

## Modélisation des écoulements mélangés avec des polymères dans une rivière pour la gestion des risques d'inondation

### [ Modeling of flow mixed with polymers in river for flood risk management ]

*Walid Bouchenafa and Arnaud Lefevre*

SNF SAS, ZAC de Milieux, Rue Adriene Bolland, 42160. Andrézieux-Bouthéon, France

Copyright © 2019 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** Floods are one of the most common natural disasters causing many casualties and significant economic damage around the world. Hurricane Florence and Typhoon Mangkhut in 2018 were only the last reminder of the disruption caused by the catastrophic floods. Despite significant safeguards to reduce fluvial flooding risk, further efforts are still needed. This study is part of the NABRAPOL (NEBARSKA POLYMER) project, which aims to improve the knowledge of the drag reduction effect on free surface flows, a new protection technique used to reduce the rivers flooding risk. This article presents a state of the art in terms of fluvial flow modeling in the presence of polymers to strengthen flood risk management. A modeling approach for flows mixed with polymers is described. A case study on the watercourse modeling containing a flow without and with polymers is presented. The modelling results show that the addition of polymers to the flows watercourse results in a marked drag reduction by decreasing the water depth up to 18% of its initial depth. This technique can be considered as an efficient new method for strengthening non-structural protection measures against river floods risk.

**KEYWORDS:** flood, uniform flow, drag reduction, polyacrylamide, Mike Hydro River.

**RESUME:** Les inondations font parties des catastrophes naturelles les plus fréquentes causant un grand nombre de victimes et des dégâts économiques significatifs dans le monde entier. Les inondations survenues à la suite de l'ouragan Florence et le typhon Mangkhut en 2018 ne sont que des derniers rappelles des perturbations qui peuvent engendrer ces évènements extrêmes. Malgré les mesures de protection importantes déployées pour réduire le risque d'inondation fluviale, des efforts supplémentaires demeurent encore nécessaires. Cette étude rentre dans le cadre de projet NABRAPOL (NEBARSKA POLYMER) qui vise à améliorer les connaissances de l'effet de réduction de la traînée sur les écoulements à surface libre, une nouvelle technique de protection utilisée pour réduire les risques d'inondation fluviale. Le présent article présente un état de l'art en terme de modélisation d'écoulement fluvial en présence des polymères dans le cadre du renforcement de la gestion des risques d'inondation. Une approche de modélisation des écoulements mélangés avec les polymères est décrite. Un cas d'étude sur la modélisation d'un cours d'eau contenant un écoulement sans et avec polymères est présenté. Les résultats de modélisation montrent que l'ajout des polymères dans les écoulements entraîne une réduction marquée de la traînée en diminuant la hauteur d'eau jusqu'à 18% de sa hauteur initiale. Cette technique peut être considérée comme une nouvelle méthode efficace pour renforcer les mesures de protection non structurelles contre les risques des inondations fluviales.

**MOTS-CLEFS :** Risque d'inondation, écoulement fluvial, réduction de traînée, polyacrylamide, Mike Hydro River.

## 1 INTRODUCTION

Les inondations sont des catastrophes naturelles les plus courantes entraînant souvent des pertes économiques considérables et des tragédies humaines et sociales [1]. Les événements extrêmes survenus dans les Caraïbes, au Bangladesh

et au Japon en 2017, en Inde et aux Philippines en 2018 montrent à quel point les effets des inondations peuvent être dévastateurs. En outre, certaines villes mégalo-poles telles que Bangkok, Mumbai, Jakarta, Shanghai, Saïgon, Dacca, Londres, Paris et Rotterdam sont extrêmement vulnérables aux inondations fluviales en raison de l'aggravation des risques liés à l'urbanisation et aux effets du changement climatique [2].

