



**HAL**  
open science

# Utilisation de l'intelligence artificielle pour prédire et atténuer efficacement les inondations

Moez Krichen

► **To cite this version:**

Moez Krichen. Utilisation de l'intelligence artificielle pour prédire et atténuer efficacement les inondations. 2024. <hal-04396345>

**HAL Id: hal-04396345**

**<https://hal.science/hal-04396345v1>**

Preprint submitted on 15 Jan 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

# Utilisation de l'intelligence artificielle pour prédire et atténuer efficacement les inondations

Moez Krichen

Laboratoire ReDCAD, Université de Sfax, Tunisie  
moez.krichen@redcad.org

**Résumé.** Le besoin urgent de développer des stratégies de prédiction et de gestion des catastrophes liées aux inondations est devenu de plus en plus important en raison de l'augmentation de la fréquence et de la gravité de ces événements, largement attribuée aux effets du changement climatique. L'intelligence artificielle offre une approche pour aborder efficacement ce problème pressant. Cette étude examine en détail comment les techniques d'intelligence artificielle sont utilisées dans la prévision et la gestion des inondations. Elle explore l'utilisation de sources de données telles que l'imagerie satellite et les capteurs de l'Internet des objets (IdO) pour améliorer la précision des prédictions basées sur l'IA. Cependant, comme toute avancée utilisant l'intelligence artificielle dans ce domaine, cela présente ses propres défis uniques. L'objectif de cette recherche est d'étudier les problèmes qui nécessitent une attention particulière dans le domaine de la gestion des inondations alimentée par l'IA. Ces défis comprennent des aspects tels que garantir l'intégrité des données à travers les régions géographiques, gérer efficacement les exigences computationnelles des modèles d'apprentissage profond et aborder les problèmes liés à la distribution équitable des technologies de contrôle des inondations alimentées par l'IA. En examinant les méthodologies utilisées dans ce domaine ainsi que les défis qui y sont associés, cet article vise à fournir une compréhension de la manière dont l'intelligence artificielle influence profondément l'orientation future de la prévision et de la gestion des inondations.

## 1 Introduction

L'eau a présenté à la fois des avantages et des inconvénients pour la civilisation humaine tout au long de son histoire. Bien que les inondations aient joué un rôle crucial en soutenant la vie en permettant l'agriculture et facilitant le transport, leur occurrence récurrente de manière non réglementée et excessive a entraîné des dévastations importantes à travers de nombreuses périodes historiques. Tout au long de l'histoire, les civilisations humaines ont constamment choisi d'établir leurs colonies à proximité des cours d'eau, reconnaissant les avantages inhérents que de tels environnements offrent en termes de développement, de commerce et de nourriture. Cependant, la proximité entre les colonies humaines et les environnements naturels a toujours été accompagnée

d'un inconvénient notable : la susceptibilité aux forces inconstantes et imprévisibles de la nature.

Le discours entourant les inondations a pris une trajectoire préoccupante à l'ère actuelle. À l'heure actuelle, on observe une augmentation à la fois de la fréquence et de l'intensité des inondations, ce qui peut être attribué à l'influence significative du changement climatique (45). La survenue de phénomènes météorologiques imprévisibles, la fonte des calottes glaciaires et l'élévation du niveau de la mer contribuent tous à la survenue d'inondations qui ne suivent pas seulement les tendances passées, mais posent également des difficultés sans précédent en termes de conception urbaine et de gestion des catastrophes.

L'impact des inondations sur les conditions socio-économiques est significatif. En plus des conséquences facilement observables telles que les pertes humaines et les dommages matériels, les répercussions sont nombreuses et variées. Les infrastructures subissent des dommages importants, entraînant l'improductivité des terres agricoles et la perturbation des services essentiels (47). Les communautés, en particulier celles aux ressources limitées, font face à des obstacles redoutables dans le domaine de la réhabilitation. L'impact durable de ces événements va au-delà des cicatrices physiques, englobant des conséquences psychologiques et émotionnelles qui peuvent s'étendre sur plusieurs générations (13).

