



HAL
open science

**Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale :
Observation et modélisation hydro-météorologique
multi-échelle pour la compréhension et la simulation des
crues éclairs Quels apports pour les gestionnaires de
territoires et les fournisseurs de services ?**

Isabelle Braud

► **To cite this version:**

Isabelle Braud. Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale : Observation et modélisation hydro-météorologique multi-échelle pour la compréhension et la simulation des crues éclairs Quels apports pour les gestionnaires de territoires et les fournisseurs de services ?. Séminaire de restitution du projet ANR Floodscale, Nov 2015, Aix-en Provence, France. pp.109, 2015. hal-02602293

HAL Id: hal-02602293

<https://hal.inrae.fr/hal-02602293>

Submitted on 16 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Pôle Risques, ANR FLOODSCALE, 24 Novembre 2015, Aix en Provence

Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale :
Observation et modélisation hydro-météorologique multi-échelle pour la
compréhension et la simulation des crues éclairs

Quels apports pour les gestionnaires de territoires et les fournisseurs de services ?



Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale 24 Novembre 2015 Aix en Provence

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2	Christophe Bouvier, HSM Montpellier, Jean-Pierre Vandervaere, LTHE Grenoble avec les contributions de J. Andrieu et les étudiants de l'université de Nice, P.-A. Ayral, I. Braud, P. Brunet, J.-F. Didon-Lescot, J.-M. Domergue, S. Gérard, N. Grard, O. Le Bourgeois, M. Über, O. Vannier.....	39
PROGRAMME	3	Quelles avancées sur l'estimation des pluies et la quantification de leur incertitude?.....	55
Le projet FloodScale : Observation et modélisation hydro-météorologique multi-échelle pour la compréhension et la simulation des crues éclaircies.....	4	Guy Delrieu, LTHE Grenoble, Etienne Leblois, Irstea, HHL Y, Lyon , J. Carreau, HSM avec la contribution de A. Wijbrans, S. Anquetin, S. Chen, M. Ollagnier.....	55
Quelle stratégie d'observation et de modélisation pour l'étude des crues rapides?.....	7	Quels progrès en hydrométrie des crues et quantification des incertitudes ?	71
Isabelle Braud (Irstea, UR HHL Y), avec la contribution des participants au projet FloodScale.....	7	Guillaume Dramais ¹ , Jérôme Le Coz ¹ , Benjamin Renard ¹ , Ivan Horner ¹ , Raphaël Le Boursicaud ² , Antoine Gallavardin ¹ , Isabelle Braud ¹ , Alexandre Hauet ³ , ¹ Irstea, HHL Y, Lyon ; ² CNR, CACOH, Lyon ; ³ EDF DTG, DMM, Grenoble.....	71
Quelles connaissances nouvelles à l'échelle des petits bassins versants ?	21	Quelles avancées sur la modélisation des processus hydrologiques actifs durant les crues et apports pour l'amélioration de la prévision?.....	85
Pierre-Alain Ayral, EMA/ESPACE Alès; Guillaume Nord, LTHE Grenoble Avec la contribution de : Julien Andrieu (UMR ESPACE), Isabelle Braud (Irstea, UR HHL Y), Christophe Bouvier (HSM), Guy Delrieu (LTHE), Brice Boudevillain (LTHE), Jean-François Didon-Lescot (UMR ESPACE), Jean-Marc Domergue (UMR ESPACE), Johnny Douvinet (UMR ESPACE), Simon Gérard (LTHE), Nadine Grard (UMR ESPACE), Jérôme Lecoz (Irstea, UR HHL Y), Philippe Martin (UMR ESPACE), Laurent Nottale (Observatoire de Paris-Meudon), Sandra Perez (UMR ESPACE), Jean-Pierre Vandervaere (LTHE), Annette Wijbrans (LTHE).....	21	Isabelle Braud ¹ , Flora Branger ¹ , Sandrine Anquetin ² ; Marko Adamovic ¹ , Olivier Vannier, ² ¹ Irstea, HHL Y, Lyon, ² LTHE, Grenoble.....	85
Quelles connaissances nouvelles à l'échelle du versant et modélisation ?	39		

PROGRAMME

9h30- 10h00 Accueil des participants

10h00-10h15 Ouverture du séminaire

Mme Anna Philippe, chargée de mission innovation, Pôle Risques, et Mr Bruno Janet, Chef du Pôle Modélisation, Schapi

10h15-10h45 Quelle stratégie d'observation et de modélisation pour l'étude des crues rapides?

I. Braud, Irstea Lyon Villeurbanne

10h45-11h15 Quelles observations et connaissances nouvelles à l'échelle des petits bassins versants ?

PA Ayrat UMR ESPACE et Ecole des Mines d'Alès et G Nord, LTHE Grenoble

11h15-11h45 Pause

11h45-12h15 Quelles connaissances nouvelles à l'échelle du versant et modélisation intégrée?

C. Bouvier, HydroSciences Montpellier et JP Vandervaere, LTHE Grenoble

12h15-14h00 Déjeuner sur place

14h00-14h30 Quelles avancées sur l'estimation des pluies et la quantification de leur incertitude ?

G Delrieu, LTHE Grenoble et E Leblois, Irstea Lyon Villeurbanne

14h30-15h20 Quels progrès en hydrométrie des crues et quantification des incertitudes ?

G Dramais, J. Le Coz, Irstea Lyon Villeurbanne

Témoignage d'A. Hauet (EDF-DTG) et B. Bompert (CNR) sur l'apport de la recherche en hydrométrie et la participation à un projet de recherche dans leurs pratiques opérationnelles

15h20- 15h45 Pause

15h50-16h30 Quelles avancées sur la modélisation des processus hydrologiques actifs durant les crues et apports pour l'amélioration de la prévision

I Braud, F Branger, Irstea Lyon Villeurbanne)

Témoignages de Y. Laborda (SPC Grand Delta) et A. Marchandise (SPC MedOuest) sur les besoins opérationnels en termes de pluviométrie et de modélisation et l'intérêt des résultats de la recherche dans ce cadre.

16h30-17h Discussions et synthèse

Le projet FloodScale : Observation et modélisation hydro-météorologique multi-échelle pour la compréhension et la simulation des crues éclairs

Objectifs

Le projet FloodScale a pour objectif d'améliorer la compréhension et la simulation des processus hydrologiques conduisant à des crues rapides (ou crues éclairs), qui sont l'un des risques naturels les plus destructeurs, notamment en région Méditerranéenne. Ces crues affectent des territoires assez vastes mais souvent de petits bassins non jaugés. La variabilité spatiale et temporelle de la pluie, celle des caractéristiques des paysages et de l'humidité des sols sont reconnues comme des facteurs importants influant sur la génération de crues éclairs. Le projet a cherché à quantifier et le rôle de leurs variabilités à différentes échelles et à proposer des outils de simulation. La compréhension des crues éclairs constitue aussi un défi météorologique puisqu'elle requiert des observations à des échelles spatiales et temporelles très fines (1 km², 5min), mais aussi sur de très vastes régions, sans compter la difficulté de les observer compte tenu de leur rapidité.

Coordination

Isabelle Braud (Irstea, UR HHLY, isabelle.braud@irstea.fr)

Partenaires

Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique, Irstea Lyon-Villeurbanne ; Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE, UMR 5564 CNRS, Grenoble-INP, IRD, Université de Grenoble), Grenoble ; HydroSciences (UMR 5569 CNRS, IRD, Université Montpellier 1 et 2), Montpellier ; Étude des Structures, des Processus d'Adaptation et des Changements de l'Espace (ESPACE UMR 7300 CNRS, Aix-Marseille Université, Université Avignon et des Pays de Vaucluse et de Nice Sophia-Antipolis), Nice.

Financements

Agence Nationale de la Recherche (projet ANR 2011 BS56 027 01) et des contributions de programme MISTRALS/HyMeX, de l'observatoire OHM-CV, de la région Rhône-Alpes, du Schapi, de l'Ecole des Mines d'Alès, de l'Université de Montpellier 1, de l'OSUG. Le séminaire de restitution a été organisé par le Pôle Risques et est parrainé par le Schapi.

Résumé

Le projet FloodScale se concentre sur deux sites pilotes de l'Observatoire Hydrométéorologique Cévennes-Vivarais (OHM-CV): les bassins du Gard et de l'Ardèche. Il s'appuie sur une stratégie d'observations et de modélisation multi-échelle, depuis le versant jusqu'au bassin de 1000 km², en passant par les bassins de 1 à 100 km². Les observations visent à documenter la variabilité spatio-temporelle des pluies et des réponses hydrologiques (débits, niveaux d'eau dans les cours d'eau, humidité des sols) à ces différentes échelles, en lien avec les caractéristiques des bassins (topographie, géologie, pédologie, occupation du sol). Un effort important porte sur le développement de méthodes d'observations innovantes et la quantification des incertitudes de mesures, notamment sur les débits de crue. La modélisation est utilisée pour formaliser et évaluer différentes hypothèses de fonctionnement hydrologique en comparant la réponse simulée aux observations.

Durant 4 ans, le projet a permis l'acquisition de jeux de données uniques qui ont été exploités pour mieux comprendre les processus et proposer des outils de simulations. Les données et connaissances acquises devraient permettre à terme d'améliorer les pratiques opérationnelles via des progrès sur les outils de modélisation utilisés et une appréhension plus globale du risque à l'échelle d'un territoire.



Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale

Quelle stratégie d'observation et de modélisation pour l'étude des crues rapides?

Isabelle Braud, Irstea, HHLY, Lyon

avec la contribution de tous les participants à FloodScale



Quelle stratégie d'observation et de modélisation pour l'étude des crues rapides?

Isabelle Braud (Irstea, UR HHLV), avec la contribution des participants au projet FloodScale

Contexte (diapos 2 et 3)

Chaque année, spécialement à l'automne, des épisodes pluvieux intenses, dits Méditerranéens, affectent les départements du sud de la France. Ces épisodes, conduisant à des cumuls de pluie importants (quelques centaines de mm en quelques heures ou quelques jours). La figure de la diapo 1, tirée du site de Météo-France¹ présente le nombre d'épisodes par an avec un cumul de pluie >150mm /jour et on voit que les départements du sud de la France, principalement le Gard, l'Ardèche et l'Hérault sont les départements les plus affectés. Ces épisodes de pluie conduisent souvent à des crues rapides, parfois dévastatrices. Les exemples récents incluent Nîmes en 1988, Vaison la Romaine en 1992, l'Aude en 1999, le Gard en 2002, le Var en 2010 ou les Alpes Maritimes en 2015, sans oublier la dizaine d'épisodes ayant affecté le sud de la France en 2014.

Les conséquences de ces crues sont des submersions de bâtiments, mais aussi des coupures de route sur des petits cours d'eau coupant le réseau hydrographique. L'analyse des victimes de la crue de septembre 2002 dans le Gard a ainsi montré qu'environ la moitié des victimes, plutôt jeunes, avaient péri sur des petits bassins de taille <20 km² dans leur véhicule et l'autre moitié, plutôt âgée, dans les bâtiments, sur des bassins >1000 km² (Ruin et al., 2008). Sur les petits bassins, il y a très peu d'informations car, en France, la majorité des stations hydrométriques concernent des bassins de plus de 50 km² et l'alerte hydrologique (Vigicrues²) concerne les cours d'eau principaux.

¹ http://pluiesextremes.meteo.fr/statistiques_r6.html

² <http://www.vigicrues.gouv.fr/>

Quelles sont les caractéristiques d'une crue rapide ? (diapos 4 et 5)

Lorsqu'on parle de crue rapide ou crue éclair, de quoi parle-t-on ? Dans nos travaux, nous avons retenu la définition suivante (Braud et al., 2014) : une crue rapide conduit à une hausse de la hauteur d'eau rapide (en quelques heures pour les bassins de 1-100 km²) et moins d'une journée pour les bassins de quelques milliers de km². Elle est provoquée par un épisode pluvieux intense conduisant à de fortes intensités sur quelques heures ou des cumuls importants sur un à deux jours.

La pluie se caractérise par une forte variabilité spatiale et temporelle qui conduit à une forte variabilité spatiale de la réponse hydrologique (diapo 5 qui montre en couleur la pluie cumulée sur l'épisode du Var en 2010 et les valeurs de débit spécifique (points en couleur) estimées suite à un retour d'expérience hydrologique (Ruin et al., 2014), voir aussi présentation de Dramais et al.). Ces crues conduisent néanmoins toujours à des valeurs élevées des débits spécifiques. Nous avons retenu une valeur assez basse de 0.5 m³ s⁻¹ km⁻² minimum, mais des valeurs de 20-40 m³ s⁻¹ km⁻² peuvent être atteintes.

Les épisodes de précipitations intenses conduisant aux crues rapides restent encore difficiles à anticiper. En particulier prévoir leur localisation exacte n'est pas encore possible dans les modèles de prévision du temps. L'alerte météo est pour le moment donnée à l'échelle d'un département mais la localisation exacte des bassins/communes impactées n'est pas encore disponible.

La connaissance des débits de crue durant ces crues rapides est très fragmentaire. En effet, de nombreux bassins ne sont pas jaugés, mais, de plus, s'ils le sont, les débits de crues sont largement extrapolés car il est trop dangereux (pour les opérateurs et le matériel) de réaliser des mesures de débits en crue. Il y a donc de fortes incertitudes sur les débits de crue.

Etat des connaissances et objectifs du projet FloodScale (diapos 6 et 7)

Plusieurs projets européens récents ont abordés la problématique des crues éclairs, notamment le projet HYDRATE³ (2006-2010). Ce projet avait permis de constituer une base de données européenne d'épisodes extrêmes et d'analyser les échelles spatiales et temporelles des différentes variables en jeu. Les résultats ont montré l'importance, selon les épisodes, de la variabilité spatio-temporelle de la pluie, mais aussi l'impact de la géologie, de l'occupation des sols et de l'humidité initiale des sols, sans qu'il soit toutefois possible de dégager des conclusions généralisables à l'ensemble d'un territoire. La compréhension des crues éclairs constitue par ailleurs un défi métrologique puisqu'elle requiert des observations à des échelles spatiales et temporelles très fines (1 km², 5min), mais aussi sur de très vastes régions et qu'elles sont difficiles à observer comme indiqué plus haut. Pour aborder ces questions, la littérature internationale préconisait la création et le suivi de bassins expérimentaux emboîtés et des études à différentes échelles : du versant aux bassins de l'ordre du millier de km², en passant par les bassins de taille petite à moyenne. Ce type de dispositif, combiné à des approches d'analyse des données et de modélisation renouvelées pouvaient permettre d'aborder les deux verrous scientifiques qui limitaient notre capacité de compréhension et de modélisation de ces phénomènes ; la question du changement d'échelle (comment transférer une connaissance acquise à une échelle à une autre échelle) et celle de la prévision en bassins non jaugés (ne disposant pas de données de débits permettant par exemple le calage de modèles hydrologiques).

Le projet FloodScale⁴ (Braud et al., 2014) avait pour objectif d'améliorer la compréhension et la simulation des processus hydrologiques conduisant à des crues rapides et de hiérarchiser les processus actifs à différentes échelles d'espace et de temps. Le projet avait aussi pour ambition de mieux caractériser et de réduire les incertitudes sur la connaissance de la pluie et des débits en crue. Il s'inscrit dans un programme plus vaste, le programme

HyMeX⁵ (Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment) qui s'intéresse au cycle de l'eau en Méditerranée, avec un focus sur les extrêmes. La question de la prévision des précipitations intenses est traitée dans le programme HyMeX. Le projet FloodScale se concentre sur l'étude de la réponse hydrologique à ces épisodes intenses. Les travaux sont plutôt des travaux de recherche « amont », visant à développer les connaissances qui permettront dans le futur, d'améliorer les outils de prévision opérationnels.

Méthode d'observation des crues rapides (diapos 8 à 18)

Les crues rapides affectent de larges zones (quelques milliers de km²), mais se manifestent souvent sur de petits bassins. Il y avait donc nécessité d'échantillonner toute une gamme d'échelle, notamment pour voir comment évoluent les processus dominants d'une échelle à l'autre. Le détail de la stratégie d'observation est décrit dans Braud et al. (2014). Nous avons proposé une stratégie d'observations multi-échelle centrée sur deux bassins de méso-échelle (le Gard et l'Ardèche) déjà suivis depuis 2000 dans le cadre de l'OHM-CV (Observatoire Hydro-Météorologique Cévennes-Vivarais⁶). Dans ces grands bassins, plusieurs petits bassins, avec des géologies et/ou des occupations du sol différentes ont été sélectionnés et des mesures de débits sur bassins emboîtés ont été mises en place (diapo 9). Trois échelles spatiales sont échantillonnées (diapos 10 à 14). L'échelle du versant permet de comprendre la genèse des écoulements (écoulement de surface ou de sub-surface, perméabilité/imperméabilité du socle) et on peut y documenter la variabilité spatiale des caractéristiques de surface. Différents versants en contextes géologiques (granite, schiste, calcaire) et d'occupation du sol (forêts, cultures) variés ont été choisis. A l'échelle des petits bassins de 1-100 km², nous avons documenté la variabilité de la topographie, de l'occupation du sol, de la géologie et des propriétés du sol et observé comment se génère le ruissellement et comment il se concentre dans les

³ <http://www.hydrate.tesaf.unipd.it/index.asp?sezione=Home>

⁴ <http://floodscale.irstea.fr/>

⁵ <http://www.hymex.org/index.php?lang=english&page=workshops>

⁶ <http://www.ohmcfv.fr/>

Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale 24 Novembre 2015 Aix en Provence

ravines et les cours d'eau. Cette instrumentation des petits bassins s'est accompagnée d'un renforcement des mesures pluviométriques pour documenter sa variabilité spatiale aux échelles pertinentes pour l'interprétation des données. A l'échelle des bassins les plus grands (Gard et Ardèche), les données opérationnelles ont été collectées et l'effort a porté sur la production de champs pluviométriques combinant radar et pluviographes et leur incertitude associée ainsi que sur la documentation des débits de crues via l'utilisation de méthodes sans contact (caméras, radars de vitesse, exploitation de films amateurs) et la quantification de leur incertitude. L'incertitude sur la pluviométrie a aussi été caractérisée via l'utilisation d'un simulateur stochastique de pluie.

Cette instrumentation en continue durant les quatre années du projet, combinant mesures recherche et opérationnelles, a été complétée par une stratégie de mesures sur alerte durant les quatre automnes 2012 à 2015 (diapo 15). Ces mesures sur alerte visaient à mesurer les débits de crue durant les épisodes importants, mais aussi l'humidité des sols ou l'échantillonnage géochimique des différentes composantes de l'écoulement. Ces interventions ont été permises grâce à une veille météo en continu de septembre à décembre s'appuyant sur le site <http://sop.hymex.org> mis en place durant la période d'observations intensives du programme HyMeX (Hydrological Cycle in the Mediterranean Experiment⁷) en 2012 et réactivé chaque automne entre 2013 et 2015 par Météo-France. Ce site nous a permis de disposer des prévisions du modèle Arôme de Météo-France, des bulletins météo des prévisionnistes Météo-France des départements du sud de la France, des images radars réactualisées toutes les 15 minutes et des observations des pluviographes. Nous avons aussi pu bénéficier des prévisions opérationnelles d'EDF-DTG et de la CNR sur nos secteurs d'intérêt, ainsi que des prévisions par analogues du LTHE de 2012 à 2014⁸. Ce dispositif s'est révélé efficace et nous a permis de documenter une dizaine d'épisodes, notamment durant l'automne 2014 (diapo 16).

Les données de débits en continu du réseau recherche ont aussi permis d'enrichir la gamme des échelles échantillonnées par les réseaux opérationnels et les retours d'expérience sur le secteur comme le montrent les points rouges sur la diapo 18.

Les données acquises durant le projet sont disponibles gratuitement pour la recherche sur différents sites : celui de la base de données HyMeX⁹, la base Sevnol¹⁰ de l'OHM-CV ou BDOH¹¹ des observatoires d'Irstea. Pour des usages commerciaux, les responsables des différents jeux de données doivent être contactés.

Stratégie de modélisation (diapos 19 et 20)

Les données collectées durant le projet sont utilisées dans des travaux de modélisation visant à formaliser les connaissances acquises à l'aide des observations et à tester la pertinence de différentes hypothèses de fonctionnement. Dans ce travail, dans la mesure du possible, les paramètres des modèles sont spécifiés à partir des observations et des informations disponibles et les modèles utilisés sans calage. Les simulations du modèle sont comparées aux observations et l'analyse porte essentiellement sur les différences qui peuvent être dues à une mauvaise prescription du forçage pluviométrique, une mauvaise spécification des paramètres, des problèmes dans la représentation des processus ou des processus non pris en compte. Ces différences nous amènent à revenir sur l'analyse des données, voire à acquérir des données supplémentaires. Ceci permet ensuite de faire évoluer le modèle et de recommencer ce processus itératif, jusqu'à obtenir un accord satisfaisant entre modélisation et observations.

En termes d'outils de modélisation, pour mettre en œuvre la stratégie décrite ci-dessus, il est utile de pouvoir s'appuyer sur des outils de modélisation souples et nous avons privilégiés l'utilisation de plateformes

⁷ <http://www.hymex.org/index.php?lang=english&page=workshops>

⁸ http://www.ohmcf.fr/P750_analogues.php

⁹ <http://mistrals.sedoo.fr/HyMeX/>

¹⁰ <http://www.ohmcf.fr/sevnol.php>

¹¹ <https://bdoh.irstea.fr/OHM-CV/>

de modélisation telles que JAMS¹², Liquid (Branger et al., 2010) ou ATHYS¹³.

Conclusions (diapos 21 et 22)

Le projet FloodScale aura permis l'acquisition de jeux de données uniques et très riches documentant les crues rapides à différentes échelles d'espace et de temps, mais aussi le fonctionnement « plus courant » des bassins versants grâce aux mesures en continu, permettant l'identification d'éventuels effets de seuil dans la réponse hydrologique. Sur la durée du projet, l'effort a essentiellement porté sur l'acquisition des données, leur qualification et leur mise à disposition dans des bases de données. Leur exploitation n'a été que partielle mais conduit déjà à des résultats intéressants qui sont détaillés dans les présentations suivantes. Il reste néanmoins encore un gros effort à réaliser pour analyser l'ensemble des données collectées.

Cependant, on peut d'ores et déjà mettre en avant quelques résultats phares du projet : la démonstration de l'intérêt d'une synergie forte entre observations et modélisation pour la compréhension des processus ; la production de champs pluviométriques à des résolutions spatiales et temporelles plus fines que les produits habituellement disponibles, ainsi que la quantification de leur incertitude ; l'amélioration, le développement et la validation de différentes techniques de mesures des débits sans contact, ainsi que la quantification des incertitudes sur la relation hauteur - débit et la propagation des erreurs sur les hydrogrammes.

Le projet FloodScale possède un caractère de recherche fondamentale assez marqué, mais les résultats obtenus peuvent avoir un intérêt pour des applications opérationnelles. Les développements en hydrométrie sont déjà diffusés dans les services opérationnels du Schapi (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Crues). Les connaissances acquises sur les processus peuvent alimenter des outils opérationnels en cours de développements tels que le modèle

ISBATopmodel développé au CNRM (Vincendon et al., 2010) ou MARINE (Roux et al., 2011 ; Garambois et al., 2013) développé à l'IMFT pour la prévision des crues rapides sur les bassins du sud de la France, la méthode AIGA¹⁴ (Lavabre et Grégoris, 2005 ; Javelle et al., 2014) de prévision des crues rapides, développée conjointement par Irstea et Météo-France, et qui devrait être opérationnelle d'ici un an ou la méthode IRIP (Indicateur de Ruissellement Pluvial Intense, Dehotin et Breil, 2011 ; Lagadec et al., 2015) proposée par Irstea pour la cartographie du risque de ruissellement intense.

Références

- Branger, F., Braud, I., Debionne, S., Viallet, P., Dehotin, J., Hénine, H., Nédélec, Y., Anquetin, S., 2010. Towards multi-scale integrated hydrological models using the LIQUID framework. Overview of the concepts and first application examples. *Environmental Modelling & Software*, 25: 1672-1681.
- Braud, I., Aral, P.A., Bouvier, C., Branger, F., Delrieu, G., Le Coz, J., Nord, G., Vandervaere, J.P., Anquetin, S., Adamovic, M., Andrieu, J., Batiot, C., Boudevillain, B., Brunet, P., Carreau, J., Confoland, A., Didon-Lescot, J.F., Domergue, J.M., Douvinet, J., Dramais, G., Freydier, R., Gérard, S., Huza, J., Leblois, E., Le Bourgeois, O., Le Boursicaud, R., Marchand, P., Martin, P., Nottale, L., Patris, N., Renard, B., Seidel, J.L., Taupin, J.D., Vannier, O., Vincendon, B., Wijbrans, A., 2014. Multi-scale hydrometeorological observation and modelling for flash flood understanding. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18(9): 3733-3761.
- Dehotin, J., Breil, P., 2011. Projet IRIP : Rapport technique - Cartographie de l'aléa ruissellement http://cemadoc.irstea.fr/exl-php/cadcgp.php?query=1&MODELE=vues/p_recherche_publication/home.html
- Garambois, P.A., Roux, H., Larnier, K., Castaings, W., Dartus, D., 2013. Characterization of process-oriented hydrologic model behavior with temporal sensitivity analysis for flash floods in Mediterranean catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17: 2305-2322.

¹² <http://jams.uni-jena.de/>

¹³ <http://www.athys-soft.org/v1/Index.html>

¹⁴ <http://www.irstea.fr/la-recherche/unites-de-recherche/ohax/hydrologie/aiga>

Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale 24 Novembre 2015 Aix en Provence

- Javelle, P., Demargne, J., Defrance, D., Pansu, J., Arnaud, P., 2014. Evaluating flash-flood warnings at ungauged locations using post-event surveys: a case study with the AIGA warning system. *Hydrological Sciences Journal*, 59(7): 1390-1402.
- Lagadec L-R, Patrice P., Chazelle B., Breil P., Braud I., 2015. Description and evaluation of a surface runoff susceptibility mapping method, *J. Hydrology*, in revision.
- Lavabre J., Gregoris Y., 2005. AIGA : un dispositif d'alerte des crues sur l'ensemble du réseau hydrographique. *Ingénieries EAT*, n° 44, 3-12, disponible sur <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00479162/document>
- Roux, H., Labat, D., Garambois, P.A., Maubourguet, M.M., Chorda, J., Dartus, D., 2011. A physically-based parsimonious hydrological model for flash floods in Mediterranean catchments. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(9): 2567-2582.
- Ruin, I., Creutin, J.D., Anquetin, S., Lutoff, C., 2008. Human exposure to flash-floods- relation between flood parameters and human vulnerability during a storm of September 2002 in Southern France. *Journal of Hydrology*, 361: 199-213.
- Ruin, I., Lutoff, C., Boudevillain, B., Creutin, J.D., Anquetin, S., Rojo, M.B., Boissier, L., Bonnifait, L., Borga, M., Colbeau-Justin, L., Creton-Cazanave, L., Delrieu, G., Douvinet, J., Gaume, E., Grunfest, E., Naulin, J.P., Payrastre, O., Vannier, O., 2014. Social and Hydrological Responses to Extreme Precipitations: An Interdisciplinary Strategy for Postflood Investigation. *Weather Climate and Society*, 6(1): 135-153.
- Vincendon, B., Ducrocq, V., Saulnier, G.-M., Bouilloud, L., Chancibault, K., Habets, F., Noilhan, J., 2010. Benefit of coupling the ISBA land surface model with a TOPMODEL hydrological model version dedicated to Mediterranean flash-floods. *Journal of Hydrology*, 394(1-2): 256-266.

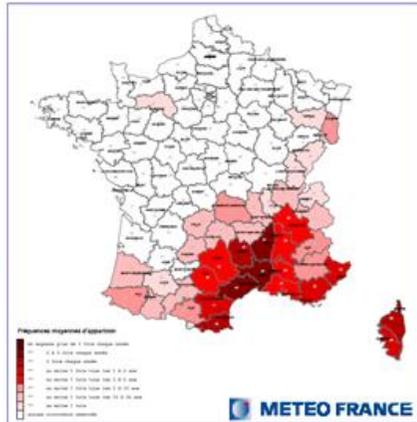


Contexte



- Des épisodes pluvieux Méditerranéens conduisent à des cumuls de pluie importants sur de courtes durées et à des crues rapides, souvent dévastatrices
- Exemples: Vaison la Romaine en 1992, Nîmes en 1988, l'Aude en 1999, le Gard en 2002, le Var en 2010, une dizaine d'épisodes en 2014 des Pyrénées Orientales à la Côte d'Azur, les Alpes Maritimes en 2015

Nombre d'épisodes avec pluie > 150mm/jour





Etat des connaissances au début de FloodScale?



