

Prévision des crues dans le sous-bassin du Cartaou (Gardon d'Anduze) : modèles numériques et études de terrain

Sommaire

I. Sélection du bassin et premiers résultats.....	1
1. Choix d'un bassin expérimental.....	1
2. Obtention et traitement des jeux de données.....	2
3. Analyse cinétique du bassin.....	2
II. Mise en œuvre d'un modèle empirique.....	3
1. Choix d'un modèle et préparation des données.....	3
2. Exploration du modèle.....	3
3. Calage.....	4
4. Validation.....	5
III. Étude de l'eau dans le sol : vers un modèle à base physique.....	5
1. Réalisation d'une carte de végétation.....	5
2. Mesures d'humidité du sol.....	6
3. Mesures de vitesse d'infiltration.....	6
4. Simulation de pluie et écoulements dans le sol.....	7
5. Réalisation de colonnes de terre.....	8
Conclusion.....	9
Références et bibliographie.....	9

Introduction^[1, pp.14-23] et [2]

Les inondations font partie des catastrophes naturelles les plus dommageables, tant en terme de bilan humain que financier. Par exemple, celle de Nîmes en 1988 a dévasté la ville et fait neuf victimes. Dans le domaine méditerranéen, le contexte géoclimatique entraîne la formation rapide de crues intenses. Un des enjeux est de prévoir l'évolution à court terme (de l'ordre d'une journée) du débit d'un cours d'eau (cinétique de la réponse hydrologique : heure et intensité du/des pics de crue) pour pouvoir alerter, évacuer à temps, etc.

Comment comprendre et prévoir la genèse de ces crues rapides ? Notre travail s'est développé dans plusieurs directions :

- la recherche d'un bassin hydrologique documenté et l'étude de l'historique de crues pour comprendre leurs caractéristiques.
- la recherche de modèles prévisionnels numériques empiriques, disponibles en ligne et leur mise en œuvre, c'est à dire les caler et les tester grâce aux chroniques précédentes.
- une étude expérimentale du bassin choisi pour comprendre par des mesures et des simulations de pluie le comportement physique réel des eaux de pluie.
- une réflexion sur les pistes pouvant mener à l'élaboration de modèles prévisionnels dits « physiques » qui prennent mieux en compte le comportement précédent.

I. Sélection du bassin et premiers résultats

Sur un bassin choisi, une analyse de l'historique des crues a été réalisée à partir de données déjà disponibles, nous permettant de dégager quelques caractéristiques du bassin.

1. Choix d'un bassin expérimental

Un contact [a] et des recherches préliminaires [1] nous ont orientés vers l'étude des crues dans une zone non karstique, celle du Gardon d'Anduze (Fig. 1 page suivante), dont les processus hydrologiques sont a priori superficiels donc accessibles à la mesure. Nous y avons sélectionné le sous-bassin du Cartaou, représentatif de la région, de taille modeste et équipé d'appareils de mesure de pluie et de débit depuis 2003, rendant possible une étude historique des crues ainsi que le calage et le test de modèles prévisionnels.

<i>Localisation</i> : Gard, Peyrolles, (LII.ét. : 719260m, 1900355m) ⁽¹⁾
<i>Superficie</i> : 0,53 km ² /53 ha ⁽¹⁾
<i>Altitude</i> : de 351m à 758m ⁽¹⁾
<i>Pente moyenne</i> : 56,8% ⁽³⁾
<i>Géologie</i> : Milieu fissuré (granite et schistes (s.l.)) ^[4] et [3,p.60]
<i>Végétation</i> : châtaignier et chênes majoritairement (carte détaillée p. 5) ⁽²⁾
<i>Débit du cours d'eau principal</i> : de 11 l/s (étiage) ⁽²⁾ , à 1200 l/s (crue) ⁽³⁾
Sources :
(1) CartoExplorer/carte IGN Top252741E/T
(2) Observations personnelles
(3) Données et rapports UMR Espace [d]

Caractéristiques du Cartaou

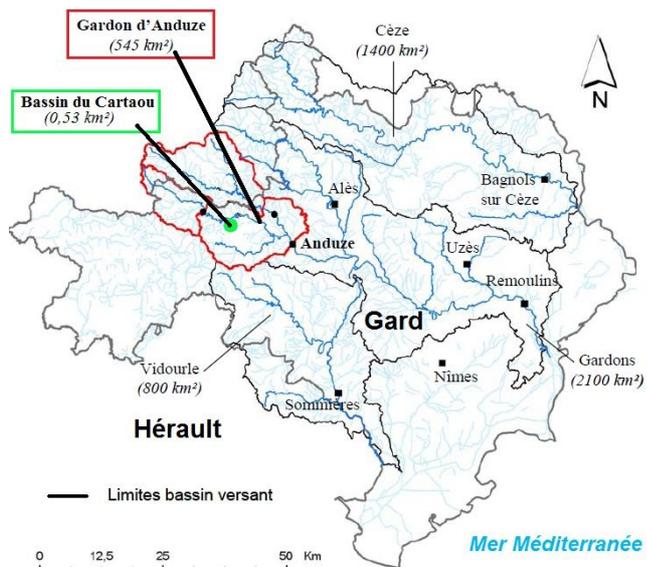


Fig. 1 : Localisation et caractéristiques du bassin du Carteau (carte d'après [1] p.115)

