

Sujet de thèse : Estimation de l'aléa hydrologique à échelle spatiale fine par désagrégation spatiale de la méthode SHYREG.

Contrat : Contrat de thèse de 3 ans débutant au 1^{er} trimestre 2019, salaire mensuel brut: 1874 € (janvier 2018).

Encadrement :

La direction de thèse sera assurée par Patrick ARNAUD, Ingénieur de Recherche et HDR de l'équipe RHAX (Risques Hydrométéorologiques) de l'UR RECOVER (Irstea d'Aix-en-Provence). L'étudiant sera inscrit dans l'Ecole Doctorale 251 – Sciences de l'Environnement.

L'équipe d'accueil sera l'équipe RHAX (Risques Hydrométéorologiques) de l'UR RECOVER (Irstea d'Aix-en-Provence).

RESUME

La détermination régionale de l'aléa hydrologique est particulièrement délicate du fait de la disproportion qui existe entre son observation et sa variabilité tant fréquentielle que spatiale. Cette disproportion est d'autant plus forte que l'on s'intéresse aux événements extrêmes et aux petits bassins versants voire aux versants. A titre d'exemple, 3% des bassins jaugés ont une superficie de moins de 10 km² alors qu'ils représentent 40% des bassins non jaugés. Il faut alors s'appuyer sur une modélisation qui permette d'assimiler un maximum d'observations pour proposer une extrapolation fréquentielle et spatiale du phénomène. C'est le principe des méthodes d'estimation de l'aléa basées sur la simulation des processus, dont fait partie la méthode SHYREG, qui assimilent l'information spatiale et temporelle des pluies, ainsi que celle des débits à travers une modélisation de la relation pluie-débit. C'est pourquoi, pour répondre à la problématique de la détermination de l'aléa hydrologique lié aux crues à des échelles fines (versants, têtes de bassins ou en milieu urbain), on veut étudier la question de la désagrégation spatiale de l'information modélisée par la méthode SHYREG. L'objectif de la thèse est donc de proposer une « descente d'échelle » spatiale de la méthode SHYREG qui fournisse une information pertinente et quantitative sur l'aléa hydrologique à échelle fine sur un grand territoire, en cohérence avec l'observation faite sur les plus grands bassins. Ce travail portera essentiellement sur trois axes :

- ⇒ *La recherche de nouvelles observations exploitables (quantitatives mais aussi qualitatives) pour étudier la variabilité des écoulements. L'objectif est d'avoir des indicateurs supplémentaires qui permettent de contraindre l'optimisation de façon locale ou régionale. Ces informations doivent aussi permettre la validation à petites échelles des hypothèses de modélisation proposées, en particulier en jouant sur les échantillonnages des bassins de calage et de validation.*
- ⇒ *La recherche de relations significatives entre les paramètres de la méthode et les caractéristiques physiographiques des bassins. C'est un point important pour espérer créer une variabilité des paramètres qui ait du sens « physique ». Ce point sera abordé par le calage de la méthode sur des bassins homogènes et de tailles réduites, ainsi que par la recherche d'un paramétrage à priori pertinent de certains paramètres fixés et de certaines zones. Une typologie des classes*

d'occupation du sol en lien avec leur influence sur les écoulements sera recherchée de façon la plus objective possible par des méthodes de classification.

- ⇒ *La réalisation d'un calage régional de la méthode permettra d'optimiser la désagrégation spatiale en l'incluant dans la phase de calage de la méthode. Le choix de l'optimisation sera guidé par l'objectif de « descente d'échelle », avec des critères basés sur la cohérence « amont-aval » des débits modélisés. La prise en compte des incertitudes sur les données de calage sera aussi étudiée pour intégrer des données plus ou moins « certaines ».*

ABSTRACT

Regional estimation of hydrological hazard is particularly delicate because of the disproportion between its observation and its frequency and spatial variability. This disproportion is all the stronger for extreme events and small watersheds. For example, 3% of the gauged basins have an area of less than 10 km² whereas they represent 40% of the ungauged basins. It is then necessary to use approaches which make it possible to assimilate a maximum of observations to propose a frequential and spatial extrapolation of the phenomenon.

It is the principle of flood hazard estimation methods based on the simulation of the processes, as SHYREG method, which assimilates the spatial and temporal information of the rainfall, as well as that of the flows through a modelling of the rainfall-runoff relationship. In order to answer the problem of determining hydrological hazard at fine scales (small basins or in urban areas), we want to study a spatial disaggregation of the information modelled by the SHYREG method. The objective of the thesis is therefore to propose a spatial downscaling of the SHYREG method which provides relevant and quantitative information on the hydrological scale at a fine scale over a large territory, consistent with the observation made on the largest basins. This work will focus on three main aims:

- ⇒ *The search for new observations to study the variability of the flows. The objective is to have additional indicators that make it possible to constrain the local or regional calibration. This information should also enable the small-scale validation of the proposed modelling assumptions.*
- ⇒ *The search for a stronger relationship between the parameters of the method and the physiographic characteristics of the basins. This is an important point to hope to create a "physical" sense of parameter variability. This point may be made by the calibration of the method on homogeneous basins of reduced size and the search for a priori relevant parameter of some specific zones (urban and peri-urban environment ...) and for some fixed parameters.*
- ⇒ *The development of a regional calibration of the method will make it possible to optimize the spatial disaggregation by including it in the calibration phase of the method. The choice of calibration will be guided by the objective of downscaling, with criteria based on the "upstream-downstream" consistency of the modelled flows. Uncertainties on calibration data will also be taken into account to improve calibration procedures.*

CONTEXTE

La détermination de l'aléa hydrologique est un pré-requis indispensable pour la prévention des inondations car elle conditionne la pertinence des résultats des études qui en découlent : mise en perspective de l'occurrence des événements présents et futurs, les procédures CATNAT, le dimensionnement d'ouvrages de protection, la cartographie des zones inondables, l'élaboration de PPRI, la mise en place de plans de prévention, etc.