Un système efficace de protection contre les risques d'inondation fluviale peut améliorer considérablement la sécurité publique, réduire les dommages sociaux et les pertes économiques liées aux inondations. Par conséquent, la gestion des risques d'inondation constitue toujours un défi énorme pour le gouvernement et les autorités locales [3], notamment lorsque l'adaptation des populations riveraines des cours d'eau face au risque d'inondation est en perpétuelle évolution.

La technique privilégiée pour lutter contre les inondations est actuellement la stratégie de protection [4]. La méthode de réduction de la traînée par l'ajout des polymères peut être considérée comme une nouvelle technique efficace pour renforcer les mesures déjà déployées dans la stratégie de protection de gestion des risques d'inondation fluviale puisqu'elle permet de réduire la hauteur d'écoulement jusqu'à 18% de sa hauteur initiale [5] et donc d'éviter le débordement des rivières en cas de crue.

Le but de la démarche présentée dans cet article consiste à minimiser les impacts des inondations fluviales dans les zones urbaines. Le présent travail est basé sur les résultats des travaux de recherche décrivant le phénomène de réduction de la traînée par l'ajout des polymères dans un écoulement à surface libre sur un canal au laboratoire sous conditions hydrauliques hautement contrôlées [6]. Durant ces travaux, il a été constaté que l'ajout des polymères, pour les écoulements à surface libre, avec une faible quantité de 20 PPM (particules par millions), entraîne une réduction significative de la traînée. En effet, les interactions entre le polymère et les structures turbulentes de l'écoulement ont tendance d'augmenter l'épaisseur de la couche limite et modifier le profil de vitesse à proximité de la paroi par la mise en place d'une sous couche élastique entre la couche visqueuse et la zone logarithmique de la couche limite [5], ce qui provoque par la suite une diminution de la hauteur d'eau.

Suivant cette interprétation, les auteurs ont émis l'hypothèse que des phénomènes similaires se produisent également à l'échelle d'un cours d'eau de plusieurs kilomètres. Néanmoins, la validation de cette hypothèse reste à confirmer. Pour ce faire, tout d'abord, un modèle de simulation hydraulique décrivant fidèlement la dynamique d'écoulement sur un vrai cours d'eau est développé dans cette étude. Le logiciel hydrodynamique quasi bidimensionnel Mike Hydro River (MHR) est utilisé pour simuler les écoulements dans notre cas d'étude. Deux modèles sont développés puis comparés entre eux, le premier modèle de référence est dédié à un écoulement sans polymères et validé à l'aide des données de mesures des hauteurs d'eau et des débits d'écoulement. Le deuxième modèle est consacré au même cours d'eau en tenant compte de la présence d'une quantité de 20 ppm de polymères dans l'écoulement. La procédure utilisée pour définir la présence des polymères dans le modèle repose sur les résultats effectués au laboratoire dans lequel les polymères modifient le coefficient de résistance à l'écoulement [6].

## 2 CAS D'APPLICATION

La modélisation est effectuée sur un cours d'eau appelé TSC (Tri-State Canal), situé dans la partie nord de Scottsbluff dans le Nebraska aux États-Unis sur une altitude de 1219 m, une longueur de 26 km a été sélectionnée pour mieux évaluer les processus de réduction de la traînée par l'ajout des polymères. La hauteur d'eau varie sur le long de la rivière de 1,2 à 1,5 mètres en condition d'écoulement normal. La largeur de la rivière varie entre 18 à 22 mètres, la pente est faible, de l'ordre de  $50 \sim 10^{-4}$ . Le lit du cours d'eau TSC contient des galets, de graviers et matériaux alluvionnaires. Le régime d'écoulement de TSC est fluvial, le débit d'écoulement lors de cette étude est égal à  $9,33 \text{ m}^3/\text{s}$ .