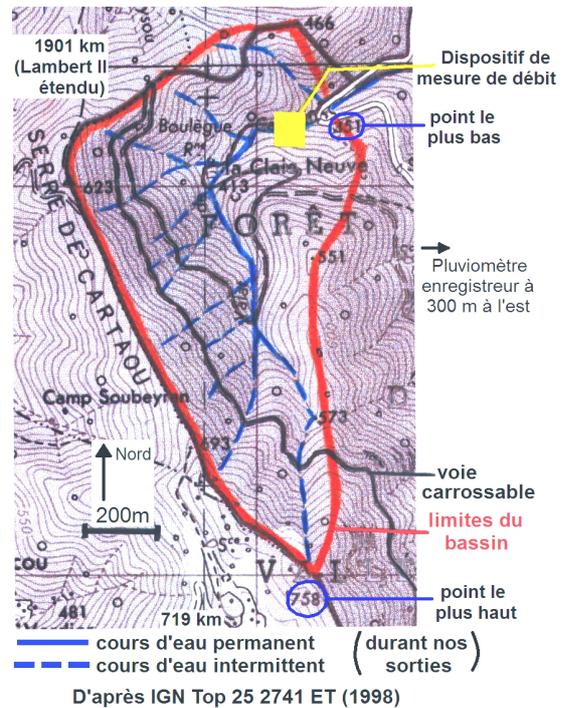


Fig. 2 : Carte topographique du Carteau

2. Obtention et traitement des jeux de données

L'UMR Espace [d] nous a fourni les chroniques de pluie et de débit du cours d'eau principal (débitmètre localisé sur la Fig. 2) sur la période 2003-2010. La pluviométrie est donnée par les heures de basculement d'un pluviomètre à auget. L'exploitation et la visualisation des données ont nécessité leur conversion à un pas de temps fixe (5 min), codée dans le langage informatique R.

3. Analyse cinétique du bassin

Nous avons étudié la cinétique du bassin, c'est-à-dire la réponse en débit face à un événement de pluie. Sept périodes de crues ont été considérées (exemple Fig. 3).

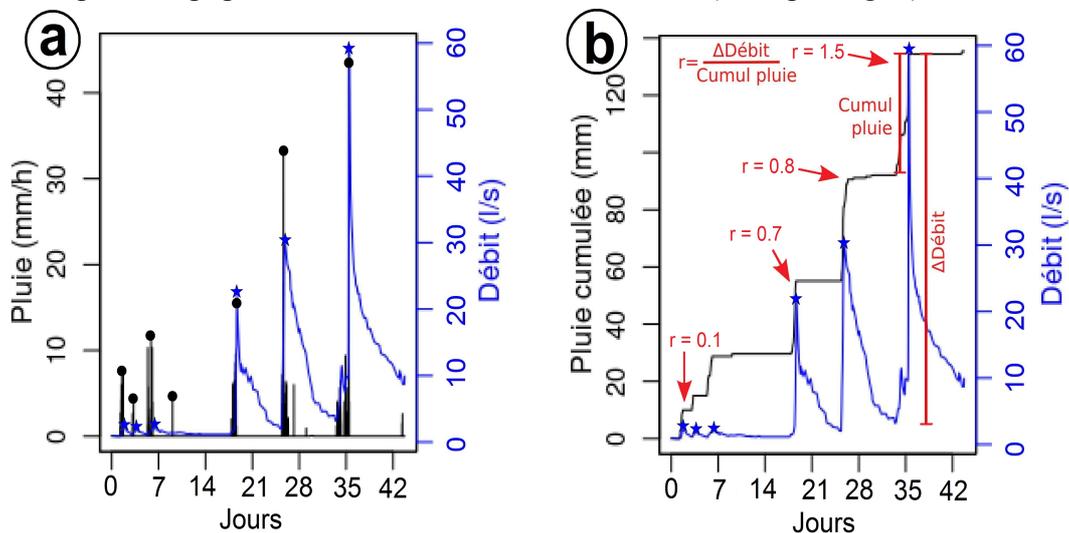


Fig. 3: événements de mars 2005 **a** : Intensité et débit – **b** : cumul, débit et exemple de calcul du rapport r . Trois crues visibles (jours 17-27-35). Pour chaque événement : ★ Débit maximal, ● Intensité de pluie maximale.

De notre analyse, il découle que :

- le temps de réponse (temps séparant, en début d'événement, une variation significative de la pluie et du débit) est de deux à quatre heures (moy=3h45, $\sigma=2h$, 7 événements considérés).
- la hauteur du pic de débit ne semble pas corrélée à l'intensité de la pluie d'un événement (Fig. 3a) ; elle paraît par contre l'être à son cumul de pluie, mais sans proportionnalité (Fig. 3b). En effet, lors d'événements pluvieux successifs et rapprochés, le rapport $r = \text{hauteur du pic de débit} / \text{pluie cumulée}$, que nous avons défini et calculé, augmente (Fig. 3b).

- D'autres observations montrent que deux pluies similaires peuvent avoir des réponses en débit différentes. Il est donc nécessaire de prendre en compte d'autres variables explicatives.

Nous avons ainsi considéré l'humidité du sol en début d'événement. La date de la dernière pluie avant l'épisode de crue sélectionné ou l'estimation fournie par le modèle SIM (MétéoFrance) [5] sous la forme du paramètre *hu2* peuvent en constituer une approximation. *hu2* est disponible jusqu'en août 2011 *via* la base de données scientifique HyMex [6] et nous a été fourni par le SCHAPI [e] à nos dates de sortie sur le terrain. Toutes les tentatives de corrélations simples entre ces indicateurs et l'importance de la réponse (caractérisée par le rapport *r*) sont restées sans succès.

En conclusion, la prévision des crues ne peut se réduire à de telles corrélations cinétiques mais doit reposer sur des modèles prévisionnels dans lesquels la circulation de l'eau et l'état du sol doivent intervenir.

II. Mise en œuvre d'un modèle empirique

La mise en œuvre de modèles numériques, dits (Pluie→Débit), peut être réalisée suivant deux approches : la première, empirique, consiste à présupposer une règle d'évolution des débits, puis à en *ajuster* manuellement les paramètres. Ces derniers ont souvent peu de réalité physique. La seconde, à base physique, modélise les phénomènes hydrauliques à l'œuvre dans le bassin pour prévoir les débits. Ces modèles s'appuient sur des paramètres mesurables et présupposent un fonctionnement hydrologique donné du bassin.

