

NOTE 2 bis

Modélisation des risques d'inondation

Les inondations sont généralement caractérisées par l'un des trois types suivants : fluviale (inondation fluviale), pluviale (eau de surface ou crue soudaine) ou côtière¹. Chaque type peut avoir des impacts sur les personnes, les biens et les gouvernements, et pour chaque type, les mécanismes de financement des risques climatiques et de catastrophe (CDRF) peuvent renforcer la résilience financière face à des risques qui ne peuvent être atténués ou évités de manière rentable. Néanmoins, ces types d'inondations se manifestent de manière très différente, et ces différences affectent à la fois l'approche de modélisation des risques adoptée et les mécanismes de financement des risques qui seront les plus réalisables et les plus efficaces.

Des trois types d'inondation mentionnés ci-dessus, deux sont les plus courants :



Photo Credit : Dibakar Roy/pexels

Inondations fluviales. De telles inondations se produisent lorsqu'une rivière ne peut plus transporter le volume d'eau dans son canal et qu'il y a débordement. La gravité de ces inondations est déterminée par une série de facteurs, notamment le volume total des précipitations (ou la fonte des neiges) dans le bassin versant, les caractéristiques du bassin versant (p. ex., les conditions d'humidité du sol, le type de sol, le type de couverture terrestre et la topographie), l'état des eaux souterraines, la capacité du réseau de chenaux fluviaux à transporter l'eau (p. ex., la forme des canaux, les blocages, etc.) et toute infrastructure de protection contre les inondations et de gestion de l'eau en place (p. ex., barrages, digues).



Photo Credit : Dibakar Roy/pexels

Inondations pluviales. À la suite d'une crue soudaine et d'un ruissellement pluvial, les inondations pluviales se produisent lorsque des pluies de haute intensité tombent sur une zone spécifiée et dépassent la capacité de drainage du sol et/ou des systèmes de drainage. Alors que les inondations pluviales peuvent créer des « étangs » dans de petites dépressions, sur un sol escarpé, elles peuvent provoquer un écoulement rapide de l'eau sur le sol.

Ces deux types d'inondations peuvent se produire indépendamment l'une de l'autre, mais les inondations entraînent souvent des inondations pluviales et fluviales, et il peut être difficile de différencier leurs impacts.

À l'instar des modèles de catastrophe pour d'autres risques, les modèles de risque d'inondation pour les applications CDRF combinent des modules sur l'aléa, l'exposition, la vulnérabilité et la perte (voir la note 2 sur la modélisation des risques de catastrophe pour plus de détails). Les modules d'aléa pour la modélisation des crues fluviales et pluviales sont décrits plus en détail dans les deux sections suivantes. Les modules d'exposition et de vulnérabilité sont également des facteurs importants à prendre en compte pour déterminer la faisabilité de la modélisation des risques d'inondation et de l'assurance, ainsi que pour la collecte et la préparation des données :

¹ Il existe également d'autres sources d'inondations, notamment les ruptures de barrage, les tsunamis, les eaux souterraines, la fonte printanière et les inondations soudaines des lacs glaciaires.



Module d'exposition:

L'un des principaux facteurs à prendre en compte pour le risque d'inondation est la disponibilité de données d'exposition à haute résolution spatiale, car le risque d'inondation peut varier considérablement à des échelles spatiales granulaires (par exemple, dans la même rue, deux maisons peuvent être confrontées à un risque d'inondation fluviale sensiblement différent en fonction de leur distance de la rivière). Ainsi, les données d'exposition pour la modélisation des risques d'inondation doivent être beaucoup plus détaillées que les données pour d'autres risques, tels que les tremblements de terre.



Module de vulnérabilité:

Les types d'impacts modélisés sont importants. Pour les impacts sur les bâtiments et les infrastructures, des courbes de vulnérabilité régionales génériques sont disponibles (p. ex., fonctions de profondeur des dommages causés par les inondations du Centre commun de recherche [CCR²]) ; Mais la vulnérabilité des structures peut varier considérablement en fonction d'une gamme de caractéristiques (par exemple, le nombre d'étages, l'élévation du premier étage, etc.). Pour ces actifs, la vulnérabilité est généralement modélisée en fonction de la profondeur de l'inondation, bien que la vitesse des eaux de crue et la durée de l'inondation puissent également être des déterminants importants des impacts (généralement non pris en compte dans les modèles de catastrophe). En agriculture, le moment des inondations est important pour les impacts, car les cultures sont vulnérables à différentes profondeurs et durées d'inondation à différents stades de leur cycle de vie.