La connaissance de cet aléa sur la totalité du territoire nécessite de mettre en place des méthodes régionales permettant son estimation en tout point, y compris en zones non jaugées. C'est dans ce contexte qu'Irstea a développé depuis de nombreuses années, une méthode originale et pertinente d'estimation quantitative de l'aléa hydrométéorologique liés aux crues, à travers la méthode SHYREG. Développée sur l'ensemble du territoire français, cette méthode propose une extrapolation vers les valeurs extrêmes, validée dans le cadre du projet ANR Extraflo (2009-2013) (Carreau, Neppel et al. 2013, Kochanek, Renard et al. 2014, Arnaud, Cantet et al. 2016). Cette estimation est calculée sur des sites non-jaugés suite à une régionalisation de la méthode, récemment améliorée dans le cadre de la thèse de Jean Odry (2014-2017) (Odry and Arnaud 2017). Mise en œuvre à grande échelle, la méthode SHYREG a conduit à l'élaboration d'une base de données nationale de quantiles de crues le long du réseau hydrographique, avec leurs intervalles de confiance. La mise à disposition de ces données a été ouverte aux services de l'état et à certains bureaux d'études via une interface web gérée par Irstea (<http://shyreg.irstea.fr>). Bien que cette mise en œuvre soit faite à une résolution de 1 km², la validité de la méthode est affichée pour une gamme de bassins versants de surfaces supérieures à 10 km². En dessous de cette superficie la variabilité spatiale de la relation pluie-débit est pratiquement inconnue à l'échelle du territoire national.

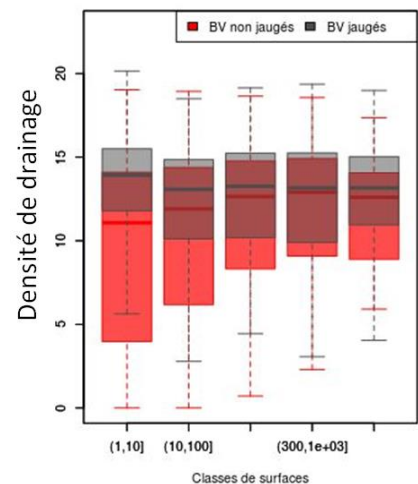
Ces données ont aussi été utilisées dans le cadre de la Directive Inondation (2011-2016), pour la cartographie du risque inondation. A ce moment là, des réflexions ont été menées pour définir les phénomènes hydrologiques associés aux inondations. Une distinction a alors été faite entre l'« inondation par ruissellement » par opposition à l'« inondation par débordement de cours d'eau ». Il est cependant difficile d'établir une frontière entre les phénomènes de ruissellement, de crues soudaines (même sur talwegs secs) ou d'inondation liées aux débordements de cours d'eau, tout phénomène rapide d'inondation étant produit généralement par du ruissellement de surface sur les versants qui s'accumule à différentes échelles (de l'hectare à quelques dizaines voire centaines de km²). Du point de vue de l'hydrologue, la question de la distinction entre le « ruissellement » et le « débordement de cours d'eau » n'est en fait qu'un problème d'échelle...

En effet, pour les hydrologues, le ruissellement en période de crue correspond généralement à la partie de la pluie qui, arrivant au sol, ne va pas s'infiltrer et va circuler rapidement en surface, suivant un chemin préférentiel associé à la topographie, pour former la crue. Même si le phénomène physique est plus complexe (une partie de l'eau s'infiltrant dans le sol peut être remobilisée rapidement en surface pour contribuer au ruissellement et inversement une partie de l'eau ruisselante peut être reprise en aval par des processus d'infiltration), c'est exactement ce que tente de faire les modèles hydrologiques pour reproduire les crues.

Si à l'extrême, un modèle global modélise une production moyenne à l'échelle d'un bassin, un modèle distribué va réduire la maille de calcul sur laquelle est modélisée la production. Cette maille est kilométrique pour l'instant dans la méthode SHYREG (Arnaud and Lavabre 2002, Arnaud and Lavabre 2010, Arnaud, Cantet et al. 2016).

Toute la difficulté que pose la modélisation distribuée réside dans la validation de la variabilité spatiale des paramètres que l'on impose, et donc des phénomènes sous-jacents que l'on veut modéliser (ruissellement, infiltration, évaporation...). En effet, l'information hydrologique qui serait nécessaire pour caler un modèle distribué n'existe pas à l'échelle de la maille de calcul (ou sur de très rares bassins versants de recherche). Certaines méthodes de régionalisation permettent de créer une variabilité spatiale des paramètres à partir de relations trouvées ou imposées entre des variables environnementales (topographie, occupation des sols, nature des sols, ...) et les paramètres des modèles, soit après leur calage (approche la plus courante), soit pendant leur calage (Fernandez, Vogel et al. 2000, Parajka, Blöschl et al. 2007, Samaniego, Kumar et al. 2010).

Notons aussi que les caractéristiques des bassins servants jaugés, servant au calage des méthodes, ne couvrent pas la même gamme de variabilité que celle qui existe pour les bassins non jaugés. Il pourrait alors y avoir une sous-représentation ou une surreprésentation de certaines configurations dans l'échantillon des bassins observés qui pourrait rendre la régionalisation difficile, voire biaisée. Par exemple, pour la gamme des petites surfaces, la densité de drainage moyenne des bassins versants jaugés est largement supérieure à celles des bassins versants « non jaugés » (graphique ci-contre). Ce point peut s'expliquer par le fait que les petits bassins jaugés sont généralement associés à des cours d'eau pérennes, présents sur le réseau de drainage Carthage qui est à l'origine du calcul du paramètre de densité de drainage. Il existe cependant de nombreux petits cours d'eau non pérennes pour lesquels le paramètre de densité de drainage est nul ou très faible et qui conduisent à minimiser leur « potentiel » de drainage. Lors de la régionalisation des modèles hydrologiques, ce genre de biais conduit forcément à appliquer les modèles dans un domaine autre que leur domaine de mise en œuvre, pouvant alors conduire à des biais ou incertitudes très fortes. Le passage à des échelles fines est alors confronté à un problème d'extrapolation dans un domaine d'application hors du domaine de calage.



