

Caractérisation multi-échelles des transferts hydriques sur un bassin méditerranéen.

Application à la prévision des crues éclair

Bilan provisoire

Avril 2006



Cadre et Objectifs

Le projet "**Caractérisation multi-échelles des transferts hydriques sur un bassin méditerranéen. Application à la prévision des crues éclair**" de l'IFR 123 ILEE (Institut Languedocien de Recherche sur l'Eau et l'Environnement) regroupe l'Ecole des Mines d'Alès, l'UMR Tetis Cemagref-Engref, Hydrosociences Montpellier et le BRGM. L'équipe ESPACE, UMR 6012, qui assure les expérimentations et le suivi des bassins du Valescure, sur la zone d'étude, est également associée à ce projet. Les travaux développés dans ce projet entrent par ailleurs dans le cadre de l'ORE OHM-CV, qui a contribué au financement des équipements (voir fiche budgétaire).

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

La protection contre ces crues, tant par la prévention que par la prévision, passe par une meilleure connaissance des transferts de l'eau dans le bassin. Cette connaissance est un fondement physique qui assure aux modèles hydrologiques leur capacité à être extrapolé dans le temps (vers les extrêmes ou dans un environnement évolutif) et dans l'espace (transposition à des bassins non jaugés).

Divers processus élémentaires, éventuellement combinés, peuvent être à l'origine de ces crues : ruissellement par excès d'infiltration ou par excès de saturation, écoulements préférentiels dans les macro-pores des horizons superficiels des sols ou dans les roches fracturées, effet piston, exfiltration, intumescence de nappe. Chacun de ces processus induit une dynamique très différente en ce qui concerne les volumes produits et les temps de réponse, et il importe d'identifier ces processus et leur combinaison pour obtenir une prévision hydrologique de qualité.

Le bassin retenu est le Gardon en amont d'Anduze (545 km²), qui a fait l'objet depuis plus d'une vingtaine d'années de différents travaux de modélisation, dont l'interprétation physique reste difficile. Ce bassin typique de la zone cévenole est sujet à des crues dont les temps de montée sont très rapides. Les sols étant localement très filtrants, dans leur quasi-totalité, ce bassin pose clairement la question de savoir comment les écoulements sont mis en vitesse au sein du bassin, quels sont les processus dominants qui gouvernent la formation des crues, et quelles sont les caractéristiques du bassin qui expliquent ces processus.

Mis en forme : Couleur de police : Rouge, Exposant

Ces questions ne peuvent être traitées indépendamment des échelles d'espace. Ainsi, les temps de transfert sub-superficiels peuvent-ils être déterminants à l'échelle de la parcelle, et tout à fait négligeables à l'échelle de bassins de plusieurs dizaines ou centaines de km². Le cas inverse peut également se produire. La dépendance des processus élémentaires aux changements d'échelle intervient également dans notre capacité à relier les échelles d'observation (de l'ordre de quelques mètres à quelques dizaines de mètres) aux échelles d'intérêt, pour interpréter la réponse hydrologique de bassins de quelques dizaines, voire centaines de km². La démarche suivie dans ce projet se veut donc ascendante pour conserver le lien entre échelles d'observation et échelles d'intérêt.

Mis en forme : Police : 11 pt, Couleur de police : Rouge, Exposant

Travaux réalisés

Les travaux ont porté sur trois domaines complémentaires :

la caractérisation du milieu et de son organisation spatiale, en mettant notamment l'accent sur les propriétés texturales, structurales et hydrodynamiques des sols, sur la densité et la géométrie du réseau de drainage (avancement estimé à 60 %) ;

Supprimé : -

l'observation des transferts d'eau aux différentes échelles : locale, versant et bassin. Ces observations ont motivé la mise en place de parcelles expérimentales, le suivi spatio-temporel des teneurs en eau et des nappes, l'utilisation de traceurs chimiques et environnementaux, la prospection géophysique (avancement estimé à 80 %) ;

