

PROPOSITION DE THÈSE

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2020

Fiche d'identité

Titre (français)	L'inversion robuste comme outil d'analyse du risque – application aux défaillances d'ouvrages (naturels et artificiels) dans les analyses probabilistes d'inondation
Mots-clés (5 max)	Incertitude, data science, apprentissage adaptatif, risque d'inondation
Titre (anglais)	Robust inversion as a new tool support risk analysis – application to failure of defences (artificial and natural) for probabilistic flooding analysis
Keywords (5 max)	uncertainty, data science, adaptive learning, flooding risk

Directeurs de thèse	Le Riche Rodolphe / Didier Rullière
Encadrant BRGM	Jeremy Rohmer
Encadrant IRSN	Yann Richet
Laboratoire d'accueil de rattachement	CNRS LIMOS à Mines de Saint-Etienne
Ecole Doctorale	ED 488 SIS

Contacts :

merci d'utiliser l'adresse suivante qui est lue par les 4 encadrants,
phd.math4flood@listes.emse.fr

Date limite de candidature : 31 mai 2020

Résumé

Le risque d'inondation est aggravé par la rupture d'ouvrages de défenses naturels (e.g. cordons dunaires) ou artificiels (digues). La prise en compte de ces phénomènes dans les simulations numériques est souvent basée sur un nombre limité de scénarios (<10) décrivant les conditions de rupture (localisation spatiale, temps d'initiation, hauteur d'affaissement, etc.). L'objectif de la présente thèse est de développer une procédure systématique et exhaustive en inversant l'ensemble de toutes les conditions de rupture qui mènent à une inondation donnée (« excursion set ») à l'aide de simulateurs numériques du risque. Afin de limiter le coût de calcul, la thèse se basera sur la combinaison de métamodèles (i.e. krigeage / processus gaussien) et de procédures d'apprentissage adaptative (active learning) spécifiquement développées pour l'identification d'excursion set. L'objectif de la thèse est d'améliorer cette combinaison sur deux aspects: (1) sur le plan méthodologique, en rendant l'inversion robuste par la prise en compte et le traitement d'un grand nombre de variables dites de « nuisance » aléatoires et rares comme les paramètres décrivant les forçages naturels ou les incertitudes inhérentes au code de calcul; (2) sur le plan opérationnel, en évaluant comment un telle procédure peut aider à la gestion du risque en particulier en abordant les questions portant sur la visualisation de l'excursion set en haute dimension ainsi que la désagrégation de l'incertitude sur l'inversion. La thèse se basera sur deux cas

d'applications : submersion marine (BRGM) et fluvial (IRSN). La thèse s'inscrit dans le cadre de la version 2 de la chaire en mathématiques appliquées OQUAIDO (<http://chaire-mathematiques-appliquees.emse.fr/>).

Summary

The risk of coastal flooding is aggravated by the failure of coastal defences (either natural like dunes or artificial like dykes). In numerical simulations, such processes are typically accounted for by defining a set of scenarii describing for instance the possible spatial location, time duration, erosion height / width of the failures. In the current PhD, we propose to develop a systematic mathematical procedure to characterize the possible combinations of conditions (named excursion set) that lead to flooding. It involves the inversion of the numerical models that simulate the floods. In order to alleviate the computational cost of this task, we build upon the combination of metamodelling techniques (kriging/Gaussian processes) and active learning specifically dedicated to the estimation of excursion set. The PhD aims at improving the existing methods in two ways: (1) methodologically, by making the inversion robust to extreme-but-rare events and accounting for uncertainties in the numerical models; (2) operationally, by assessing how this approach can help in the communication and the management of the risk through better high dimensional visualization of the excursion set and the decomposition of the uncertainties. The application cases will focus on marine (BRGM) and river (IRSN) flooding. The PhD candidate will participate to the continuation of the OQUAIDO collaborative project (<http://chaire-mathematiques-appliquees.emse.fr/>) and benefit from numerous interactions with other researchers in the same scientific domain.

