

## CONTRIBUTION À LA SPATIALISATION DU MODÈLE OPÉRATIONNEL DE PRÉVISION DES CRUES ÉCLAIR ALHTAÏR

Pierre-Alain AYRAL <sup>(1)</sup>, Sophie SAUVAGNARGUES-LESAGE <sup>(1)</sup> et François BRESSAND <sup>(2)</sup>

(1) : École des Mines d'Alès, Centre de Recherche LGEI, 6 avenue de Clavières, 30319 ALÈS.

Mél. : pierre-alain.ayral@ema.fr .

(2) : Direction Départementale de l'Équipement du Gard, Service d'Annonce des Crues, 89 rue Weber, 30907 NÎMES.

**RÉSUMÉ** : Le modèle de prévision des crues ALHTAÏR est développé depuis bientôt cinq 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 dans la zone sous surveillance du SAC-30. Deux versions de ce modèle de prévision de crue existent. La première version, ALHTAÏR en mode "bassin versant", permet un calage des paramètres du modèle par bassin versant étudié. La seconde, ALHTAÏR en mode "spatialisé", permet de réaliser un calage en fonction de caractéristiques telles que la capacité d'infiltration des sols. Cet article fait état de la contribution à l'établissement de cette version du modèle de prévision de crue. Une double approche, expérimentale et spatiale, a été mise en place pour entreprendre cette démarche. Une cartographie de la perméabilité des sols sur le bassin versant test du Gardon d'Anduze a été réalisée. Les tests effectués avec la version spatialisée d'ALHTAÏR montrent l'intérêt d'une telle démarche, sous réserve d'affiner la méthodologie mise en place pour réaliser cette spatialisation et la calibration du modèle. Ces compléments de recherche sont indispensables pour envisager d'étendre l'utilisation d'ALHTAÏR en mode spatialisé à l'ensemble de la zone de compétence du SAC-30 et plus spécifiquement aux bassins versants non jaugés.

**MOTS-CLÉS** : prévision de crue, crues éclair, capacité d'infiltration du sol, service de prévision des crues

**ABSTRACT** : The flood forecasting model ALHTAÏR is developed for five years by the flood-warning service: Service d'Annonce des Crues du Gard (SAC-30). This model, with an operational orientation, aims at a flood hydrograph for each location of the rivers for the supervision area of the SAC-30, in a real time processing. Two versions of this flood forecasting model exist. The first one, ALHTAÏR in "watershed" mode, allows to affect the model parameters by catchment area. The second version, ALHTAÏR in "spatialised" mode, allows to realize a model calibration according to the catchment area characteristics such as the infiltration capacity. This paper proposes the contribution to the establishment of flash floods forecasting model version. Experimental and spatial analyses have been proposed. Cartography of the permeability on Gardon d'Anduze watershed was realized. Tests of this cartography with ALHTAÏR in "spatialised" mode show the interest of this approach provided that the methodology is refined to realize the cartography of the permeability and the model calibration. Further researches are required to consider an expansion of the use of ALHTAÏR in "spatialised" mode to the whole area under supervision of the SAC-30 and more especially to the non-gauged watersheds.

**KEY-WORDS** : flash floods, forecasting model, infiltration capacity, flood warning service.

### I - INTRODUCTION

Les crues rapides ou "éclair" ont provoqué des catastrophes récurrentes, durant la dernière décennie, sur l'arc méditerranéen français. Les inondations catastrophiques de Nîmes (octobre 1988), de Vaison-La-Romaine (septembre 1992),

de l'Aude (novembre 1999) et du Gard (septembre 2002) viennent en témoigner.

Ces crues sont engendrées par des précipitations intenses qui induisent :

- des débits considérables : des estimations de débits spécifiques dépassant les 30 m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup> ont été réalisées suite aux inondations des 8 et 9

septembre 2002 dans le Gard (É. GAUME *et al.*, 2003) ;

- des temps de concentration très rapides : les rivières du bassin versant du Gardon d'Anduze (département du Gard), par exemple, présentent des temps de concentration variant de 3 à 8 heures (R. MOUSSA, 1991).

C'est pour répondre à cette situation, que le Service d'Annonce des Crues du Gard (SAC-30) a initié, en 1999, le développement du système de prévision des crues ALHTAÏR (ALarme Hydrologique Territoriale Automatisée par Indicateur de Risque). Ce système de prévision des crues repose actuellement sur trois outils : (1) CALAMAR<sup>®</sup> qui permet d'avoir une mesure, grâce à l'imagerie radar, de la pluie qui tombe sur chaque km<sup>2</sup> de la zone sous surveillance ; (2) HYDROKIT<sup>®</sup> qui est un logiciel destiné à caractériser les bassins versants, et qui génère automatiquement les temps de transfert de l'eau ruisselant sur tous les bassins versants du département ; (3) un modèle de prévision pluie-débit distribué, qui intègre un module de production hortonien permettant, en tout point de la zone d'étude, de déterminer la pluie efficace, c'est-à-dire celle qui participe directement à la crue, et un module de propagation qui transfère le ruissellement à l'exutoire selon les conditions déterminées par HYDROKIT<sup>®</sup>.

Ce système fonctionne actuellement dans des conditions opérationnelles au SAC-30. Le retour d'expérience sur ce système a montré qu'avec un même calage de la fonction de production, il n'est pas possible de produire un hydrogramme simulé acceptable pour l'ensemble des bassins versants sous surveillance (F. BRESSAND, 2002). Deux possibilités s'offraient alors au SAC-30 en terme de développement :

- réaliser un calage spécifique de la fonction de production par bassin versant ;
- entreprendre la régionalisation des paramètres du module de production en fonction de l'hétérogénéité des bassins versants à surveiller.

Le choix s'est porté sur la démarche de régionalisation (F. BRESSAND, 2002), dans la mesure où, à terme, l'objectif d'ALHTAÏR est de rendre compte de l'évolution du débit de crue à l'exutoire de bassins versants non jaugés.

La problématique du travail de recherche est d'entreprendre la spatialisé de ce système de prévision des crues. Cet article fait état, de

manière synthétique, de ces recherches qui ont été menées, dans le cadre d'une thèse de doctorat, au Centre LGEI de l'École des Mines d'Alès (P.A. AYRAL, 2005).

## II – ÉTAT DES LIEUX ET MÉTHODOLOGIES

Le système de prévision des crues ALHTAÏR a pour objectif la prévision à court terme d'un hydrogramme de crue pour tout point du réseau hydrographique de la zone surveillée par le Service d'Annonce des Crues du Gard. Ce système dispose en outre d'un mode en temps différé, ce qui permet une analyse *a posteriori* des événements enregistrés en temps réel, et donc la vérification des calages de ce modèle pluie-débit.

### 1 ) Les outils du système ALHTAÏR

#### a . Imagerie radar et logiciel CALAMAR<sup>®</sup>

La donnée de pluie nécessaire au système de prévision est produite par le logiciel CALAMAR<sup>®</sup> développé par la société Rhéa<sup>®</sup>. Ce logiciel permet d'alimenter le module de production à partir d'une image radar calibrée et advectée. Cette image propose la valeur de l'intensité des précipitations pour chaque pixel de la zone d'étude (1 km<sup>2</sup>), avec un pas de temps de cinq minutes.

La zone sous surveillance du SAC-30 est divisée en cinq entités par CALAMAR<sup>®</sup>. Elles correspondent à la partie amont des bassins versants des Gardons et de la Cèze, à la partie aval de ces mêmes bassins versants, au bassin versant du Vidourle, au bassin du Vistre, et enfin aux Cadreaux de la ville de Nîmes.

L'image radar est calibrée, à partir des mesures pluviographiques du réseau au sol du SAC-30, à l'intérieur de chacune des zones présentées précédemment. Depuis 1994, date où le SAC-30 a commencé à être alimenté en temps réel avec les images radar traitées par CALAMAR<sup>®</sup>, la méthode de calcul du coefficient de calibration ( $F_C$ ) de l'image radar a évolué. Trois phases se sont ainsi succédées :

- de 1994 à 2000, le coefficient  $F_C$  est imposé et différencié pour chacune des zones CALAMAR<sup>®</sup> ;
- de 2000 à 2002, le coefficient  $F_C$  est variable au pas de temps horaire, toujours en fonction des

- zones CALAMAR® ;
- depuis 2002, le coefficient  $F_C$  est réactualisé toutes les cinq minutes en fonction des trois dernières mesures pluviographiques (15 minutes), toujours en fonction des zones CALAMAR®.

#### b . La gestion des bassins versants avec HYDROKIT®

L'outil HYDROKIT®, développé par la société STRATEGIS®, permet l'exploitation du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la BD ALTI® de l'IGN®. Ainsi est-il possible :

- de connaître les caractéristiques physiques d'un bassin versant ;
- de calculer les temps de concentration ;
- de tracer les profils en long du talweg ;

- d'analyser le temps de transfert du bassin et de tracer les courbes d'isochrones.

#### c . Le module de production et de transfert

Le module de production d'ALHTAÏR (Fig. 1) est basé sur l'hypothèse d'un fonctionnement hortonien exprimant un refus d'infiltration des précipitations lorsque la vitesse d'infiltration est inférieure à l'intensité des précipitations (R.E. HORTON, 1933). Pour chaque pas de temps (5 minutes) et au droit de chacun des pixels de la zone sous surveillance, ce module détermine :

- l'infiltration instantanée ;
- le volume ruisselé ;
- l'écoulement hypodermique.

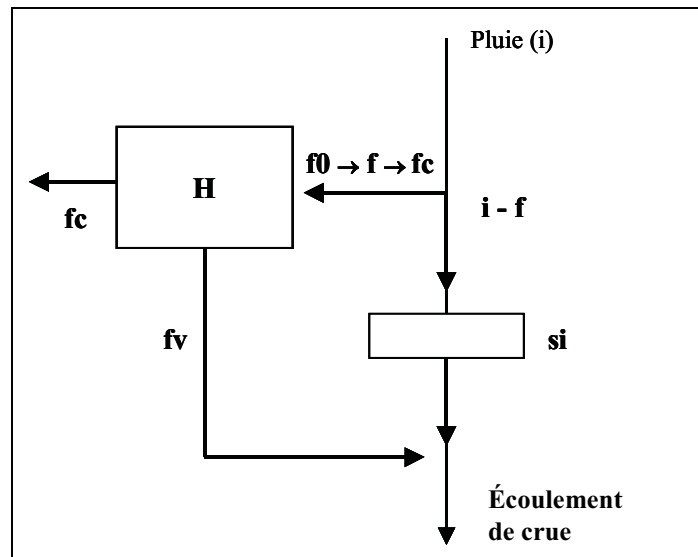


Figure 1 - Fonctionnement du module de production d'ALHTAÏR.

La pluie brute ( $i$ ) est diminuée de la vitesse d'infiltration. La pluie efficace (qui "ruisselle" au sens hortonien) doit remplir le volume que représente la pluie d'imbibition ( $si$ ) avant de participer activement à l'écoulement de crue. Au cours de l'événement, l'infiltration varie de la capacité d'infiltration initiale ( $f_0$ ) jusqu'à tendre vers l'infiltration profonde ( $f_c$ ). L'écoulement hypodermique ( $f_v$ ) se génère par la vidange du stockage hortonien ( $H$ ) et participe à "retardement" aux écoulements générateurs de la crue. À la fin de l'événement, le volume d'imbibition ( $si$ ) se vide par l'intermédiaire du stockage hortonien. Dans la présente étude, le fonctionnement du réservoir d'imbibition, qui représente une évolution méthodologique postérieure au

début des travaux, n'a pas été pris en compte. Sa valeur est donc fixée à 0.

Le volume total ruisselé est déterminé pour chacun des pixels de la zone de calcul, puis est propagé à l'exutoire du bassin versant sous surveillance.

