SCHAPI DDE-Gard
Mai 2004	D2. Rapport de sélection du type de matériel à acquérir	Liste, intérêts respectifs, argumentaire	1 1	SCHAPI DDE-Gard
Juin 2004	D3. Rapport de plan d'échantillonnage et du volume effectif de matériel à acquérir		1 1	SCHAPI DDE-Gard
Décembre 2004	D4. Rapport d'avancement de l'adaptation de STREAM-Ted et Bilan des apports et interaction avec ALTHAIR	Après amélioration identifiées avec SAC-DDE et INRA volet (2)	2 1	SCHAPI DDE-Gard
Décembre 2004	D5. Rapport d'avancement de la métrologie temps réel et de la réflexion sur les couplages d'indicateurs		2 1	SCHAPI DDE-Gard
Décembre 2004	D6. Bases de données pour SIG	Image-MNT	1	DDE-Gard
Décembre 2004	D7. Bases de données de mesures terrain	Infiltration et séries temporelles	1 1	DDE-Gard SCHAPI-DDE Gard
Décembre 2004	D8. Cahier des charges	Cahier des charges et protocole proposés, pour étendre les acquisitions infiltration de terrain.	5 2	SCHAPI DDE-Gard
Avril 2005	D9. Rapport de synthèse annuel	Intégration des avancées depuis décembre	5 2	SCHAPI DDE-Gard

Bibliographie

Cerdan O., Le Bissonnais Y., Souchère V., et al. (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., Souchère V., Lecomte V., et al. (2002) - Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff and erosion model STREAM (Sealing Transfer Runoff Erosion Agricultural Modification)', *Catena*, 46, p. 189-205.

Cerdan O., Le Bissonnais Y., Souchère V., et al. (2002a) - Concentration of suspended particles in interrill flow, *Earth Surface Processes and Landforms*, 27 (2), p. 193-205.

Cerdan O., Le Bissonnais Y., Couturier A., et al. (2002b) - Modelling interrill erosion in small cultivated catchments. *Hydrological Processes* in press.

Cerdan O., Le Bissonnais Y., Souchère V., et al. (2002c) - Rilling development on cultivated hillslopes during two extreme events. *Soil & tillage Research* 67 (1), p. 99-108.

Cerdan O., Le Bissonnais Y., Govers G., et al. (2004) - Scale effect on runoff from experimental plots to catchments in agricultural areas in Normandy in press *Journal of Hydrology*.

Gallien E., Le Bissonnais Y., Eimberck M., et al. (1995) - Influence des couverts végétaux de jachère sur le ruissellement et l'érosion diffuse en sol limoneux cultivé. *Cahiers Agricultures* 4: p. 171-183.

King C., Lecomte V., Le Bissonnais Y., et al. (2003) - Use of remote sensing data as alternative inputs in the "STREAM" runoff model. *Catena* (in press).

Le Bissonnais Y., Cerdan O., Lecomte V., et al. (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 p. + ann.

Lecomte V., Le Bissonnais Y., Renaux B., et al. (1997) - Erosion Hydrique et transfert de produits phytosanitaires dans les eaux de ruissellement. *Cahiers Agricultures* 6, p. 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, p. 233-245.

Souchère V., Cerdan O., Ludwig B., et al. (2002) - Assessment of potential ephemeral gully erosion in small agricultural catchments using a GIS-based model. *Catena* in press.

Annexe 1

Classification de l'occupation du sol

Les données satellitales

La classification de l'occupation des sols a été élaborée à partir de l'étude de trois images satellitales SPOT, commandées à SPOT Image, dont les caractéristiques sont regroupées dans le tableau suivant.

Date	KJ/Sat	Heure	incidence	Centre
28 mai 2001	47-261/1	10 :48 :22	02.39' R	N44.06'16'' E003.57'08''
1 août 2001	47-261/1	11 :06 :29	25.46' L	N44.06'20'' E003.58'58''
6 janvier 2002	47-261/6	10 :26 :57	28.58' R	N43.50'26'' E004.01'47''

Caractéristiques des images SPOT

Ces images couvrent l'ensemble du bassin versant à différentes saisons, ce qui permet d'analyser la végétation à des stades différents et donc de déterminer plus précisément l'occupation des sols.

Le travail de géoréférencement et de superposition a été contrarié par les fortes incidences des images d'août (25.46'L) et de janvier (28.58'R). De plus, le fort relief de la zone accentue ces difficultés. Aussi, la classification de l'occupation du sol du bassin versant a été réalisée :

- en monodate sur les parties du bassin à fort relief à partir de l'image de mai (SPOT mai quasi verticale) ;
- en bidate sur l'aval du bassin versant où le relief est modéré et où la superposition a été possible (SPOT mai et août).

L'image de janvier, n'apportant pas d'information supplémentaire, n'a pas été prise en compte pour la classification.

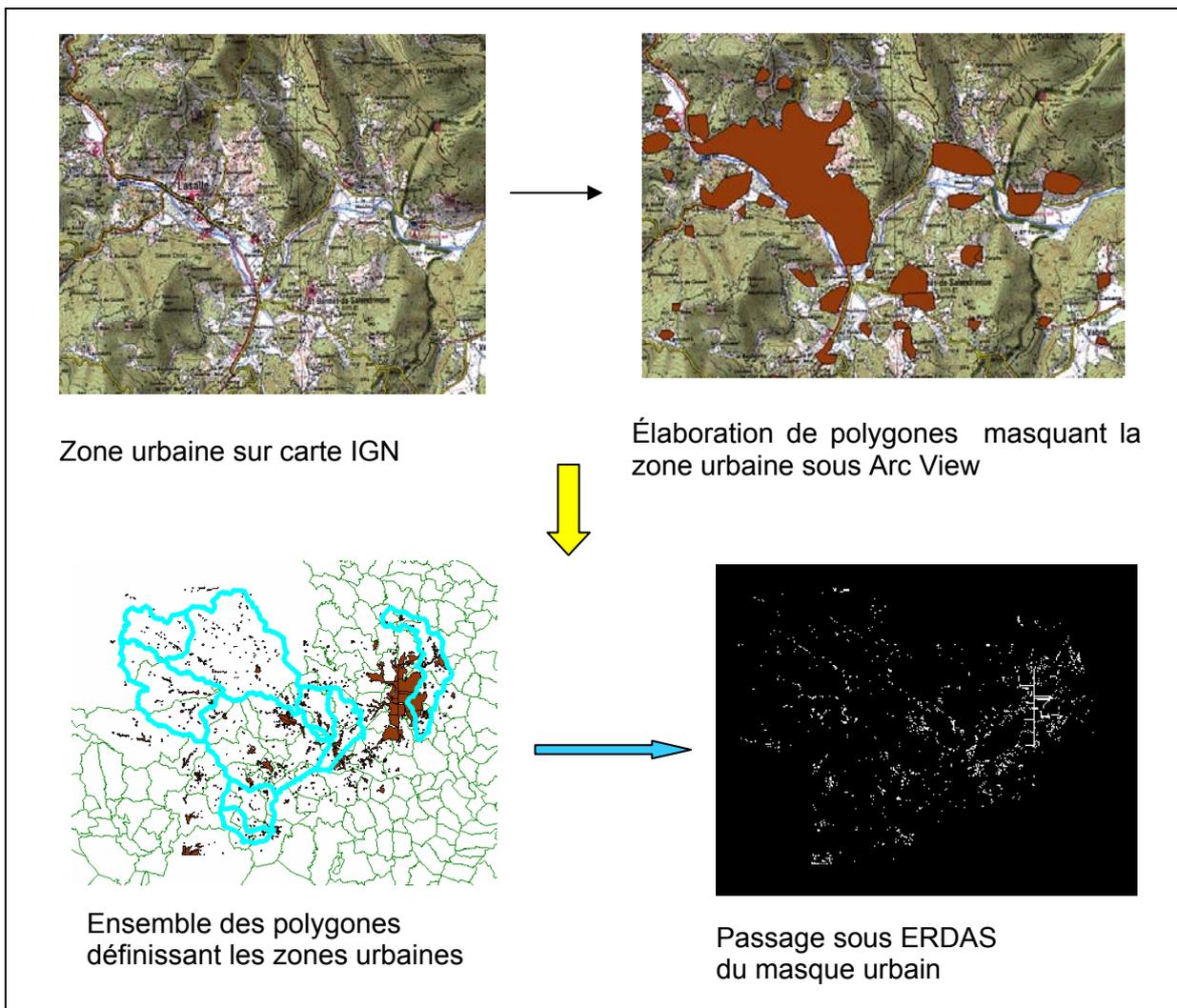
Travail préliminaire : élaboration des différents masques

Un travail préparatoire aux traitements des images a été réalisé à l'aide du logiciel SIG ArcView aboutissant à l'obtention de deux masques :

- Un masque forêt obtenu à partir du MNT (modèle numérique de terrain) fourni par le SAC 30 (figure suivante).
- Un masque urbain obtenu à partir des cartes IGN numériques (1/25000) fournies par la BD Carto IGN.