Approches de modélisation de l'aléa d'inondation fluviale

La modélisation des inondations est particulièrement difficile, car les inondations sont un risque très localisé qui peut avoir des répercussions sur les actifs de diverses manières. Les inondations sont fortement influencées par l'environnement bâti et par l'impact des humains sur l'environnement.

En règle générale, les modèles hydrauliques sont utilisés pour comprendre le potentiel d'inondation dans une zone d'intérêt. Ces modèles prennent comme entrée le volume d'eau s'écoulant dans le chenal de la rivière (débit), et ils simulent l'influence des dimensions du canal, de la rugosité et des contrôles de débit sur le mouvement de cette eau. Si le modèle détermine que le volume d'eau entrant dans une section de la rivière dépasse sa capacité possible, le modèle simulera la quantité d'eau qui déborde des berges, les endroits où le débordement se produit et la distribution du débordement sur la base d'un modèle numérique d'élévation (MNT³).

Pour déterminer le débit d'eau dans la rivière, ainsi que le moment et le volume maximal des débits extrêmes, deux approches alternatives sont utilisées :



1 Données historiques basées sur les jauges fluviales

Les jauges fluviales surveillent le débit de l'eau (également appelé débit ou débit fluvial) et permettent l'extrapolation des données historiques à l'aide de techniques statistiques. Cette approche fournit souvent une représentation plus précise des événements, mais nécessite au moins 30 ans de données historiques sur les niveaux d'eau et les débits, qui ne sont souvent pas disponibles dans les pays en développement.

² J. Huizinga et al., Global Flood Depth-Damage Functions : Methodology and the Database with Guidelines, EUR 28552 EN (Office des publications de l'Union européenne, 2017), doi :10.2760/16510, JRC105688.

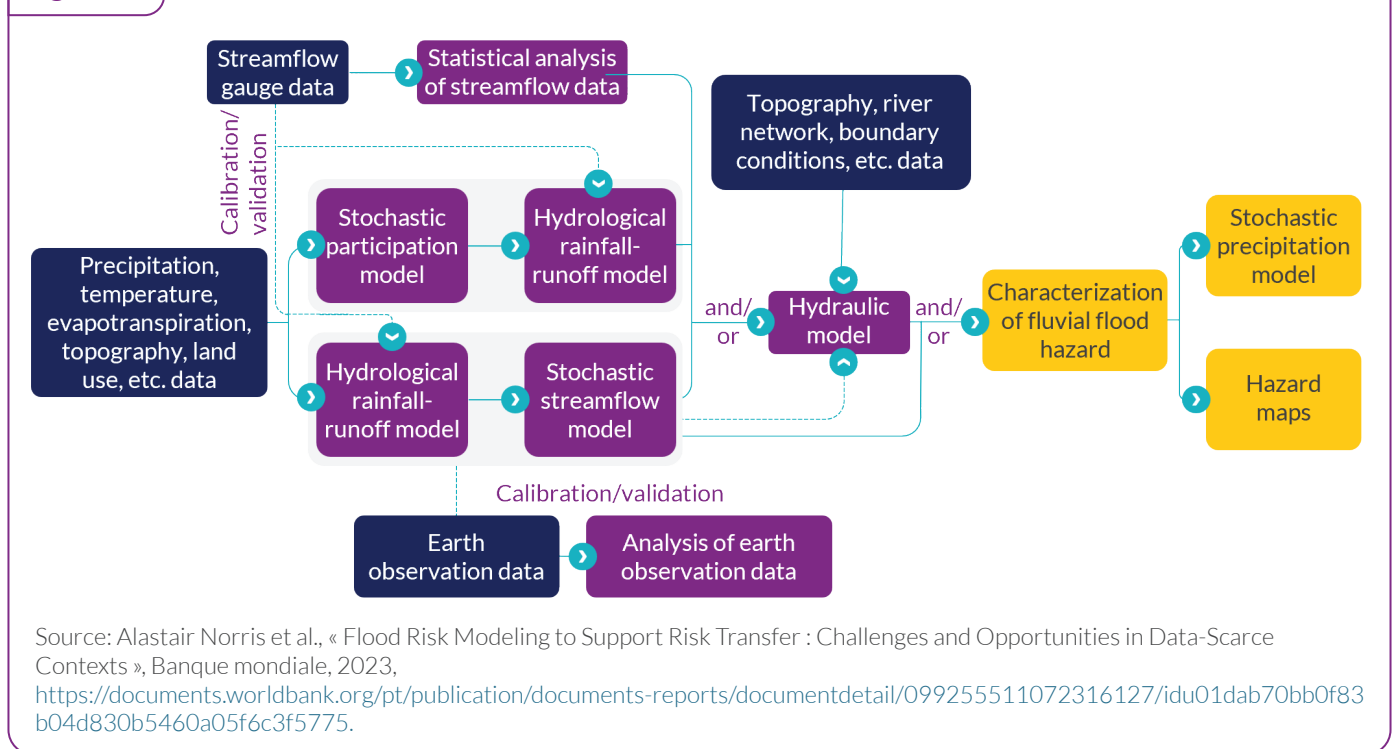
³ Un modèle numérique d'élévation (MNE) est une représentation 3D de la surface de la terre nue d'un terrain représentée sans arbres, bâtiments ou autres objets.