C'est une loi de transfert "géomorphologique" qui permet de déterminer la vitesse de propagation selon l'équation suivante :

$$V = \left(1 + \frac{(p-1)}{9}\right) \times L^{0,25}$$

où  $V$  est la vitesse de propagation en m/s,  $p$  la pente en %, et  $L$  la distance hydraulique à l'exutoire en km.

Cette loi transfère le volume de ruissellement total jusqu'à l'exutoire sans tenir compte des relations de voisinage qui peuvent exister entre les pixels de la zone d'étude.

## 2 ) Un système qui fonctionne en temps réel au SAC-30

Le module de production d'ALHTAÏR compte donc six paramètres ( $f_0$ ,  $f_C$ ,  $f_V$ ,  $s_i$ ,  $k$  et  $\alpha$ ) dont deux d'ajustements ( $k$  et  $\alpha$ ). Ces derniers sont susceptibles d'être calés en fonction du

bassin versant dont il faut évaluer le débit à l'exutoire.

Le SAC-30 a réalisé un calage sur un bassin versant et a testé le jeu de paramètres sur huit bassins versants, le tout sur treize événements de fréquences plus que décennales (F. BRESSAND, 2002). L'optique qui a prévalu, était de réaliser un calage qui convienne au maximum de bassins versants. Trois paramètres du module de production étaient variables ( $f_0$ ,  $f_C$  et  $f_V$ ), les trois autres ( $k$ ,  $\alpha$  et  $s_i$ ) étaient fixés (Tab. I).

Tableau I - Calage des paramètres d'ALHTAÏR.

Les paramètres d'ALHTAÏR					
$f_0$ (mm/h)	$f_C$ (mm/h)	$f_V$ (mm/h)	$k$	$\alpha$	$s_i$ (mm)
90	4	15	0,575	3	0

La majorité des hydrogrammes simulés (70 %) sont bien reconstitués avec un même jeu de paramètres (F. BRESSAND, 2002). L'événement

du 3 au 5 octobre 1995 sur le bassin versant du Gardon d'Anduze en fournit un exemple (Fig. 2).

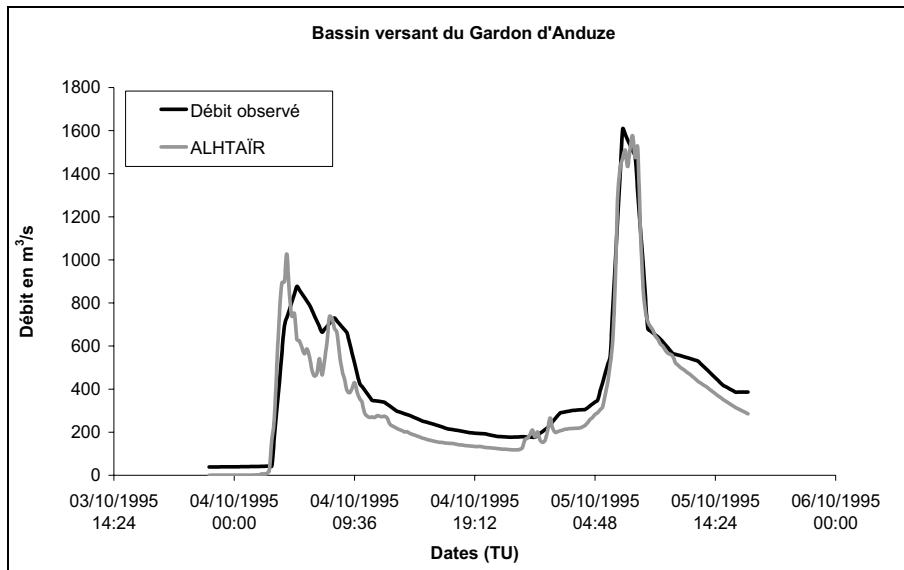


Figure 2 - Hydrogrammes observés et simulés avec ALHTAÏR pour l'événement du 3 octobre 1995 sur le bassin versant du Gardon d'Anduze.

Toutefois des incohérences importantes subsistent :

- pour un même événement sur plusieurs bassins versants différents (Fig. 2 et 3) ;

- entre un bassin versant et ses sous-bassins pour un même événement (Fig. 2 et 4) ;

- au sein d'un même bassin versant pour plusieurs événements (Fig. 2 et 5).

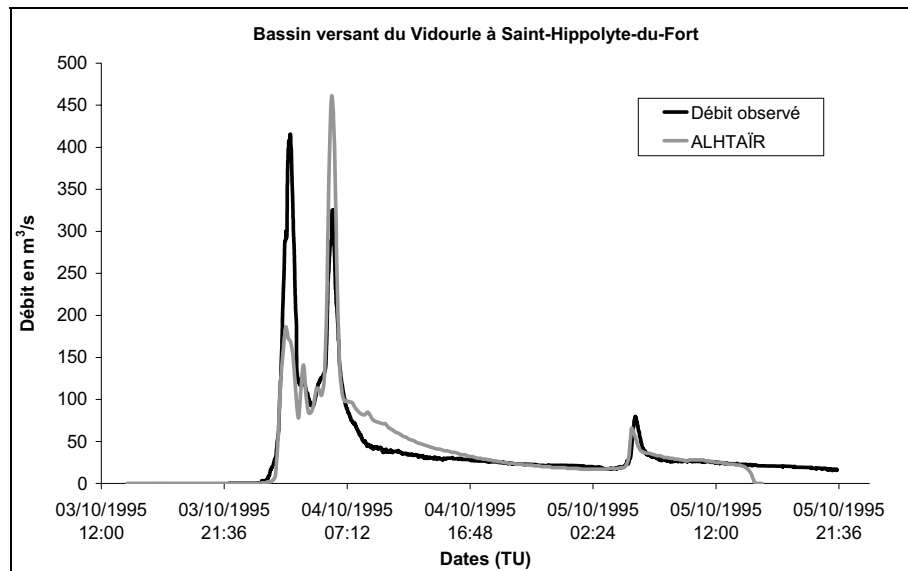


Figure 3 - Hydrogrammes observés et simulés avec ALHTAÏR pour l'événement du 3 octobre 1995 sur le bassin versant du Vidourle à Saint-Hippolyte-du-Fort.

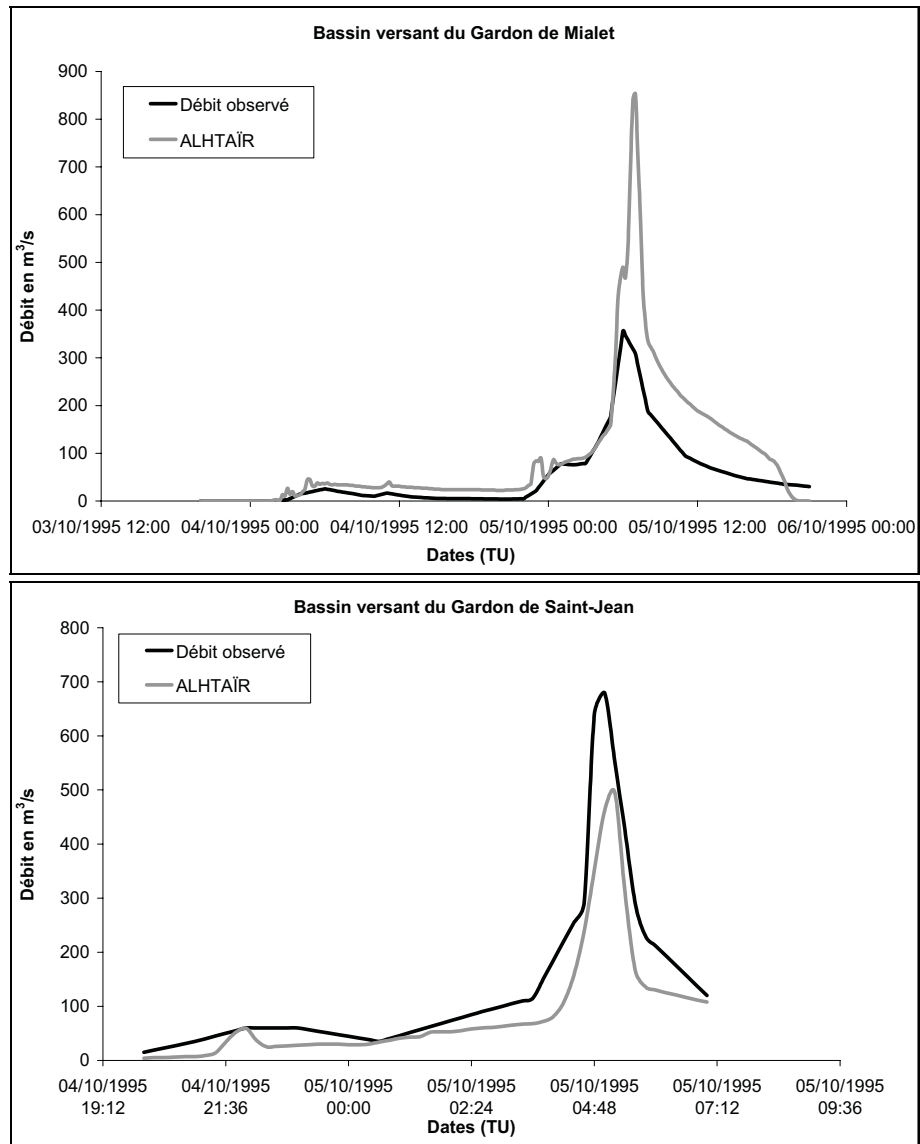


Figure 4 - Hydrogrammes observés et simulés avec ALHTAÏR pour l'événement du 3 octobre 1995 sur deux sous-bassins versants du Gardon d'Anduze.

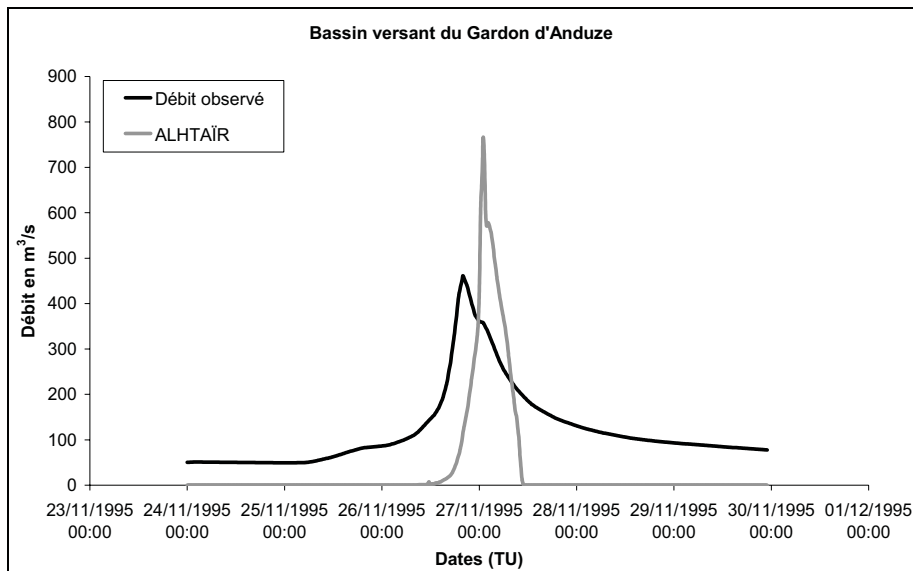


Figure 5 - Hydrographes observés et simulés avec ALHTAÏR pour l'événement du 27 novembre 1995 sur le bassin versant du Gardon d'Anduze.

Ces cas atypiques ont conduit le SAC-30 à développer une version spatialisée d'ALHTAÏR. L'objectif de cette version est de fixer les paramètres du modèle en fonction de la capacité d'infiltration des sols.

### 3 ) Vers la spatialisation d'ALHTAÏR

Une double démarche, expérimentale et spatiale, est proposée pour mener cette spatialisation (Fig. 6).

