

Influence passée et future du climat et des facteurs socio-économiques sur les risques d'inondation au niveau mondial

Des simulations hybrides

Lenin Del Rio Amador

*Stagiaire postdoctoral,
Département de mathématiques, UQÀM*

Mathieu Boudreault

*Professeur-chercheur en actuariat
Département de mathématiques, UQÀM*

David A. Carozza

*Climate Scientist - Natural Catastrophe Modeler
Definity*

Motivation

- La fréquence et la gravité des inondations augmentent, exigeant une gestion urgente des risques et une vue globale des impacts socio-économiques passés et futurs ;
- Comprendre les déplacements humains nécessite d'intégrer l'interaction entre climat, vulnérabilité et facteurs socioéconomiques ;
- Les modèles hydrologiques sont essentiels pour les applications régionales à haute résolution, mais ils sont limités en raison de leur coût de calcul élevé ;
- Les modèles actuels peuvent ignorer des interdépendances entre les composantes de l'aléa, de la vulnérabilité et de l'exposition ;
- En général, les modèles d'apprentissage automatique de pluie-débit ne peuvent pas prédire facilement les réponses au changement climatique en raison de leur incapacité à extrapoler en dehors du domaine d'apprentissage ;
- Nécessité d'évaluer dans quelle mesure l'évolution des impacts des inondations est déterminée par le changement climatique et dans quelle mesure elle l'est par le développement socio-économique ;
- Nous construisons une plateforme de modélisation flexible qui inclut des facteurs climatiques, environnementaux et socio-économiques afin d'évaluer directement leur influence individuelle sur les déplacements provoqués par les inondations.



Les terrains du Calgary Stampede et le Saddledome sont inondés en raison des fortes pluies à Calgary le 21 juin 2013. **JEFF MCINTOSH / THE CANADIAN PRESS**

Diagramme d'un modèle de risque d'inondation pour le Royaume-Uni

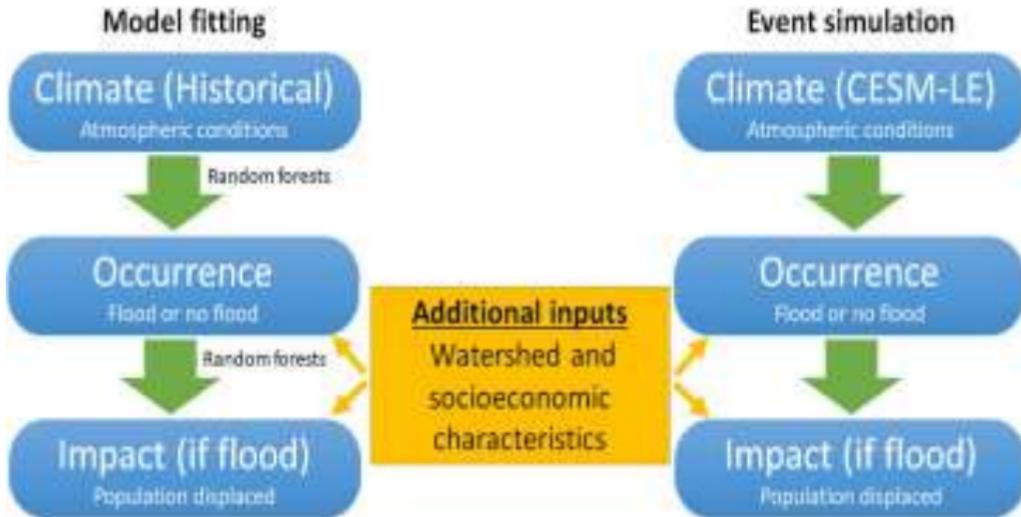


Bates, P. D., Savage, J., Wing, O., Quinn, N., Sampson, C., Neal, J., and Smith, A.: A climate-conditioned catastrophe risk model for UK flooding, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 23, 891–908, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-891-2023>, 2023.

Cadre de modélisation globale des inondations

A global flood risk modeling framework built with climate models and machine learning. Carozza, D. A., & Boudreault, M. (2021). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13, e2020MS002221. <https://doi.org/10.1029/2020MS002221>

Diagramme du modèle



Variable	Resolution
Response variables	
Flood event	4,189 polygons
Population displaced	4,189 polygons
Predictor variables	
Climate predictors	
Precipitation	Daily, 1981-present, 0.16°
Temperature	Daily, 1979-present, 0.5°
Socioeconomic predictors	
Population count	Annual, 30 arcsec
Gross domestic product (PPP) per capita	Annual, 30 arcsec
Watershed characteristics	
Watershed length	4,734 watershed polygons
Watershed width	4,734 watershed polygons
Watershed area	4,734 watershed polygons
Watershed upstream area	4,734 watershed polygons
Latitude of watershed centroid	4,734 watershed polygons
Longitude of watershed centroid	4,734 watershed polygons
Aspect	30 arcsec
Elevation	30 arcsec
Relief	30 arcsec
Slope	30 arcsec
Topographic position index	30 arcsec
Topographic index	15 arcsec
Artificial surface	30 arcsec
Cropland	30 arcsec
Grassland	30 arcsec
Tree-covered areas	30 arcsec
Shrub-covered areas	30 arcsec
Herbaceous vegetation, sparse or regularly flooded	30 arcsec
Mangrove	30 arcsec
Sparse vegetation	30 arcsec
Bare soil	30 arcsec
Stony and glacial	30 arcsec
Water bodies	30 arcsec
Sand	30 arcsec
Silt	30 arcsec
Clay	30 arcsec
Gravel	30 arcsec
Soil soil density	30 arcsec
Global depth to bedrock	30 arcsec
Bedrock porosity	1,284,892 polygons
Bedrock permeability	1,284,892 polygons