L'agilité de l'intelligence artificielle dans le domaine de l'analyse des données, sa capacité à extraire des informations précieuses à partir de schémas passés et sa capacité à s'adapter aux circonstances changeantes en font un atout remarquable dans la lutte contre les inondations (46).

Cette étude entreprend une enquête détaillée sur l'impact de l'IA sur la transformation des pratiques de prévision et de gestion des inondations (29; 28; 4; 59; 6; 19; 7; 30; 31; 10; 8). Cette analyse examinera les différentes applications de la technologie, en incluant sa capacité à offrir des avertissements précoces avancés et à soutenir les efforts de récupération post-inondation. De plus, bien que la promesse de l'IA soit indéniablement étendue, sa mise en œuvre dans ce domaine particulier présente une série complexe de problèmes, notamment des contraintes techniques ainsi que des difficultés éthiques. L'objectif principal est de fournir une analyse complète, mettant en lumière à la fois l'impact potentiellement révolutionnaire de l'IA et les obstacles qui entravent sa mise en œuvre approfondie pour aborder efficacement la gestion des inondations.

L'utilisation de techniques de test est essentielle pour évaluer l'efficacité et la fiabilité des systèmes de prévision et de gestion des inondations basés sur l'intelligence artificielle (IA) (27; 26; 42; 44; 39; 25; 35; 38; 40; 34; 41; 43; 36; 37). Les tests permettent de vérifier la précision des modèles prédictifs et des algorithmes utilisés, en confrontant les résultats aux données réelles des inondations passées. Cela permet d'identifier les éventuelles erreurs ou biais dans les prévisions et d'améliorer les performances des systèmes. De plus, les techniques de test aident à évaluer la robustesse des systèmes face à des scénarios extrêmes et à des conditions environnementales changeantes. Les tests peuvent être effectués à différentes étapes du processus, de la collecte des données à la formulation des prévisions et à la gestion des ressources. En intégrant des techniques de test rigoureuses, il est possible d'accroître la confiance dans les systèmes d'IA et de garantir leur efficacité dans la gestion des inondations.

En plus des techniques de test, l'intégration des drones et de l'Internet des objets (IdO) joue un rôle crucial dans l'amélioration des capacités des systèmes de prévision et de gestion des inondations (51; 1; 33; 18; 32; 21). Les drones équipés de capteurs avancés et de caméras peuvent fournir des données en temps réel sur les niveaux d'eau, les conditions météorologiques et les dommages aux infrastructures lors d'événements d'inondation. Ces données peuvent être transmises sans fil via le réseau IdO, permettant une collecte d'informations rapide et précise sur les zones touchées. En exploitant la quantité considérable de données collectées par les drones et les dispositifs IdO, les algorithmes alimentés par l'IA peuvent analyser et interpréter les informations pour générer des prédictions d'inondation opportunes et soutenir les processus de prise de décision. Les drones peuvent également être utilisés pour l'évaluation post-inondation, permettant l'identification des zones touchées et l'évaluation de l'efficacité des mesures de réponse et de rétablissement. L'utilisation combinée des drones, de l'IdO et de l'IA offre une approche globale et dynamique de la gestion des inondations, permettant la mise en place de mesures proactives pour atténuer les dommages et renforcer la résilience globale des communautés confrontées aux risques d'inondation.

Les principales contributions sont les suivantes :

- Fournit un examen approfondi du rôle global de l'intelligence artificielle dans la prévision et la gestion des inondations.
- Met en évidence la vaste capacité de traitement des données de l'IA et illustre sa capacité à remodeler les méthodologies traditionnelles.
- Grâce à des analyses détaillées, il présente l'application de l'IA à différentes étapes de la gestion des inondations, de l'utilisation de données en temps réel pour les avertissements précoces à son rôle significatif dans l'allocation des ressources après les inondations.
- Met en lumière les complexités et les défis de l'intégration de l'IA dans la prévision des inondations, en mettant l'accent sur des préoccupations telles que l'intégrité des données, les exigences computationnelles et l'équité.
- En associant le domaine technologique à des applications pragmatiques, cet article offre une vue d'ensemble complète du potentiel et des défis de l'IA dans la résolution d'un des problèmes environnementaux les plus importants de notre époque.

