

Méthodes de régionalisation pour un modèle pluie-débit distribué et à base physique dédié aux crues éclair

GARAMBOIS Pierre-André¹, DOUINOT Audrey^{2,3}, ROUX Hélène^{2,3}, DARTUS Denis^{2,3}

¹ ICUBE - UMR 7357, fluid mechanics team, INSA Strasbourg, 24 Boulevard de la victoire, 67084 Strasbourg cedex, France – e-mail: Pierre-andre.garambois@insa-strasbourg.fr

² Université de Toulouse, INPT, UPS, IMFT (Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse), surface hydrology HYDROECO group, Allée Camille Soula, 31400 Toulouse, France.

³ UMR CNRS/INP-UPS 5502, 31400 Toulouse, France

RÉSUMÉ. – Cette étude s'intéresse aux méthodes de régionalisation pour des jeux de paramètres d'un modèle pluie-débit distribué et à base physique, dédié aux crues éclair. Les performances du modèle MARINE sont testées sur un total de 117 événements de crues éclair survenues sur des bassins versants de l'arc méditerranéen français. Étant donnée la relative rareté des enregistrements de crues éclair, ce jeu de données représente un échantillon conséquent des paysages et de l'hydrologie des régions allant du piémont pyrénéen à la Provence en passant par les Cévennes et le Vivarais. Des approches de régionalisation basées sur la proximité géographique ou les similarités physiographiques sont testées avec plusieurs combinaisons de descripteurs. Des résultats encourageants sont obtenus avec les deux méthodes de similarités physiographiques basées sur deux ou trois bassins donneurs. Une perte de performance de 10% en régionalisation par rapport à la calibration/validation est relevée pour ces méthodes. Pour 13 bassins versants sur 16, au moins un événement est simulé avec de bonnes performances. Cette étude met en avant l'importance des informations hydrologiques contenues dans les événements de calibration disponibles sur site ou sur les bassins donneurs. De plus les techniques de régionalisation produisent de meilleures performances sur les bassins présentant un comportement hydrologique apparemment plus régulier. Le paramètre le plus sensible du modèle MARINE, C_z , contrôlant le volume de sol et ainsi le bilan en eau, est plutôt bien contraint par les approches de régionalisation par similarité grâce aux descripteurs du socle rocheux.

Mots-clés : Crues éclair méditerranéennes, régionalisation de jeux de paramètres, modèle distribué à base physique.

Regionalization methods for a process oriented distributed model dedicated to flash floods

ABSTRACT. – The present contribution is a study about parameter sets regionalization for process oriented hydrological models in the case of flash floods. MARINE model performances are tested on 117 flash floods from the last two decades which is a large catalogue of hydrology and landscapes from Pyrenean, Mediterranean, Cévennes-Vivarais and Provence regions. Encouraging results are obtained with two similarity approaches. Only a small decrease of performances from calibration/validation to regionalization is detected for these two methods. This study sheds more light on the importance of hydrological information that is available in calibration events for a gauged catchment or from donor catchment(s) for regionalization. It can also be shown that the most sensitive parameter of MARINE model (Garambois et al 2013) which is controlling the soil volume and water balance, is rather well constrained by the two similarity approaches thanks to bedrock descriptors.

Key-words: Mediterranean flash floods; parameter sets regionalization; process oriented distributed model

I. CONTEXTE: LA PRÉVISION DES CRUES ÉCLAIR SUR LES BASSINS VERSANTS NON JAUGÉS

La prévision de débits pointe et d'incertitudes associées, pour des crues de périodes de retour variées, est un prérequis indispensable pour planifier des mesures d'atténuation voir même pour prévenir les dégâts causés par des crues (ex. (Pilon, 2004)), et plus particulièrement dans le cas des crues éclair qui sont souvent des réponses hydrologiques extrêmes. Elles entraînent la mort de personnes et des milliards d'euros de dégâts en France durant les deux décennies passées (Gaume et al., 2009). Les crues éclair mettent en jeu un certain nombre de processus hydrologiques rapides, non linéaires

et souvent couplés en temps et en espaces, présentant de fortes variabilités spatio-temporelles comme les orages les déclenchant (Borga et al., 2008; Garambois et al., 2014a).

La littérature met en avant le besoin d'améliorer les connaissances sur la dépendance des processus hydrologiques vis-à-vis des propriétés des bassins versants, ce qui peut être utile pour élaborer et calibrer des modèles pour des régions spécifiques et pour la prévision sur les bassins non jaugés. Il n'est pas possible de calibrer un modèle hydrologique de manière classique sur les bassins non jaugés où la connaissance des débits manque. Le terme régionalisation fait ainsi généralement référence au transfert de paramètres d'un modèle hydrologique depuis un bassin donneur, jaugé, vers des bassins receveurs et non jaugés. Parmi les nombreuses techniques proposées pour

la régionalisation des paramètres de modèles hydrologiques, généralement pour des modèles continus (et souvent conceptuels), trois types d'approches peuvent être distinguées avec pour chacune leurs avantages et inconvénients (Oudin et al., 2008) : les méthodes de régression, de proximité géographique et de similarité. La plupart des études de régionalisation ont été menées avec des modèles continus sur des bassins de méso-échelle, de plusieurs milliers de km². Cependant, le problème de la régionalisation concernant des crues éclair sur des têtes de bassins versants, sur un large jeu de données et à l'aide d'un modèle pluie débit distribué et à base physique, n'a pas été documenté dans la littérature à notre connaissance. Cet article, dans le contexte de crues éclair méditerranéennes, se propose d'étudier les questions de comment est reflétée l'unicité physique des bassins versants dans un procédure de régionalisation (Wagener and Wheeler, 2006) et comment et quelle information est la mieux transférée (Merz et al., 2006)?