- Déjà beaucoup de travaux et projets sur les crues rapides (crue de l'Aude 1999, travaux de l'OHM-CV, crue du Gard septembre 2002, projet européen HYDRATE (2006-2010))
- Mais encore pas mal d'inconnues sur les processus actifs et le rôle respectif de la pluie, des conditions initiales, de la géologie, des propriétés des sols, de l'occupation du sol
- Beaucoup d'incertitudes sur la pluie et les débits de crue
- Des questions sur le changement d'échelle ou comment transférer une connaissance acquise à une échelle à une autre échelle
- Besoin d'outils de modélisation capables de simuler les débits sur des bassins non jaugés sur de larges étendues

6



Stratégie d'observation



- Stratégie de mesures multi-échelle
- Mesures en continu (2011-2015) sur des sous-bassins emboîtés: du versant, au petit bassin de qqs 1-100 km², jusqu'à l'échelle régionale de bassins de 2000 km². Focus sur le Gard et l'Ardèche dans le cadre de l'OHM-CV (historique depuis 2000)
- Mesures recherche sur des petits bassins en contexte différents (géologie, occupation du sol) et collecte de mesures opérationnelles sur les plus grands bassins
- Mesure sur alerte durant 4 automnes (2012-2015) pour documenter les épisodes intenses
- Contribution aux retours d'expérience hydrologique après certains épisodes importants

8

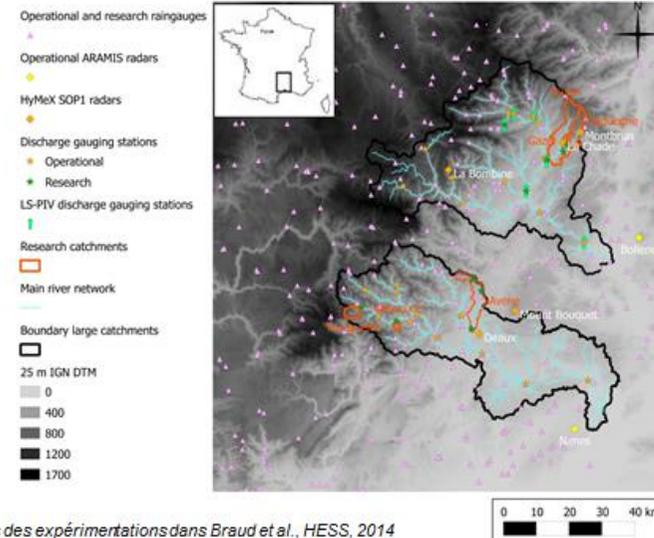


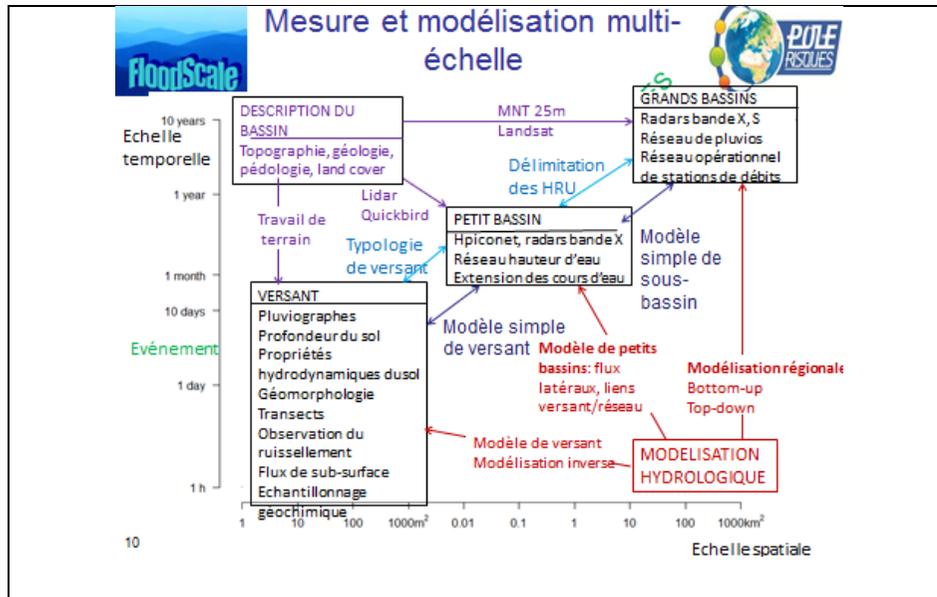
Objectifs de FloodScale



- Projet s'inscrivant dans les objectifs généraux du programme HyMeX (Hydrological Cycle in the Mediterranean Experiment) sur le volet crues rapides
 - Progresser sur la connaissance des processus hydrologiques actifs durant et entre les crues rapides
 - Documenter et mieux caractériser les crues rapides et hiérarchiser les processus dominants à différentes échelles
 - Réduire les incertitudes sur la connaissance de la pluie et des débits durant les crues rapides
 - Projet de recherche « amont » pour améliorer les outils de prévision et prévention ou préparer les outils futurs
- => Mettre en place une stratégie d'observation et de modélisation adaptée aux caractéristiques des crues rapides**

7





Hydrologie des petits bassins

- Documenter la variabilité spatiale des surfaces (topographie, occupation du sol par imagerie très haute résolution, propriétés des sols) pour différents contextes de géologie (granite, schiste, calcaire) et d'occupation du sol (forêt, cultures)
- Documenter la production du ruissellement quand/où se produit le ruissellement? Quel type de ruissellement?
- Documenter la concentration des écoulements en réseau
- Décrire/comprendre les patrons spatiaux et temporels et en particulier la redistribution latérale des flux

Hydrologie de versant

- Documenter le fonctionnement de différents versants représentatifs: profondeur du sol, propriétés hydrodynamiques, humidité des sols
- Perméabilité/imperméabilité du socle et origine des écoulements (surface, subsurface)?
- Quantifier l'impact des hétérogénéités sur la réponse à l'échelle du versant
- Proposer une paramétrisation du fonctionnement d'un versant

Hydrologie des grands bassins

- Améliorer la résolution spatiale et temporelle des champs de pluie à l'aide d'un réseau dense de radars et combinaison de capteurs
- Quantifier les incertitudes sur les champs de pluie
- Quantifier les débits en crue et leur incertitude
- Analyser la réponse pluie/débit à différentes échelles d'espace et de temps



Mesures sur alerte

- Veille météo en continu de septembre à mi-décembre en 2012-2015
- Site sop.hymex.org
 - Prévisions Arôme, bulletins des prévisionnistes de Météo-France
 - Images radar à 15 minutes et cumuls sur des pas de temps de 30mm à 24h, pluviographes horaires
 - Sortie modèle SIM d'état d'humidité des sols
- Prévisions opérationnelles d'EDF-DTG et de la CNR
- Prévisions par analogues du LTHE en 2012-2014

15



Les mesures en continu et autres données

- Chroniques à différentes échelles: pluviométrie, niveaux d'eau et débits, humidité des sols
 - Caractérisation des milieux: topographie (MNT lidars), occupation des sols haute résolution, infiltrabilité dans les sols
- => Données disponibles pour la recherche (base de données HyMeX, BDOH, SevNol), à discuter pour des usages commerciaux

17



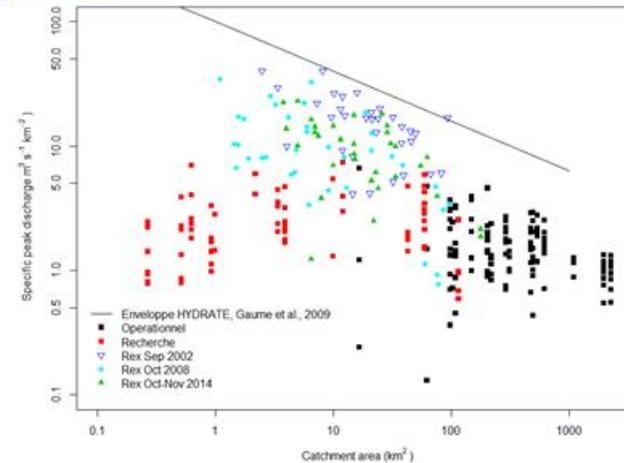
Les campagnes d'automne en quelques chiffres

- Une dizaine d'épisodes avec équipes sur le terrain
- Réalisation d'une soixantaine de jaugeages en crue sur les différentes stations de l'Ardèche, dont 45 en 2014
- Une vingtaine d'événements échantillonnés pour la mesure de l'humidité des sols (avant-après)
- Une dizaine d'épisodes avec des échantillonnages géochimiques
- Participation au retour d'expérience (ReX) hydrologique Gard, Hérault, Ardèche en 2014

16



Caractérisation des crues



18



Stratégie de modélisation



- Les modèles comme testeurs d'hypothèses
 - Objectif : comprendre le fonctionnement des bassins versants et les processus en jeu
 - Les modèles sont des formalisations mathématiques de notre connaissance des processus hydrologiques
 - Utilisation de modèles distribués: pour prendre en compte l'hétérogénéité spatiale du bassin versant (géologie, occupation des sols, pédologie.)
 - La plupart du temps, nous ne savons pas vraiment ce qui est important: les modèles nous aident à formaliser des hypothèses de fonctionnement
 - Ces hypothèses peuvent être fausses: pour le savoir on compare avec des observations représentatives
- Intérêt des plateformes de modélisation
 - Ce sont des outils adaptés au test d'hypothèses: modèle = ensemble de composantes interconnectées et qu'on peut échanger/tester, permettent de travailler à différentes échelles (dans l'espace et le temps)
 - Plateformes utilisées dans le projet: ATHYS (HSM), LIQUID (Hydrowide) et JAMS (Université de Jena)

19



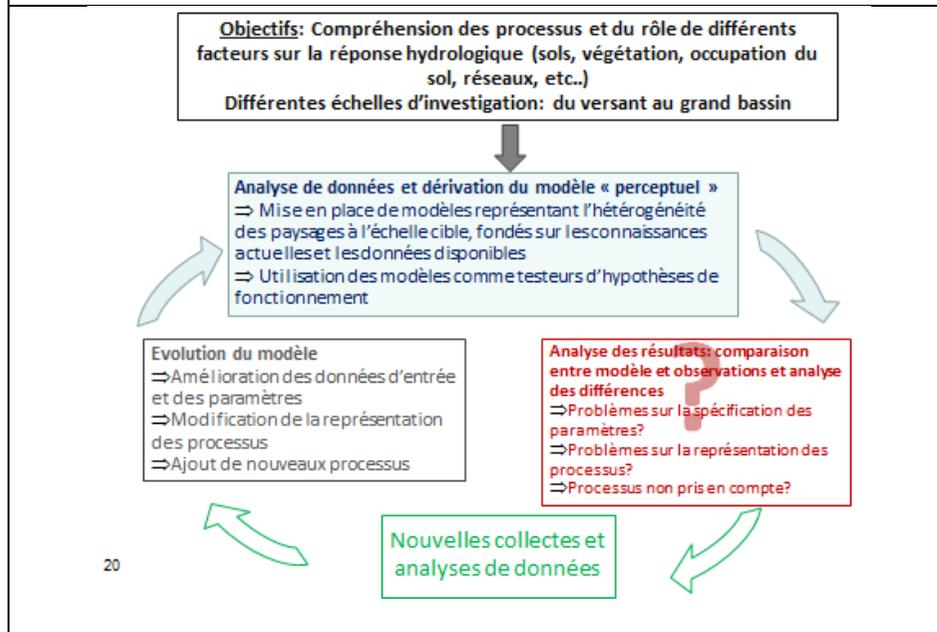
Principaux acquis de FloodScale



- Acquisition de riches jeux de données à différentes échelles d'espace et de temps, disponibles sur la base de données du programme HyMeX, SevNol ou BDOH
- Des progrès significatifs sur la quantification de la variabilité de la pluie et de ses incertitudes
- Validation de méthodes de mesures des débits de crues et leur incertitudes (courbes de tarage, hydrogrammes)
- Illustration de l'apport synergie observation/ modélisation pour la compréhension et la hiérarchisation des processus
- Plusieurs modèles mis en œuvre et évalués de l'échelle locale à l'échelle régionale

⇒ **Plus de détails dans les présentations à venir**

21




Quel intérêt pour les opérationnels



- **Ce qui peut être utile à court terme**
 - Progrès sur l'hydrométrie et la quantification des erreurs sur les débits (déjà diffusé dans les services opérationnels)
 - Méthodes de fusion de données radar et pluviomètres
- **Ce qui peut être utile à moyen ou long terme**
 - Progrès sur les connaissances des processus pour améliorer les outils de prévision des crues rapides (ex: méthode AIGA (Irstea-Météo-France), modélisation ISBATopmodel (CNRM/Météo-France), MARINE (IMFT))
 - Des données pour évaluer des méthodes de prévention (ex: méthode IRIP (Irstea) de cartographie du risque de ruissellement intense)

22



Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale

Quelles observations et connaissances nouvelles à l'échelle des petits bassins versants ?

Pierre-Alain Ayrat (UMR ESPACE et EMA) & Guillaume Nord (LTHE)

Andrieu J., Braud I., Boudevillain B., Bouvier C., Delrieu G., Dramais G., Didon-Lescot J-F, Domergue J-M., Douvinet J., Gérard, S., Grard N., Le Coz J., Martin P., Nottale L, Perez S., Vandervaere J-P, Wijbrans A.



Quelles connaissances nouvelles à l'échelle des petits bassins versants ?

Pierre-Alain Ayral, EMA/ESPACE Alès; Guillaume Nord, LTHE Grenoble Avec la contribution de : Julien Andrieu (UMR ESPACE), Isabelle Braud (Irstea, UR HHLY), Christophe Bouvier (HSM), Guy Delrieu (LTHE), Brice Boudevillain (LTHE), Jean-François Didon-Lescot (UMR ESPACE), Jean-Marc Domergue (UMR ESPACE), Johnny Douvinet (UMR ESPACE), Simon Gérard (LTHE), Nadine Grard (UMR ESPACE), Jérôme Lecoq (Irstea, UR HHLY), Philippe Martin (UMR ESPACE), Laurent Nottale (Observatoire de Paris-Meudon), Sandra Perez (UMR ESPACE), Jean-Pierre Vandervaere (LTHE), Annette Wijbrans (LTHE)

Contexte (diapos 2 et 3)

Les crues éclairs représentent un risque naturel très destructeur en région méditerranéenne. Les derniers événements dans notre mémoire sont ceux qui ont frappé la Côte d'Azur le 03/10/2015. Ils furent causés par un système convectif de méso-échelle en mode stationnaire. Les cellules de pluie associées, de taille souvent modeste (de l'ordre de 500 km²), très difficiles à prévoir à l'heure actuelle avec les outils numériques de prévision météorologique, sont responsables de la plupart des crues éclairs dans cette région. De par leur taille, ces cellules de pluie touchent de façon prédominante les bassins de taille inférieure à 100 km² que nous pouvons qualifier de bassins de méso-échelle. Dans le cas de l'évènement du 03/10/2015 sur le Côte d'Azur, la superposition du réseau drainage et de la carte du cumul de précipitation sur une fenêtre de temps de 2h, mesurée par le réseau de radars de Météo-France (réseau ARAMIS), montre que le bassin versant de plus grande taille le plus impacté est le bassin de la Brague ayant une surface drainée d'environ 63 km² (diapo 2). Pour un bassin de méso-échelle ayant une sensibilité au ruissellement de surface, le temps de concentration estimé est souvent de l'ordre de 2 à 3 heures, c'est-à-dire approximativement le temps que cette cellule est restée en mode stationnaire au-dessus de la Côte d'Azur. La réponse hydrologique de ces bassins a donc pu être très importante, étant donné la rareté des intensités de pluie horaire observées.

Du point de vue du fonctionnement hydrologique, les crues éclairs sont encore mal comprises, en partie dû au fait que les réseaux de mesure sont lacunaires aux échelles fines. Il est nécessaire de s'intéresser aux processus

qui conduisent à la formation des crues éclairs, depuis les versants jusqu'au petit bassin versant de taille inférieure à 5 km². Ces études doivent s'appuyer sur des mesures dans les sols, dans la nappe et la rivière, intégrer des méthodes de traçage de l'eau dans les différents compartiments traversés et mettre en œuvre une modélisation distribuée à base physique pour tester des hypothèses de travail sur les processus mis en jeu. Le passage aux bassins de méso-échelle (jusqu'à 100 km²) introduit de l'hétérogénéité dans les sols, la géologie et les usages des sols et introduit également de la variabilité spatiale dans les pluies. La modélisation distribuée à base physique est encore utilisée à cette échelle mais elle doit s'appuyer sur des mesures spatialisées et de différentes natures (quantitatives/ qualitatives, hydrologie/géochimie/thermodynamique) pour contraindre au mieux les modèles et prétendre comprendre le fonctionnement interne du bassin versant. Cette connaissance du fonctionnement hydrologique interne du bassin versant est cruciale pour comprendre les transferts de sédiments et de matière associée à l'eau et aux sédiments depuis les zones sources jusqu'à l'exutoire du bassin versant qui ont des impacts importants sur la qualité des écosystèmes et les zones situées à l'aval (diapo 3).

Objectifs (diapos 4 et 5)

Le premier objectif de ce travail est la compréhension des processus de formation des crues rapides à l'échelle du petit à moyen bassin versant (1- >100 km²). Il s'agit notamment de comprendre l'origine de l'eau provenant de la surface du sol, de la subsurface et du profond pour être en mesure de déterminer la contribution de ces différents compartiments aux

écoulements de crue rapide et déterminer aussi les temps de transit de l'eau à l'intérieur du bassin versant.

Le second objectif est de comparer le rôle de la pluie (intensité, variabilité), des sols (hétérogénéité dans la géologie, la pédologie et les occupations des sols) et des conditions initiales (état initial d'humidité des sols, de la végétation) sur la réponse hydrologique distribuée. Le troisième objectif est de faire le lien entre les études à l'échelle du versant et la modélisation pluie-débit distribuée à base physique à l'échelle du bassin versant en se focalisant sur la compréhension des processus d'une part et la paramétrisation d'autre part, pour tester par exemple si les mesures effectuées à l'échelle locale peuvent servir de données d'entrée dans le modèle à l'échelle du bassin versant. Ce travail pourra contribuer potentiellement à la production de paramétrisations pour les modèles hydrologiques régionaux plus simplifiés. Le dernier objectif consiste à développer des méthodes de validation des modélisations mises en œuvre en s'appuyant sur des observations de différentes natures et à différentes échelles (débits, humidités des sols, ruissellement, géochimie, dynamique temporelle, physico-chimie), qui sont distribuées spatialement et qui tiennent compte des incertitudes.

Questions abordées (diapo 6)

Deux types de question sont abordés dans cette présentation, il s'agit dans un premier temps de 3 questions d'ordre méthodologique :

- ✚ Où observer ?
- ✚ Quelle stratégie expérimentale à déployer ?
- ✚ Comment caractériser ces bassins ?

Puis de trois questions se rapportant aux principaux résultats faisant suite à cette étude, à savoir :

- ✚ Quels événements observés ?
- ✚ Quelle variabilité spatiale de la pluie ?
- ✚ Quelles incertitudes pour les observations ?

Le plan de la présentation répond successivement aux questions précédemment citées.

Où observer ? (diapo 7)

Les bassins versants étudiés se situent dans les bassins de l'Ardèche (site de l'Auzon) et du Gardon (sites de Tourgueille, de Valescure et de l'Avène). Le choix de ces bassins versants a été guidé d'une part par l'antériorité des observations réalisées dans le cadre de l'OHM-CV (Observatoire Hydrométéorologique Cévennes-Vivarais¹⁵) sur certains sites (Valescure et le Gazel, cf. Diapositive 7) mais également par la nécessité de d'échantillonner une large gamme de pédo-paysages représentatifs de la région Cévennes-Vivarais et de combler le « fossé » entre les échelles fines où sont déployés les réseaux de recherche et les plus grandes échelles couvertes par le réseau opérationnel.

Les Cévennes, avec une occupation du sol très largement forestière sont représentées, par le bassin versant de Valescure essentiellement granitique et les bassins versants du Roumegous, de la Lieure et du Crébadès (bassins versants emboîtés du site de Tourgueille) sur substratum schisteux. La partie de piémont ardéchoise est représentée par le bassin de l'Auzon où l'on retrouve des agrosystèmes sur des terrains essentiellement marno-calcaires et aussi la présence de basalte sur le plateau du Coiron.

Enfin, le bassin versant de l'Avène (affluent en rive gauche du Gardon d'Alès en aval d'Alès) a été suivi car il est bien représentatif des bassins versants non jaugés, en piémont des Cévennes, présentant de forts enjeux. Il est composé d'une partie amont située sur schiste, d'une partie intermédiaire karstique puis de terrains marneux et marno-calcaires cultivés dans sa partie aval. Il est également important de noter que ce bassin versant a connu de très fortes crues en 1997 et 2002, crues qui ont fait l'objet de retours d'expérience hydrologiques (Gaume, 2002 ; Gaume et Borga 2008).

¹⁵ <http://www.ohmcv.fr/>

Quelle stratégie expérimentale à déployer ? (diapos 8 à 10 et diapos 25 à 30)

En s'appuyant sur les réseaux opérationnels (du Service de Prévision des Crues Grand-Delta et de Météo-France), il s'agissait de densifier le réseau de mesure en emboitant les échelles spatiales et en assurant un couplage entre les mesures météorologiques et hydrologiques. L'accent a été mis sur la haute résolution spatiale et temporelle des observations hydro-météorologiques. Le tableau présenté sur la diapositive 8 liste le matériel déployé et les figures des diapositives 25 à 28 viennent préciser la localisation de ce matériel sur les différents bassins versants emboîtés équipés.

Un réseau de limnimètres a été déployé de manière à densifier le suivi de la hauteur d'eau sur les bassins versants de la Claduègne et du Cartaou (cf. Diapositive 9). Il ne s'agit pas ici obligatoirement de remonter à la valeur du débit mais plutôt de suivre la dynamique des écoulements de bassins versants allant de 0,01 km² à 2,2 km². Ce réseau est composé de 5 limnimètres sur le Cartaou et 11 limnimètres sur la Claduègne dont certains permettent de suivre également la conductivité (4 sondes CTD Diver).

En complément de ce suivi, un réseau de capteurs de température «low cost» a été installé sur les ravines du bassin versant de Cartaou (18 capteurs permettant de suivre 8 sites). L'objectif est ici de suivre la mise en eau de ces cours d'eau temporaires lors des épisodes pluvieux.

Enfin ce dispositif est complété par des observations lors des épisodes. Pour ce faire un système de veille a été organisé durant les automnes 2012, 2013, 2014 et 2015. Au final ce sont 150 jaugeages qui ont été réalisés durant les différents épisodes sur les bassins versants instrumentés (cf. Diapositive 10).

Comment caractériser ces bassins ? (diapo 11 et diapos 29 et 30)

Il convenait de caractériser les bassins versants étudiés dans le cadre de ce projet. Pour ce faire la priorité a été donnée à l'acquisition et aux

traitements de données à Très Haute Résolution Spatiale (THRS). Pour ce faire un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à 1 m de résolution a été acquis sur les principaux bassins versants (Valescure, le Roumegous, l'Avène, la Claduègne), de même des images satellites THRS *QuickBird* et *Pléiades* ont pu être utilisées pour générer des cartes d'occupation du sol à résolution 5 ou 10 m sur les plus petits bassins versants (< 10 km² généralement et même 40 km² pour la Claduègne) (diapo 11). Pour les plus grands bassins des cartes d'occupation du sol à résolution 30 m, issues d'images du satellite Landsat ont été réalisées pour alimenter notamment les modèles hydrologiques à vocation régionale.

Un travail de compilation des données de capacité d'infiltration à saturation (Ks) existantes sur le Gardon et l'Avène a été faite, et des mesures complémentaires ont été réalisées pour densifier la caractérisation sur les bassins de la Caduègne, de Valescure, Tourgueille. Des données acquises sur le bassin versant de l'Yzeron près de Lyon ont aussi été incorporées à l'analyse. La figure de la diapo 29 présente une synthèse de ce travail qui montre que la géologie et l'occupation du sol sont des facteurs discriminants sur la conductivité hydraulique de surface. Cette synthèse regroupe des essais d'infiltration de différentes natures : essais réalisés par le BRGM entre 2002 et 2008 à l'aide d'essais double anneau ou d'un perméamètre de Guelph sur les bassins des Gardons et de l'Avène (Desprats et al., 2010), essais d'infiltration réalisés par méthode Beerkan ou infiltromètre sur les bassins de l'Yzeron et de la Claduègne (Gonzalez-Sosa et al., 2010 ; Braud et Vandervaere, 2015). Ce travail vient alimenter les recherches menées sur le développement et la paramétrisation des modèles hydrologiques mis en œuvre dans FloodScale.

Toujours pour caractériser ces bassins versants une attention particulière a été portée sur le sol tant sur sa composition (granulométrie) que sur la profondeur. Des cartographies ont pu être établies sur les sites de Valescure et de Tourgueille.

Pour aller plus loin sur ce volet caractérisation des bassins deux démarches ont été entreprises pour définir (1) des typologies géomorphologiques de versant et (2) étudier les dimensions fractales des courbes de niveaux au

regard des échelles et prospector les liens entre les formes (du bassin) et le flux.

Avec comme objectif de définir des mailles irrégulières de versants, une base de données descriptives de ces versants a été développée et intègre : l'altitude, la pente, l'orientation, la régularité du relief, l'indice topographique de Beven, un indice d'encaissement et de surélévation, la couverture végétale et la couverture en surfaces artificielles. A partir de cette base de premières cartographies ont été proposées sur les différents bassins versants étudiés. Des allers-retours seront encore nécessaires avec le volet modélisation pour affiner et finaliser cette analyse (diapo 12).

Faisant suite à différents travaux de morphologie théorique et quantitative (Martin 2004, Nottale et al 2012.a et b, Forriez 2010, Forriez et al. 2010, 2011) un focus particulier a été réalisé dans le cadre de FloodScale sur la modélisation fractale de courbes de niveau issues de 2 modèles numériques de terrain (MNT) de résolution différentes dont celui à très hautes résolution spatiale (Lidar 0,5 m). Les principaux résultats sont présentés dans l'article de Martin *et al.*, 2015 (à paraître) et montrent que grâce à l'analyse combinée des deux (MNT) de résolutions différentes, il a été possible d'accéder à la mesure de la variation de la dimension fractale depuis l'échelle métrique jusqu'à l'échelle kilométrique (voir figure diapo 30). On observe une double transition : Non Fractal – Fractal – Fractal qui correspond au passage d'une situation d'indépendance d'échelle (infra métrique ou métrique) à une situation de dimension fractale variable (échelles moyennes) pour s'achever dans une situation d'invariance d'échelles (entre 3 000 et 8 000 m). Les prochains travaux sur ce thème s'attacheront à approcher les liens entre les formes mises en évidence et les flux observés.

Quels événements observés ? (diapos 13 à 16)

Après des automnes 2012 et 2013 relativement « calmes », des événements plus importants ont été observés durant les automnes 2014 et 2015 notamment sur le Valescure (cf. Diapositive 13) où l'on observe la crue la plus importante observée depuis 2004 (date du suivi de ce bassin versant) avec un débit spécifique de $4.6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ (17/09/2014). Au final c'est une

grande variété de crue qui a été observée avec notamment des crues de printemps et d'hiver qui viennent s'ajouter à celles de l'automne.

Un exemple de résultat obtenu au travers d'un réseau de mesures emboîté est donné pour le site de Valescure (diapo 14) pour l'événement du 17 septembre 2014, un des plus importants enregistrés depuis 2004. Les débits spécifiques obtenus varient de $4,6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ à $1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$, avec une variabilité relativement importante (illustrée par les hydrogrammes présentés) sur le bassin versant expérimental, variabilité qui sera un atout pour la validation de modèles pluie-débit distribués.

Le suivi de l'extension des ravines durant l'automne 2012 (diapo 15) illustre tout l'intérêt que l'on peut avoir à déployer un réseau de mesure spatialement distribué. On observe que les extensions maximums observées lors des épisodes (en rouge) sont relativement proches pour les 3 événements étudiés. Par contre, la saturation progressive du bassin lors de l'automne est particulièrement visible au travers de la présence de plus en plus importante d'un écoulement pérenne dans les ravines. Là encore il est tout à fait envisageable que ce type de résultat puisse servir à la validation de modèles hydrologiques distribués. Une exploitation quantitative de ces résultats (densité de drainage notamment) est actuellement en cours. L'intérêt de ce type de suivi hydrologique distribué avait été montré sur ce même bassin par Maréchal *et al.*, 2013.

Il est évident que les événements les plus extrêmes sont difficilement observables dans les petits bassins versants de recherche en raison de leur relative rareté et de leur potentiel de destruction élevé. Les Retours d'Expérience sont plus à même de décrire les pics de crue dans ce type de contexte. Néanmoins, les dispositifs d'observation hydrométéorologique classiques (pluviomètres et stations hydrométriques) peuvent fournir des données en continu très pertinentes à haute résolution spatiale et temporelle permettant de documenter des événements faibles à modérés. En outre, la durée minimale des observations (4 ans) permet de caractériser le comportement standard du bassin versant (y compris les périodes de vidange) et offre la possibilité d'observer des événements moins ordinaires avec des processus plus spécifiques aux crues éclairs et de caractériser d'éventuels effets de seuil qui ne sont pas observés dans les événements

faibles à modérés. La Figure de la diapo 16 illustre bien l'apport des données observées ces 4 dernières années dans les bassins versants de taille inférieure à 100 km² (carrés rouge sur la Figure).

Quelle variabilité spatiale de la pluie ? (diapos 17 à 20)

Afin de quantifier la variabilité des précipitations dans un bassin versant, la pluviométrie est comparée à la forme du bassin versant. Cela se fait en représentant la géométrie du bassin versant et la lame d'eau précipitée en fonction de la distance à l'exutoire. Les précipitations sont cumulées sur une durée qui dépend principalement du temps de concentration du bassin versant. En effet, la variabilité des pluies doit persister dans le temps pour avoir un impact en termes de réponse hydrologique. La distribution des volumes précipités est calculée en fonction de la distance à l'exutoire en considérant d'une part une répartition uniforme des précipitations sur le bassin versant et d'autre part une répartition variable. Dans le cas d'une répartition uniforme des précipitations, la distribution des volumes en fonction des distances à l'exutoire est une fonction de la géométrie du bassin seulement. La différence entre les deux distributions informe sur le degré de variabilité spatiale de la pluie (diapo 17). Pour cela, deux indices sont proposés (diapo 18):

- ✚ L'Indice de localisation (LI) qui est le résidu des abscisses des centres de gravité normalisés, caractérisant le déplacement de la localisation du centre de gravité.
- ✚ L'Indice de concentration (CI) qui est le résidu des ordonnées des centres de gravité normalisés, caractérisant l'intensité de la concentration spatiale de l'évènement de pluie

A titre d'exemple pour le bassin de l'Avène aval (55 km²), deux évènements de pluie pour lesquels les précipitations ont été cumulées sur une période de 4 heures, c'est-à-dire une durée proche du temps de concentration du bassin, illustrent des situations contrastées : un évènement pluvieux globalement uniforme (diapo 19) et un évènement pluvieux variable spatialement et concentré vers l'aval du bassin (17/09/2014) (diapo 20).

Quelles incertitudes pour nos observations ? (diapo 21)

Un travail important a été consacré à la production des données mais aussi à la critique des données et à la quantification des écart-types ou des incertitudes. Ceci est particulièrement vrai pour les estimations spatialisées des précipitations tirées de la fusion des données radar et pluviomètres (cf présentation de G. Delrieu et E. Leblois) et pour les hydrogrammes tirés des séries limnimétriques par l'intermédiaire des courbes de tarage (cf présentation de G. Dramais et al.). Les estimations spatialisées des précipitations ont été produites à des résolutions spatiales et temporelles adaptées aux études hydrologiques dans les petits bassins versants et redécoupées au contour des bassins versants suivis dans cette étude. Les incertitudes des données sont à mettre en regard des incertitudes des modèles pour pouvoir évaluer les modèles.

Conclusions et perspectives ? (diapos 22)

Des jeux de données collectés durant le projet pourront servir de référence pour des études hydrologiques en région méditerranéenne et être utilisées pour tester ou développer des modèles hydrologiques distribués. Les bases de données associées sur la capacité d'infiltration, les sols et l'occupation du sol sont de nature à fournir des données d'entrée aux modèles adaptées à la résolution spatiale des études sur les petits bassins versants. Des études complémentaires devront permettre de poursuivre la caractérisation des milieux, notamment les sols et la couche altérée qui semblent des compartiments importants dans le fonctionnement de ces bassins versants.

Ce travail a permis de mettre au point une méthode de caractérisation de la variabilité de la pluie afin de quantifier cette variabilité et de la comparer entre évènements et aux différentes échelles étudiées. Des stratégies d'observation innovantes de type « low-cost » ont été initiées (réseaux de thermo-boutons pour cartographier l'extension du réseau hydrographique intermittent, traçage de l'eau par conductivité). Ces stratégies d'observation, spatialement distribuées, ont beaucoup de potentiel en hydrologie. Une réduction de la qualité des données est acceptée en échange d'un gain quantitatif sur la spatialisation des données qui permet

de davantage contraindre les modèles et de limiter les problèmes d'équifinalité.

Quel intérêt pour les opérationnels ? (diapo 23)

Plusieurs éléments semblent intéressants d'un point de vue opérationnel et sont ici succinctement rappelés :

- ✚ Les périodes entre les crues sont importantes pour comprendre le fonctionnement du bassin versant.
- ✚ Pourquoi ne pas étendre la mesure de température, de conductivité de l'eau aux stations hydrométriques du réseau opérationnel ?
- ✚ La mesure en continu de la vitesse de surface (radar fixe) apporte des informations pertinentes pour l'estimation des débits et diagnostiquer les détariages.
- ✚ Les jeux de données collectés pourront servir à tester les modèles de prévision du SCHAPI ou proposer de nouvelles paramétrisations pour s'intéresser aux bassins non jaugés.
- ✚ Des méthodes de jaugeages ont été testées en crue pour des petits bassins versants.

Références

- Braud, I., Ayral, P.-A., Bouvier, C., Branger, F., Delrieu, G., Le Coz, J., Nord, G., Vandervaere, J.-P., Anquetin, S., Adamovic, M., Andrieu, J., Batiot, C., Boudevillain, B., Brunet, P., Carreau, J., Confoland, A., Didon Lescot J.-F., Domergue, J.-M., Douvinet, J., Dramais, G., Freydier, R., Gérard, S., Huza, J., Leblois, E., Le Bourgeois, O., Le Boursicaud, R., Marchand, P., Martin, P., Nottale, L., Patris, N., Renard, B., Seidel, J.-L., Taupin, J.D., Vannier, O., Vincendon, B., Wijbrans, A., (2014), Multi-scale hydrometeorological observation and modelling for flash-flood understanding. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 3733-3761. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-18-3733-2014>.
- Braud, I., Vandervaere, J.P., 2015. Analysis of infiltration tests and performed in the Claduègne catchment in May-June 2012, contribution to WP3.4 "Documentation and mapping of soil hydraulic properties, soil geometry and vegetation cover of small catchments" of the FloodScale 56012-2015) ANR project, 66 pp.
- Desprats, J.-F., Cerdan, O., King, C., Marchandise, A., 2010. Cartographie de la perméabilité des sols pour l'aide à la prévision des crues ; cas d'étude sur le Gardon d'Anduze. *La Houille Blanche*(3): 32-38.
- Forriez M., (2010), Caractérisation formelle des structures multi-échelles géographiques en relativité d'échelle. Exemples en géographie physique, géographie urbaine, géohistoire et géographie du peuplement. Thèse codirigée par L. Nottale et Ph. Martin et soutenue à l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse (UAPV), 406 p. 1 cdrom.
- Forriez M., Martin Ph., Nottale L., (2010), Transition fractal – non fractal et géographie. Réflexion des lois d'échelle possibles à travers l'étude de quelques cas. *L'espace géographique*, n° 2, p.97-112 et http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/41/99/06/PDF/Espace_geo-Forriez-Martin-Nottale-2009-V1.pdf
- Forriez M., Martin Ph., Nottale L., (2011), Comparaison entre la classification de Horton et la classification ascendante hiérarchique des confluences. Application au bassin amont des Gardons, in *Mobilité des formes et surface terrestre ; Des changements passés aux changements actuels sous la direction de M. J. Penven, H. Regnauld et D. Mercier. Coll. Espace et territoire, Presses universitaires de Rennes*, p.55-67 et <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/41/99/01/PDF/JJG-Forriez-Martin-Nottale-2009.pdf>
- Gaume E., (2002), *Eléments d'analyse des crues éclair*, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 359 p.
- Gaume E., Borga M., (2008), Post-flood field investigations in upland catchments after major flash floods: proposal of a methodology and illustrations, *Journal of Flood Risk Management*, 1(4), 175-189.
- Gonzalez-Sosa, E., Braud, I., Dehotin, J., Lassabatère, L., Angulo-Jaramillo, R., Lagouy, M., Branger, F., Jacqueminet, C., Kermadi, S., Michel,

Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale 24 Novembre 2015 Aix en Provence

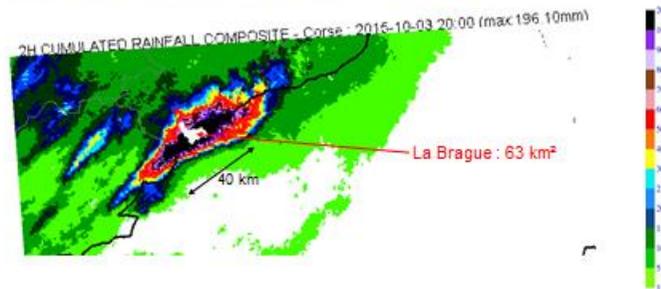
- K., 2010. Impact of land use on the hydraulic properties of the topsoil in a small French catchment. *Hydrological Processes*, 24(17): 2382-2399.
- Huza, J., Teuling, A.J., Braud, I., Grazioli, J., Melsen, L.A., Nord, G., Raupch, T.H., Uijlenhoet, R., (2014), Precipitation, soil moisture variability and discharge dynamics in a small catchment in south-east France (Ardèche), during HyMeX Special Observation Period 1. *Journal of Hydrology*, 514: 330-342. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.041>.
- Martin Ph., (2004), Modélisation fractale et structurelle des formes en géographie. Réflexion développée à partir d'exemples karstiques. Habilitation à diriger les recherches. Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse, tome 1, 173 p., tome 2, 314 p., tome 3, 176 p., 1 carte coul. ht. <http://www.geo.univ-avignon.fr/Personnel/MartinP/MartinP-HDR2004Avignon.pdf>
- Martin Ph., Nottale L., Ayrat P-A., (2015), Modélisation fractale de courbes de niveau à partir de deux modèles numériques de terrain, *Cybergéo*, à paraître.
- Maréchal D., Ayrat P-A., Bailly J-S., Puech C., Sauvagnargues-Lesage S., (2013), Sur l'origine morphologique des écoulements par l'analyse d'observations hydrologiques distribuées. Application à deux bassins versants cévenols (Gard, France), *Géomorphologie*, 1, 47-62.
- Nottale L., Martin Ph., Forriez M., (2012.a), Analyse en relativité d'échelle du bassin versant du Gardon (Gard, France). Étude de la variabilité de la dimension fractale en fonction de l'altitude et de l'échelle, *Revue Internationale de Géomatique*, p.103-133.
- Nottale L., Martin Ph., Forriez M., (2012.b), Analyse en relativité d'échelle du bassin versant du Gardon (Gard, France). Étude de la variabilité de la dimension fractale en fonction de l'altitude et de l'échelle. 2e rencontre autour de la relativité d'échelle (2009), Actes Numérique Avignon, 24 p. En ligne : <http://espaces-dechelles.org/>
- Wijbrans A., Delrieu G., Nord G., (2015), Spatial rainfall patterns of intense events in the Cévennes-Vivarais Region, France during the 2007 – 2014 period for varying basin sizes (10-500 km²) and temporal scales (1-6 hours). Hymex 9th workshop Conference.
- n'est pas encore possible dans les modèles de prévision du temps. L'alerte météo est pour le moment donnée à l'échelle d'un département mais la localisation exacte des bassins/communes impactées n'est pas encore disponible.