Les sections suivantes de cet article sont organisées de manière cohérente pour offrir aux lecteurs une exploration méthodique de la connexion complexe entre l'IA et la gestion des inondations. Dans ces sections, nous examinerons les applications de l'IA dans les systèmes d'alerte précoce, l'allocation des ressources et la planification de simulations. Nous discuterons à la fois des progrès réalisés dans ces domaines et des défis rencontrés. De plus, nous consacrerons une section à aborder les problèmes rencontrés dans ce domaine, en donnant un aperçu des obstacles et en soulignant l'importance d'une réflexion attentive. La discussion se conclut en reprenant les idées et les perspectives offertes jusqu'à présent, tout en réfléchissant aux possibilités futures de l'intelligence artificielle dans la prévision et la gestion des inondations.

## 2 Techniques d'IA pour la prédiction des inondations

L'avancée rapide de l'intelligence artificielle a ouvert une ère de prédiction des inondations. L'IA utilise des méthodologies et des ressources de données pour atteindre une capacité de calcul efficace ainsi que des capacités d'adaptabilité et d'apprentissage (12). En intégrant des flux de données tels que les observations satellitaires depuis l'espace et les données des capteurs au sol, l'IA offre une approche pour comprendre et prédire les événements d'inondation (54). Dans cette section, nous explorerons les techniques d'IA utilisées pour la prédiction des inondations et leurs contributions respectives au développement de modèles de prévision.

### 2.1 Acquisition de données

À l'ère actuelle, où nous disposons d'une abondance de données à grande échelle et où la création de modèles de prédiction des inondations dépend fortement de l'intégration de sources de données (48), l'obtention de données pertinentes et opportunes est cruciale pour le développement de modèles de prédiction.

- **Images satellitaires** : Les satellites tels que Sentinel 1 et Landsat fournissent des observations obtenues depuis l'espace. Ces images capturent les changements dans les masses d'eau du monde entier au fil du temps (16).  
En examinant les motifs temporels, les algorithmes d'intelligence artificielle ont la capacité d'identifier les comportements ordinaires ainsi que les déviations, facilitant ainsi l'anticipation des périodes et des zones susceptibles d'être inondées. De plus, l'utilisation de données satellitaires offre une couverture globale complète, permettant la surveillance efficace des risques d'inondation même dans les régions les plus éloignées et inaccessibles.
- **Capteurs IoT** : L'avènement de l'Internet des objets (IoT) a considérablement augmenté le niveau de détail des données pouvant être utilisées pour la prédiction des inondations. Des capteurs stratégiquement positionnés dans des zones sujettes aux inondations ou des systèmes de drainage urbains fournissent la collecte de données en temps réel concernant divers facteurs tels que l'humidité du sol, les débits des rivières et l'intensité des précipitations (17). La quantité d'informations disponible aide au développement de modèles d'inondation dynamiques et constamment mis à jour, améliorant ainsi l'efficacité opérationnelle des systèmes d'alerte précoce en incluant les données les plus récentes.
- **Rapports et prévisions météorologiques** : La fusion des connaissances en météorologie est l'une des clés dans le domaine de la prédiction des inondations. Les modèles avancés, qui intègrent des facteurs tels que la pression atmosphérique, les schémas de vent et les précipitations projetées, ont la capacité de fournir des aperçus préliminaires sur les situations d'inondation potentielles (15). L'intégration de ces données avec les modèles d'inondation précédents permet aux modèles d'intelligence artificielle d'améliorer leurs capacités prédictives, en particulier dans le contexte des inondations éclair ou des averses soudaines.