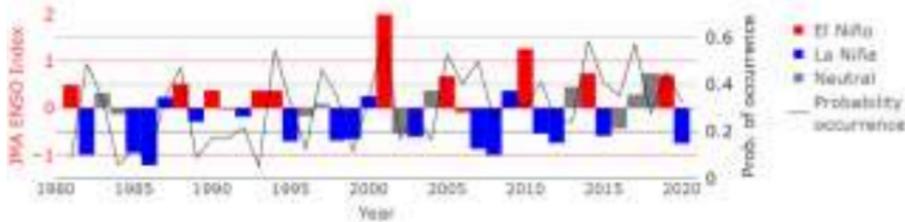
Influence de l'ENSO sur l'occurrence des inondations

Global asymmetries in the influence of ENSO on flood risk based on 1,600 years of hybrid simulations. Del Rio Amador, L., Boudreault, M., & Carozza, D. A. (2023). *Geophysical Research Letters*, 50, e2022GL102027.

<https://doi.org/10.1029/2022GL102027>

- **Indice ENSO JMA** calculé pour chaque sortie CESM-LE : 40 membres, 1981 à 2020 → 1600 années-membres ;
- **Probabilité d'occurrence** calculée en utilisant les mêmes séries du CESM-LE

Exemple a for basin centered at 14.7°N 85.8°W



Couverture mondiale beaucoup plus large de la corrélation significative entre les risques d'inondation et l'ENSO :

55 % avec un niveau de confiance de 95 % vs. 37 % avec un niveau de confiance de 90 %.

Corrélation entre la probabilité d'occurrence et l'ENSO JMA



P. J. Ward et al. (2014): Annual flood sensitivities to El Niño–Southern Oscillation at the global scale. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*



Note : les codes de couleur sont inversés dans les deux cartes.

Prévision de l'occurrence et de l'impact des inondations jusqu'en 2060

Remplacer les données relatives à la population et au PIB par des projections SSP5

NASA SOCIOECONOMIC DATA AND APPLICATIONS CENTER (SEDAC)
A Data Center at NASA's Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS) - Hosted by CIRES at Colorado University

DATA MAPS THEMES RESOURCES SOCIAL MEDIA ABOUT HELP

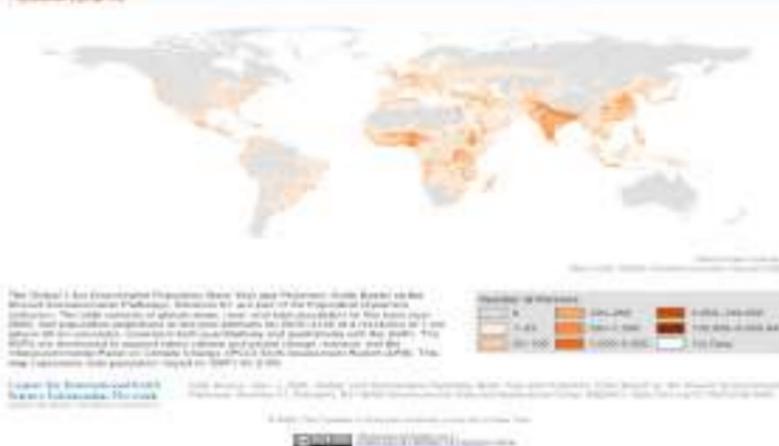
Population Dynamics

Collection Overview: Global 1-km Downscaled Population Base Year and Projection Grids Based on the SSPs, v1.01 (2000-2100)

Data Set (1)

Global 1-km Downscaled Total Population Projection Grids Based on SSP1, v1.01 (2000)