Masque forêt sous le logiciel ERDAS



Élaboration du masque urbain

Pour analyser l'occupation du sol, 55 classes radiométriquement différentes ont été photo-interprétées :

- 13 classes pour la classification de la strate « forêt » ;
- 12 classes pour la classification de la strate « ville et village en zone forestière » ;
- 17 classes pour la classification de la strate « surface agricole » ;
- 9 classes pour la classification de la strate « villes et villages en zone agricole » ;
- 4 classes pour la classification de la strate « nuages » (les nuages masquant les objets au sol il faut une classification spéciale).

La figure suivante montre le code couleur des différentes classes sélectionnées de la classification Forêt.

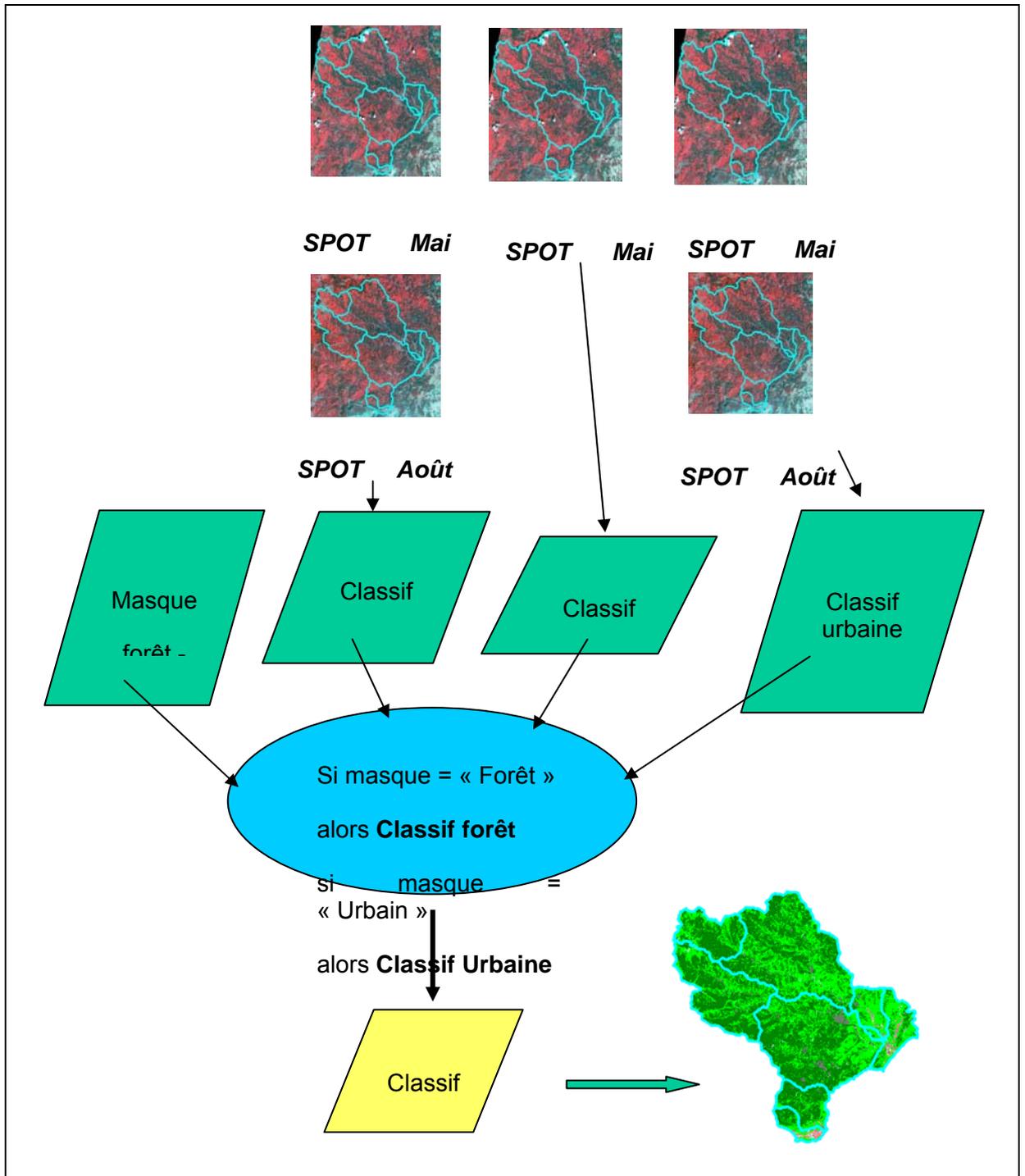
Row	Color	Red	Green	Blue	Opacity	Class Names
0		0	0	0	0	Unclassified
1		0.254902	0.639216	0.560784	1	garrigue3
2		0.635294	0.309804	0.337255	1	foret1
3		0.752941	0.305882	0.337255	1	foret3
4		0.133333	0.34902	0.329412	1	garrigue1
5		0.180392	0.443137	0.423529	1	garrigue2
6		0.231373	0.945098	0.784314	1	sol nu3
7		0.462745	0.839216	0.741176	1	sol nu 4
8		0.513725	1	1	1	sol nu2
9		0.72549	1	1	1	sol nu1
10		0.333333	0.368627	0.34902	1	garrigue4
11		0.215686	0.341176	0.32549	1	foret4
12		0	0	1	1	eau
13		1	0.360784	0.411765	1	foret2

Code de couleurs des 13 classes de la classification Forêt

Ces différentes classes ont fait l'objet d'une validation statistique avant d'être intégrées dans la classification finale. En effet, la pertinence des parcelles d'entraînement a été vérifiée par le logiciel. Celui-ci calcule les confusions qui peuvent être faites entre pixels sur chacune des parcelles (AOI) en fonction de la réponse spectrale des objets observés. Pour chaque classe donnée on a pu ainsi voir la proportion de pixels qui se trouvaient bien classés. Ces statistiques nous ont donc permis de vérifier si les classes photo-interprétées étaient judicieusement choisies c'est-à-dire si elles étaient radiométriquement différentes (proportion de pixels bien classés > 90 %). Plusieurs classifications ont dû être réalisées ou affinées avant d'être validées par les statistiques.

Ces classes, ensuite intégrées dans une classification finale ont été regroupées dans 8 catégories d'occupation du sol (garrigue, forêt, sol nu, eau, urbain, cultures hiver, vigne et jardins) aboutissant ainsi à la carte d'occupation du sol (cf. 0).

La figure suivante montre un algorithme simplifié du passage de l'analyse des images SPOT à l'obtention de la cartographie de l'occupation du sol.



Algorithme synthétique pour l'obtention de la cartographie de l'occupation du sol

Validation de la classification sur le terrain

La validation de la classification s'est faite par observations de la végétation et localisation précise des sites à l'aide d'un GPS Magellan 320 sur le terrain (précision décimétrique). La confrontation de ces observations à la classification établie a permis de réajuster cette dernière.

Certaines classes ont été changées de catégories, de plus certaines catégories ont été renommées. En effet, la catégorie garrigue a été transformée en forêt arbustive (essentiellement chênes verts (4 – 5 m) et buissons), les catégories forêt et vignes ont été élargies respectivement à forêt + prairies et vignes + vergers. La distinction entre ces différents types d'occupation du sol par télédétection est toujours délicate car leurs couvertures végétales sont voisines.

Résultat : carte de l'occupation des sols sur le bassin versant du Gardon d'Anduze.

La figure de la page suivante est le résultat intégré au SIG de la classification du sol appliquée aux images SPOT.