Mis en forme : Couleur de police : Rouge

Supprimé : -

la modélisation des transferts d'eau aux différentes échelles, basée sur les expérimentations sur parcelles, sur les observations multi-variables recueillies sur les petits bassins du Valescure, et sur les données pluie-débit disponibles sur différents affluents des Gardons (avancement estimé à 40 %) ;

Mis en forme : Couleur de police : Rouge

Supprimé : -

Mis en forme : Couleur de police : Rouge

Sites expérimentaux

Ces travaux se sont appuyés sur 3 sites expérimentaux : Sumène et Tourgueille, sur terrains schisteux, Peyrolles sur terrain granitique. Ces sites ont concentré les mesures destinées à caractériser les sols et le réseau de drainage, ainsi que les observations concernant les processus de transfert aux échelles parcelle et versant.

Le site de Peyrolles est intégré dans le dispositif des petits bassins du Valescure, mis en place par l'UMR ESPACE depuis 2002. Ce dispositif comprend 6 bassins de 0,28 à 4 km², sur roches cristallines (granite et/ou gneiss), équipés de stations hydrométriques et de pluviographes. L'équipement est complété par une station TDR de mesure de l'humidité des sols (12 sondes réparties sur 4 profils, avec une profondeur maximale atteignant 140 cm) et par deux piézographes disposés en bas de versant en peu en amont de la station amont du Valescure.

Enfin, 12 sites de prélèvements d'eau ont été mis en place sur le bassin, afin d'identifier l'origine et les chemins des eaux via des outils chimiques (éléments majeurs et traces) et isotopiques (isotope du strontium ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr).

Principaux résultats

Propriétés hydrodynamiques et structurales des sols : Les conductivités hydrauliques à saturation ont été mesurées à l'aide de différents infiltromètres; elles sont de l'ordre de plusieurs centaines de mm/h sur les terrains schisteux et granitiques, qui composent l'essentiel du bassin étudié. Elles sont relativement homogènes dans l'espace, et varient peu sur un profil vertical. Les épaisseurs des sols varient de 10-20 cm à 1m et plus, pour les sols sur terrasses. Les structures verticales des sols doivent être précisées par mesure des résistivités électriques (cf. prospection géophysique). Les propriétés texturales et granulométriques ont également été caractérisées. L'ensemble de ces caractéristiques confirme le caractère très filtrant des sols, et leur capacité à stocker plusieurs dizaines, voire centaines de millimètres de précipitations.

Supprimé : sols : les

Densité et géométrie des réseaux de drainage en surface : La densité et la géométrie du réseau de drainage conditionnent la rapidité du transfert à la surface des versants. Dans le contexte du gardon d'Anduze, la densité et la géométrie des ravines de versant peuvent également jouer un rôle important dans la capacité du réseau de drainage à intercepter les écoulements de sub-surface, pour les remettre en écoulement gravitaire. Sur le site de

Supprimé : surface : ¶
¶

Tourgueille ont débuté des travaux de reconnaissance de drains à différentes échelles. Les travaux s'organisent autour de 2 thèmes : 1) la faculté de reconnaissance du réseau de drain à partir d'imagerie spatiale et de MNT, et 2) le fonctionnement hydrologique de ces drains. Pour le point 1, une base de données a été développée : elle comprend un MNT issu de digitalisation de cartes au 1/25000, des relevés topographiques et GPS in situ ; des photographies aériennes et images satellite Quickbird à THRS (très haute résolution spatiale, i.e. $r=0.70$ m) sont en cours d'acquisition. Le but est d'en déduire une cartographie automatique du réseau de drainage par différentes approches et échelles avec focalisation sur leur validation et précision respectives. Pour répondre au point 2, des débits sur une trentaine de points en ravines, ont été mesurés lors de 4 périodes bien différenciées : la gamme des débits est de l'ordre de 1 à 20. Cette observation spatialisée des débits est destinée à comprendre et modéliser la mise en eau des ravines, leur évolution temporelle, en lien avec une densité de drainage effective évolutive dans le temps.