Contexte



- Les cellules de pluie les plus actives (Mesoscale Convective System) qui sont difficiles à prévoir en hydrométéorologie sont généralement de taille $< 500 \text{ km}^2$. Les bassins les plus impactés sont de taille $< 100 \text{ km}^2$.



2



Objectifs généraux

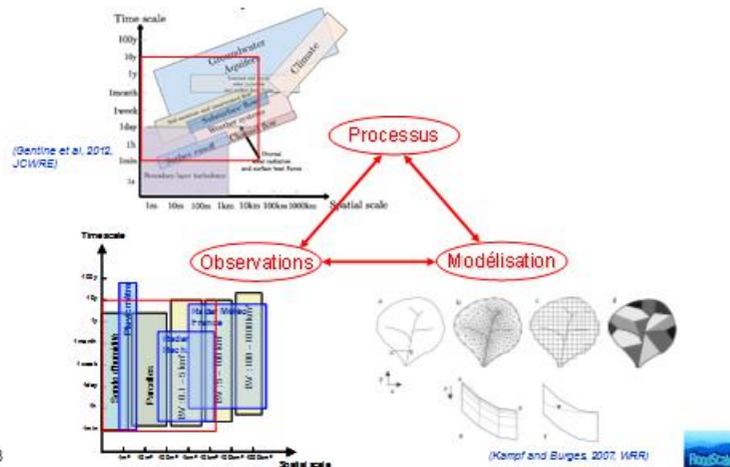


- Comprendre **les processus** de formation des crues rapides à l'échelle du petit à moyen bassin versant ($1 \rightarrow 100 \text{ km}^2$)
- Comprendre l'origine de l'eau (compartiments de la surface, de la subsurface et du profond) qui compose les écoulements de crue rapide et déterminer les temps de transit dans les différents compartiments
- Comparer le rôle de la **pluie** (intensité, variabilité), **des sols** (hétérogénéité dans la géologie, la pédologie et les occupations des sols) et **des conditions initiales** (état initial d'humidité des sols, de la végétation) sur la **réponse hydrologique**

4



Contexte



3



Objectifs généraux



- Faire le lien entre les études à l'échelle **du versant** et la **modélisation pluie-débit** distribuée à base physique à l'échelle du bassin versant (compréhension des processus et paramétrisation des modèles)
- Fournir des paramètres pour les **modèles régionaux**
- Valider les modélisations développées à partir **d'observations** de différentes natures et à différentes échelles (débits, humidités des sols, ruissellement, géochimie, dynamique temporelle, physico-chimie), qui sont **distribuées spatialement** et qui tiennent compte des **incertitudes**

5



Questions abordées



- Où observer ?
- Quelle stratégie expérimentale à déployer ?
- Comment caractériser ces bassins ?

- Quels événements observés ?
- Quelle variabilité spatiale de la pluie ?
- Quelles incertitudes pour les observations ?

6



Quelle stratégie expérimentale à déployer ?



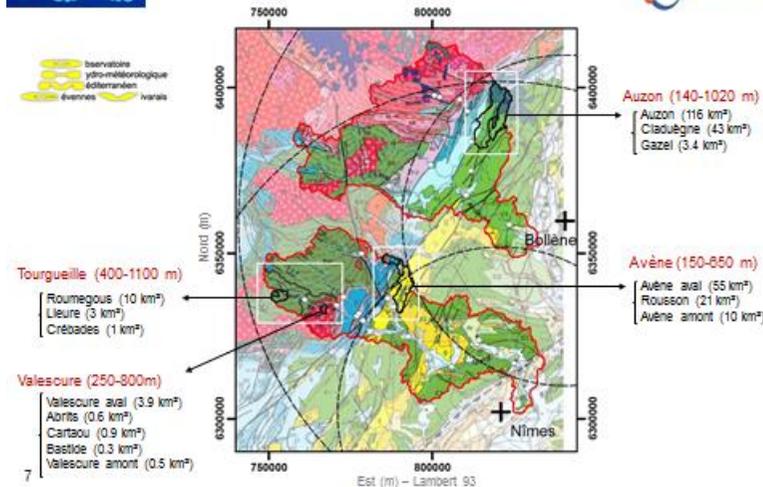
- Couplage hydrométéorologique
- Haute résolution spatiale et temporelle

	Auzon (07)	Valescure (30)	Tourgueille (30)	Avène (30)
Hydrologie				
station hydrométrique recherche :	3	5	3	3
- cond. temp., vitesse, turb.	(3,4,43, 116 km ²)	(0,3,0,5, 0,6, 0,9, 3,9 km ²)	(1,3, 10 km ²)	(10, 21, 55 km ²)
station hydrométrique opérationnelle	---	St Jean du Gard (152 km ²)	Saumans (89 km ²)	---
réseau de limnimètres	11 points (dont 4 CTD)	5 points	---	---
réseau de thermo-boutons	---	18 points	---	---
sonde humidité du sol	9 points	34 points	16 points	---
Hydro-météorologie				
pluviomètre opérationnel	10	2	1	---
pluviomètre recherche	21	3	1	3
disdromètre	12	1	1	1
radar opérationnel (bande S)	2	2	2	2
radar recherche (bande X)	2	---	1	1

- Des observations sous épisode
- Un mode d'intervention sur Alerte



Où observer ?



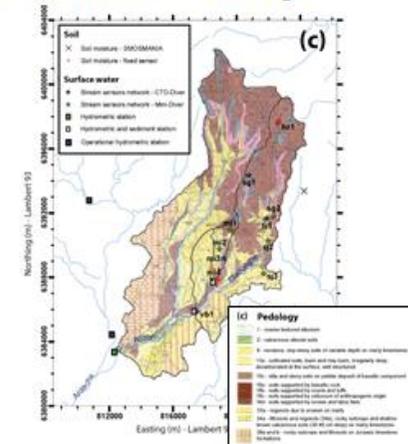
7



Quelle stratégie expérimentale à déployer ?



- Réseaux de limnimètres sur le Cartau et la Cladugne



Quelle stratégie expérimentale à déployer ?

➤ Alerte en crue (période 2012 – 2015)

	Avon (07)	Valescure (50)	Tourguville (50)	Avène (30)
Nombre de jaugages en crue	47	---	66	37
Nombre d'événements pour suivi d'humidité du sol	12 + continu	continu	continu	---
Nombre d'événements pour suivi géochimique	---	20	---	---



10

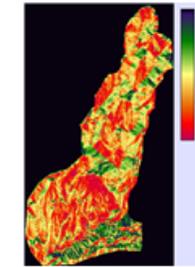
Comment caractériser ces bassins ?

➤ Typologie géomorphologique des versants

Objectif :

- Créer une maille irrégulière de versants
- Monter une base de données descriptive de ces versants :
 - Altitude
 - Pente
 - Orientation
 - Régularité du relief
 - Indice topographique de Beven
 - Indice d'encastement-surélévation
 - Couverture végétale
 - Couverture par surfaces artificielles
- Produire une typologie des versants

Plus de questions : Julien.ANDRIEU@unice.fr



Carte de l'orientation (Nord/sud)

12

➤ Géomorphologie quantitative – Liens entre les échelles et relation flux - formes

Comment caractériser ces bassins ?

- La Très Haute Résolution Spatiale (MNT, images pléiades avec cartographies d'occupation du sol associées)
- Caractérisation de l'infiltration : la compilation et la réalisation d'essais complémentaires – Sur le Gardon et l'Ardèche
- Granulométrie et profondeur des sols (Sites pilotes)



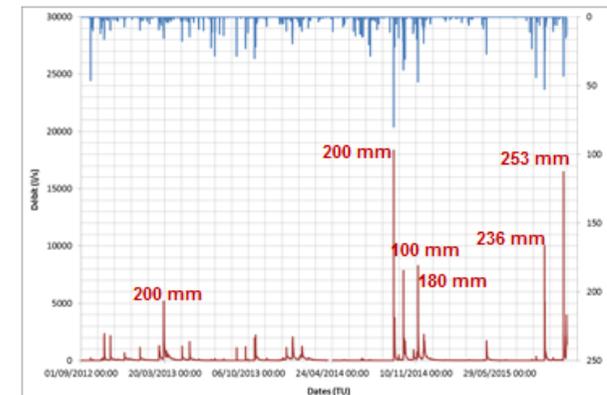
Lidar 1 m - Cartaou 11

Infiltrométrie (mini-disque, Gazel)

Julien.ANDRIEU@unice.fr

Quels événements observés ?

➤ Un exemple de chronique pluie-débit à Valescure (2012-2015)



<https://bdoh.irstea.fr/OHM-CV/>

<http://mistrals.sedoo.fr/HyMeX/>

FloodScale Quels événements observés ? **POLE RISQUES**

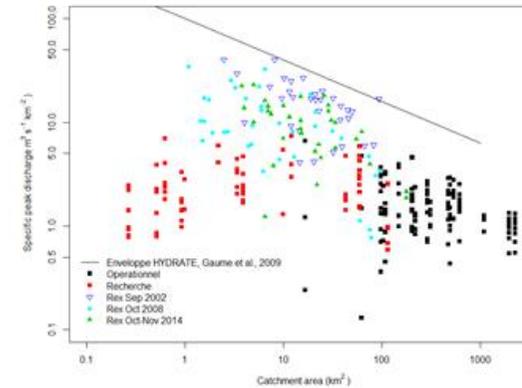
➤ Un exemple de réponse hydrologique distribuée et multi-échelles – Cas de l'épisode du 17/09/2014



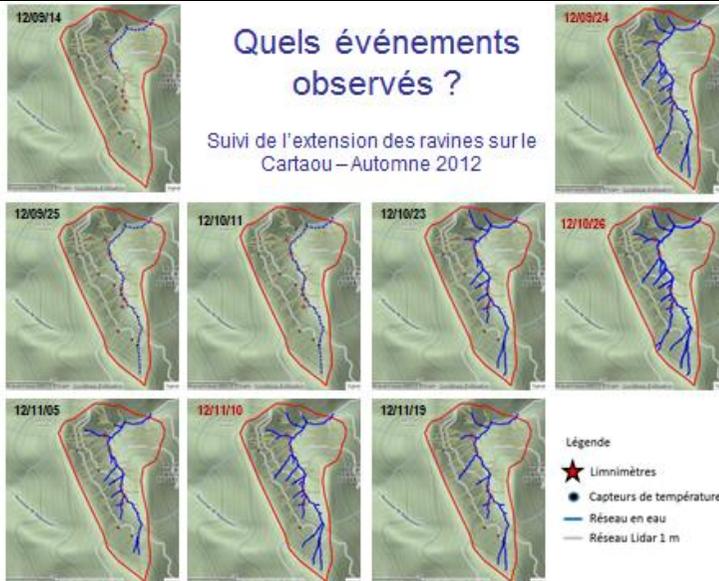
14

FloodScale Quels événements observés ? **POLE RISQUES**

➤ L'apport des dispositifs d'observation aux fines échelles

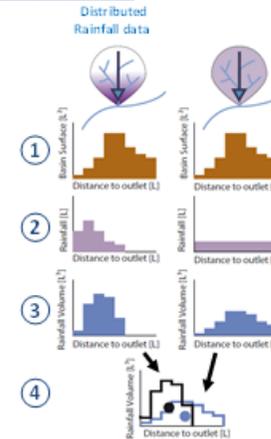


16



15

FloodScale Quelle variabilité spatiale de la pluie ? **POLE RISQUES**



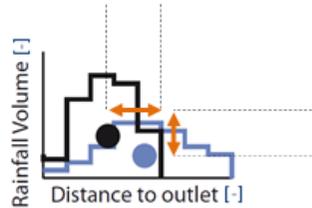
- 1) Distribution des surfaces en fonction de la distance à l'exutoire [L^2 / L]
- 2) Distribution des lames d'eau précipitée en fonction de la distance à l'exutoire [L / L]
- 3) Distribution des volumes précipités en fonction de la distance à l'exutoire [L^3 / L]
- 4) Calcul des indices de variabilité de la pluie [-]
 - Comparaison du centre de gravité des deux distributions (pluie uniforme et pluie distribuée)
 - Normalisation du volume précipité et de la distance à l'exutoire pour comparer entre eux des événements de pluie et des bassins différents

Thèse A. Wijbrans (région Rhône-Alpes, 2012-2015)

FloodScale **POLE RISQUES**
 Quelle variabilité spatiale de la pluie ?

➤ Critères de variabilité des pluies

Indice de localisation (LI) :
 Résidu des abscisses des centres de gravité normalisés = déplacement de la localisation du centre de gravité

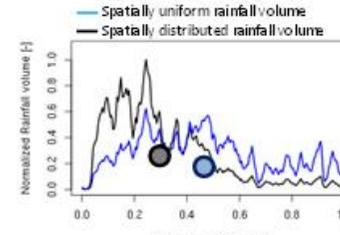


Indice de concentration (CI) :
 Résidu des ordonnées des centres de gravité normalisés = intensité de la concentration spatiale de l'évènement de pluie

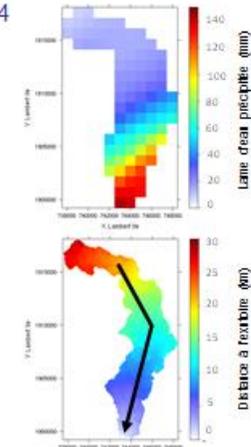
18

FloodScale **POLE RISQUES**
 Quelle variabilité spatiale de la pluie ?

➤ Variabilité spatiale marquée : 17/09/2014



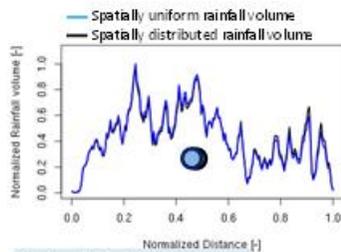
Surface: 55 km²
 Mean Rainfall : 47 mm in 4 h
 Centre of Mass indices:
 LI = -0.16
 CI = 0.09



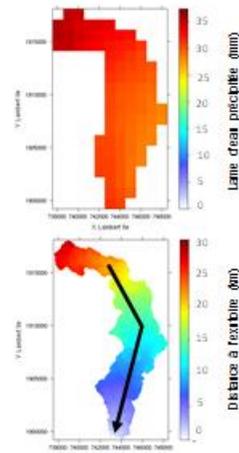
20

FloodScale **POLE RISQUES**
 Quelle variabilité spatiale de la pluie ?

➤ Peu de variabilité spatiale : 28/04/2012



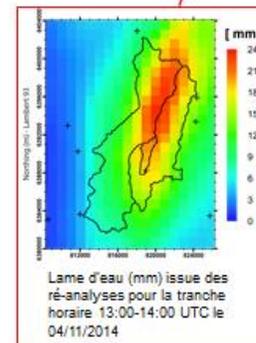
Surface: 55 km²
 Mean Rainfall : 31 mm in 4 h
 Centre of Mass indices:
 LI = 0.013
 CI = -0.006



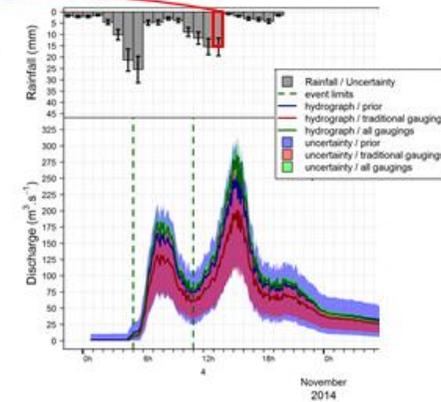
19

FloodScale **POLE RISQUES**
 Quelles incertitudes pour nos observations ?

➤ Exemple de données pluie-débit pour l'Auzon



21





Conclusions et perspectives

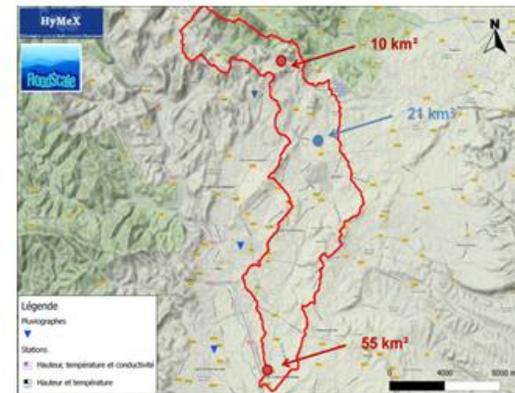


- Des jeux de données de référence
- Des bases de données associées sur la capacité d'infiltration, les sols et l'occupation du sol. Travaux de caractérisation des milieux à poursuivre
- Une opportunité pour construire, tester et valider des modèles hydrologiques distribués
- Une méthode de caractérisation de la variabilité de la pluie et des échelles de référence
- Des stratégies d'observation innovantes à poursuivre (méthodes « low-cost ») : réseaux de mesure, traçage

22



Expérimentation bassin de l'Avène



25



Quel intérêt pour les opérationnels ?

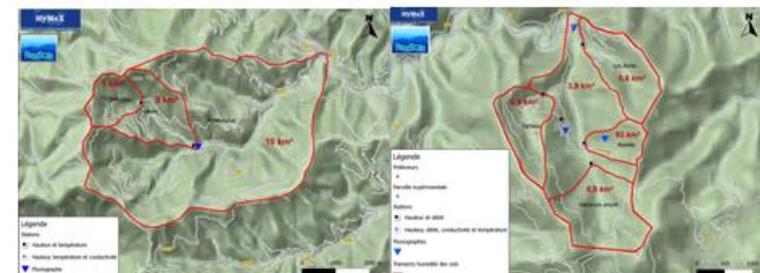


- Les périodes entre les crues sont importantes pour comprendre le fonctionnement du bassin versant.
- Pourquoi ne pas étendre la mesure de température, de conductivité de l'eau aux stations hydrométriques du réseau opérationnel ?
- La mesure en continu de la vitesse de surface (radar fixe) apporte des informations pertinentes pour l'estimation des débits et diagnostiquer les détariages.
- Les jeux de données collectés pourront servir à tester les modèles de prévision du SCHAPI ou proposer de nouvelles paramétrisations pour s'intéresser aux bassins non jaugés.
- Des méthodes de jaugeages ont été testées en crue pour des petits bassins versants.

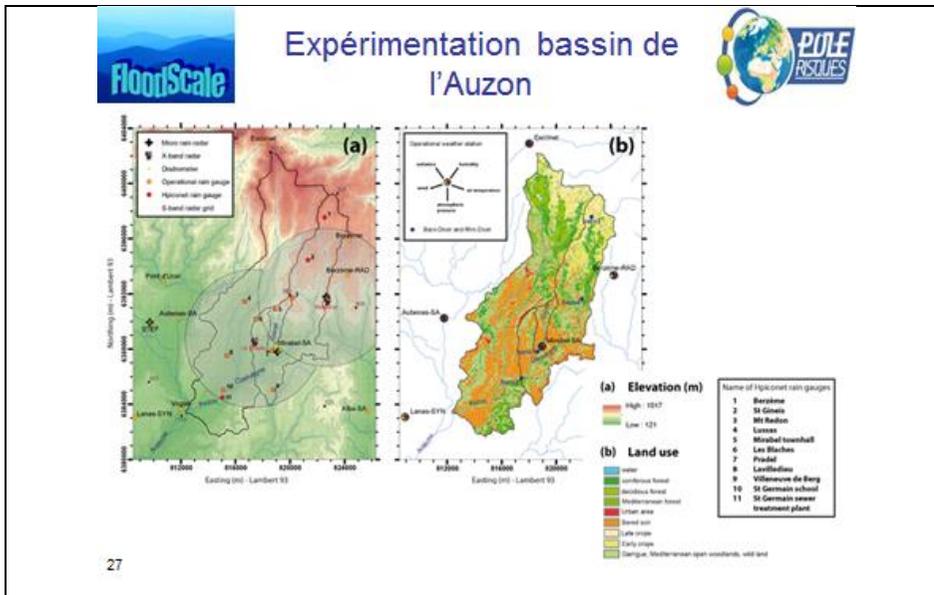
23



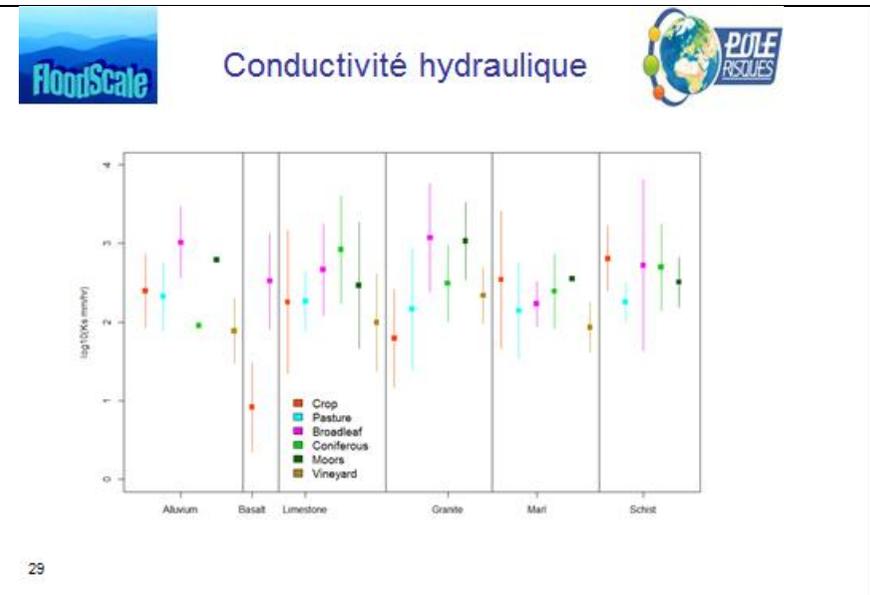
Expérimentation bassin de Tourgueille (a) et Valescure (b)



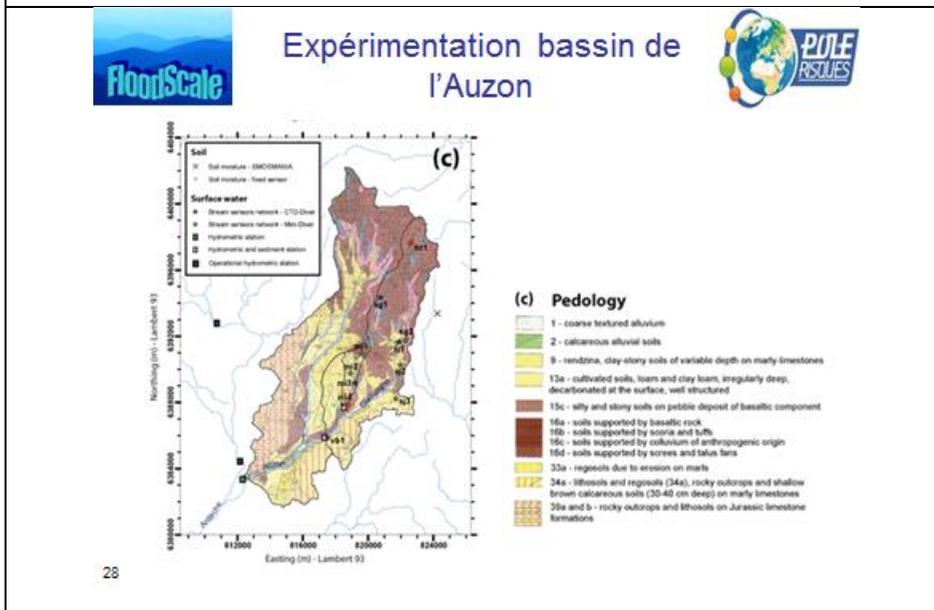
26



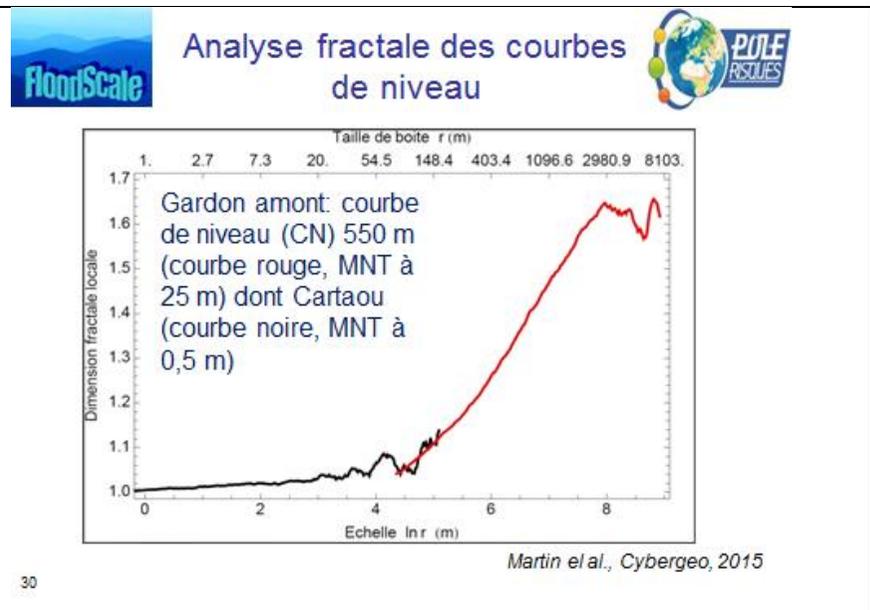
27



29



28



30



Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale

Quelles connaissances nouvelles à l'échelle du versant et modélisation ?

Christophe Bouvier, HSM et Jean-Pierre Vandervaere, LTHE

avec les contributions de J. Andrieu et les étudiants de l'université de Nice, P.-A. Ayrat, C. Batiot, I. Braud, P. Brunet, J.-F. Didon-Lescot, J.-M. Domergue, R. Freydier, S. Gérard, N. Grand, O. Le Bourgeois, N. Patris, A. Remes, J.L. Seidel, J.D. Taupin, M. Uber, O. Vannier, S. Van-Exter...



Quelles connaissances nouvelles à l'échelle du versant et modélisation ?

Christophe Bouvier, HSM Montpellier, Jean-Pierre Vandervaere, LTHE Grenoble avec les contributions de J. Andrieu et les étudiants de l'université de Nice, P.-A. Ayrat, I. Braud, P. Brunet, J.-F. Didon-Lescot, J.-M. Domergue, S. Gérard, N. Grard, O. Le Bourgeois, M. Über, O. Vannier...

Contexte et objectifs (diapos 1 et 2)

La formation des crues peut résulter de processus multiples (Diapo2) qu'il importe de bien identifier pour une région et une échelle données. Ceci permet de proposer des modèles à base physique, qui représentent explicitement ces processus et permettent de prévoir les crues dans un contexte non stationnaire (aménagement, changement d'origine anthropique ou climatique), d'extrapoler vers les extrêmes, et de coupler les flux d'eau avec les flux de sédiments ou d'éléments chimiques.

Dans les Cévennes, plusieurs modélisations représentant différents types de processus ont déjà été testées (Cosandey et al., 1999 ; Ayrat et al., 2005 ; Moussa et al., 2007 ; Le Lay et Saulnier, 2007 ; Saulnier et Le lay, 2009 ; Roux et al., 2011). Ces modèles ont pu être ajustés avec succès sur les débits observés, quels que soient les processus représentés. Il n'a cependant pas été possible, compte tenu de l'absence ou de la faible connaissance des caractéristiques du terrain, de confronter ces modèles à une réalité physique. L'objectif ici est de mettre en adéquation observation et modélisation, pour proposer des modèles qui fonctionnent bien pour de bonnes raisons. L'échelle versant (Diapo3), intermédiaire entre l'échelle d'observation (locale) et l'échelle d'intérêt (bassin versant de plusieurs centaines de km²) est pertinente pour cet objectif parce qu'elle permet une observation au plus près des processus mis en jeu.

Ces objectifs (diapo 2) seront déclinés selon 2 aspects, consistant à observer et à instrumenter les versants d'une part, à proposer un modèle de référence à base physique pour chacune des régions géologiques étudiées, à des échelles variant entre 1 et quelques centaines de km². Sur le volet expérimental, un focus est proposé sur les bassins de Valescure (Gard) et du Gazel (Ardèche) afin d'illustrer la variété des approches. Le volet

modélisation sera détaillé sur le bassin de Valescure qui a bénéficié des plus grandes avancées pour le moment, le travail étant encore en cours sur le bassin du Gazel (master 2 M. über, 2016 par exemple).

Questions abordées (diapos 3 et 4)

Les formations superficielles ont fait l'objet d'une étude détaillée, visant à caractériser les propriétés texturales et hydrauliques des différentes couches des profils verticaux sur plusieurs mètres de profondeur. Quelles sont les porosités, les conductivités hydrauliques, les rétentions en eau, les profondeurs des différentes couches du sol ? Quelle est la variabilité spatiale de ces propriétés, cette variabilité est-elle organisée dans l'espace ? Est-elle prédictible par la connaissance de l'usage du sol ? Quelle est la capacité totale de stockage en eau des formations superficielles, en particulier dans les couches altérées profondes, et quelle est la dynamique de ce stock ?

D'un point de vue métrologique, les sols cévenols sont souvent des sols grossiers, très caillouteux et présentant une forte hétérogénéité spatiale (diapo 4). Les conditions d'instrumentation sont donc difficiles, et doivent être orientées vers les méthodes de mesures non intrusives. Le projet a donné l'occasion de tester et de comparer différents types de mesure pour l'infiltration et la rétention en eau, la profondeur, et d'évaluer les apports de méthodes adaptées au contexte.

Une autre question concerne la possibilité de mettre en évidence une signature hydrologique d'un versant, au sens d'une caractéristique invariante, ou dépendant de grands traits du paysage (géologie, exposition, pente ...). Sachant que la mesure locale est peu représentative, comment et à partir de combien de points de mesure est-il possible de caractériser cette signature ?

Enfin, les questions ont porté sur la représentation des flux verticaux et latéraux au sein, du versant, et le lien avec les propriétés du milieu. Quels sont les processus finalement identifiés, quelle est, suivant les sites, la part des écoulements de surface, celles des écoulements de sub-surface ou profonds sur la formation des crues ? Et finalement, le schéma proposé pour les petits bassins est-il applicable à des bassins de quelques centaines de km² ?

Observation : Méthodes et résultats (diapos 5 à 16)

Les instrumentations ont été réalisées à des échelles complémentaires : parcelle, transect versant, petit bassin.