Sujet de thèse

1.1 Problématique scientifique

La défaillance d'ouvrages côtiers naturels (comme les cordons dunaires) ou artificiels (comme les ouvrages de protection côtières) est un facteur aggravant du risque d'inondation marine. Plusieurs évènements passés en attestent. Dans le contexte français citons deux exemples, (1) la tempête Xynthia (2010) avec la rupture du cordon dunaire du marais d'Yves, proche de La Rochelle (voir l'étude BRGM par Muller et al., 2016) ; (2) l'impact de la succession des tempêtes de l'hiver 2013-2014 sur la côte Aquitaine (Bulteau et al. 2014, rapport BRGM 63797). Au niveau européen, citons la combinaison de ruptures d'ouvrages artificiels et naturels aux Pays-Bas avec l'exemple de la tempête de 1953 (e.g. Jonkman et al., 2008). Enfin au niveau international, citons l'exemple de Katrina en 2005 à la Nouvelle Orléans (e.g. Sills et al., 2008). Ce facteur est un point majeur non seulement pour l'analyse du risque d'inondation pour le présent mais également pour les projections futures dans un contexte de changement climatique (e.g., Buchanan et al., 2016 ; Lincke et Hinkel, 2018; Rohmer et al., 2019).

Afin de prendre en compte ces processus de rupture (généralisée ou ponctuelle), les modélisations du risque d'inondation se basent souvent sur des scénarios, p.e. en supposant la location et la date de déclenchement de la rupture ainsi que ses caractéristiques comme la hauteur d'affaissement de l'ouvrage, la largeur, la durée de rupture, etc. Voir la section 6.4.5 du rapport BRGM/RP-64807-FR sur la caractérisation de l'aléa de submersion marine dans le cadre des PPRL du bassin d'Arcachon. Ces scénarios sont souvent basés sur les retours d'expériences (comme les brèches historiques, voir l'étude BRGM par Muller et al.,

2016) ou sur des valeurs forfaitaires définies réglementairement. Ce constat est également valable pour les analyses probabilistes du risque d'inondation comme celles réalisées aux Pays-Bas où les caractéristiques de la rupture (une fois initiée) sont supposées sur la base d'informations d'experts (voir p.e. Sect. 3, page 91 de Apel et al. 2006 pour un contexte côtier ainsi que Curran et al., 2019 pour un contexte fluvial).

Les bonnes pratiques de modélisation actuelles, bien que simples et efficaces, se trouvent forcément limitées en ne focalisant l'analyse que sur un nombre restreint de scénarios i.e. ils ne couvrent pas toutes les combinaisons possibles ; de nombreuses conditions définissant la rupture mais également toutes des conditions de forçages décrivant l'aléa naturel ainsi que des incertitudes inhérentes aux modélisations du risque d'inondation (coefficients de Manning, choix du MNT, etc.) ne sont pas pris en compte.

Dans cette thèse, nous cherchons à développer une nouvelle approche mathématique et numérique afin de faciliter l'analyse des conditions de ruptures. L'objectif est de mieux cadrer / contraindre les scénarios de défaillances en entrée des simulations numériques du risque d'inondation maritime (pour le BRGM) et fluvial (pour l'IRSN). L'originalité de la proposition est de se baser sur une inversion systématique et exhaustive de toutes les conditions de rupture qui mènent à une inondation aux caractéristiques données (étendue spatiale, hauteur d'eau à terre, etc.), i.e. l'objectif est d'identifier l'ensemble de toutes ces conditions. Cet ensemble est nommé « ensemble d'excursion » et est schématiquement représenté sur la Figure 1A. Sur cette figure, les configurations *c* et *b* mènent systématiquement à l'inondation alors que la configuration *a* n'y mène pas.