Écoulements sur parcelles expérimentales : Une dizaine de parcelles ont été expérimentées, sur les sites de Tourgueille, Sumène et Peyrolles, pour mesurer les écoulements de surface, et dans certains cas, les écoulements de sub-surface, sous pluies artificielles. Les résultats montrent que le ruissellement de surface est négligeable, sous des pluies artificielles de 100 à 300 mm/h. Les écoulements de sub-surface peuvent représenter de 30 à 60 % des précipitations. L'interprétation des résultats montre cependant que le ruissellement de surface pourrait être beaucoup plus important, en conditions de pluies naturelles, compte tenu des apports de sub-surface en amont de la parcelle, conduisant à une saturation plus rapide des sols. Les vitesses de transfert en sub-surface ont été estimées à quelques (3-5) cm/mn sur 3 parcelles, à l'aide d'un dispositif combinant pluies artificielles, mesures d'humidité par TDR et résistivités électriques en aval. Une vitesse très supérieure (1m/mn) a cependant été mesurée sur une autre parcelle, et suggère dans ce cas un autre type de transfert, qui reste à déterminer.

Supprimé : ¶

Supprimé : expérimentales : une

Supprimé :

Traceurs chimiques : Les traceurs chimiques ont été utilisés dans un double objectif : caractériser les contributions des affluents drainant des bassins à géologie contrastée ; caractériser les contributions des eaux de sub-surface aux écoulements de surface, pour les versants géologiquement homogènes. Plusieurs traceurs ont été analysés : ions majeurs, traces (Sr, Rb), isotopes du Strontium $^{86}\text{S}/^{87}\text{Sr}$. Ces derniers offrent l'avantage d'avoir une stabilité dans le temps très largement supérieure aux échelles d'observation des crues, et de ne pas subir de fractionnement, par évaporation notamment.

Supprimé : chimiques

Supprimé : objectif

Supprimé : analysés

Les principaux résultats obtenus portent sur : i) l'identification des signatures isotopiques et chimiques des écoulements provenant des différentes unités géologiques, et leur conformité avec des résultats obtenus dans d'autres régions, ii) la caractérisation des contributions des différents affluents aux crues observées à l'exutoire du Gardon d'Anduze, iii) la caractérisation des eaux de sub-surface aux écoulements de surface dans la partie granitique du bassin de la Salendrinque (Fig.1).