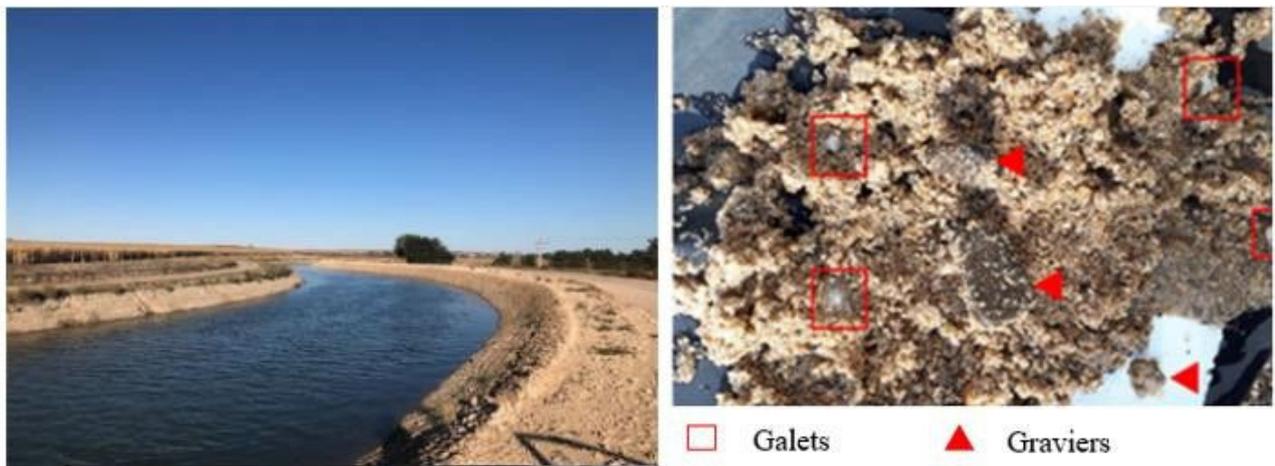


Fig. 1. Le canal Tri- State à Scottsbluff et les sédiments de son lit

Le site sélectionné pour l'étude est un cours d'eau méandre, traversé par dix ponts, entretenues par le bureau départemental des agriculteurs et d'irrigation (Farmers Irrigation District Office).

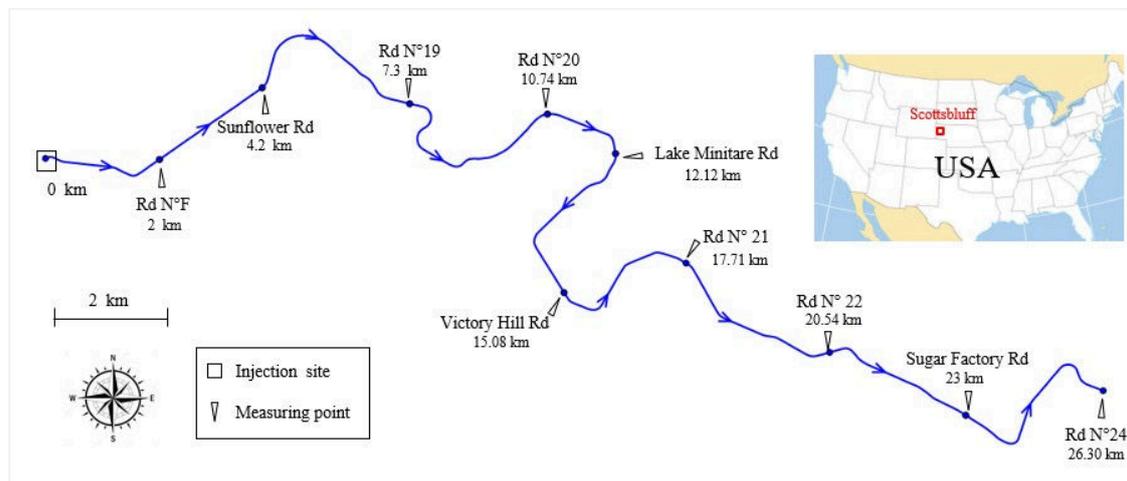


Fig. 2. Localisation du site d'étude et définition des points de mesures

À 34 km en amont de site d'étude, il existe un barrage mobile permettant de réguler le débit d'écoulement et contrôler le niveau d'eau. Cette eau stockée et régulée est destinée principalement à l'irrigation. Le choix de ce cours d'eau pour la modélisation est justifié par la possibilité d'effectuer de essais *in-situ* dans le cadre du projet NEBRAPOL afin de mieux évaluer le phénomène de la réduction de trainée par l'injection des polymères à l'échelle d'un cours d'eau réel.