1. Choix d'un modèle et préparation des données

Parmi les modèles empiriques disponibles dans la plate-forme de modélisation choisie, Athys [8], nous en avons sélectionné un, SCS, réputé efficace. Il propose une modélisation du débit à partir des données topographiques, pluviométriques et sous réserve de renseigner des paramètres.

- Les Modèles Numériques de Terrain (MNT) en libre accès avaient une résolution insuffisante devant la faible superficie du Cartaou (0,5x1,2km). Nous nous sommes procuré un MNT au pas de 1m auprès de l'ÉMA [b]. Nous l'avons sous-échantillonné au pas de 10m pour la modélisation hydrologique et écrit des fonctions en R pour le visualiser (Fig.4).
- Nous avons sélectionné quatorze événements pluvieux majeurs sur la période 2003-2009. Les huit premiers ont servi à caler les modèles (groupe de calage), les six autres à tester les paramètres calés (groupe de validation).

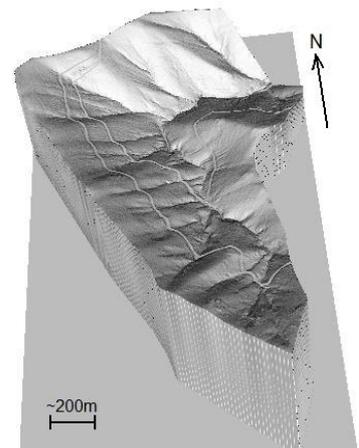
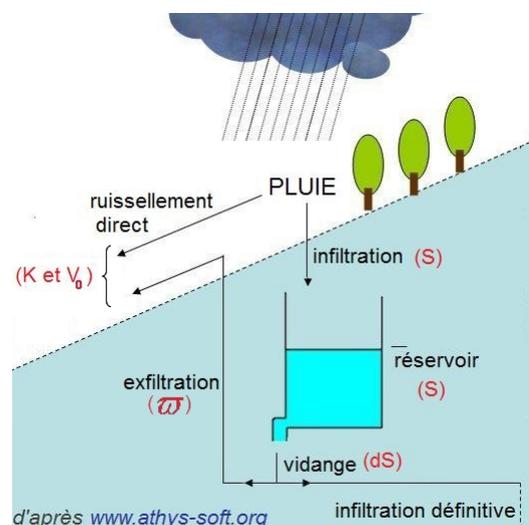


Fig. 4: Représentation 3D du MNT du Cartaou, échelle verticale arbitraire

La modélisation du débit est considérée comme bonne lorsqu'elle prévoit correctement l'heure et l'intensité du pic de crue. On évalue cette adéquation par une représentation graphique et par un critère numérique calculé par le logiciel (NASH [8] et Fig. 6).

2. Exploration du modèle

SCS [8] modélise l'intensité de l'infiltration en fonction du cumul de pluie à chaque pas de temps et pour chaque maille du MNT. Un réservoir linéaire y a été adjoint. Il se remplit avec la pluie infiltrée et en remet une partie en jeu sous forme d'exfiltration. L'eau non infiltrée et exfiltrée est transférée à l'exutoire. SCS nécessitant de faibles temps de calcul, il peut fournir une prévision en temps réel.



d'après www.athys-soft.org
Fig. 5: Schéma fonctionnel de SCS, en rouge les paramètres qui déterminent les flux associés.

SCS comporte 5 paramètres à renseigner (Fig. 5), images d'une représentation très simplifiée du bassin : S (capacité d'un réservoir), dS (coefficient de vidange du réservoir), ω (fraction de la vidange remise en jeu sous forme d'exfiltration), V_0 (vitesse de ruissellement) et K (étalement du champ des vitesses de ruissellement).

On présente l'effet de valeurs extrêmes de paramètres sur l'événement du 21 octobre 2008 (Fig. 6) pour évaluer la sensibilité du modèle. On met en évidence qu'un S nul provoque une copie de la pluie (C) et un S croissant diminue l'ampleur de la réponse (C et D). Un K élevé étale le pic et réciproquement (A et B).

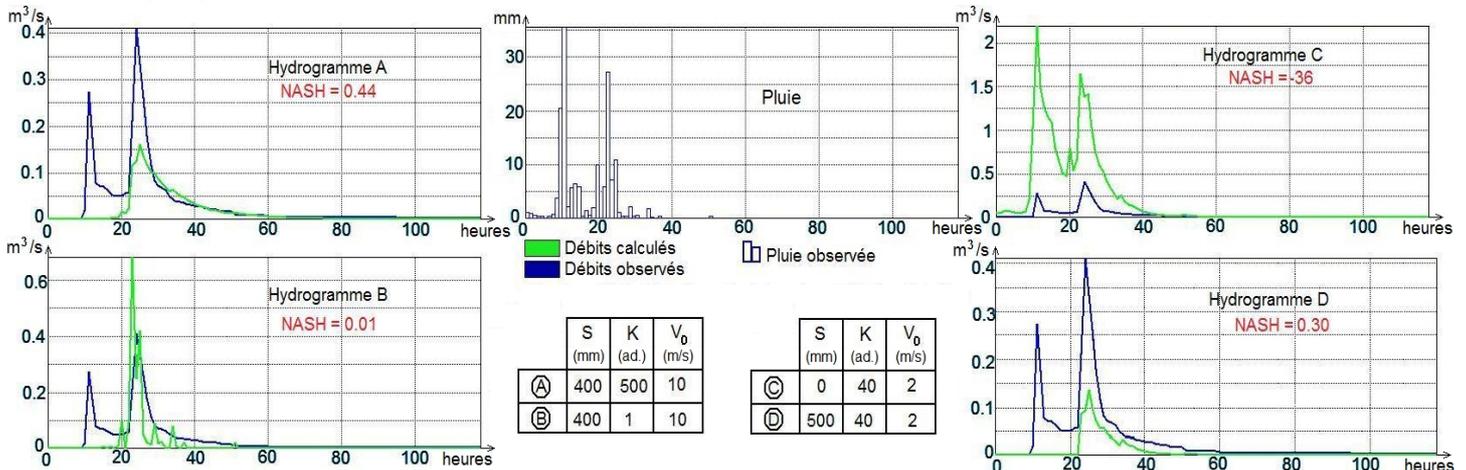


Fig. 6: Effets de la variation extrême des paramètres K et S. NASH d'autant plus proche de 1 que la modélisation est bonne, très mauvaise ici.