Cet article s'intéresse à une centaine de crues éclair surveillées dans la région méditerranéenne qui est plutôt complexe et variée en termes de pédologie, géologie, et distributions de pluie parfois intenses. La section 2 présente le cadre de modélisation et le large jeu de données utilisé. Une discussion des résultats de calibration/ validation et de régionalisation est exposée en section 3. Les résultats de régionalisation sont analysés à l'aide de statistiques globales sur l'efficacité du modèle pour tout le jeu de données, par bassin versant et par événement de crue.

II. JEU DE DONNÉES ET MODÈLE

II.1. Aire d'étude et descripteurs physiographiques

La zone d'étude est située dans la région méditerranéenne française et s'étend du piémont pyrénéen au piémont alpin en passant par les massifs des Corbières, des Cévennes et du Vivarais. Le jeu de données concerne 16 têtes de bassins versants non régulées de taille petite à moyenne, allant de 144 à 786 km², et présentant des caractéristiques contrastées. Ces bassins représentent un large échantillon de paysages

hydrologiques du pourtour méditerranéen français. La proximité des reliefs entourant la mer est un facteur qui peut favoriser l'apparition d'événements pluvieux intenses. Pour cette étude des mesures de pluie effectuées à l'aide de radars météorologiques (Figure 1, disques oranges) puis recalibrées sur un réseau de pluviomètres sont disponibles.

Trois types de données d'entrée statiques sont nécessaires pour alimenter le modèle MARINE (Figure 2) : Un MNT¹ (ici à 25m de résolution), des cartes d'épaisseur et de texture des sols², l'occupation des sols³ nécessaire pour déterminer des cartes de rugosité de surface.

II.2. Caractéristiques du modèle

Afin de produire des prévisions de crues rapides, le modélisateur est d'abord confronté au problème du choix du modèle hydrologique, puis de la calibration de jeux de paramètres pouvant simuler des événements de crue et ainsi reproduire de manière plus ou moins fine la forme des hydrogrammes à partir de données d'entrée, et enfin évaluer les performances du modèle sur chaque événement à l'aide d'une fonction coût. La présente étude utilise le modèle distribué MARINE dédié à la prévision des crues éclair (Roux et al., 2011) avec un module de transfert subsurface. Le facteur prédominant pour la formation du ruissellement est la topographie : la pente et les directions de drainage. Le modèle MARINE, permettant de représenter aussi bien le ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration que par excès de saturation, est structuré en trois modules principaux (Figure 2). Le premier module permet de séparer les précipitations entre le ruissellement de surface et l'infiltration modélisée avec un modèle de Green et

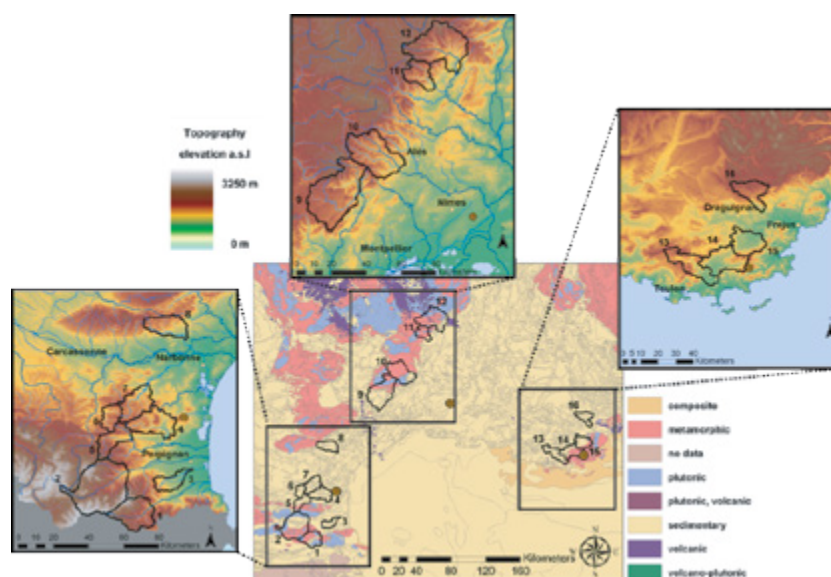


Figure 1 : (Centre) Composition simplifiée du socle rocheux de la région méditerranéenne française (source: (Bd Million-Géol, BRGM) and (périphérie) topographie (source: IGN). (contours noirs) 16 bassins versants d'intérêt ; d'ouest en est les radars météorologiques d'Opoul, Nîmes et Collobrières du réseau de Météo France (disques oranges).