Comme nous pouvons l'observer, l'occupation du sol est globalement composée de 95 % de forêt (forêt dense de châtaigniers et forêt arbustive de chênes, avec un gradient de densification vers l'ouest du bassin versant) et les cultures, essentiellement de la vigne et des jardins, sont concentrées au niveau des villes (surtout Saint-Hippolyte-du-Fort et Anduze).

Une étude du recensement agricole 2000 au niveau des communes du bassin versant montre que la surface des vignes représente 0,86 % de la surface totale (ensemble des communes).

Quelques villages sont clairsemés au milieu de la forêt comme nous le montre la photo suivante.

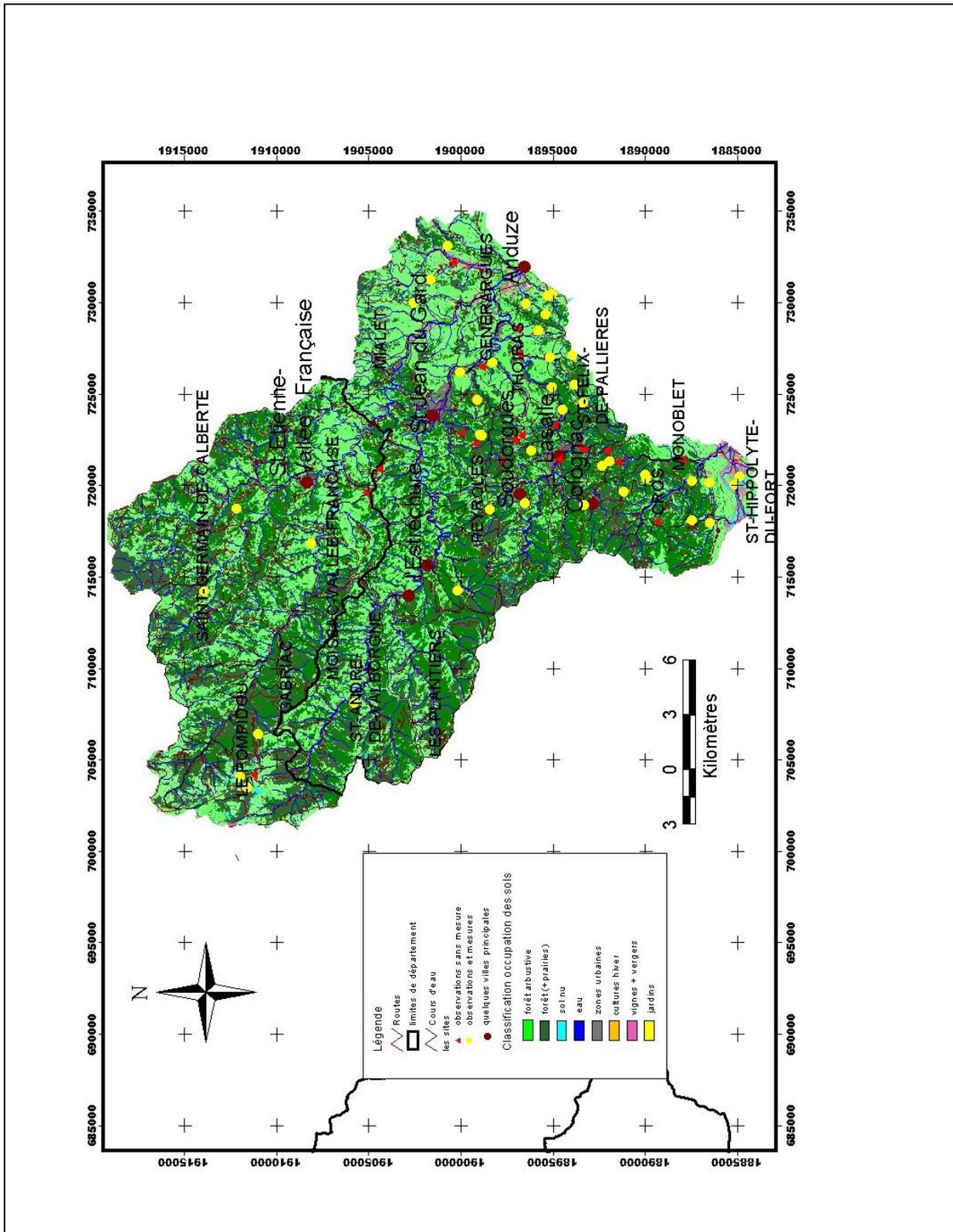
Le bassin versant étudié, relativement homogène, fournit un couvert végétal qui peut être un paramètre important au niveau de l'infiltrabilité des sols (capacité de rétention de l'eau).

C'est pourquoi il est intéressant d'intégrer l'occupation du sol dans le SIG et de la confronter aux autres données acquises pour caractériser le potentiel d'infiltration des sols du bassin versant.

Cette donnée finalisée a fait l'objet d'une intégration dans le SIG. Elle a été remise à nos partenaires de l'École des Mines d'Alès.



Photographie de Mialet prise de la D450 en revenant du site Les Puechs.



Cartographie de l'occupation du sol (1/230 000)

Annexe 2

Protocole des mesures double anneau

Avant d'entreprendre la campagne de terrain, nous avons discuté avec P. Andrieux (département Science des Sols à l'INRA) de la méthodologie mise en place. L'INRA présente une longue expérience de terrain, par le suivi depuis plusieurs années du site de Roujan (bassin versant de l'Hérault).

Pour caractériser l'infiltration, le milieu naturel est découpé en zones homogènes (d'un point de vue pédologie).

Les essais sont réalisés avec l'infiltromètre double anneau (type Müntz) : cet appareil de mesures permet de déterminer l'infiltration de l'eau dans le sol de façon très locale (diamètre de l'appareil : environ 40 cm). Il est nécessaire de faire par zone entre 3 et 5 points de mesure afin d'obtenir une bonne représentativité du site.

Plusieurs facteurs interviennent au niveau de l'infiltration de l'eau dans le sol :

- l'occupation des sols
- la pratique culturale (terrains labourés ou non, couverts de cailloux, sols nus...)
- la nature et la profondeur du sol (carte des pédopaysages)
- la nature des terrains géologiques sous-jacents
- l'évolution dans le temps des états de surface du sol
- la pente (la dynamique de l'écoulement)
- la rugosité
- la teneur en eau du sol

Le choix du double anneau sur le bassin versant du Gard, avec un minimum de trois essais par site (surface homogène) doit permettre une cartographie qualitative du potentiel d'infiltration des sols (hiérarchisation des différentes unités homogènes). L'approche quantitative sera obtenue par relation avec les mesures en parallèle par l'Ecole des Mines d'Alès qui effectue actuellement des essais avec un prototype de simulateur de pluie (nous avons pu assister à des essais d'infiltration organisés lors d'une journée sur le site de Tourgueille à l'ouest du bassin versant).

L'appareil de mesures utilisé est un infiltromètre double anneau à réglette ("CERAS Réglette"). Cet infiltromètre est utilisé pour mesurer des vitesses d'infiltration supérieures à 10^{-6} m/s.

Il se compose de :

- 1 anneau de garde en PVC de 315 mm de diamètre, muni de 3 poignées et relié par 3 voiles à un centreur de 100 mm de diamètre.
- 1 anneau de mesure en acier, de diamètre interne 150 mm.
- 1 ensemble flotteur tube guideur en PVC (tube guide de 80 mm de diamètre, le flotteur de 74 mm de diamètre et de hauteur 70 mm est muni d'une règle de lecture graduée de 0 à 110 mm).



Photographie de l'appareil de mesure.

Les mesures ont été effectuées sur des surfaces non travaillées.

De plus, lors de la mise en place de l'infiltromètre, nous avons veillé à conserver les états de surfaces des terrains.

L'anneau de garde puis l'anneau en acier sont enfoncés de quelques centimètres dans le sol de façon à être à l'horizontal (vérification avec un niveau visible sur la photo ci-dessus).

L'anneau de garde est colmaté à l'intérieur avec de l'argile pour éviter les pertes d'eau latérales et assurer un bon maintien de la charge.