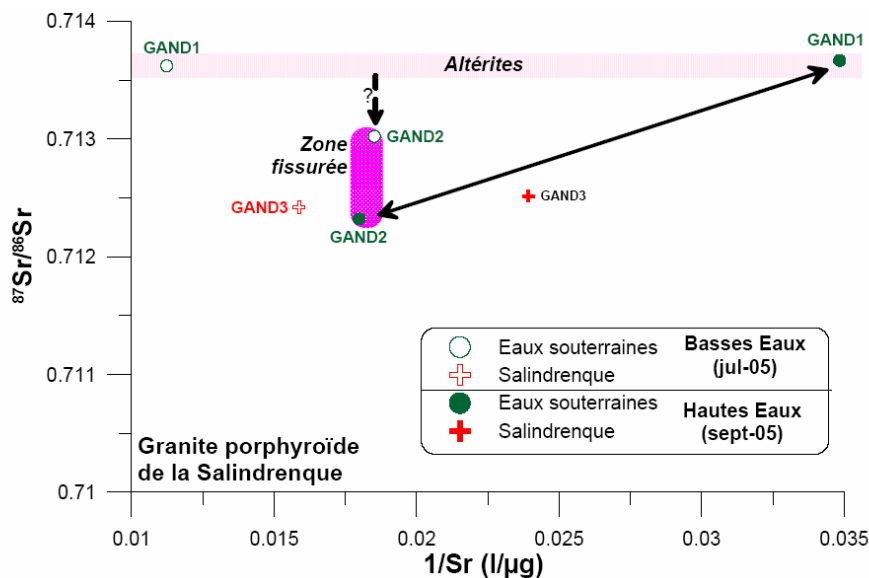
Supprimé : sur

Figure 1 : composition chimique et isotopique des eaux du bassin de la Salendrinque. Les eaux de la zone altérée (Gand1) sont prélevées dans une source, les eaux de l'aquifère de la roche fracturée (Gand2) dans un forage, les eaux de surface (Gand3) dans la rivière Salendrinque. En hautes eaux, la composition des eaux de surface se trouve à proximité de la droite de mélange des aquifères profonds et superficiels (dans quelles proportions ?). La composition des eaux des altérites est elle-même un mélange d'eaux anciennes et d'eaux de pluie infiltrée (dans quelles proportions ?). On en déduit les contributions à la crue des différents compartiments : surface, altérites et aquifère profond.

Supprimé : Figure 1

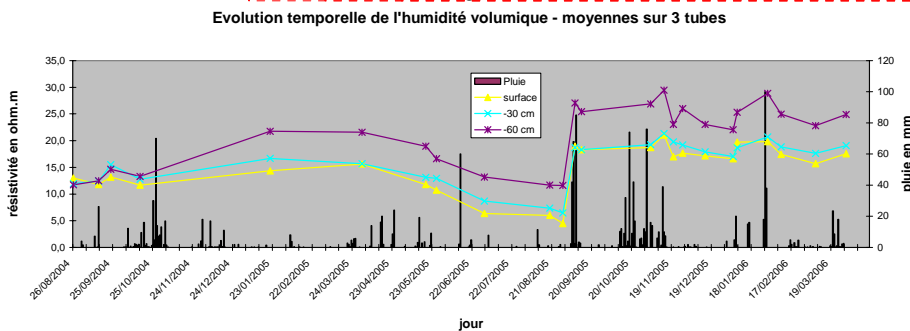
Supprimé : ?) ?.

Supprimé : compartiments



Dynamique spatio-temporelle des teneurs en eau : Trois aspects ont été abordés – dynamiques locales intra et inter-événementielle, variabilité spatiale. La dynamique intra-événementielle a été suivie sur le site de Valescure, à l'aide de mesures TDR pratiquées sur 4 profils verticaux. On note que les teneurs en eau reviennent à leur état initial moins de 24 heures après l'épisode pluvieux, lorsque les valeurs initiales sont supérieures à 15 %. Dans le cas contraire, l'eau est en partie retenue par le sol, et les teneurs en eau diminuent beaucoup plus lentement. Deux piézomètres situés en bas de versant permettent en outre d'observer clairement la dynamique de saturation des sols et le développement de nappes de versant au cours des événements pluvieux. La dynamique inter-événementielle a été suivie sur les sites de Sumène et Valescure (Fig.2). La variabilité spatiale fera l'objet de mesures TDR et de sondages électriques (cf prospection géophysique). On cherchera à relier les stocks hydriques à un temps donné, à un indicateur spatial du type indice de similarité hydrologique (indice de Beven).

Figure 2 : évolution des teneurs en eau en 2005 – sites de Sumène et de Valescure. Les teneurs en eau des sols varient entre 5 et 30 % entre les événements pluvieux, selon la saison et la profondeur du sol. Les fluctuations sont semblables jusqu'à une profondeur de 30-40 cm, dont les teneurs en eau sont inférieures à 10 % pendant les mois chauds (juillet, août), et comprises entre 10 et 20 % selon les forçages atmosphériques (températures et vents); à des profondeurs supérieures, les teneurs en eau fluctuent entre 12 et 30 % au long de l'année.