Ampt ; le second module représente les écoulements de subsurface à l'aide d'une approximation de la loi de Darcy et le troisième module représente l'écoulement de surface (sur les versants et dans un réseau de drainage) : la fonction pour transférer l'excédent de pluie jusqu'à l'exutoire utilise l'approximation d'onde cinématique. Pour une description complète du modèle le lecteur peut se référer à Roux et al., (2011). Un modèle continu d'équilibre hydrologique (SIM) (Habets et al., 2008) est utilisé pour initialiser le contenu en eau du sol du modèle MARINE avant de simuler un événement crue.

Ce modèle est le résultat d'une approche mécaniste qui ne considère que les composantes jugées prépondérantes dans la genèse des crues éclair méditerranéennes. Plusieurs études de sensibilité et de calibration/validation (cal/val) du modèle ont été menées pour des bassins de la région méditerranéenne française sur des bassins avec des surface de drainage comprises entre 100 km² et 700 km² (Garambois et al., 2014b, 2013; Roux et al., 2011). Les résultats de ces études montrent que l'épaisseur des sols et les transferts latéraux de subsurface ont un impact significatif sur les dynamiques de saturation des sols et de génération des débits. Le réseau de drainage est important également.

Le choix d'une fonction est relativement important pour juger de la qualité des simulations. La simulation de l'heure du pic de crue et de son amplitude sont deux caractéristiques importantes pour la comparaison avec les hydrogrammes

observés. Ces deux critères seront pris en compte avec la fonction coût L_{NP} (1) (Roux et al., 2011):

$$L_{NP} = \frac{1}{3} Nash + \frac{1}{3} \cdot (1 - dQ_p) + \frac{1}{3} \cdot (1 - dT_p) \quad (1)$$

Avec :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_{obs}} (Q_s^t - Q_o^t)^2}{\sum_{i=1}^{N_{obs}} (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} ; dQ_p = \frac{|Q_s^p - Q_o^p|}{Q_o^p} ;$$

$$dT_p = \frac{|T_s^p - T_o^p|}{T_o^c} \quad (2)$$

Où N_{obs} est le nombre d'instantanés d'observation, Q_s and Q_o sont respectivement le débit simulé et observé, Q_s^p and Q_o^p sont respectivement le débit de pointe simulé et observe, T_s^p and T_o^p sont respectivement les temps simulés et observés pour le pic de débit, T_o^c est le temps de concentration du bassin estimé en moyennant la méthode de Bransby ($T_o^c = \frac{21.3L}{A^{0.1}S^{0.2}}$, L est la longueur de drainage (m), A est l'aire du bassin (m²) et S la pente du profil en long (m/m)).