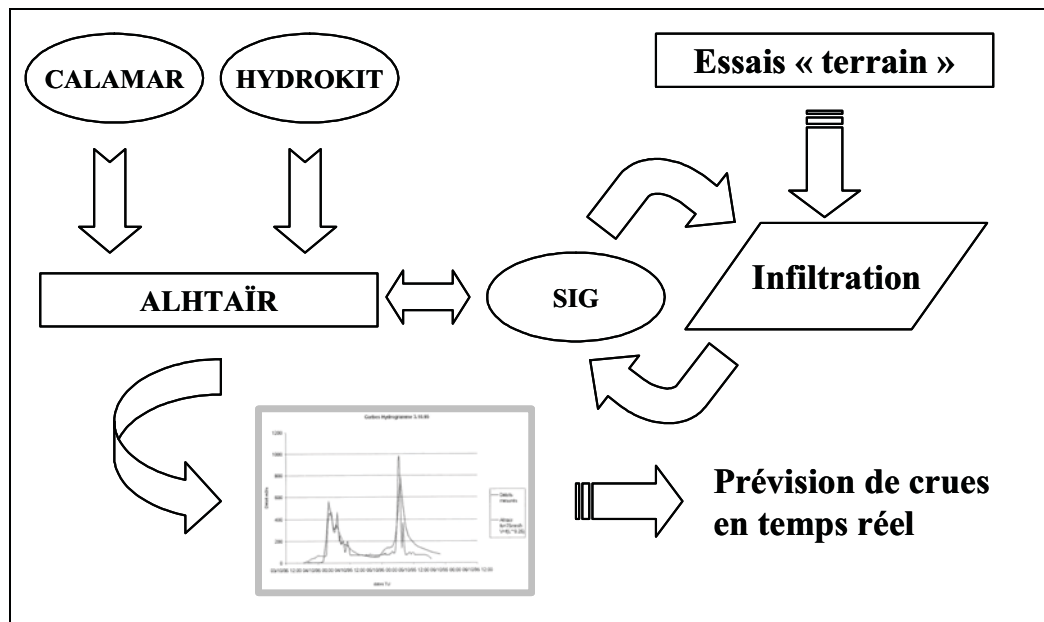


Figure 6 - Méthodologie pour la spatialisation d'ALHTAÏR.

La problématique du travail consiste en la discrétisation du territoire en fonction de la capacité d'infiltration des sols (paramètre essentiel du modèle) lors des épisodes pluvieux majeurs (événements entraînant une crue). Cette typologie est réalisée en tenant compte des propriétés des

sols (structure, rugosité, teneur en eau...), mais aussi de paramètres extérieurs à l'élément sol (comme l'occupation du sol ou la géologie) grâce à une démarche d'analyse spatiale appuyée sur des Systèmes d'Information Géographique (SIG). L'attribution de paramètres spécifiques à chaque

zone ainsi déterminée doit permettre au modèle ALHTAÏR de pondérer ses analyses de production.

#### a . Une approche expérimentale

Les mesures effectuées dans le cadre de cette étude devaient répondre à deux objectifs :

- quantifier l'infiltrabilité des sols sur les zones supposées "homogènes" préalablement identifiées par l'analyse spatiale et donc permettre de compléter la cartographie de ces zones ;
- apporter des éléments de compréhension de la formation des écoulements suivant une perspective hydrodynamique.

Pour atteindre le premier de ces objectifs, c'est l'infiltromètre double anneau qui a été retenu. Le travail a été conduit en collaboration avec le BRGM (J.F. DESPRATS *et al.*, 2003). La capacité d'infiltration de la partie la plus superficielle du sol a été déterminée par des essais très courts (quelques minutes – la vitesse horaire étant calculée en utilisant l'équation de la droite de régression linéaire), de manière à permettre la différenciation des formations superficielles du point de vue de la perméabilité.

La poursuite du deuxième objectif passe par l'observation des processus intervenant dans la genèse des écoulements. Un dispositif expérimental conçu par le SAC-30 a été adopté pour l'étude du ruissellement de surface et de l'écoulement hypodermique sous pluie "naturelle" et sous pluie simulée.

#### b . Une approche spatiale

Quatre étapes successives sont envisagées pour réaliser la spatialisation du module de production d'ALHTAÏR :

- le choix d'une zone pilote ;
- la réalisation d'une carte de la perméabilité des sols ;
- l'identification d'un jeu de paramètres du module de production en fonction de la cartographie précédemment proposée ;
- le test de la version "spatialisée" d'ALHTAÏR sur un panel d'événements pluie-débit.

### III - APPLICATION AU BASSIN VERSANT DU GARDON D'ANDUZE

surveillance du SAC-30 (Fig. 7) qui comprend trois bassins versants principaux ayant chacun une superficie supérieure à 1 000 km<sup>2</sup>, le Gardon, la Cèze et le Vidourle, une zone test a été déterminée pour entreprendre la spatialisation d'ALHTAÏR. Le choix s'est porté sur le bassin versant du Gardon d'Anduze.

#### 1 ) Le bassin versant du Gardon d'Anduze

Ce bassin versant répond à plusieurs exigences :

- il rentre dans la gamme des bassins versants pour lesquels ALHTAÏR a été conçu, à savoir des bassins versants de fortes pentes, où la relation "pluie-débit" reste prépondérante, et de surface maximum de l'ordre de 500 km<sup>2</sup> ;
- il comprend des sous-bassins versants instrumentés, ce qui dans un objectif de spatialisation représente un intérêt important ;
- il est soumis à nombreux enjeux, notamment à travers des activités touristiques très développées ;
- enfin, une parcelle expérimentale de simulation de pluie existait déjà en amont de ce bassin versant (parcelle expérimentale de Tourgueille).

#### a . Présentation de la zone pilote

La zone pilote retenue pour notre travail couvre le bassin versant du Gardon d'Anduze dont l'exutoire est fixé à la station hydrométrique implantée immédiatement en amont de la petite ville d'Anduze. Le bassin versant ainsi délimité draine une zone de 545 km<sup>2</sup>. Il comporte deux sous-bassins versants présentant également une station hydrométrique : le bassin versant du Gardon de Mialet, d'une superficie de 220 km<sup>2</sup> (station à environ deux kilomètres en amont du village de Mialet), et celui du Gardon de Saint-Jean, d'une superficie de 100 km<sup>2</sup> (station dans le village de Saumane).

Sur le bassin versant du Gardon d'Anduze, le gradient d'altitude est très important entre le point culminant (1060 m) et l'exutoire (130 m). La vigueur du relief se traduit par une pente moyenne des versants de l'ordre de 10 %. Cette caractéristique participe à expliquer le temps de réponse très court des cours d'eau aux précipitations. Les sous-bassins versants du Gardon de Mialet et du Gardon de Saint-Jean possèdent un relief encore plus accusé, avec respectivement des pentes moyennes des versants de 36 et 20 %.

Compte tenu de l'étendue de la zone sous

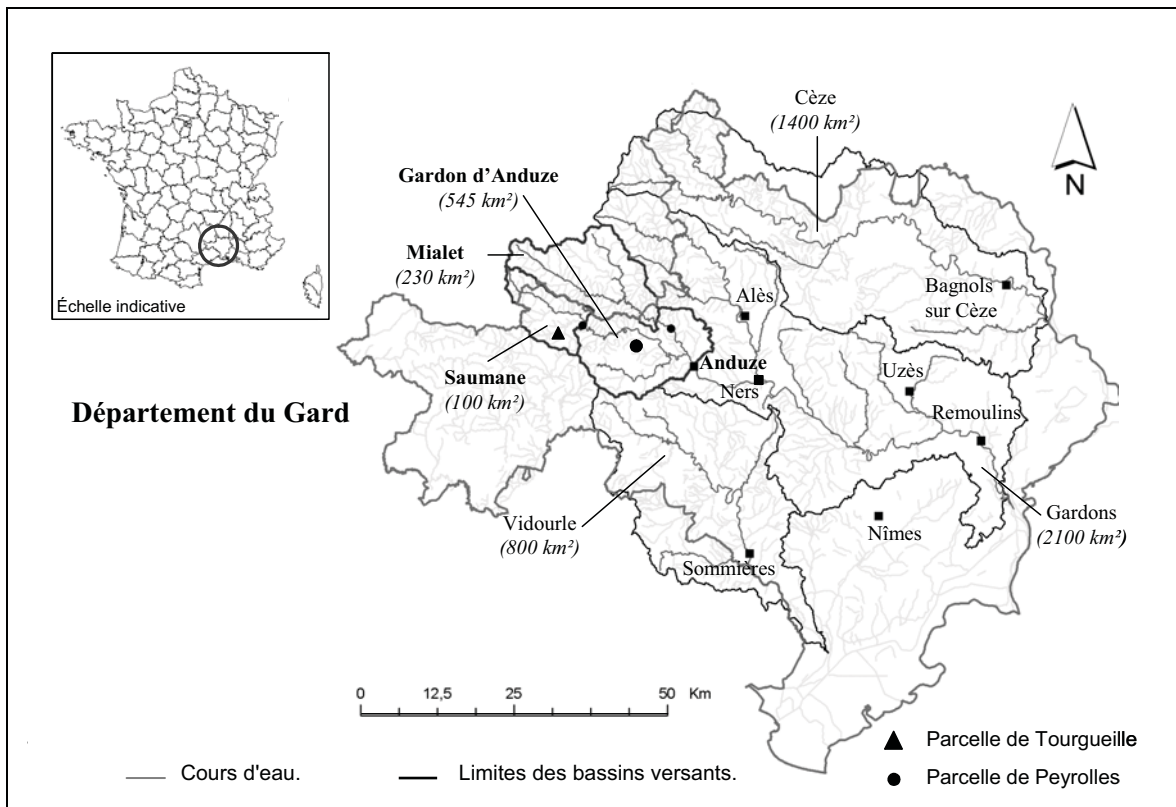


Figure 7 - Carte de localisation.

Le secteur d'étude est essentiellement constitué par des terrains métamorphiques : schistes, gneiss et micaschistes (Tab. II). La partie aval comprend une zone granitique et une zone de roches carbonatées du Jurassique (calcaires, dolomies et grès). Enfin, des

formations détritiques du Trias (marnes et argiles) et des alluvions du Quaternaire sont présentes. Il faut souligner le degré d'altération souvent poussé des roches métamorphiques et granitiques.

Tableau II - Répartition (en % de la surface totale) des formations géologiques sur le bassin versant du Gardon d'Anduze et ses deux sous-bassins.

Formations géologiques	Répartition en (%)		
	Gardon d'Anduze	Gardon de Mialet	Gardon de Saint-Jean
Alluvions récentes et anciennes	2	-	0,9
Marnes et argiles	3	1	1,1
Granites	14	3	2
Calcaires, dolomies et grès	17	1	2
Schistes, micaschistes, gneiss	64	95	94

Sources : d'après les cartes géologiques numériques au 1/50000<sup>ème</sup> et 1/80000<sup>ème</sup>, BRGM®.

Il est important de noter que les bassins versants du Gardon de Mialet et du Gardon de Saint-Jean ont une lithologie plus homogène que celle de l'ensemble du bassin versant du Gardon d'Anduze, puisque les roches métamorphiques

affleurent sur plus de 90 % de leur superficie.

Le bassin versant du Gardon d'Anduze est recouvert à plus de 80 % par des forêts. Les châtaigniers et les résineux sont plutôt localisés en haut de bassin, alors que les garrigues boisées



associées aux chênes verts se retrouvent plus en aval. Cette répartition s'organise selon un étagement altitudinal, doublé d'une opposition nette entre adrets et ubacs.

Les zones cultivées se concentrent à l'extrémité aval du bassin versant (vignes et vergers) et à proximité des cours d'eau (prairies). Dans les zones les plus élevées, des pelouses pastorales couvrent un espace réduit (3 % de la superficie totale).

Les sols, peu épais et discontinus, se répartissent principalement entre des rankers, des lithosols et des sols bruns. Les sols les plus profonds se trouvent en fond de vallée, ou dans des secteurs où se sont accumulées des colluvions.

