UNIVERSITE DE STRASBOURG

ECOLE DOCTORALE MATHEMATIQUES SCIENCES DE L'INFORMATION ET DE L'INGENIEUR

RESUME DE LA THESE DE DOCTORAT

Discipline : Mécanique des fluides

Spécialité (facultative) :

Présentée par : Hariri Sleimane
(*Nom Prénom du candidat)*

Titre : Modélisation des inondations historique de la Sarre

Unité de Recherche : Laboratoire ICube UMR 7357
(N° et Nom de l'Unité)

Directeur de Thèse : Charpentier Isabelle
(Nom Prénom – Grade)

Co-Directeur de Thèse (s'il y a lieu) :
(Nom Prénom – Grade)

Localisation : 4 Rue Boussingault, 67000 Strasbourg

Thèse confidentielle : ■ NON ☐ OUI

RESUME DE THESE

Modélisation des inondations historique de la Sarre

Sleimane Hariri

Introduction

Les inondations sont considérées comme la catastrophe naturelle la plus fréquente, susceptible d'affecter localement une grande partie de la population mondiale. Entre 1998 et 2002, l'Europe a subi plus de 100 inondations sévères, dont celles du Danube et de l'Elbe en 2002. Les 14 et 15 juillet 2021, des précipitations de 100 et 150 millimètres soit l'équivalent de deux mois de pluies selon l'Organisation météorologique mondiale, ont provoqué la mort d'au moins 183 personnes dans l'ouest de l'Allemagne. En France, le risque inondation est le risque naturel majoritairement encouru par la population (Berz, 2000). Une commune française sur trois subit occasionnellement les inondations. En conséquence, ces territoires se sont dotés de programmes de prévention (PPRI : Plans de Prévention des Risques d'inondation, PAPI : Programmes d'Actions de Prévention des Inondations, etc.) qui visent à gérer et réduire le risque dû aux inondations.

Le développement des modèles numériques a permis une meilleure compréhension des processus hydrologiques. Ces modèles visent à exprimer les différents processus hydrologiques et leurs relations sous forme d'équations. Aujourd'hui, ces modèles hydrologiques sont largement utilisés dans la gestion des ressources en eau, la prévision des inondations, l'évaluation des risques (Fan, et al., 2016) et la simulation de d'événements extrêmes (Sorribas, et al., 2016).
A partir de 1980 (Rodriguez, et al., 2008), l'utilisation des équations aux dérivées partielles (EDP) non linéaires et de paramétrisations physiques supplémentaires ont permis de représenter les processus hydrologiques complexes d'une manière de plus en plus complète. Cette complexité requiert une résolution itérative, d'autant plus coûteuse en temps de calcul et en mémoire que le bassin versant modélisé est grand.

Ces 20 dernières années, dans de nombreux domaines en sciences et en ingénierie, l'utilisation du calcul à haute performance s'est considérablement accrue en raison du développement de nouvelles architectures et de la diminution de leurs coûts, facilitant l'accès à ces super-calculateurs (Kumar & Duffy, 2015). Les méthodes de décomposition de domaines et de calcul parallèle ont alors permis de résoudre des problèmes plus grands avec des temps de calculs raisonnables, lorsqu'elles ont été combinées dans des algorithmes efficaces.

Dans le contexte hydrologique, cette décomposition peut être opérée sur le bassin versant avant la construction de sous problèmes d'EDP, ou bien en partitionnant les matrices après linéarisation et discrétisation des systèmes d'équations. Dans le premier cas, une méthode de décomposition de domaine (MDD) organise la résolution numérique en calculant les conditions aux limites des sous-problèmes d'EDP, puis en résolvant ceux-ci. Des itérations peuvent être nécessaires. Dans le second cas, un solveur parallèle creux peut être employé. Dans les deux cas, l'objectif est de résoudre des problèmes plus petits.