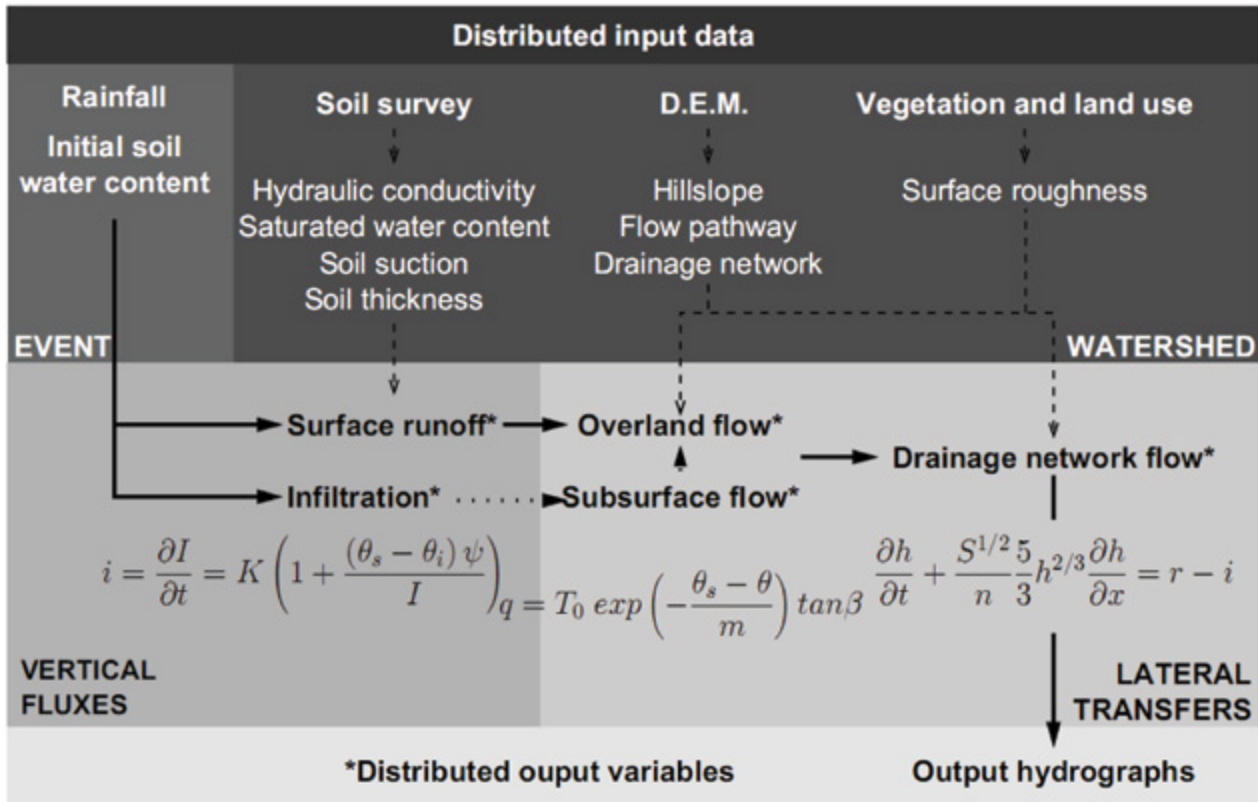


Figure 2: structure du modèle MARINE, paramètres et variables. Equation d'infiltration de Green et Ampt : taux d'infiltration i (m.s⁻¹), infiltration cumulée I (mm), conductivité hydraulique à saturation K (m.s⁻¹), succion du sol au front de saturation ψ (m), contenus en eaux initial et à saturation θ_s and θ_i (m³ m⁻³). Écoulement de subsurface: transmissivité locale d'un sol saturé T_0 (m².s⁻¹), contenus en eaux initial et à saturation θ_s and θ (m³ m⁻³), paramètres de décroissance de la transmissivité m (-), angle de pente locale β (rad). Onde cinématique : hauteur d'eau h (m), temps t (s), vitesse d'écoulement de surface u (m.s⁻¹), variable d'espace x (m), taux de pluie r (m.s⁻¹), taux d'infiltration i (m.s⁻¹), pente du fond S (m.m⁻¹), coefficient de frottement de Manning n (m^{-1/3}.s).

II.3. Méthode de régionalisation

Comme exposé précédemment, 5 paramètres du modèle MARINE sont calibrés sur des bassins versants où des chroniques de débit sont disponibles (section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), mais l'application du modèle MARINE dans le cas de bassins non jaugés requiert l'utilisation de méthodes de régionalisation. Les paramètres du modèle MARINE sont estimés à l'aide de deux approches : celle du plus proche voisin et par similarité. Afin de mesurer la similarité entre deux bassins versants, la distance euclidienne est utilisée dans l'espace des caractéristiques physiographiques normalisées par leur intervalle de variation.

L'évaluation des méthodes de régionalisation est faite selon un processus de validation croisé avec une technique de type jack-knife. Les bassins versants du jeu de données sont tour à tour considérés comme non jaugés et les paramètres sont estimés à l'aide des autres bassins considérés comme jaugés. Les 16 bassins d'intérêt représentent un total de 117 événements de crue et seront considérés une fois comme non jaugé (Garambois, 2012).

Les événements sélectionnés pour cette étude sont les réponses hydrologiques les plus fortes enregistrées sur la période 1980-2011 pour les bassins d'intérêt. Les débits de pointe spécifiques sont supérieurs à $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$. Pour certains bassins des crues ont été enregistrées dans les années 80 et 90 avec des champs de pluie calculés à partir de données de pluviomètres interpolés. En effet, cette étude essaie autant que possible d'évaluer les performances prédictives du modèle MARINE et des méthodes de régionalisation sur un jeu de données étendu. Les performances du modèle MARINE en cal/val s'étalent de $(\text{Nash}; L_{\text{NP}}) = (0.2; 0.26)$ à $g(0.86; 0.88)$. Pour l'ensemble des bassins et des crues l'efficacité moyenne $(\text{Nash}; L_{\text{NP}})$ est de $(0.54; 0.56)$ et plus de 60 crue sont simulées avec un $L_{\text{NP}} > 0.7$ i.e. environ 4 événements de crue en moyenne par bassin. Les résultats sont détaillés sur les 117 événements de crue par la suite.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats de simulation en régionalisation sont comparés aux observations et aux simulations avec des jeux de paramètres calibrés. Les résultats de régionalisation, ici pour des événements de crues rapides sur des bassins versants méditerranéens, peuvent dépendre de la sélection des paramètres physiographiques utilisés pour définir des similarités entre bassins versants et transférer les jeux de paramètres calibrés du modèle. Cela dépend en particulier de la disponibilité et de la qualité des descripteurs du sol et du sol rocheux comme exposé ensuite. L'extrapolation de ces résultats à d'autres régions du monde n'est pas forcément garantie. De plus la présente étude ne considère pas la densité du réseau de drainage, ou encore des descripteurs météorologiques et climatiques.

III.1. Combien de bassins donneurs doivent être considérés pour la régionalisation ?

Afin d'explorer ce problème, les méthodes de régionalisation sont testées avec un nombre de bassins donneur variant de 1 à 11. Parmi les descripteurs physiographiques disponibles (cf. Table 1) le choix est fait de présenter les résultats de régionalisation pour les descripteurs du sol, du socle rocheux et de la topographie. L'utilisation d'autres descripteurs résulte en des performances plus faibles en régionalisation.