Une approche hydrologique distribuée doit donc à minima garantir que la modélisation réalisée sur l'ensemble des pixels contenus dans un bassin versant jaugé soit cohérente avec l'observation intégratrice des débits à l'exutoire. Cela veut dire qu'à partir de l'information sur la pluie, les débits générés sur les pixels puis leur agrégation jusqu'aux exutoires jaugés permettent de retrouver les écoulements observés. Mais cela est-il suffisant pour garantir que la variabilité du fonctionnement modélisé aux pixels est pertinente ?

- « Oui de façon moyenne sur les pixels du bassin » : les pixels de deux bassins ayant des comportements hydrologiques différents sont en moyenne représentatifs du fonctionnement de ces deux bassins.
- « Et non de façon précise » : on ne sait pas comment les débits varient réellement entre deux pixels car cette information n'existe pas !... L'exemple donné par des observations sur de très petits bassins versants voisins de l'ordre du kilomètre carré, montre des variations d'écoulement de 1 à 5 inexpliquées par des caractéristiques géomorphologiques classiques.

ENJEUX

L'estimation de l'aléa hydrologique sur des échelles fines ne peut donc pas à priori s'appuyer sur l'unique observation des débits. La variabilité de ceux-ci est trop grande par rapport à leur observation. Les méthodes distribuées utilisant l'information de pluie permettent déjà d'expliquer une certaine variabilité des écoulements grâce à l'information distribuée sur la pluie à l'origine des crues. Dans l'approche développée par l'équipe, la détermination de l'aléa hydrologique est réalisée en combinant une information pixélisée de la pluie (dont la variabilité spatiale est bien connue), une information pixélisée de la production des versants (dont la variabilité est liée à la méthode de régionalisation) et une règle unique d'agrégation des débits générés sur les pixels du bassin versant (règle paramétrée par la surface du bassin). Cette approche est validée sur près de 2000 bassins versants sur lesquels la méthode est calée pour respecter l'observation. On possède là un outil très intéressant pour modéliser la variabilité à échelle plus fine de l'aléa hydrologique, sur lequel on veut appliquer une « descente d'échelle » par désagrégation spatiale de l'information fournie par la méthode, en particulier la désagrégation spatiale de la paramétrisation hydrologique.

L'enjeu d'un tel travail de recherche est à la fois scientifique et opérationnel.

- Enjeu scientifique car il pose la question de la modélisation hydrologique à fine échelle et la question de la transposabilité des méthodes en sites non jaugés. Les résultats attendus sur ces aspects pourront bénéficier aux travaux de l'équipe sur la régionalisation des approches distribuées qu'elle développe (Odry and Arnaud 2017, Organde, Javelle et al. 2018). Le défi de ce travail est d'extraire de l'information disponible, la meilleure estimation de la variabilité spatiale des écoulements à l'intérieur d'un bassin versant. Ce travail va au delà de la régionalisation de l'approche SHYREG puisqu'il projette d'améliorer la connaissance de la variabilité hydrologique intra-bassin en étudiant des groupes de bassins emboîtés. Ce travail devrait aussi améliorer la régionalisation des modèles en dehors des bassins jaugés. Un travail spécifique sur la prise en compte de nouvelles données et sur la prise en compte des incertitudes associées sera aussi nécessaire. La difficulté de validation des méthodes de désagrégation proposées peut faire reporter le problème de la validation sur celui des incertitudes et sur le meilleur moyen pour les réduire.

- Enjeu opérationnel car l'ensemble des améliorations obtenues dans ce travail de thèse pourra être directement intégré dans la base de données SHYREG, afin d'améliorer la

connaissance à échelle fine de l'aléa hydrologique. Ce point présente un enjeu particulièrement important car la limitation d'utilisation de la méthode SHYREG aux bassins de plus de 10 km² conduit encore les bureaux d'études à utiliser des méthodes obsolètes, très incertaines et très hétérogènes pour les études hydrologiques sur les petits bassins versants (Gillet 2017). La pertinence de la désagrégation spatiale de l'information hydrologique (paramètres du modèle hydrologique) et la bonne connaissance de la pluviométrie devrait alors permettre de donner une information pertinente de l'aléa hydrologique sur certains bassins de moins de 10 km² pour lesquels l'application de la méthode sera jugée pertinente.

COHERENCE AVEC LES OBJECTIFS STRATEGIQUES D'IRSTEA

Irstea affine sa volonté d'être visible dans le domaine des « *risques naturels et environnementaux* ». C'est un des quatre domaines scientifiques stratégiques de l'établissement. Cet objectif stratégique se décline au niveau du département Eaux dans un des trois axes directeurs que le département s'est défini : ADD2 « *Hydrosystèmes et risques naturels* ». Ce travail de thèse entre parfaitement dans les objectifs de l'ADD2 portant sur l'étude des risques naturels que sont les pluies et les crues extrêmes et les questionnements autour du développement d'approches de prédétermination robustes de l'aléa, le développement d'approches basées sur la simulation stochastique ou le questionnement de l'urbain, autant de questions auxquelles ce sujet de la détermination des débits extrêmes à échelles fines tente de répondre.

L'étude des risques naturels aussi un objectif affiché au niveau de l'UR RECOVER qui oriente son projet scientifique sur les risques. Ce projet de thèse est donc cohérent avec les objectifs stratégiques d'Irstea, aux niveaux du département Eaux et de l'UR d'accueil.

La méthode SHYREG fait partie des méthodes reconnues et utilisées par les services de l'état et les bureaux d'études privés en charge de la prévention des risques hydrologiques. L'application de la méthode sur l'ensemble du territoire national a conduit à une base de données (Arnaud, Aubert et al. 2014) dont les résultats sont disponibles via un service web (<http://shyreg.irstea.fr>). Les développements autour de cette approche bénéficient d'un soutien de la DGPR et constituent un bon exemple de recherches en appuie aux politiques publiques menées par Irstea.

ETAT DE L'ART

Les méthodes de prédétermination des crues en milieux non jaugés sont généralement basées sur des approches probabilistes utilisant essentiellement l'information des débits. Dans certains pays, ces méthodes sont préconisées et font l'objet de guides ou recommandations officielles comme en Europe (Castellari, Kohnová et al. 2012), aux États-Unis (USGS 1982, Jennings, Thomas et al. 1993) ou en Australie (Ball, Weinmann et al. 2016). Elles peuvent même être utilisées à une échelle planétaire (Smith, Sampson et al. 2015).