3. Calage

Les paramètres ont d'abord été ajustés pour chaque événement individuellement. Les résultats obtenus sont satisfaisants (Fig. 7 haut), mais avec des valeurs très différentes des paramètres, ce qui est contraire à une démarche prévisionnelle.

Nous avons cherché le quintuplet de paramètres qui donnerait les meilleures modélisations pour l'ensemble des événements (calage collectif), c'est-à-dire un quintuplet donné qui appliqué à chaque événement donne la meilleure modélisation globale. Les résultats sont alors bien moins bons, principalement parce que la hauteur du pic est mal estimée (non représenté ici).

Le paramètre S peut s'interpréter comme étant une fonction des conditions initiales du bassin [c et 7]. Nous avons alors tenté d'adapter S à chaque événement tout en gardant constants les autres paramètres (dS, ω , V_0 , K) qui sont alors considérés comme des constantes intrinsèques du bassin. Cela conduit à un résultat assez satisfaisant (Fig. 7 bas).

Un écueil majeur subsiste, puisque S varie avec l'événement, ce qui rend ce modèle caduc à l'aune de la prévision. Aussi, une estimation de S a été recherchée. Il est possible de déduire S de l'humidité du sol ([7] et [9]), celle-ci étant estimée par le paramètre *hu2* décrit *supra*. Le graphique $S=f(hu2)$ (Fig. 8) montre un lien net entre S et l'humidité du sol ($R^2 > 0.84$, 11 événements considérés). *hu2* étant accessible quotidiennement, il est possible d'utiliser SCS dans un contexte de prévision.

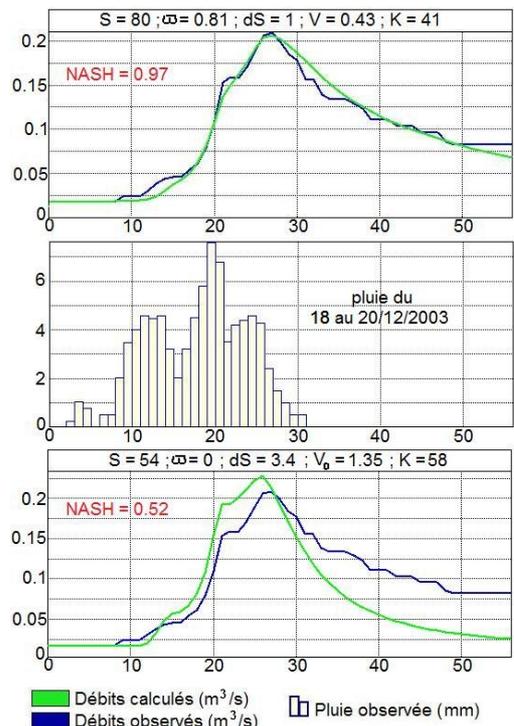


Fig. 7: Calage individuel (haut) et collectif avec S variable (bas) d'un événement

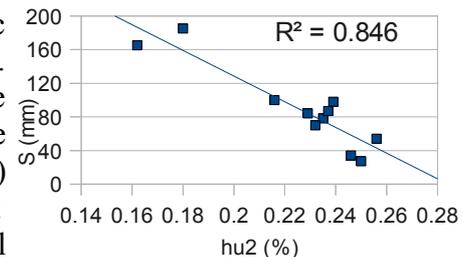


Fig. 8: $S = f(hu2)$. Plus le sol est sec plus S est important.

4. Validation

Les événements du groupe de validation ont été simulés en calant S individuellement. Les résultats sont globalement de la même qualité que ceux du groupe de calage (exemple Fig. 9).

En résumé, SCS apparaît comme un bon modèle prévisionnel, mais il est aveugle quant aux mécanismes réels de genèse des crues. À l'inverse, un modèle à base physique nous semblait *a priori* plus explicatif car utilisant des paramètres mesurables sur le terrain et rendant compte de la nature du bassin.

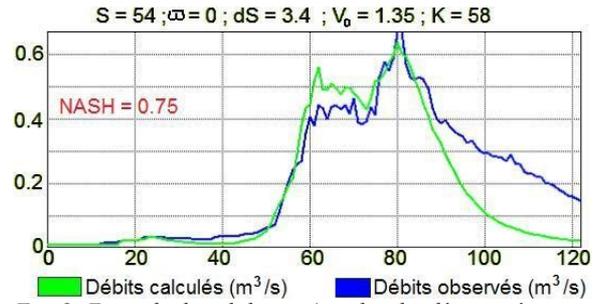


Fig. 9: Exemple de validation (quadruplet déterminé précédemment et S ajusté manuellement)

III. Étude de l'eau dans le sol : vers un modèle à base physique

La connaissance des types d'écoulements du bassin conditionne le choix d'un modèle physique et permettrait d'éclairer la cinétique. Un inventaire succinct de modèles physiques et une réflexion sur leur conception montre que certains paramètres sont souvent requis : vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol, humidité du sol en début d'événement. Par ailleurs, les écoulements peuvent être de deux types : ruissellement de surface ou écoulements dans le sol, l'influence d'écoulements profonds (nappes) ayant été exclue par des études précédentes [1]. Nous avons donc réalisé trois campagnes de mesures sur huit jours au total (3-4 et 20-22 déc., 20-22 fév.).