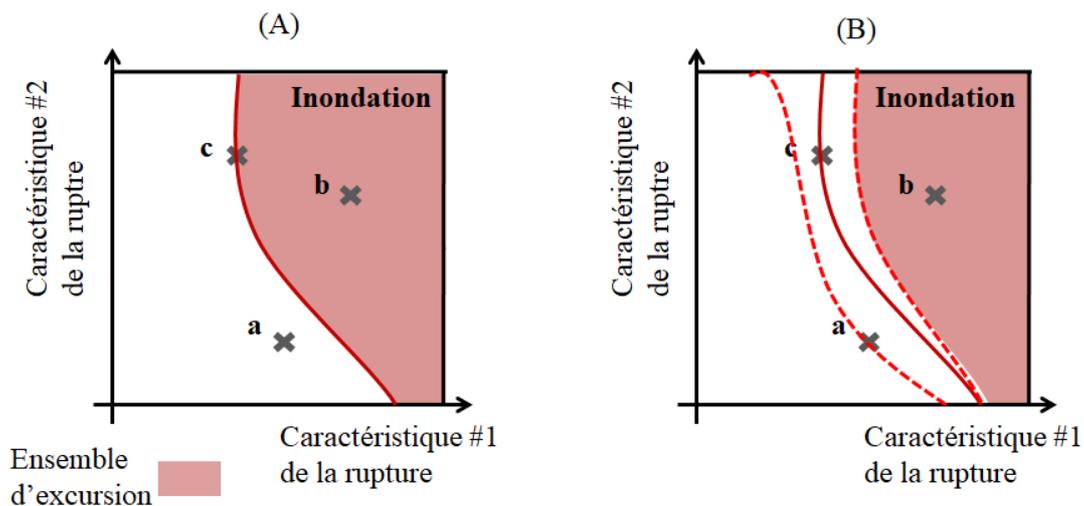


Figure 1. Concept d'ensemble d'excursion identifiant les caractéristiques de la rupture qui mènent à une inondation donnée : (A) sans incertitude ; (B) en intégrant la variabilité des forçages naturels (la frontière n'est plus certaine mais varie entre les deux frontières en pointillés).

1.2 Questions de recherche principales

L'inversion de l'ensemble d'excursion soulève les questions de recherche suivantes :

(Q1) comment mettre en œuvre une démarche d'inversion alors que chaque appel au simulateur numérique a un temps de calcul très important, i.e. typiquement plusieurs heures ? L'inversion exige plusieurs milliers d'appels au simulateur, ce qui est incompatible avec cet ordre de grandeur du temps de calcul.

(Q2) comment réaliser cette inversion en tenant compte du caractère aléatoire et rare des forçages naturels ? Par exemple dans le cas côtier, l'occurrence de la combinaison des caractéristiques de vagues et de niveaux d'eau menant à une inondation côtière est un phénomène de faible probabilité, ce qui exige l'emploi de méthodes statistiques appropriées. En d'autres termes, la frontière rouge de l'ensemble d'excursion sur la Figure 1A est associée à une incertitude liée aux forçages ainsi qu'aux paramètres de la simulation. La Figure 1B montre que si ces incertitudes ne sont pas prises en compte, la configuration a identifiée comme « sans risque » sur la Figure 1A mène à une inondation sur la Figure 1B.

(Q3) comment rendre opérationnel ce type d'analyse ? Sur la Figure 1A,B, l'ensemble d'excursion peut être directement visualisé car en 2D. Or en réalité, le nombre de caractéristiques est supérieur à 2 et exige de visualiser l'ensemble d'excursion dans des dimensions supérieures à 4. En intégrant les incertitudes sur l'ensemble d'excursion, une procédure de désagrégation de ces incertitudes est nécessaire pour analyser les contributions respectives pour faciliter la communication et la priorisation des futures analyses.

1.3 Etat de l'art et approches envisagées

Nous basons l'approche d'inversion sur les méthodes modernes de « data science » adaptées aux expériences numériques, i.e. l'analyse statistique des résultats de simulations coûteuses en temps de calcul à partir des techniques dites de « métamodélisation ».