Transect versant

La notion de transect de versant correspond à la répétition de mesures le long de la pente du versant (diapo 5), dans le but d'établir une distribution statistique des mesures traduisant leur variabilité spatiale intra-versant. Ces distributions sont ensuite comparées d'un versant à l'autre afin d'analyser la variabilité inter-versant. Un ensemble de 6 transects a été mis en place sur les bassins de Valescure (granites) et de Tourgueille (schistes), chaque transect comptant une dizaine de stations. La signature du versant peut être assimilée à la distribution statistique des valeurs mesurées, elle apparaît être finalement assez stable pour l'ensemble des versants, au moins pour les conductivités hydrauliques et les rétentions en eau dans les 40 premiers cm du sol (exemple de la conductivité hydraulique à saturation K_s (diapo 6).

Les profondeurs de sols ont fait l'objet de mesures de résistivités électriques (ERT), à chaque station de transect. Les contrastes de résistivité parviennent à caractériser différentes couches : sols de profondeur moyenne 40 cm, surmontant des couches de résistivité plus importante (5-6000 $\Omega.m$) correspondant à des bancs rocheux plus ou moins fracturés (diapo 6). Une description géomorphologique des transects a aussi été menée à l'aide de fosses pédologiques et d'analyses granulométriques. Une distribution statistique des profondeurs de sols a pu être établie pour chaque versant, et apparaît relativement stable. La zone sondée

(profondeurs 0-2m) doit cependant être étendue pour mieux évaluer la capacité de stockage réelle des formations superficielles.

Des sondes d'humidité des sols ont été mises en place sur les transects pour extraire les propriétés hydrodynamiques du sol (teneur en eau à saturation, teneur en eau résiduelle, paramètres de forme pour la rétention en eau, conductivité hydraulique à saturation) par utilisation du modèle Hydrus-1D (qui résout les transferts dans la zone non saturée à l'aide de l'équation de Richards) et modélisation inverse (Le Bourgeois et al., 2014 ; Le Bourgeois et al., sous presse). Cette méthode s'est avérée performante et d'utilisation relativement simple. Les sols se sont avérés très perméables, avec des conductivités hydrauliques à saturation en moyenne de quelques centaines de mm/h.

La méthode offre également l'avantage de caractériser l'infiltration des couches profondes à partir des mesures dans les horizons superficiels, par calage de la condition limite profonde. Les perméabilités profondes sont dans l'ensemble élevées, et suggèrent que malgré l'apparition de bancs rocheux à partir de 30-40 cm, les horizons profonds sont susceptibles de stocker une quantité d'eau importante.

Sur les zones agricoles des bassins ardéchois, les conductivités hydrauliques proches de la saturation sont faibles (sols riches en argiles), surtout au sein des vignobles et les ruissellements se déclenchent dans les zones les moins perméables qui se connectent progressivement vers le réseau hydrographique. Plutôt qu'une logique d'écoulements de versant, c'est plutôt une organisation spatiale des usages du sol qui est à l'œuvre. On peut notamment trouver des zones saturées sur les crêtes.

Néanmoins, les mesures d'humidité en surface, avant et après événements, montrent une assez grande part de variabilité non expliquée par l'usage du sol. Les écarts de teneur en eau entre deux prairies ou entre deux vignobles sont plus grands que les écarts entre les moyennes de ces états (diapo 10). La réaction des sols entre 10 et 50 cm révèle des réactions à la pluie essentiellement limitées à la surface (diapo 11). On note aussi des gradients initiaux plus forts dans les vignes, ce qui explique, malgré une plus faible

Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale 24 Novembre 2015 Aix en Provence

conductivité hydraulique, un fort retard de saturation dû à l'état plus sec que dans les prairies, protégées de l'évaporation directe.

Parcelles

Les observations précédentes ont également été réalisées sur 4 parcelles de 10 m² (diapo 7), sous pluies naturelles et artificielles (bassins de Valescure sur granite et Tourgueille sur schiste dans le Gard), ces dernières permettant de simuler des conditions extrêmes. Les parcelles apportent donc des réponses sur la stabilité des réponses de la normale à l'extrême, et permettent d'évaluer en conditions extrêmes l'apparition de flux latéraux et la capacité de stockage totale des formations superficielles (Bouvier et al., 2011).

Le dispositif est constitué par un asperseur type goutte à goutte, et d'un ensemble de sondes d'humidité, piézomètres, tensiomètres, lignes d'électrodes pour la réalisation de mesures de résistivité électrique (ERT), complétées par des traçages chimiques, permettant de suivre la progression des flux verticaux et latéraux (diapo 7).

Les mesures de résistivités électriques multi-temporelles (diapo 8, voir aussi Brunet et al., 2010) ont montré que malgré la présence d'horizons rocheux à partir de 30-40 cm, les flux sont essentiellement verticaux dans les 2 premiers m de profondeur. Des pluies artificielles de 500 mm (5 heures à 100 mm/h) survenant sur un sol à demi saturé, ont été totalement infiltrées, et témoignent d'une capacité de stockage au moins égale à ce cumul. Dans ces conditions, la capacité de stockage de la zone sous-jacente au sol est au moins 2 fois supérieure à ce qui est stocké dans les 40 premiers cm.

Sur le bassin du Gazel (Ardèche), des parcelles de vigne et de prairie ont été choisies pour mener des essais de saturométrie (diapo 14). Il s'agit de mesurer le temps de saturation de la surface en fonction de l'intensité de pluie appliquée (Vandervaere et al., soumis). Via une formulation analytique (Boulier et al., 1987), on remonte aux valeurs de la conductivité hydraulique (paramètre intrinsèque) et de la sorptivité capillaire (qui dépend de la teneur en eau initiale). La connaissance de ces deux paramètres permet de calculer un temps de saturation, fonction de

l'intensité de pluie et de l'état initial, qui peut ensuite être cartographié. Les résultats montrent une conductivité hydraulique plus faible sur les vignes mais un temps de saturation plus long en raison d'un état initial plus sec que celui des prairies (diapo 15). Les temps de déclenchement du ruissellement ont également été mesurés lors de ces essais (travail en cours).

Géochimie

La déconvolution géochimique des eaux de rivière permet d'identifier les contributions des différents compartiments de surface, sub-surface et profonds, en fonction des signatures respectives de ces différents compartiments. Un vaste panel d'éléments ont ainsi été explorés : paramètres physico-chimiques, éléments traces, isotopes stables de l'eau, carbone organique... afin de préciser l'origine des eaux de rivière. Au total, sur le bassin de Valescure, 9 crues ont été échantillonnées (pluies et écoulements), complétés par une trentaine de prélèvements en basses eaux, et le même nombre de prélèvements d'eau du sol (20-40cm) pour les isotopes de l'eau.

Les prélèvements de basses eaux montrent une concentration stable des éléments tout au long de l'année, qui représente la signature de l'eau profonde (avec toutefois des nuances si on considère la fin de la période estivale, et des concentrations significativement différentes du reste de l'année). Lors des crues, les mélanges par dilution (Ca, Sr, conductivités électriques) indiquent une contribution de 60-80% de l'eau de pluie au pic de crue, et seulement 20-40% de l'eau pré-existante. Sur le volume total de la crue, ces proportions sont inversées, avec 60-80% d'eau pré-existante et seulement 20-40% d'eau de pluie (diapo 9).

En Ardèche et sur certaines stations de Valescure et Tourgueille, ces suivis détaillés sont complétés par des méthodes plus simples (suivi en continu de la conductivité électrique et de la température de l'eau). L'analyse des données pour en déduire une décomposition des hydrogrammes est en cours.

Infiltrométrie

Sur les bassins ardéchois, les observations montrent le rôle prépondérant de la surface sur la production d'écoulement. Les humidités du sol varient principalement en surface, même lors des pluies les plus intenses (diapos 10 et 11). Une campagne d'essais d'infiltration a été réalisée sur le bassin de la Claduègne (43 km²) en Ardèche. Différents types d'infiltromètres ont été utilisés pour caractériser l'infiltration de surface (diapo 12). Les conductivités hydrauliques dépendent du type d'occupation des sols (diapo 13). Un dispositif de saturation des sols sous pluies artificielles a été proposé pour caractériser les propriétés hydrauliques de surface (diapos 14 et 15). Une compilation des données d'essais d'infiltration sur la région des Cévennes a aussi été menée (voir présentation de P.-A. Ayral et G. Nord). Elle montre que la géologie et l'occupation du sol sont des facteurs explicatifs de la variabilité de la conductivité hydraulique à saturation à l'échelle de la région.

Synthèse sur les observations (diapo 16)

Sur granites et schistes, on note des conductivités hydrauliques de plusieurs centaines de mm.h⁻¹, et des capacités au champ peu élevées, de l'ordre de 0.15 cm³/cm³. Les teneurs en eau au début des crues peuvent varier de 0.05 à la fin de la période estivale, à 0.15-0.20 pour la plupart des crues. Les profondeurs des sols sont en moyenne de 40 cm, avec une forte variabilité spatiale. On a pu montrer l'existence d'une infiltration profonde importante, avec une capacité de stockage estimée à au moins 500 mm. On n'observe pas de saturation sous l'action seule de la pluie.

Sur marnes et calcaires, les conductivités hydrauliques sont aussi élevées. Une campagne d'essais d'infiltration échantillonnant différentes occupation du sol a permis de montrer que la porosité était significativement plus élevée sur les sols recouverts de végétation naturelle que sur les sols cultivés. La conductivité à saturation est quant à elle plus élevée sur forêt que sur sols cultivés. Dans les deux cas, on note aussi une augmentation très rapide de la conductivité lorsqu'on se rapproche de la saturation. La variété des méthodes appliquées a permis de documenter cette forte différence entre conductivité à saturation, liée aux macroporosités, d'une part, et valeur limite de la conductivité non-saturée

près de la saturation, liée à la matrice du sol. Cette discontinuité est une signature de l'usage et du travail du sol.

Modélisation : méthodes et résultats (diapos 17 à 21)

Le modèle vient ensuite comme outil de test, pour des hypothèses concernant les processus aussi bien que la caractérisation des milieux. Le modèle présenté ici (diapo 17) a vocation à combiner les flux verticaux et latéraux dans les différents compartiments de surface, sub-surface et profonds des versants. Le modèle opère à l'échelle événementielle, et ne traite pas des périodes entre les crues, où les processus d'évapotranspiration sont dominants. La paramétrisation du modèle est parcimonieuse (Roux et al., 2011), et certaines simplifications ont été apportées sur les transferts en zone non-saturée, sur la représentation des écoulements latéraux et sur l'infiltration profonde, sans préjudice à l'identification des processus dominants. Dans la version utilisée, le modèle combine un schéma de production de type Green&Ampt, à profondeur limitée, pour l'infiltration de surface, un réservoir linéaire pour l'infiltration profonde, un transfert de type onde cinématique pour l'écoulement de surface, et de type Darcy pour l'écoulement de sub-surface. L'exfiltration de l'écoulement de sub-surface survient lorsque la capacité de stockage en sub-surface est dépassée (diapo 17). La plupart des paramètres du modèle sont tirés des observations et de la connaissance du terrain. D'autres sont calés, fixes (vitesse de transfert de sub-surface) ou variables (humidité initiale du sol, infiltration profonde, fonction de l'humidité initiale) pour l'ensemble des épisodes. Le calage du modèle peut être effectué en mode multi-variables : débits dans la rivière, concentrations géochimiques, extension spatiale du réseau actif, humidités des sols.

Les crues sont correctement simulées à condition de considérer une zone de recharge supérieure à la profondeur des sols stricto sensu. Une distribution aléatoire des profondeurs de 0 à 2m est requise pour la zone de recharge, ce qui semble cohérent avec les observations disponibles. La vitesse de transfert en sub-surface a été estimée à 3 m/h, et la perméabilité

profonde entre 0 et 10 mm/h selon l'humidité initiale. L'humidité initiale est bien corrélée au débit de base (Bouvier et al., 2015).

Dans ces conditions, le modèle indique que pour la plupart des épisodes, l'exfiltration des flux de sub-surface est le processus dominant et contribue pour 70-80% à l'écoulement total, mais que cette contribution n'est que de 20-30% au pic de crue (diapo 18). Ce résultat est cohérent avec l'interprétation des mélanges géochimiques (diapo 9). Le processus dominant au pic de crue serait donc du ruissellement sur surfaces saturées. Un autre contrôle du modèle est apporté par la localisation des mailles saturées sur le bassin, produisant un écoulement de surface par exfiltration ou par ruissellement de la pluie sur surfaces saturées. Ces mailles coïncident plus ou moins avec le réseau hydrographique, ce qui suggère que l'exfiltration est principalement due à la concentration des flux de sub-surface au niveau des ravines (diapo 20). Une meilleure coïncidence avec le réseau observé peut être obtenue moyennant des hypothèses sur l'organisation spatiale des profondeurs des mailles, actuellement à l'étude. Enfin, le modèle s'est avéré robuste au changement d'échelle, et s'applique de façon satisfaisante avec les mêmes paramètres (à l'exception du coefficient de Strickler, ajusté pour des rivières plus larges) au bassin du Gardon à Anduze (545 km²)(diapo 21).

Synthèse des résultats d'observation et de modélisation

- 1/ Les résultats des observations et de la modélisation convergent vers le schéma type suivant (diapo 21), pour les bassins à substrat granitique (et probablement schisteux, avec des variantes sur le stockage profond, à évaluer) :
- 2/ La pluie s'infiltré, sauf saturation du profil vertical
- 3/ L'eau est stockée pour 1/3 dans le sol (< 40cm) et pour 2/3 dans la zone altérée (> 40cm)
- 4/ Un flux latéral s'instaure à la base de la zone altérée et contribue à la saturation des surfaces aval
- 5/ Les zones saturées alimentent la rivière, par exfiltration des flux de sub-surface et par le ruissellement de la pluie
- 6/ Les incisions du réseau hydrographique favorisent l'exfiltration

- 7/ Sur les sites d'Ardèche, l'hydrologie est au contraire pilotée par la surface des sols.
- 8/ Ceux-ci se saturent rapidement mais la macroporosité liée à l'usage du sol (racines, travail de la surface) retarde le déclenchement des écoulements après saturation de la matrice poreuse.
- 9/ Cependant, la majeure partie des écoulements de crue se fait en surface. Les zones ruissellantes se connectent vers les exutoires sans nécessairement suivre une logique de versant
- 10/ Les sols à texture fine sont lents à se mettre en régime permanent d'infiltration, ce qui induit une grande sensibilité à l'état initial. Celui-ci doit être pris en compte dans la qualification des alertes

Conclusions et perspectives (diapo 22)

- 1/ Une expérience réussie de couplage entre observations et modélisation, même si de nouvelles observations doivent être mises en place (zone profonde). Des hypothèses/connaissances nouvelles sur les flux de sub-surface, sur le rôle de la zone altérée/fracturée, sur les conditions de saturation des sols, sur le rôle du réseau hydrographique.
- 2/ Des « patterns » des propriétés des terrains étudiés : porosités, conductivités hydrauliques, rétention en eau, perméabilité profonde. Probablement des variations locales, mais une structure type significativement rattachée à la géologie.
- 3/ Des outils de référence pour des prévisions de crue en contexte non stationnaire ou pour le couplage avec sédiments et éléments chimiques. Des outils robustes au changement d'échelle, utilisables comme référence par rapport à des modèles simplifiés régionaux.
- 4/ Nécessaire d'approfondir le fonctionnement de la zone profonde, dont les propriétés restent insuffisamment connues : installation de piézomètres, sondages ERT plus profonds...
- 5/ Si possible, passer de l'événementiel au continu, et utiliser les données continues d'humidités actuellement disponibles pour mesurer et modéliser l'évapotranspiration réelle (ETR) ou utiliser d'autres estimations de cette grandeur

- 6/ Réaliser le contrôle multi-variable du modèle : couplage avec chimie, extension spatiale du réseau hydrographique
- 7/ Elargir l'étude des processus aux autres bassins, et aux autres unités géologiques (schistes, marnes et calcaires).

Quel intérêt pour les opérationnels ? A quoi cela peut-il servir en pratique ? (diapo 23)

- 1/ Acquisition de jeux de données très fournis sur les propriétés hydrodynamiques des sols/sous-sol, ce qui permet la mise à jour de fonctions de pédo-transfert reliant la texture du sol à ses propriétés hydrodynamiques
- 2/ Les mesures d'humidité de surface pourraient remplacer l'indice SIM (issu du modèle SAFRAN-ISBA-MODCOU de Météo-France) pour affiner les niveaux d'alerte
- 3/ Les informations sur la chimie des eaux peuvent permettre d'évaluer la qualité des modèles,
- 4/ Mise au point de méthodes éprouvées et robustes, accessibles en semi-opérationnel (modélisation inverse des humidités du sol, résistivités électriques, infiltrométrie)
- 5/ Comme dit précédemment, les modèles basés sur les processus (bien identifiés) ont vocation à servir de référence dans tous les cas de non stationnarité temporelle, en prenant explicitement en compte les changements du milieu. Ils apportent également un contrôle de l'extrapolation vers les extrêmes, étant basés sur une physique validée du phénomène. Ils offrent également des perspectives intéressantes pour le transport de sédiments ou l'étude de la mobilité des particules, pour les pollutions ou l'épuration. Enfin, ils servent également de référence pour des modèles simplifiés, ou appliqués à d'autres échelles.

Références bibliographiques

Ayral, P.A., Sauvagnargues-Lesage, S., Gay, S., Bressand, F., 2005. Forecasting flash-floods with an operational model. Application in the

South-East of France (Gard). In: (Ed), S.B. (Ed.), Flood Risk Management in Europe. Springer, pp. 335-352.

Boulier, J.-F., Parlange, J.Y., Vauclin, M., Lockington, D.A., 1987. Upper and lower bounds of the ponding time for near constant surface flux. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51 (6), 1424– 1428.

Bouvier C., Brunet P., Taver V., 2011. Caractérisation des écoulements de sub-surface sur un versant méditerranéen : expérimentation sur la parcelle de Sumène (Gard). 36èmes Journées du GFHN, 8ème colloque GEOFCAN, Orléans, 29 nov. 1er dec., « Milieux poreux et transferts hydriques », Bulletin du GFHN n°57, 177-180

Bouvier, C. et al., 2015. Hydrological processes generating flash floods in a small mountainous Mediterranean French catchment, *J. Hydrology*, in revision.

Brunet, P., Clément, R., Bouvier, C., 2010. Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT) - A case study in the Cevennes area, France. *Journal of Hydrology*, 380(1-2): 146-153.

Cosandey, C., Didon-Lescot, J.-F., 1999. Genèses des crues «Cévenoles» dans les bassins élémentaires: L'exemple du Bassin de la Latte (versant sud du Mont Lozère). In Société hydrotechnique de France (pp. 35-44).

Le Bourgeois et al, 2014. Spatial variability of the hydrodynamic properties of soil at hillslope scale in Cevennes area. Conference AGU Chapman, Catchment Spatial Organization and Complex Behavior

Le Bourgeois O. , Bouvier C., Brunet P., Ayral P.-A.(accepted). Inverse modeling of water content for estimation of the hydraulic properties in a high-conductive soil in Mediterranean climate

Le Lay, M., Saulnier, G.-M., 2007. Exploring the signature of climate and landscape spatial variabilities in flash flood events: case of the 8-9 September 2002 Cévennes-Vivarais catastrophic event. *Geophysical Research Letters*, 34(13): L13401.

Moussa, R., Chahinian, N., & Bocquillon, C. (2007). Distributed hydrological modelling of a Mediterranean mountainous catchment—Model

Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale 24 Novembre 2015 Aix en Provence

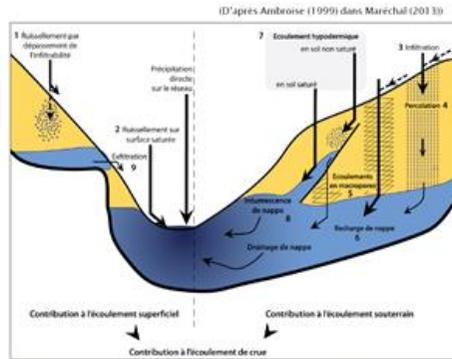
construction and multi-site validation. *Journal of Hydrology*, 337(1), 35-51.

Roux, H., Labat, D., Garambois, P. A., Maubourguet, M. M., Chorda, J., & Dartus, D. (2011). A physically-based parsimonious hydrological model for flash floods in Mediterranean catchments. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 11(9), 2567-2582

Saulnier, G.M., Le Lay, M., 2009. Sensitivity of flash-flood simulations on the volume, the intensity, and the localization of rainfall in the Cévennes-Vivarais region (France). *Water Resources Research*, 45: W10425, doi: 10.1029/2008WR0069056.



Contexte : Processus hydrologiques, comment et pour quoi faire ?



2 Multiples façons de générer des crues !

Besoin de modèles base physique pour des applications en contexte non stationnaire (climat, sol/végétation, aménagement), extrapolation (extrêmes, bv non jaugés), couplages (sédiments, chimie), etc...

Aller vers des modèles qui fonctionnent bien pour des bonnes raisons!
Echelle versant/petit bassin = échelle idéale

2



Questions abordées



- Quelles propriétés des sols: profondeurs, porosités, conductivités hydrauliques et rétention en eau, variabilité et organisation spatiale ?
- Quelle perméabilité du sous-sol, et des différents niveaux d'altération ? Quelle métrologie ?
- Les propriétés de surface peuvent-elles être déterminées par l'usage du sol ? Impact des conditions d'humidité initiale sur la réponse du versant ?
- Quels processus finalement identifiés ? Quelle part des écoulements de surface, de sub-surface ou profonds sur la formation des crues ? Pour quelle gamme de bassins versants ?

Cas des formations granitiques



Autres géologies étudiées : schistes, marnes, basaltes, karts

4



Etat des lieux/Objectifs



Plusieurs modélisations sur les Cévennes, basées soit sur des processus de type hortonien (Ayrat et al., 2005; Chahinian et Moussa, 2007), soit ruissellement sur surface saturées (Le Lay et Saulnier, 2007; Saulnier et Le Lay, 2009) & écoulements de sub-surface (Roux et al., 2011)

Mais peu de connaissances des caractéristiques et des propriétés du milieu : pas de validation physique des processus !

- Mettre en adéquation modélisation et observation
- Instrumenter à l'échelle du versant / petit bassin
- Proposer un modèle de référence à base physique pour chacune des régions géologiques étudiées, à des échelles variant entre 1 et quelques centaines de km²

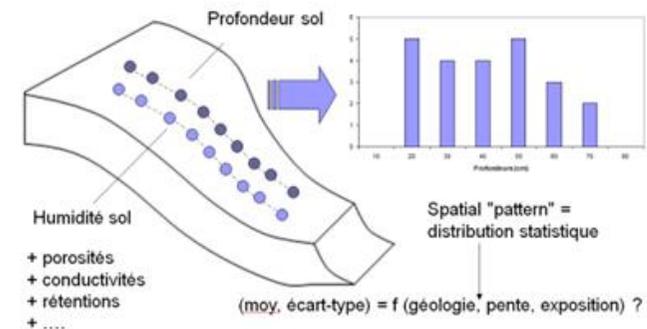
3



Mesures transects versant



➤ Signature versant

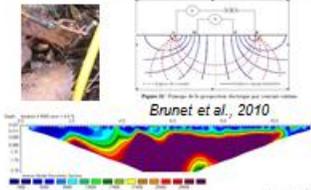


6 transects Valescure/Tourqueille

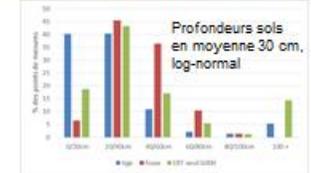
5

FloodScale Mesures transects versant **POLE RISQUES**

Mesures de résistivités électriques

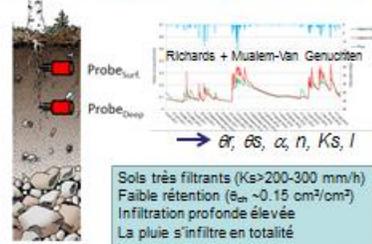


Brunet et al., 2010

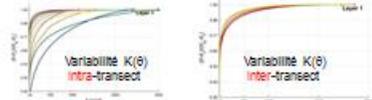


Profondeurs sols en moyenne 30 cm, log-normal

Modélisation inverse des humidités des sols



Sols très filtrants ($K_s > 200-300$ mm/h)
Faible rétention ($\theta_{\text{sat}} \sim 0.15$ cm³/cm³)
Infiltration profonde élevée
La pluie s'infiltré en totalité

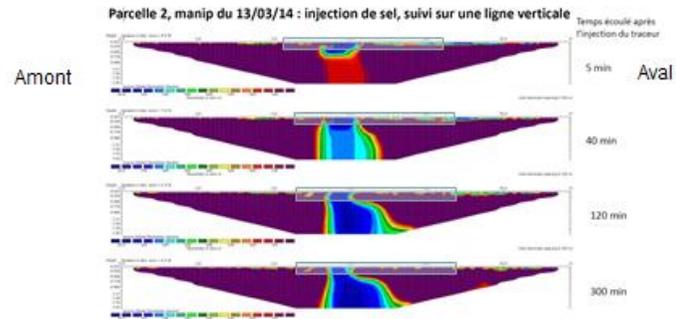


Le Bourgeois et al., 2014, 2015

6

FloodScale Mesures parcelles **POLE RISQUES**

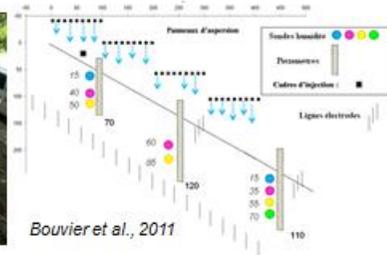
Résistivités électriques multi-temporelles



- Flux essentiellement vertical dans les 1ers mètres
- Capacité de stockage > 500 mm, principalement dans la zone altérée

8

FloodScale Mesures parcelles **POLE RISQUES**



Bouvier et al., 2011

- Suivi de parcelles sous pluies naturelles et artificielles (extrêmes)
- Suivi des flux verticaux et latéraux, par mesures des résistivités électriques multi-temporelles et traçages
- Estimation du stockage profond en conditions extrêmes

3 parcelles sur Valescure

7

FloodScale Geochimie **POLE RISQUES**

Valescure 2012-2014



Paramètres physico-chimiques	Rapports entre isotopes stables de l'eau
pH, Conductivité Électrique, T°C, Na, Ca, K, Mg, NH ₄ ⁺ , F, Cl, NO ₃ ⁻ et SO ₄ ²⁻ = alcalinité (HCO ₃ ⁻ +CO ₃ ²⁻)	¹⁸ O/ ¹⁶ O ² H/ ¹ H
Matière organique	Concentrations et Rapports entre isotopes d'éléments en trace
COT : Carbone Organique Total COD : Carbone Organique Dissous	Li, B, Al, Si, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Mo, Cd, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Tl, Pb, Th, U

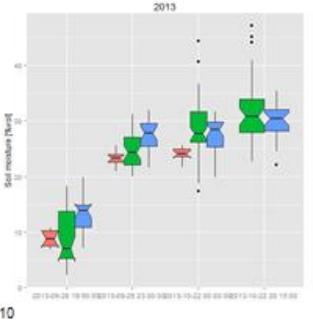
Eau rivière = mélange pluie, eau du sol, eau profonde, de signatures différentes



9

FloodScale Mesures humidités sols (Gazel) 

- Caractérisation des **profils verticaux** :
 - sonde itinérante en surface (0-5 cm)
 - sondes fixes de 10 à 50 cm de prof.
- dans les prairies, les vignes, les jachères, les zones boisées.


En surface, les différences sont plus grandes entre les sites qu'entre les moyennes des usages du sol.

Infiltrométrie



Infiltromètre LTHE



Mini-infiltromètres Irstea



Peméamètre de Guelph



Infiltromètre HSM



Méthode Beerkan

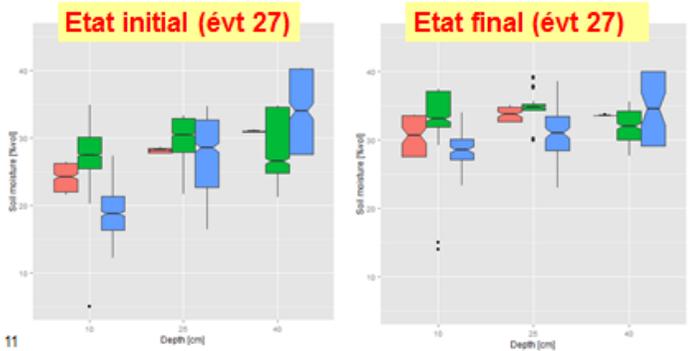


Double anneau

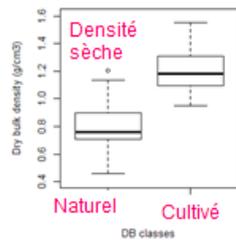
FloodScale Rôle prépondérant de la surface 

Même les événements forts ne font varier l'humidité du sol que **superficiellement**. Ceci confirme l'intérêt d'une surveillance de l'humidité de surface pour les alertes sur les petits bassins ardéchois peu perméables. Les variations sont plus importantes **dans les vignes**.

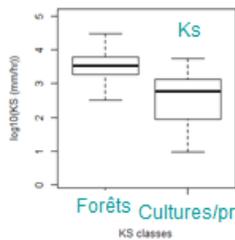
Etat initial (évt 27) **Etat final (évt 27)**



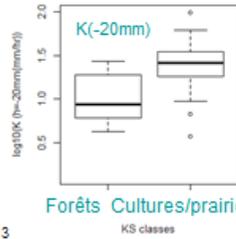
Impact occupation sols sur propriétés sols (Ardèche)



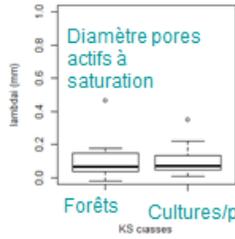
Densité sèche



Ks



K(-20mm)



Diamètre pores actifs à saturation

Forêts: Ks plus élevé, mais conductivité plus faible que les cultures et les prairies proche de la saturation

FloodScale Une nouvelle méthode de caractérisation de la surface **POLE RISQUES**

Pour caractériser rapidement les propriétés de surface : le SATUROMETRE.

Mesure du temps de saturation du sol à différentes intensités de pluie → Conductivité hydraulique K et sorptivité capillaire S

FloodScale Synthèse des observations **POLE RISQUES**

➤ Estimation des propriétés hydrodynamiques

- Sur granites (et schistes) :
 - Conductivités élevées (> 200 mm/h) entre 0 et 40 cm de profondeur
 - Infiltration profonde (> 40 cm) élevée,
 - Stockage profond > 300-400 mm,
 - Pas de saturation sous l'action seule de la pluie
- Sur marnes et basaltes
 - Conductivités faibles (2 mm/h pour la matrice du sol, >200 mm/h pour la macroporosité)
 - Pilotage du fonctionnement par la surface
 - Infiltration faible sous intensité de pluie forte
 - Rôle important de l'humidité initiale sur la réponse des bassins (en cours de modélisation).

16

FloodScale Saturométrie : exemple de résultat **POLE RISQUES**

On caractérise l'état sec (en rouge) avec la couche de surface et l'état humide (en bleu) avec la couche sous-jacente.

$K = 3 \text{ mm/h}$
 $S(\text{humide}) = 14 \text{ mm/h}^{1/2}$
 $S(\text{sec}) = 28 \text{ mm/h}^{1/2}$

➤ **Prédiction à base physique des temps de saturation au sein du bassin.**

15

FloodScale Modélisation Valescure (4 km²) **POLE RISQUES**

➤ **Modèle base physique pour test hypothèses**

Surface infiltration : Green&Ampt, limited depth
 $f(t) = K_s \left(1 + \frac{2S_0(h - \theta_s)}{F(t)} \right) \text{ si } F(t) < H_0 \cdot (\theta_s - \theta)$
 $f(t) = 0$ sinon
 $F(t) = \frac{dF(t)}{dt} = f(t) - ds \cdot F(t)$

Surface runoff : kinematic wave
 $q_s(t) = K_r \cdot \sqrt{I} \cdot R(t)^{\beta-0.66} \cdot I_h(t)$
 $R(t) = I \cdot h(t) / (t + 2h(t))$

Sub-surface runoff : Darcy
 $q_{ss}(t) = K_{int} \cdot I \cdot f(t)$

Exfiltration
 si $F(t) > H_0 \cdot (\theta_s - \theta)$

Deep infiltration : linear reservoir
 $f_{deep}(t) = ds \cdot F(t)$

www.athys-sof.org
 Validation multi-variable : débits/chimie/humidité sols/réseau hydro actif
 Ref

17

FloodScale **POLE RISQUES**

Résultats

➤ **Ce que dit le modèle**

- 70-80 % du volume de la crue est fourni par l'exfiltration des flux de sub-surface
- 70-80 % du débit de pointe de crue est fourni par le ruissellement sur surfaces saturées
- schéma conforme à dilution Strontium
- Vitesse transfert latéral ~ 3m.h⁻¹
- Profondeur moyenne active ~ 2m
- Infiltration profonde entre ~ 2-10 mm.h⁻¹ selon humidité initiale

Bouvier et al., en révision, JoH

18

FloodScale **POLE RISQUES**

Où et pourquoi exfiltration ?