1. Réalisation d'une carte de végétation

Les mesures présentées *infra* sont hétérogènes. Nous avons tenté de relier cette variabilité à une donnée accessible (carte géologique, pédologique, de végétation). En effet, un lien entre nos mesures ponctuelles et un paramètre cartographié permettrait de tirer une estimation de ceux-ci à moindre coût.

Les cartes existantes [3 p.105, 4] étant trop imprécises et la végétation étant facile à cartographier en hiver (Fig. 11) nous en avons réalisé une. Nous avons procédé par triangulation, report sur une carte IGN et vérifié que des points GPS pris sur le terrain concordent (Fig. 10).

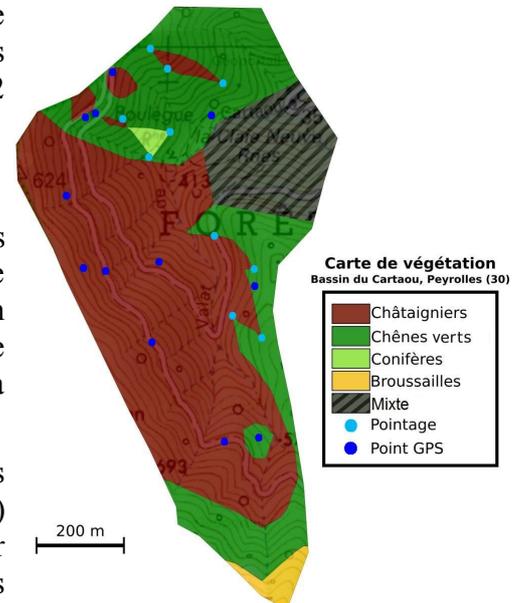


Fig. 10: Carte de végétation sur carte ©IGN

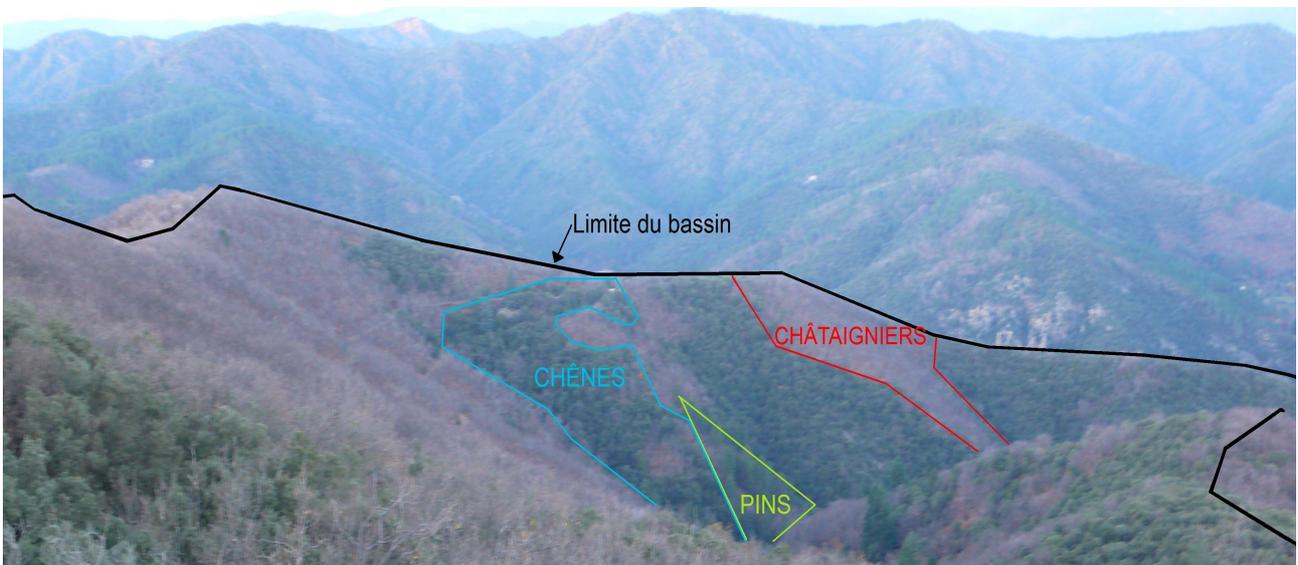


Fig. 11 : Photographie prise vers le nord à 731m d'altitude le 22 décembre 2011 et exemple de trois types de végétation

2. Mesures d'humidité du sol

La donnée de l'humidité du bassin en début d'événement est requise par certains modèles. Celle-ci est donnée quotidiennement par le paramètre *hu2* produit par le modèle SIM sur des mailles de 8x8 km. Le bassin étant plus de cent fois plus petit qu'une maille de SIM, il faut vérifier la validité de la sortie de ce modèle pour la maille englobant le Cartaou, d'autant plus que ce paramètre a servi dans la modélisation avec SCS.

Dans ce but, 69 prélèvements au total ont été effectués sur tout le bassin aux trois dates. Ils ont été déshydratés à l'étuve ($T=105\pm 5^{\circ}\text{C}$) et l'humidité *massique* a été calculée. Pour comparer à l'humidité *volumique* déduite de SIM, il a fallu estimer la densité de la terre sèche en tentant de reproduire le tassement originel du sol dans une éprouvette graduée. Cette expérience a donné sur cinq échantillons une densité estimée variant de 1,0 à 1,3 (moyenne=1,1 \pm 12%). Ce résultat est très dépendant du tassement de la terre, que nous n'avons pu mesurer sur place. Ce montage a ensuite été saturé en eau et l'humidité volumique à saturation (Θ_s) a été déduite (53%).

Reportée sur le MNT et la carte de végétation (Fig. 12), l'humidité mesurée est très hétérogène. Cela peut s'expliquer par la variabilité intrinsèque du bassin (présence d'un tapis de feuilles mortes, ensoleillement, type de sol, etc.) mais aussi par le choix inapproprié de certains lieux de prélèvement, peu représentatifs. Néanmoins, la moyenne des mesures est décroissante au cours du temps, ce qui est conforme à l'absence de pluie sur la période et concorde avec les variations de *hu2*. Pour autant, aucune corrélation plus précise n'a pu être établie.