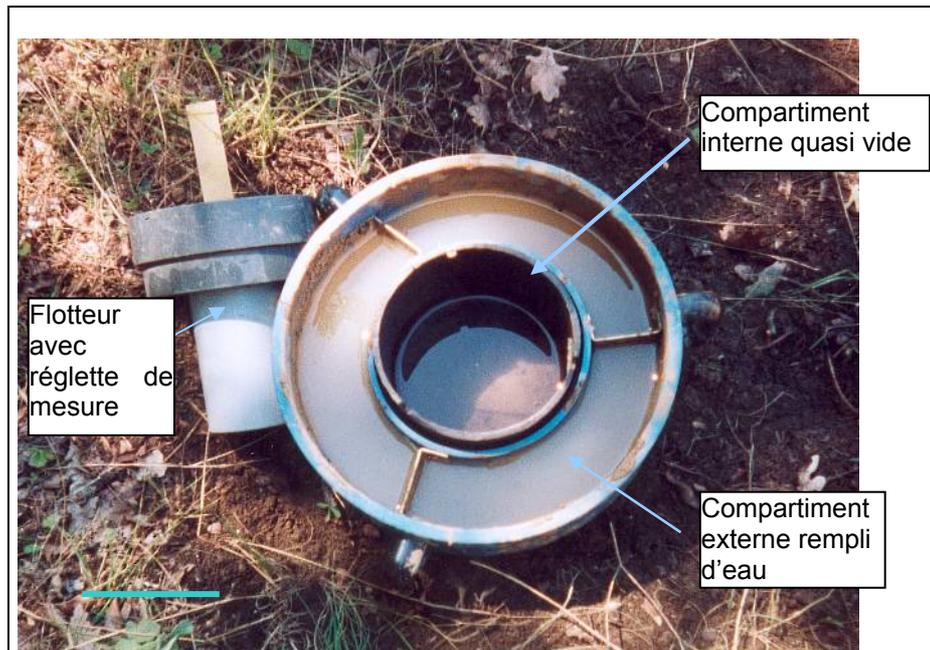
Les deux compartiments sont remplis d'eau et on met en place le flotteur au niveau de la partie centrale.

Le chronomètre enclenché, l'essai commence.

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. Notons que durant toute la mesure on doit veiller à ce que le niveau d'eau entre les deux anneaux restent le même (au besoin, on rajoute de l'eau dans le compartiment externe). On peut alors supposer que sous l'anneau interne l'infiltration est verticale. Nous pouvons lors de l'essai relever les valeurs de la règle à différents temps et ainsi obtenir un coefficient d'infiltration verticale (en mm/s).

Ce coefficient d'infiltration nécessite une interprétation pour obtenir une perméabilité au sens de la loi de Darcy.

La figure suivante montre un essai qui a bien fonctionné. En effet il n'y a plus d'eau à l'intérieur du cylindre central alors que le compartiment externe est rempli d'eau.



Visualisation de l'absence de communication entre les deux compartiments de l'infiltromètre.

Avant de se rendre sur le terrain, les sites sont sélectionnés précisément sur une carte IGN (localisation d'un chemin, d'un pont, sortie d'un village, dans un virage...) après analyse de la carte géologique.

Ceci permet d'optimiser les trajets et l'accès aux sites mais aussi de prévoir où se réapprovisionner en eau.

Ainsi, plusieurs essais d'infiltration ont été réalisés, dans des endroits différents, pour chacune des formations géologiques présentes sur notre secteur d'étude.

Au niveau de chaque site sont relevées les informations suivantes :

- les coordonnées en Lambert 3 à l'aide du GPS,
- si des mesures d'infiltration ont été effectuées (oui/non),
- les observations sur l'occupation du sol,
- la géologie des terrains (lithologie, présence de fractures...),
- la pédologie (épaisseur et couleur du sol ...).

Annexe 3

Bilan des mesures

site	Budget	X	Y	Lieu-dit	infiltr corrigées (mm/s)	occupation sol	géol-observations	autres observations
2002-07	Karst / EAU	724230	3194800	62La Pommeraie	0,0199	prairie en jachère	alluvions récentes	sol sablonneux et limoneux
2002-07	Karst / EAU	706520	3211330	41Le Pompidou	0,0918	prairie brebis, fougère, chardons	schistes	peu de sol (schiste affleurant)
2002-07	Karst / EAU	716970	3208440	45Arbousse	0,0531	forêt de châtaigniers, noisetiers, acacias (10 m), fougères	schistes	sol 40 cm
2002-07	Karst / EAU	730560	3195370	25Suéjol	0,0459	conifères (pins), chênes verts, prairies, herbes	marnes noires	sol humique 50 cm - 1 m
2002-07	Karst / EAU	720370	3187780	33Baumel	0,1261	prairie, mousse, trèfles, chiendent	alluvions récentes	terre légère et petits granulats
2002-07	Karst / EAU	730470	3195610	22Montaigu	0,0123	forêt peu dense, conifères, chênes verts, pins (replantation), prairies	marnes grises	sol 1 m
2002-07	Karst / EAU	720570	3185190	35La Jasse	0,0099	vigne âgée de 30 ans	limite calcaires marneux et argileux et alluvions récentes	sol non travaillé et dés herbés (70% surface recouverte de petits cailloux et 30% terre fine marron brun)
2002-07	Karst / EAU	722830	3199180	63Marine1	0,3661	chênes verts, châtaigniers	grès, ou granite altéré?	fracturé, sol (30 - 80 cm)
2002-07	Karst / EAU	719150	3196860	53Soudorgue-Mourier	0,1094	forêt de châtaigniers, bruyère, fougère, genêt, jardins et habitations à proximité	grès et argile	sol 20 cm (marron clair)
2002-07	Karst / EAU	721190	3192680	55Bétizac	0,2473	acacias, châtaigniers, conifères (dense)	granite très altérés	sol (1 m environ)
2002-07	Karst / EAU	718780	3198750	57 Col du Mercou	0,2172	chênes verts, herbes, genêts, châtaigniers	granite altéré	terre marron clair, sol (20 cm environ)
2002-07	Karst / EAU	725490	3195400	61Malérargues	0,1360	terres en jachère, hautes herbes	alluvions récentes	sol sablonneux et limoneux
2002-07	Karst / EAU	719020	3193630	56Nauregal	0,3034	châtaigniers, conifères	granite altéré	terre brune et souple
2002-07	Karst / EAU	724620	3193690	19Vabres	0,0251	bois de conifères, ronces, prairies autour	alluvions anciennes	
2002-07	Karst / EAU	730060	3196780	24OlivierNord	0,2170	conifères, chênes verts	granite altéré	
2002-07	Karst / EAU	722030	3196530	8Les Combettes	0,2489	feuillus châtaigniers + conifères	granite altéré	
2002-07	Karst / EAU	721440	3192260	4La Baraquette	0,2550	châtaigniers, fougères, 10 m	granite	
2002-07	Karst / EAU	704210	3212290	39La Borie	0,2166	champs non cultivés	dolomie	sol rouge 15 cm
2002-07	Karst / EAU	727100	3195500	48Arnauds	0,0718	forêt de chênes verts	dolomie	
2002-07	Karst / EAU	731350	3201940	27Bastide	0,0457	genêts, buis, buissons denses, chênes verts (2,5m)	dolomie	sol 15 cm
2002-07	Karst / EAU	720250	3186850	34La Boissière	0,1510	forêt sapins, chênes verts, mousse, herbes	dolomie	très accidenté, sablonneux, terre rouge, rognons, ancien site minier
2002-07	Karst / EAU	703620	3211920	40Les Crottes	0,1021	champs non cultivés	calcaires marneux et argileux	sol 20 cm
2002-07	Karst / EAU	720130	3185530	32Le Pereyrol	0,0812	prairie herbes hautes, genêts, vignes en contre bas	calcaires marneux et argileux	
2002-07	Karst / EAU	733220	3201050	26Fontanelle	0,1066	forêt chênes verts et pédonculés, ronces	calcaires bleus	sol 15 cm
2002-07	Karst / EAU	728600	3196100	47Paillière	0,0744	forêt de chênes verts	calcaires	terrain accidenté, 10 - 20 cm de sol avec cailloux
2002-07	Karst / EAU	718050	3186830	49Cambo1	0,0295	garrigue, chênes verts, thym, genévrier, buis	calcaires	présence d'éboulis calcaires, peu de sol (brun)
2002-07	Karst / EAU	730100	3202880	29Puech	0,4859	forêt chênes verts et pédonculés (8 - 10 m)	calcaire gris bleus	sol humique 20 cm
2002-07	Karst / EAU	724810	3199450	60Gros Garens	0,1684	chênes verts, conifères, châtaigniers, fougères	argiles, grès	terre humique, gros cailloux, gros grains, grès fracturés, sol (1 m environ)
2002-07	Karst / EAU	722890	3199290	58La Marine2	0,0410	chênes verts, châtaigniers, genêts	argiles, grès	terre argileuse, grès fracturés, sol (1m environ)
2002-07	Karst / EAU	726320	3200370	59Les Fournels	0,0151	prairie non cultivée	alluvions récentes	sol sablonneux, brun, présence de limons
2002-07	Karst / EAU	726820	3198620	15Beau-regard	0,1330	chênes verts + pédonculés, 5-6 m	argile + grès quartzeux	
2002-07	Karst / EAU	714320	3214250	43Le Masel Rosade	0,0631	pré, et chênes verts et châtaigniers à proximité	schistes	20 cm de sol dans le pré, sol humique dans la forêt
2002-07	Karst / EAU	714370	3200520	54Millérine	0,1867	forêt de châtaigniers et de chênes verts	schistes	sol 15 - 20 cm (brun)
2002-07	Karst / EAU	718880	3212460	44La Liquière	0,0602	forêt de châtaigniers (8 m)	schistes	sol 40 cm
2002-07	Karst / EAU	720690	3190330	30Cros1	0,0271	forêt châtaigniers, chênes (8 - 10 m), mousse	schistes	peu de sol (10-15 cm)
2002-07	Karst / EAU	708250	3206090	42Les Barbutis	0,0994	forêt de châtaigniers, fougères	schistes	sol (30 cm), morceaux de schiste (plaquettes) affleurants
2003-07	Karst / EAU	719360	3200975	Vallée obscure	0,0817	forêt pin / châtaignés	formations gneis	épaisseur sol 60 cm, très accidenté
2003-07	Karst / EAU	721550	3202325	Mas de la Cam	0,3646	forêt chênes	granite et arène	très accidenté jusqu'à la rivière
2003-07	Karst / EAU	719600	3209300	Piantevidou	0,0362	châtaignés, pin, peu de chênes, mousses lichens+H72	schistes fracturés, schistes à l'affleurement	
2003-07	Karst / EAU	723060	3199225	La Maine	0,1589	chêne, arbousier, châtaigniers	tuff, travertin	
2003-07	Karst / EAU	709630	3212025	Trabassac	0,1729	chêne vert, houx, bruyère, genêts	schistes en petits morceaux	très accidenté, 10 cm de sol
2003-07	Karst / EAU	709050	3214875	Molezon	0,0534	bruyère, genêts, fougères, châtaigniers en contrebas	schistes	50 cm de sol
2003-07	Karst / EAU	720350	3207925	St Etienne	0,0459	bruyère, châtaigniers coupés	schistes	terre marron clair, morceaux de schistes, sol 60 cm
2003-07	Karst / EAU	717300	3200030	Les Cabanes	0,0838	chêne vert, mousse, lichens	gneiss	très accidenté, 20 cm de sol, qq cailloux
2003-07	Karst / EAU	714080	3203320	Saumane	0,1090	pré fauché	alluvions	sol 60 cm
2003-07	Karst / EAU	706150	3207430	St André	0,0214	forêt châtaigniers, pins, accacias, fougère, herbe	schistes en place, non friable	sol argileux, marneux, vers de terre
2003-07	Karst / EAU	721450	3202600	Mas de la CAM	0,1132	pré non fauché, jachère		sable limoneux
2003-07	Karst / EAU	727100	3203325	Malboissière	0,3147	chêne vert, houx, buis	calcaire	sol marron brun, terre en grumaux
2003-07	Karst / EAU	727225	3196075	Les Malines	0,0385	buis, chêne	calcaire	nombreux cailloux, terre brune sur 20 cm