Le nord-est de la France, en particulier le district hydrographique Moselle-Sarre-Nieds, a connu plusieurs crues d'importance significative, notamment en décembre 1919 - janvier 1920, décembre 1947, avril et mai 1983, janvier 1995, février 1997, octobre 2006, décembre 2010 et juillet 2021. En particulier, nous cherchons dans cette thèse à modéliser les inondations historiques extrêmes qui ont pris place sur les bassins du Moderbach, de l'Albe et de la Sarre, dont les inondations défensives de 1939 et 1940 durant la deuxième guerre mondiale. La particularité de nos simulations est d'utiliser comme des données des précipitations sur le bassin versant. Différentes des modélisations de lit majeur, nous avons développé des partitions en sous-unités hydrologiques, des modèles hydrologiques

distribués, et des stratégies de calcul parallèle pour réduire les temps de calculs nécessaires à la simulation de ces événements exceptionnels.

Objectifs

1- Modélisation des inondations historiques extrêmes dans le bassin versant de la Sarre (1800 km²) ;
2- Développement d'une méthode de partition de bassin de drainage assurant une répartition des aires des sous-bassins équilibrée ;
3- Développement d'une méthode de décomposition de domaine pour le couplage des méthodes de partition de bassin avec des modèles hydrologiques ;
4- Validation de cette stratégie de couplage et évaluation des performances numériques (temps de calcul, et comparaison aux images/photos historiques).

Méthode de partition de bassin de drainage

La simulation des modèles hydrologiques distribués à base physique sur de grands bassins versants a été limitée par de fortes exigences en matière de capacité de calcul. Cela provient des fines résolutions spatiales et temporelles nécessaires pour résoudre les équations pertinentes. Avec le développement du calcul à haute performance, plusieurs études ont développé puis illustré la mise en œuvre des modèles hydrologiques distribués sur des plateformes de calcul parallèles.

L'effort de parallélisation est motivé par la nécessité de partitionner le domaine de calcul en sous-domaine pour répartir et équilibrer la charge de calcul entre les processeurs. L'objectif est d'améliorer de manière significative la performance du calcul parallèle.

La charge de calcul dans un sous-bassin est déterminée, en partie, par la surface du sous-bassin. Par conséquent, une méthode efficace de partitionnement des bassins visant à équilibrer la charge de calcul repose sur la création de sous-bassins de surfaces similaires.

Plusieurs méthodes de partition de bassin versant ont été proposées dans la littérature pour satisfaire différentes contraintes ou pour répondre à différents objectifs, sans pleinement atteindre une partition en sous-bassins de surface similaires. En particulier, la très classique méthode de partition aux confluences produira un très petit sous-bassin lorsque deux confluences sont proches l'une de l'autre. De même, de longs tronçons (sans confluences) résultent de grands sous-bassins. Pontes et al (2017) ont proposé la longueur du cours d'eau comme critère de partition complémentaire, réduisant ainsi la taille du plus grand sous-bassins, sans résoudre le problème des petits sous-bassins.

A partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) et d'un exutoire, nous proposons un outil SIG (Système d'information géographique), appelé WatershedPart, permettant de partitionner un bassin versant en des sous-bassins de taille similaire (Hariri, et al., 2019). Cet outil propose deux méthodes. La première méthode appelé décomposition équilibrée guidé (Guided area-balanced), permet de prendre en compte des caractéristiques du terrain définis par l'utilisateur (UD outlets) comme par exemple les structures de génie civil ou des stations de jaugeage avant de continuer à décomposer le bassin pour atteindre le nombre de sous-bassin requis, tout en respectant au mieux la condition de sous-bassin de taille similaire. La deuxième méthode propose une décomposition équilibrée non guidée, elle permet de générer des sous-bassins de taille similaire sans aucune intervention de l'utilisateur. WatershedPart est développé en Matlab sur la base des fonctions de la Topotoolbox (Schwanghart & Kuhn, 2010).