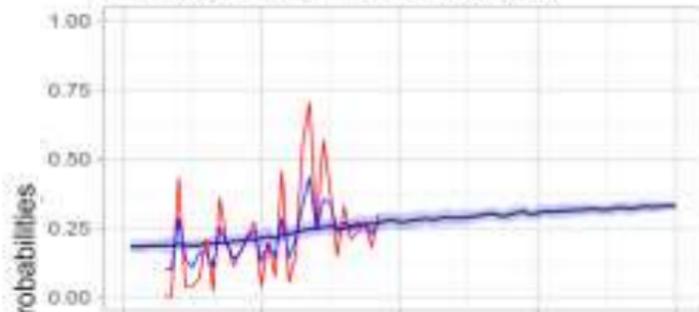
Population: Europe



Prévision de l'occurrence et de l'impact des inondations jusqu'en 2060

Remplacer RF par GLM

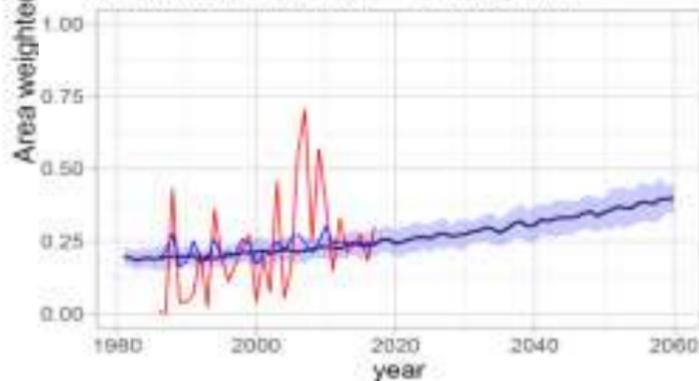
Predictions for HS2 = 3 using RF



HS1.5 - 3



Predictions for HS2 = 3 using LR

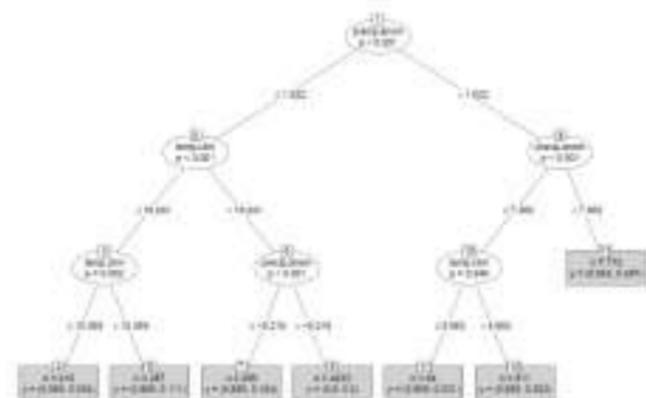
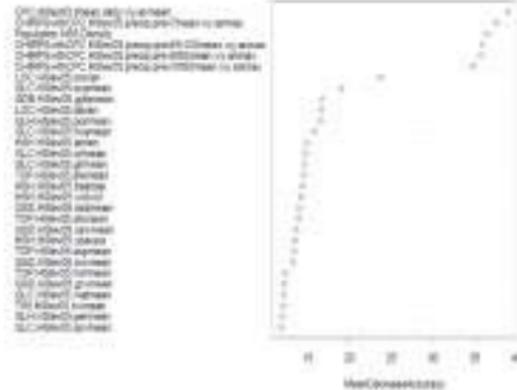


Fraction of basin affected

Hindcasts based on observations

Projection based on CSM-LENS

Var. importance for HS1.3 - 1



Modèle modifié pour les projections jusqu'en 2060

Modèle précédent de forêt aléatoire (RF) et nouvelle version du GLM

In Carozza and Boedts (2021), the RF model gives the function $F(D)$ that relates the response and the predictor variables shown in Table 1 for each HSS basin:

$$\log(D) = F(PD, GDP, P_1, P_2, P_3, P_4, T_1, T_2, T_3, T_4, E_i), \quad (1)$$

where:

D = fraction of population displaced,

PD = population density for the basin,

GDP = GDP per capita for the basin,

P_1 = average precipitation 7 days before a flood event,

P_2 = average precipitation 8 to 30 days before a flood,

P_3 = average precipitation 31 to 60 days before a flood,

P_4 = average precipitation 61 to 120 days before a flood,

T_{1-4} follows the same notation but for temperature.

E_i denotes the 31 time-invariant watershed characteristics shown in Table 1.

Here, we replace the complex function F in Eq. 1 by the following GLM:

$$f(D) = A + \alpha \log(PD) + \beta \log(GDP) + \sum_{i=0}^4 \gamma_i p_i + \sum_{i=0}^4 \delta_i t_i + \sum_i \eta_i E_i + \mu p_1 t_1, \quad (2)$$

where:

A = additive constant,

p_0 = precipitation climatology (mean over 20 years),

p_1 = average precipitation anomaly 7 days before a flood event,

p_2 = average precipitation anomaly 8 to 30 days before a flood,

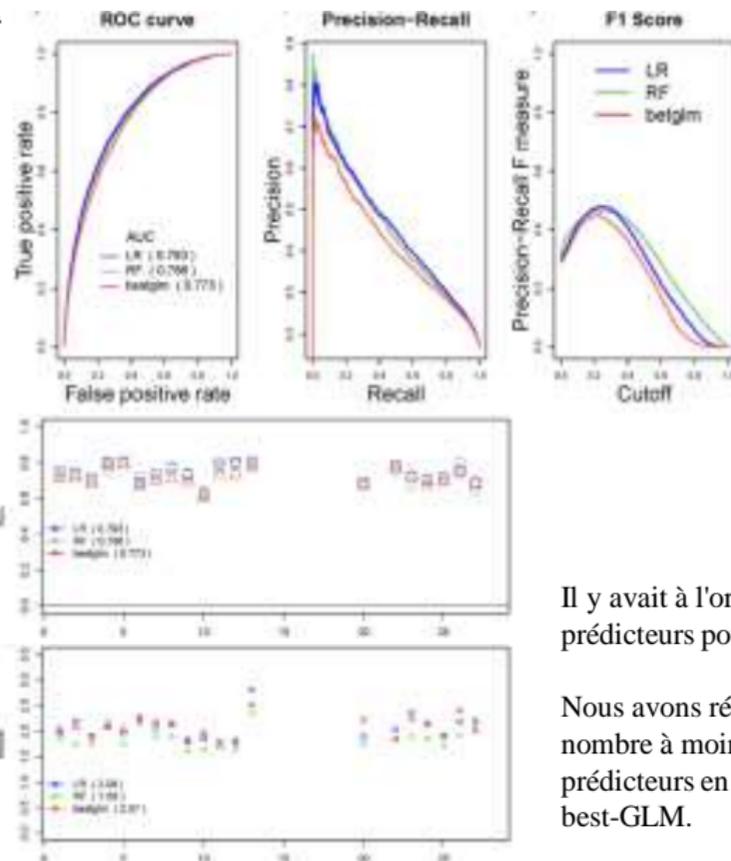
p_3 = average precipitation anomaly 31 to 60 days before a flood,

p_4 = average precipitation anomaly 61 to 120 days before a flood,

t_{0-4} follows the same notation but for temperature,

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta$ and μ are the corresponding coefficients for each predictor and

f is a function such that $f(D)$ is Gaussian. If D is not too close to 0 or 1, $f(D) \approx \log(D)$.