site	Budget	X	Y	Lieu-dit	infiltr corrigées (mm/s)	occupation sol	géol-observations	autres observations
2003-07	Karst / EAU	720385	3194800	Poney-club	0,0763	cèdre, pins, forêt	granite affleurant	sol entre 0 et 5 cm, très accidenté
2003-07	Karst / EAU	719000	3194925	Les Vignolles	0,2564	chênes grands, marronniers, fougères, genêts	granite fracturé, altéré	sol entre 0 et 10 cm
2003-07	Karst / EAU	719575	3201800	L'Arénas	0,2688	petit chênes, forêt moyennement dense, pins	gneiss	tere avec petits cailloux, pas d'herbe
2003-07	Karst / EAU	716600	3199300	Vallée Borgne	0,1075	foret cevenolle, chêne, châtaigners, pins, fougères	granite altéré	sol de forêt humique, avec cailloux, et hors foret avec de l'argile, jaunâtres
2003-10	SCHAPI	724550	3203900	Pommarède	0,1054	prairie fauchée	alluvions, colluvions	terre souple, brun foncé, fine
2003-10	SCHAPI	726825	3204750	Aigladines	0,0093	pré non cultivé, fauché		terre marron, limoneuse, avec cailloux ronds
2003-10	SCHAPI	727825	3206100	Roc Taillade	0,2545	chênes, houx	calcaire	sol 20 cm
2003-10	SCHAPI	727125	3205450	Les Combes	0,0867	bruyère, pins, chênes, houx	schistes micassés, friables	terre noire
2003-10	SCHAPI	719260	3191900	Camblat	0,1621	prairie fauchée, non travaillée	arène granitique	sol 80 cm épaisseur
2003-10	SCHAPI	723120	3196850	St Croix de Caderle	0,2696	garrigue, avec humus, chêne vert, houx, bruyère	arène granitique	très accidenté
2003-10	SCHAPI	726350	3198050	Gornies	0,0097	terrasses, forêt de chênes, herbe	calcaire	dépôts, limoneux - argileux
2003-10	SCHAPI	717300	3189300	La Fage	0,1158	chênes verts, épineux, pins		terre épaisse, marron - brune, aérée
2003-10	SCHAPI	717250	3188360	Les Rauquets	0,1144	chênes verts, pins, herbe	calcaire	sol de 30 à 50 cm, terrain incliné
2003-10	SCHAPI	713875	3199900	La Calette	0,0916	châtaigners dominants, chênes, genêts, mousse	schistes	terre avec morceaux de schistes sur 50 cm, très accidenté
2003-10	SCHAPI	714200	3197175	Montagne Liron	0,2681	genêts, chênes, pins	granite	sol léger, beaucoup de petits cailloux, pentu
2003-10	SCHAPI	729630	3197725	Le Serre	0,1671	chêne vert, garrigue, buis, racines	calcaire	terre rouge, bonne épaisseur, vers de terre
2003-10	SCHAPI	730500	3196540	Colette	0,0727	chênes, pins, fougères, lierres, humus		terre argileuse, jaune et brun clair, 50 cm
2003-10	SCHAPI	733720	3201280	Les Campanèzes	0,0213	pins châtaigners fougères, pas d'herbe, humus	poudingues en affleurement	terre avec cailloux jaune ocre, légèrement marseuse
2003-10	SCHAPI	720500	3208210	St Etienne	0,1280	prairie fauchée, non travaillée	alluvions	terre limoneuse, avec cailloux ronds
2003-10	SCHAPI	724475	3201190	St Jean	0,0726	prairie fauchée, jamis travaillée	alluvions	inondable, éléments fins
2003-10	SCHAPI	719860	3198625	Col du Mercou	0,3579	châtaigners, chêne vert, bruyère, genêt	granite	arène granitique, sol 10 cm, puis arène, accidenté
2003-10	SCHAPI	719770	3191500	52AV Cognac	0,7031	forêt de chataigniers et chênes verts	granite altéré	sol humique (40 cm)
2003-10	SCHAPI	718210	3187800	50Cambo2	0,6128	forêt chênes verts et pédonculés (3 m), graminées	dolomie fracturée	beaucoup de racinaire, sol marron (15 - 20 cm)
2003-10	SCHAPI	720480	3190260	31Cros2	0,8570	forêt chênes verts (5-6 m), tamaris, mousse	schistes fracturés	sol humique (35 cm)
2003-10	SCHAPI	727210	3194280	21Barafort	1,0543	forêt chênes verts et pédonculés, buis	calcaire	sol 20 cm, présence de cailloux
2003-10	SCHAPI	725590	3194170	20Clède	1,9601	forêt conifères, chênes verts et pédonculés	argiles et grès	
2003-10	SCHAPI	729440	3195710	23OlivierSud	0,6417	forêt dense conifères, chênes verts, fougères, bruyère, buis	argile, grès	sol humique 70 cm -1 m et présence de cailloux de 15 cm
2003-10	SCHAPI	716620	3196960	Le Vaquier	0,9075	forêt chênes, fougères	granite et arène	très accidenté
2003-10	SCHAPI	721450	3211675	La Borie	0,2654	fougères, genêts, bruyères, chêne vert, châtaigners, pins	schistes altéré en surface	épaisseur sol 40 cm, morceaux de schistes, terre jaune
2003-10	SCHAPI	725475	3203400	Vitrac	0,1719	fougères dans clairière, chênes, houx, mousse	alluvions, colluvions	brun foncé
2003-10	SCHAPI	714100	3199575	Millérimes	1,4476	chênes verts, châtaigners	schistes	pas de sol, très accidenté
2003-10	SCHAPI	732425	3199825	Le Bruel	0,1883	châtaigners, fougères, pins	poudingue, marne	peu de terre en surface
2003-10	SCHAPI	718344	3193875	Bouzanguet	0,3174	genêts, châtaigners, pins	granite altéré, 40 cm de sol	racines, terre marron souple, souple, légère
2003-10	SCHAPI	732878	3198619	Les gypières	0,0202	chêne, un peu d'herbe	calcaire marneux	accidenté, mousse
2003-10	SCHAPI	722032	3208881	Le Mazel	0,0522	zone brûlée, repousse de fougère. Précédent pin, châtaigners	schistes	terre 5 cm, petites plaques de schistes micassés, mauvais drainage
2003-10	SCHAPI	732533	3199497	Cabanoule	0,0990	houx, mousse, chênes	marne/argile	très accienté, sol 10 cm, puis cailloux, racines
2003-10	SCHAPI	721348	3209917	La courbe d'avelac	0,0749	châtaigners, pins, genêts, fougères	schistes	sol 5 à 10 cm
2003-10	SCHAPI	725447	3197442	Barniès	0,5971	chênes, accacias, châtaigners, pins	sableux, pas d'argile	sol très caillouteux
2003-10	SCHAPI	725738	3197143	La croix de Flanarys	0,1701	chênes, garrigue, buis, genêts, herbe	calcaire / grès	sol argileux, marron brun, pas de marne
2003-10	SCHAPI	725485	3199559	Mas Poujol	0,1824	pins, châtaigners		terre marron clair à brun, avec qq grains
2003-10	SCHAPI	732304	3198327	Chemin de Brigau	0,0575	châtaigners, fougères, chênes	marne	sol 5 à 10 cm
2003-10	SCHAPI	725739	3194267	Mazet de Fontane	0,3567	chênes et châtaigners	grès argile	
2003-10	SCHAPI	710872	3202515	Les plantiers	0,0277	châtaigners; chênes, bruyère	schistes, filons de quartz	épaisseur 30 cm, tere marron clair, sol humide
2003-10	SCHAPI	716439	3197256	La Traversette	0,3957	châtaigners; chênes, fougères	granite	terre marron brune, racines, épaisseur 10 à 20 cm, très accidenté
2003-10	SCHAPI	718362	3197118	La Salette	0,2532	chênes, houx, fougères	granite	sol souple, avec granite altéré, humus
2003-10	SCHAPI	709060	3209242	Remessié	0,0511	pins et châtaigners	schistes	terre marron, fougères et feuilles au sol
2003-10	SCHAPI	716820	3204457	Le Prunier	0,0625	châtaigners, pins	schistes	terre marron brune
2003-10	SCHAPI	721812	3199681	La Graussille	0,4352	châtaigners, peu de chênes, fougères	granite	sol léger, arène
2003-10	SCHAPI	725845	3194514	Mazet de Fontane	0,3240	chênes et châtaigners	grès argile	
2003-10	SCHAPI	730562	3195391	Suejol	0,0313	pins, chênes, herbe	grès marneux	terre grasse, noire 30 à 20 cm, petits cailloux
2003-10	SCHAPI	732800	3200400	Blateiras	0,1590	Pins, châtaigners	marne	5 cm de sol
2003-10	SCHAPI	732590	3199619	La Cabanoule	0,1594	Pins, châtaigners, chênes	marne, calcaire gréseux	30 cm de sol
2003-10	SCHAPI	731486	3199793	La Parade	0,2231	Châtaigners, pins, fougères, chênes	calcaires gréseux	30 cm de sol
2003-10	SCHAPI	731310	3198838	Picadenoux	0,1275	Pins, chênes, houx	poudingues, calcaires	20 cm de sol brun