### b . Une base de données "pluie-débit"

Les choix qui ont prévalu pour l'élaboration de cette base de données, découlent des contraintes opérationnelles du système de prévision des crues ALHTAÏR. Ainsi ce sont les

images radar calibrées et advectées en temps réel par le logiciel CALAMAR<sup>®</sup> qui ont été choisies. De même, ce sont les données limnimétriques enregistrées en temps réel au SAC-30 qui ont été collectées, sauf pour l'événement du 8 et 9 septembre 2002. Pour cet événement, les données de débit utilisées sont celles proposées par SIEE (SIEE, 2004). En effet, les données enregistrées en temps réel ne permettaient pas la reconstitution complète de l'hydrogramme de cette crue particulièrement violente.

Au total, vingt événements pluviométriques importants ont été suivis depuis 1994 (date du début de l'utilisation de l'image radar au SAC-30). Ils couvrent une gamme étendue de cumuls de précipitations. Pour le Gardon d'Anduze par exemple, six événements présentent des lames d'eau précipitées moyennes sur le bassin versant proches de 200 mm ou supérieures, sept des lames d'eau moyennes comprises entre 100 et 150 mm et cinq des lames d'eau moyennes inférieures à 100 mm. (Fig. 8).

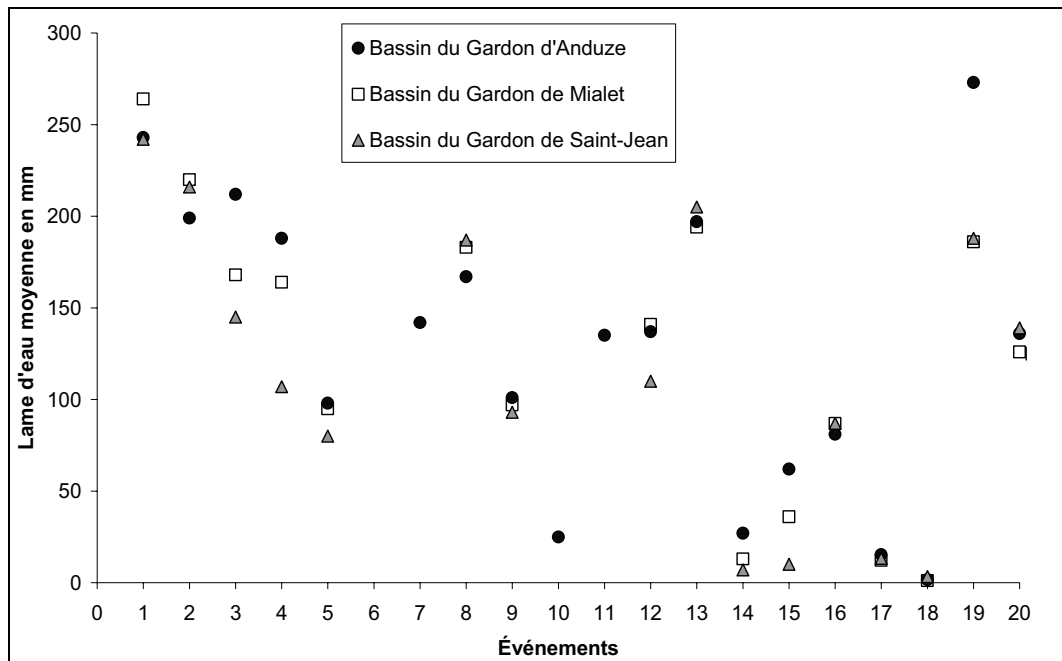


Figure 8 - Lames d'eau précipitées moyennes sur les bassins versants lors des événements retenus.

Pour la majorité des événements, les lames d'eau précipitées sont voisines sur les trois bassins versants étudiés. Des différences importantes se manifestent toutefois pour cinq événements (n° 3, 4, 12, 15 et 19).

Les débits correspondant aux vingt évé-

nements pluviométriques considérés, n'ont pas tous pu être collectés ou reconstitués. Les débits de pointe des événements pour lesquels les hydrogrammes sont complets, sont représentés sur la figure 9.

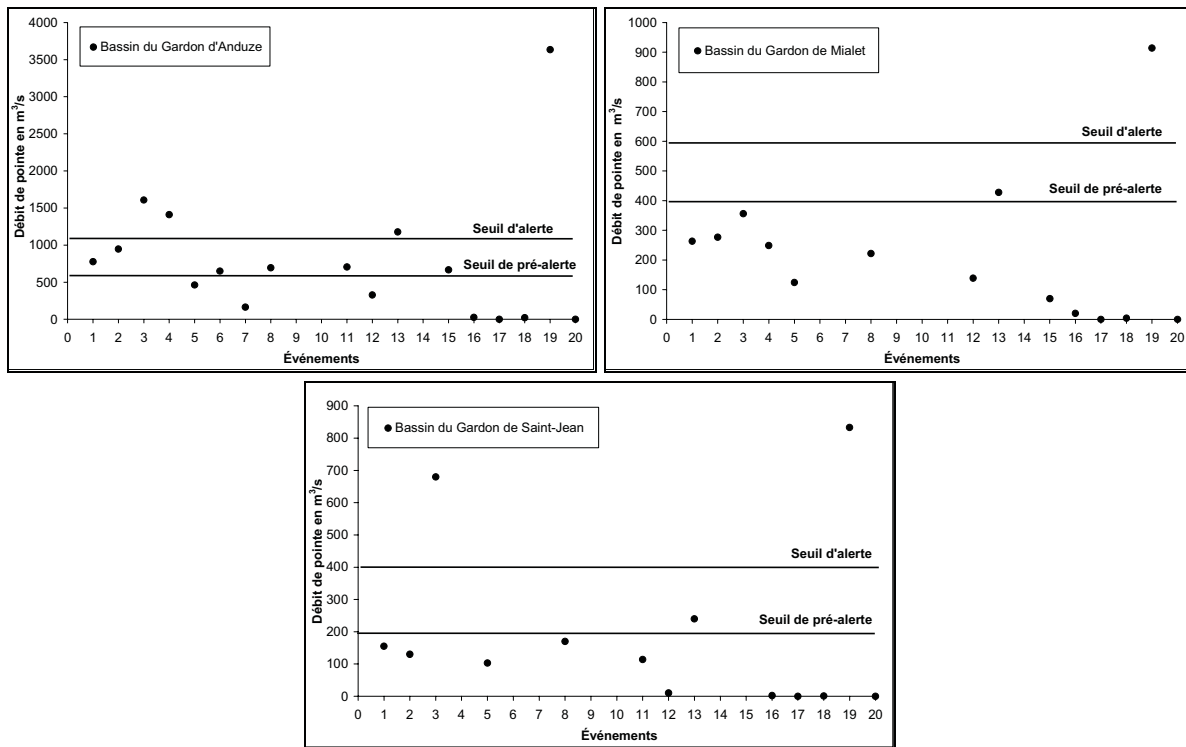


Figure 9 - Débits de pointe de crue des événements retenus.

La base de données pour le bassin versant du Gardon d'Anduze comprend les hydrogrammes de dix sept événements. Dix ont dépassé le seuil de pré-alerte, quatre ont dépassé le seuil d'alerte. Sur les sous-bassins versants du Gardon de Mialet et du Gardon de Saint-Jean, quatorze et treize hydrogrammes ont été observés respectivement, avec seulement deux événements ayant dépassé le seuil de pré-alerte, l'événement du 8 septembre 2002 étant le seul à avoir dépassé le niveau d'alerte.

### c. Un indice de fiabilité

De manière à prendre la mesure des incertitudes susceptibles de peser sur les données issues de l'imagerie radar et des enregistrements limnimétriques, un indice de fiabilité a été associé à chaque événement. La construction de ce dernier passe par la combinaison de deux indices de confiance établis respectivement sur les données radar et les données limnimétriques. Ces indices de confiance sont conçus de manière qualitative et conduisent à la répartition des données suivant trois degrés de confiance : "bon", "moyen" et "faible".

Pour établir un indice de confiance sur les données de pluie radar, deux types de test sont réalisés. Pour chacun des événements, une comparaison entre les cumuls radar et les cumuls

des pluviographes du réseau sol est effectuée au droit du pixel concerné. En fonction des données disponibles, cette comparaison est effectuée sur trois à huit pluviographes situés dans ou à la périphérie du bassin versant du Gardon d'Anduze. Parallèlement, une comparaison en terme d'intensité est effectuée entre l'image radar et les pluviographes du réseau sol. Cette comparaison est réalisée au pas de temps horaire sur trois à cinq pluviographes situés dans le bassin versant du Gardon d'Anduze.

En ce qui concerne les débits, c'est une approche plus spatiale qui est choisie. La méthode des débits spécifiques maximaux (A. MUSY et C. HIGY, 2004) consiste à représenter les débits spécifiques de plusieurs stations d'un même bassin versant en fonction des surfaces drainées. Ces débits spécifiques doivent varier de manière inversement proportionnelle à la surface drainée à partir de laquelle ils sont calculés. La figure 10 schématise cette méthode très simple d'utilisation.

Cette approche donne une représentation simultanée des débits des trois stations pour un même événement, ce qui permet une appréhension de la cohérence des données, en fonction de la position "hydrologiquement correcte" de ces débits spécifiques (A. MUSY et C. HIGY, 2004). Il ne s'agit pas, avec cette

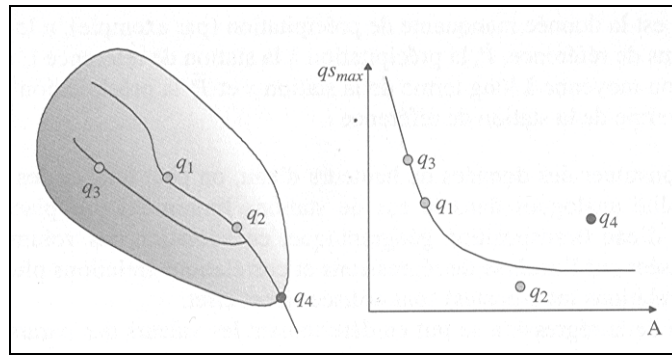


Figure 10 - Méthode des débits spécifiques maximaux (A. MUSY et C. HIGY, 2004).

méthode, de proposer des débits réévalués pour un événement, mais plutôt d'apprécier dans quelle mesure les débits des trois stations étudiées sont cohérents entre eux et si l'une des stations indique *a priori* un débit plutôt majorant ou minorant par rapport aux deux autres.

L'agrégation des indices de confiance, attribués aux images radar opérationnelles et aux enregistrements de débit, est assurée suivant la méthode proposée dans le tableau III.

Tableau III - Agrégation des indices de fiabilité  $(I + D) / 2$ .

		Débit observé (D)		
		Bon 100 %	Moyen 50 %	Faible 0 %
Image radar (I)	Bon 100 %	Très bon 100 % <sup>1</sup>	Bon 75 %	Moyen 50 %
	Moyen 50 %	Bon 75 %	Moyen 50 %	Faible 25 %
	Faible 0 %	Moyen 50 %	Faible 25 %	Très faible 0 %

Cinq classes d'indices de confiance sont donc proposées. À partir de cette analyse, trois événements ont été qualifiés de "très bons", quatre de "bons", deux de "moyens". Pour neuf événements, l'indice de fiabilité se révèle être "faible" ou "très faible" (P.A. AYRAL, 2005).

## 2) Les essais "in-situ" de simulation de pluie

Deux parcelles expérimentales pour la mesure des écoulements ont été exploitées (voir Fig. 7). La première, sur le site de Tourgueille, était en place au début des travaux, la seconde, sur la commune de Peyrolles, a été aménagée durant la thèse.