Il y avait à l'origine **40** prédicteurs pour RF.

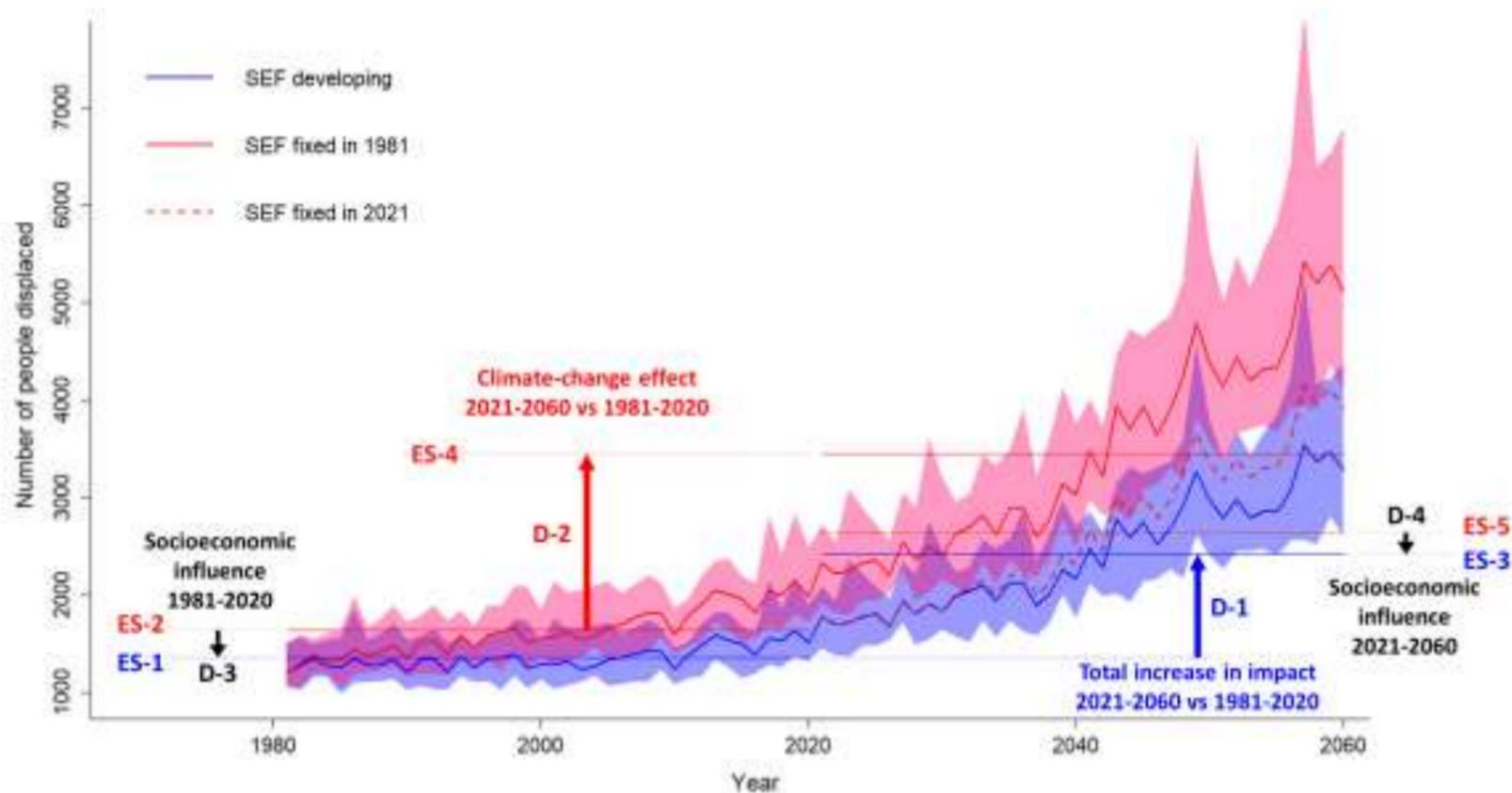
Nous avons réduit ce nombre à moins de **14** prédicteurs en utilisant le best-GLM.

Description des ensembles d'événements

Ensemble d'événements	Période	Facteurs socio-économiques (FSE)
ES-1	1981-2020	Changeants
ES-2	1981-2020	Fixés en 1981
ES-3	2021-2060	Changeants
ES-4	2021-2060	Fixés en 1981
ES-5	2021-2060	Fixés en 2021

- Les simulations ont été produites en remplaçant la température et les précipitations par les résultats de 40 membres du Community Earth System Model–Large Ensemble (CESM-LE) ;
- Nous avons produit 5 types d'ensembles d'événements (ES) pour l'impact en cas d'occurrence en supposant différents développements de facteurs socio-économiques ;
- Chaque ensemble d'événements comporte 100 simulations équivalant à 1600 années-membres de l'ensemble (160 000 années simulées au total) ;
- Pour chaque année et emplacement (bassin HS5), nous simulons l'impact des inondations, mesuré en nombre de personnes déplacées.