103 sites ont fait l'objet de mesures de perméabilité, soit environ 300 mesures réalisées (3 mesures par site). Ceci a été réalisé au cours de trois campagnes de terrain : été 2002 et été 2003 (financement BRGM – Projet Karsteau), et automne 2003 (financement SCHAPI). Outre les mesures de perméabilité figurent sur les relevés de terrain les caractéristiques observées sur le terrain : géologie, pédologie, paysages.

Annexe 4

Classification du potentiel d'infiltration des sols

Le potentiel d'infiltration des sols, présenté comme délivrable dans le rapport a été remis à nos partenaires de l'École des Mines d'Alès. Ce produit a fait l'objet de discussions au cours des différentes réunions et comités de pilotage organisés autour du Service de Prévention des Crues du Gard (François Bressand). Il a remis comme couche d'information ArcView, donc à un format directement importable dans le SIG de l'École des Mines d'Alès. Deux versions ont été produites : la première en 2002, suite à la première campagne de terrain, la seconde fin 2003, après les mesures in situ de l'été et l'automne.

Remis à l'EMA pour des simulations avec Althaïr, il a permis la réalisation de différents essais. Une communication commune a ainsi pu être présentée à la Société Française de photogrammétrie et Télédétection, pour parution dans le Bulletin n°172 :

Ayral P.A., Desprats J.F., Bressand F., Pinel D., Sauvagnargues-Lesage S., King C., Dorfliger N., 2003 . Intégration de la variabilité spatiale de l'infiltration des sols dans un modèle de prévision des crues opérationnel : Althaïr – zone test du bassin versant du Gardon d'Anduze. SFPT n° 172 (2003-4 p 22 à 30)

Article page suivante

INTEGRATION DE LA VARIABILITE SPATIALE DE L'INFILTRATION DES SOLS DANS UN MODELE DE PREVISION DES CRUES OPERATIONNEL : ALHTAIR - 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 de crue ALHTAIR 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, ALHTAIR en mode « bassin versant », permet un calage des paramètres du modèle par bassin versant étudié. La seconde, ALHTAIR en mode « régionalisé », 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 de l'intégration de cette cartographie à ALHTAIR en mode régionalisé montre 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'ALHTAIR en mode régionalisé 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 is developed for five years by the flood-warning service: Service d'Annonce des Crues du Gard (SAC-30). The purpose of this model with an operational orientation is to produce a flood hydrograph for each location of the rivers for the area under supervision of the SAC-30, in a real time processing. Two versions of this flood forecasting model exist. The first one, ALHTAIR in "watershed" mode, allows affecting the model parameters by catchment area. Second version, ALHTAIR in "regionalized" mode, permits 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 ALHTAIR in mode "regionalized" show the interest of this methodology provided that the methodology is refined to realize the cartography of the permeability and the model calibration. Further research are required to consider an expansion of the use of ALHTAIR in "regionalized" 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 entraînés 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 se sont retrouvés en crue et qui ont provoqués 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'ALHTAIR 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'Année des Crues du Gard (SAC-30) développe depuis bientôt 5 ans le modèle de prévision de crue ALHTAÏR (ALarme Hydrologique Territoriale Automatisée par Indicateur de Risque) [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).

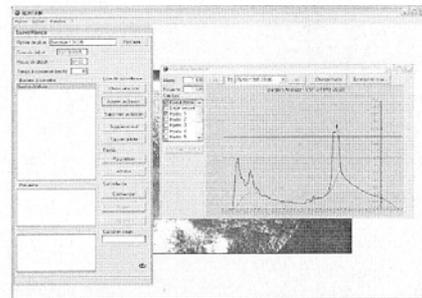


Figure 1 : interface d'ALHTAÏR

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 "régionalisé" 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).