2 Modèles pluie-ruissellement:

Parfois appelés modèles hydrologiques, ils estiment le débit d'eau à partir de données météorologiques (principalement les précipitations et la température) et les caractéristiques des bassins versants. Pour ce faire, ils acheminent l'eau qui se trouve dans chaque bassin versant vers la rivière correspondante, mais ils s'appuient sur des représentations informatisées des bassins versants, qui sont souvent trop simplifiées.

Figure 1: Exemples d'approches pour caractériser l'aléa fluvial



Source: Alastair Norris et al., « Flood Risk Modeling to Support Risk Transfer : Challenges and Opportunities in Data-Scarce Contexts », Banque mondiale, 2023, <https://documents.worldbank.org/pt/publication/documents-reports/documentdetail/099255511072316127/idu01dab70bb0f83b04d830b5460a05f6c3f5775>.



Approches de modélisation de l'aléa d'inondation pluviale

La modélisation des inondations pluviales suit une approche similaire à la modélisation fluviale, mais se concentre sur l'estimation du volume d'eau qui s'accumule aux points bas d'une zone. Le modèle cherche à identifier la quantité de pluie qui se produit sur différentes durées avec une probabilité donnée. Cette information fournit une gamme d'événements de précipitations possibles et sert d'entrée au modèle hydraulique, qui simule les profondeurs d'inondation pour différents événements de période de retour.

Dans les pays où les inondations sont généralement limitées à la zone où les précipitations ont eu lieu (par exemple, les petits États insulaires sans grands bassins versants ou les longs réseaux fluviaux qui transportent les précipitations sur de longues distances), les inondations pluviales sont souvent le principal type d'inondation.

Selon le cas d'utilisation, dans certains cas, il peut ne pas être possible de modéliser les profondeurs d'inondation associées aux inondations pluviales. Au lieu de cela, l'analyse des inondations pluviales se concentrerait principalement sur la modélisation des précipitations elles-mêmes. Cette approche de modélisation des inondations pluviales est parfois appelée « précipitations excessives », car elle prend en compte le volume de pluie au-dessus duquel des inondations seraient attendues dans la même zone.



Nouvelles approches de la modélisation des inondations

Deux innovations récentes dans la modélisation des inondations méritent d'être mentionnées dans cette note. Le premier est l'avènement des modèles mondiaux d'inondation, qui combinent de nouvelles approches en hydrologie et en apprentissage automatique pour prédire le débit potentiel de l'eau dans les régions qui manquent de données. Ces modèles fonctionnent en sélectionnant des régions qui sont similaires à la région d'intérêt en termes de climat et de topographie et pour lesquelles des données détaillées existent, puis en transférant ces connaissances à la région où les données sont rares. Bien que cette approche offre d'importantes possibilités d'analyser des régions qui n'avaient pas encore été modélisées, il est important de noter que ces modèles n'ont peut-être pas été calibrés et validés localement pour tous les pays. La nécessité d'une validation est un facteur important à prendre en compte lors de l'application des données de ces modèles.