*Fig. 3. Localisation Barrage mobile en amont du canal Tri-State*

### 3 ETAT DE L'ART SUR LES DONNEES REQUISES POUR LA MODELISATION

Trois bases de données d'entrée sont nécessaires pour lancer la modélisation quel que soit le modèle hydraulique retenu, il s'agit 1) d'une cartographie du secteur d'étude permettant de localiser le cours d'eau et définir ses sections transversales ainsi que les pentes et sa longueur considérée, 2) d'un coefficient de résistance à l'écoulement définissant la structure du lit de la rivière et ses berges latérales et enfin 3) des conditions initiales et aux limites caractérisant l'état d'écoulement. La méthode de saisie des données et ses qualités définissent les résultats finaux de la modélisation.

1) Les sections transversales déterminent les relations entre hauteur d'eau et surface mouillée. Elles sont typiquement obtenues sur la base de relevés topographiques orthogonaux au lit du cours d'eau. En effet, la topographie est un autre aspect important pour l'évaluation de propagation des écoulements au sein d'un tronçon de rivière de longueur finie. Traditionnellement, les données topographiques et bathymétriques sont obtenues à partir de l'arpentage et des levés bathymétriques collectés généralement auprès des organisations locales. Néanmoins, actuellement, il existe plusieurs technologies permettant de caractériser la topographie d'un système étudié, comme par exemple, les images satellite pouvant être obtenues auprès des organisations nationales ou internationales impliquées dans la collecte et le stockage d'image satellite telle que l'Administration Nationale de l'Espace et de l'Aéronautique NASA et l'Institut Indien de Télédétection IIRS. Certaines de ces données sont librement disponibles. En outre, la technique la plus courante pour la mise à jour des données bathymétriques est appelée la télédétection par laser ou LIDAR (Light Detection And Ranging), c'est une technique utile pour mesurer simultanément la topographie et la bathymétrie [7]. La cartographie du secteur d'étude peut être reproduite à l'aide d'un modèle numérique de terrain (MNT) qui fournit des données morphologiques et topographiques précises. La bathymétrie de notre zone d'étude est préparée à partir d'un modèle numérique de terrain et fournie en tant que données d'entrée pour le modèle.

Il est à noter que les zones avec peu ou pas de données font face à des défis particuliers. La télédétection et l'utilisation de la technique du Système d'Information Géographique (SIG) sont des solutions particulièrement utiles. Ces techniques peuvent également être utilisées dans les zones où l'accessibilité physique pose un problème. Bien que l'imagerie par satellite, les photographies aériennes et la technologie LIDAR peuvent générer des données en temps réel, le coût de l'acquisition de données est toujours un sujet de préoccupation : l'achat de données coûteuses et de technologies telles que le LIDAR doit être comparé aux avantages liés à l'obtention des résultats de modélisation plus précis.

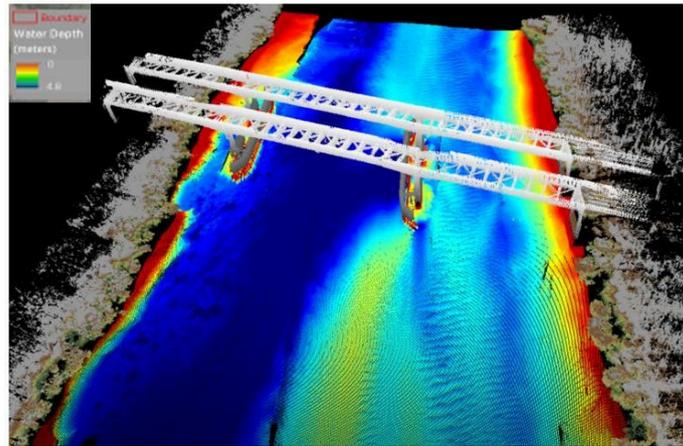


Fig. 4. Bathymétrie d'une rivière traversée par un pont définie par un pont définie par la technique LIDAR ([www.usgs.gov](http://www.usgs.gov))