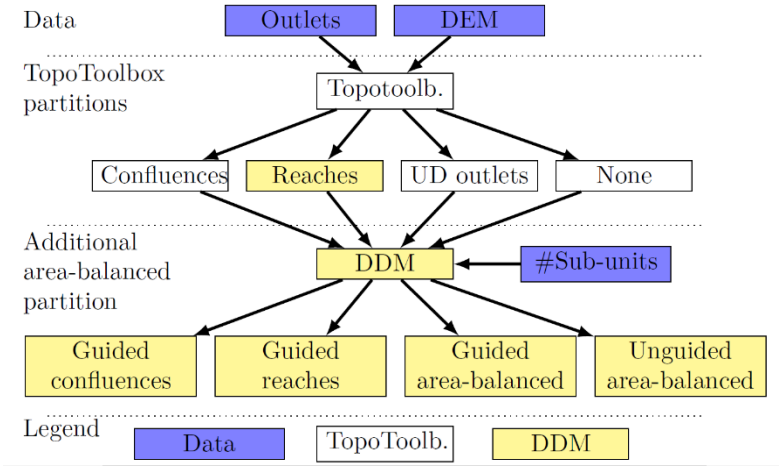

Figure 1 Les méthodes de partition de bassin de drainage

Couplage de la méthode de partition avec les modèles hydrologiques

Dans ce travail, nous présentons deux modèle hydrologique différents, HEC-RAS (code professionnel) et NIM (code académique). Les deux modèles sont capables d'effectuer des simulations 2D sur des bassins versants à grande échelle en utilisant l'équation de l'onde diffusive.

Les principales différences entre les deux modèles sont au niveau de la stratégie du calcul parallèle utilisée et des solveurs d'équations 2D.

1. HEC-RAS utilise un solveur parallèle creux qui permet d'impliquer plusieurs cœurs d'un processeur à mémoire partagé dans la résolution numérique. De son côté, la disponibilité des codes sources de NIM permet de profiter des méthodes de partition de bassin versant en sous-bassins pour résoudre les équations sur un calculateur à mémoire distribuée. L'implémentation utilisée bénéficie de l'outil « ORWL» qui assure la synchronisation du calcul et le transfert d'information d'un bassin à l'autre.
2. HEC-RAS utilise un algorithme implicite de volumes finis pour résoudre l'équation 2D, ce qui permet d'améliorer la stabilité et la robustesse par rapport aux techniques traditionnelles de différences finies et d'éléments finis, comme celle utilisée dans NIM. Il permet également d'augmenter le pas de temps de calcul, ce qui réduit le temps de simulation nécessaire. Pour cette raison, la correction du MNT à l'aide de méthodes qui permet de traiter les dépressions dans le MNT a été nécessaire avant de pouvoir l'appliquer dans n'importe quelle simulation de NIM (Hariri, et al., 2021).

Un événement d'inondation sur le bassin versant du Moderbach a été étudié avec les deux modèles. Les résultats montrent que l'efficacité de calcul, en terme de temps de calcul, de HEC-RAS est largement supérieure à celle de NIM.

Pour simuler l'utilisation d'HEC-RAS sur une machine à mémoire distribuées, nous avons automatiser la simulation séquentielle de plusieurs modèles 2D (Hariri, et al., 2021). Ce processus a nécessité le développement de modèles 2D-1D avec HEC-RAS avec l'outil HECRASController. La simulation d'un bassin décomposé permet donc de générer le même comportement hydraulique que la simulation d'un bassin total (Figure 2), tout en nécessitant moins de temps de calcul. La méthode de partition de bassin équilibrés que nous avons proposée montre une meilleure performance que d'autres méthodes telles que la méthode de partition a la confluence (Figure 3).

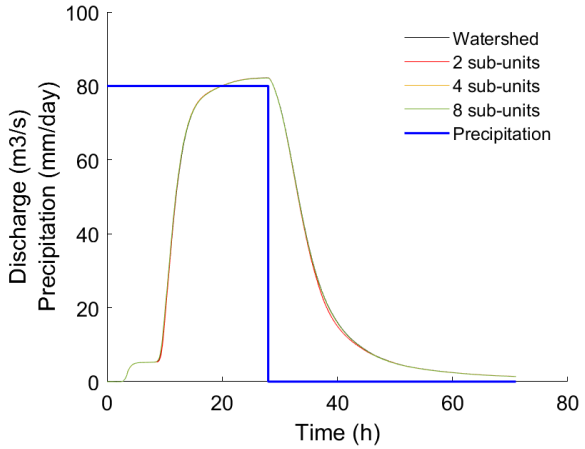

Figure 2 Débit à l'exutoire du Moderbach dans les diffèrent configuration de partitionnement