Exemple de série temporelle pour un bassin centré sur 61.2°N, 7.9°E

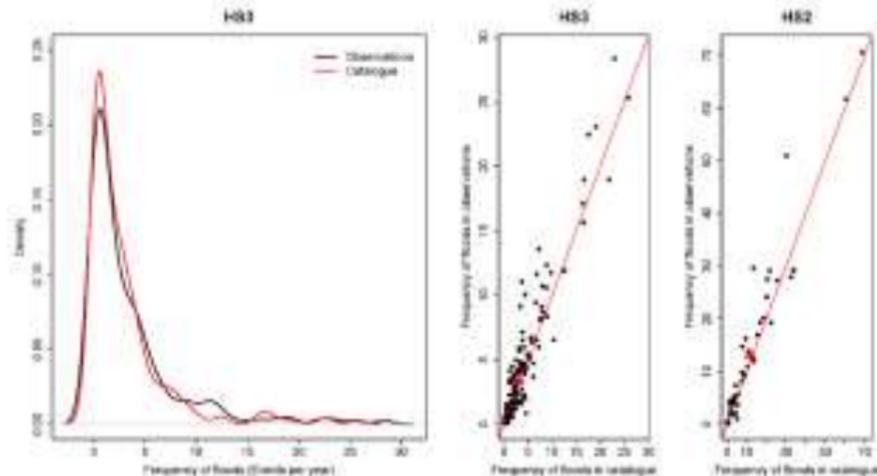


Validation des simulations

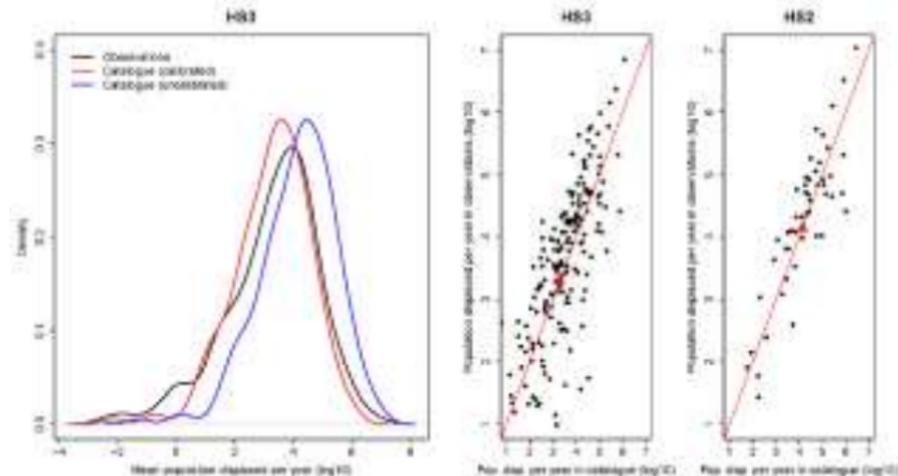
- Simulations utilisant les forçages climatiques du Community Earth System Model – Large Ensemble (CESM-LE)
- Observations de l'Observatoire des inondations de Dartmouth (DFO)
- Période de validation : 1986-2017
- Nombre de bassins HS5 : 4734
- Nombre de bassins HS3 : 292
- Nombre de bassins HS2 : 62

- Les simulations ont été effectuées au niveau HS5
- Nous avons utilisé des agrégations aux niveaux HS3 et HS2 pour la validation