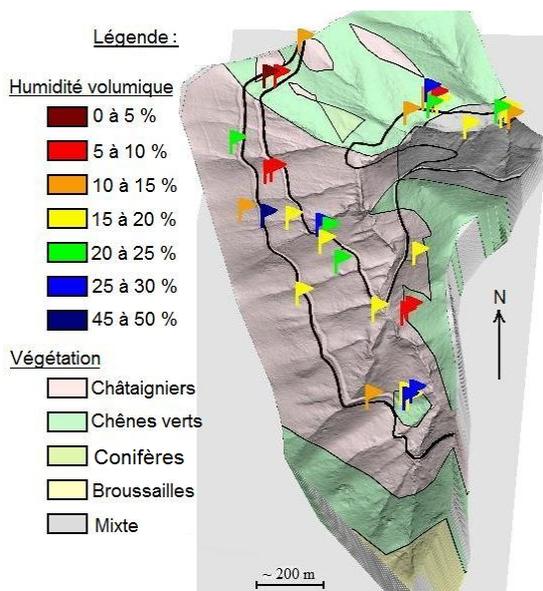


Fig. 12: Humidité volumique à la date du 20-22 fév.

3. Mesures de vitesse d'infiltration

La vitesse d'infiltration est un paramètre d'entrée important des modèles et permet d'évaluer la part du ruissellement de surface. Dans un premier temps nous avons cherché à mesurer en différents points la vitesse d'infiltration (K_s) en régime permanent (sol saturé).

Pour cela, nous avons fabriqué des appareils de mesure d'infiltration. D'un simple tube planté dans le sol dont la pression au niveau du sol variait avec la vidange, l'appareil a été perfectionné suivant le principe du vase de Mariotte de manière à assurer à la fois une pression constante et une réserve d'eau (Fig. 13). Autant que possible, le sol a été saturé latéralement afin de ne mesurer que l'infiltration verticale. Les résultats sont consignés Tableau 1 et Fig. 14.

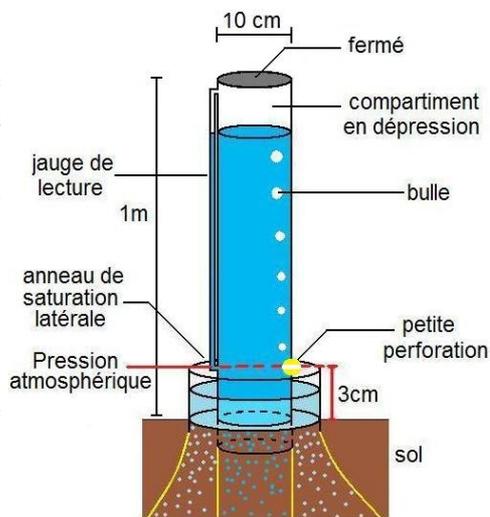


Fig. 13: Principe de l'infiltromètre

Ce dispositif souffre de plusieurs défauts. Tout d'abord, la faible section rend la mesure peu fiable, mais résulte d'un compromis entre la représentativité de la mesure et la quantité d'eau à transporter. Ensuite une mesure de K_s prend plusieurs heures, et l'enregistrement des bruits causés par l'entrée des bulles par la perforation dans le tube eût permis une automatisation. Enfin, le tube plein planté est instable, déporter la réserve d'eau grâce à un tuyau aurait réglé le problème.

	Chênes	Châtaignier	Total
Moy. (mm/h)	637	550	523
Écart-standard (mm/h)	105	110	80
Nb. mesures	4	6	18

Tableau 1: vitesse d'infiltration par zones

Partout, l'infiltration est très supérieure à une pluie extrême (100mm/h maximum), le ruissellement de surface est donc improbable et s'explique par la nature arénitique du sol. Ces valeurs sont confirmées par la bibliographie [1 et 7]. Cela dénote une genèse inhabituelle des crues avec un rôle important du processus d'infiltration/exfiltration. Nos mesures montrent de plus une grande variabilité spatiale et pas de corrélation convaincante avec le couvert végétal.

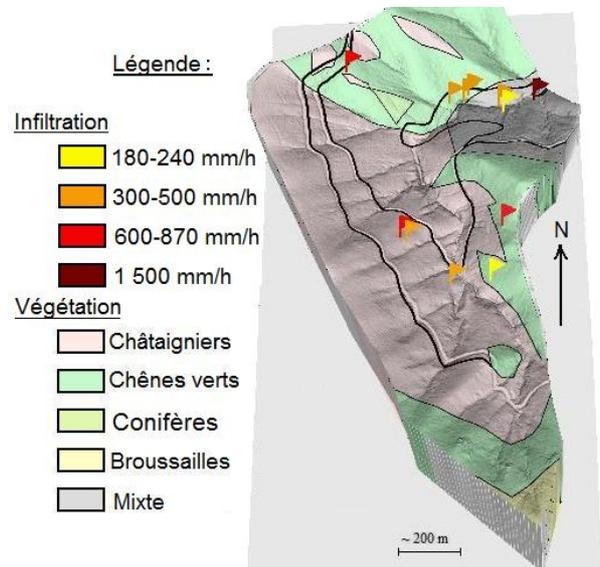


Fig. 14: Vitesses d'infiltration (20-21-22 Fév.)

4. Simulation de pluie et écoulements dans le sol

Pour confirmer l'absence de ruissellement de surface et déterminer les types d'écoulements souterrains (e.g. : écoulement de sub-surface – dans les vingt premiers centimètres du sol – ou bien sur une roche-mère faiblement enfouie [1]) et en l'absence de pluie pendant les périodes sur le terrain, nous avons réalisé des simulations de pluie.