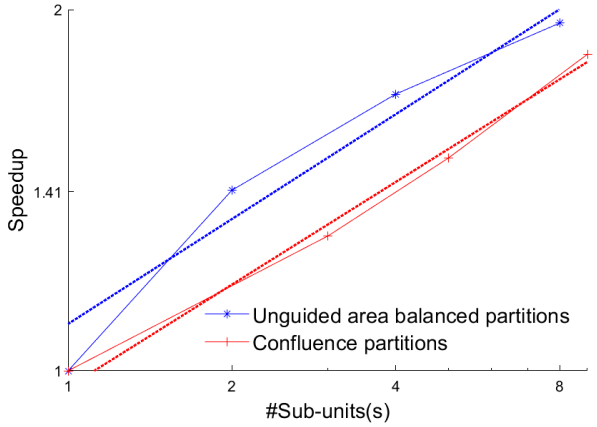

Figure 3 Performance des deux méthodes de décomposition de domaine

Modélisation des scenarios historiques

Trois événements historiques ont été modélisés dans la région de la Sarre. Le premier scénario est celui supposé se dérouler en 1940 sur le bassin versant du Moderbach et visant à inonder la vallée pour arrêter l'attaque des ennemis par l'évacuation soudaine des 5 étangs dans le bassin versant. Les résultats de la simulation d'inondation ont été comparés à l'aide des paramètres d'ajustement (Di Baldassarre, et al., 2009) à l'image d'inondation dessinée par le service géographique de l'armée en 1944 par l'Institut géographique national français (Figure 4). Le second scénario est un événement extrême sur le bassin versant de l'Albe en 2012. La particularité de cet événement est qu'il présente trois crues significatives consécutives en moins de 2 mois. Le débit calculé à l'exutoire du bassin versant de l'Albe est comparé aux données de débit observées fournies par la banque Hydro. Le troisième scénario est un événement d'inondation sur le bassin versant de la Sarre en décembre 2010. Le bassin versant de la Sarre est décomposé en 20 sous-bassins versants de taille similaire pour effectuer une simulation séquentielle automatique des sous-bassins versants dans HEC-RAS. Les résultats sont comparés à une carte de données en utilisant les paramètres d'ajustement et le débit à l'exutoire est comparé aux débit observé a la station de Sarreguemines disponible sur le site de la banque Hydro.

Surface d'inondation observé sur la carte de 1940

Surface d'inondation calculé sur HEC-RAS

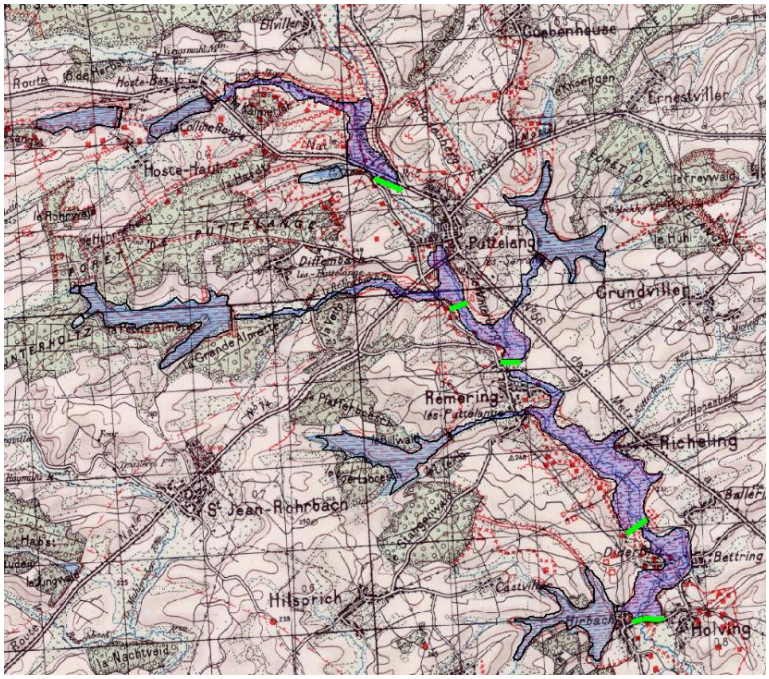

Figure 2 Surface d'inondation calculé sur la carte d'inondation de 1940 - Service géographique de l'armée 1921 - mise à jour 1940

Conclusion

Les méthodes proposées dans le cadre de la thèse ont permis d'atteindre les objectifs annoncés puisque différents scénarios d'inondations historiques ont pu être simulés.