- **Lectures des jauges de rivière** : Ces instruments, fréquemment positionnés à des endroits stratégiques le long des cours d'eau, observent et mesurent attentivement les niveaux d'eau. L'écoulement ininterrompu des données qu'ils fournissent offre une représentation de la dynamique des rivières sur une période de temps. Les modèles d'IA ont la capacité d'anticiper les ruptures ou les débordements potentiels en détectant les anomalies ou lorsque les niveaux approchent des limites dangereuses (58). Dans de tels cas, les autorités compétentes et les communautés concernées peuvent être rapidement alertées.
- **Médias sociaux et données de plateformes** : La prévalence généralisée des plateformes de médias sociaux et des téléphones portables s'est révélée être une ressource précieuse et inattendue dans le but de prédire les inondations. L'analyse des témoignages, des photos et des vidéos diffusés sur des plateformes de médias sociaux telles que Twitter ou Facebook peut fournir des informations en temps réel. De plus, l'utilisation de plateformes participatives permet à quiconque d'enregistrer des cas d'inondations localisées, contribuant ainsi à des données hyper-locales qui, une fois intégrées aux modèles d'IA, ont le potentiel d'améliorer considérablement l'exactitude de la prédiction des inondations (56).

## 2.2 Modèles d'apprentissage automatique

La large gamme de sources de données accessibles pour la prédiction des inondations en fait un domaine particulièrement adapté à l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage automatique. Diverses techniques peuvent être personnalisées pour s'adapter à différents types de données ou à des besoins de prédiction spécialisés.

- **Régression linéaire** : La régression linéaire est un modèle fondamental utilisé en analyse prédictive, en particulier dans les situations où les variables présentent des associations linéaires évidentes (23). En analysant la relation entre certains facteurs tels que les niveaux de précipitations et leur impact sur différents résultats, tels que les niveaux d'eau dans les rivières ou les lacs, il devient possible de formuler des prédictions. Cependant, la simplicité de cette approche peut ne pas prendre en compte les interconnexions complexes.
- **Arbres de décision** : Ces modèles présentent des performances remarquables dans les scénarios où des décisions doivent être prises en fonction de certaines conditions. Les chercheurs déduisent des prédictions anticipées pour les scénarios d'inondation probables en analysant les occurrences d'inondation précédentes par rapport aux variables environnementales actuelles (14). Cette réflexion aide les autorités à déterminer quelles zones présentent un risque plus élevé et à allouer efficacement les ressources appropriées.
- **Machines à vecteurs de support (SVM)** : Les machines à vecteurs de support fonctionnent en classifiant les données en catégories distinctes et sont utilisées dans les problèmes de reconnaissance de modèles (50). Les régions peuvent être classées en fonction de leur susceptibilité aux inondations dans les projections d'inondations. Le processus de classification contribue à améliorer la formulation des politiques en dirigeant l'attention et en consacrant des ressources aux secteurs qui présentent des niveaux de risque élevés.

- **Réseaux neuronaux** : Les réseaux neuronaux ont la capacité d'analyser efficacement de grandes quantités de données et d'identifier des modèles complexes similaires aux capacités de calcul du cerveau humain (2). Ils offrent des avantages significatifs dans les régions caractérisées par des facteurs environnementaux complexes, car ils fournissent des prédictions d'inondation globales qui prennent en compte de multiples variables contributives.

### 2.3 Approches d'apprentissage profond

L'apprentissage profond, une branche particulière de l'apprentissage automatique, utilise des réseaux neuronaux multicouches pour analyser et interpréter des ensembles de données complexes et multidimensionnels (57). Cette caractéristique particulière le rend très approprié pour la prédiction des inondations.

- **CNN (Réseaux neuronaux convolutifs)** : Les réseaux neuronaux convolutifs (CNN) ont principalement été utilisés dans le domaine du traitement d'images. Ils se sont également révélés utiles dans la prédiction des inondations (5). Plus spécifiquement, les chercheurs ont utilisé des CNN pour analyser des photos satellites et aériennes afin d'identifier les zones présentant un risque plus élevé d'inondation dans des environnements où les données traditionnelles peuvent être insuffisantes (24).
- **RNN (Réseaux neuronaux récurrents) et LSTMs (Réseaux LSTM à mémoire à court et long terme)** : Les réseaux neuronaux récurrents (RNN) et les réseaux LSTM à mémoire à court et long terme (LSTM) sont des types de réseaux qui excellent dans la compréhension de l'importance de l'ordre dans les tâches de prédiction (9). Ces modèles conviennent parfaitement à l'analyse de données de séries temporelles telles que les mesures des jaugeages des rivières ou les schémas de précipitations saisonnières (20). En incorporant les tendances, les RNN et les LSTMs peuvent prévoir efficacement des scénarios tout en maintenant une pertinence contextuelle.
- **Modèles hybrides** : Les modèles hybrides représentent une combinaison de techniques d'apprentissage intégrées ensemble. Les modèles hybrides fournissent des prédictions d'inondations approfondies en combinant des données provenant de sources telles que des images satellites, des prévisions météorologiques et des archives historiques. Cette approche intégrée garantit que tous les facteurs pertinents sont pris en compte, ce qui permet d'obtenir des prédictions précises (60).