Validation de l'occurrence

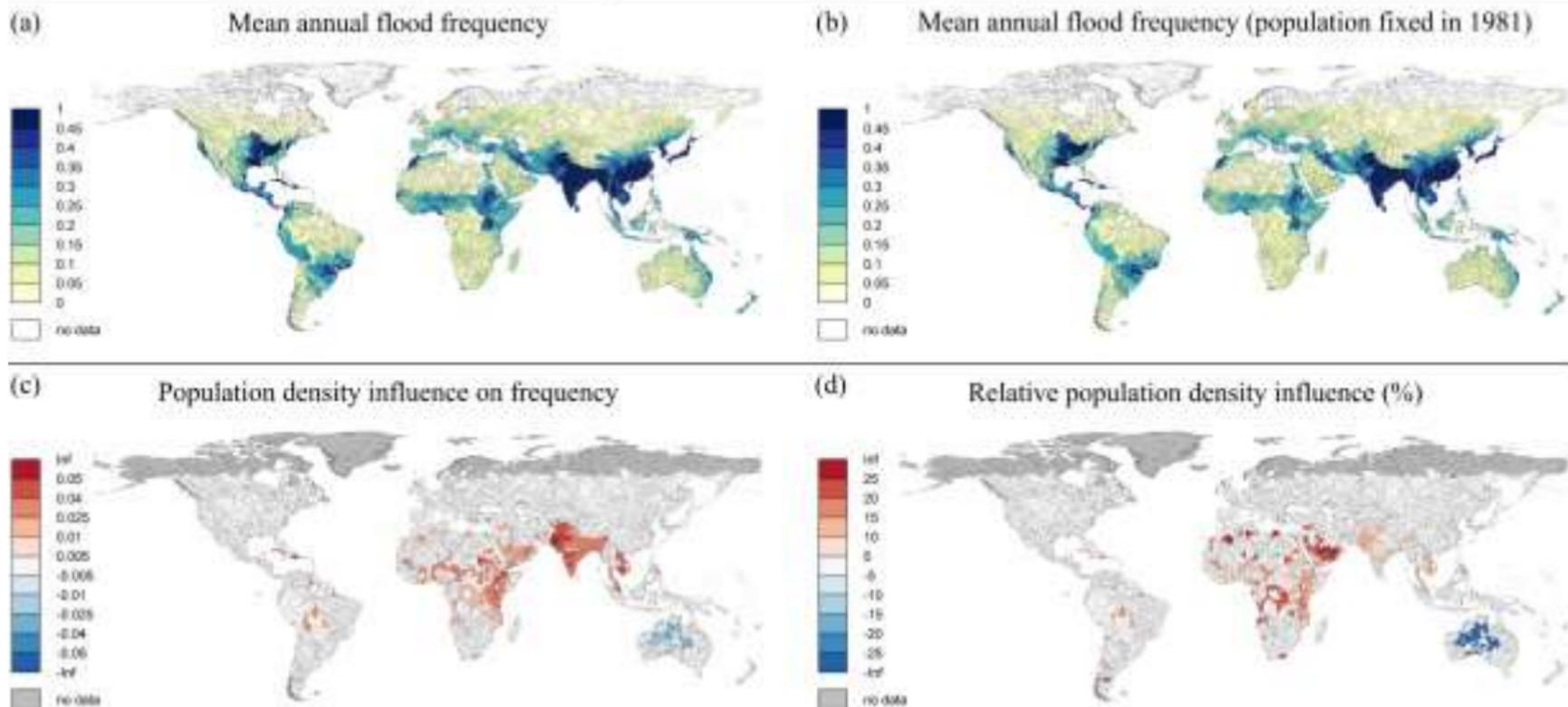


Validation de l'impact



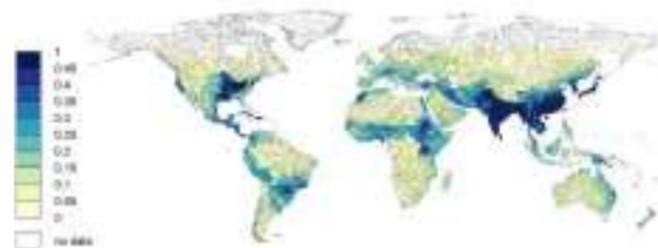
Influence historique de la densité de population sur la fréquence des inondations