Pour aller plus loin, il serait nécessaire de disposer d'un code de simulation ouvert (comme l'est le code académique NIM) et performant (comme l'est le code professionnel HEC-RAS) de manière à tirer pleinement avantage des calculateurs parallèles actuels composés de multi-processeurs multi-cœurs.

Références

Berz, G., 2000. *Flood disasters: lessons from the past - worries for the future.* s.l., s.n.

Coroza, O., Evans, D. & Bishop, I., 1997. Enhancing runoff modeling with GIS. *Landscape and Urban Planning,* Volume 38, pp. 13-23.

Di Baldassarre, G., Schumann, G. & Bates, P. D., 2009. A technique for the calibration of hydraulic models using uncertain satellite observations of flood extent. *Journal of Hydrology,* Volume 367, pp. 276-282.

Fan, F. M. et al., 2016. Flood forecasting on the Tocantins River using ensemble rainfall forecasts and real-time satellite rainfall estimates. *Journal of Flood Risk Management,* Volume 9, pp. 278-288.

Hariri, S., Gustedt, J., Weill, S. & Charpentier, I., 2021. A Hybrid Breaching-Filling method for sink removal adapted to parallel hydrological simulations. *EGU21 European Geosciences Union General Assembly.*

Hariri, S., Weill, S., Gustedt, J. & Charpentier, I., 2019. Pairing GIS and distributed hydrological models using Matlab. *CAJG - 2nd Conference of the Arabian Journal of Geosiences.*

Hariri, S., Weill, S., Gustedt, J. & Charpentier, I., 2021. A balanced watershed decomposition method. Application to HEC-RAS. *Journal of Hydroinformatics. Article en cours de soumission.*

Islam, Z., 2011. A review on physically based hydrologic modeling. *University of Alberta: Edmonton, AB, Canada.*

Kumar, M. & Duffy, C. J., 2015. Exploring the Role of Domain Partitioning on Efficiency of Parallel Distributed Hydrologic Model Simulations. J Hydrogeol Hydrol Eng 4: 1. *of,* Volume 12, p. 2.

O'Callaghan, J. F. & Mark, D. M., 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer vision, graphics, and image processing,* Volume 28, pp. 323-344.

Rieger, W., 1993. Automated river line and catchment area extraction from dem data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing,* Volume 29, pp. 642-642.

Rodriguez, F., Andrieu, H. & Morena, F., 2008. A distributed hydrological model for urbanized areas--Model development and application to case studies. *Journal of Hydrology,* Volume 351, pp. 268-287.

Schwanghart, W. & Kuhn, N. J., 2010. TopoToolbox: A set of Matlab functions for topographic analysis. *Environmental Modelling & Software,* Volume 25, pp. 770-781.

Sorribas, M. V. et al., 2016. Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. *Climatic Change,* Volume 136, pp. 555-570.

Publications

Hariri, S., Gustedt, J., Weill, S. & Charpentier, I., 2021. A Hybrid Breaching-Filling method for sink removal adapted to parallel hydrological simulations. *EGU21 European Geosciences Union General Assembly.*

Communications

Hariri, S., Weill, S., Gustedt, J. & Charpentier, I., 2019. Pairing GIS and distributed hydrological models using Matlab. *CAJG - 2nd Conference of the Arabian Journal of Geosiences.*

Hariri, S., Weill, S., Gustedt, J. & Charpentier, I., 2021. A balanced watershed decomposition method. Application to HEC-RAS. *Journal of Hydroinformatics. Article en cours de soumission.*