## 3 L'IA dans la gestion des inondations

La prévision précise des inondations revêt une importance considérable et est tout aussi cruciale pour la gestion efficace de ces phénomènes. L'intelligence artificielle ne se limite pas aux capacités prédictives pour les événements futurs, elle a également le pouvoir de créer des stratégies efficaces, d'améliorer les mécanismes de réponse et d'aider les opérations de récupération après les inondations (53). Cette section examine le rôle multifacette de l'intelligence artificielle dans le domaine de la gestion des

inondations, en mettant l'accent sur les façons dont l'IA aide à relever efficacement les nombreux défis posés par les inondations. L'application de l'intelligence artificielle dans la gestion globale des inondations revêt une importance considérable et progresse continuellement. Elle englobe plusieurs aspects, notamment l'optimisation de l'allocation des ressources en situation d'urgence et l'analyse des scénarios post-inondation afin d'améliorer la préparation future.

### 3.1 Systèmes d'alerte précoce

L'intégration de l'IA dans les systèmes d'alerte a transformé la prévision et la compréhension des événements liés aux inondations. En utilisant des données et des algorithmes, l'IA permet une approche proactive de la gestion des inondations.

- **Analyse en temps réel** : Les capacités de calcul rapides de l'IA permettent la collecte et l'analyse en temps réel de données provenant de capteurs d'Internet des objets, d'images satellites et d'informations météorologiques. Le processus continu de réception et d'analyse simultanée des données fournit aux autorités des mises à jour en temps réel, leur permettant de prédire le début et la progression des inondations.
- **Alertes basées sur la communauté** : Souvent, les notifications génériques s'avèrent inefficaces pour susciter une réponse significative de la part des individus. Dans cette optique, des systèmes d'alerte alimentés par l'IA ont été développés pour personnaliser les messages en fonction des caractéristiques uniques des sites communautaires (49). Cette approche garantit que les alertes sont adaptées au trajet prévu d'un événement d'inondation, rendant les notifications plus pertinentes. Par conséquent, les personnes sont motivées à agir en réponse.
- **Modélisation de scénarios** : Un avantage significatif de l'intelligence artificielle est sa capacité à réaliser efficacement des simulations dans un laps de temps limité. En utilisant des modèles basés sur des données, ces systèmes peuvent générer une gamme de scénarios d'inondation.

### 3.2 Allocation des ressources

Une gestion efficace des inondations implique non seulement l'anticipation des inondations, mais aussi la prise en compte d'aspects tels que la préparation et la réponse. L'intégration de l'intelligence permet l'allocation des ressources humaines et matérielles dans le contexte des catastrophes liées aux inondations.

- **Déploiement dynamique des ressources** : Les modèles d'IA sont utilisés pour l'évaluation et la prévision de la trajectoire des événements d'inondation et des régions vulnérables, en tenant compte de leurs caractéristiques changeantes (11). La connaissance approfondie des autorités dans ce domaine leur permet d'allouer et d'utiliser efficacement les ressources de manière à garantir des actions et à atténuer les dommages potentiels.
- **Récupération après les inondations** : Les conséquences des inondations dévoilent souvent un paysage marqué par le désordre et la destruction étendue. Grâce à l'utilisation de modèles de prévision, l'intelligence artificielle aide les

gouvernements à évaluer l'ampleur de l'influence, garantissant ainsi la distribution rapide de ressources essentielles telles que la nourriture, l'hébergement et les soins médicaux dans les régions touchées par la privation.