2) Le coefficient de résistance à l'écoulement est estimé à partir de l'état de surface du milieu. Il dépend en particulier du type de sol et caractérise les pertes de charge linéaires. Généralement, il est interprété par le coefficient de Manning  $K$  intervenant dans la formule de Manning-Strickler qui donne l'expression de la vitesse moyenne pour un écoulement en régime uniforme [8] :

$$\bar{v} = KR_h^{2/3} S_0^{1/2}$$

Où  $R_h$  [m] est le rayon hydraulique,  $S_0$  la pente énergétique, égale à celle du fond du canal,  $K = \frac{1}{\eta}$ , où  $K$  [ $m^{1/2}s^{-1}$ ] et  $\eta$  [ $m^{1/2}s^{-1}$ ] sont les coefficients de Strickler et Manning respectivement.

3) Les conditions initiales sont décrites par des données hydrauliques telles que les débits en tout point du cours d'eau pour le début de la simulation. Les données sur les hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement sont fournies par la FIDO (Farmers Irrigation District Office) qui assure le suivi du canal TSC, ainsi que le contrôle de la qualité des données et leur mise à la disposition au public.

Dans notre cas d'étude, les données hydrauliques fixées par le barrage mobile sur la hauteur d'eau et le débit d'écoulement ainsi que les données de mesures sur la hauteur d'eau le long de TSC sont utilisées en tant que données d'entrée pour la modélisation. La condition à la limite aval est une relation connue entre le débit et la hauteur d'eau. Un modèle MNT est utilisé pour définir la morphologie de cours d'eau et ses sections transversales. L'écoulement du canal TSC est simulé pour la période de septembre 2019. Les données de mesure sont utilisées pour valider les résultats de la modélisation et corriger le modèle d'écoulement sans polymères.

#### 4 MODELISATION HYDRODYNAMIQUE DES ECOULEMENT SANS ET AVEC POLYMERES

Les processus hydrodynamiques des écoulements en rivière pourraient être représentés par différentes approches simplifiées [9], le choix d'une approche de modélisation doit être cohérent au contexte d'étude. Il existe plusieurs principaux logiciels de modélisation hydrodynamique des écoulements surfaciques, tels que HEC-RAS, LISFLOOD-FR, TELEMAC et MIKE HYDO. Dans le cadre de la modélisation des écoulements mélangés avec les polymères, la représentation de la dynamique de ce type d'écoulement demeure assez cruciale pour mieux évaluer l'efficacité de la technique de réduction de la traînée. Le modèle hydrodynamique Mike Hydro River (MHR) est considéré comme mieux adapté à la modélisation de ce type d'écoulement. Ce dernier permet de décrire et représenter explicitement la dynamique d'écoulement à l'aide des équations de Barré de Saint Venant décrivant le mouvement des écoulements à surface libre en eau peu profonde [10]. Le modèle calcule la hauteur d'eau et la vitesse d'écoulement en tout point le long de la rivière. Le principe du modèle MHR est discuté dans [11].