Quatre sites représentatifs du bassin (pente, type de sol) ont été sélectionnés (détail des simulations Tableau 2 page suivante). Il fallait qu'ils permettent la simulation et l'observation, donc situés en contrebas d'un cours d'eau afin d'alimenter le dispositif et avec une rupture de pente (coupe naturelle) permettant de visualiser les écoulements en sortie (Fig. 15 et Fig. 16). La simulation d'une intensité de pluie réaliste (de l'ordre de 20mm/h) est inefficace, en particulier parce qu'elle ne tient pas compte des écoulements latéraux et des apports d'eau par l'amont ; de fortes intensités sont donc appliquées, en s'inspirant de travaux antérieurs [1].

Le dispositif s'appuie sur une dérivation de la rivière par le biais d'un siphon. Pour avoir une pression, et donc un débit suffisant, un fort dénivelé entre le point de captage de l'eau et la parcelle arrosée est nécessaire. Un système de goutte-à-goutte de notre conception suspendu à 1,5 m du sol a permis un arrosage continu et homogène et une intensité de pluie allant jusqu'à 160mm/h. Sur de fortes pentes, la pression plus importante en bas du tuyau impliquerait une intensité de pluie plus importante en aval. Des vannes intermédiaires ont permis d'ajuster les intensités. Les observations et les mesures ont été réalisées après qu'un régime permanent (saturation) eût semblé établi.



Fig. 15: Dispositif de simulation de pluie

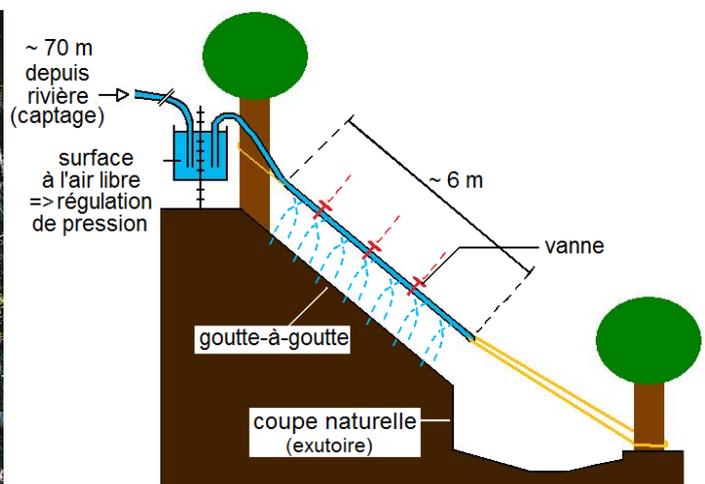


Fig. 16: Principe du dispositif de simulation de pluie

N ^o	Date	Pente (*)	Surface (**)	Intensité pluie (***)	Durée simulation	Écoulements visibles			Commentaires
						Surface	Subsurf.	Roche mère	
1	20/12	22°	1,5 x 6 m	50 mm/h	> 4 h	+	+	+	Macropores observés. Dispositif non placé dans la plus forte pente et une partie sur sentier.
2	21/12	< 15°	1,5 x 6 m	40 mm/h	16 h	-	-	-	
	22/12								
3	22/12	38°	1,5 x 2 m	55 mm/h	3 heures	+	+	+	Faible ruissellement de surface sur feuilles mortes.
	22/02		1,8 x 2 m	90 mm/h			-		
4	20/02	25°	1 x 3 m	160 mm/h	48 h au total	-	-	-	Faible ruissellement de surface sur feuilles mortes. Montage qui a gelé la nuit sans interrompre la pluie. Sol non gelé.
	21/02			130 mm/h					
	22/02								

* : Mesure au niveau à bulle.

** : Surface recevant approximativement 80 % de la pluie.

*** : Intensité moyenne de pluie calculée à partir des vitesses de vidange des bidons intermédiaires.

Tableau 2: Caractéristiques des simulations de pluie

Plusieurs observations ont été effectuées :

- la quantité d'eau à l'exutoire est toujours faible ($\approx 10\%$) devant la quantité introduite (300 à 500l/h).
- l'eau ne ressort qu'après plusieurs dizaines de minutes de pluie.
- on confirme l'absence de ruissellement en surface, à l'exception de celui, négligeable, sur les feuilles.
- le ruissellement de subsurface ne dépasse pas le goutte-à-goutte, contrairement à ce qu'indiquait la bibliographie.
- on n'observe d'écoulements plus profonds que sous forme de ruissellement torrentiel sur la roche mère faiblement enfouie (3 m).

On se concentre alors sur les écoulements profonds observés. Dans le but de préciser le comportement de l'eau dans le sol et d'évaluer sur le terrain la vitesse de déplacement de l'eau, nous avons tenté un traçage au sel suivant deux protocoles. Après établissement des écoulements par de l'eau pure, l'un d'eux consiste en une pluie salée, tandis que pour l'autre nous avons versé ponctuellement un bidon d'eau salée à 50g/l (détectable après dilution) sans interrompre la pluie d'eau pure. Nous avons essayé de vérifier que le sel constituait un bon traceur de l'eau.

Pendant les 45 minutes de mesure après l'introduction d'eau salée, aucune apparition de sel n'a pu être détectée par conductimétrie à l'exutoire. Il y a donc des phénomènes de stockage de l'eau dans le sol.

5. Réalisation de colonnes de terre

Nous avons complété nos observations de terrain par des traçages sur des colonnes de terre prélevée sur le site de simulation.