- **Analyse des infrastructures :** Lorsqu'il s'agit d'atténuer les conséquences des inondations, l'analyse de l'intégrité des infrastructures revêt une importance capitale. En utilisant l'IA, nous pouvons modéliser les effets des inondations sur les infrastructures existantes. Cela permet aux entités gouvernementales d'identifier les vulnérabilités et d'obtenir des informations pour mettre en œuvre des mesures visant à améliorer ou à adapter les infrastructures telles que les routes, les ponts et les services publics.

### 3.3 Simulation et planification

L'intégration de l'IA dans la planification a le potentiel de créer des villes plus résilientes face au changement climatique croissant et aux risques associés d'inondations (52).

- **Simulations de développement urbain :** L'un des aspects où l'IA se révèle bénéfique est la simulation de l'impact de développements urbains spécifiques sur les motifs hydrologiques d'une région. Par exemple, elle peut prédire les risques d'inondation et identifier les opportunités de mise en œuvre de mesures visant à réduire les risques lors de la création de nouveaux quartiers résidentiels ou de complexes commerciaux.
- **Planification d'infrastructures résilientes :** Pour relever efficacement ces défis, les villes doivent faire preuve de qualités reflétant l'urbanité et l'adaptabilité. Cela inclut la planification d'infrastructures capables de résister aux changements. L'application de modèles d'inondation alimentés par l'IA permet aux urbanistes de prévoir et d'évaluer de manière proactive les impacts des événements d'inondation. Obtenir ces informations est crucial pour guider la conception et la construction d'infrastructures capables de résister aux inondations. Cela comprend la mise en place de structures, de bassins de rétention des eaux de crue et de routes perméables spécifiquement conçues pour améliorer le drainage des eaux.
- **Restauration des barrières naturelles :** Une approche efficace pour atténuer les inondations consiste à restaurer les barrières naturelles. L'IA a la capacité de prédire comment ces barrières peuvent contribuer à prévenir les inondations (22). Cela permet de formuler des recommandations concernant les efforts de restauration écologique et environnementale dans les zones où ils auraient un impact sur la réduction des occurrences d'inondation.

## 4 Défis et orientations futures

L'intelligence artificielle est largement reconnue comme une technologie dans les systèmes de gestion des inondations. Cependant, sa mise en œuvre réussie dans ce domaine comporte des défis. Bien que les avantages potentiels soient nombreux et

fascinants, il est important d'aborder ce sujet en tenant compte de ses limites et des éventuels inconvénients.

- **Intégrité des données** : Maintenir l'intégrité des données est crucial pour toute solution d'IA. Même des modèles robustes peuvent être compromis si des données inexactes, obsolètes ou biaisées sont incluses (55). Dans les situations où la collecte de données est difficile, il existe un risque que des incohérences ou des lacunes introduisent des biais dans les modèles de prédiction.
- **Intensité de calcul** : L'utilisation de ressources informatiques pose une limitation notable liée aux caractéristiques sophistiquées des modèles d'apprentissage profond. Ce phénomène peut créer des contraintes dans certaines régions où le développement des infrastructures est encore en cours ou dans des scénarios où un traitement immédiat est essentiel pour la prise de décisions en temps réel. Par conséquent, l'objectif est d'optimiser les modèles afin d'améliorer leur efficacité tout en préservant leurs capacités prédictives.
- **Sur-reliance à la technologie** : L'incorporation de l'intelligence artificielle dans la gestion des inondations offre des fonctionnalités avancées. Cependant, négliger les connaissances et l'expertise hydrologiques conventionnelles pourrait entraîner des résultats indésirables. Les techniques traditionnelles, qui ont été largement affinées tout au long de l'histoire, démontrent un degré significatif de compréhension et de contexte qui ne devrait pas être éclipsé par l'attrait de la technologie contemporaine.
- **Préoccupations d'équité** : L'avancée de la technologie a le potentiel d'élargir davantage les écarts entre les communautés qui ont accès aux technologies avancées et celles qui n'en ont pas. Les communautés plus aisées peuvent disposer de systèmes de gestion des inondations basés sur l'intelligence, tandis que les régions économiquement défavorisées peuvent encore s'appuyer sur des méthodes obsolètes. Cet écart constitue non seulement un danger pour le bien-être des personnes vivant dans des zones défavorisées, mais il perpétue également un cycle où ces régions accusent un retard en termes de collecte de données et d'intégration de la technologie (3).
- **Intégration avec les systèmes existants** : Un défi lors de l'incorporation de solutions intelligentes dans les systèmes de gestion des inondations existants est de garantir la communication entre les modèles d'IA et les systèmes d'alerte actuels, les dispositifs de défense des infrastructures et les canaux de communication publics. L'efficacité du système de contrôle des inondations dépend fortement de l'établissement de cette connexion.