➤ **Zones productives limitées essentiellement au réseau hydrographique**

Simulation localisation des mailles saturées sous certaines hypothèses de profondeurs sols (en cours)

- Rupture de pente
- Diminution profondeur
- Convergence de flux de sub-surface
- Interception ravines

20

FloodScale **POLE RISQUES**

Synthèse processus

➤ **Schéma Valescure**

- La pluie s'infiltré jusqu'à saturation du profil vertical
- L'eau est stockée pour 1/3 dans le sol (< 40cm) et pour 2/3 dans la zone altérée (> 40cm)
- Un flux latéral s'instaure à la base de la zone altérée et contribue à la saturation des surfaces aval
- Les zones saturées alimentent la rivière, par exfiltration des flux de sub-surface et par le ruissellement de la pluie
- Les incisions du réseau hydrographique favorisent l'exfiltration

19

FloodScale **POLE RISQUES**

Changement d'échelle

➤ **Application au Gardon à Anduze (545 km²)**

- Le modèle est robuste au changement d'échelle, sans changement de paramètres (sauf Strickler)

21



Conclusions et perspective



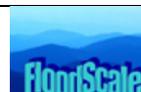
➤ Ce qu'il faut retenir, nouvelles connaissances acquises

- une description représentative des propriétés des versants et des processus de formation de crues en zone cévenole (granit/schistes, marnes/calcaires)
- Des caractérisations adaptées aux différents contextes
- une expérience réussie de mise en adéquation observation/modélisation
- un modèle à base physique opérant à une large gamme d'échelle

➤ Ce qui reste encore à étudier

- Entre les crues (ETR, modélisation continue)
- Autres géologies (schistes, marnes, calcaires)
- Modélisation HEC-HMS en cours sur le bassin du Gazel
- Couplages multi-variables (chimie, réseau actif, humidités)

22



Quel intérêt pour les opérations



➤ Ce qui peut être utile à court ou moyen terme. A quoi ça peut servir en pratique

- Des jeux de données très fournis sur les propriétés hydrodynamiques des sols/sous-sol (→ mise à jour fonctions pédo-transfert), la chimie des eaux (→ contrôle qualité)
- Des méthodes éprouvées et robustes, accessibles en semi-opérationnel (modélisation inverse, résistivités électriques, infiltrométrie, saturométrie) ?
- Des mesures pour affiner les index (SIM) d'état initial et de niveaux d'alerte
- Un modèle de référence/contrôle pour :
 - Δ extrapolation vers extrêmes,
 - Δ simulation impact aménagement ou changement climat
 - Δ validation modèles simplifiés à différentes échelles
 - Δ couplages avec chimie/pollutions

23



Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale

Quelles avancées sur l'estimation des pluies et la quantification de leur incertitude?

Guy Delrieu, LTHE Grenoble; Etienne Leblois, Irstea, HHLY, Lyon; Julie Carreau, HSM, Montpellier

avec les contributions de B. Boudevillain, A. Wijbrans, A. Confoland, S. Anquetin, C. Bouvier, S. Chen, M. Ollagnier



Quelles avancées sur l'estimation des pluies et la quantification de leur incertitude?

Guy Delrieu, LTHE Grenoble, Etienne Leblois, Irstea, HHLY, Lyon, J. Carreau, HSM de B. Boudevillain, A. Wijbrans, A. Confoland, S. Anquetin, C. Bouvier, S. Chen, M. Ollagnier

Contexte (diapos 2 et 3)

Les épisodes de pluie méditerranéens qui conduisent parfois à des crues rapides, en particulier sur les Cévennes, peuvent être de deux types (diapo 2). On trouve d'une part des pluies d'origine plutôt orographique lorsque les flux d'air humides venus de la Méditerranée viennent buter sur les reliefs. Ces pluies peuvent durer plusieurs jours, avec des intensités modérées, mais conduire à des cumuls de pluie importants. D'autre part, on trouve des Systèmes Convectifs de Méso-Echelles (SCME) qui conduisent à des épisodes généralement plus intenses et plus courts que les premiers (voir aussi le site de Météo-France dédié aux épisodes méditerranéens).

Les échelles caractéristiques de la variabilité spatiale et temporelle de la réponse hydrologique (temps de réponse en fonction de la surface du bassin versant) associée à différents types de pluie sont présentées sur la diapo 3. La cellule convective, affecte des petits bassins, urbains en particulier, avec des temps de réponse de la dizaine de minutes à l'heure. Les SCME affectent plutôt des bassins de taille intermédiaire 100-1000 km², avec des temps de réponse de quelques heures. Enfin, les fronts intéressent les plus grands bassins avec des temps de réponse de 1 à 15 jours.

Compte tenu des échelles des crues rapides (cf présentation introductive I. Braud), il est important d'être capable de caractériser la variabilité spatiale et temporelle de la pluie à différentes échelles, d'estimer la pluie à ces échelles et de connaître les incertitudes sur ces estimations. Compte tenu de l'évolution de la modélisation, qui tend à passer d'une approche événementielle à une modélisation en continu, des estimations de pluie sur des bassins versants de différentes tailles en continu sont aussi requises.

Ces estimations peuvent aussi être utiles pour l'ajustement de la distribution des pluies extrêmes.

Le travail réalisé dans le projet FloodScale sur les précipitations avait comme objectifs (diapo 4):

- De fournir des estimations de pluie à différentes échelles d'espace et de temps
- De quantifier l'incertitude associée à ces estimations
- De progresser sur la connaissance des distributions des extrêmes

Pour répondre à ces objectifs, trois pistes de travail ont été exploitées (diapo 5):

- Piste 1: estimer la pluie et son incertitude par combinaison de données radar et pluviométriques, avec les questions suivantes : comment fusionner les données radar et pluviométriques ? Y a-t-il une valeur ajoutée par cette fusion ? Comment caractériser l'incertitude des estimations de pluie?
- Piste 2: s'appuyer sur le simulateur stochastique de pluie SAMPO et des simulations de pluie conditionnelles (i.e. respectant les observations disponibles). Une version du simulateur correspondant à des pluies homogènes existait au début du projet qui a permis de produire un premier jeu de simulations. D'autres travaux ont aussi porté sur l'adaptation du simulateur pour prendre en compte l'hétérogénéité spatiale des pluies telle que l'effet de relief
- Piste 3: étude des distributions des extrêmes des moyennes spatiales de pluie sur un bassin, avec comme objectif de comparer

la pertinence de différentes distributions statistiques à reproduire la distribution des extrêmes de pluie spatiale

Plusieurs sources de données pluviométriques ont été utilisées dans ces travaux (diapo 6)

- Piste 1 : les données des postes pluviométriques horaires et journaliers sur la fenêtre des Cévennes, ainsi que les mosaïques du réseau radar ARAMIS de Météo-France sur la période 2007-2014
- Piste 2 : les données des postes pluviométriques horaires sur le bassin versant de l'Ardèche
- Piste 3 : 8 postes pluviométriques journaliers sur le bassin des Gardons à Anduze

Estimation des pluies par fusion radar et pluviographes (diapos 7 à 14)

Ce travail a permis l'obtention d'estimations quantitatives de pluie, adaptées à la dynamique rapide des crues, pour la région Cévennes-Vivarais au cours de la période 2007-2014, en s'appuyant sur les données des services opérationnels (Météo-France, Service de Prévision des Crues du Grand Delta, Electricité de France). Pour chaque jour de la période, une carte de pluie quotidienne basée sur les données pluviométriques seules a été produite avec une résolution de 1 km² sur la région d'intérêt (32 000 km²) en utilisant la méthode du krigeage ordinaire (KO). En outre, pour une sélection d'événements de pluies significatives (cumul journalier supérieur à 30 mm en un point du domaine), des estimations de pluies horaires sont produites pour deux types de supports géographiques: (i) les cartes avec 1 km² de résolution et (ii) un découpage des principaux bassins versants cévenols en sous-bassins de taille sensiblement homogène dans la gamme 5 – 300 km². Une mise en œuvre systématique de trois méthodes d'estimation (diapo 7) a été effectuée : estimation par radar seul (radar), estimation par krigeage ordinaire des pluviomètres horaires (OK), estimation par fusion des données radar et pluviométriques par la technique de krigeage avec dérive externe (KED) (Delrieu et al., 2014b). Les diapos 8 à 10 illustrent les résultats de ces trois méthodes pour trois épisodes aux caractéristiques différentes. La comparaison de ces méthodes par

validation croisée (diapo 11) montre que la méthode KED est systématiquement équivalente ou meilleure à la meilleure des deux autres méthodes en termes de biais et de co-fluctuation spatiale et temporelle.

Nous avons également développé un modèle d'erreur (Delrieu et al., 2014a, b) fondé sur une hypothèse de dépendance linéaire de l'écart-type d'erreur au produit de l'écart-type d'estimation normalisé du krigeage par l'intensité de pluie, le coefficient multiplicatif de cette relation étant estimé également par validation croisée (diapo 12). Nous avons étudié (diapo 13) l'évolution de l'écart-type d'erreur en fonction du pas de temps (de 1h à 6 h) et de la surface (de 5 à 300 km²) : nous observons que la plus-value du radar par rapport au réseau pluviométrique augmente pour les plus petits pas de temps et d'espace, et que cette plus-value est particulièrement forte pour les épisodes de convection localisée. Mentionnons aussi la production de réanalyses à pas de temps de 15 minutes et résolution kilométrique sur des bassins de méso-échelle comme le bassin de l'Auzon (Wijbrans et al., 2014).

Ces « réanalyses » de pluie seront utiles pour différentes études telles que (diapo 14) :

- Le forçage de modèles hydrologiques distribués et l'étude de la propagation des erreurs
- La validation des prévisions de pluie des modèles numériques de prévision tels que AROME
- La validation d'estimations de pluie par satellite (projet GPM de la NASA-JAXA)
- L'aide à la caractérisation des extrêmes de pluie, notamment dans leur dimension spatiale aux plus fines échelles spatio-temporelles.

Simulation stochastique de pluie (diapos 15 à 27)

L'approche présentée ici a visé à reconstruire les pluies sur le bassin de l'Ardèche sur la période 2000-2008 sur des mailles de 2x2 km² et au pas de temps horaire (Renard et al., 2011). Elle s'appuie sur des techniques de simulations conditionnelles d'inspiration géostatistique implémentées

Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale 24 Novembre 2015 Aix en Provence

dans le simulateur stochastique de pluie SAMPO (Leblois et Creutin, 2013)..

Les hypothèses suivantes sous-tendent la modélisation (diapo 15):

1. Homogénéité spatio-temporelle du processus, au moins temporaire. On entend par là qu'au-dessus de la zone d'étude fixée, à tout instant ne se présente qu'un type de pluie. C'est ce qu'on entend par la notion de zone homogène : c'est le type de pluie (statistique) qui est le même, les valeurs de pluie concrètes varient quant à elles d'un point à l'autre selon la variabilité propre du type.
2. A ce type de pluie en succèdera au bout d'un certain temps un autre, l'alternance entre les différents types de pluie devra donc être décrite. Les paramètres de cette alternance porteront la variabilité saisonnière, les paramètres des types de pluie, eux, sont constants.
3. Intermittence. Au sein d'un même type de pluie se présentent des zones pluvieuses et non pluvieuses, qui se combinent pour former un composite. Sauf exception on admettra qu'il y a indépendance, aux pas de temps et d'espace fins, des champs d'indicatrice et de pluie non-nulle (Leblois et Creutin, 2013)
4. Possibilité d'une advection
5. Distributions non gaussiennes. Il est d'évidence empirique que les pluies présentent occasionnellement des valeurs très fortes. Ces éléments orientent vers des distributions de pluie non-nulles (hors les zéros) non gaussiennes, asymétriques à droite. Pour autant, il ne s'agit pas de lois d'extrêmes, car les petites pluies aussi doivent être décrites.

Les hypothèses qui sous-tendent la simulation sont les suivantes (diapo 16) : le domaine d'étude peut être divisé en zones homogènes du point de

vue de la pluie ; sur une zone homogène, les pas de temps de pluie peuvent être divisés en types de pluie ; sur une zone homogène, on n'a qu'un seul type de pluie à la fois ; chaque type est modélisé comme un processus aléatoire d'ordre 2.

La simulation sur une zone homogène est basée sur la technique géostatistique des bandes tournantes appliquée à des champs 3D (diapo 17), moyennant certaines adaptations pour tenir compte du fait que la pluie se déploie dans l'espace et le temps, a une distribution non-gaussienne, peut être advectée, et est intermittente (diapos 18 à 21). La technique des bandes tournantes par essence génère des champs Gaussiens de structure spatiale connue (imposée). Le champ de précipitation est élaboré comme composite d'un champ de précipitation non-nulle et d'un champ d'indicatrice de pluie. Le champ de précipitation non nulle est dérivé d'un premier champ Gaussien simulé. Il faut aussi estimer les paramètres du modèle géostatique (diapo 22). Pour cela, on applique une distribution calée sur l'ensemble des valeurs de précipitations non nulles observées (il s'agit bien de l'ensemble des pluies non-nulles et pas seulement des valeurs extrêmes). Ces valeurs présentant souvent une forte asymétrie, on aura recours à une distribution compatible, la gaussienne inverse (IG). Le champ d'indicatrice est obtenu par seuillage dans un deuxième champ Gaussien, simulé indépendamment (seuillage).

De par la technique de simulation, les paramètres d'un type de pluie doivent être établis pour une population réputée homogène. Quand on part d'observations de long terme effectuées sur un réseau pluviométrique, l'homogénéité n'est pas donnée et il faut l'organiser en traçant des sous-ensembles de travail au sein du continuum, de fait segmenter la chronologie en un calendrier d'occurrences de types de pluie (Leblois et al., en préparation). Pour cela, nous procédons à une classification de Kohonen des champs de pluie. Insistons sur le fait que ce sont les pas de temps que l'on classe. Nous ne recourons à la classification que pour les pas de temps proprement pluvieux, le temps sec étant mis à part d'office. La classification non supervisée de Kohonen (également appelée carte

auto-organisatrice ou Self Organizing Map, SOM) a la particularité de ventiler les individus dans un espace de classes ordonné sur un espace graphique prédéfini, en privilégiant la continuité entre classes voisines (diapo 22). Ce type de résultat est interprétable par le géographe comme une carte, par le dynamiqueur comme un plan de phase, par le statisticien comme une classification. Cette lisibilité des résultats rend cette technique souvent utile dans les travaux approches multidisciplinaires, et son usage s'est beaucoup développé dans les années récentes en climatologie-météorologie.

Les pluies étant regroupées par classes, il convient de décrire chaque type (Lepioufle et al., 2012). On cale empiriquement distribution ponctuelle et fonctions de structure (variogrammes) sur les données, ce qui requiert un certain degré d'expertise et de savoir-faire.

Les travaux récents (master 2 Ollagnier, 2013 ; thèse de Sheng Chen en cours) portent sur la levée de l'hypothèse d'homogénéité des champs de pluie pour un pas de temps donné. Les travaux de recherches se basent sur l'hypothèse que la coordination peut être faite non pas au niveau des valeurs de pluies simulées, problème difficile, mais plus simplement en liant entre elles les séquences qualitatives pilotant les types de pluie (diapo 24).

Pour la simulation conditionnelle (diapos 25 et 26), toute valeur de précipitation non-nulle observée doit être transformée en son équivalent Gaussien pour que soit conditionné le champ Gaussien sous-jacent. Il faut réaliser une opération équivalente pour l'indicatrice de précipitation, mais le seuillage n'admet pas de fonction réciproque : nous recourons donc préalablement à un échantillonneur de Gibbs, ou à l'algorithme de Metropolis-Hastings, pour fournir des valeurs Gaussiennes compatibles avec les valeurs d'indicatrice observées. Les études de pluies se baseront sur des pluies regroupées en ensembles homogènes.

Ceci a permis de générer un premier jeu d'une centaine de réalisations de pluie sur la période 2000-2008 sur le bassin de l'Ardèche, respectant les valeurs observées aux pluviomètres, tout en rendant compte de la

méconnaissance de la pluie entre ces derniers. Ces champs de pluie, tout comme les réanalyses pluviométriques, ont été exploitées dans une modélisation hydrologique simple (modèle SIMPLEFLOOD, Adamovic, et al., 2015, voir présentation sur la modélisation de I. Braud et al.) dans le travail de Suspène (2015).

Distribution des extrêmes pluviométriques (diapos 27 et 28)

Nous avons comparé huit modèles de densité multivariée ajustés aux cumuls de pluie journaliers en huit stations réparties sur le bassin du Gardon à Anduze (voir Carreau et Bouvier, 2015 pour plus de détails).

Seuls les cumuls journaliers dont la moyenne spatiale est supérieure à 50 mm sont retenus dans cette comparaison car ce type d'événement est considéré comme potentiellement générateur de crues rapides.

Les conclusions générales sont les suivantes :

- Il est difficile de mettre en évidence la valeur ajoutée des modèles spécifiques pour les extrêmes car la longueur de la chronique utilisée est courte (43 ans) ce qui entraîne de fortes incertitudes sur l'estimation des événements extrêmes.
- Cependant, des modèles plus flexibles, en particulier qui permettent d'introduire de l'asymétrie, ont, selon les critères retenus dans la comparaison, une performance significativement meilleure que des modèles de références (modèle méta-Gaussien avec loi marginale Gamma).

Conclusions et perspectives (diapos 29 et 30)

Les travaux sur la pluie ont permis des progrès dans plusieurs directions :

- Production de réanalyses par fusion de données radar et pluviométriques à l'échelle de la fenêtre des Cévennes et leur écart-type d'estimation

Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale 24 Novembre 2015 Aix en Provence

- De faire progresser un simulateur stochastique de pluie pour mieux prendre en compte les hétérogénéités spatiales et pouvoir ainsi simuler des séries de pluies spatialisées avec leurs incertitudes pour des études de sensibilité
- De mieux appréhender la distribution des extrêmes pluviométriques pouvant conduire à des crues rapides.

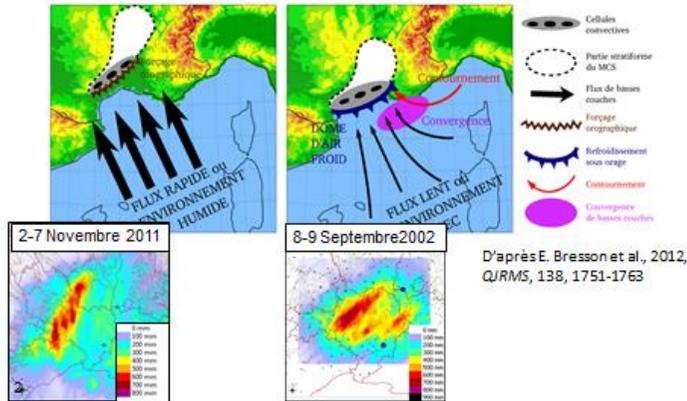
Pour aller plus loin, il pourrait être intéressant de combiner les différentes approches. On peut ainsi penser à utiliser les informations des réanalyses pluviométriques pour améliorer la description statistique des caractéristiques de pluie dans le simulateur stochastique. Ces données peuvent aussi être intéressantes pour les études sur les distributions des extrêmes. Les connaissances acquises sur les distributions des extrêmes pourraient aussi être utiles pour améliorer le simulateur stochastique de pluie sur ce type d'épisodes.

Références

- Adamovic, M. Branger, F., Braud, I., Kralisch, S., 2015. Development of a data-driven distributed hydrological model for regional scale catchments prone to Mediterranean flash floods, *J. Hydrology*, submitted.
- Carreau, J., Bouvier, C., 2015. Multivariate density model comparison for multi-site flood-risk rainfall in the French Mediterranean area, *Stoch Environ Res Risk Assess*, sous presse, DOI 10.1007/s00477-015-1166-6
- Delrieu, G., Bonnifait, L., Kirstetter, P.-E., Boudevillain, B., 2014a. Dependence of radar quantitative precipitation estimation error on the rain intensity in the Cévennes region, France. *Hydrological Sciences Journal*, 59(7): 1-12.
- Delrieu, G., Wijbrans, A., Boudevillain, B., Faure, D., Bonnifait, L., Kirstetter, P.-E., 2014b. Geostatistical radar-rain gauge merging: A novel method for the quantification of rain estimation accuracy. *Advances in Water Resources*, 71(0): 110-124.
- Leblois, E., Creutin, J.-D., 2013. Space-time simulation of intermittent rainfall with prescribed advection field: Adaptation of the turning band method. *Water Resources Research*, 49(6): 3375-3387.
- Leblois E., Creutin J.-D., Jeanpierre A.-L., Renard, B., Braud, I., in prep. Modeling Rainfall Type Occurrence Coupling Kohonen's Classification and Hidden Markov's Model, en préparation.
- Lepioufle, J.M., Leblois, E., Creutin, J.D., 2012. Variography of rainfall accumulation in presence of advection. *Journal of Hydrology*, 464: 494-504.
- Ollagnier, Mélodie, 2013. Climatologie des pluies en région Cévennes-Vivarais : caractérisation des situations pluvieuses à l'échelle régionale, Juin 2013, M2R "Science de la Terre - Eau, Climat, Environnement" 4 mois, LTHE.
- Renard, B., Kavetski, D., Leblois, E., Thyer, M., Kuczera, G., Franks, S.W., 2011. Towards a reliable decomposition of predictive uncertainty in hydrological modeling: characterizing rainfall errors using conditional simulation. *Water Resources Research*, 47: W11516, doi:10.1029/2011WR010643.
- Suspène, H., 2015. Impact de l'incertitude sur la connaissance des champs pluviométriques sur la réponse hydrologique d'un grand bassin Méditerranéen. Application au bassin versant de l'Ardèche, Master EAU, Spécialité Ressource Parcours Hydrologie, Risques et Environnement, Montpellier, 50 pp.
- Wijbrans A., Delrieu G., Nord G., Boudevillain B., Berne A., Grazioli J., Confoland A., 2014. Rain gauge - radar rainfall reanalysis of operational and research data in the Cévennes-Vivarais region, France, estimation error analysis over a wide range of scales in; *International Symposium Weather Radar and Hydrology*, Washington DC, USA, 7-9 April 2014.

Contexte: une grande variété de systèmes pluvieux

Des pluies orographiques ... aux systèmes convectifs de méso-échelle



3

Contexte et objectifs

➤ Besoins :

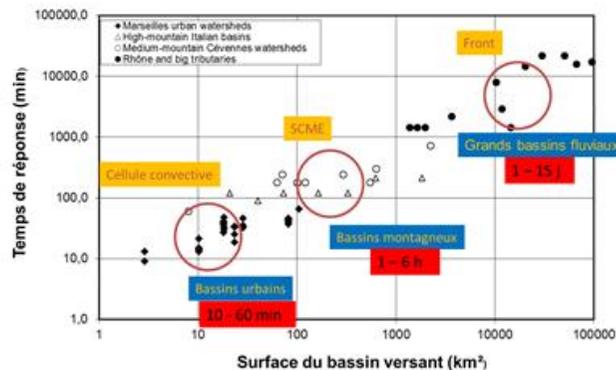
- de longues séries de données spatialisées (pour la modélisation en continu par exemple), de l'échelle locale à l'échelle régionale, avec une résolution temporelle adaptée à l'étude des crues rapides
- d'une meilleure caractérisation des extrêmes pluviométriques associés aux crues rapides

➤ Objectifs dans le projet FloodScale

- Fournir des estimations de pluie à différentes échelles d'espace et de temps
- Quantifier l'incertitude associée à ces estimations
- Progresser sur la connaissance des distributions des extrêmes

4

Contexte: le temps de réponse hydrologique



Source : G. Delrieu et al., 2014, Adv Water Res, 71, 110-124

3

Pistes explorées

➤ Piste 1: estimer la pluie et son incertitude par combinaison de données radar et pluviométriques

- Comment fusionner les données radar et pluviométriques ?
- Y a-t-il une valeur ajoutée par cette fusion ?
- Comment caractériser l'incertitude des estimations de pluie ?

➤ Piste 2: s'appuyer sur un simulateur stochastique de pluie

- Améliorer la version du modèle existant pour prendre en compte l'hétérogénéité spatiale des pluies tel que l'effet de relief

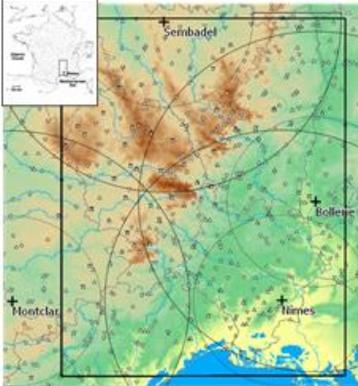
➤ Piste 3: étude les distributions des extrêmes de pluie sur un bassin

- Comparer la pertinence de différentes distributions statistiques à reproduire la distribution des extrêmes de pluie spatiale

5

FloodScale **POLE RISQUES**

Données utilisées

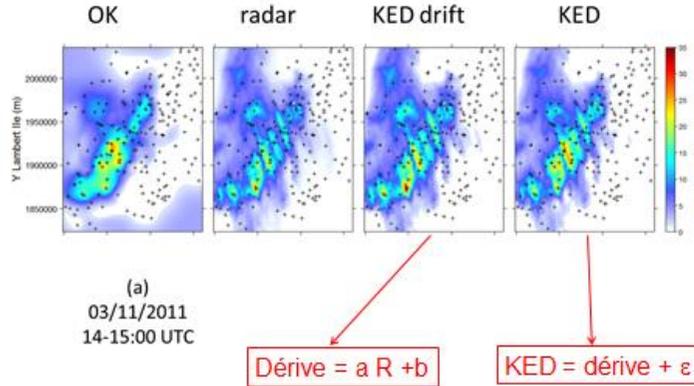


- **Données disponibles**
 - 250 pluviomètres horaires
 - 160 pluviomètres journaliers
 - mosaïque radars ARAMIS
 - période : 2007-2014
- **Données utilisées**
 - Piste 1: données radar et pluviomètres horaires sur toutes les Cévennes
 - Piste 2: pluviomètres horaires sur l'Ardèche
 - Piste 3: 8 pluviomètres journaliers sur le bassin du Gardon

6

FloodScale **POLE RISQUES**

Illustration 1 des résultats



(a)
03/11/2011
14-15:00 UTC

$Dérive = a R + b$ $KED = dérive + \epsilon$

8

FloodScale **POLE RISQUES**

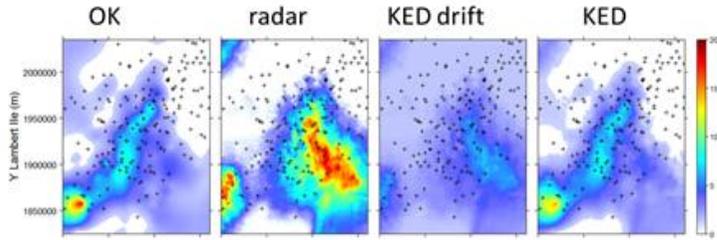
Estimation des pluies par combinaison de données radar pluviométriques

- **Méthodes d'interpolation utilisées/comparées**
 - Krigeage ordinaire des mesures pluviométriques (OK)
 - Estimation radar seule (radar)
 - Fusion par krigeage avec dérive externe (KED)

7

FloodScale **POLE RISQUES**

Illustration 2 des résultats

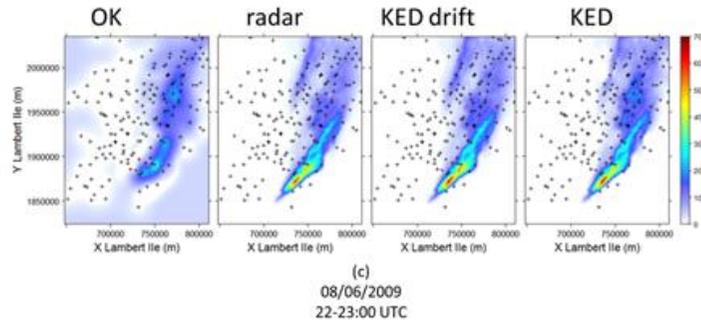


(b)
03/01/2008
21-22:00 UTC

9



Illustration 3 des résultats



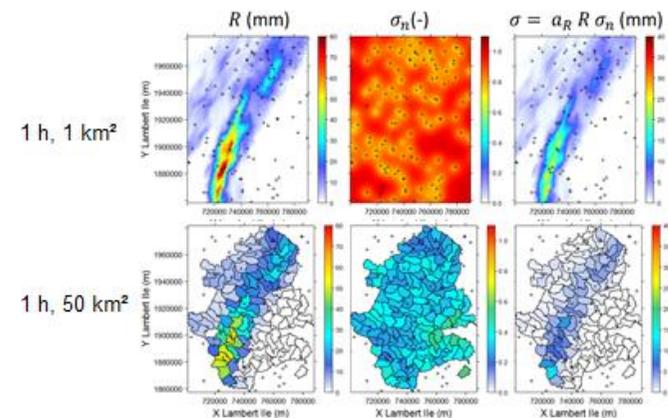
10



Incertitudes



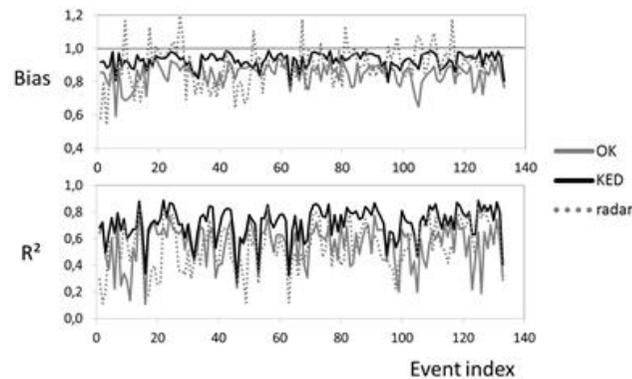
Estimation KED: 22 Octobre 2008 02:00 – 03:00 UTC



12



Comparaison des méthodes

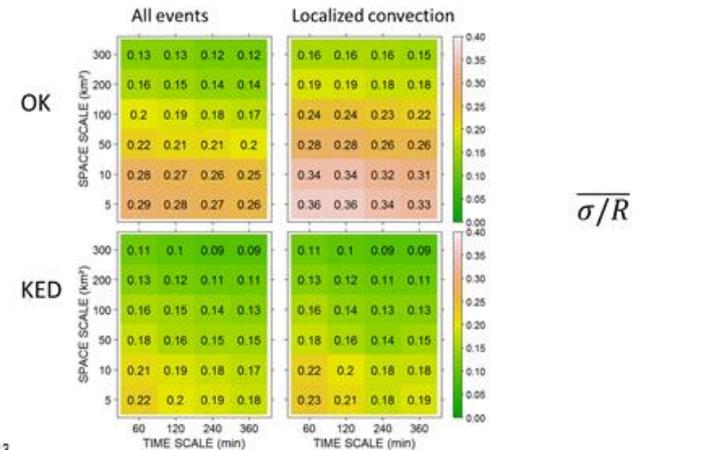


Validation croisée, pas de temps : 1 heure

11



Evolution de l'incertitude



13

FloodScale Conclusions et perspectives sur la fusion radar/pluviomètres 

➤ Acquis

- Intérêt de la fusion radar-pluviomètres aux échelles spatio-temporelles utiles pour l'hydrologie des crues cévenoles
- Quantification des erreurs d'estimation

➤ Applications

- Forçage de modèles hydrologiques distribués et propagation des erreurs
- Validation des prévisions d'AROME
- Validation d'estimations satellitaires (GPM)
- Aide à la quantification des pluies extrêmes et la détection de tendances

14

FloodScale Simulation stochastique de pluie 

➤ Approche 'à la Descartes' :

on décompose et on recompose
... du moins on essaye.

➤ Hypothèses

- domaine d'étude divisible ... en zones homogènes
- la pluie d'une zone divisible... en types de pluie
- à tout instant, sur une zone, un seul type à la fois
- chaque type approché comme processus d'ordre 2

16

FloodScale Simulation stochastique de pluie 

➤ Pourquoi ?

Obtenir une description *formelle* et *fonctionnelle* de la pluie, entrée première des systèmes hydrologiques (aléa, aussi ressource)

➤ La pluie

- se déploie dans l'espace et dans le temps
- se cumule au cours du temps
- est souvent advectée (vent) ;
- sa distribution est irrégulière ;
- l'intermittence est importante

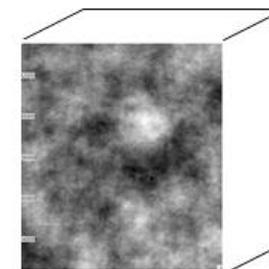
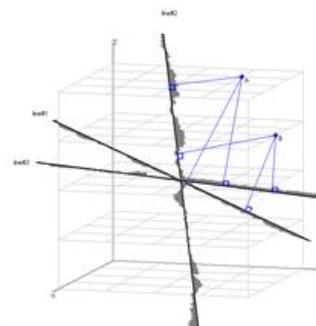
➤ Le respect qualitatif et quantitatif de ces caractéristiques est nécessaire à la pertinence hydrologique de pluies simulées

15

FloodScale Une pluie homogène ? 