D'autres méthodes font appel à l'information sur la pluie et à une modélisation de pluie en débit. Elles sont plus difficiles à utiliser à très large échelle, parfois par manque d'informations précises sur la pluie alors souvent estimée par l'information satellite (Kidd, Bauer et al. 2012, Chen, Liu et al. 2014), et parfois en raison des difficultés qu'ont les modèles hydrologiques à prédire les extrêmes en contexte non jaugé (Salinas, Laaha et al. 2013).

Elles sont cependant recommandées en France pour l'estimation des valeurs extrêmes de débit (Lang, Arnaud et al. 2014). En effet, l'information sur les pluies extrêmes est plus facilement déterminable et elle peut aider à l'estimation des débits extrêmes. Leur intérêt est aussi lié à la prise en compte de la variabilité spatiale des pluies pour expliquer une partie de la variabilité spatiale des débits. Rouhier et al (2017) montrent par exemple, l'importance de la variabilité spatiale des pluies ainsi que celle des paramètres hydrologiques pour expliquer la variabilité des débits. Dans ce cas il faut avoir une bonne connaissance spatiale de la pluie et pouvoir régionaliser des modèles hydrologiques.

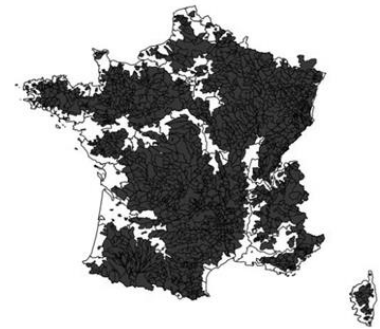
La régionalisation de paramètres hydrologiques est nécessaire dans de nombreux cas (estimation de la ressource, détermination de l'aléa de crue, prévision des débits, ...) où les modèles hydrologiques sont amenés à se prononcer sur des sites ne disposant que de peu de données de débits, voire aucune. Cette problématique a amené une partie des recherches en hydrologie à se concentrer sur le thème de la régionalisation des modèles hydrologiques, pour les rendre applicables sur des bassins non-jaugés. Ces travaux, menés au départ par chaque modélisateur pour son propre modèle, se sont intensifiés et organisés ces dernières années, notamment dans le cadre de la décennie « PUB » - prediction at ungauged basins [2003-2012]- (Sivapalan, Takeuchi et al. 2003). Ceci a permis l'émergence de vraies questions communes liées à différents problèmes comme :

- *Les problèmes d'échelle* : il est difficile de relier des variables et des processus à différentes échelles, notamment dans le cas des modèles distribués (Beven and Binley 1992, Blöschl, Sivapalan et al. 2011)
- *Les problèmes d'équifinalité* : la non-unicité des paramètres des modèles rend parfois nécessaire une identification « sous contrainte » pour pouvoir être régionalisés (Beven and Freer 2001). On inclut alors une information supplémentaire dans l'optimisation des paramètres qui contraind alors leur variabilité par des méthodes dites de « régularisation » (Pokhrel, Gupta et al. 2008). Ces problèmes sont d'autant plus importants lorsque l'on travaille avec des approches distribuées ou semi-distribuées pour lesquelles l'obtention de paramètres optimaux stables semble plus difficile de par une plus grande quantité de combinaisons équivalentes possibles (Lavenne, Thirel et al. 2016).
- *Les problèmes liés aux techniques de régionalisation*, c'est-à-dire les questions relatives au transfert de l'information obtenue sur des bassins jaugés vers des bassins non-jaugés « similaires » (Blöschl, Sivapalan et al. 2011). Quel type de transfert adopter (Merz and Blöschl 2004, Merz and Blöschl 2005, Oudin, Andréassian et al. 2008) ? Quelles caractéristiques transférer et à partir de quels « descripteurs » (Yadav, Wagener et al. 2007) ? Quels bassins jaugés intégrer dans l'analyse (Burn and Boorman 1993, Oudin, Andréassian et al. 2008) ? ...

Dans cette question de la transposabilité de l'information en sites non jaugés, on peut distinguer deux cas d'applications qu'on pourrait appeler « l'extrapolation » spatiale et « l'interpolation » spatiale. Pour distinguer ces deux cas de figures on pourrait dire que :

- dans le cas de « l'extrapolation », on cherche à estimer des débits sur le long d'un cours d'eau n'ayant aucune information sur les débits. On utilise alors l'information des cours d'eau voisins pour faire cette estimation. Dans ce cas, il peut y avoir une totale indépendance des débits entre les bassins jaugés et non jaugés (ce que l'on ne souhaite pas évidemment).
- dans le cas de « l'interpolation » spatiale, on cherche à estimer les débits à l'intérieur de bassins versants jaugés, où à l'aval. Dans ce cas on a une information partielle sur les débits à estimer car il est à une dépendance entre les débits connus et les débits à estimer à l'amont ou à l'aval du même cours d'eau. Cette dépendance peut être prise en compte dans les méthodes d'interpolation comme le « *top-kriging* » par exemple (Sauquet, Gottschalk et al. 2000, Skøien, Merz et al. 2005) mais aussi lors du calage des paramètres par des méthodes de calage régional (Odry 2017, Odry and Arnaud 2017).

Dans le cas de territoires fortement couverts par de l'information hydrométrique (c'est le cas de la France, comme le montre la carte ci-contre présentant la couverture spatiale des bassins versants jaugés de moins de 10 000 km² en France), l'estimation des débits en sites non jaugés relève le plus souvent d'une interpolation de l'information hydrométrique à l'intérieur de bassins jaugés, car la taille médiane des bassins jaugés (médiane à 186 km²) est bien plus grande que celle des bassins non jaugés (médiane à 14 km²).



L'estimation de l'aléa hydrologique en site non jaugé et en particulier pour les petits bassins versants relève donc d'une problématique que l'on appellera « de descente d'échelle » (même si ce terme est habituellement utilisé par les modélisateurs du climat) ou de « désagrégation », c'est-à-dire d'estimation d'une information à une échelle inférieure à celle de l'observation.