- Supprimé : ¶
- ¶
- ¶
- Supprimé : eau : trois
- Supprimé : abordés
- Supprimé : aval
- Supprimé :
- Supprimé : t
- Supprimé : site
- Supprimé : xx
- Supprimé : yy
- Supprimé : les plus importantes interviennent dans les horizons superficiels (prof < zz
- Supprimé :)
- Supprimé : xx
- Supprimé : yy
- Supprimé : zz
- Supprimé : précipitations
- Supprimé : moins,
- Supprimé : xx
- Supprimé : zz % tout
- Supprimé : ¶
- ¶
- (Claude, Pascal, est-ce que vous pouvez compléter avec un graphique de l'évolution annuelle des teneurs en eau à différentes profondeurs d'un profil vertical; en faisant figurer pluies et températures si possible)¶
- ¶
- ¶

Prospection géophysique : Les résistivités électriques ont été mesurées sur différentes sections 2D, afin de caractériser les teneurs en eau et les structures des sols. Les résistivités mesurées dépendent de différents facteurs physiques : nature du matériau, teneur en eau, solution des sels minéraux, et dans une certaine mesure du type de sondage : Wenner-Schlumberger, pôle-dipôle, dipôle-dipôle... Sur les essais effectués, le signal électrique est principalement influencé par la teneur en eau. Les stocks hydriques peuvent être estimés sur des profondeurs importantes, incluant notamment la zone des roches altérées, difficile à investiguer par d'autres moyens. Indirectement, les caractéristiques structurales sont déduites de la répartition des teneurs en eau. Cette technique, non intrusive, s'avère donc très prometteuse pour explorer plus systématiquement les versants, et caractériser les stocks hydriques (Fig.3), leur dynamique temporelle et leur variabilité spatiale.

Supprimé : géophysique : les

Supprimé : sondage

Supprimé :

Figure 3 : panneau 2D des résistivités électriques – site de Sumène. On observe en surface une variabilité des résistivités, traduisant des teneurs en eau différentes (de 10 à 25 %, mesurées par TDR) probablement liées à des porosités variables du matériau de surface. Les teneurs en eau sont ensuite homogènes sur une profondeur d'environ 1 m, sur toute la largeur de la mesure (environ 15 à 20 m, mesurées par TDR), et renvoient à un matériau homogène, au regard de sa capacité de stockage, voire de ses propriétés hydrodynamiques. Enfin, les résistivités augmentent au delà de 1,50m, traduisant une diminution significative des teneurs en eau du fait de l'apparition de la roche saine ou peu fracturée. On peut estimer globalement le déficit à saturation à environ 300 mm (profondeur 1,5m, porosité moyenne 0,4, teneur en eau moyenne 0,2).

Supprimé : Figure 3

Supprimé : 25

Supprimé : -

Supprimé : .

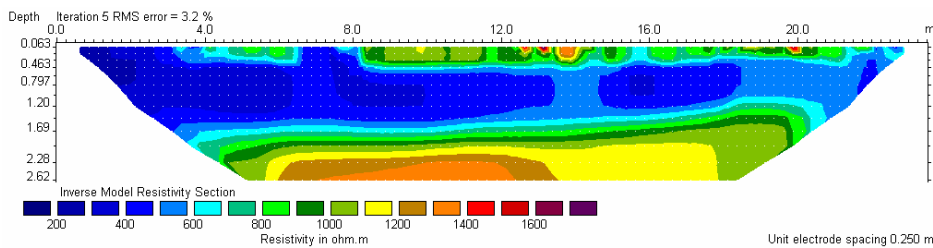
Supprimé : .

Supprimé : .

Supprimé : .

Supprimé : .

Supprimé : .