Population density contribution to flood frequency for 1981-2020



Augmentation prévue de la fréquence moyenne jusqu'en 2060

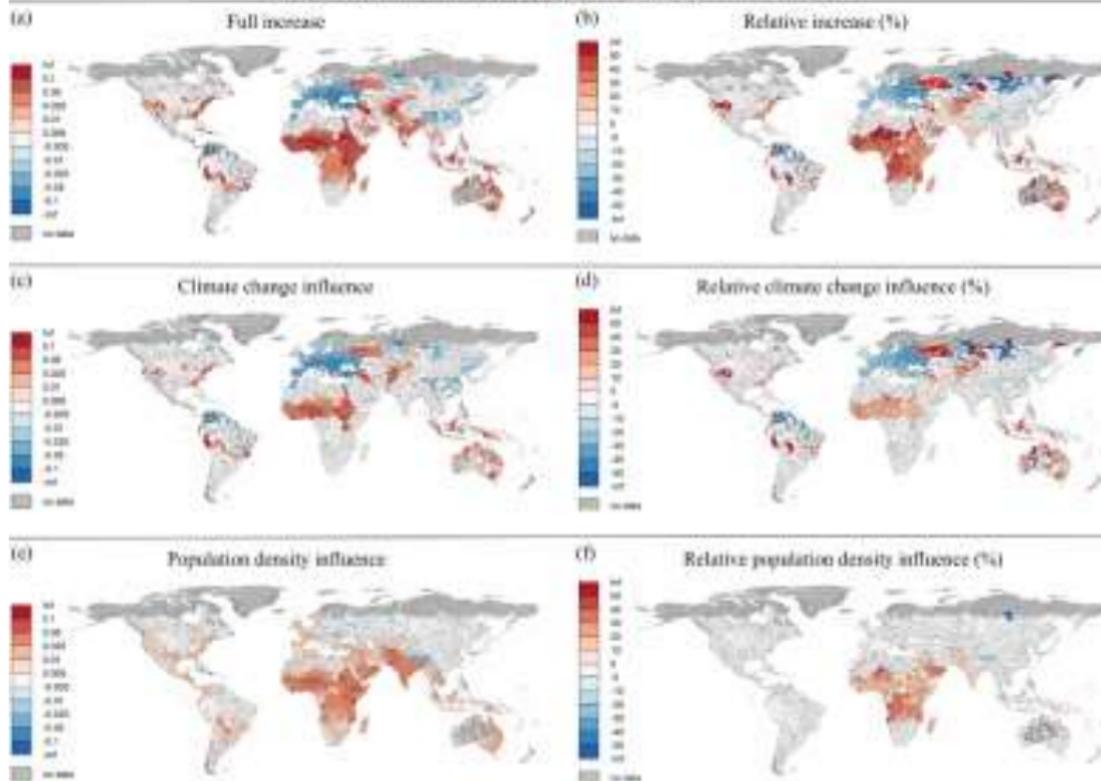
Mean annual flood frequency 1981-2020



Mean annual flood frequency 2021-2060

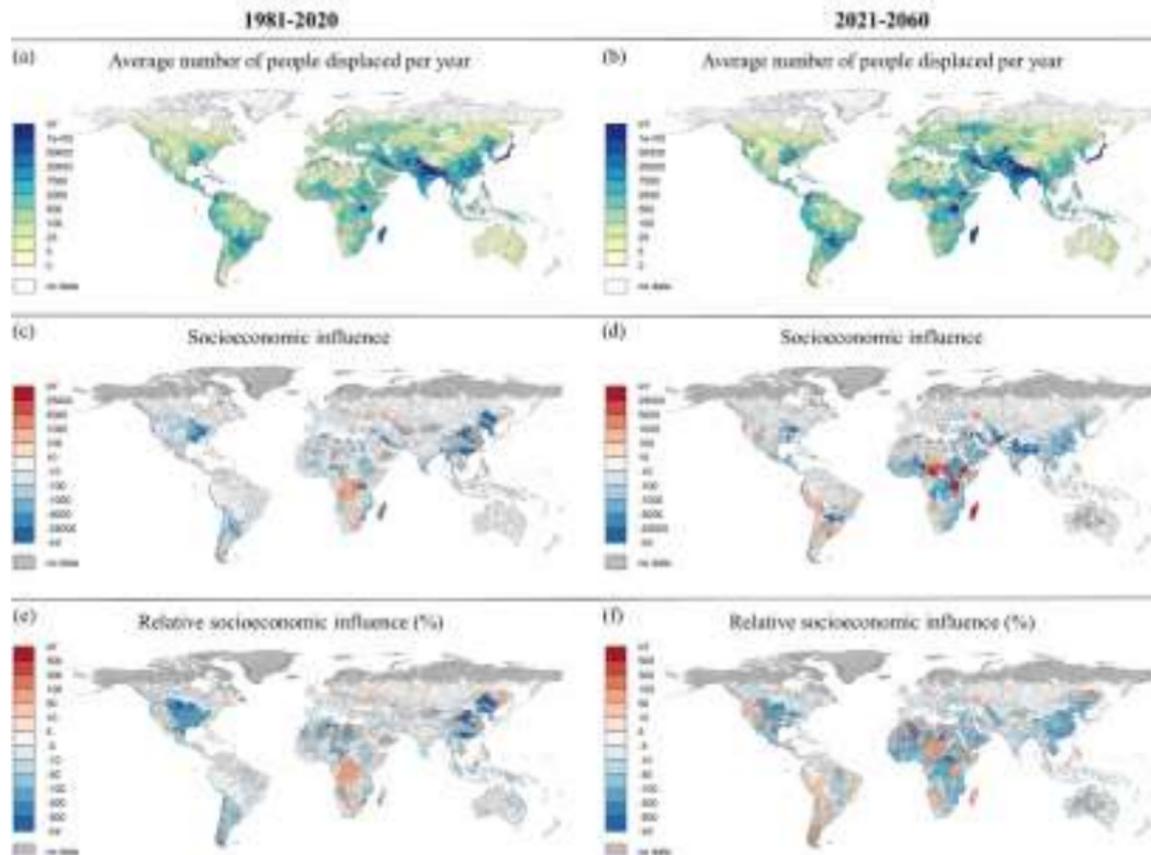


Differences in mean flood frequency for 2021-2060 vs. 1981-2020



Note: Places where the differences are different than zero with less than 90% confidence are shown in white.

Influence socio-économique sur les déplacements causés par les inondations



Augmentation prévue du nombre moyen de personnes déplacées

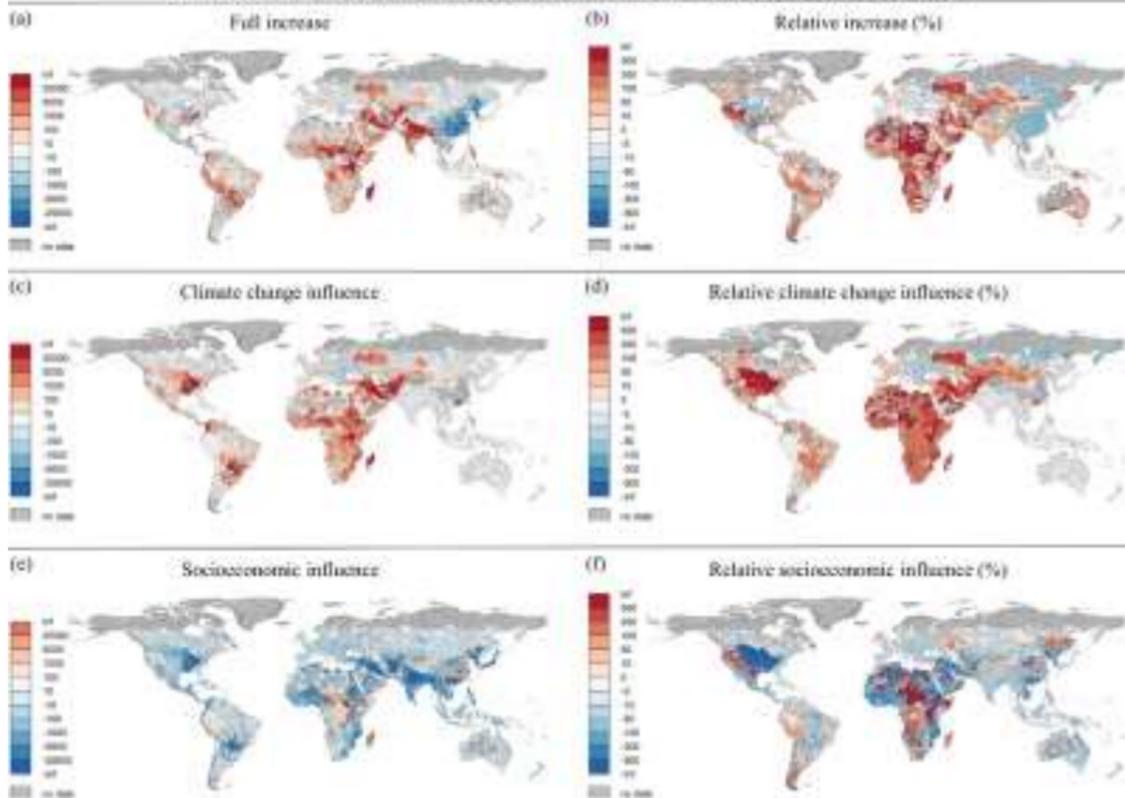
Number of people displaced per year 1981-2020