Un moteur mathématique
ici la méthode des
bandes tournantes

Matheron 1973
Lantuéjoul, 2002
Emery, 200*



17

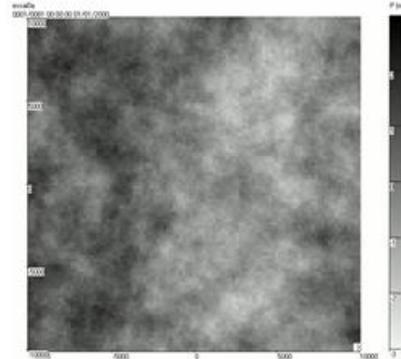


Une pluie homogène ?



Adaptation à la simulation des pluies

- 1/ considérer l'axe « vertical » comme axe temporel
- 2/...



18

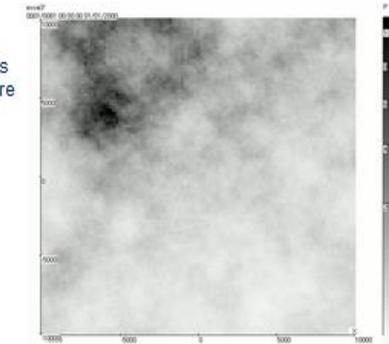


Une pluie homogène ?



Adaptation à la simulation des pluies

- 1/ considérer l'axe « vertical » comme axe temporel
- 2/ respecter la distribution des pluies
- 3/ ajouter de l'advection si nécessaire
- 4/ ...



20

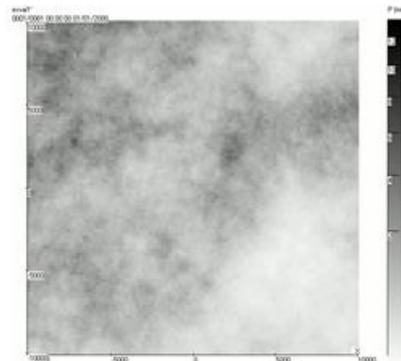


Une pluie homogène ?



Adaptation à la simulation des pluies

- 1/ considérer l'axe « vertical » comme axe temporel
- 2/ respecter la distribution des pluies
- 3/...



19

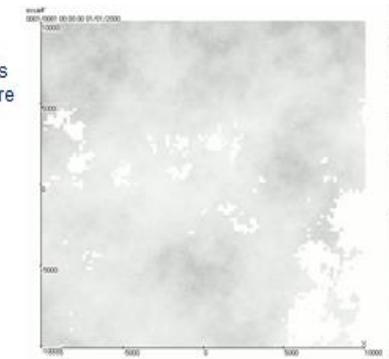


Une pluie homogène ?



Adaptation à la simulation des pluies

- 1/ considérer l'axe « vertical » comme axe temporel
- 2/ respecter la distribution des pluies
- 3/ ajouter de l'advection si nécessaire
- 4/ ne pas oublier l'intermittence



*Leblois et Creutin, 2013
Creutin et al, 2015*

21

FloodScale **POLE RISQUES**

Une pluie homogène ?

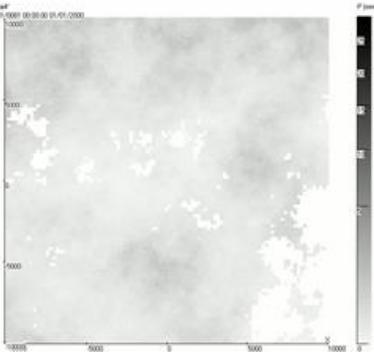
Adaptation à la simulation des pluies

5/ caler cela sur les données observées:
 a/ pluviomètres (Lepiouffe, 2009-12)
 b/ radar (Emmanuel, 201*)

6/ simulations libres
 c/ types de pluie isolés
 d/ succession climatologique

7/ simulations conditionnées
 e/ respectant les valeurs observées

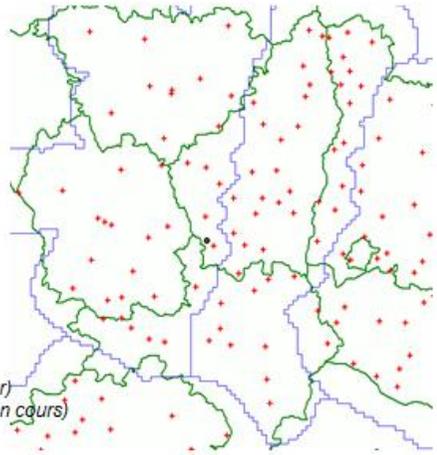
etc... etc...



22

FloodScale **POLE RISQUES**

Simulation libre, en mosaïque spatiale



Ollagnier (master)
 Chen S. (thèse en cours)

FloodScale **POLE RISQUES**

Typologie des pluies

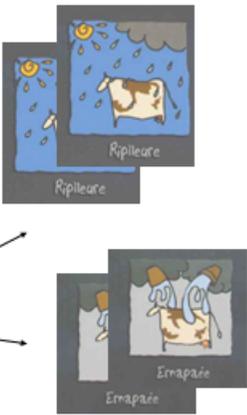
On se fixe un pas de temps de travail
 (ici une heure : doit résoudre l'hydrologie à l'échelle des bassins)

Descripteurs à finalité hydrologique

- Pluie totale (mm/pas de temps)
- Couverture spatiale [0-1]
- Coef. de variation des pluies « non-nulles »
- Indicateur de structure spatiale (GearyC)

D'où typologie, et séquence historique de types

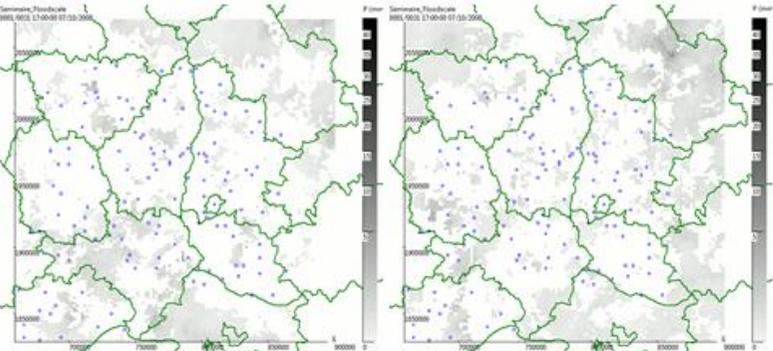
On ne s'occupe pas ici de physique mais bien sûr l'occurrence des types est liée à la situation météo.



Leblois et al., in prep

FloodScale **POLE RISQUES**

Simulation conditionnée



Réalisations équiprobables sachant le modèle et les données
 membre ~ possibilité moyenne ~ estimation ensemble ~ incertitude
 (techniquement délicat mais scientifiquement pas pire que la simulation libre)

Renard (B.), 2011 ; Caseri, 2015

FloodScale **POLE RISQUES**

Simulation conditionnée

Réalisations équiprobables sachant le modèle et les données
 membre ~ possibilité moyenne ~ estimation ensemble ~ incertitude
 (techniquement délicat mais scientifiquement pas pire que la simulation libre)

Renard (B.), 2011; Caseri, 2015

FloodScale **POLE RISQUES**

Exemple de comparaison de distributions ajustées

Points rouges: observations
 Traits bleus: modèles

Ici on voit que la première solution est moins satisfaisante

1/ Intérêt intrinsèque (étude des précipitations fortes spatialisées en tant que grandeur observée/ observable)

2/ Est-ce grave ? pas sûr, mais recommandation possible pour les simulations (aider à leur pertinence pour les événements les plus forts)

28 Carreau et Bouvier, 2015

FloodScale **POLE RISQUES**

Analyse de la distribution des extrêmes pluviométriques

Contribution J.Carreau, HSM

- Analyse sur 8 stations pluviométriques journalières région des Gardons
- Sélection des pluies correspondant à une moyenne spatiale >50mm

(il y a diverses manières d'obtenir cela)

- Comparaison de différentes distributions statistiques des extrêmes (en effet, les extrêmes ont des propriétés mathématiques particulières)

27

FloodScale **POLE RISQUES**

Conclusions

- Trois approches complémentaires
 - Réanalyses pluviométriques par fusion radar/ pluvio: un produit de référence pour la modélisation hydrologique, l'évaluation de modèles atmosphériques ou de produits satellitaires
 - Des simulations stochastiques de pluie devenues raisonnables/ utilisable, capable de rendre compte d'incertitude historique
 - Une méthodologie d'analyse des extrêmes pluviométriques conduisant à des crues rapides

29



Perspectives



➤ Aspect scientifique (exemples)

- Exploiter les réanalyses radar/ pluvio pour mieux estimer les paramètres du simulateur stochastique ou l'étude des distributions des extrêmes
- Enrichir la réanalyse radar/ pluvio d'un bruitage exprimant l'incertitude résiduelle
- Tenir compte de l'apport de la théorie des valeurs extrêmes dans la simulation des pluies (LT)
- Investiguer la relation / interaction / résonance entre 'échelle de variabilité des pluies' et 'structure des bassins' (déjà mentionné)
- Thèses en cours.

➤ Aspect technique (exemple)

- 'Décanner' les codes de simulation afin qu'ils puissent être embarqués dans les modélisations hydrologiques (simulation à la volée)



Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale

Quels progrès en hydrométrie des crues et quantification des incertitudes ?

Guillaume Dramais, Jérôme Le Coz, Benjamin Renard, Ivan
Horner, Raphaël Le Boursicaud¹, Antoine Gallavardin,
Isabelle Braud, Alexandre Hauet²

Irstea, HHLY, Lyon

¹CNR, CACOH, Lyon

²EDF DTG, DMM, Grenoble



Quels progrès en hydrométrie des crues et quantification des incertitudes ?

Guillaume Dramais¹, Jérôme Le Coz¹, Benjamin Renard¹, Ivan Horner¹, Raphaël Le Boursicaud², Antoine Gallavardin¹,

Isabelle Braud¹, Alexandre Hauet³, ¹Irstea, HHLy, Lyon ; ²CNR, CACOH, Lyon ; ³EDF DTG, DMM, Grenoble

Contexte et objectifs (diapo 1)

La soudaineté des crues en fait des événements difficiles à mesurer à cause de la difficulté de prévoir ces phénomènes et leur localisation mais aussi de leur rapidité, des conditions d'accès, et des conditions de sécurité pour les équipes de jaugeage.

En termes de mesures et d'hydrométrie en particulier, les questions scientifiques principales abordées dans le projet sont les suivantes

1/ Comment mieux mesurer les débits de crue ?

2/ Comment estimer les incertitudes des courbes de tarage et les propager aux hydrogrammes ?

Les méthodes « traditionnelles » de mesure du débit (diapos 4 et 5) et la courbe de tarage (diapos 5 à 7)

Les jaugeages ponctuels par les méthodes traditionnelles (diapos 4 et 5) comme les moulinets, profileurs de courant et autres mesures par dilution de traceur, (incertitudes de ~3 à 20%, suivant la méthode et les conditions de mesures) permettent de construire des relations entre hauteur d'eau et débit (courbe de tarage, diapo 5 à 7). Ces relations permettent d'obtenir des séries de débits à partir des enregistrements en continu des variations de hauteur d'eau au niveau des stations hydrométriques. Les méthodes traditionnelles de jaugeage permettent d'observer les débits dans une large gamme mais deviennent quasi-impossible à déployer en crue, les courbes de tarage sont donc extrapolées par différentes méthodes dans la partie des hauts débits notamment. Cette extrapolation induit des incertitudes importantes sur l'estimation des débits de crue. On sait, par des mesures topographiques post événement, estimer les pics de crue (diapo 9). Ces

estimations restent aussi très incertaines (incertitudes de ~50%) et ne sont pas horodatées, sauf à pouvoir disposer d'informations par des témoins.

L'apport des mesures sans-contact (diapos 10 à 18)

Les recherches en hydrométrie et les progrès technologiques ont permis de mettre au point de nouvelles techniques de mesure pour jauger les crues violentes : les mesures en continu par analyse d'image (LSPIV pour Large Scale Particle Image Velocimetry, Le Coz et al., 2010 ; diapos 10 à 13) et les jaugeages ponctuels à l'aide de radar vélocimétriques (Dramais et al., 2014 ; Welber et al., 2015 ; diapos 16 et 17). Ces deux techniques vont se baser sur la mesure des vitesses de l'écoulement en surface.

La méthode LSPIV est utilisée dans le projet de deux manières : des stations de mesure pérennes (diapo 12), et l'analyse de films de témoins (Le Boursicaud et al., 2015 ; diapo 15). Quatre stations de mesure sont équipées (Volane, Lignon, Auzon, Ardèche, Dramais et al., 2015 ; diapo 10) pour enregistrer et traiter les données en continu (<https://forge.irstea.fr/projects/fudaa-lspiv>). L'autre méthode consiste à exploiter des films enregistrés par des témoins des crues, on peut ensuite par post-traitement calculer le débit correspondant. (Recommandations pour l'enregistrement de films : <http://floodscale.irstea.fr/donnees/videos-amateurs-de-rivieres-en-crue>).

La technique de jaugeage par radar mobile permet rapidement depuis un pont de mesurer la répartition des vitesses de surface sur des sites préalablement identifiés et documentés (diapo 16).

Ces techniques sans-contact permettent des estimations (incertitudes de ~20%) qui sont riches d'informations pour améliorer l'extrapolation haute des courbes de tarage et par conséquent la qualité des séries de débit. Ces

méthodes permettent également de construire des courbes de tarage rapidement sur une large gamme de débit.

La méthode BaRatin et la propagation des incertitudes (diapos 19 à 26)

Les courbes de tarage utilisées dans le projet sont calculées à partir des jeux de jaugeages en notre possession et à l'aide du programme BaRatin (BAYesian RATINg curve, Le Coz et al., 2013 ; 2014a, b) qui est une méthode de calcul des courbes de tarage utilisant des a priori hydrauliques (diapo 19) qui permettent de définir différents contrôles hydrauliques pour lesquels une portion de courbe est ajustée (diapo 20). Un formalisme bayésien combinant les a priori hydrauliques ainsi que les jaugeages et leur incertitude permet l'estimation des paramètres et d'une courbe de tarage la plus probable ainsi que les incertitudes associées (diapo 21). Lorsqu'on ajoute les jaugeages par méthode sans contact (diapo 22), la nouvelle courbe de tarage obtenue (en bleu sur les diapos 23) peut être modifiée et les incertitudes sont réduites (diapo 24). Les diapos 25 et 26 illustrent un exemple de résultat pour la courbe de tarage de l'Ardèche à Vallon Pont d'Arc (diapo 25) et de la propagation de cette incertitude sur les débits de la crue du 19-20 septembre 2014. Les couleurs correspondent respectivement à une estimation de la courbe de tarage avec uniquement les a priori hydrauliques (bleu), les a priori hydrauliques et les jaugeages traditionnels (rose) et enfin, en vert, l'ensemble des jaugeages, en particulier les jaugeages réalisés en crue à l'aide de radars vélocimétriques. On voit que, d'une part l'estimation du pic est moins incertaine dans cette dernière configuration.

La méthode est implémentée sous la forme d'un exécutable Fortran, accompagné de son interface utilisateur BaRatinAGE (BaRatin Advanced Graphical Environment). Les développements actuels de la méthode BaRatin permettent de propager les incertitudes des courbes de tarage aux hydrogrammes. Cette information nouvelle, est essentielle pour mener des études et des modélisations en prenant en compte un intervalle de confiance sur les débits.

Conclusions et perspectives (diapos 27 et 28)

Les protocoles de mesure utilisés pour le projet FloodScale sont directement utilisables par les opérationnels (jaugeage sans-contact par radar, exploitation de séquences d'images par LSPIV). La méthode BaRatin et son interface graphique est également disponible gratuitement (écrire à baratin.dev@lists.irstea.fr). Ces protocoles et méthodes, dont le développement est également soutenu par le Schapi, viennent s'ajouter aux outils de l'hydromètre et permettront d'améliorer nos mesures et la connaissance des incertitudes associées.

Références

- Dramais, G., Gallavardin, A., Le Coz, J., Le Boursicaud, R., Horner, I., Braud, I., 2015. Bilan de fonctionnement 2014 des stations LSPIV en Ardèche. 47 p.
- Dramais, G., Le Coz, J., Le Boursicaud, R., Hauet, A., Lagouy, M., 2014. Jaugeage par radar mobile, protocole et résultats. Houille Blanche-Revue Internationale de l'eau, vol. 3, p. 23-29
- Le Coz, J., Chaléon, C., Bonnifait, L., Le Boursicaud, R., Renard, B., Branger, F., Diribarne, J., Valente, M., 2013. Analyse bayésienne des courbes de tarage et de leurs incertitudes : la méthode BaRatin. Houille Blanche-Revue Internationale de l'eau, vol. 6, p. 31-41
- Le Coz, J., Hauet, A., Pierrefeu, G., Dramais, G., Camenen, B., 2010. Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers. Journal of Hydrology, 394(1-2): 42-52.
- Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F., Le Boursicaud, R., 2014a. Combining hydraulic knowledge and uncertainty gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. Journal of Hydrology, 509:573-587.
- Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Le Boursicaud, R., Branger, F., Mansanarez, V., 2014b. Guide pratique de la méthode BaRatin pour l'analyse des courbes de tarage et de leurs incertitudes. 94 p.
- Le Boursicaud, R., Pénard, L., Hauet, A., Thollet, F., Le Coz, J., 2015. Gauging extreme floods on YouTube: application of LSPIV to home

Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale 24 Novembre 2015 Aix en Provence

movies for the post-event determination of stream discharges, Hydrological Processes, sous presse.

Welber, M., Le Coz, J., Laronne, J., Zolezzi, G., Zamler, D., Dramais, G., Hauet, A., Salvaro. M., 2015. Field assessment of non-contact stream

gauging using portable surface velocity radars (SVR), Water Resources Research, in revision.



Problématique



Hydrométrie

- On sait mesurer en continu la hauteur d'eau dans une rivière, mais pas le débit.
- Mesurer ponctuellement des débits de crue avec les méthodes « traditionnelles » est dangereux pour les opérateurs et le matériel.
- La dynamique des crues éclair permet rarement d'intervenir suffisamment rapidement pour jauger.

- Comment mieux mesurer les débits de crue ?
- Comment estimer les incertitudes des courbes de tarage et les propager aux hydrogrammes ?

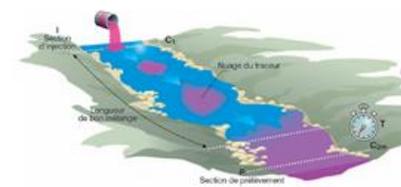
2



Mesure de débit



➤ Méthodes de jaugeage des rivières



Jaugeage chimique par dilution de traceur
(Incertitude ~ 3 à 10 %)



Jaugeage capacitif par mesure du temps de remplissage d'un seau
(Incertitude ~ 5 à 10 %)

4



Mesure de débit



➤ Méthodes de jaugeage des rivières – Exploration des vitesses



Jaugeage au courantomètre
(Incertitude ~ 7 à 15 %)



Jaugeage au profileur (ADCP)
(Incertitude ~ 5 à 10 %)

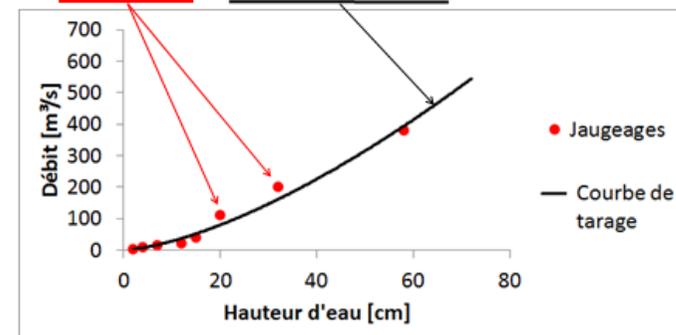
3



Mesure de débit



➤ Jaugeages et courbe de tarage



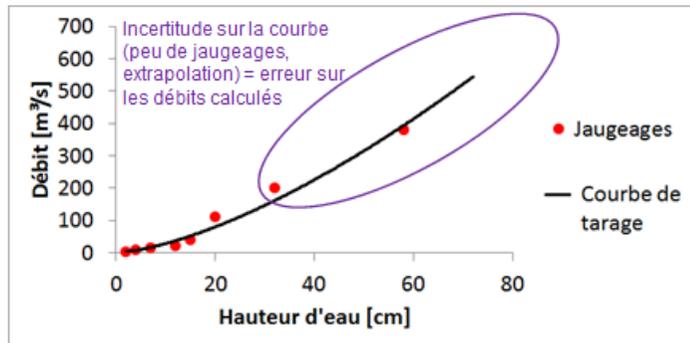
5



Mesure de débit



Jaugeages et courbe de tarage



6



Moyens mis en œuvre



Campagnes de mesures post-crue (REX)

- Stations de mesures LSPIV
- Analyse de films de témoins
- Campagnes de mesures radar

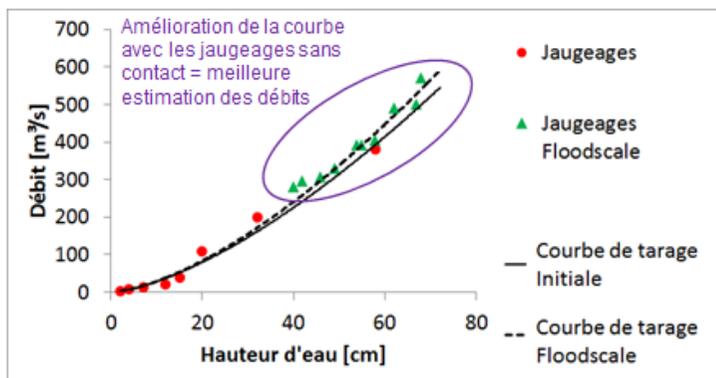
8



Mesure de débit



Apport des mesures sans-contact



7

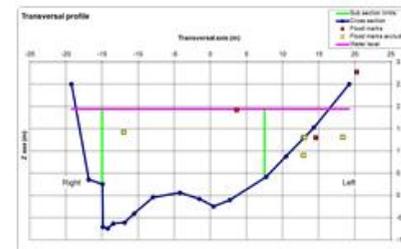


Campagnes de mesures post-crue



Evaluation indirecte du pic de crue :

- Mesure de laisses de crue
- Equation de Manning-Strickler



Estimation non-horodatée du pic de crue (Incertitude ~ 50%)



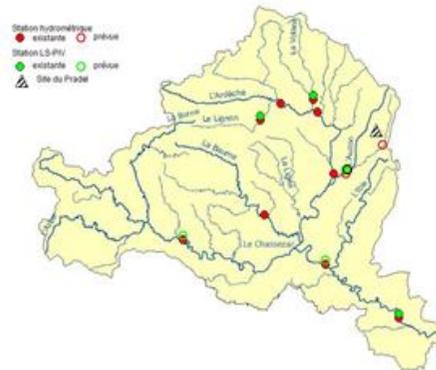
9



Mesures innovantes



➤ 4 stations de mesures LSPIV



10



Mesures innovantes



➤ Stations de mesures LSPIV

- Mesure de la hauteur d'eau par capteur sans contact (radar)
- Mesure du champ de vitesse par analyse d'images
- Topographie de la géométrie de la section de mesure
→ débit de la rivière en crue



12
Caméra sur le Lignon à Jaujac



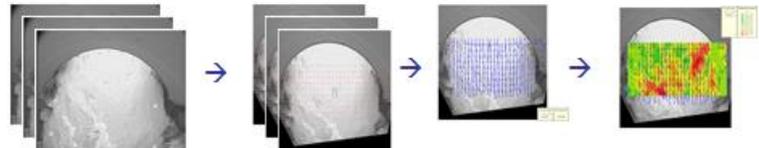
Acquisition et transfert des données sur l'Ardèche à Sauze



Méthode LSPV



- Les étapes de la méthode LSPV (Large Scale Particle Image Velocimetry)



Acquisition de séquences d'images et corrections géométriques (orthorectification)

Détection des motifs et de leurs déplacements

Calcul des vitesses instantanées

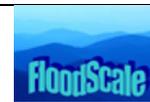
Moyennes de vitesse et calcul du débit



<https://forqe.irstea.fr/projects/fudaa-lspv>



11



Méthode LSPIV



➤ Avantages de la technique :

- Technique sans contact
- Mesure en continu des hauteurs d'eau et des vitesses (fortes)
- Jaugeages en crue

➤ Limites de la technique :

- Pas de mesures de nuit (éclairage public, projecteur IR)
- Problèmes (réflexions, ombres, vent)
- Mesure de la bathymétrie (variations pendant la crue)
- Estimation du coefficient de vitesse
- (Incertitude ~ 20 %)

13



Mesures innovantes



➤ Analyse de films de témoins

- De nombreux témoignages vidéo sur Youtube, Dailymotion...
- Certains sont exploitables par la technique LSPIV

14



Mesures innovantes



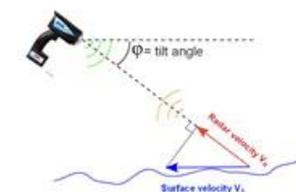
➤ Campagnes de mesures radar

- Déploiement d'équipes de jaugeur en fonction des prévisions météo
- Jaugeages distribués sur le bassin versant
- Description des vitesses de surface par verticales successives



Jaugeage sur la Volane à Vals-les-bains

16



Principe de fonctionnement du radar vélocimétrique



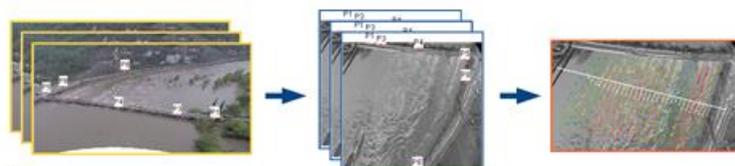
Mesures innovantes



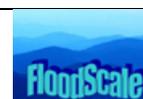
➤ Analyse de films de témoins - Exemple



- Le pont de Sampzon (Ardèche)
- Film réalisé par : <http://www.ardechevideo.com/>
- Débit LSPIV surestimé de 4 à 13% suivant les hypothèses de temps de propagation du débit



15



Méthode de jaugeage par Radar



➤ Avantages de la technique :

- Technique sans contact
- Mesure rapide (20 min)
- Jaugeages en crue

➤ Limites de la technique :

- Configuration du site (pont)
- Fortes pluies, vent
- Mesure de la bathymétrie (variations pendant la crue)
- Estimation du coefficient de vitesse
- (Incertitude ~ 20 %)

17



Synthèse des jaugeages (78)



Station	Rivière	Jaugeages SVR 2012	Jaugeages SVR 2013	Jaugeages SVR 2014	Jaugeages SVR 2015
Jaujac	Lignon	2	/	6	3
Meyras	Ardèche	/	/	4	4
Pont-de-Labeaume	Ardèche	/	/	5	3
Pont-d'Ucel	Ardèche	2	/	4	2
Vals-les-Bains	Volane	5		1	1
Vogüé	Ardèche	1	3	4	/
Vogüé	Auzon	2	2	9	1
Rosières	Beaume	/	/	3	1
Gravières	Chassezac	/	/	3	/
Vallon-Pont-d'Arc	Ardèche	/	/	5	/
Lagorce	Ibie	/	/	1	1

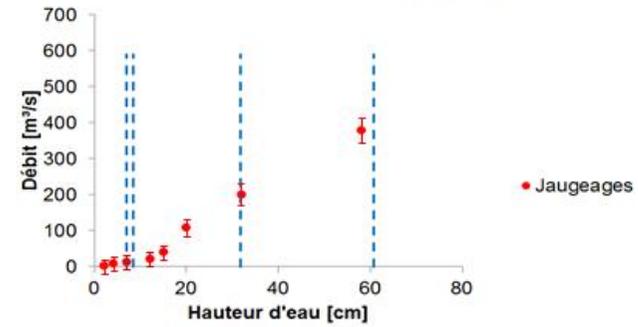
18



Méthode BaRatin BAYesian RATING curve



➤ Contrôles hydrauliques + jaugeages



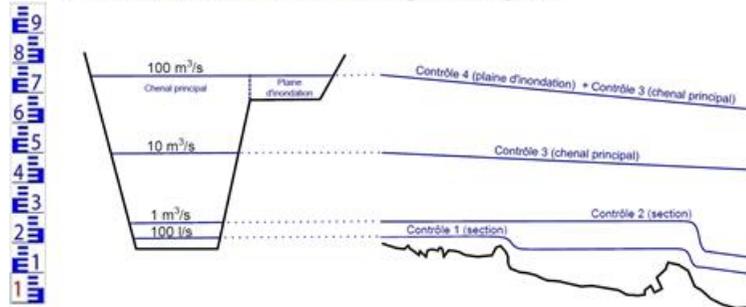
20



Méthode BaRatin BAYesian RATING curve



➤ Identifier les contrôles hydrauliques



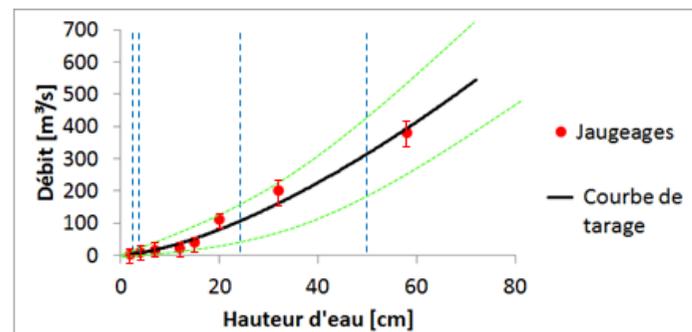
19



Méthode BaRatin BAYesian RATING curve



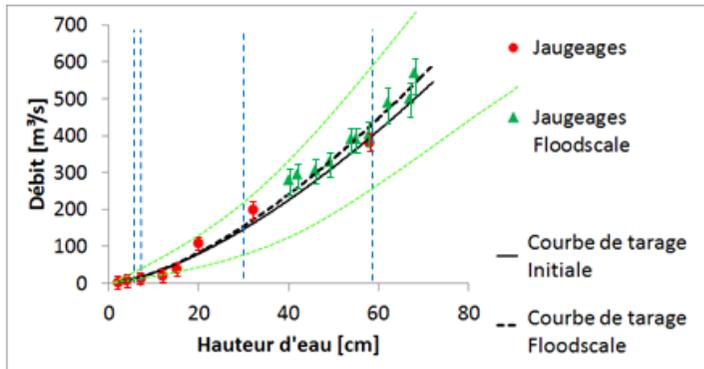
➤ Courbe de tarage estimée et son incertitude



21

FloodScale **Méthode BaRatin**
BAYesian RATING curve 

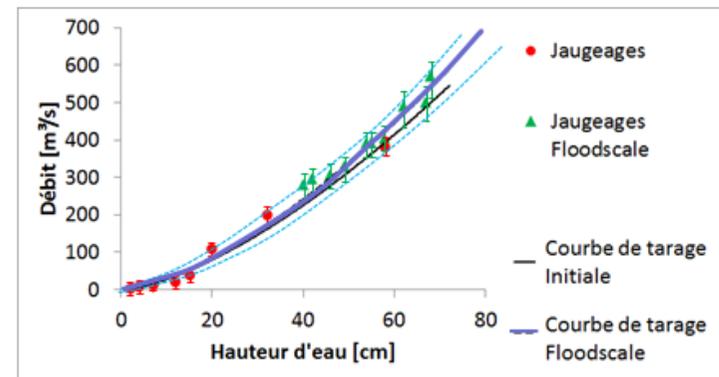
- Apport des mesures sans-contact avec leurs incertitudes



22

FloodScale **Méthode BaRatin**
BAYesian RATING curve 

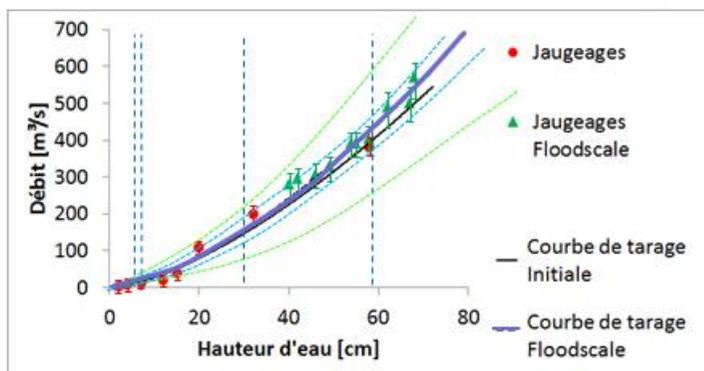
- Amélioration des courbes et de l'estimation des hauts débits grâce à BaRatin et aux jaugeages sans-contact



24

FloodScale **Méthode BaRatin**
BAYesian RATING curve 

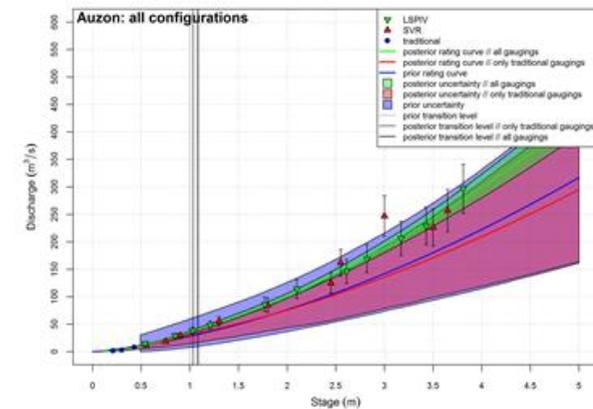
- Réduction des incertitudes de la courbe de tarage



23

FloodScale **Exemples de Résultat** 

- Courbe de tarage de l'Auzon à Vogüé-Gare (2013-2015)



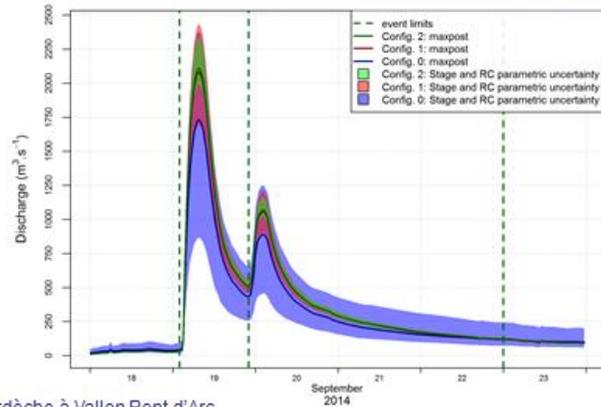
25



Exemples de Résultat



➤ Propagation des incertitudes aux hydrogrammes



Ardèche à Vallon Pont d'Arc



Avancées et perspectives



➤ Intérêt pour les opérationnels:

- Diffusion des protocoles développés et transfert aux services de l'état (SPC, DREAL), à terme, amélioration des courbes de tarage
- Les stations et mesures sans contact permettent rapidement d'élaborer une courbe de tarage

➤ Perspectives :

- Industrialisation des stations LSPIV
- BaRatin : propager les incertitudes aux statistiques hydrologiques (période de retour)

→ Pour plus de précisions sur BaRatin et/ou une démonstration de la méthode (voir Ivan Horner)

28



Avancées et perspectives



➤ Avancées

- Mise en place d'un réseau de station LSPIV
- Développement d'un protocole d'analyse de film de témoin et d'un protocole de jaugeage en crue par radar (Cofinancé par le Schapi)
- Prise en compte des incertitudes des courbes de tarages et propagation aux hydrogrammes



27



Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale

Quelles avancées sur la modélisation des processus hydrologiques actifs durant les crues et apports pour l'amélioration de la prévision?