Ces deux parcelles expérimentales sont construites de manière identique. D'une surface de 10 m<sup>2</sup>, pour une longueur de 5 m, elles sont isolées des terrains alentours par des murets en

béton d'une largeur de 10 cm. Lors de l'installation de ces murets, il a été pris grand soin à ne pas modifier la structure superficielle, du sol. La profondeur des murets varie en fonction des parcelles, elle dépend de la position du substratum qui fixe la limite entre l'écoulement hypodermique et l'infiltration considérée comme profonde.

En aval de la parcelle expérimentale, un système de récupération du ruissellement de surface (Photo 1) et de l'écoulement hypodermique (Photo 2) est mis en place. Au niveau des premiers centimètres du sol, une géo-membrane est enfoncée horizontalement, de manière à collecter cet écoulement en évitant l'infiltration au niveau du muret. Une gouttière conduit les eaux vers un bidon. Un dispositif identique est utilisé pour l'écoulement hypodermique.



Photo 1 - La parcelle de Tourgueille.



Photo 2 - La parcelle de Peyrolles.

Ce type de parcelle peut recevoir un dispositif de simulation de pluie (Photos 1 et 2) ou fonctionner sous pluie naturelle. C'est pour parfaire la fonctionnalité sous pluie naturelle que le site de Peyrolles a été choisi, l'UMR 6012 "ESPACE" du CNRS assurant la surveillance de plusieurs bassins versants expérimentaux sur ce même site.

#### a . Parcelles expérimentales et protocoles

Situé à 1000 m d'altitude en amont de la vallée Borgne, le site de Tourgueille a été mis en

place en 2000 par le SAC-30. La végétation du site se compose d'une forêt mixte de conifères et de châtaigniers. Les arbres dominent une strate herbacée dense, composée essentiellement de graminées (Photo 1).

Les sols sont des rankers sur schistes altérés. Leur profondeur varie de 30 à 50 cm. Très riches en matière organique (teneur supérieure à 20 %), ils se caractérisent par une densité apparente très faible et par une porosité élevée (Tab. IV).

Tableau IV - Caractéristiques des sols de la parcelle de Tourgueille (A. MARCHANDISE, 2004 ; P.A. AYRAL, 2005).

Profondeur d'observation (en cm)	Densité apparente (en g/cm <sup>3</sup> )	Porosité (en %)
5	0,6 à 0,8	65
15	1 à 1,2	50

La parcelle de Tourgueille est située sur un versant en forte pente (16,7 ° – soit 30 %). Elle est isolée par des murets en béton, dont l'enfoncement dans le sol varie de 30 à 50 cm. Les écoulements sont mesurés :

- sur une tranche de 0 à 5 cm pour le ruissellement de surface ;
- sur une tranche de 5 à 50 cm pour l'écoulement hypodermique.

La parcelle de Peyrolles a été implantée dans le bassin versant du Valescure, au lieu dit "Cartaou" (351 m d'altitude). Elle est couverte par une forêt mixte composée de résineux et de

châtaigniers. La strate herbacée, composée de graminées et de fougères, est abondante. La pente du versant avoisine 19,3 ° (soit 35 %).

Les sols sont ici des rankers sur granite, dont les horizons A sont peu épais (30 cm), très caillouteux, riches en matière organique, de densité apparente faible et de porosité élevée.

Ces rankers surmontent une arène et des roches altérées. Lors de la mise en place de la parcelle, il n'a pas été possible d'atteindre le granite sain. La profondeur des murets varie de 1,10 m en amont à 1,50 m en aval du dispositif. Des arènes granitiques d'une profondeur

supérieure à 2 m ont été observées en plusieurs points du bassin versant du Valescure.

Sur le site de Peyrolles, les écoulements sont mesurés :

- sur une tranche de 0 à 8 cm pour le ruissellement de surface ;
- sur une tranche variant de 8 cm à 1,10 ou 1,50 m pour l'écoulement hypodermique.

Une journée d'essais de simulation de pluie, par exemple celle du 11 juillet 2002 (Tab. V), suit le protocole suivant :

- réalisation d'une première pluie dont l'intensité et la durée sont toujours identiques ;
- réalisation d'essais de simulations complémentaires de manière à préciser le fonctionnement hydrodynamique de la parcelle étudiée (dont l'intensité et la durée sont variables).

Tableau V : Essais de simulation de pluie sur la parcelle de Tourgueille le 11 juillet 2002.

Essai 1	Essai 2	Essai 3
200 mm/h pendant 1h 300 mm/h pendant 1h	200 mm/h pendant 30 min 300 mm/h pendant 30 min	50 mm/h pendant 40 min 100 mm/h pendant 10 min 150 mm/h pendant 10 min

À ce jour, dix journées d'essais au total ont été pratiquées sur les deux parcelles expérimentales de Tourgueille et de Peyrolles. Lors des simulations de pluie, l'intensité de la pluie simulée est réglée manuellement, les écoulements de surface et de sub-surface sont mesurés en volume en fonction du temps ; l'infiltration est déduite des mesures précédentes, par différence entre la lame d'eau précipitée et les écoulements mesurés. À titre d'exemple, la figure 11 propose les résultats de l'essai 1 du 5 juillet 2001 sur le site de Tourgueille et de l'essai 1 du 11 mai 2004 sur le site de Peyrolles.

### b . Résultats principaux

Les résultats obtenus diffèrent sensiblement d'une parcelle à l'autre (Fig. 12).

Les résultats de la parcelle expérimentale de Tourgueille se caractérisent par :

- des vitesses d'infiltration très élevées (100 mm/h) ;
- un écoulement hypodermique très fort (43 à 51 % de la pluie) ;
- un ruissellement de surface faible (4 à 11 % de la pluie).

La modestie du ruissellement de surface s'explique par la perméabilité des sols. En effet, ce ruissellement ne débute qu'une fois l'intensité de 150 mm/h atteinte. Cette valeur considérable, rarement atteinte sous pluies naturelles, et de toute façon jamais pendant très longtemps, ne

satisfait pas au modèle hortonien de la genèse des crues, qui pose comme condition de la production d'un ruissellement de surface des précipitations d'une intensité supérieure à la vitesse d'infiltration dans les sols.

L'importance du volume infiltré en profondeur (40 % de la pluie environ) est *a priori* surprenante, car les schistes sont généralement considérés comme imperméables (R. MOUSSA, 1991). Elle trouve son origine dans le degré d'altération de la partie superficielle des roches. Il faut également tenir compte du fait que la direction de la schistosité est à la fois très redressée et parallèle à la pente topographique, ce qui favorise la pénétration des eaux en profondeur et leur évacuation vers le bas du versant (F. MARTIN *et al.*, 2004).

L'apparition systématique d'un écoulement diffus sur le talus en aval de la parcelle durant les essais vient confirmer cette hypothèse. Toutefois les écoulements sur ce talus sont relativement peu abondants au regard des précipitations générées sur la parcelle. Ainsi, soit l'épaisseur des schistes altérés est supérieure à celle du talus, soit le sol est capable de stocker une partie très importante du volume d'eau.

Les coefficients d'écoulement hypodermique, évalués au pas de temps de la minute (volume de l'écoulement dans le sol rapporté à la lame d'eau précipitée), représentent jusqu'à 60 % de la pluie en fin de simulation (Fig. 13).

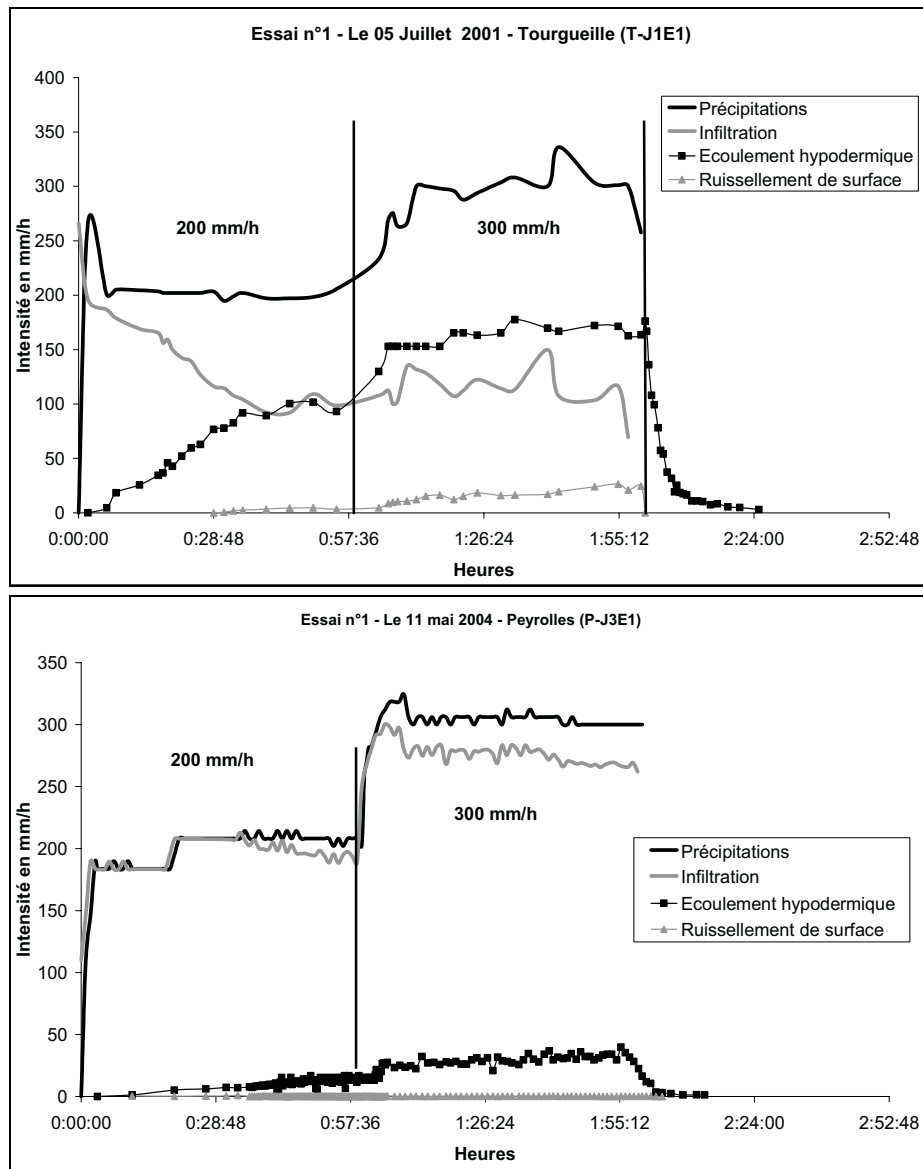


Figure 11 - Essais de simulation de pluie sur la parcelle de Tourgueille et de Peyrolles.

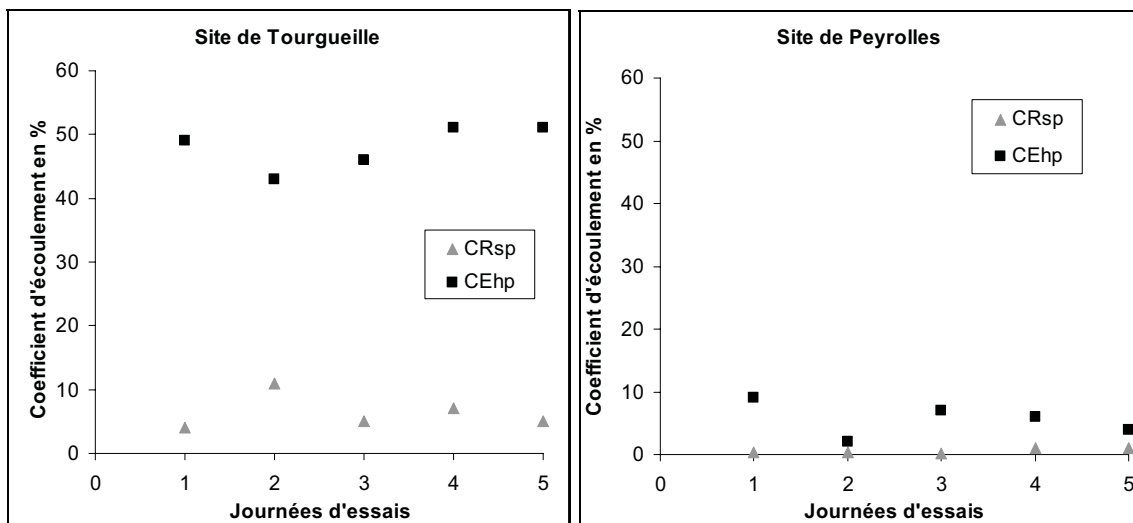


Figure 12 - Coefficients de ruissellement superficiel (CRsp) et d'écoulement hypodermique (CEhp) lors des premiers essais de chaque journée.