De telles méthodes statistiques ont été appliquées avec succès au BRGM pour l'analyse du risque de submersion marine à l'aide de simulateur numérique coûteux en temps de calcul dans différents contextes : cyclones (Rohmer et al., 2016), tempêtes en métropole (Rohmer et al., 2018a) et tsunamis (Rohmer et al., 2018b), mais également dans d'autres domaines comme le risque sismique (Sochala et De Martin, 2018), l'érosion des sols (Rousseau et al., 2012).

Le caractère ambitieux vient de l'inversion qui se veut exhaustive : cela exige d'être économe en nombre d'appels au simulateur. Pour répondre à cette exigence, des techniques d'apprentissage actif (« active learning »), i.e. d'optimisation des scénarios de simulation à réaliser ont été développées comme l'algorithme « Stepwise Uncertainty Reduction SUR » (Bect et al. (2012)), qui ont été mis en place dans Rohmer et Idier (2012) sur un cas d'inondation marine à Palavas.

Plusieurs améliorations de cet algorithme ont été apportées notamment par Chevallier et al. (2014) ainsi que par Azzimonti et al. (2016). Plus récemment, des éléments de réponses ont été apportés aux questions

- Q1 (Lopez-Lopera et al., 2019) en intégrant des informations d'expert (p.e. monotonie, bornes de variation) dans la construction des métamodèles ;
- Q3 (Azzimonti et al., 2019) en proposant les « profils d'extrema » dans le cadre de l'approche SUR mais en se restreignant à des analyses 1d (voire 2d) des variables menant au risque.

La question de l'intégration de l'incertitude (Q2) reste cependant ouverte. Des premiers éléments ont été apportés dans le cadre de la thèse de Clément Chevalier (thèse IRSN dans le cadre de ReDice, encadrant Yann Richet membre de l'équipe encadrante de cette nouvelle thèse). Cette approche d'inversion est dite « robuste » dans le sens où elle intègre toutes les sources d'incertitudes non contrôlables (forçages naturels, incertitudes du modèle, etc.). Elle a été récemment appliquée par l'IRSN sur un cas d'inondation fluvial (Bacchi et Richet, 2019), mais plusieurs aspects restent à développer :

- Intégration des informations réalistes sur les lois de probabilités et la dépendance des variables de forçage ; en particulier sur leur caractère rare ;
- Traitement du nombre de sources d'incertitudes (>10) ;
- Désagrégation des contributions relatives de chaque source d'incertitude.

1.4 Avancées scientifiques et techniques espérées

Les travaux préliminaires (visualisation en haute dimension de l'ensemble d'excursion et inversion robuste) réalisés par l'IRSN et par le BRGM dans la chaire OQUAIDO constituent le socle de départ pour aborder la question Q2 et aller plus loin sur la question Q3.

Sur le **plan méthodologique**, les avancées espérées sont :

A1 : Prise en compte du caractère extrême et de la dépendance d'un grand nombre d'incertitudes dans l'inversion robuste

A2 : Quantifier et désagréger l'incertitude sur l'ensemble d'excursion

A3 : Visualisation de l'ensemble d'excursion « probabilisé » en haute dimension

Sur le **plan applicatif**, les avancées espérées sont :

A4 : faciliter la définition des scénarios de défaillances d'ouvrages dans les simulations du risque d'inondation (marine pour le BRGM, fluvial pour l'IRSN)

A5 : évaluer la pertinence de l'ensemble d'excursion pour donner une vision concise et exhaustive d'un facteur essentiel à la gestion du risque d'un territoire donné.

Partenariat

La proposition de thèse se construit autour de trois partenaires, à savoir :

- Le BRGM – équipe DRP/R3C ;
- L'IRSN - équipe BERIG ;
- Le laboratoire LIMOS (UMR CNRS 6158).

Les développements numériques réalisés seront, le cas échéant, distribuables en open source.

Profil de candidatures souhaitées

Le candidat devra :

- Etre titulaire d'un M2R ou d'un diplôme d'ingénieur (formation en mathématiques appliquées : probabilités/statistiques, machine learning, data science, optimisation...)
- Maîtriser au moins un langage de programmation « scientifique » de haut niveau (type Python, Matlab/Octave, R).
- Avoir un bon niveau en anglais écrit et parlé.