Isabelle Braud¹, Flora Branger¹, Sandrine Anquetin²

¹Irstea, HHLY, Lyon

²LTHE, Grenoble



Quelles avancées sur la modélisation des processus hydrologiques actifs durant les crues et apports pour l'amélioration de la prévision?

Isabelle Braud¹, Flora Branger¹, Sandrine Anquetin²; Marko Adamovic¹, Olivier Vannier,² ¹Irstea, HHLY, Lyon, ²LTHE, Grenoble

Objectifs de la modélisation et stratégie retenue (diapos 2 à 6)

En termes de modélisation, les questions scientifiques principales abordées dans le projet sont les suivantes

1/ Comment transférer les connaissances acquises à une échelle à une autre échelle dans la modélisation ?

2/ Comment prévoir les débits en bassin non jaugé sur un large territoire ?

Dans le contexte des crues rapides, ces questions revêtent d'autant plus d'importance que ces dernières peuvent affecter n'importe quelle partie du territoire, que les tailles des cellules pluvieuses associées sont souvent faibles, d'où la nécessité d'une simulation à une échelle fine, mais balayant néanmoins une large gamme d'échelle (0.1-1000 km²). Or, pour le moment, les outils de prévision disponibles sont loin de couvrir toute cette gamme d'échelle. Ainsi (diapo 2 et 3), les tronçons de cours d'eau actuellement suivis dans le cadre du système de prévision national Vigicrues¹⁶ correspondent en général à des bassins dont la taille est supérieure à 50-100 km² et la prévision ne concerne que les cours d'eau principaux. Or si on s'intéresse par exemple aux points de coupures de route dans le Gard (points d'intersection entre le réseau routier et le réseau hydrographique), ces derniers sont très nombreux et concernent des bassins de taille bien inférieure (quelques km²) à celle des bassins jaugés (diapo 3). Des outils de simulation à ces échelles sont donc nécessaires. Mentionnons qu'Irstea et Météo-France développent, depuis une dizaine d'années, un système de prévision des crues rapides appelé AIGA¹⁷ (Lavabre et

Grégoris, 2005 ; Javelle et al., 2014) qui devrait devenir opérationnel d'ici 2017. Une modélisation hydrologique régionale est utilisée dans cette méthode. Les travaux que nous avons menés sont complémentaires de ces outils opérationnels et pourront contribuer à leur amélioration dans le futur.

Les objectifs du projet FloodScale en termes de modélisation sont les suivants (diapo 4) :

1/ servir de base à l'analyse des données et à la vérification de leur cohérence ;

2/ permettre de tester des hypothèses de fonctionnement hydrologique et de hiérarchiser les processus dominants par confrontation entre simulation et observation.

La démarche suivie est itérative (diapo 5). Dans nos travaux, dans la mesure du possible, les paramètres des modèles sont spécifiés à partir des observations et des informations disponibles et les modèles sont utilisés sans calage. Les simulations du modèle sont comparées aux observations et l'analyse porte essentiellement sur les différences qui peuvent être dues à une mauvaise prescription du forçage pluviométrique, une mauvaise spécification des paramètres, des problèmes dans la représentation des processus ou des processus non pris en compte. Ces différences nous amènent à revenir sur l'analyse des données, voire à acquérir des données supplémentaires. Ceci permet ensuite de faire évoluer le modèle et de recommencer ce processus itératif, jusqu'à obtenir un accord satisfaisant entre modélisation et observations.

En termes d'outils de modélisation (diapo 6), pour mettre en œuvre la stratégie décrite ci-dessus, il est utile de pouvoir s'appuyer sur des outils de modélisation souples. Nous avons ainsi privilégié l'utilisation de

¹⁶ <http://www.vigicrues.gouv.fr/index.php>

¹⁷ <http://www.irstea.fr/la-recherche/unites-de-recherche/ohax/hydrologie/aiga>

plateformes de modélisation telles que JAMS¹⁸, Liquid (Branger et al., 2010) ou ATHYS¹⁹. Des outils de modélisation « standard » ou commerciaux ont aussi été utilisés et les travaux menés aux différentes échelles spatiales investiguées dans le projet :

- A l'échelle locale, des modèles comme le modèle HYDRUS 1D/2D²⁰ ont été utilisés afin d'interpréter les données de teneur en eau (Le Bourgeois et al., 2015) ou les mesures réalisées sur les parcelles d'infiltration
- A l'échelle des petits bassins versants, le modèle présenté par Bouvier et al. (2015) (cf présentation de C. Bouvier et J.P. Vandervaere) a permis de synthétiser les connaissances acquises à l'échelle des versants dans une modélisation évaluée sur des bassins de 4 à 500 km². D'autres outils ont aussi été testés : le modèle RuiCells (Langlois et Delahaye, 2002) qui simule le ruissellement de surface uniquement pour vérifier si la prise en compte de ce seul processus permettait ou pas de reproduire les observations. Ce modèle s'est révélé mieux adapté à la simulation des processus sur le bassin du Gazel (Ardèche) où le ruissellement de type hortonien est présent, mais ne représentait pas correctement les écoulements sur le bassin de Valescure où les écoulements sont plutôt de sub-surface. Sur ce dernier bassin, une version du modèle CVN (décrit dans la section suivante) prenant en compte les transferts latéraux a été développée et testée sur le bassin de Valescure, avec de meilleurs résultats que la version sans transfert latéral, mais néanmoins des résultats pas très satisfaisants (Vannier, 2013).

- A l'échelle régionale, deux approches ont été mises en œuvre et comparées. Il s'agit dans les deux cas de simulations en continu, ce qui permet de s'affranchir du problème de l'initialisation des modèles événementiels, mais requiert une modélisation de l'évapotranspiration entre les épisodes pluvieux. Un premier travail a exploré l'utilisation de modélisation à résolution fine, avec une représentation des processus s'appuyant sur des équations de la physique (modèle CVN-p, Vannier, 2013 ; Vannier et al., 2015). Un second travail a évalué l'apport de méthodes où les paramètres et la structure du modèle hydrologique sont estimés à partir de l'analyse de données (modélisation SIMPLEFLOOD, Adamovic, 2014 ; Adamovic et al., 2015a).

La suite de cette présentation se concentre sur la présentation des résultats principaux obtenus à partir de ces approches à l'échelle régionale.

Apport d'une modélisation « ascendante » : exemple avec le modèle CVN (diapos 7 à 14)

Nous sommes partis d'une version événementielle du modèle CVN (Manus et al., 2009 ; Anquetin et al., 2010) qui a été enrichie pour aboutir à une modélisation en continu (diapo 7 et 8). Le maillage sur lequel s'appuie CVN est constitué d'hydro-paysages résultant du croisement de couches SIG : celle des sous-bassins versants issus d'un modèle numérique de terrain (MNT) avec ici une taille minimale de 0.5 km², la carte pédologique et celle de l'occupation du sol. A chaque sous-bassin est associé un brin de réseau hydrographique. Le modèle prend en entrée une chronique de pluie et d'évapotranspiration de référence à pas de temps variable ou fixe. Sur chaque unité de modélisation, on résout d'équation de Richards de transfert d'eau en milieu saturé ou non-saturé. La modélisation peut prendre en compte différents horizons de sol aux propriétés hydrodynamiques différentes. En bas de colonne, la condition à la limite peut être un flux de drainage libre (flux gravitaire) ou un flux nul. Lorsque la pluie dépasse la capacité d'infiltration ou si l'horizon de surface est

¹⁸ <http://jams.uni-jena.de/>

¹⁹ <http://www.athys-soft.org/v1/Index.html>

²⁰ <http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx>

saturé, il y a production de ruissellement. Ce dernier est directement envoyé au brin de rivière le plus proche pour être routé jusqu'à l'exutoire. Il n'y a pas de transfert latéral d'eau d'une unité de modélisation à l'autre. L'évapotranspiration réelle est modélisée par un terme puits dans l'équation de Richards, représentant l'extraction racinaire. L'interception est aussi représentée et dépend de l'indice foliaire (LAI).

Nous illustrons ensuite une des questions abordée avec ce modèle : comment spécifier les paramètres représentant les propriétés du sol dans le modèle ? Dans les premiers travaux (diapo 6 pour la cartographie de l'épaisseur du sol correspondante), nous avons utilisé une base de données sol du programme IGCS²¹ (Inventaire Gestion et Conservation des Sols) au 1/25000^{ème} sur Languedoc-Roussillon et l'Ardèche. Cette base renseigne différentes unités typologiques de sol avec des informations sur les horizons de sol en particulier leur épaisseur et leur texture. Nous en avons tiré une cartographie des capacités de stockage des sols et de leurs propriétés hydrodynamiques (courbes de rétention d'eau et de conductivité hydraulique) en utilisant les fonctions de pédo-transfert de Rawls et Brackensieck (1985). Ces fonctions fournissent des relations statistiques entre paramètres décrivant les propriétés hydrodynamiques des sols et leur texture (% sable, argile, limon). Les premiers essais de modélisation ne se sont pas révélés très concluants (Vannier, 2013) et nous avons réalisé que cette base de données, construite à des fins agronomiques, ne renseignait pas les horizons de sol altérés, qui peuvent stocker de l'eau et avoir un rôle hydrologique (diapo 8). Nous avons alors cherché un moyen d'estimer les capacités de stockage des sols par d'autres méthodes (Vannier et al., 2014). Une méthode qui a fourni des résultats intéressants consiste à analyser les chroniques de débit, en particulier les récessions (diapo 10). Moyennant des hypothèses sur la modélisation de ces récessions, cette analyse permet d'estimer la profondeur D des horizons altérés, leur conductivité k et la capacité de stockage, moyennant une hypothèse sur la porosité (deux valeurs ont été utilisées 0.05 et 0.1 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, ce qui fournit les barres d'erreur de la figure en bas à droite). Les résultats montrent que les profondeurs de roches altérées estimées sont très élevées pour certaines géologies (une

dizaine de mètres pour le granite). Par ailleurs, la géologie (les différentes couleurs) explique de manière remarquable les différences observées. Les capacités de stockage ainsi estimées sont largement supérieures à celles estimées à partir des seules bases de données sol (figure en haut à gauche).

A partir de ces résultats, le modèle CVN a été modifié pour arriver à une version appelée CVN-p (diapo 11). Dans cette nouvelle version, on rajoute au sol un horizon supplémentaire correspondant à l'horizon de roches altérées, avec les propriétés déterminées par l'analyse de données de la diapo 10. La condition à la limite inférieure est fixée à un flux de drainage libre et le flux correspondant est transmis au brin de rivière le plus proche (débit de base). Les résultats en termes de modélisation sont illustrés sur les diapos 12 et 13 pour des simulations longues et événementielles respectivement. Pour les simulations longues, les pluies utilisées sont celles de la réanalyses SAFRAN (Vidal et al., 2010) de Météo-France. Pour les épisodes, des pluies horaires issues du krigeage des pluviographes, ou d'une combinaison de pluies radar et de pluviomètres ont été utilisées. La diapo 27 présente les cumuls pluviométriques correspondants. Les résultats (diapos 12 et 13) montrent une nette amélioration des simulations longues et de celle des épisodes pour la géologie granitique. Les améliorations sont sensibles, mais les volumes restent surestimés durant les épisodes et les récessions trop rapides pour la géologie sur schiste.

La diapo 14 illustre une évaluation spatialisée du modèle (avec un forçage issu des pluies krigées) qui s'appuie sur des estimations de débit maximum réalisées lors du retour d'expérience sur la crue d'octobre 2008. Le modèle donne des ordres de grandeur réalistes, même s'il tend à surestimer les valeurs faibles et sous-estimer les valeurs fortes.

Cet exemple illustre la démarche itérative entre modélisation et observation et son intérêt en termes d'amélioration des connaissances. On peut aussi souligner la mise en œuvre du modèle CVN pour 7 bassins principaux des Cévennes (Ardèche, Cèze, Gard, Tarn, Vidourle, Hérault, Vistre) et son évaluation tant sur des simulations longues que sur des épisodes intenses. Les données utilisées sont bien entendu les débits aux stations, mais d'autres données comme les estimations de débit de pointe des retours d'expérience ou les coupures de route ont aussi été utilisées.

²¹ <http://www.gissol.fr/tag/igcs>

Des évaluations supplémentaires, en particulier avec les épisodes de 2014, seraient nécessaires pour consolider les résultats.

Apport d'une modélisation « descendante » : exemple avec le modèle SIMPLEFLOOD (diapos 15 à 18)

Une autre approche testée dans le projet s'appuie sur une méthode dite « descendante » où la structure du modèle et les valeurs des paramètres sont estimées à partir de l'analyse des données. Pour déterminer la structure du modèle, nous sommes partis d'une méthode proposée par Kirchner (2009) qui suppose que le débit à l'exutoire ne dépend que de l'eau stockée dans le bassin (diapo 16). Cette conceptualisation des écoulements permet de représenter essentiellement les écoulements rapides de sub-surface. La manipulation de l'équation de bilan hydrologique à l'échelle du bassin permet de formuler les équations de manière à faire intervenir une fonction $g(Q)$ qui ne dépend que du débit et de la variation de débit (2^{ème} équation et figure). Une fonction quadratique est ajustée sur les données (3^{ème} équation), conduisant à un modèle à 3 paramètres valable à l'échelle d'un sous-bassin. L'estimation de ce modèle ne repose que sur l'analyse des récessions de débits. On peut ensuite dériver une modélisation simple (1^{ère} équation) où les données d'entrée sont la pluie et l'évapotranspiration de référence. Adamovic et al. (2015b) et Coussot (2015) ont montré que cette approche, initialement développée pour des bassins en contexte humide, pouvait être utilisée en contexte méditerranéen, moyennant une estimation de la fonction $g(Q)$ pour les périodes nocturnes et sans végétation, afin de limiter l'impact de l'évapotranspiration réelle sur les récessions. Soulignons que l'utilisation de ce type d'approche suppose que les données soient de bonne qualité, en particulier sur les bas débits, ce qui montre l'importance de bien caractériser ces incertitudes (cf présentation de G. Dramais et al.). A noter que l'utilisation de l'approche de la diapo 16 nécessite une représentation de l'évapotranspiration réelle AET , qui, dans ces premiers travaux, a été supposée égale à l'évapotranspiration potentielle, mais nécessiterait d'être revisitée.

Adamovic (2014) et Adamovic et al. (2015a) sont repartis de cette analyse de données pour proposer une modélisation à l'échelle d'un bassin versant

comme celui de l'Ardèche. Ce bassin a été découpé en sous-bassins versants d'une taille moyenne de 10 km². Sur chaque sous-bassin, la fonction de production est celle décrite sur la diapo 15. Les 3 paramètres ont été régionalisés avec la géologie, une analyse statistique (analyse factorielle de données mixtes, FAMD en anglais) des facteurs explicatifs ayant montré que c'était le facteur explicatif principal (diapo 16). Sur la figure de la diapo 15, on montre le maillage du modèle et la géologie dominante par maille qui conditionne le choix des paramètres de la fonction $g(Q)$. Un module de routage, fondé sur l'onde cinématique permet le routage jusqu'à l'exutoire (voir la structure générale du modèle diapo 29).

Le modèle a été évalué par des simulations continues sur la période 2000-2012 (diapo 17), montrant des résultats contrastés selon les années, avec des performances meilleures en conditions humides qu'en conditions sèches (Adamovic, 2014 ; Adamovic et al., 2015a). L'évaluation a aussi porté sur 4 épisodes intenses dont la pluviométrie, estimée sur le maillage du modèle est présentée diapo 28. Pour les 4 épisodes, la diapo 18 présente la comparaison des simulations avec les observations à l'exutoire de l'Ardèche (figure de gauche) et la figure de droite, la comparaison des débits de pointe aux différentes stations de jaugeage. On voit que les résultats sont mitigés avec des résultats satisfaisants pour les épisodes de novembre 2008 et décembre 2003 en conditions plutôt humides, mais une sous-estimation du volume pour les épisodes d'octobre 2008 et novembre 2011, en conditions plutôt sèches. A noter aussi que les pluies utilisées dans ces premières évaluations sont les données SAFRAN, dont la résolution est relativement grossière et qui sont connues pour sous-estimer les pluies en zone de relief.

Sensibilité de la réponse hydrologique à la spécification et à l'incertitude sur la pluie (diapos 19 à 21)

Compte tenu de temps de calculs assez rapides, le modèle SIMPLEFLOOD a été utilisé pour comparer la réponse hydrologique simulée pour différents produits pluviométriques : (diapo 20) : la réanalyse SAFRAN (rouge), des pluies horaires krigées (bleu foncé), les réanalyses radar – pluviographes (bleu ciel) et les pluies simulées à l'aide du

Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale 24 Novembre 2015 Aix en Provence

simulateur stochastique SAMPO (rose) (voir présentation de G. Delrieu et E. Leblois). Pour l'épisode de novembre 2008, la diapo 20 montre un impact différent selon le bassin considéré (amont ou aval). La diapo 21 illustre quant à elle l'impact de l'incertitude de la connaissance de la pluie, telle que représentée par le simulateur stochastique SAMPO. On constate que pour les bassins amont (figure de droite), l'incertitude encadre bien les observations, alors que, à l'exutoire (figure de gauche), l'incertitude de la pluie ne suffit pas à combler la sous-estimation du modèle.

Conclusions et perspectives (diapos 22 à 25)

Les deux approches de modélisation régionale présentées présentent toutes les deux des avantages et inconvénients. La modélisation CVN-p, avec une résolution fine, permet de simuler les débits sur de tous petits bassins versants, ce qui le rend utilisable pour des travaux relatifs au risque de coupure de route (étudié dans le projet ANR MobiClimEx²²). Les résultats obtenus sur l'année 2008 sont encourageants et mériteraient d'être consolidés avec d'autres épisodes. La généralisation de l'utilisation du modèle est néanmoins limitée par l'information détaillée sur les sols qu'il requiert et la lourdeur de mise en œuvre. De plus, la plateforme LIQUID, dans laquelle il est développé, n'est plus maintenue, ce qui rend son évolution difficile. Le modèle SIMPLEFLOOD est quant à lui d'une structure simple à facile à mettre en œuvre. Le type d'approche « descendante » utilisé dans sa conception est récent et nous n'avons pas encore beaucoup de recul sur ces approches. Pour les régions méditerranéennes, il faudrait l'améliorer pour mieux représenter l'évapotranspiration réelle et pouvoir intégrer le ruissellement par excès d'infiltration (ruissellement hortonien).

Les exemples présentés dans cette communication illustrent l'intérêt de l'approche itérative entre observations et modélisation (diapo 5) pour progresser sur la compréhension des processus. Les deux approches de

modélisation mises en œuvre dans le projet sont complémentaires et soulignent toutes les deux :

- La nécessité de prendre en compte les transferts rapides de subsurface pour représenter correctement les débits observés
- Le rôle discriminant de la géologie dans la modulation de la réponse hydrologique, en particulier du débit de base
- L'importance d'une résolution fine de la variabilité spatiale et temporelle de la pluie pour bien simuler les crues rapides, en particulier sur de petits bassins.

Il reste néanmoins encore de nombreux points qui nécessiteraient des travaux supplémentaires pour complètement exploiter les données collectées dans le projet;

- Étendre l'évaluation des différents modèles proposés dans le projet aux différents bassins instrumentés pour vérifier que les résultats soient transposables dans différentes conditions
- Exploiter les données sur les crues rapides collectées en 2014 et 2015
- Prendre en compte certains résultats obtenus à partir des mesures comme la spatialisation des propriétés hydrodynamiques du sol sur la base de la géologie et l'occupation du sol
- Exploiter de manière plus complète les données collectées sur les petits bassins versants pour approfondir la compréhension des processus
- Exploiter de manière plus complète les estimations de la pluviométrie obtenues par réanalyse radar et pluviographes et celles issues du simulateur stochastique de pluie
- Prendre mieux en compte les incertitudes sur la pluie ou les débits dans l'évaluation des modèles, ce qui peut nécessiter de faire évaluer ces méthodes

²² [http://www.agence-nationale-recherche.fr/suivi-bilan/editions-2013-et-anterieures/environnement-et-ressources-biologiques/societes-et-changements-environnementaux/fiche-projet-soc-env/?tx_lmwsuivibilan_pi2\[CODE\]=ANR-12-SENV-0002](http://www.agence-nationale-recherche.fr/suivi-bilan/editions-2013-et-anterieures/environnement-et-ressources-biologiques/societes-et-changements-environnementaux/fiche-projet-soc-env/?tx_lmwsuivibilan_pi2[CODE]=ANR-12-SENV-0002)

Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale 24 Novembre 2015 Aix en Provence

Ces résultats peuvent être exploités dans les outils opérationnels pour améliorer la spécification des paramètres ou pour préparer les futurs outils de simulation. Certains outils développés dans le projet pourraient aussi être simplifiés pour être exploités en opérationnel.

Références

- Adamovic, M., 2014. Development of a data-driven distributed hydrological model for regional catchments prone to Mediterranean flash floods. Application to the Ardèche catchment (France). , Université de Grenoble, Grenoble, France, 05 Décembre 2014, 298 pp, disponible sur http://cemadoc.irstea.fr/exl-php/cadcg.php?query=1&MODELE=vues/p_recherche_publication/home.html
- Adamovic, M. Branger, F., Braud, I., Kralisch, S., 2015a. Development of a data-driven distributed hydrological model for regional scale catchments prone to Mediterranean flash floods, *J. Hydrology*, submitted.
- Adamovic, M., Braud, I., Branger, F., Kirchner, J.W., 2015b. Assessing the simple dynamical systems approach in a Mediterranean context: application to the Ardèche catchment (France). *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19(5): 2427-2449.
- Anquetin, S., Braud, I., Vannier, O., Viallet, P., Boudevillain, B., Creutin, J.-D., Manus, C., 2010. Sensitivity of the hydrological response to the variability of rainfall fields and soils for the Gard 2002 flash-flood event. *Journal of Hydrology*, 394(1-2): 134-147.
- Bouvier, C. et al., 2015. Hydrological processes generating flash floods in a small mountainous Mediterranean French catchment, *J. Hydrology*, in revision.
- Branger, F., Braud, I., Debionne, S., Viallet, P., Dehotin, J., Hénine, H., Nédélec, Y., Anquetin, S., 2010. Towards multi-scale integrated hydrological models using the LIQUID framework. Overview of the concepts and first application examples. *Environmental Modelling & Software*, 25: 1672-1681.
- Coussot, C., 2015. Assessing and modelling hydrological behaviours of Mediterranean catchments using discharge recession analysis, Grenoble University, Grenoble.
- Javelle, P., Demargne, J., Defrance, D., Pansu, J., Arnaud, P., 2014. Evaluating flash-flood warnings at ungauged locations using post-event surveys: a case study with the AIGA warning system. *Hydrological Sciences Journal*, 59(7): 1390-1402.
- Kirchner, J.W., 2009. Catchments as simple dynamical systems: Catchment characterization, rainfall-runoff modeling, and doing hydrology backward. *Water Resour. Res.*, 45(2): W02429.
- Lavabre J., Gregoris Y., 2005. AIGA : un dispositif d'alerte des crues sur l'ensemble du réseau hydrographique. *Ingénieries EAT*, n° 44, 3-12, disponible sur <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00479162/document>
- Langlois, P., Delahaye, D., 2002. RuiCells, automate cellulaire pour la simulation du ruissellement de surface. *Revue Internationale de Géomatique*, 12(4): 461-487.
- Le Bourgeois, O. et al., 2015. Inverse modeling of soil water content to estimate the hydraulic properties of a shallow soil and the associated weathered bedrock, *J. Hydrology*, in revision.
- Manus, C., Anquetin, S., Braud, I., Vandervaere, J.P., Viallet, P., Creutin, J.D., Gaume, E., 2009. A modelling approach to assess the hydrological response of small Mediterranean catchments to the variability of soil characteristics in a context of extreme events. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13: 79-87.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. In: Jones, E.B.a.W., T.J. eds. (Ed.), *Watershed Management in the eighties*. ASCE, Denver, April 30-May 1, 1985, pp. 293-299.
- Vannier, O., 2013. Apport de la modélisation hydrologique régionale à la compréhension des processus de crue en zone méditerranéenne, Université de Grenoble, Grenoble, France, 22 Novembre 2013, 274 pp, disponible sur http://www.lthe.fr/PagePerso/boudevil/THESES/vannier_13.pdf
- Vannier, O., Anquetin, S., Braud, I., 2015. Investigating the role of geology in the hydrological response of Mediterranean catchments prone to flash floods: regional modelling study and process understanding, *J. Hydrology*, in revision
- Vannier, O., Braud, I., Anquetin, S., 2014. Regional estimation of catchment-scale soil properties by means of streamflow recession analysis for use in distributed hydrological models. *Hydrological Processes*, 28(26): 6276-6291.
- Vidal, J.P., Martin, E., Franchisteguy, L., Baillon, M., Soubeyroux, J.M., 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the SAFRAN system *International Journal of Climatology*, 30(11): 1627-1644.



Objectifs de la modélisation

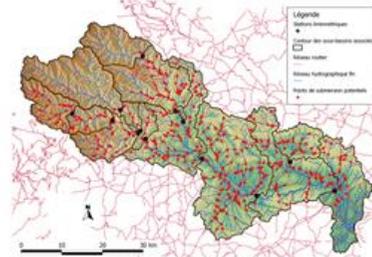


➤ Rappel des questions scientifiques

- Changement d'échelle: comment transférer une connaissance acquise à une échelle à une autre échelle?
- Prédiction en bassin non jaugé sur un large territoire



2 Tronçons réglementaires suivis dans Vigiecrues



En rouge: tous les points d'intersection entre réseau routier et réseau hydrographique (Vannier, 2013)



Stratégie de modélisation



➤ Objectifs des travaux de modélisation dans FloodScale

- Servir de support à l'analyse des données et à l'évaluation de leur cohérence
- Permettre de tester la pertinence d'hypothèses de fonctionnement hydrologique et hiérarchiser les processus actifs par confrontation entre simulation et observation

⇒ Proposer et évaluer des outils de simulation à l'échelle régionale, représentant les principaux processus

➤ Les modèles comme testeurs d'hypothèses

- Utilisation de modèles distribués: pour prendre en compte l'hétérogénéité spatiale du bassin versant (géologie, occupation des sols, pédologie.)
- Les modèles support de formalisations mathématiques de notre connaissance des processus hydrologiques ou des hypothèses que nous pouvons poser
- Evaluation de la pertinence de ces hypothèses en comparant avec des observations représentatives



Objectifs de la modélisation

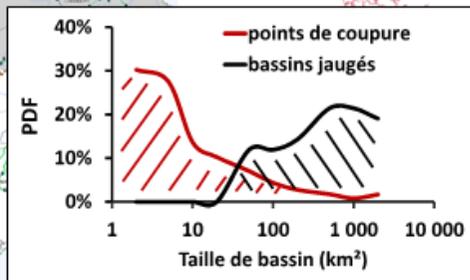


➤ Rappel des questions scientifiques

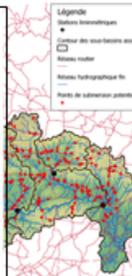
- Changement d'échelle: comment transférer une connaissance acquise à une échelle à une autre échelle?
- Prédiction en bassin non jaugé à échelle fine sur un large territoire



3 Tronçons réglementaires suivis dans Vigiecrues



En rouge: tous les points d'intersection entre réseau routier et réseau hydrographique



Objectifs: Compréhension des processus et du rôle de différents facteurs sur la réponse hydrologique (sols, végétation, occupation du sol, réseaux, etc.)
Différentes échelles d'investigation: du versant au grand bassin

Analyse de données et dérivation du modèle « perceptuel »
⇒ Mise en place de modèles représentant l'hétérogénéité des paysages à l'échelle cible, fondés sur les connaissances actuelles et les données disponibles
⇒ Utilisation des modèles comme testeurs d'hypothèses de fonctionnement

Evolution du modèle
⇒ Amélioration des données d'entrée et des paramètres
⇒ Modification de la représentation des processus
⇒ Ajout de nouveaux processus

Analyse des résultats: comparaison entre modèle et observations et analyse des différences
⇒ Problèmes sur la spécification des paramètres?
⇒ Problèmes sur la représentation des processus?
⇒ Processus non pris en compte?