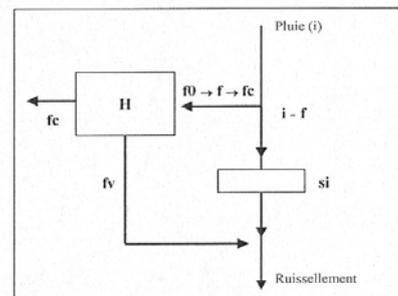


Figure 2 : schématisation du fonctionnement du module de production d'ALHTAÏR

La pluie brute (i) est soustraite à la capacité d'infiltration initiale (f0) 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 (fc). La pluie efficace (qui « ruisselle » au sens hortonien, i-f) doit remplir le volume que représente la pluie d'imbibition (si) avant de participer activement à l'écoulement de crue. L'écoulement hypodermique (fv) est généré par la

vidange du stockage hortonien (H) et participe à « retardement » aux écoulements générateurs de la crue. A la fin de l'événement, le volume d'imbibition (si) 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 si) sont susceptibles d'être calés par bassin versant. Les deux autres paramètres du module n'ont que 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'événement du 3 octobre 1995 (dont le bassin versant est fortement karstique) montre qu'ALHTAÏR ne retranscrit pas le 1^{er} pic de crue mesuré.

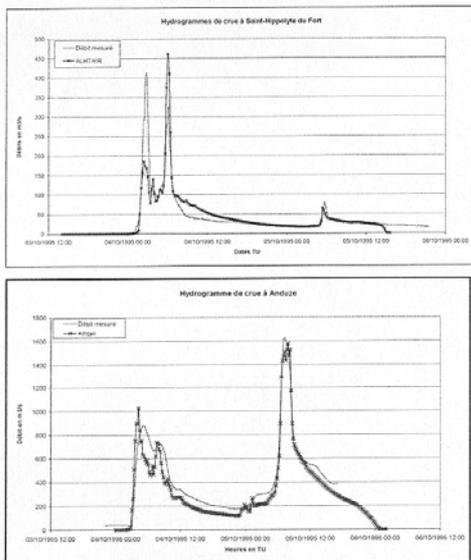


Figure 3 : hydrogrammes de crue de l'événement du 3 octobre 1995 à Anduze et à Saint-Hippolyte du Fort

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 régionalisé, ce qui permet un calage des paramètres du module de production par zones homogènes.

1.3. ALHTAÏR en mode "régionalisé"

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 3) schématise la problématique du projet.

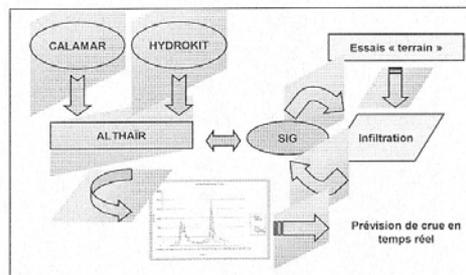


Figure 3 : élaboration d'une couche d'information sur la capacité d'infiltration du sol

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 régionalisé 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. Il s'agit du bassin versant du Gardon de Saint-Jean à Saumane et du 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 % à la station limnimétrique de la ville de Saumane. Le bassin versant du Gardon de Mialet, dont l'exutoire est choisi à la station limnimétrique 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 satellitaires 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.

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 (57,58% de la superficie), la partie centrale est granitique (14,18%), le Sud et l'Est concentrent les formations calcaires (7.2%), dolomitiques (9%), marneuses (environ 3%) et argilo-gréseuses (environ 3.5%). 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.

2.2. 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 : description du type de sol, profondeur (minimum, moyenne, maximum), 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 ont permis de dégager des zones homogènes sur lesquelles des mesures expérimentales sont conduites de manière à les caractériser d'un 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 des dispositifs en laboratoire, des dispositifs de mesure "in-situ" à l'échelle ponctuelle (dont la surface de mesure n'excède pas 1 m²) et 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).

3.1. Mesures "in-situ"

Si les mesures "in-situ" à l'échelle parcellaire (≥ 1 m²) 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 règlette (type Müntz) est utilisé car il permet un nombre de mesures conséquentes (4 à 5 sites par jour, 42 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 40cm) et devra être complété par des mesures avec simulateurs 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.

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 un interface majeur 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.

Quatre classes de formations superficielles basées sur le regroupement des différentes formations géologiques présentent des infiltrations moyennes de même ordre de grandeur. Pour chaque classe, une moyenne d'infiltration est calculée et un code de perméabilité leur

est affectée (perméabilité décroissante de 1 à 4) (Tableau 1).

Formations superficielles (Nombres de sites utilisés)	Infiltration moyenne (mm/s-mm/h)	Code de perméabilité
Altérites sur granite, éboulis (6)	0,418 (1 505 mm/h)	1
Sols sur dolomies et calcaires (8)	0,253 (912 mm/h)	2
Sols sur schistes et argiles – grès (10)	0,168 (607 mm/h)	3
Alluvions sur terrasses, sols sur marnes, calcaires marneux – argileux (7)	0,067 (243 mm/h)	4

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

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

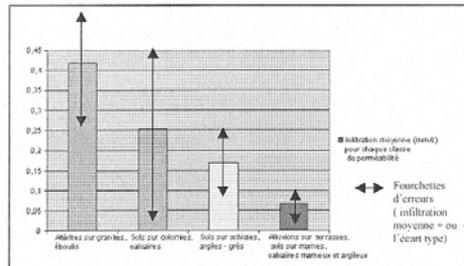


Figure 4 : visualisation des écarts types de l'infiltration pour les 4 classes de perméabilité

L'écart type, important au niveau de la formation superficielle « sols sur dolomies et calcaires », 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 5) 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.

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.

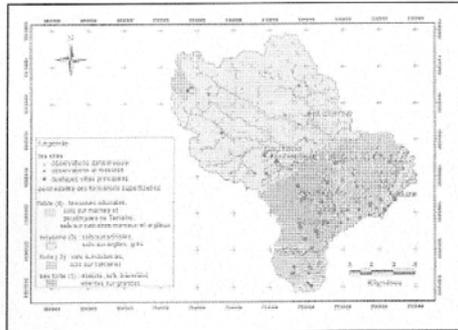


Figure 5 : cartographie de la perméabilité

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

4. Premiers tests en mode régionalisé

Deux évènements pluvieux ont été sélectionnés pour réaliser ces premières simulations en mode régionalisé: 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 (f0) 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 (f0) doit être importante de manière à limiter le ruissellement. La structure des tests (15 essais de jeux de paramètres ont été testés) et le test dont les résultats sont présentés dans le chapitre suivant sont reportés dans le tableau ci-dessous (Tableau 2).

Paramètres d'ALHTAÏR	f0	fv	fc	k	α	si
En mode Bassin Versant	90	15	4	0.575	3	0
En mode "Régionalisé"						
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	70	15	4	0.575	3	0

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

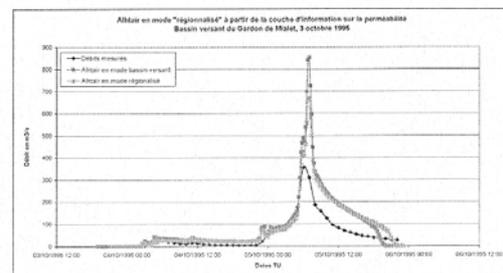
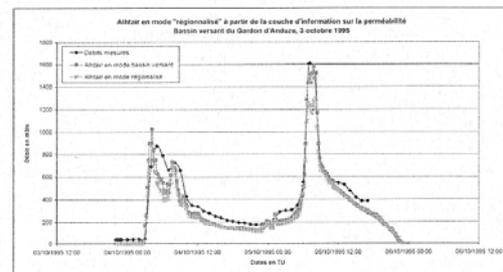
En l'état actuel d'avancement des travaux, il n'est pas possible d'établir un rapport direct entre les mesures expérimentales et les paramètres ayant une représentation physique du module de production d'ALHTAÏR. De plus, bien qu'inspiré de la loi de Horton, ce modèle se classe dans la catégorie des 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 le bassin versant du Gardon d'Anduze, mais aussi sur deux sous bassins versants équipés de station limnimétrique : Le bassin versant du Gardon de Saint-Jean à Saumane (100 km²) et le bassin versant du Gardon de Mialet à Mialet (200 km²).

4.2. Résultats

Les résultats ci-dessous présentent les simulations ALHTAÏR en mode régionalisé, 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 évènements étudiés : le 3 octobre 1995 et le 28 septembre 2000.