La Figure 3 montre que pour la plupart des méthodes de régionalisation basées sur les similarités physiographiques, les meilleures performances sont obtenues pour un faible nombre de bassins donneurs compris entre 2 et 4. Ce nombre peut dépendre des descripteurs utilisés pour mesurer la similarité et sur l'information qu'ils contiennent à propos des processus hydrologiques. L'utilisation d'un seul bassin donneur ou d'un nombre supérieur à 4 tend à détériorer les performances en régionalisation. Augmenter le nombre de bassins donneurs revient en fait à sélectionner les jeux de paramètres de bassins dont le comportement hydrologique est de plus en plus éloigné de celui du bassin non jaugé d'intérêt. Pour un nombre de bassins donneurs élevé l'efficacité en régionalisation tend à augmenter de nouveau, les erreurs importantes sur les pics de crues peuvent être réduites lorsque le comportement hydrologique est moyenné sur un nombre important de donneurs. Ces tendances seraient-elles vraies sur un jeu de données encore plus grand ? Cette question reste ouverte mais pour toutes les combinaisons de descripteurs testées, les performances sont obtenues de 2 à 4 bassins donneurs.

III.2. Comment sélectionner l'information hydrologique pour régionaliser ?

Sélectionner des bassins donneurs pour transférer des informations hydrologiques vers le bassin non jaugé d'intérêt reste une question ouverte dans le contexte de la régionalisation de prévisions hydrologiques. En effet, en fonction de la combinaison de descripteurs choisis et même de la méthode de régionalisation, différentes combinaisons de bassins donneurs peuvent être obtenues sur un même jeu de données. Les méthodes de proximité géographiques et de similarité physiographique basées sur l'épaisseur et la conductivité hydraulique moyennes du sol ($H_{\text{soil}_{\text{mean}}}$ et K_{sat}) produisent les performances moyennes les plus faibles (Figure 3), alors que certaines combinaisons de descripteurs contenant l'indice de socle rocheux primaire (PrimG) semble le plus pertinent pour sélectionner des bassins donneurs. Augmenter le nombre de descripteurs de 2 à 3 améliore sensiblement les performances, cependant l'ajout d'un quatrième descripteur du sol, du socle ou de la topographie n'apparaît pas utile car il contient probablement des informations hydrologiques redondantes. Dans la suite les résultats de régionalisation obtenus avec deux combinaisons de descripteurs impliquant une caractéristique du socle rocheux (PrimG) seront discutés.

III.3. Performances par bassin

La Figure 4 met en avant des cas où les performances des méthodes de régionalisation sont largement inférieures à celles de calibration/validation (Réart, Hérault, Ardèche, Réal Martin). Pour ces bassins versants ce peuvent être les descripteurs utilisés pour la régionalisation ou même les bassins versants du jeu de donnée qui ne contiennent pas assez d'informations hydrologiques pertinentes pour contraindre le modèle MARINE et reproduire des comportements particuliers. Pour les 12 autres bassins versants l'efficacité en régionalisation est proche de celle obtenue en cal/val (par exemple : Verdouble, Gardon, Beaume) ce qui est un résultat très encourageant étant données les difficultés rencontrées dans la collecte de données et la prévision des crues éclair.

Les résultats de cal/val seraient sensés représenter la borne supérieure des performances de régionalisation. Cependant il est intéressant de remarquer que dans certains cas, la régionalisation dépasse légèrement les performances de cal/val : le Verdouble, l'Agly, le Gardons et la Cesse. Cela remet en question « l'optimalité » du point de fonctionnement (un

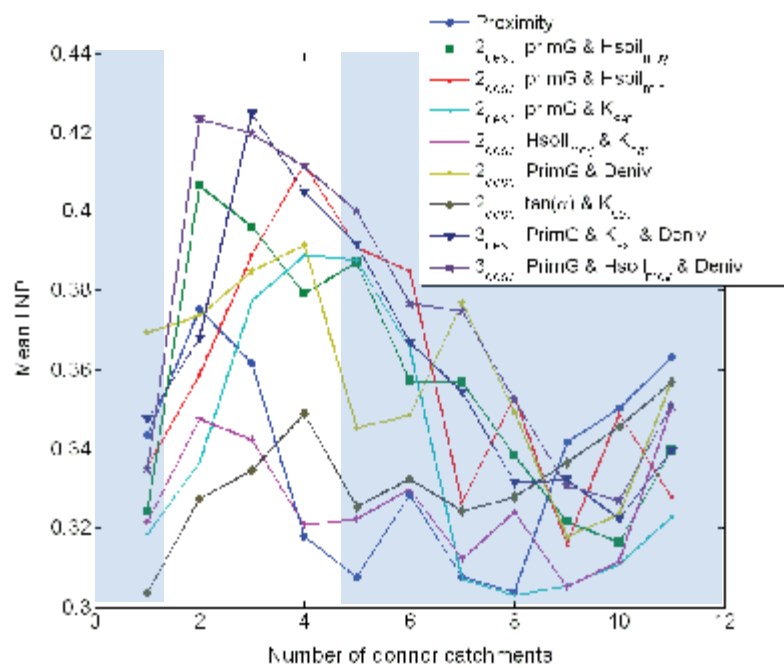


Figure 3 : Impact du nombre de bassins donneurs pour l'efficacité moyenne de chaque schéma de régionalisation, i.e sur les 117 crues du jeu de données (8 methods×117 events×12 number of donors = 11232 simulations).

jeu ou vecteur de paramètres) déterminé dans l'espace des paramètres lors du processus de calibration. Dans le cas du Gardons, les performances en cal/val et en régionalisation sont aux alentours de 0.7, plus élevées que pour le Verdouable, l'Agly et la Cesse. Dans le cas de l'Agly et du Verdouable, le manque d'informations hydrologiques pertinentes dans le jeu de bassins donneurs peut être mis en avant. Dans le cas du Gardons, les bassins donneurs fournissent une combinaison d'information hydrologique plus pertinente que celle contenue dans les événements de calibration.