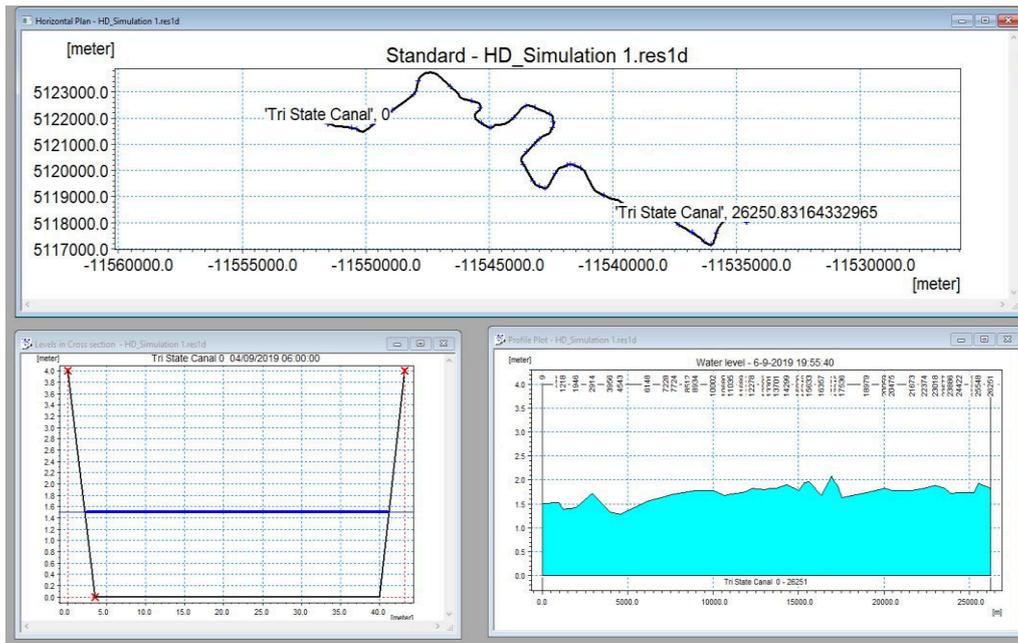


Fig. 5. Visualisation des écoulements modélisés dans le canal Tri-State par Mike Hydro River

Dans leurs études [6], les auteurs ont montré l'impact du polymère sur le changement de coefficient de Strickler. Dans la modélisation des écoulements mélangés avec les polymères, la démarche utilisée pour introduire les polymères dans le modèle consiste à faire varier le coefficient de Manning pour chaque profil en travers du tronçon modélisé [5].

## 5 RESULTATS

Dans ce travail, le Mike Urban Hydro a été utilisé pour modéliser les écoulements dans le canal TSC. Une comparaison des résultats du modèle avant l'injection du polymère, avec les données de mesure a montré une capacité remarquable du système de modélisation mis en place permettant à reproduire d'une façon efficace la dynamique de l'écoulement dans le canal TSC. Les données de mesures fournies par la FIDO ont permis de mieux corriger le modèle développé.

Le modèle de calcul des écoulements mélangés avec les polymères montre une réduction significative de la résistance à l'écoulement dans le cours d'eau TSC. La figure 6 représente la hauteur d'eau pour un écoulement sans et avec polymères. Deux phénomènes hydrauliques sont observés dans le système modélisé : diminution de hauteur d'eau le long du cours d'eau jusqu'à 18% de sa hauteur initiale et en retour, une augmentation de la capacité d'écoulement à 30%.