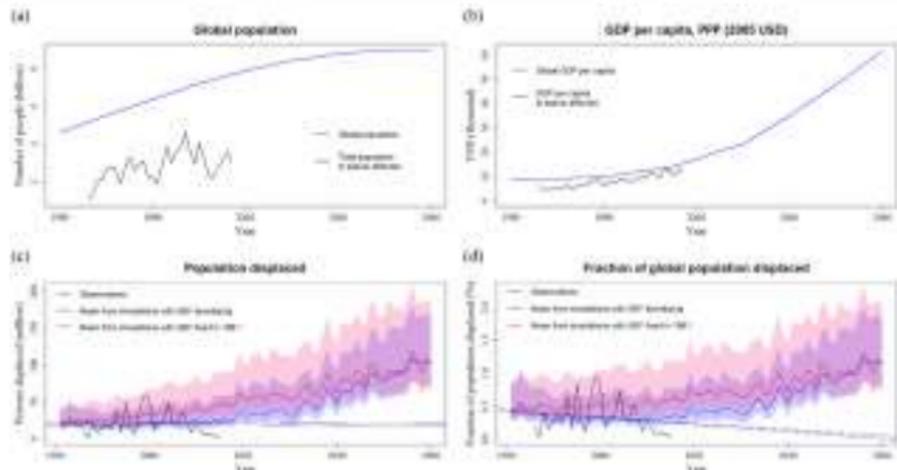
Number of people displaced per year 2021-2060



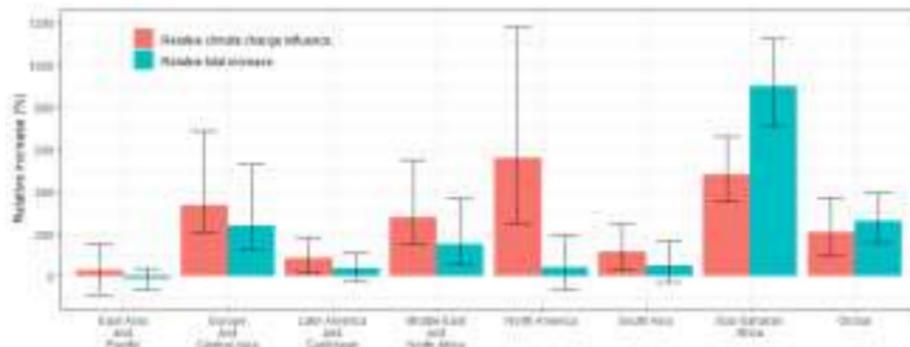
Differences in average number of people displaced per year for 2021-2060 vs. 1981-2020



Projections mondiales et comparaison avec le GIEC



Aggregations over 7 world economic regions defined by the World Bank



Comparison avec l'atlas interactif du GIEC AR6 WGI



Increase in mean impact due to climate change (2021/2060 - 1981/2020)



Les projections de déplacements dus aux inondations pour la période 2021-2060 sont en accord avec le sixième rapport d'évaluation du GIEC, montrant une diminution de l'impact en Europe mais une augmentation des déplacements ailleurs en raison du changement climatique.

Conclusions

- Les résultats concernant l'impact ne peuvent pas être interprétés de manière simple. Parfois, ils peuvent même être considérés comme contre-intuitifs. Par exemple, une augmentation de la population signifie généralement une augmentation de l'impact en raison d'une augmentation de l'urbanisation et de l'exposition, mais en même temps, une augmentation du PIB par habitant est généralement liée à une diminution de la vulnérabilité et donc à une diminution de l'impact ;
- C'est pourquoi l'un des points forts du modèle est sa capacité à projeter l'impact socio-économique des inondations en utilisant les conditions atmosphériques et socio-économiques futures à l'échelle mondiale, qui ne peuvent pas être facilement intégrées par les approches traditionnelles avec les modèles hydrologiques et climatiques ;
- Notre modèle permet d'évaluer l'influence individuelle des facteurs climatiques, environnementaux et socio-économiques sur le risque d'inondation ;
- Les résultats obtenus sont en accord avec d'autres résultats contribuant à l'AR6 du GIEC mais apportent beaucoup plus de détails à la fois en termes de résolution et d'évaluation de la contribution des facteurs individuels.



Merci pour votre attention

 **SYMPOSIUM**
OURANOS 2025