En hydrologie, cette « descente d'échelle » est confrontée à l'insuffisance des données d'observation sur les petits bassins où l'information est inexistante hormis pour quelques bassins versants (Graff, Meunier et al. 2004). La problématique est donc de produire une variabilité spatiale à partir d'une information à plus grande échelle. On peut commencer à répondre à cette question au niveau du calage des modèles. En effet, déjà dans le cadre d'un groupe de bassins jaugés emboîtés, on peut procéder à un calage par sous-bassins en prenant en compte les dépendances amont-aval (Odry 2017), créant ainsi déjà une variabilité spatiale sur les plus grands bassins.

La régionalisation permet aussi de créer une variabilité en utilisant des variables descriptives exogènes pour expliquer les paramètres des modèles. C'est le cas des différentes méthodes de régionalisation basée sur des régressions, que des similarités physiques et encore les méthodes de calage régional.

La désagrégation spatiale de l'information hydrologique reste une réelle difficulté que l'on tente d'étudier au mieux avec la méthode SHYREG qui garantit une modélisation cohérente avec l'observation hydrométrique, c'est-à-dire en moyenne à l'échelle des bassins versants jaugés. On a

montré que la régionalisation du paramètre hydrologique de la méthode SHYREG peut être réalisée suivant différentes options qui fourniront des résultats généralement proches lors de leur validation sur les bassins jaugés. La difficulté apparaît lors de l'utilisation des cartographies des paramètres obtenus, qui vont conduire à des bases de données parfois très différentes aux échelles spatiales fines (Arnaud 2010).

DESCRIPTIF DES TRAVAUX

Les travaux réalisés au cours de cette thèse auront donc pour objectif d'améliorer la connaissance de l'aléa hydrologique à des échelles fines (de l'ordre du km²) sur un territoire étendu (le territoire national). Pour répondre à cet objectif ambitieux on s'appuiera sur la méthode SHYREG qui présente l'intérêt d'être déjà régionalisée sur le territoire. Le passage à des échelles plus fines se fera par l'étude de la « désagrégation spatiale » des paramètres hydrologiques de l'approche. Les différents points de recherche envisagés sont les suivants.

1. Recherche de données de validation

Afin d'appréhender le fonctionnement hydrologique des bassins à des échelles fines, il est nécessaire de chercher des informations/observations supplémentaires pour valider les différentes hypothèses faites pour la régionalisation. Ces informations supplémentaires permettront aussi de comparer différentes procédures de désagrégation entre elles. Actuellement, la méthode SHYREG se confronte aux données hydrologiques connues à l'échelle des bassins versants de la banque HYDRO (près de 2000 stations sur le territoire métropolitain français). La confrontation à des informations locales moins systématiques doit être recherchée. C'est pourquoi nous allons confronter la méthode à de nouvelles séries de mesures issues de petits bassins versants de recherche (base des réseaux de bassins versants expérimentaux d'Irstea (Draix, Orgeval, Yzeron, Réal Collobrier), OHMCV, ...). Des données supplémentaires peuvent fournir une information exploitable comme celles issues des études hydrologiques locales (Gillet 2017), des données historiques, des cartographies hydrologiques, de signatures hydrologiques (Booker and Woods 2014), etc. L'objectif de cette partie est d'avoir des indicateurs supplémentaires qui permettront de contraindre l'optimisation de façon locale ou plus régionale. Pour cela, des échantillons de bassins de calage/validation pertinents seront étudiés comme par exemple des bassins de calage « grands ou aval » et de validation « petits ou amont », des bassins de calage « homogènes » et de validation « hétérogènes », ... Pour cela une analyse/typologie des bassins doit être réalisée pour déterminer leur degré d'hétérogénéité, d'imbrication avec d'autres bassins, de précision métrologique (notions d'incertitude à prendre en compte lors du calage), leur singularité régionale, etc.

2. Recherche d'une paramétrisation à priori

Les modèles distribués sont particulièrement difficiles à caler de part la multitude de combinaisons possibles dans la répartition spatiale de leurs paramètres. En effet il est quasiment impossible de valider la variabilité spatiale des paramètres, imposée à priori, ce qui conduit à des cartographies de paramètres équivalentes en validation sur les bassins mais pouvant être extrêmement variable à l'échelle du pixel de calcul (Arnaud 2016).

Dans cette partie, on cherchera à déterminer un classement à priori des caractéristiques des bassins au regard des écoulements : production et transfert (amortissement). Cette partie s'appuiera entre autres sur une analyse bibliographique des méthodes de classification et sur l'exploitation des bases de données SIG disponibles (Corine Land Cover, BD Topo, ...). Des approches qualitatives sur le ruissellement telles que la méthode IRIP développée à Irstea-Lyon (Dehotin, Breil et al. 2015, Lagadec, Patrice et al. 2016) seront aussi étudiées pour apprécier leur apport dans la connaissance à priori de la paramétrisation de la méthode et la détermination de zones spécifiques liées aux écoulements. L'idée ici sera de proposer une hiérarchisation des valeurs des paramètres des pixels d'un bassin en fonction des connaissances à priori des processus hydrologiques en lien avec l'occupation/nature des sols. Cela permettra d'assurer une certaine cohérence hydrologique qu'un calage purement mathématique risque d'occulter. Cette connaissance à priori pourra aussi être intégrée dans les approches de calage développées dans la dernière partie (calage probabiliste, calage régional, contrainte pour des méthodes d'assimilation de données).