La deuxième innovation est l'utilisation des données d'observation de la Terre (parfois appelées données de télédétection ou, selon leur source, données satellitaires) pour soutenir l'évaluation et la surveillance des risques d'inondation. Les données d'OT ont un grand potentiel pour l'avenir : elles sont disponibles à une échelle plus rentable que n'importe quelle mesure localisée, elles peuvent estimer divers paramètres clés (étendue des précipitations, étendue des inondations, etc.), et leur précision et leur résolution s'améliorent rapidement. Les données d'OT constitueront un domaine de recherche important dans les années à venir, d'abord pour la surveillance des inondations, puis pour fournir des séries chronologiques historiques permettant de déterminer les profils de risque d'inondation, en particulier pour les événements dont les périodes de retour sont plus courtes, où les modèles sont moins précis. Cependant, les données d'observation de la Terre présentent certaines limites clés, notamment des passages peu fréquents (lorsque le satellite observe un endroit donné), une détection incorrecte de l'inondation (en raison de problèmes de précision des capteurs, de traitement et d'interprétation des images) et une couverture géographique limitée. Les approches fondées sur l'OT peuvent également être appliquées conjointement avec des approches utilisant d'autres types de données et de modélisation ; voir l'encadré 1 pour l'exemple du produit d'assurance paramétrique SEADIF (Southeast Asia Disaster Risk Insurance Facility).



Applications de la modélisation des risques d'inondation au CDRF

La modélisation des risques d'inondation est un outil essentiel pour éclairer le financement des risques climatiques et de catastrophes liées aux inondations, du diagnostic initial à l'élaboration et à la mise en œuvre des instruments CDRF (voir note 1). L'objectif de la modélisation influencera le choix de l'approche, en particulier pour les modules d'exposition et de vulnérabilité (p. ex., modélisation des dommages aux bâtiments par rapport aux impacts sur les cultures par rapport aux personnes touchées).

Dans le cadre de l'élaboration d'instruments de transfert des risques d'inondation (p. ex., l'assurance souveraine contre les inondations), la modélisation des risques d'inondation est nécessaire pour éclairer la tarification et la souscription des instruments par le marché. Les assureurs peuvent utiliser la modélisation des risques d'inondation pour éclairer la tarification basée sur les risques ; voir l'encadré 2 pour l'exemple du modèle d'inondation au Népal. Ils peuvent également utiliser la modélisation pour surveiller les accumulations potentielles, déterminer le montant de capital qu'ils pourraient avoir besoin de détenir et éclairer les décisions d'achat de réassurance. Dans le cas des instruments CDRF qui utilisent des indices paramétriques pour le déclenchement, les modèles d'inondation sont également parfois utilisés dans les systèmes de déclenchement en temps quasi réel ; voir encadré 1 pour l'exemple du produit d'assurance paramétrique SEADRIF.

Encadré 1.**Modélisation des risques et indice paramétrique utilisés pour le produit SEADRIF en République démocratique populaire du Laos**

Le produit d'assurance souveraine contre les inondations SEADRIF (Southeast Asia Disaster Risk Insurance Facility) au Laos utilise un indice paramétrique basé sur une combinaison de modélisation hydrologique quotidienne de l'étendue des inondations, d'estimations de l'étendue des inondations dérivées de données satellitaires et de données de jaugeage. Le produit couvre plusieurs types d'inondations, y compris les inondations fluviales (rivières), pluviales (eaux de surface), côtières et dues aux marées. L'indice paramétrique utilisé pour déterminer les paiements en vertu de la police d'assurance sur la base du nombre estimé de personnes touchées. Une structure de déclenchement paramétrique échelonnée est utilisée, avec différents niveaux de paiement pour les événements modérés et graves.

Un outil opérationnel de surveillance des inondations a été mis au point pour surveiller les inondations et évaluer si une inondation a déclenché la police d'assurance. L'outil combine une gamme de sources de données, comme décrit ci-dessous et illustré dans Figure 2.