## 5 Conclusion

L'intégration de l'intelligence artificielle dans la prédiction et la gestion des inondations représente une intersection entre le progrès et la nécessité urgente de relever les défis mondiaux. Tout au long de l'histoire, les inondations ont représenté une menace pour la civilisation. Leur gravité a été amplifiée par les effets rapides du changement climatique. Dans ces circonstances, l'intelligence artificielle émerge non seulement comme

une solution, mais aussi comme une approche réalisable pour développer des méthodes innovantes permettant d'anticiper, de planifier et de gérer les catastrophes naturelles.

L'efficacité de l'intelligence réside dans sa capacité à analyser de grandes quantités de données de manière efficace et à générer des informations pertinentes qui peuvent être appliquées de manière efficace. Les techniques traditionnelles de prédiction des inondations, bien qu'utiles, présentent souvent des limites dans la gestion efficace de l'ampleur considérable et des caractéristiques complexes des données hydrologiques. L'IA fonctionne comme un moyen de connecter divers composants grâce à l'utilisation d'algorithmes et de mécanismes d'apprentissage profond. Cela permet de générer des informations à jour qui peuvent même prédire des résultats. Par conséquent, les communautés à risque ne se contentent pas de réagir aux catastrophes causées par les inondations ; elles disposent des connaissances nécessaires pour atténuer les conséquences désastreuses.

Cependant, il est crucial de reconnaître que l'efficacité des technologies d'IA repose à la fois sur ses aspects, tels que les données et la manière d'en tirer des informations précieuses. Il est primordial d'améliorer continuellement les données utilisées par l'IA. De plus, il est nécessaire de tenir compte des disparités socio-économiques résultant de l'accès à ces technologies. Il est important de donner la priorité à la distribution des ressources d'IA et aux avantages correspondants. Cela est essentiel pour éviter une situation où seuls quelques privilégiés ont accès à ses avantages, ce qui conduirait à une trajectoire de développement inéquitable.

De plus, en combinant l'expertise avec la puissance de calcul de l'intelligence artificielle, nous pouvons garantir une approche plus solide, globale et adaptable. L'intégration des systèmes de connaissances traditionnels, qui ont été affinés et améliorés au fil des générations, avec des systèmes alimentés par l'IA fournit des informations contextuelles qui améliorent l'efficacité et la pertinence des prédictions globales des inondations.

En conclusion, compte tenu des défis climatiques actuels, l'utilisation de l'intelligence artificielle se révèle être un outil pour traiter les problèmes d'inondation. Elle représente non seulement une avancée technologique, mais aussi un changement significatif dans notre compréhension, notre préparation et nos stratégies pour atténuer les inondations. L'application de l'intelligence dans la lutte contre les inondations est prometteuse, cependant, il est crucial d'aborder son déploiement aux côtés des systèmes de connaissances établis avec prudence, équité et collaboration. Ce voyage à venir présente des défis, mais offre de nombreuses opportunités pour réévaluer notre relation avec l'environnement. Cela renforcera nos efforts de conservation et ouvrira la voie à un avenir plus résilient et adaptable.