3. Calage/Régionalisation « orientés »

Dans cette partie, on cherchera à prendre en compte l'objectif de régionalisation plus en amont dans la méthode, c'est-à-dire dès l'étape d'optimisation via des méthodes de « calage-régional ». Ce point permet d'optimiser les paramètres en prenant déjà en compte sa variabilité spatiale lors du calage (Szolgay, Hlavčová et al. 2003, Hundecha and Bárdossy 2004, Pokhrel, Gupta et al. 2008). On peut aussi espérer améliorer l'optimisation des paramètres des bassins emboîtés en travaillant par groupes de bassins emboîtés de façon à limiter la variabilité du paramètre à l'intérieur d'un groupe de bassin. Ce point permet de faire un compromis entre la recherche d'une cohérence spatiale du paramètre et la recherche de sa valeur optimale. On s'appuiera alors sur les résultats obtenus dans la partie précédente pour assurer une certaine cohérence hydrologique aux résultats. Deux étapes seront à réaliser :

- ⇒ **La mise en place du calage régional de la méthode** : dans ce cas, on cherchera à optimiser la désagrégation spatiale en l'incluant dans la phase de calage de la méthode. Le choix de l'optimisation sera guidé par l'objectif de « descente d'échelle », avec par exemple des critères de cohérence « amont-aval » des débits.
- ⇒ **Le choix d'une procédure d'optimisation prenant en compte les incertitudes** : l'objectif ici est de tester de nouvelles procédures d'optimisation mieux adaptées au transfert de l'information à des sites non jaugés (Bárdossy 2007). On testera des procédures de calage « probabiliste » qui prennent en compte la distribution de fréquence des paramètres du

modèle hydrologique (Wu, Liu et al. 2017). On pourra aussi tester les méthodes de calage par des processus de type 4DVAR en l'adaptant à la méthode SHYREG.

On cherchera plusieurs critères de validation pour comparer les différentes modélisations testées. Ces critères d'évaluation seront aussi appliqués à des méthodes plus simples (méthodes statistiques régionales) pour juger de la pertinence de l'approche par simulation. Ces critères d'évaluation s'appliqueront sur des objets variables :

- **Sur les petits bassins versants jaugés** : des critères de restitution des quantiles des débits modélisés sur les petits bassins versants jaugés, utilisés en validation, seront calculés.
- **Sur les grands bassins versant jaugés** : une validation peut aussi être faite à l'échelle des plus grands bassins versants pour juger si la variabilité spatiale produite lors de la régionalisation de la méthode est plus pertinente.
- **Sur les données « incertaines »** : un certain nombre d'informations peuvent être insuffisantes pour estimer des paramètres d'un modèle, mais utilisables pour valider une modélisation. Prise de façon globale à l'échelle d'une région, elles peuvent fournir des informations permettant une étude comparative des essais réalisés.

Ces perspectives d'amélioration permettront qu'augmenter le domaine d'application de la méthode SHYREG avec les intérêts que représente sa nature (approche par simulation des processus hydrologiques) qui sont :

- D'être quantitative : la méthode permet une cartographie de plusieurs aléas, de la pluie aux débits dans le réseau en passant par la production des versants.
- D'être cohérente spatialement avec l'observation : les valeurs proposées sont cohérentes avec les observations hydrologiques. Elles sont fournies par une méthode homogène qui prend en compte le principal facteur créant le ruissellement à savoir les pluies intenses.
- D'être évolutive : la modélisation de la pluie et de la relation pluie-débit permet de prendre en compte des hypothèses de changement climatique et d'occupation du sol dans la méthode (autre demande de la Directive Inondation).

PLANNING

Le planning prévisionnel est le suivant :

- 1^{er} année :
 - Analyse bibliographique sur la problématique de la thèse.
 - Assimilation de la méthode SHYREG : bibliographie des travaux antérieurs, prise en main de la chaine de traitement, premiers calculs.
 - Acquisition de nouvelles données : recueil, traitement, critique, typologie des bassins
 - Etude de la paramétrisation à priori de l'approche, comparaison avec la méthode IRIP, ...
 - Mise à place de la méthodologie : cohérence spatiale, calage « amont-aval », critères d'évaluation,...
 - Rapport d'avancement et 1^{er} comité de pilotage.

- 2^{ème} année :
 - Amélioration de la méthode sur les bassins jaugés : tests de la paramétrisation à priori et des paramètres fixés par type de bassins, appréciation de la cohérence spatiale intra-bassin.
 - Calage régionale de la méthode : mise en œuvre, tests, évaluation en sites non jaugés.
 - Rédaction d'un premier article sur la désagrégation de l'information par les approches distribuées.
 - Rapport d'avancement et 2^{ème} comité de pilotage.
 - Participation à une conférence internationale.
- 3^{ème} année :
 - Finalisation des tests.
 - Rédaction d'un second article sur l'apport du calage régional.
 - Rédaction du manuscrit et soutenance de thèse.

COLLABORATIONS EXTERNES

- **Laboratoires du RBV** : pour la constitution d'un jeu de données sur les petits bassins versants, notre implication dans le réseau RBV permettra l'obtention des séries de mesures hydrométriques des petits bassins du RBV (Strengbach, OHMCV, OMERE, Yzeron, Draix, etc.)
- **CEREMA** : Le CEREMA utilise les données SHYREG dans la mise en place de la méthode Cartino de cartographie à grande échelle des zones inondables (Pons, Bader et al. 2012). Ils ont un regard critique sur les résultats de la méthode de part les nombreuses études et expertises en hydrologie qu'ils réalisent.
- **DGPR** et réseau des services déconcentrés pour les aspects opérationnels et pour leur soutien financier pour les recherches associées à la méthode.
- **Equipes Irstea** : les hydrologues des équipes d'Antony et de Lyon sont familiarisés avec les problématiques de modélisation hydrologique, de régionalisation. Une part importante sera donnée au cours de la thèse à un dialogue avec les hydrologues d'Irstea, par le biais de réunions, participation à des séminaires internes et la participation au comité de suivi de la thèse. En particulier avec l'équipe d'Isabelle Braud qui travaille sur la méthode IRIP et sur la modélisation physique des processus, ainsi que celle de Charles Perrin qui travaille sur les modèles GR et leur régionalisation.

VALORISATION

En plus de la participation à des congrès nationaux et internationaux (SHF, EGU), deux articles sont envisagés dans des journaux scientifiques à comité de lecture : Hydrological Sciences Journal, Journal of Hydrology ou autres...

1. L'un sur la paramétrisation de la méthode qui permettra de garantir une cohérence amont-aval et sur le choix de la paramétrisation *à priori* la plus pertinente.
2. L'autre sur la mise en œuvre du calage régional pour la désagrégation spatiale de la méthode SHYREG.

Les résultats du travail de thèse seront largement valorisés en fournissant une information supplémentaire à la base de données SHYREG mise en ligne pour les services de l'état et les bureaux

d'études, élargissant ainsi son domaine d'utilisation.