Modélisations physiques et équivalentes : Les modélisations interviennent à différentes échelles, locales, versant et bassins. Aux échelles locales et versants, ces modélisations ont pour objectif d'extrapoler les résultats des expérimentations (de pluies artificielles à pluies naturelles, de la parcelle au versant), d'extraire les caractéristiques intrinsèques des sols (conductivité, potentiel matriciel), de tester l'impact de la variabilité spatiale du milieu, de proposer des modélisations simplifiées. Cette partie pourra faire l'objet d'une collaboration avec le CEREVE et l'IMFT, basée sur l'utilisation de modèles 2D de versant. Aux échelles versants et bassins, les modélisations mises en place s'appuieront sur les processus de transfert et les caractéristiques physiques mis en évidence précédemment. On cherchera à valider différents modèles susceptibles de recevoir une interprétation physique : TopModel, TopKapi (version distribuée de TopModel pour le transfert), SCS spatialisé, Althair. On cherchera également à faire apparaître l'influence de la variabilité spatiale du milieu sur les résultats de la modélisation et sur l'estimation des paramètres. Les tests seront réalisés sur les données multi-variables (pluies, débits, teneurs en eau, piézométrie) des bassins du Valescure, et sur les données pluie-débit disponibles sur les Gardons (Anduze, Saumane, Mialet).

Supprimé : équivalentes : les

Supprimé :

Supprimé :

Supprimé : physique

Conclusions (provisoires) et perspectives

Les observations et expériences réalisées sur le bassin du gardon d'Anduze sont cohérentes aux différentes échelles, et semblent bien confirmer que la formation des crues est

principalement liée au développement de zones saturées de versant. L'hydrodynamique de ces zones doit maintenant être reproduite à l'aide de modélisations s'appuyant sur les caractéristiques du milieu telles qu'elles ont été identifiées dans le cadre de ce projet : conductivités hydrauliques verticales et latérales, épaisseurs des sols, densité et géométrie des drains superficiels. Les conclusions obtenues à partir des traceurs chimiques sur les versants à géologie homogène doivent être approfondies afin de caractériser plus précisément les proportions eaux anciennes / eaux nouvelles dans les écoulements de surface, pour vérifier que ces proportions sont compatibles avec les processus invoqués, ou pour mettre éventuellement en évidence d'autres types de processus.

Supprimé : projet

D'un point de vue métrologique et méthodologique, ce programme montre l'intérêt des méthodes géochimiques pour la compréhension des processus de versant et pour l'estimation des contributions des réservoirs de sub-surface aux crues. La prospection géophysique a également fourni des résultats très prometteurs pour la caractérisation des stocks hydriques des formations superficielles, leur dynamique temporelle et leur variabilité spatiale.

Les différents aspects étudiés se prêtent à des publications, dont la rédaction doit constituer le principal objectif des 6 mois à venir. On peut estimer le nombre de publications qui seront soumises à l'issue du programme à 7 ou 8.

Les recherches développées dans ce programme seront approfondies dans le cadre de l'ORE OHM-CV, du Chantier Méditerranée, de projets déposés auprès de l'ANR (un projet, HYDRECLAIR, a été soumis à l'ANR-blanc), et diffusées dans le cadre de différentes initiatives internationales : FRIEND-Amhy, SLICE, PUB...

Supprimé : internationales

Fiche budgétaire

Le budget du projet était de 30.000 euros, destinés à :

- analyses : majeurs, traces et isotopes, 17.000 euros
- équipement : acquisition d'un résistivimètre Syscal Switch Junior, co-financé par OHM-CV, 8000 euros
- fonctionnement : petit équipement, tournées terrain, 5000 euros

A ce jour, le budget a été dépensé conformément aux prévisions. Le solde actuel est de 2000 euros, et sera utilisé pour le fonctionnement des 6 derniers mois.

Unités Participantes

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

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

ESPACE : C. Martin (CR), F. Didon-Lescot (IE), J. Jolivet (AJT)

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

TETIS : C. Puech (DR), J.-S. Bailly (MC)