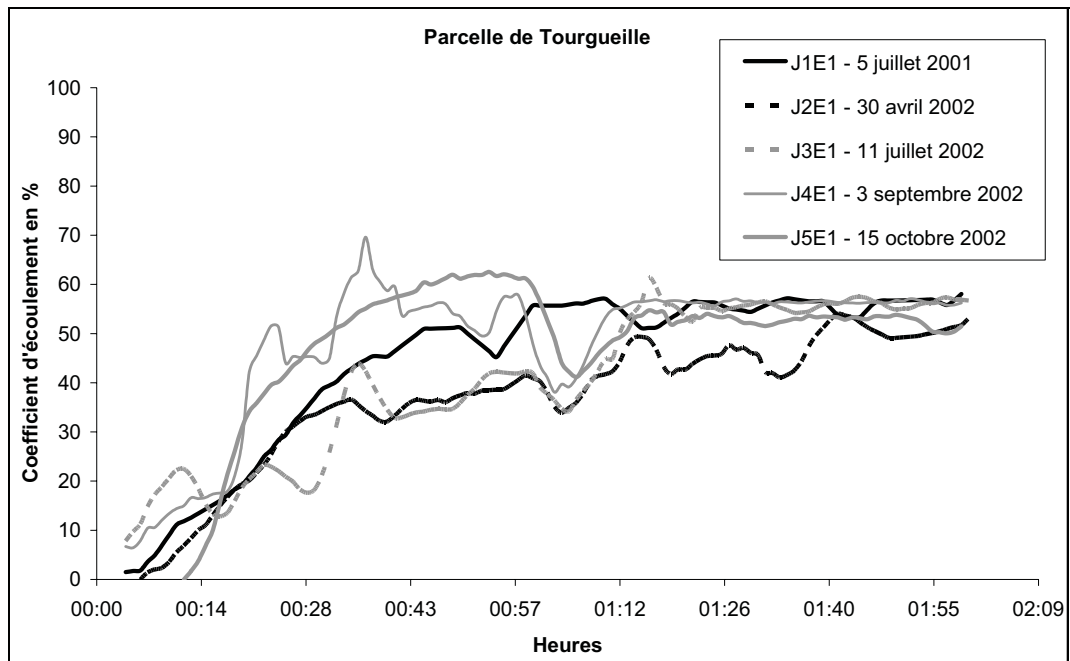


Figure 13 - Coefficients d'écoulement hypodermique.

Cet écoulement semble peu influencé par la teneur initiale en eau du sol, dans la mesure où les différentes valeurs mesurées lors de chaque journée d'essais restent du même ordre de grandeur. Le coefficient d'écoulement hypodermique paraît en outre indépendant de l'intensité de la pluie.

Les mesures sous pluies naturelles effectuées à Tourgueille, bien que peu nombreuses (sept épisodes), corroborent les résultats sous pluies simulées (P.A. AYRAL, 2005).

Des essais avec un simulateur de pluie de type ORSTOM ont en outre été réalisés sur deux placettes ( $1 \text{ m}^2$ ) voisines de la parcelle (A. MARCHANDISE, 2004 ; P.A. AYRAL, 2005). Le premier site expérimenté, sur une pente de  $8,5^\circ$  (soit 15 %), fournit des coefficients de ruissellement de 70 %, le second site sur une pente équivalente à celle de la parcelle ( $16,7^\circ - 30\%$ ), donne des résultats proches de ceux observés sur cette dernière (5% de ruissellement de surface). On peut s'interroger sur le rôle de la pente, qui pourrait favoriser la formation de l'écoulement hypodermique en régime saturé (A. MUSY et C. HIGY, 2004).

Sur la parcelle de Peyrolles, les écoulements de surface et hypodermiques mesurés lors des essais 1 représentent ensemble moins de 15 % de la pluie. Ces écoulements sont restés très faibles quelle que soit l'intensité des pluies simulées.

L'écoulement hypodermique représente en moyenne 10 % seulement de la pluie. Il faut

cependant relativiser ce résultat, le dispositif ne permettant la récupération des écoulements obliques que sur une tranche de matériaux épaisse de 1,50 m. Les roches altérées cohérentes, sur lesquelles vient buter le drainage *per descensum*, se trouvent en dessous de la limite de l'écoulement oblique intercepté par le dispositif. Dans ces conditions, la différence entre la pluie et les écoulements mesurés ne peut pas être considérée comme représentative de l'infiltration profonde.

Le ruissellement de surface est extrêmement faible, le plus souvent inférieur à 1 % de la pluie.

Les quatorze épisodes étudiés sous pluies naturelles fournissent des résultats différents de ceux obtenus sous pluies simulées. Des coefficients de ruissellement de surface de 18 % ont été observés, ainsi que des coefficients d'écoulement hypodermique atteignant jusqu'à 35 %. Cette dernière valeur, très élevée, peut s'expliquer par le fait que les eaux circulent sur l'ensemble du versant. Ainsi, sous pluie naturelle, la profondeur du muret amont (1,10 m) étant moindre que celle du muret aval (1,50 m), ce dernier peut bloquer des circulations d'eau assez profondes, favorisant ainsi l'engorgement des sols. Les données enregistrées par les pluviographes de l'UMR 6012 "ESPACE" n'ont pas encore été intégrées aux interprétations, mais elles n'ont jamais atteint les valeurs des pluies simulées, ni pour les volumes précipités, ni pour les intensités.

Lors des journées d'essais, des prélèvements de sol effectués à différentes profondeurs à proximité des parcelles ont permis d'évaluer la teneur en eau pondérale des sols avant la pluie. Des mesures de la teneur en eau volumique par prélèvement et des mesures TDR ont en outre été effectuées à proximité de la parcelle, en collaboration avec l'UMR Hydro-Sciences de Montpellier. Enfin, des mesures de la résistivité des sols ont été réalisées lors des dernières journées d'essais (A. MARCHANDISE, 2004). Toutefois, il semble que l'influence de la teneur en eau pourrait être plus sensible sur la parcelle de Peyrolles que sur celle de Tourgueille, au vu notamment des essais sous pluies naturelles et des résultats atypiques en rapport aux essais de simulation de pluies (P.A. AYRAL, 2005).

### 3 ) La spatialisation d'ALHTAÏR

La spatialisation du système de prévision

des crues éclair ALHTAÏR nécessite la régionalisation des paramètres de son module de production. Pour ce faire, ces paramètres doivent être déterminés en fonction de zones homogènes au point de vue de la capacité d'infiltration des sols. La première étape de la spatialisation consiste donc dans la cartographie de ce paramètre.

#### a . Cartographie de la capacité d'infiltration

Ce volet cartographique a été mené en collaboration avec le BRGM. Une première série de mesures effectuée sur le terrain à l'aide de l'infiltromètre double anneau, a permis de caractériser la perméabilité de la partie superficielle des sols en fonction de la lithologie (D. PINEL, 2002 ; J.F. DESPRATS *et al.*, 2003 ; P.A. AYRAL *et al.*, 2003). Cinquante essais ont été réalisés (Fig. 14). La figure 15 présente les valeurs de la capacité d'infiltration obtenues et les écarts types associés.

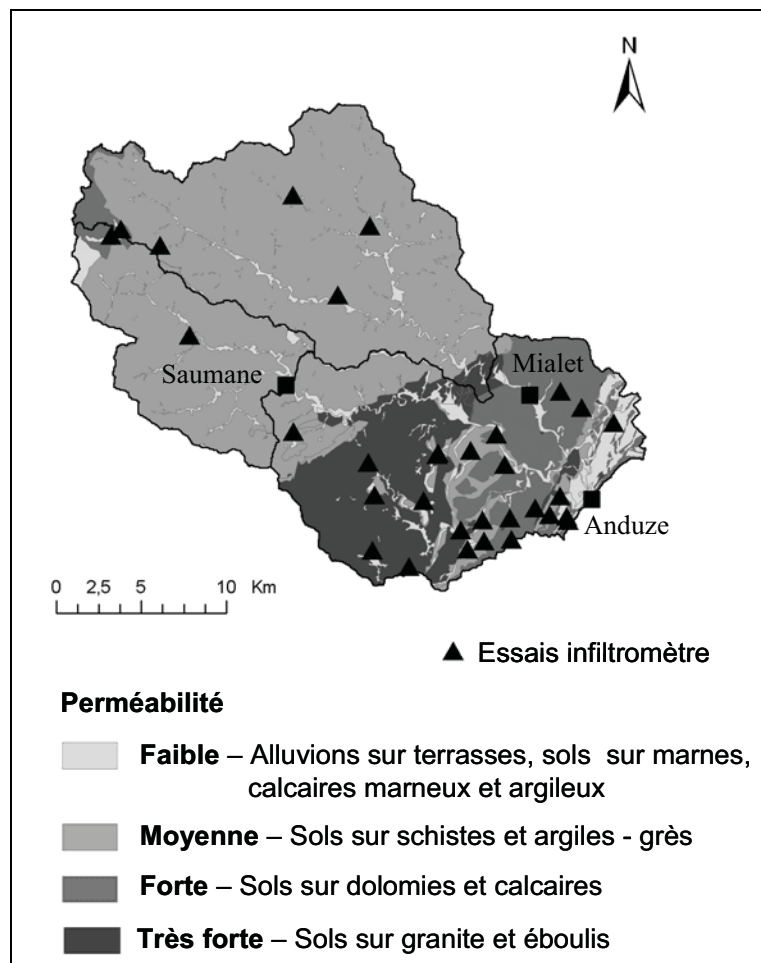


Figure 14 - Cartographie de la capacité d'infiltration des sols sur le bassin versant du Gardon d'Anduze.



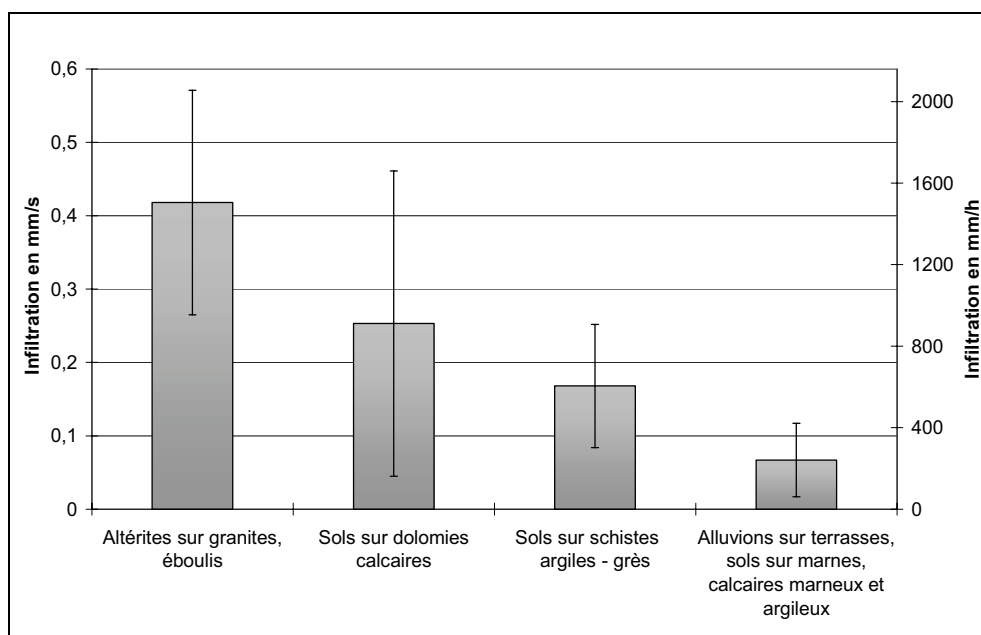


Figure 15 - Capacités d'infiltration moyennes sur le bassin versant du Gardon d'Anduze.