ORGANISATION DE LA THESE

Profil du candidat

- Etre titulaire d'un diplôme d'ingénieur et/ou master en Sciences de l'Eau et de l'Environnement.
- Disposer de compétences en hydrologie, statistiques, géostatistiques, analyse de données et modélisation.
- Avoir un bon niveau en programmation (R, Fortran)
- Maîtrise de l'anglais scientifique oral et écrit ;
- Avoir une capacité rédactionnelle ;
- Intérêt pour la recherche appliquée dans un environnement interdisciplinaire.

Modalité de candidature :

Adresser CV et lettre de motivation à Patrick ARNAUD : patrick.arnaud@irstea.fr

Tel : 04 42 66 99 46

Irstea – Centre d'Aix-en-Provence, 3275 Route de Cézanne, CS 40061, 13182 Aix-en-Provence cedex 5

Comité de pilotage prévisionnel

- Roger MOUSSA (DR-HDR à l'INRA Montpellier – Science du Sol) pour la « modélisation et les processus à échelle fines »
- Philippe NAVEAU (MdC-HDR au LSCE-Paris) pour les aspects « statistiques et extrêmes ».
- Gilles DROGUE (MdC-HDR à l'Université de Lorraine) pour les aspects « géographie et régionalisation ».
- Ludovic OUDIN (MdC-HDR à l'UPMC) pour les aspects « modélisation et régionalisation ».
- Benjamin RENARD (CR à Irstea) pour les aspects « statistiques et méthode de calage ».
- Isabelle BRAUD (DR à Irstea) pour les aspects « modélisation des processus »
- Charles PERRIN pour les aspects « modélisation GR et régionalisation »

REFERENCES

Arnaud, P. (2010). "Estimation de l'aléa « ruissellement » par la méthode SHYREG : éléments de réflexions sur la difficulté d'estimation de l'aléa ruissellement." Rapport d'étude Irstea - DGPR: 22 pages.

Arnaud, P. (2016). Désagrégation spatiale de l'information fournie par la méthode SHYREG : mise en évidence de la problématique, Rapport d'étude DGPR/BRIL - 26 pages.

Arnaud, P., Y. Aubert, D. Organde, C. Fouchier and N. Folton (2014). "Estimation de l'aléa hydrométéorologique par une méthode par simulation : la méthode SHYREG – Présentation – Performances – Base de données. ." La Houille Blanche - Revue Internationale de l'Eau: 20-26.

Arnaud, P., P. Cantet and Y. Aubert (2016). "Relevance of an at-site flood frequency analysis method for extreme events based on stochastic simulation of hourly rainfall." Hydrological Sciences Journal **61**(1): 36-49.

Arnaud, P. and J. Lavabre (2002). "Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation." Water Resources Research **38**(6): 1075-1085.

Arnaud, P. and J. Lavabre (2010). Estimation de l'aléa pluvial en France métropolitaine, QUAE, Paris. Update Sciences & Technologies: 158 pages.

Ball, J., E. Weinmann and G. Kuczera (2016). Peak Flow Estimation. Australian Rainfall and Runoff: A Guide to Flood Estimation, Commonwealth of Australia. J. Ball, M. Babister, R. J. Nathan et al. **Book 3**.

Bárdossy, A. (2007). Calibration of Hydrological Model Parameters for Ungauged Catchments.

Beven, K. and A. Binley (1992). "The future of distributed models : model calibration and uncertainty prediction." Hydrological Processes **6**(3): 279-298.

Beven, K. and J. Freer (2001). "Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology." Journal of Hydrology **249**(1-4): 11-29.

Blöschl, G., M. Sivapalan, T. Wagener, A. Viglione and H. Savenije (2011). Runoff prediction in ungauged basins: Synthesis across processes, places and scales.

Booker, D. J. and R. A. Woods (2014). "Comparing and combining physically-based and empirically-based approaches for estimating the hydrology of ungauged catchments." Journal of Hydrology **508**(0): 227-239.

Burn, D. H. and D. B. Boorman (1993). "Estimation of Hydrological Parameters at Ungauged Catchments." Journal of Hydrology **143**(3-4): 429-454.

Carreau, J., L. Neppel, P. Arnaud and P. Cantet (2013). "Extreme rainfall analysis at ungauged sites in the South of France: comparison of three approaches." Journal de la Société Française de Statistique **154**(2): 119-138.

Castellarin, A., S. Kohnová, L. Gaál, A. Fleig, J. L. Salinas, A. Toumazis, T. R. Kjeldsen and N. Macdonald (2012). Review of applied-statistical methods for flood-frequency analysis in Europe: WG2 of COST Action ES0901, European Cooperation in Science and Technology.

Chen, S., H. Liu, Y. You, E. Mullens, J. Hu, Y. Yuan, M. Huang, L. He, Y. Luo, X. Zeng, G. Tang and Y. Hong (2014). "Evaluation of High-Resolution Precipitation Estimates from Satellites during July 2012 Beijing Flood Event Using Dense Rain Gauge Observations." PLOS ONE **9**(4): e89681.

Dehotin, J., P. Breil, I. Braud, A. De Lavenne, M. Lagouy and B. Sarrazin (2015). "Detecting surface runoff location in a small catchment using distributed and simple observation method." Journal of Hydrology **525**: 113-129.

Fernandez, W., R. M. Vogel and A. Sankarasubramanian (2000). "Regional calibration of a watershed model." Hydrological Sciences Journal **45**(5): 689-707.

Gillet, M. (2017). Mise en place d'une méthode d'analyse de la cohérence d'études hydrologiques, Rapport de stage du Master GEOSPHERES, Institut de géographie alpine, Université de Grenoble, 63 pages: 63 pages.

Graff, B., M. Meunier, J. Lavabre and D. Richard (2004). "Analyse directe des crues en vue d'une meilleure compréhension de la réponse hydrologique des petits bassins versants torrentiels." Etudes de Géographie Physique n°XXXII: 27-46.

Hundecha, Y. and A. Bárdossy (2004). "Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model." Journal of Hydrology **292**(1-4): 281-295.