III.4. Quelle information hydrologique est la mieux transférée ?

Afin d'examiner si il existe des motifs spatiaux pour les performances des méthodes de régionalisation, les meilleurs

résultats obtenus en régionalisation sont représentés sur la Figure 5 avec la composition du socle rocheux prise en compte dans les schémas de régionalisation par similarité (Reg2 and Reg3). Pour le jeu de données et le modèle à base physique utilisés dans cette étude, les approches par similarité produisent de meilleures performances que celles seulement basées sur la proximité géographique. De plus il ne semble pas exister de répartition spatiale privilégiée des bassins versants donneurs pour les trois méthodes de régionalisation testées.

Comme décrit précédemment le paramètre multiplicatif C_z de l'épaisseur de sol spatialisée, détermine la capacité de stockage modélisée pour un bassin versant et a une grande influence sur les débits de pointe simulés (cf. Roux et al 2011, Garambois 2012, 2014a). Les valeurs obtenues pour ce paramètre à l'aide des méthodes de régionalisation sont proches de celles obtenues par calibration classique. Lorsque

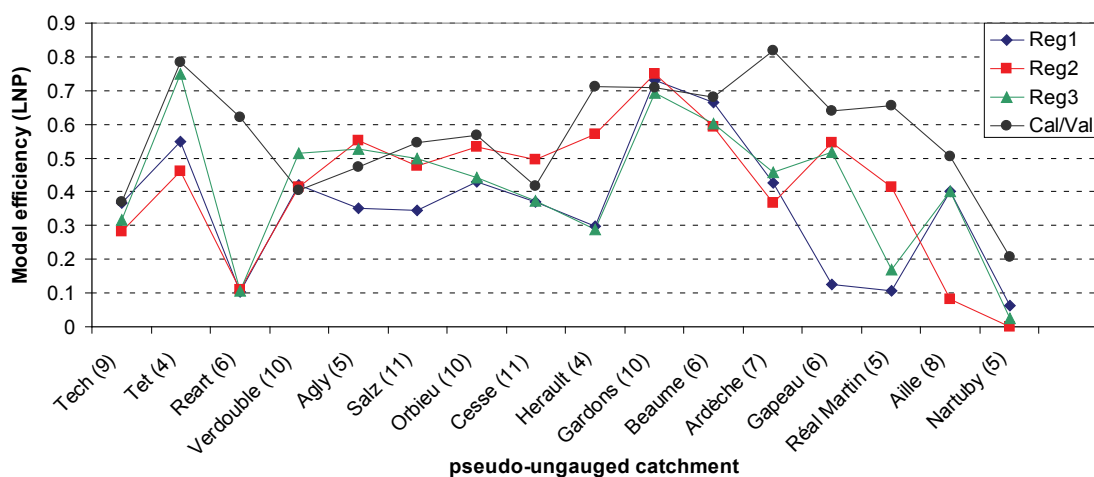


Figure 4 : Efficacité en termes de LNP sur les bassins versants considérés comme non-jaugeés pour trois schémas de régionalisation : proximité géographique (2 donneurs) [Reg1], PrimG-Ksat-Deniv (3 donors) [Reg2] et PrimG-Hsoilmean-Deniv (2 donors) [Reg3]. Nombre de crues rapides considérées entre parenthèse.

les valeurs de C_z obtenues en régionalisation sont trop différentes de celles calibrées de manière classique les performances en régionalisation sont généralement inférieures à celles obtenues en cal/val, par exemple le Réart ou l'Ar-dèche. Remarquons de plus que les paramètres avec des C_z similaires échangent volontiers leurs jeux de paramètres (Figure 5). De manière intéressante le descripteur du socle rocheux PrimG, non pris en compte dans le modèle et la calibration, se révèle lors de la régionalisation être un indicateur puissant pour contraindre le modèle MARINE et plus particulièrement le paramètre C_z . Il est possible de supposer que les caractéristiques du socle rocheux influencent de manière significative le bilan d'eau lors d'une crue même rapide comme détaillé dans Garambois et al., 2013a.

IV. CONCLUSIONS

Ce travail s'intéresse à la régionalisation du modèle à base physique MARINE dans le cas d'un jeu de données de 117 crues rapides de l'arc méditerranéen français. L'utilisation de 2 à 4 bassins donneurs de leurs paramétrisations engendre les meilleures performances en régionalisation et les combinaisons de descripteurs contenant des informations sur le socle rocheux sont les plus pertinentes. Les approches par similarité physiographique produisent de meilleurs résultats que celle utilisant la proximité géographique sur ce jeu de données.

Des résultats encourageants sont obtenus avec deux approches par similarités physiographiques. Les performances moyennes sur tout le jeu de données décroissent légèrement de la cal/val avec $L_{NP} = 0.59$ à la régionalisation avec $L_{NP} = 0.47$ and 0.45 pour ces deux méthodes.