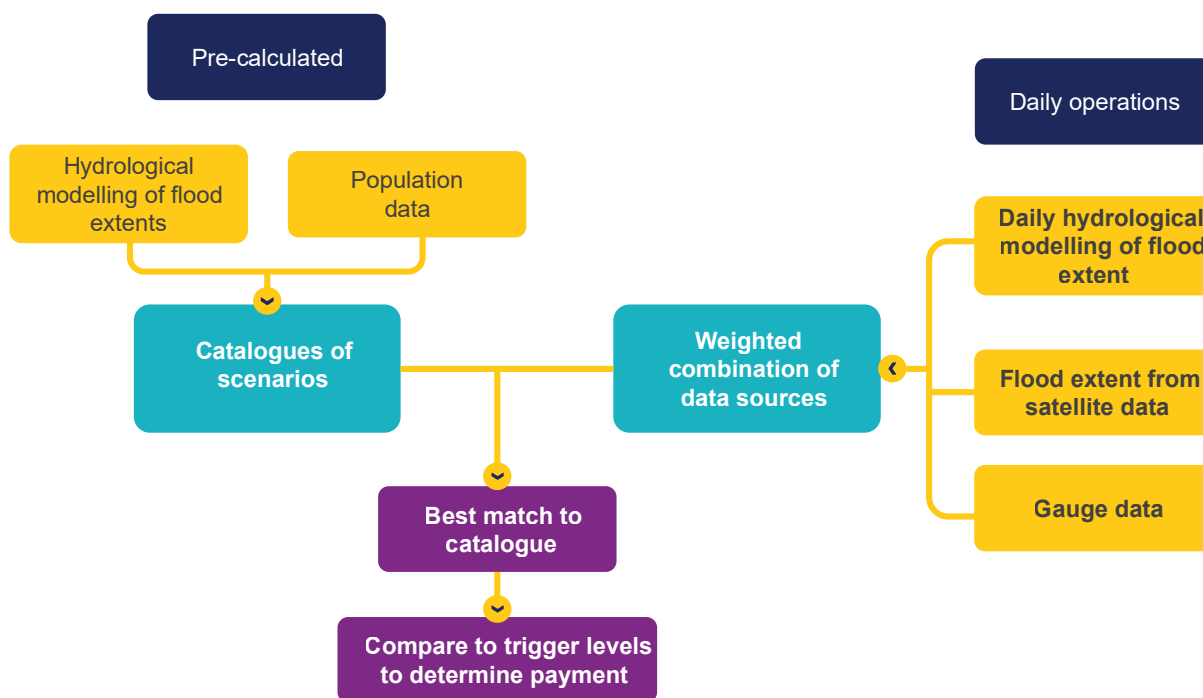
**Une combinaison pondérée de sources de données en temps quasi réel :**

- Empreintes de l'étendue des inondations dérivées des données satellitaires Sentinel-1 de l'Agence spatiale européenne
- Mesures locales en temps réel des jauges fluviales et côtières (p. ex., niveau de l'eau)
- Simulations à partir de la modélisation hydrologique quotidienne de l'étendue des inondations

**Catalogues de scénarios précalculés :**

- Un catalogue de cartes de profondeur d'inondation modélisées pré-simulées, à partir desquelles l'outil sélectionne la carte la plus représentative de l'événement pour des sous-zones et des types d'inondation individuels, en fonction des données de jauge disponibles, des simulations et des données satellitaires décrites ci-dessus
- Cartes de population maillées, qui sont des cartes d'inondation superposées pour estimer le nombre total de personnes touchées pour chacun des scénarios

Figure 2:

Vue d'ensemble des données et des modèles utilisés pour l'assurance paramétrique contre les inondations SEADRIF

Source: Karen Whittingham, « Renforcer la résilience financière face aux risques d'inondation en Asie du Sud-Est », 24 octobre 2023, JBA Risk Management, <https://www.jbarisk.com/products-services/consultancy/our-work-around-the-world/building-financial-resilience-to-flood-risk-in-south-east-asia/>.

SEADRIF a également développé un modèle stochastique pour permettre la modélisation du profil de risque, qui a fourni les informations nécessaires à la tarification du produit. Le modèle a été comparé aux événements historiques pour s'assurer qu'il représentait correctement les données utilisées pour l'indice paramétrique et qu'il s'alignait avec celles-ci.