Jennings, M. E., W. O. Thomas and H. C. Riggs (1993). Nationwide Summary of U.S. Geological Survey Regional Regression Equations for Estimating Magnitude and Frequency of Floods for Ungaged Sites. Reston, United States Geological Survey.

Kidd, C., P. Bauer, J. Turk, G. J. Huffman, R. Joyce, K.-L. Hsu and D. Braithwaite (2012). "Intercomparison of High-Resolution Precipitation Products over Northwest Europe." Journal of Hydrometeorology **13**(1): 67-83.

Kochanek, K., B. Renard, P. Arnaud, Y. Aubert, M. Lang, T. Cipriani and E. Sauquet (2014). "A data-based comparison of flood frequency analysis methods used in France." Natural Hazards and Earth System Sciences **14**: 295-308.

Lagadec, L. R., P. Patrice, I. Braud, B. Chazelle, L. Moulin, J. Dehotin, E. Hauchard and P. Breil (2016). "Description and evaluation of a surface runoff susceptibility mapping method." Journal of Hydrology **541**: 495-509.

Lang, M., P. Arnaud, J. Carreau, N. Deaux, L. Dezileau, F. Garavaglia, A. Latapie, L. Neppel, E. Paquet, B. Renard, J.-M. Soubeyroux, B. Terrier, J.-M. Veyssière, Y. Aubert, A. Auffray, F. Borch, P. Bernardara, J.-C. Carre, D. Chambon, T. Cipriani, J.-L. Delgado, H. Doumenc, R. Fantin, S. Jourdain, K. Kochanek, A. Paquier, E. Sauquet and Y. Trambly (2014). "Résultats du projet ExtraFlo (ANR 2009-2013) sur l'estimation des pluies et crues extrêmes." La Houille Blanche - Revue Internationale de l'Eau **2**(2014): 5-13.

Lavenne, A. d., G. Thirel, V. Andréassian, C. Perrin and M. H. Ramos (2016). Spatial variability of the parameters of a semi-distributed hydrological model. 7th International Water Resources Management Conference of ICWRS, Bochum, Germany.

Merz, R. and G. Blöschl (2004). "Regionalisation of catchment model parameters." Journal of Hydrology **287**(1-4): 95-123.

Merz, R. and G. Blöschl (2005). "Flood frequency regionalisation - Spatial proximity vs. catchment attributes." Journal of Hydrology **302**(1-4): 283-306.

Odry, J. (2017). Prédétermination des débits de crues extrêmes en sites non-jaugés - Régionalisation de la méthode par simulation SHYREG, Aix-Marseille-Université.

Odry, J. and P. Arnaud (2017). "Comparison of flood frequency analysis methods for ungauged catchments in France." Geosciences **7**(3): 88.

Organde, D., P. Javelle, J. Demargne, M. Jay-Allemand, J.-A. Fine and P. Arnaud (2018). Méthode AIGA : vers une modélisation hydrologique au pas de temps infra horaire, continue et totalement distribuée. SHF. Avignon, 14-16/11/2018.

Oudin, L., V. Andréassian, C. Perrin, C. Michel and N. Le Moine (2008). "Spatial proximity, physical similarity, regression and ungaged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments." Water Resources Research **44**(3).

Parajka, J., G. Blöschl and R. Merz (2007). "Regional calibration of catchment models: Potential for ungauged catchments." Water Resources Research **43**(6).

Pokhrel, P., H. V. Gupta and T. Wagener (2008). "A spatial regularization approach to parameter estimation for a distributed watershed model." Water Resources Research **44**(12).

Pons, F., B. Bader, P. Chassé, A. Caruso, P. Arnaud and E. Leblois (2012). Cartino Project: A French automated hazard flood map. SIMHYDRO 2012. Sophia-Antipolis - Nice (France).

Rouhier, L., M. Le Lay, F. Garavaglia, N. Le Moine, F. Hendrickx, C. Monteil and P. Ribstein (2017). "Impact of mesoscale spatial variability of climatic inputs and parameters on the hydrological response." Journal of Hydrology **553**: 13-25.

Salinas, J. L., G. Laaha, M. Rogger, J. Parajka, A. Viglione, M. Sivapalan and G. Blöschl (2013). "Comparative assessment of predictions in ungauged basins – Part 2: Flood and low flow studies." Hydrol. Earth Syst. Sci. **17**(7): 2637-2652.

Samaniego, L., R. Kumar and S. Attinger (2010). "Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale." Water Resources Research **46**(W05523): 1-25.

Sauquet, E., L. Gottschalk and E. Leblois (2000). "Mapping average annual runoff: a hierarchical approach applying a stochastic interpolation scheme." Hydrological Sciences Journal **45**(6): 799-815.

Sivapalan, M., K. Takeuchi, S. W. Franks, V. K. Gupta, H. Karambiri, V. Lakshmi, X. Liang, J. J. McDonnell, E. M. Mendiola, P. E. O'Connell, T. Oki, J. W. Pomeroy, D. Schertzer, S. Uhlenbrook and E. Zehe (2003). "IAHS decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences." Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques **48**(6): 857-880.

Skøien, J. O., R. Merz and G. Blöschl (2005). "Top-kriging ? geostatistics on stream networks." Hydrology and Earth System Sciences Discussions **2**(6): 2253-2286.

Smith, A., C. Sampson and P. Bates (2015). "Regional flood frequency analysis at the global scale." Water Resources Research **51**(1): 539-553.

- Szolgay, J., K. Hlavčová, S. Kohnová and R. Danihlík (2003). "Regional estimation of parameters of a monthly water balance model." Journal of Hydrology and Hydromechanics **51**(4): 256-273.
- USGS (1982). Guidelines for determining flood flow frequency: Bulletin 17B of the hydrology Subcommittee. Reston, United States Geological Survey.
- Wu, Q., S. Liu, Y. Cai, X. Li and Y. Jiang (2017). "Improvement of hydrological model calibration by selecting multiple parameter ranges." Hydrol. Earth Syst. Sci. **21**(1): 393-407.
- Yadav, M., T. Wagener and H. Gupta (2007). "Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins." Advances in Water Resources **30**(8): 1756-1774.