Les résultats concernant le 3 octobre 1995 sont présentés ci-dessous (Figure 6).



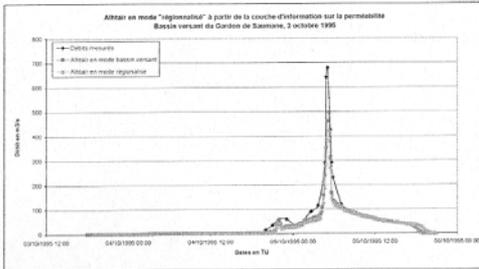


Figure 6 : simulations de la crue du 3 octobre 1995 sur les bassins versants d'Anduze de Mialet et de Saumane

Les résultats sont contrastés sur ces trois bassins versants. Sur Anduze, ALHTAÏR en mode régionalisé 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 régionalisé 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 régionalisé, 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 7).

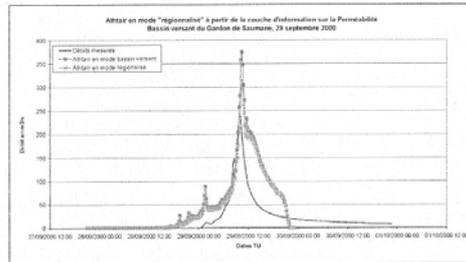
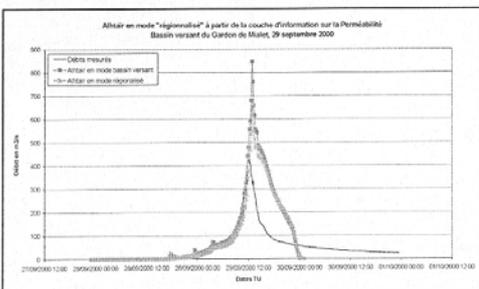
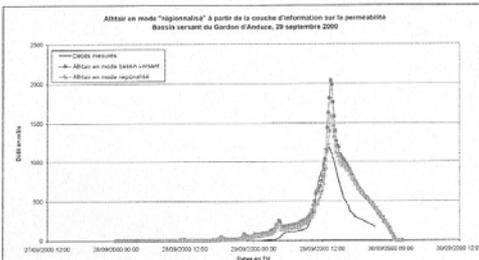


Figure 7 : simulations de la crue du 28 septembre 2000 sur les bassins versants d'Anduze de Mialet et de Saumane

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 régionalisé 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.

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 régionalisé sous estime 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 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 événements 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 événements antérieurs à 2000. Un processus d'expertise doit être donc mis en place pour pouvoir tester sur ces événements ALHTAÏR en mode régionalisé.

Enfin, l'ensemble des hydrogrammes présentés (Figure 6 & Figure 7) ne doivent pas être analysés uniquement en terme de production. Il est nécessaire de s'attacher aussi à la synchronisation de ces pics. Pour l'événement du 28 septembre 2000, les pics de crues ont de 7 minutes (Anduze) à 36 minutes (Mialet) de retard et pour l'événement du 3 octobre 1995 le retard se situe entre 12 minutes (Saumane) et 1 heure (Mialet). Une manière de travailler en mode régionalisé 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. Pour ce faire, une nouvelle campagne de mesures à l'aide de l'infiltromètre double anneau a été menée durant l'été 2003. L'exploitation de ces nouvelles mesures est en cours, elle devrait permettre de mieux délimiter les 4 classes de formations superficielles et notamment celle qui comprend les « sols sur dolomies et calcaires » (Figure 4). A cette occasion une nouvelle cartographie de la perméabilité sera produite.

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 régionalisé

L'analyse des premiers résultats montrent la nécessité de tester ALHTAÏR en mode régionalisé sur un panel d'événements pluvieux plus importants que les deux événements choisis pour ces premiers essais. Un ensemble de 19 événements depuis 1995 ont été sélectionnés 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 événement 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 régionalisé que se 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

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., Payrastré 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.

Rhèa, (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.

Annexe 5

Implémentation de l'onde cinématique dans STREAM

Master's Thesis
1st Intermediate Report
20/02/2004

**Runoff Modelling with STREAM
using Inputs from Field Observations and Remote Sensing**

Afstørningsmodellering i Boyne oplandet vha. STREAM
med inputdata fra feltobservationer og remote sensing observationer

Student : David Thauré
Student number: s021609
Supervisor at BRGM (France): Olivier Cerdan
Supervisor at DTU: Dan Rosbjerg
Co-Supervisor at DTU: Torben Sonnenborg

Starting date: 02/02/2004
Ending date: 30/06/2004 (officially 30/07/2004)
Credit Points: 30



Context

A team of French researchers has been working on the development of a specific computer application called STREAM in order to automate their findings related to runoff and erosion processes on agricultural fields. STREAM stands for Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management and is an expert-based distributed model. This application has been developed based on the ArcView software and allows the determination of (among others):

The infiltration rate for each parcel

The overall runoff volumes and pathways through the considered area

This model has been constructed to provide an efficient forecasting tool to be easily applied to most of agricultural lands without requiring detailed data. The input data needed to run the model includes topography (through a Digital Elevation Model), vegetation coverage, soil roughness, sealing state, land use (crop) and map of soil surfaces impacted by agricultural practices (tillage direction).

My task

So far the model is unable to display the hydrograph at the outlet of the study area since it takes the rain event as a whole without taking into account its temporal variability. The first goal of my work is to add a specific functionality to the existing application in order to model the temporal variability.

If this first step is achieved within a reasonable amount of time I will be invited to test and validate the model against well-documented study.

The first stage consists of a large literature survey to gain an overview of the state-of-the-art in the kinematic wave modelling as well as to pinpoint existing models (especially those based on GIS software such as ArcView) and numerical codes. This strenuous literature survey is thought to run over at least the first two months of my internship.

Parallel to this survey an approach to ArcView and STREAM is performed through tutorials and User's Manuals reading. When those tools are properly managed a deeper insight into the underlying numerical procedures is performed.

After the first results given by the literature survey the conceptual frame of the add-in module concerning the kinematic wave is formulated. Then the code is written, added to the existing STREAM structure and tested.

Preliminary time schedule

Week	Date	Task	Comments
1	02/02/2004	Literature survey Arcview tutorial STREAM approach	
2	09/02/2004	Literature survey VBA exploration STREAM insight	
3	16/02/2004	Literature survey ArcView code insight Models survey	1 st intermediate report (selection of references)
4	23/02/2004	Literature survey Conceptual formulation of the Kinematic Wave module	
5	01/03/2004	Literature survey Code writing?	
6	08/03/2004	Literature survey Model testing?	
7	15/03/2004		Meeting with STREAM developers on March 16 th to present what I have done so far and discuss possible problems or extensions.
11	12/04/2004	Basic code finished	
16	17/05/2004	Simulation with field data	
19	07/06/2004	Writing	
23	05/07/2004		

Selection of references

Ambroise B. (1999) - La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant, Processus, Facteurs, Modèles. Editions HGA, Bucarest.

Cerdan O., Le Bissonnais Y., Couturier A., Saby N. (2002) - Modelling interrill erosion in small cultivated catchments. Hydrol. Process.

Cerdan O., Le Bissonnais Y., Souchère V., Martin P., Lecomte V. (2002) - Sediment concentration in interrill flow : interactions between soil surface conditions, vegetation and rainfall. Earth Surf. Process. Landforms 27, p. 193-205.

Cerdan O., Souchère V., Lecomte V., Couturier A., Le Bissonnais Y. (2001) - Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model : Seal and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management. Catena 46, p. 189-205.

Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W. Applied Hydrology. McGraw-Hill, 1998. ISBN : 0070108102

Razavi A.H. ArcGIS developer's guide for VBA. Delmar Learning, 2002. ISBN : 0-7668-6325-5

Singh V.P. Kinematic Wave Modeling in Water Resources, Surface Water Hydrology. John Wiley, 1996. ISBN : 0-471-10945-2.

Souchère V., King D., Daroussin J., Papy F., Capillon A. (1998) - Effects of tillage on runoff directions: consequences on runoff contributing area within agricultural catchments. J. Hydrol. 206, p. 256-267.

Wallach R., Grigorin G., Rivlin J. (1997) - The errors in surface runoff prediction by neglecting the relationship between infiltration rate and overland flow depth. J. Hydrol. 200, p. 243-259.



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