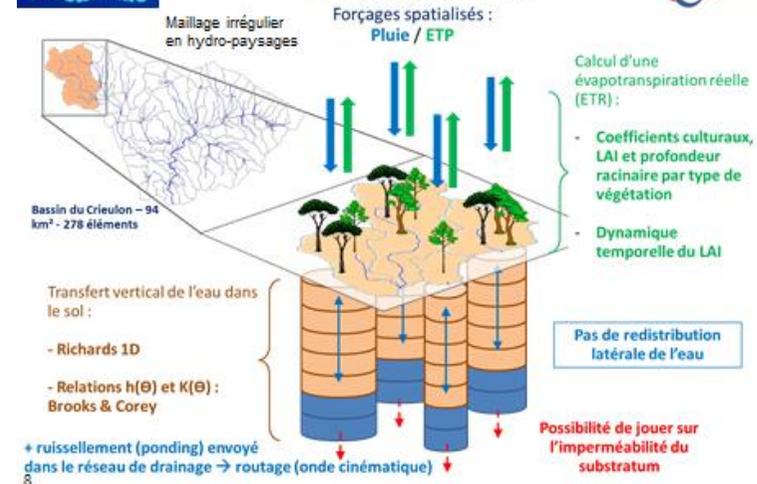
Nouvelles collectes et analyses de données

FloodScale Quels outils à quelle échelle? POLE RISQUES

- Utilisation de plateformes de modélisation
 - Permettent la construction facilitée de modèles à la carte
 - Plateformes utilisées dans le projet: ATHYS (HSM), LIQUID (Hydrowide) et JAMS (Université de Jena)
- Outils de modélisation utilisés
 - Echelle locale: HYDRUS 1D/2D pour la modélisation des expérimentations et l'interprétation des mesures (transects, parcelles d'infiltration)
 - Echelle des petits bassins versants: construction de modèles formalisant les processus à partir des observations et évaluation avec des mesures distribuées (modèle CVN-latéral, modèle RuiCells, approches bayésiennes ou fractales)
 - Echelle régionale: même philosophie que pour les petits bassins
 - ✓ Modélisation continue à résolution assez fine, formalisation des processus à partir d'équations physiques (bottom-up)
 - ✓ Modélisation continue simplifiée s'appuyant sur l'analyse des données pour dériver la structure du modèle (top-down)

6

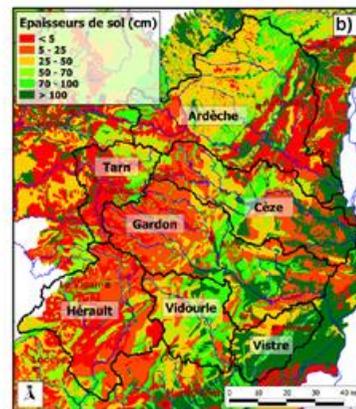
FloodScale Modélisation « ascendante »: le modèle CVN POLE RISQUES



8

FloodScale Modélisation ascendante : CVN POLE RISQUES

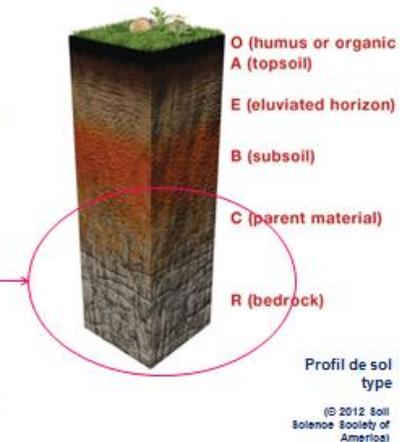
- Domaine: ensemble des bassins cévenols (Ardèche à Hérault)
- Mailles irrégulières ~ 0.1-0.5 km²
- Pas de temps variable
- Entrées pluie: pluies krigées à 1h et 1km² pendant les événements, réanalyse SAFRAN à 1h et 64 km² entre les épisodes
- Simulation continue année 2008 et épisodes 21-23/10 et 31/10-06/11/2008



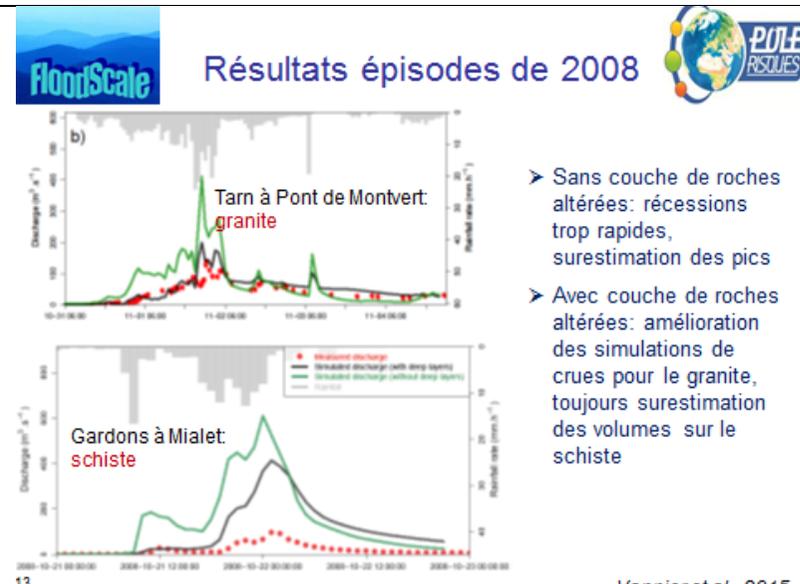
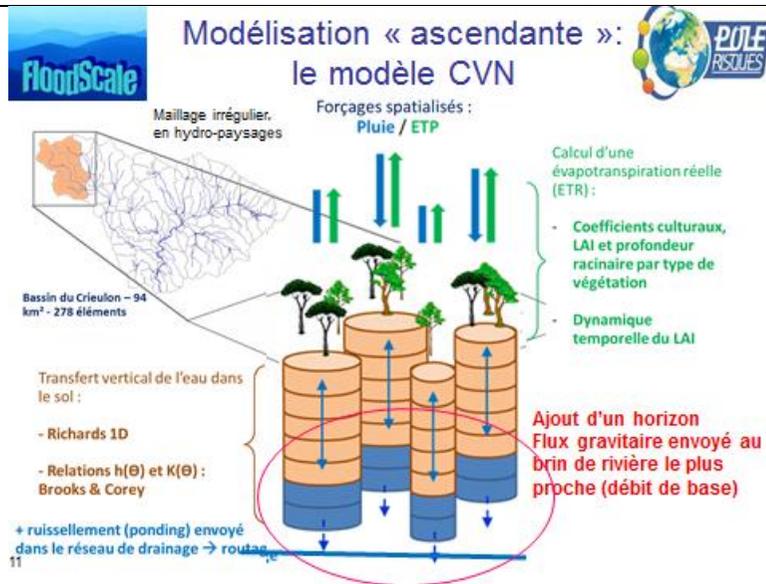
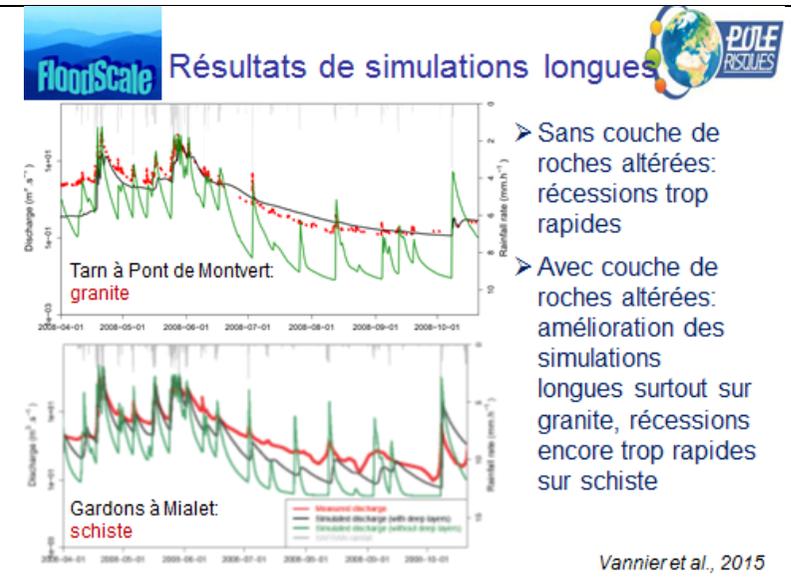
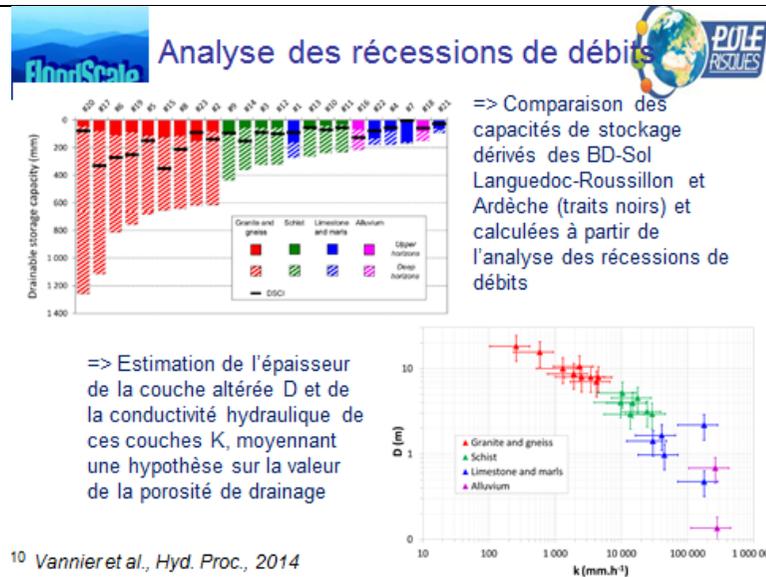
7

FloodScale Comment représenter le sol dans CVN? POLE RISQUES

- Utilisation du Référentiel Régional Pédologique au 1/250000^{ème} (Languedoc-Roussillon et Ardèche): description des horizons de sol + fonction de pédo-transfert => capacités de stockage faibles
 - BD sol construites pour l'agronomie
 - Ne renseigne pas les horizons de sol altéré qui peuvent stocker de l'eau et être importants pour l'hydrologie
- => Analyse des récessions de débit pour estimer la capacité de stockage des sols et les propriétés des horizons altérés**



9



Comparaison aux ReX

14

- Valeurs simulées de débit de pointe spécifiques en accord avec les observations
- Tendance à sous-estimer les valeurs fortes et sous-estimer les valeurs faibles (pluies krigées à 1h)

Vannier et al., 2015

Modélisation descendante « SIMPLEFLOOD »

- Modélisation continue par sous-bassin: débit fonction du stock en eau
- Modèle de production (3 paramètres) déduit de l'analyse des récessions sur des bassins non influencés et à la géologie homogène
- Routage par onde cinématique
- Analyse FAMD de plusieurs facteurs pour régionaliser les paramètres: la géologie est discriminante

$$\frac{d(\ln(Q))}{dt} = g(Q) \left(\frac{P - AET}{Q} - 1 \right)$$

$$g(Q) = \frac{dQ}{dS} \approx - \frac{dQ/dt}{Q} \quad | P \ll Q, AET \ll Q$$

$$\ln(g(Q)) \approx C_1 + C_2 \ln(Q) + C_3 (\ln(Q))^2$$

16 Adamovic et al., 2015a

Modélisation descendante: SIMPLEFLOOD

- Domaine: bassin de l'Ardèche
- Mailles sous-bassins 10 km²
- Pas de temps horaire
- Entrées pluie: réanalyse SAFRAN à 1h + analyse de sensibilité à d'autres entrées pluie
- Simulation continue 2000 à 2012

Adamovic et al., 2015b

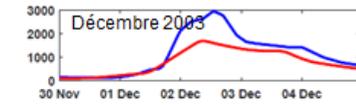
Résultats simulation continue Entrée pluie SAFRAN

- Année humide 2008
 - Bonnes performances du modèle
 - NSE= 0.76
 - Bias volume = -6%
- Année sèche 2005
 - Sous-estimation des débits par le modèle
 - NSE= 0.05
 - Bias volume = -62%

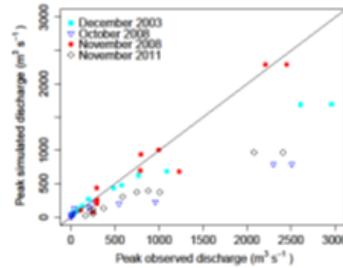
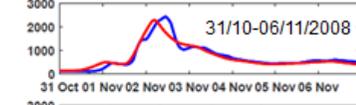
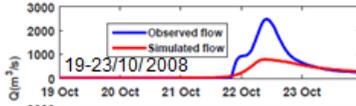
Adamovic, 2014



Résultats épisodes de 2008 Entrée pluie SAFRAN



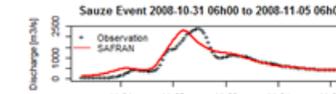
- Sous-estimation générale des pics sauf épisode de novembre 2008



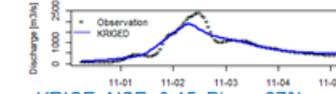
Adamovic et al., 2015b



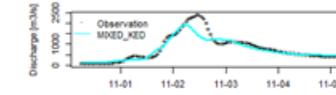
Simulation épisode 31 Oct-05 Nov. 2008



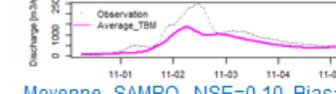
SAFRAN, NSE=0.28, Bias=-15%



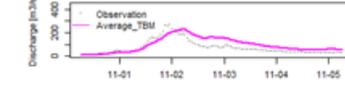
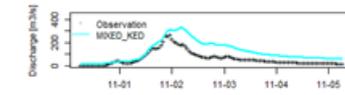
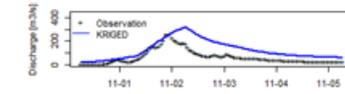
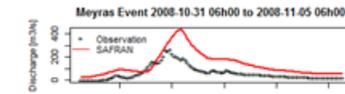
KRIGE, NSE=0.15, Bias=-27%



KED, NSE=0.14, Bias=-36%



Moyenne_SAMPO, NSE=0.10, Bias=-23%



Sensibilité de la réponse hydrologique à la spécification et à l'incertitude sur la pluie



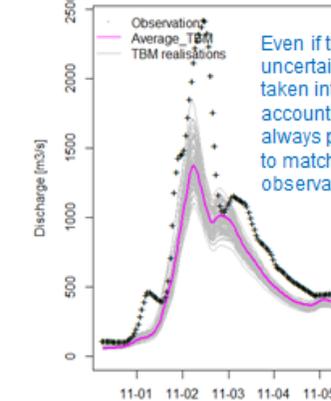
- Avec SIMPLEFLOOD sur l'Ardèche
- Illustration: épisode du 30/10 au 05/11 2008
- Produits pluviométriques
 - SAFRAN horaire
 - Pluviographes horaires krigés (KRIGE)
 - Réanalyses radar-pluviographes (KED)
 - Simulations stochastiques conditionnées par les observations (SAMPO)
- Impact de l'incertitude sur la pluie (100 réalisations SAMPO)

19

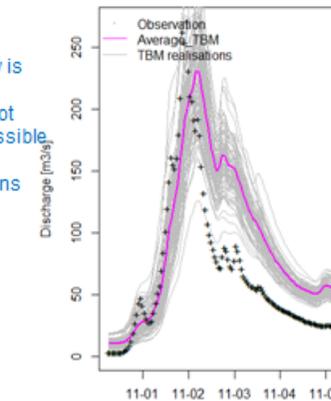


Incertain sur la pluie 31/10-05/11/2008

Sauze Event 2008-10-31 06h00 to 2008-11-05



Meyras Event 2008-10-31 06h00 to 2008-11-05



Even if the uncertainty is taken into account, not always possible to match observations



Avantages et Limites des modèles développés



- CVN:
 - Avantages: échelles spatiales adaptées à la simulation régionale des très petits bassins (coupure de route)
 - Limites: lourdeur de mise en œuvre, besoin d'informations détaillées sur les sols, développé dans un outil propriétaire difficile à faire évoluer
- SIMPLEFLOOD:
 - Avantages: simplicité de structure et mise en œuvre, temps de calcul rapide, développé dans un outil Open-Source
 - Limites: représentation des processus en conditions sèches (évapotranspiration, écoulements rapides)

22



Mais encore pas mal d'analyses à poursuivre



24



Conclusions et perspectives



- Pertinence de l'approche itérative associant modélisation et observation pour comprendre les processus et améliorer progressivement les simulations
- Des approches différentes mais complémentaires, qui soulignent toutes les deux:
 - Nécessité de prendre en compte les transferts de subsurface pour représenter correctement les débits observés
 - Rôle discriminant de la géologie dans la génération de ce débit de base
 - Importance du signal d'entrée « pluie »
- Premiers essais de validation de simulations spatialisées utilisant d'autres données que les débits (ReX)
- Des outils en place pour étudier l'impact de l'incertitude sur la pluie

23

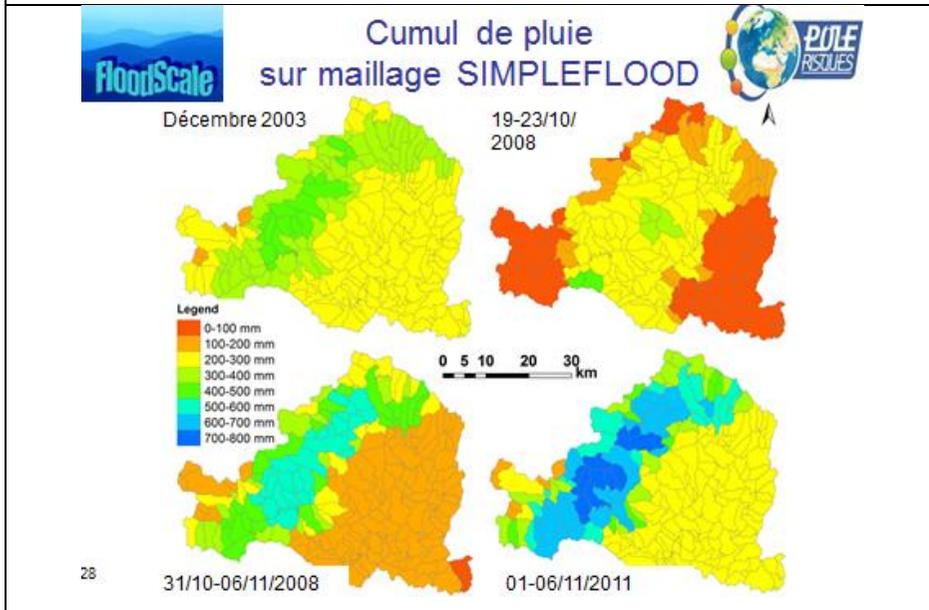
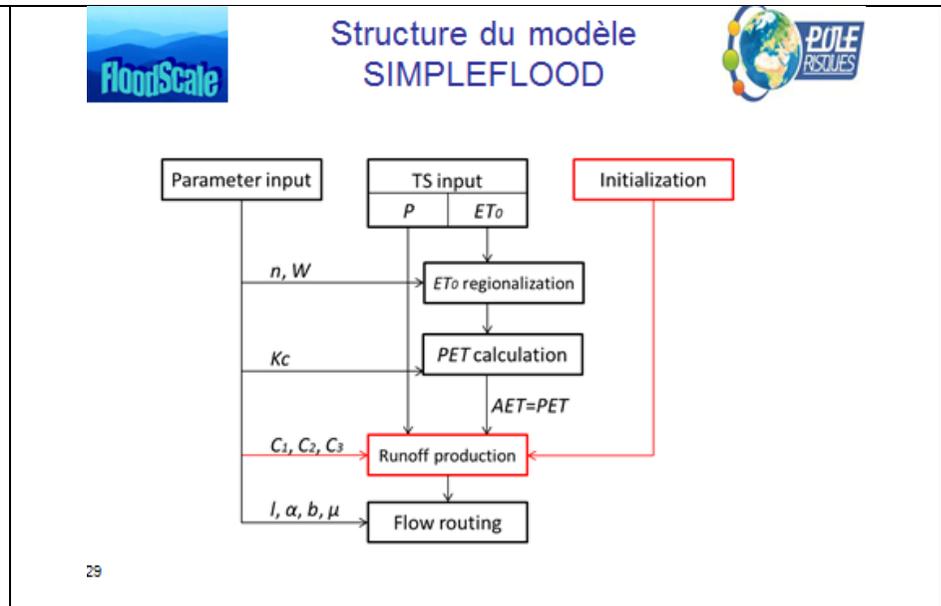
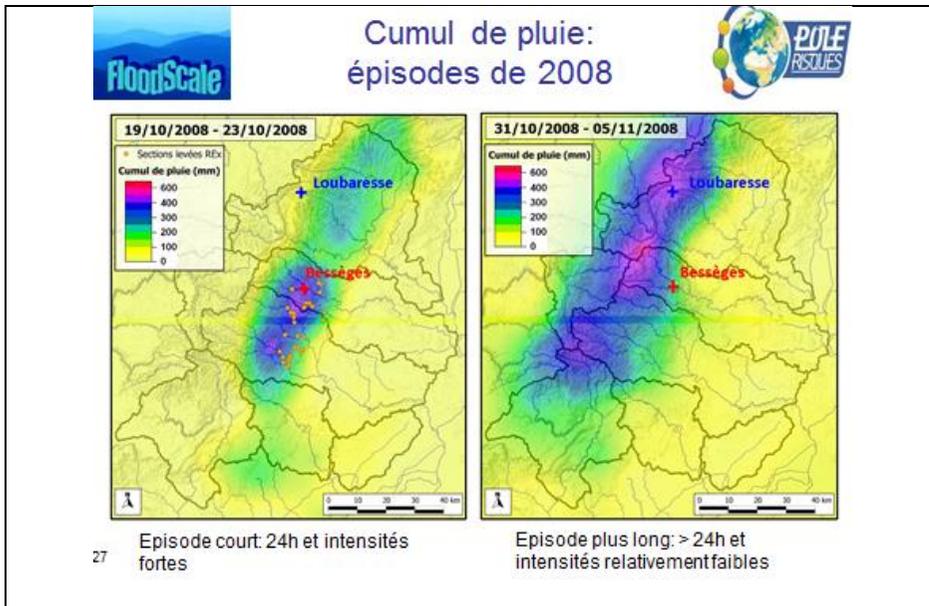


Quel intérêt pour les opérationnels



- **Ce qui peut être utile à court terme**
 - Prendre mieux en compte les résultats sur les capacités de stockage des sols et la géologie dans la spécification des paramètres des modèles opérationnels
- **Ce qui peut être utile à moyen ou long terme**
 - Intégration des nouvelles connaissances sur les processus dans les modèles opérationnels
 - Adaptation/simplification des outils développés dans le projet pour aller vers des outils opérationnels

25



Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale 24 Novembre 2015 Aix en Provence



Synthèse des discussions lors du séminaire du 24 Novembre 2015

Isabelle Braud¹, ¹Irstea, HHLV, Lyon.

Discussions sur les présentations

Les questions sur les présentations ont permis de compléter les points suivants :

Etude des processus de versants ou sur les petits bassins versants

- Sur l'analyse de l'extension du réseau de drainage durant les crues/la saison et la possibilité d'avoir accès à cette information par satellite. Il est indiqué que ça n'est pas encore possible à cette résolution. En revanche, le futur satellite SWOT devrait fournir après son lancement des informations sur l'altimétrie dans les rivières à une résolution assez fine.
- Sur l'intérêt de la mesure de la température ou de la conductivité : il est indiqué que ces données peuvent fournir, à un coût moindre que les analyses géochimiques, des informations utiles pour la décomposition des hydrogrammes et l'identification des sources d'eau contribuant au débit.
- Sur l'intérêt d'un suivi entre les crues : il est indiqué qu'un suivi de l'humidité du sol peut permettre d'avoir accès à un indicateur de l'état de saturation des sols, pertinent à l'échelle des petits bassins versants. Il est aussi souligné que l'analyse des récessions est un bon indicateur des capacités de stockage du sol (voir aussi la présentation sur la modélisation régionale).
- Sur la caractérisation des sols : comment les mesures de profondeurs de sol, issues de résistivité ont-elles été validées ? Il est indiqué que ces valeurs ont été comparées à des mesures directes avec des tiges en fer ou au résultat issu de l'ouverture de fosses pédologiques.

- Sur la dépendance du temps de saturation à l'intensité de pluie : il est demandé si ça pourrait être expliqué par un bouchage de certains pores par les sédiments fins. Il est rappelé qu'il faut deux paramètres pour caractériser l'infiltrabilité d'un sol : la conductivité à saturation est la valeur en régime permanent, la sorptivité caractérise les effets capillaires avant la saturation et donc la forme de l'infiltrabilité durant le régime transitoire. Ces deux effets expliquent par exemple pourquoi, sur le site Ardéchois, les conductivités à saturation des vignes sont plus faibles que celles des prairies, mais le saturomètre montre qu'elles se saturent plus lentement car le sol s'assèche plus rapidement que sur prairie.
- Sur les capacités de stockage du sol et l'infiltration profonde : dans la modélisation la conductivité latérale Klat a été fixée et le paramètre contrôlant l'infiltration profonde calibré pour chaque épisode. Ce dernier paramètre peut être relié à l'humidité initiale du sol.
- Sur les valeurs de coefficient de Strickler utilisées : une valeur de l'ordre de 10-30 est utilisée pour les rivières un peu larges (Gardon d'Anduze), alors qu'une valeur de 3 uniquement est utilisée pour les petits bassins comme Valescure. Ceci peut être expliqué par le fait que les petits cours d'eau sont beaucoup plus rugueux.

Estimation de la pluie

- Quel est le nombre minimal de stations nécessaires à la fusion radar/pluviomètres : cette question est abordée dans une thèse en cours et la méthode de krigeage par dérive externe semble

Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale 24 Novembre 2015 Aix en Provence

être robuste lorsque la densité du réseau de pluviographes est dégradée.

- Quelle complémentarité/différences avec les produits fournis par Météo-France : les méthodes sont partagées. La recherche a pu apporter une méthodologie de quantification de l'incertitude, les moyens pour réaliser ce travail de réanalyses étant limités, le travail entre Météo-France et laboratoires de recherche est partagé : Météo-France a produit une première réanalyse radar sur la France entière entre 1997 et 2006 (1 km², 1h) et les chercheurs ont complété ces données sur 2007(2014 sur les Cévennes).
- La question du pas de temps de la pluie pertinent pour l'étude des crues a été plusieurs fois posée : le pas de temps de 1h retenu pour les réanalyses radar/pluviographes est en effet un peu grossier pour les petits bassins versants ou des bassins à composante urbaine forte. Sur la période 2012-2013, des réanalyses à 15 minutes ont été produites sur des bassins de méso-échelle. Néanmoins, établir des réanalyses à pas de temps plus fin nécessite une critique des données à ces pas de temps, ce qui est un gros travail. Il est aussi souligné que, à pas de temps très fin, la mesure de pluie devient dépendante de la granularité de la mesure (basculement d'augets), ce qui rend l'analyse des propriétés statistiques de la pluie à pas de temps fin délicate. Une solution préférée est d'essayer d'inférer les propriétés de la pluie à pas de temps fin, qui permettront de respecter les propriétés des pluies sur des pas de temps agrégés. Cette stratégie a été testée avec le simulateur stochastique de pluie sur des bassins urbains. Les services opérationnels de prévision de crue (SPC) soulignent aussi l'intérêt, pour leur pratique, de données de pluies à pas de temps inférieurs à l'heure, pour la prévision sur les bassins méditerranéens.

Hydrométrie

- Les services opérationnels (EDF, CNR, SPC) ont souligné l'intérêt, pour l'évolution de leurs pratiques, des travaux menés dans des projets comme FloodScale et HyMeX : appropriation de la méthode Baratin d'estimation des courbes de tarage, utilisation de stations LS-PIV et de caméras pour documenter les crues rapides, équipement des équipes avec des radars SVR. Ces évolutions amènent aussi à des besoins d'évolution des métiers dans les équipes et à des besoins en formation: apprentissage des méthodes de retour d'expérience hydrologie, nécessité d'acquérir des savoir-faire sur la topographie du lit des rivières pour exploiter des films, documentation des sections de rivières par banque de photos pour mieux documenter les contrôles hydrauliques en vue d'une application de la méthode BaRatin, ... Il est aussi souligné que l'exploitation des films est limitée par la nécessité de réaliser des levés topographiques, qui sont consommateurs de temps.
- Des questions sur l'utilisation des mesures sans contact, en particulier le coefficient de vitesse reliant vitesse de surface et vitesse moyenne dans la section. Il est indiqué, qu'au-delà de l'utilisation de références dans la littérature, l'exploitation des jaugeages classiques (ADCP, jaugeages au moulinet, etc..) peut permettre d'obtenir des informations sur ces coefficients. Côté recherche, un radar doppler a été installé 6 mois au fond de l'eau pour réaliser des profils de vitesse à un endroit où un radar de vitesse de surface était installé, ce qui permettra de réaliser des analyses fines sur le coefficient de vitesse.
- Une question sur le coût des radars : SVR environ 4 k€, un radar RQ-30, environ 30 k€
- Des besoins pour prendre en compte les détarages liés à la végétation : il est indiqué qu'une thèse est actuellement en cours qui aborde ce sujet.

Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale 24 Novembre 2015 Aix en Provence

- Sur l'utilisation de films amateurs : comme indiqué précédemment, il faut que ces films puissent être localisés pour qu'une topographie soit faite à posteriori. Il paraît recommandable de former un réseau d'observateurs plutôt que de faire appel au public, en particulier afin de bien sensibiliser les personnes aux problèmes de sécurité durant ce type d'intervention.

Modélisation

- Les pratiques des SPC qui utilisent plusieurs produits pluviométriques (mosaïque radar PANTHERE, produits CALAMAR ou ANTILOPE) montrent une sensibilité de la réponse du modèle hydrologique à la spécification de ces entrées pluie. La présentation insiste aussi sur le besoin de produits de pluie infra-horaires, pour bien anticiper les crues rapides.
- Une question est posée sur la possibilité d'avoir des outils de vigilance à l'échelle des communes : il est rappelé que cet aspect « prévision » de la modélisation n'a pas été abordé dans le projet. Les travaux du CNRM/Météo-France sur l'utilisation de prévisions d'ensemble du modèle Arôme sont néanmoins cités. Ces simulations peuvent aussi être bruitées pour donner un ensemble équiprobable tenant compte de l'incertitude sur la localisation et l'intensité des cellules les plus intenses. Ces pluies équiprobables sont ensuite routées dans un modèle hydrologique pour un ensemble de valeurs de paramètres/conditions initiales représentatives des incertitudes du modèle. Ces outils restent encore du domaine de la recherche et il faudra encore beaucoup de temps avant qu'ils puissent fournir une information fiable à l'échelle de la commune.

Pour aller plus loin

Les séances de questions et les présentations des opérationnels sollicités ont mis en évidence plusieurs éléments intéressants les services opérationnels ou les bureaux d'étude. On peut mentionner :

- Intérêt fort sur les développements en hydrométrie, les produits pluviométriques adaptés aux crues rapides, des informations sur l'humidité des sols, la quantification des incertitudes
- Intérêt pour les résultats obtenus sur les stockages d'eau dans les sols, en fonction des différents contextes, ainsi que sur les caractérisations des propriétés d'infiltrabilité dans les sols
- Une demande pour des fiches de synthèse des informations nécessaires/disponibles pour caractériser un bassin versant
- Intérêt pour les jeux de données acquis durant le projet et leur exploitation possible pour évaluer/améliorer des produits/modèles opérationnels

Les discussions ont aussi fait émerger différents questionnements/besoins non abordés dans le projet FloodScale, qui ouvrent des pistes de recherche intéressantes. On peut en particulier mentionner :

- Le besoin de produits/d'information pluviométrique à des pas de temps fins (inférieurs à l'heure) pour les petits bassins et/ou les bassins urbains
- Des besoins sur l'impact de la végétation sur les courbes de tarage
- Le besoin d'étendre les approches développées dans FloodScale à des environnements plus urbanisés
- Des besoins en formation des personnels (méthodes de mesure, modélisation)
- Des besoins pour établir une vigilance à l'échelle de la commune



Un jeu de données unique



- Une stratégie d'acquisition de données sur les crues rapides qui s'est révélée adaptée
 - Combinaison de mesures en continu et de mesures sur alerte
 - Suivi sur quatre années pour « capturer » des crues rapides
 - Effort de quantification de l'incertitude sur la donnée à tous les niveaux
- Un jeu de données unique sur la caractérisation des crues rapides à différentes échelles d'espace et de temps
- Echantillonnage à des échelles spatiales et temporelles plus fines que les réseaux opérationnels
- Démonstration de l'importance de données de débits de qualité en continu, même à bas débit (exploitation des récessions pour simuler les crues)
- Un jeu de données de référence pour la communauté scientifique ou l'évaluation/validation d'outils de prévision opérationnels

2



Ce qui reste à faire



- Exploitation complète des jeux de données acquis
 - Echelle du versant: poursuivre l'exploitation des différentes données pour caractériser les flux de surface et de sub-surface
 - Echelle du petit bassin versant: encore du travail pour répondre complètement aux questions initiales:
 - Quelle part de la réponse liées à la pluviométrie et aux conditions de surface (géologie, pédologie, occupation du sol)?
 - Quel rôle des ravines?
 - Quelle partition des flux (question importante pour aborder des problématiques connexes telles que l'érosion ou le transfert de polluant)
- Poursuivre la vérification de la généricité des résultats
 - en appliquant le même modèle dans des contextes variés
 - En simulant de nouveaux épisodes de crue
- Le projet n'a pas abordé la réponse des zones urbaines

4



Des avancées significatives



- Sur la caractérisation de la pluie et des débits
 - Une méthode de fusion de données radar/pluviographes validée et l'erreur d'estimation quantifiée
 - Plusieurs méthodes de jaugeage des débits de crue validées, documentées et mises à disposition des services opérationnels
 - Une méthode objective pour quantifier les incertitudes sur les courbes de tarage et leur propagation sur les hydrogrammes
- Sur les processus
 - La géologie est un facteur clé pour comprendre des différences de réponse hydrologique et de stockage dans les sols
 - Nécessité de prendre en compte des flux de sub-surface pour expliquer les crues, même en contexte où le ruissellement de surface est important
 - Des modélisations proposées et évaluées à différentes échelles et une approche de synergie observations/modélisation qui permet de progresser dans les connaissances

3



Ce qui peut être utile aux opérationnels



- La méthode de consolidation des pluies (fusion radar/pluviographes) et des jeux de pluies de référence pour l'évaluation/la calibration de produits satellitaires ou de modèles météo
- Les avancées en hydrométrie (méthodes de jaugeage en crue, méthode BaRatin pour l'estimation des courbes de tarage, quantification des incertitudes)
- Les informations/connaissances acquises sur le rôle du sous-sol sur le stockage de l'eau et sur la modulation de la réponse hydrologique
- Les outils de modélisation développés pour en dériver des outils simplifiés applicables en prévision

5



Merci pour votre participation active à la journée

- Actes des journées sur le site FloodScale
- Rapport final mis à disposition à partir de fin mai 2016

<http://floodscale.irstea.fr/>

Séminaire de restitution du projet ANR FloodScale 24 Novembre 2015 Aix en Provence



Pôle Risques ANR FloodScale, 24 Novembre 2015, Aix-en Provence