En opposition avec la simulation de pluie, elles permettent de quantifier les flux entrants et sortants, de connaître la distance parcourue et la nature du sol. L'une d'elles reproduit un de nos protocoles de simulation de pluie (saturation eau pure – eau salée – eau pure). L'eau salée ressort au bout de 90min (Fig. 18). Celle-ci permet de déterminer une vitesse expérimentale de l'eau de 36cm/h (colonne de 54cm), cette valeur est compatible avec l'absence de sel à la sortie au bout de 45 minutes de simulation de pluie sur le terrain. Cette vitesse est en revanche trop faible pour rendre compte à elle seule du faible temps de réponse du bassin après de fortes pluies répétées (cf I.3)

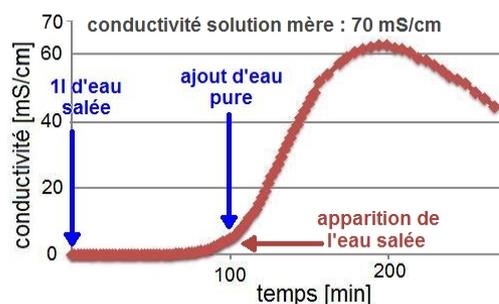


Fig. 18: Suivi de la conductivité (première colonne)

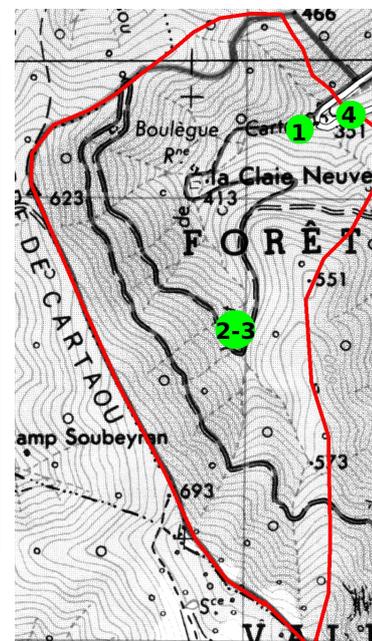


Fig. 17: Localisation des sites de pluie simulée (d'après carte IGN)

Conclusion

Du point de vue de la compréhension du bassin, les expérimentations sur le terrain nous ont montré l'importance du phénomène d'infiltration et du stockage d'eau infiltrée dans le sol comme le décrit formellement le modèle SCS. Il apparaît donc que la contribution du ruissellement de surface à la genèse des crues est très improbable, ce qui est confirmé par la bibliographie [1]. En revanche, le ruissellement de subsurface, abondamment décrit [1], n'a pas été observé, tandis que des écoulements à même la roche mère semblent prédominer, ce qui semble une originalité de ce bassin.

Cependant, nos manipulations, parce que ponctuelles dans un bassin hétérogène et parce que ne parvenant pas à identifier toujours clairement le comportement de l'eau *in situ*, nous montrent la difficulté à progresser vers des modèles physiques de comportement du bassin. De plus, les mesures réalisées ne s'agrègent pas à l'échelle du bassin en une donnée pertinente.

Du point de vue opérationnel, les modèles empiriques, a priori illégitimes apparaissent d'une efficacité perturbante. Ainsi, sous réserve d'acquisition de chroniques conséquentes de données pluie-débit, SCS semble fournir, pour le cas particulier du Cartaou, de robustes prévisions. C'est entre autre pourquoi les professionnels de la prévision (*e.g.* : SCHAPI) le choisissent. Ainsi, du point de vue de la protection civile, qu'importent les mécanismes, pourvu qu'on ait la prévision.

Néanmoins, la prévision pluie-débit repose par définition sur celle, quantifiée, de la pluie. Celle-ci, soumise à de fortes incertitudes, est fournie par MétéoFrance à l'horizon de six heures sur des mailles de grande taille. Les modèles pluie-débit héritent donc *de facto* des limites des prévisions de pluie.

Références et bibliographie

- a. Valérie Borrell-Estupina, HydroSciences Montpellier, UMR 5569, UM2, *Exemples de la Vallée Obscure et du vallon du Rouquet*. Supplément au n° XXXIII des Études de Géographie Physique.
 - b. Pierre-Alain Ayrat, Enseignant Chercheur, Équipe Risques Industriels et Naturels, Centre de recherche LGEI (Laboratoire Génie de l'Environnement Industriel et des risques), École Des Mines d'Alès (ÉMA). Chercheur associé UMR ESPACE 7300 CNRS.
 - c. Christophe Bouvier, Hydrologue, directeur de recherche IRD, laboratoire HSM UMR 5569, UM1-UM2-CNRS-IRD.
 - d. UMR 7300 Espace, universités Aix-Marseille, Avignon et Nice.
 - e. SCHAPI : Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations, <http://www.environnement.gouv.fr/>.
 1. Pierre-Alain Ayrat, (2005), *Contribution à la spatialisation du modèle opérationnel de prévision des crues éclair ALHTAIR ; Approches spatiale et expérimentale, application au bassin versant du Gardon d'Anduze*, thèse de doctorat, Université Aix-Marseille.
 2. Emma Haziza, (2012), *Vers une approche territoriale du risque d'inondations: de la connaissance du risque à la réduction de la vulnérabilité*, cours de Master 2 Géorisques, UM2.
 3. Claude Martin *et al.* (2006), *Les systèmes de terrasses cévenols*.
 4. Carte géologique, BRGM, Saint-André-de-Valborgne (911) et Le Vigan (937).
 5. Agnès Ducharme *et al.*, (2009), *Description des modèles hydrologiques Annexe Volet 2*, UMR 7619 Sisyphe, Structure et fonctionnement des systèmes hydriques continentaux, UPMC.
 6. Base de données HyMex, <http://mistrals.sedoo.fr/HyMeX>.
 7. American Society of Civil Engineers, (1996), *Hydrology Handbook*, pp.103-114.
 8. Documentation d'Athys, www.athys-soft.org, (février 2012).
 9. Yves Tramblay *et al.*, (2010), *Assessment of initial soil moisture conditions for event-based rainfall-runoff modelling*, Journal of Hydrology 387 (176–187).
- Dans ce rapport, nous avons utilisé des données fournies par Météo France et le SCHAPI ainsi qu'un fond de carte IGN. Nous tenons à remercier l'UMR Espace et l'École des Mines d'Alès qui nous ont gracieusement fourni, respectivement, le MNT et les chroniques pluie-débit.