Si possible avoir :

- Aptitudes personnelles souhaitées : autonomie, ouverture d'esprit, sens du travail en équipe, ...

The candidate should:

- Hold a master's degree in applied mathematics: probability/statistics, machine learning, data science, optimization,...
- Have a strong background in scientific programming using (Python, Matlab/Octave, R for example)
- Have English skills allowing scientific communication (oral/reading/writing)

References

- Apel, H., Thieken, A. H., Merz, B., & Blöschl, G. (2006). A probabilistic modelling system for assessing flood risks. *Natural hazards*, 38(1-2), 79-100.
- Azzimonti, D., Ginsbourger, D., Rohmer, J., & Idier, D. (2019). Profile Extrema for Visualizing and Quantifying Uncertainties on Excursion Regions: Application to Coastal Flooding. *Technometrics*, 1-27.
- Azzimonti, D., Bect, J., Chevalier, C., & Ginsbourger, D. (2016). Quantifying uncertainties on excursion sets under a Gaussian random field prior. *SIAM/ASA Journal on Uncertainty Quantification*, 4(1), 850-874.
- Yann Richet, Vito Bacchi (2019). Using an inversion algorithm for the optimization of civil defense against flooding: application to bi-dimensional numerical model of the Garonne River. *Frontiers in Environmental Science*. accepted
- Bect, J., Ginsbourger, D., Li, L., Picheny, V., & Vazquez, E. (2012). Sequential design of computer experiments for the estimation of a probability of failure. *Statistics and Computing*, 22(3), 773-793.
- Buchanan MK, Kopp RE, Oppenheimer M, Tebaldi C (2016) Allowances for evolving coastal flood risk under uncertain local sea-level rise. *Clim Chang* 137(3–4):347–362
- Chevalier, C., Bect, J., Ginsbourger, D., Vazquez, E., Picheny, V., & Richet, Y. (2014). Fast parallel kriging-based stepwise uncertainty reduction with application to the identification of an excursion set. *Technometrics*, 56(4), 455-465.
- Curran, A., de Bruijn, K. M., Klerk, W. J., & Kok, M. (2019). Large Scale Flood Hazard Analysis by Including Defence Failures on the Dutch River System. *Water*, 11(8), 1732.
- Jonkman, S. N., Kok, M., & Vrijling, J. K. (2008). Flood risk assessment in the Netherlands: A case study for dike ring South Holland. *Risk Analysis: An International Journal*, 28(5), 1357-1374.
- Muller, H., Van Rooijen, A., Idier, D., Pedreros, R., & Rohmer, J. (2016). Assessing storm impact on a French coastal dune system using morphodynamic modeling. *Journal of Coastal Research*, 33(2), 254-272.

Lopez-Lopera, Andres F., Bachoc, Francois, Durrande, Nicolas, Rohmer, Jeremy, Idier, Deborah, and Olivier Roustant (2019) Approximating Gaussian Process Emulators with Linear Inequality Constraints and Noisy Observations via MC and MCMCIn : MCQMC 2018.

Rohmer, J., & Idier, D. (2012). A meta-modelling strategy to identify the critical offshore conditions for coastal flooding. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(9), 2943-2955.

Rohmer, J., Le Cozannet, G., & Manceau, J. C. (2019). Addressing ambiguity in probabilistic assessments of future coastal flooding using possibility distributions. *Climatic Change*, 1-15.

Rousseau, M., Cerdan, O., Ern, A., Maître, O.L., Sochala, P.: Study of overland flow with uncertain infiltration using stochastic tools. *Adv. Water. Resour.* 38, 1–12 (2012)

Sills, G. L., Vroman, N. D., Wahl, R. E., & Schwanz, N. T. (2008). Overview of New Orleans levee failures: lessons learned and their impact on national levee design and assessment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(5), 556-565.

Sochala, P., & De Martin, F. (2018). Surrogate combining harmonic decomposition and polynomial chaos for seismic shear waves in uncertain media. *Computational Geosciences*, 22(1), 125-144.