Les valeurs d'infiltration mesurées sont très fortes. Elles varient entre 100 et 2000 mm/h. À l'exception de la classe des sols sur dolomies et calcaires, les mesures effectuées permettent de

dissocier chacune des formations identifiées. Une classification qualitative des sols et formations superficielles peut donc être proposée (Tab. VI).

Tableau VI – Classes de perméabilité des sols.

Formations superficielles	Classes de perméabilité
Alluvions sur terrasses, sols sur marnes, calcaires marneux et argileux	Faible
Sols sur schistes et argiles – grès	Moyenne
Sols sur dolomies et calcaires	Forte
Altérites sur granite, éboulis	Très forte

C'est à partir de cette cartographie de la perméabilité que les paramètres du module de production d'ALHTAÏR doivent être déterminés.

#### b . Utilité des résultats expérimentaux

L'intégration des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de ces travaux, que ce soit au travers des essais de simulation de pluie sur les parcelles de 10 m<sup>2</sup> ou au travers des essais avec l'infiltromètre double anneau, ne peuvent être directement utilisés pour caler les paramètres du module de production d'ALHTAÏR. Plusieurs éléments viennent expliciter cet état de fait.

Les écoulements mesurés lors des protocoles expérimentaux ne rendent pas compte de la théorie de HORTON, base du module de

production d'ALHTAÏR, et les valeurs moyennes d'infiltration obtenues avec l'infiltromètre double anneau ne sont pas cohérentes avec cette même loi. D'autre part, les caractéristiques hydrodynamiques observées sur les parcelles de 10 m<sup>2</sup> ne sont sûrement pas identiques à celles qui expliquent la formation du débit à l'exutoire de bassins versants compris entre 100 et 500 km<sup>2</sup>, sur lesquels le modèle effectue le calcul de production.

L'incohérence observée entre données expérimentales et modélisation renvoie au caractère conceptuel du modèle ALHTAÏR. En effet, la fonction de production de ce modèle, bien que fondée sur une loi de production physique (déduite d'une démarche empirique – R.E. HORTON, 1933), reste un modèle

conceptuel au sens de B. AMBROISE (1998), de C. COSANDEY et M. ROBINSON (2000), ou bien encore de C. PERRIN (2000). Ses paramètres se comportent comme ceux de ces modèles : leur détermination résulte d'une analyse numérique plus que d'une mesure expérimentale.

Une démarche empirique devrait donc permettre de définir le jeu de paramètres régionalisé du module de production d'ALHTAÏR.

### c. Proposition d'un jeu de valeurs régionalisé pour le paramètre $f_0$

De manière à pouvoir associer aux diffé-

rentes classes de perméabilité identifiées des paramètres du module de production, deux étapes successives ont été menées :

- une analyse de la sensibilité des différents paramètres du module de production ;
- le choix d'un jeu de paramètres régionalisé.

Une analyse de sensibilité des paramètres  $f_0$ ,  $f_C$  et  $f_V$  a montré l'importance prépondérante de  $f_0$  sur l'hydrogramme simulé. À titre d'illustration, la figure 16 fait état de l'influence respective des trois paramètres du module de production d'ALHTAÏR sur la reconstitution du débit de pointe.

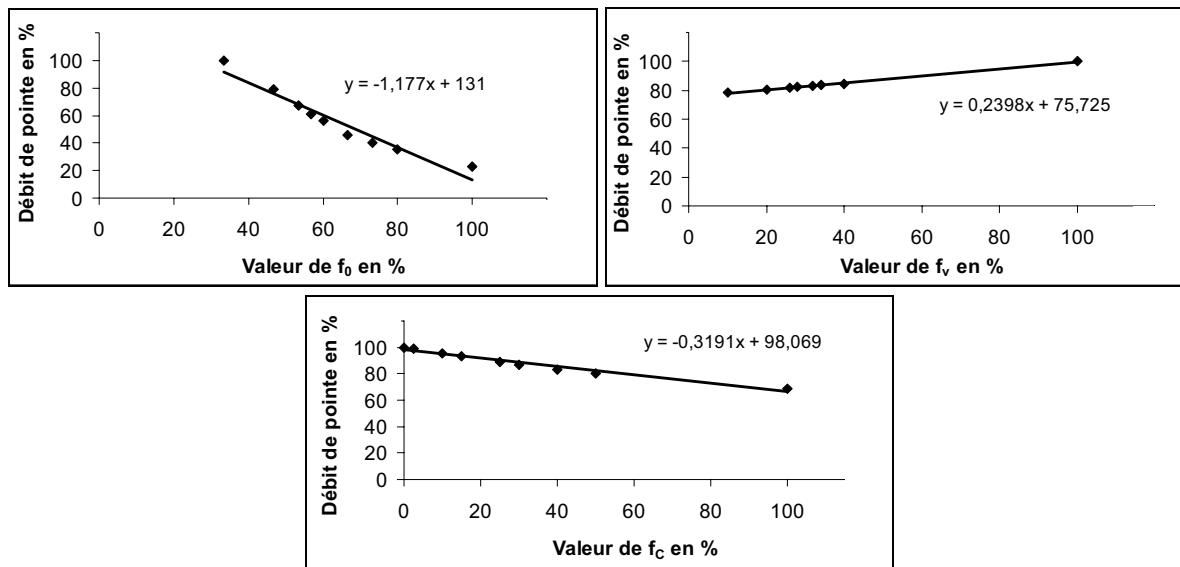


Figure 16 - Influence de  $f_0$ ,  $f_C$  et  $f_V$  sur le débit de pointe de crue.

Au vu des tests de sensibilité effectués c'est la capacité d'infiltration initiale  $f_0$  qui influe le plus sur les débits des pics de crue. C'est donc ce paramètre du module de production qui a été choisi pour être régionalisé en premier.

C'est par une démarche itérative que le choix d'une gamme de valeurs du paramètre  $f_0$  a été effectué. À partir de la cartographie de la perméabilité, un premier jeu est proposé en modifiant le calage originel du paramètre (90 mm/h). Ainsi la valeur de 90 mm/h est attribuée à la classe de perméabilité moyenne. Cette valeur est diminuée pour la zone qualifiée d'une perméabilité faible (70 mm/h). *A contrario*, la valeur de  $f_0$  est augmentée de 10 mm/h pour

les classes de perméabilité forte et très forte (respectivement 100 et 110 mm/h). Cette valeur de 10 mm/h résulte des variations observées lors des tests de sensibilité.

Une fois la simulation effectuée sur les trois bassins versants, la comparaison des hydrogrammes simulés avec les hydrogrammes observés, selon une analyse visuelle, et le critère de NASH permettent de proposer un nouveau jeu de valeurs du paramètre  $f_0$  à tester. La figure 17 présente les valeurs du critère de NASH obtenues pour chacun des tests réalisés pour un événement de référence ayant servi au calage d'ALHTAÏR dans sa version originelle par le SAC-30 (celui du 3 octobre 1995).

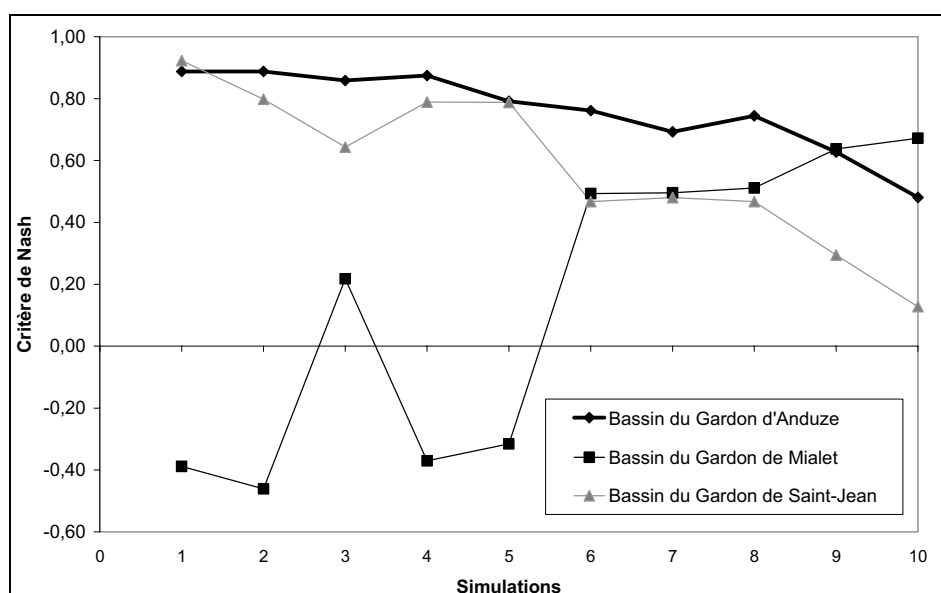


Figure 17 - Valeurs du critère de NASH pour les 10 jeux de valeurs du paramètre  $f_0$  testés.

Ce sont les tests 6, 7 et 8 qui conduisent aux simulations optimums du point de vue du critère de NASH. Le jeu de paramètres 8 est en outre le plus pertinent d'après les analyses visuelles

effectuées (P.A. AYRAL, 2005). Le tableau VII présente les valeurs du paramètre  $f_0$  finalement obtenues.

Tableau VII – Valeurs de  $f_0$  en fonction des classes de perméabilité.

Classes de perméabilité			
Très forte	Forte	Moyenne	Faible
130	120	110	70

#### d . Tests sur la base de données

Les événements retenus pour être analysés dans ce développement sont ceux ayant un indice de confiance qualifié de "très bon" et "bon", soit sept événements au final. D'une manière générale, les comparaisons entre la version initiale d'ALHTAÏR (en mode "bassin versant" et la version "spatialisée" ont été réalisées suivant cinq critères (P.A. AYRAL, 2005) :

- analyse visuelle des hydrogrammes ;
- le critère de NASH ;
- la reconstitution des volumes écoulés ;

- la reconstitution des débits de pointe ;
- la capacité du modèle à reconstituer les dépassements des seuils de pré-alerte et d'alerte.

Les résultats sont ici analysés suivant les deux critères les plus déterminants pour la prévision des crues : la reconstitution des débits de pointe et la capacité à reconstituer les dépassements des seuils de pré-alerte et d'alerte.

Le tableau VIII fait état des coefficients de détermination ( $R^2$ ), calculés avec la droite  $y = x$ , entre les débits de pointes observés et simulés avec les deux versions d'ALHTAÏR.

Tableau VIII - Coefficients de détermination ( $R^2$ ), pour différentes stations, entre les débits de pointe de crue observés et simulés avec les deux versions d'ALHTAÏR.

	Anduze	Mialet	Saumane
ALHTAÏR	0,86	0,40	0,81
ALHTAÏR "spatialisé"	0,94	0,70	0,76

La reconstitution des débits de pointe se trouve améliorée avec la version spatialisée d'ALHTAÏR, notamment sur le bassin versant du Gardon de Mialet. Malgré tout, une diminution du coefficient de corrélation est à noter pour le bassin versant du Gardon de Saint-Jean, diminution qui reste toutefois faible (< 5 %).

ALHTAÏR est un système de prévision

opérationnel des crues éclair. À ce titre, il est pertinent de s'intéresser à sa capacité à simuler les dépassements de seuils. Les seuils de pré-alerte et d'alerte définis par le SAC-30 (Tab. IX), ont été bien évidemment choisis comme seuils d'étude. Les résultats de la comparaison entre les prévisions du modèle et les hydrogrammes observés sont portés dans le tableau X.