Encadré 2.**Modèle d'inondation pour les applications d'assurance au Népal**

Contexte et justification : Le Népal est très exposé aux risques d'inondation en raison de son climat de mousson et de sa topographie accidentée. Au cours des 10 dernières années, le Népal a été frappé par de multiples inondations de moindre gravité. Les inondations de 2017 ont touché environ la moitié du pays. L'un des principaux objectifs de l'aide de la Banque mondiale au gouvernement népalais est d'améliorer les données et les analyses disponibles pour comprendre et évaluer les risques de catastrophes naturelles, y compris le risque d'inondation, qui doivent être pris en compte dans le cadre des efforts déployés par le gouvernement pour renforcer la résilience climatique.

En réponse aux limites des archives historiques et aux impacts du changement climatique, la Banque mondiale a travaillé avec ses partenaires, dont Aon Impact Forecasting, pour développer un modèle de pointe des risques d'inondation et de catastrophe pour le Népal, en utilisant autant de données locales que possible. Ce modèle permettra à la Banque mondiale de fournir au gouvernement du Népal des recommandations pour améliorer la résilience financière de ses actifs publics ainsi que des options pour mettre en œuvre une tarification tenant compte du risque soutenue par le régulateur des assurances.

Méthodologie: Le modèle d'inondation au Népal a été développé à l'aide de données locales et d'une modélisation à haute résolution à 30 m et calibré avec les données du Département népalais d'hydrologie et de météorologie provenant de centaines de stations de précipitations. Il couvre les inondations des rivières ainsi que les eaux de surface et les crues soudaines, et il calcule le coût des dommages aux actifs physiques, y compris les actifs résidentiels, commerciaux, industriels et d'infrastructure.

Les fonctions de vulnérabilité ont été développées à partir d'une combinaison d'approches d'ingénierie basées sur les composants, de données sur les dommages et d'enquêtes d'ingénierie recueillies après la catastrophe au Népal. Plus de 15 classes de risque immobilier sont prises en charge, et la vulnérabilité est différenciée par des attributs tels que les matériaux de construction, la hauteur du bâtiment et (particulièrement important pour les pertes dues aux inondations) la présence d'un sous-sol.

Avant que le modèle d'inondation au Népal ne soit finalisé, un vaste exercice de validation a été mené ; il a comparé l'analyse des flux du modèle aux données historiques, ses cartes des risques d'inondation aux cartes d'autres sources et ses résultats aux observations satellitaires (par exemple après les inondations de septembre 2024). Le modèle comprend un modèle complet pour les conditions climatiques actuelles, et il génère également des ensembles d'événements stochastiques supplémentaires pour une gamme de scénarios de changement climatique futurs.

L'observation de la Terre peut-elle remplacer la modélisation des inondations ?

À l'heure actuelle, les données historiques de l'OT sont insuffisantes pour évaluer le risque de tous les événements possibles. Cependant, à mesure que ces séries chronologiques se développent, les données deviennent plus précieuses pour l'élaboration de profils de risque pour des événements plus petits et plus fréquents, où les modèles sont traditionnellement plus faibles. Quelque 20 à 30 ans de données peuvent fournir suffisamment d'informations pertinentes.

Les données d'OT montrent actuellement plus de potentiel dans les zones rurales, où l'environnement bâti interfère moins avec les images captées par les satellites. Certaines approches prometteuses récentes utilisant des données satellitaires MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) ont été testées le long de bassins fluviaux au Bangladesh et en Argentine, et des polices sont maintenant mises sur le marché sur la base d'approches d'OT, en particulier dans les régions où les données sont limitées comme l'Afrique.

Qu'est-ce qui est possible si aucune donnée locale ne peut être obtenue ?

Les modèles mondiaux d'inondation ont permis de modéliser des bassins versants avec des données même très minimales, en supposant que les bassins versants puissent être comparés à d'autres bassins versants à l'échelle mondiale pour lesquels davantage de données sont disponibles. S'il existe un bassin versant suffisamment similaire, les informations provenant de ce bassin versant peuvent être utilisées pour modéliser le bassin versant sans données. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une approche idéale, elle peut au moins fournir une première représentation du risque d'inondation et des pertes potentielles. Les utilisateurs doivent toutefois être conscients que ces modèles n'ont pas nécessairement été validés localement pour tous les pays.

Quelles sont les informations les plus importantes nécessaires à l'élaboration d'un modèle de risque d'inondation ?