L'examen par bassin versant des performances en régionalisation met en avant le besoin de bons bassins donneurs, i.e. avec des comportements similaires. Il faut donc qu'ils existent au sein du jeu de données et que les combinaisons de descripteurs utilisées permettent de les sélectionner. De manière intéressante pour certains bassins, les performances

en régionalisation sont supérieures à celles de cal/val. Dans ces cas cela suggère que des informations hydrologiques plus pertinentes sont transférables en régionalisation depuis les bassins donneurs vers le bassin d'intérêt que lors de la calibration sur site.

Les performances événementielles en régionalisation sont également encourageantes mais non présentées ici. Pour 13 bassins sur 16, il existe au moins une crue simulée avec un L_{NP} supérieur à 0,6 et parfois 0,8 en régionalisation. Différents types de comportements hydrologiques moyens peuvent être simulés au travers du processus de régionalisation. Le comportement d'un bassin versant peut cependant changer d'une crue à l'autre, c'est pourquoi la régionalisation d'un jeu de paramètres unique par bassin semble mieux fonctionner sur des bassins versants avec un comportement hydrologique apparemment plus régulier.

La percolation dans le socle rocheux doit jouer un rôle significatif sur le bilan en eau même aux échelles de temps de quelques heures à quelques dizaines d'heures des écoulements en jeu lors de crues rapides. Un coefficient C_z supérieur à un est trouvé pour des bassins dont le socle est composé essentiellement de roches métamorphique ou plutoniques ce qui est en accord avec les résultats de Vannier et al. (2013). Probablement à cause de sa sensibilité élevée, le paramètre C_z est relativement bien contraint par deux schémas de régionalisation. L'unicité des bassins peut être prise en compte de manière satisfaisante avec l'usage de descripteur de la topographie, du type de sol et de socle rocheux. Cette étude montre les capacités prédictives d'un modèle hydrologique à base physique contraint par un descripteur de socle rocheux dans le cas de crues éclair en région méditerranéenne.

V. REFERENCES

- BORGA M., GAUME E., CREUTIN J.D., MARCHI L. (2008) — Surveying flash floods: gauging the ungauged extremes. *Hydrological Processes*. **22** 3883-3885

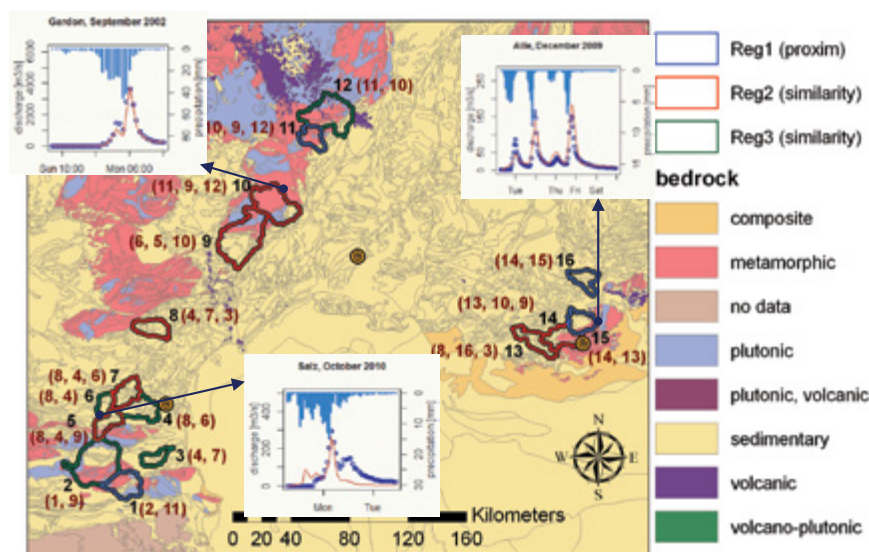


Figure 5 : Bassins non jaugeés numérotés en noir avec le schéma de régionalisation produisant les meilleures performances (frontière du bassin en bleu, rouge ou vert selon méthode) et les bassins donneurs (numéros marrons). Composition simplifiée du socle rocheux en fond de carte. Hydrogrammes simulés avec des jeux de paramètres régionalisés (points bleus = observations, ligne rouge = débit simulé).