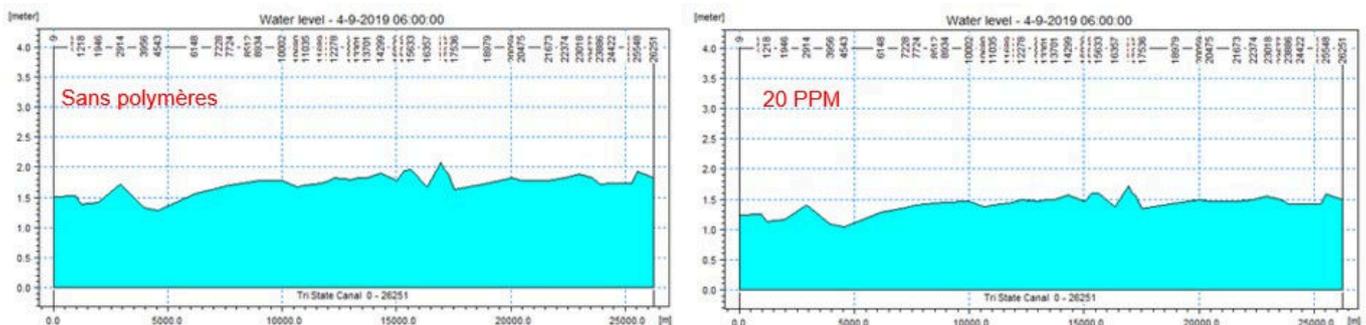


Fig. 6. Hauteur d'eau simulée le long du canal Tris-State

En effet, le phénomène de la réduction de traînée provoquée par l'injection des polymères surfactants dans un cours d'eau peut réduire la hauteur d'eau local tout en augmentant la vitesse d'écoulement et en contribuant par la suite, à une protection

plus efficace contre les effets des inondations dans la zone vulnérable. Ce phénomène permet d'améliorer les stratégies de gestion des risques d'inondation fluviale [16].

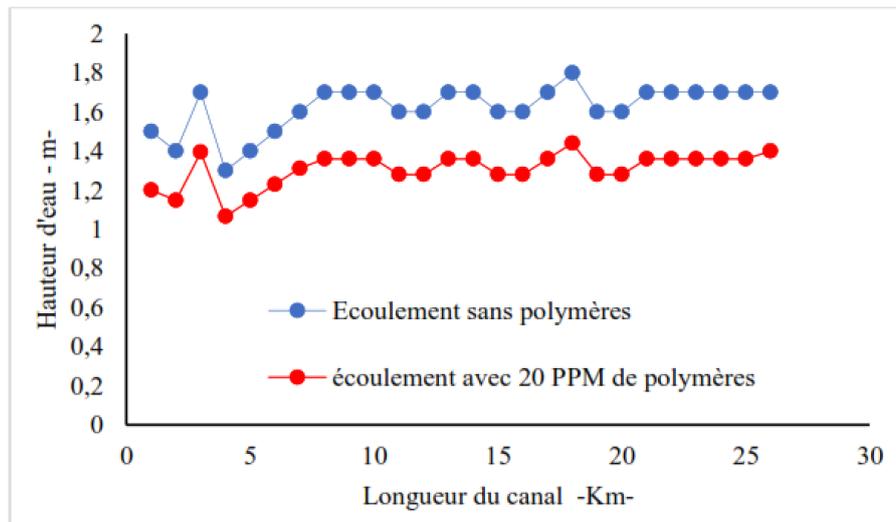


Fig. 7. Hauteur d'eau le long du canal TSC avant et après injections des polymères

## 6 CONCLUSION

La modélisation numérique des écoulements des rivières peut être utilisée pour évaluer l'impact des risques d'inondation fluviale. La modélisation peut également être utilisée pour tester l'efficacité de différentes solutions de risque d'inondation de manière plus ou moins détaillée [13]. N'importe quel type de modélisation peut être un outil puissant pour aider les décideurs à comprendre les risques d'inondation. Dans notre cas d'étude, la modélisation hydraulique a montré l'intérêt de la méthode de réduction de la traînée pour éviter le débordement des berges en cas d'une crue fluviale. Cependant, les résultats du modèle doivent être validés en fonction des données de mesure. Une campagne de mesure sur le canal TSC est en préparation afin de mieux évaluer l'efficacité de la technique de réduction de traînée par l'ajout des polymères et ainsi valider le modèle numérique.



Fig. 8. Site d'injection des polymères pour le projet NEPRAPOL

**REMERCIEMENT**

L'étude est soutenue par le projet NEBRAPOL dans le cadre de gestion de risque d'inondation fluviale. Les auteurs remercient les responsables de la FIDO (Farmers Irrigation District Office) de Scottsbluff dans le Nebraska pour le partage des données utilisées dans cette étude.