Bien que de nombreuses sources de données soient nécessaires pour construire un modèle d'inondation fiable, plusieurs ensembles de données sont particulièrement importants :



Données d'élévation:

Les modèles numériques de terrain (MNT) et les modèles numériques d'élévation (MNE) qui représentent les données d'élévation sont très importants, car les variations de l'élévation du sol sur de courtes distances peuvent grandement influencer la profondeur et l'emplacement de l'inondation. Le cas échéant, des MNE en terre nue doivent être utilisés. Les données LiDAR offrent le plus haut degré de précision, mais elles ne sont souvent pas disponibles pour les pays en développement ; dans ce cas, il convient d'utiliser des MNE par satellite (par exemple, Copernicus GLO-30).



Protection contre les inondations:

Les défenses contre les inondations et les systèmes de drainage peuvent diriger et limiter les inondations dans le domaine modélisé, en particulier dans les zones urbaines. Il peut être difficile de représenter la protection contre les inondations dans n'importe quelle modélisation, car les informations sur l'emplacement de chaque réseau de protection/drainage et la norme de protection qu'il offre sont limitées. Souvent, des hypothèses larges et généralisées sont faites pour estimer la zone défendue et le niveau de protection contre les inondations fluviales. Des tentatives ont été faites pour répertorier les normes de protection contre les inondations ; le plus important à ce jour est FLOPROS⁴.



Observations historiques:

Les observations, par exemple à partir des pluviomètres et des débitmètres, sont essentielles à l'élaboration de modèles réalistes. Dans les pays en développement, les observations sont souvent incomplètes, imprécises ou disponibles sur une courte période, et ne capturent donc pas les événements extrêmes.

⁴ Paolo Scussolini et al., « FLOPROS : une base de données mondiale évolutive sur les normes de protection contre les inondations », Natural Hazards and Earth System Sciences 16 (2016), <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1049-2016>.



Fonctions de vulnérabilité:

elles sont moins souvent disponibles pour les inondations que pour d'autres risques. Dans les contextes développés comme dans les pays en développement, la qualité des données historiques est limitée. Certains modèles utilisent des données basées sur des expériences et des preuves mondiales ou régionales, telles que les données du JRC⁵ ou les courbes de vulnérabilité HAZUS de la Federal Emergency Management Agency (FEMA) des États-Unis. Cependant, leur application à un pays particulier ajoute de l'incertitude. Idéalement, des recherches locales supplémentaires, par exemple sur les caractéristiques locales des bâtiments, devraient être utilisées pour mieux comprendre la relation entre la profondeur des inondations et les dommages.

Comment savoir si je peux faire confiance à un modèle de risque d'inondation ?

Bien que les modèles de risque d'inondation présentent des degrés élevés de biais et d'incertitude potentiels en raison de la complexité du péril modélisé, ils restent des représentations du monde physique et peuvent donc être testés à différents niveaux pour s'assurer qu'ils fournissent des mesures de risque fiables. Tout modèle doit être calibré et validé par rapport aux données historiques, un processus qui peut être particulièrement compliqué dans les économies émergentes et en développement (EMDE), qui manquent souvent de données historiques nécessaires.

Lorsque des données sont disponibles, le modèle doit être validé à la fois au niveau des composantes individuelles (par exemple, en comparant les données modélisées et historiques pour les précipitations/le débit des rivières, la profondeur des inondations, etc.) et au niveau des extrants (par exemple, en comparant la population touchée lors d'événements historiques à la population estimée par le modèle).

Liste de lecture

Norris, Alastair, Stuart Fraser, Michaela Mei Dolk et Olivier Mahul. 2023. « Modélisation des risques d'inondation pour soutenir le transfert de risques : défis et opportunités dans des contextes de pénurie de données. » Banque mondiale.

<https://documents.worldbank.org/pt/publication/documents-reports/documentdetail/099255511072316127/idu01dab70bb0f83b04d830b5460a05f6c3f5775.72316127/idu01dab70bb0f83b04d830b5460a05f6c3f5775>.

⁵ J. Huizinga et al., Global Flood Depth-Damage Functions : Methodology and the Database with Guidelines, EUR 28552 EN (Office des publications de l'Union européenne, 2017), doi :10.2760/16510.