Tableau IX - Seuils de pré-alerte et d'alerte pour les bassins versants d'Anduze, Mialet et Saumane (données SAC-30).

	Anduze	Mialet	Saumane
Seuil de pré-alerte	600 m <sup>3</sup> /s	400 m <sup>3</sup> /s	200 m <sup>3</sup> /s
Seuil d'alerte	1 200 m <sup>3</sup> /s	600 m <sup>3</sup> /s	400 m <sup>3</sup> /s

Tableau X - ALHTAÏR comme indicateur de risque.

ALHTAÏR en mode "bassin versant"						
		Ev.1	Ev.3	Ev. 4	Ev. 13	Ev. 19
Pré-alerte	Gardon d'Anduze	<i>00:35</i>	<i>00:22</i>	<b>00:07</b>	<i>00:03</i>	<i>00:52</i>
	Gardon de Mialet	FA	FA	FA	<b>00:03</b>	<i>00:27</i>
	Gardon de Saint-Jean	-	<b>00:25</b>	nd	<b>00:10</b>	<i>00:13</i>
Alerte	Gardon d'Anduze	-	<i>00:03</i>	<i>00:04</i>	FA	<i>00:29</i>
	Gardon de Mialet	FA	FA	FA	FA	<i>00:06</i>
	Saumane	-	<b>00:13</b>	nd	-	<i>00:38</i>
ALHTAÏR en mode "spatialisé"						
		Ev. 1	Ev. 3	Ev. 4	Ev. 13	Ev. 19
Pré-alerte	Gardon d'Anduze	<b>00:47</b>	<i>00:10</i>	FA	<b>01:16</b>	<i>00:25</i>
	Gardon de Mialet	FA	FA	-	<b>00:51</b>	<i>00:06</i>
	Gardon de Saint-Jean	-	<i>00:05</i>	-	<b>00:39</b>	<b>00:34</b>
Alerte	Gardon d'Anduze	-	<b>NP</b>	<b>NP</b>	FA	<i>00:12</i>
	Gardon de Mialet	-	-	-	FA	<i>00:16</i>
	Gardon de Saint-Jean	-	<b>NP</b>	-	-	<b>00:03</b>

*En italique* : avance du modèle par rapport à l'hydrogramme observé, en heure(s) et minutes ; **en gras** : retard du modèle, en heure(s) et minutes ; - : pas de dépassement de seuil ; FA : fausse alerte ; NP : dépassement non prévu ; nd : absence de données.

La spatialisation du module de production d'ALHTAÏR, évaluée sur les événements considérés comme fiables, entraîne la diminution de la moitié des fausses alertes, notamment sur le bassin versant du Gardon de Mialet.

Hormis pour l'événement 13, les dépassements des seuils de pré-alerte et d'alerte sont simulés avec moins d'une heure de décalage. Les "avances" et "retards" par rapport aux débits

observés se répartissent de manière équilibrée sur ces épisodes.

Enfin, le biais principal généré par cette spatialisation, en terme d'indicateur de risque, est la non prévision du dépassement du seuil d'alerte. Même si ce dépassement n'est avéré que pour deux événements, il constitue un problème majeur de cette première version d'ALHTAÏR en mode "spatialisé". Il est toutefois important de

noter que pour le premier de ces événements, le débit de pointe simulé par ALHTAÏR est de  $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ , ce qui reste proche des  $1200 \text{ m}^3/\text{s}$  du seuil d'alerte.

#### IV – CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les essais réalisés sur les parcelles de Tourgueille et de Peyrolles ont permis de développer des analyses au niveau des processus qui génèrent les flux hydriques. En l'état actuel des recherches, de nombreuses limites rendent l'utilisation des résultats expérimentaux difficilement exploitables en terme de modélisation avec ALHTAÏR. Des éléments pertinents, issus de ces derniers, peuvent toutefois être soulignés.

La part très importante de l'écoulement de sub-surface est mise en évidence sur la parcelle expérimentale de Tourgueille. Cela laisse présager que sur des versants de configuration comparable, notamment en ce qui concerne la pente, des écoulements du même type se produisent. Toutefois la vitesse de l'eau dans la tranche de sol, estimée à  $1 \text{ m}/\text{min}$  par traçage au sel (P.A. AYRAL, 2005), est insuffisante pour engendrer une crue éclair. À cet égard, il est intéressant d'émettre l'hypothèse que le temps de séjour de cette eau dans le sol est court et que très rapidement, par des processus d'exfiltration, elle se trouve canalisée dans des drains à écoulement intermittent. Les quelques observations sous pluies naturelles effectuées dans le cadre de ces travaux, semblent aller dans ce sens.

Sur le site de Tourgueille, la réponse de la parcelle expérimentale sous pluies "naturelles" a confirmé les résultats obtenus avec le simulateur de pluie. *A contrario*, des comportements atypiques ont été mis en évidence sur la parcelle de Peyrolles. Dans ce cas, des coefficients d'écoulement hypodermique et de ruissellement de surface particulièrement élevés ont été enregistrés sous des pluies naturelles (jusqu'à respectivement 35 et 18 %). La teneur en eau initiale du sol et l'intensité des précipitations sont des éléments d'explication possibles qu'il conviendra d'étudier en détail.

Même si les paramètres du module de production d'ALHTAÏR, modèle pluie-débit

conceptuel, ne sont pas directement mesurables sur le terrain, l'utilisation qualitative qui a été faite des données expérimentales constitue assurément une limite à cette étude. Des travaux de modélisation de ces résultats expérimentaux de simulation de pluies restent nécessaires pour parfaire cette étape de régionalisation.

Outre la limite évoquée précédemment, l'étape de régionalisation mise en place comprend également deux limites auxquelles il conviendra de pallier. Il est intéressant, en effet, de noter qu'un seul paramètre du module de production a été régionalisé ( $f_0$ ). Une étude complémentaire est donc nécessaire pour entreprendre la spatialisaiton des autres paramètres ( $f_v$ ,  $f_c$  et  $s_i$ ). D'autre part, "un piège numérique" (C. PUECH *et al.*, 2003) est à noter. En effet, seules les zones homogènes représentant plus de 10 % de la superficie du bassin considéré ont une influence sensible sur la simulation de l'hydrogramme. Il est donc difficile de juger de la pertinence des valeurs du paramètre  $f_0$  attribuées à des classes de perméabilité dont la répartition spatiale reste minoritaire.

Cette version spatialisée fonctionne actuellement en temps réel au SAC-30, les données issues du retour d'expérience à venir permettront d'affiner cette dernière. En terme de perspective, une démarche similaire est d'ores et déjà amorcée sur le bassin versant de l'Avène (affluent rive gauche du Gardon d'Anduze), ce qui permettra de contrôler la pertinence des valeurs des paramètres régionalisés proposées sur le bassin versant du Gardon d'Anduze et d'approcher la problématique des bassins versants non jaugés, objectif *in fine* de cette version d'ALHTAÏR.

Enfin, le développement des recherches sur les parcelles expérimentales passera nécessairement par la mesure systématique de la teneur en eau des sols, ce qui sera fait en utilisant une méthode fondée sur la variation de la résistivité électrique en fonction de l'humidité. Il est également envisagé de mesurer les écoulements de surface et hypodermique en temps réel. Sur le site de Peyrolles, cette approche devrait permettre, d'établir un lien entre la parcelle et les bassins versants expérimentaux gérés par l'UMR 6012 "ESPACE".

**Remerciements :** Les auteurs remercient Émile PELLECUER et Rémi GERVAIS (Service d'Annonce des Crues du Gard), pour la construction et la réalisation du simulateur de pluie, Jean-François

DESPRATS, Nathalie DORFLIGER et Christine KING (BRGM), pour la réalisation de la carte de perméabilité, Christophe BOUVIER, Jean-Louis PERRIN, Pascal BRUNET et Arthur MARCHANDISE (UMR HydroSciences, Maison des Sciences de l'Eau à Montpellier), ainsi que Claude MARTIN, Jean-François DIDON-LESCOT et Joël JOLIVET (UMR 6012 "ESPACE"), pour leur participation active à cette étude.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMBROISE B. (1998) - Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : processus et facteur. *Revue des Sciences de l'Eau*, p. 471-495.
- AYRAL P.A. (2005) - *Contribution à la spatialisation du modèle opérationnel de prévision des crues éclair ALHTAÏR – Approches spatiale et expérimentale – Application au bassin versant du Gardon d'Anduze*. Thèse de Doctorat, Université de Provence, Aix-Marseille I, 310 p.
- AYRAL P.A., DESPRATS J.F., BRESSAND F., PINEL D., SAUVAGNARGUES-LESAGE S., KING C. et DORFLIGER N. (2003) - Intégration de la variabilité spatiale de l'infiltration des sols dans un modèle de prévision des crues opérationnel : ALHTAÏR. Zone test du bassin versant du Gardon d'Anduze. *Société Française de Photogrammétrie et Télédétection, Hydrosystèmes et Télédétection à haute résolution*, n°172, p. 22-30.
- BRESSAND F. (2002) - Le projet ALHTAÏR du service d'annonce des crues. *La Houille Blanche*, n° 2, p. 64-68.
- COSANDEY C. et ROBINSON M. (2000) - *Hydrologie continentale*. Édit. Armand COLIN, Coll. U, Géographie, p. 360.
- DESPRATS J.F., PINEL D., AYRAL P.A., SAUVAGNARGUES-LESAGE S. et BRESSAND F. (2003) - Cartographie du potentiel d'infiltration des sols du Bassin Versant du Gardon d'Anduze comme élément d'amélioration élémentaire du modèle de prévision de crue du Gard. *Conférences SIRNAT - Forum JPRN, Les journées pour la prévention des risques naturels*, Orléans, 29-30 janvier 2003, 6 p.
- GAUME É., PAYRASTRE O. et ROSA DA SILVA B. (2003) - *Analyse hydrologique des crues des 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard*. Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, République Française, Paris, 94 p.
- HORTON R.E. (1933) - The role of infiltration in the hydrological cycle. *Transactions of the American Geophysical Union*, vol. 14, p. 446-460.
- MARCHANDISE A. (2004) - *Vers une modélisation opérationnelle des crues sur les bassins versants cévenols ; modélisation hydrologique distribuée et étude des chemins de l'eau*. Rapport d'étude, Maison des Sciences de l'Eau, SCHAPI, 61 p.
- MARTIN F., MARTIN C., LAVABRE J. et FOLTON N. (2004) - Fonctionnement hydrologique des bassins versants de roches métamorphiques : exemple du bassin versant des Maurets (massif des Maures, Var, France). *Ét. Géogr. Phys.*, n° XXXI, p. 39-69.
- MOUSSA R. (1991) - *Variabilité spatio-temporelle et modélisation hydrologique. Application au bassin du Gardon d'Anduze*. Thèse de Doctorat, Université de Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier II, 259 p.
- MUSY A. et HIGY C. (2004) – *Hydrologie : une science de la nature*. Presse Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 314 p.
- PERRIN C. (2000) - *Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 527 p.
- PINEL D. (2002) - *Cartographie du potentiel d'infiltration des sols du Bassin Versant du Gardon d'Anduze*. Rapport de Stage, École Nationale Supérieure de Géologie, BRGM, Montpellier, 41 p.
- PUECH C., DARTUS D., BAILLY J.S. et ESTUPINA-BORRELL V. (2003) - Hydrologie distribuée, télédétection et problèmes d'échelle. *Société Française de Photogrammétrie et Télédétection, Hydrosystèmes et Télédétection à haute résolution*, n°172, p 11-21.
- SIEE – Société d'Ingénierie Eau et Environnement (2004) - *Valorisation des relevés*

---

*hydrométriques de l'événement des 8 et 9  
septembre 2002. Rapport d'étude, Direction*

Départementale de l'Équipement du Gard,  
162 p.