**REFERENCES**

- [1] G. Merkuryeva, M. Kornevs, "Water Flow Forecasting and River Simulation for Flood Risk Analysis", *Information Technology and Management Science*, doi: 10.2478/itms-2013-0006, pp42-46, 2013.
- [2] Z. W. Kundzewicz, D. L. T. Hegger, P. Matczak, and P. P. J. Driessen, "Water Flow Forecasting and River Simulation for Flood Risk Analysis", *National Academy of Sciences*, vol. 115, N° 49, 12321-12325, December 2018.
- [3] Peter P. J. Driessen, Dries L. T. Hegger, Zbigniew W. Kundzewicz, Helena F. M. W. van Rijswick, Ann Crabbé, Corinne Larrue, Piotr Matczak, Maria Pettersson, Sally Priest, Cathy Suykens, Gerrit Thomas Raadgever and Mark Wiering "Governance Strategies for Improving Flood Resilience in the Face of Climate Change", *Water MDPI*, vol. 10, N° 1595, 2018.
- [4] P. Driessen, D. Hegger, M. H. N. Bakker, H. Rijswick and Z. Kundzewicz,, "Toward more resilient flood risk governance", *Ecology and Society*, 21(4): 53, 2016.
- [5] W. Bouchenafa, A. Lefevre, and B. Quillien, "Augmenter le coefficient de Strickler par la technique de réduction de la traînée dans les écoulements à surface libre", *International Journal of Innovation and Applied Studies*, ISSN 2028-9324 Vol. 24 No. 1 Aug. 2018, pp. 1-8.
- [6] E. Mignot, N. Rivière, A. Lefevre and B Quillien "Smoother Than Smooth: Increasing the Flow Conveyance of an Open-Channel Flow by Using Drag Reduction Methods". *J. Hydraul. Eng.*, 2019, 145(4): 04019011, p8.
- [7] W.J. Lillycrop, L.E., Parson and J.L Irish, "Development and operation of the SHOALS airborne LIDAR hydrographic survey system", *Proceedings of SPIE 2694 CIS Selected Papers : Laser Remote Sensing of Natural Waters : From Theory to Practice*, St Petersburg, November 01, 1996.26 (1996) :26 -37.
- [8] M. Soutter, A. Mermoud, A. Musy " *Ingénierie des eaux et du sol. Processus et aménagements*", Presses polytechniques et universitaires romandes. 2007, p 294.
- [9] B. J. Dewals, S. Detrembleur, P. Archambeau, S. Epicum, J. Ernst, M. Pirotton "Caractérisation micro-échelle du risque d'inondation : modélisation hydraulique détaillée et quantification des impacts socio-économiques", *La Houille Blanche*, N°2n 2011, p-28-34.
- [10] Mike Powered by DHI "MIKE 1D DHI Simulation Engine for 1D river and urban modelling, Référence Manual", p 334,
- [11] [http://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Water\\_Resources/MIKEHydro\\_River\\_UserGuide.pdf](http://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Water_Resources/MIKEHydro_River_UserGuide.pdf).
- [12] Mike Powered by DHI "Mike Hydro River, User Guide", p310
- [13] [http://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Water\\_Resources/MIKEHydro\\_River\\_UserGuide.pdf](http://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Water_Resources/MIKEHydro_River_UserGuide.pdf).
- [14] S. Patro, C. Chatterjee, S. Mohanty, R. Singh, N. S. Raghuwanshi, "Flood Inundation Modeling using MIKE FLOOD and Remote Sensing Data" *J. Indian Soc. Remote Sens.* March 2009. 37:107–118.
- [15] L. Timbre, P. Willems, J. Berlamont, "Validation of a quasi-2D hydrodynamic river flood model using historical and ERS-SAR derived flood maps", *XXXI IAHR CONGRESS*, September 11~16, 2005, Seoul, Korea, pp 137-147
- [16] R. Pich, "Method for limiting freshet levels and controlling floods ", Patent# WO 2014199037 A1., 2014.