- GARAMBOIS P.A. (2012) — *Etude régionale des crues éclair de l'arc méditerranéen français. Elaborations de méthodologies de transfert à des bassins versants non jaugés (phD thesis)*
- GARAMBOIS P.A., LARNIER K., ROUX H., LABAT D., DARTUS D. (2014) — Analysis of flash flood-triggering rainfall for a process-oriented hydrological model. *Atmospheric research*. **137** 14-24
- GARAMBOIS P.A., LARNIER K., ROUX H., LABAT D., DARTUS D. (2014) — Characterisation of catchment behaviour and rainfall selection for the regionalisation of flash flood hydrological models: catchments of the eastern Pyrenees. *Hydrological Sciences Journal (accepted)*
- GARAMBOIS P.A., ROUX H., LARNIER K., CASTAINGS W., DARTUS D. (2013) — Characterization of process oriented hydrologic model behaviour with temporal sensitivity analysis for flash floods in Mediterranean catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*. **17** 2305-2322
- GAUME E., BAIN V., BERNARDARA P., NEWINGER O., BARBUC M., BATEMAN A., BLASKOVICOVÁ L., BLÖSCHL G., BORGIA M., DUMITRESCU A., DALIAKOPOULOS I., GARCIA J., IRIMESCU A., KOHNOVA S., KOUTROULIS A., MARCHI L., MATREATA S., MEDINA V., PRECISO E., SEMPERE-TORRES D., STANCALIE G., SZOLGAY J., TSANIS I., VELASCO D., VIGLIONE A. (2009) — A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology*. **367** 70-78
- HABETS F., BOONE A., CHAMPEAUX J.L., ETCHEVERS P., FRANCHISTEGUY L., LEBLOIS E., LEDOUX E., LE MOIGNE P., MARTIN E., MOREL S., NOILHAN J., QUINTANA SEGUI P., ROUSSET-REGIMBEAU F., VIENNOT P. (2008) — The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *J. Geophys. Res.* **113**
- MANUS C., ANQUETIN S., BRAUD I., VANDERVAERE J.-P., CREUTIN J.-D., VIALLET P., GAUME E. (2009) — A modeling approach to assess the hydrological response of small mediterranean catchments to the variability of soil characteristics in a context of extreme events. *Hydrol. Earth Syst. Sci. JI. HESS* **13** 79-97
- ODIN L., ANDREASSIAN V., PERRIN C., MICHEL C., LE MOINE N. (2008) — Spatial proximity, physical similarity, regression and ungaged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resour. Res.* **44** W03413
- PILON P. (2004) — *Guidelines for Reducing Flood Losses. United Nations*. 79 p
- RAWLS W.J., BRAKENSIEK D.L. (1985) — Prediction of soil water properties for hydrologic modelling. Watershed management in the eighties: proceedings of the American. *Society of Civil Engineers symposium, Denver, april 30-May 1 1985. ASCE, New York*. 293-299
- ROBBEZ-MASSON J.-M., MAZZONI C., VALLEJO S., ERNESTY D., FALLOU P. (2002) — A regional multimedia soil and landscape database on the web in order to help use and teaching of soil data. *Presented at the 17th World congress of Soil Science*
- 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 catchment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. JI. NHESS* **161** 2567 -2582
- VANNIER O., BRAUD I., ANQUETIN S. (2013) — Regional estimation of catchment-scale soil properties by means of streamflow recession analysis for use in distributed hydrological models. *Hydrological Processes*

VI. ANNEXES

Table 1 : Descripteurs physiographiques des bassins versants H_{soil} est l'épaisseur de sol et $_{std}$ signifie écart type.

Catchment	N°	Area (km²)	Height difference (m) (Deniv)	Median altitude (m) (Alt _{q50})	Sedimentary (% area) (Sedi)	Plutonic (% area) (Plut)	Metamorphic (% area) (Meta)	Primary Geology (% area), (PrimG)	$H_{soil-min}$ (m)	$H_{soil-max}$ (m)	$H_{soil-mean}$ (m)	$H_{soil-std}$ (m)	Soil volume (m³) (V_{soil})	Saturated hydraulic conductivity (mm.h ⁻¹) (K_{sat})
Tech (Pas du Loup)	1	250	2730	1464	27	32	41	73	0	0.69	0.16	0.13	5.33E+07	2.5
Têt (Marquixane)	2	776	2540	1573	38	27	36	63	0	0.64	0.19	0.15	1.50E+08	2.8
Réart (Saleilles)	3	145	780	398	98	0	0	0	0.06	0.74	0.41	0.25	5.76E+07	1.4
Verdouble (Tautavel)	4	299	915	526	100	0	0	0	0.08	0.63	0.33	0.16	1.03E+08	2.4
Agly (St Paul de F.)	5	216	1640	1031	81	4	15	19	0	0.5	0.25	0.11	5.31E+07	1.6
Salz (Cassaignes)	6	144	995	994	100	0	0	0	0	0.74	0.31	0.19	4.19E+07	3.9
Orbieu (Lagrasse)	7	263	840	521	100	0	0	0	0	0.74	0.38	0.16	9.93E+07	3.8
Cesse (Bize Minervois)	8	231	970	533	99	0	1	1	0.05	0.69	0.28	0.15	6.62E+07	2
Hérault (Ganges)	9	786	1495	850	61	12	26	38	0	0.79	0.23	0.12	1.55E+08	4.7
Gardon (Anduze)	10	543	1065	665	21	16	63	79	0.08	0.64	0.28	0.12	1.54E+08	5
Beaume (Rosières)	11	212	1360	817	14	13	73	86	0.05	0.49	0.25	0.07	5.15E+07	8.7
Ardèche (Vogüé)	12	619	1380	837	22	23	47	70	0.05	0.5	0.28	0.08	1.72E+08	8.7
Gapeau (Hyères)	13	535	980	495	73	0	27	27	0	10.8	0	90.4	1.76E+09	1.5
Réal Martin (La Crau)	14	283	740	398	52	0	48	48	0	19.2	0	137.2	8.42E+08	5.3
Aille (Vidauban)	15	227	728	394	68	0	29	29	0	11.6	1.2	134	6.80E+08	10.1
Nartuby (Trans en Pce)	16	196	1060	638	100	0	0	0	0	0	0	71.6	4.88E+08	1.4