## Références

- [1] Mohamed S Abdalzaher, Moez Krichen, Derya Yiltas-Kaplan, Imed Ben Dhaou, and Wilfried Yves Hamilton Adoni. Early detection of earthquakes using iot and cloud infrastructure : A survey. *Sustainability*, 15(15) :11713, 2023.
- [2] Charu C Aggarwal et al. Neural networks and deep learning. *Springer*, 10(978) :3, 2018.

- [3] Cristian Alonso, Siddharth Kothari, and Sidra Rehman. How artificial intelligence could widen the gap between rich and poor nations. *IMF Blog*, 2, 2020.
- [4] Hamoud Alshammari, Karim Gasmi, Ibtihel Ben Ltaifa, Moez Krichen, Lassaad Ben Ammar, and Mahmood A Mahmood. Olive disease classification based on vision transformer and cnn models. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 2022.
- [5] Haytham Assem, Salem Ghariba, Gabor Makrai, Paul Johnston, Laurence Gill, and Francesco Pilla. Urban water flow and water level prediction based on deep learning. In *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases : European Conference, ECML PKDD 2017, Skopje, Macedonia, September 18–22, 2017, Proceedings, Part III 10*, pages 317–329. Springer, 2017.
- [6] Rubby Aworka, Lontsi Saadio Cedric, Wilfried Yves Hamilton Adoni, Jérémie Thouakesseh Zoueu, Franck Kalala Mutombo, Charles Lebon Mberi Kimpolo, Tarik Nahhal, and Moez Krichen. Agricultural decision system based on advanced machine learning models for yield prediction : Case of east african countries. *Smart Agricultural Technology*, 2 :100048, 2022.
- [7] Wadii Boulila, Maha Driss, Eman Alshantiti, Mohamed Al-Sarem, Faisal Saeed, and Moez Krichen. Weight initialization techniques for deep learning algorithms in remote sensing : Recent trends and future perspectives. *Advances on Smart and Soft Computing : Proceedings of ICACIn 2021*, pages 477–484, 2022.
- [8] Zakaria Boulouard, Mariyam Ouaisa, Mariya Ouaisa, Farhan Siddiqui, Mutiq Almutiq, and Moez Krichen. An integrated artificial intelligence of things environment for river flood prevention. *Sensors*, 22(23) :9485, 2022.
- [9] Jason Brownlee. A gentle introduction to long short-term memory networks by the experts. *Machine Learning Mastery*, 19, 2017.
- [10] Oumaima Chakir, Abdeslam Rehami, Yassine Sadqi, Moez Krichen, Gurjot Singh Gaba, Andrei Gurtov, et al. An empirical assessment of ensemble methods and traditional machine learning techniques for web-based attack detection in industry 5.0. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 35(3) :103–119, 2023.
- [11] Kamran Chapi, Vijay P Singh, Ataollah Shirzadi, Himan Shahabi, Dieu Tien Bui, Binh Thai Pham, and Khabat Khosravi. A novel hybrid artificial intelligence approach for flood susceptibility assessment. *Environmental modelling & software*, 95 :229–245, 2017.
- [12] So-Min Cheong, Kris Sankaran, and Hamsa Bastani. Artificial intelligence for climate change adaptation. *Wiley Interdisciplinary Reviews : Data Mining and Knowledge Discovery*, 12(5) :e1459, 2022.
- [13] Paolo Cianconi, Sophia Betrò, and Luigi Janiri. The impact of climate change on mental health : a systematic descriptive review. *Frontiers in psychiatry*, 11 :74, 2020.
- [14] Romulus Costache, Quoc Bao Pham, Ehsan Sharifi, Nguyen Thi Thuy Linh, Sani Isah Abba, Matej Vojtek, Jana Vojteková, Pham Thi Thao Nhi, and Dao Nguyen Khoi. Flash-flood susceptibility assessment using multi-criteria deci-

- sion making and machine learning supported by remote sensing and gis techniques. *Remote Sensing*, 12(1) :106, 2019.
- [15] T Cowan, MC Wheeler, O Alves, S Narsey, C de Burgh-Day, M Griffiths, C Jarvis, DH Cobon, and MK Hawcroft. Forecasting the extreme rainfall, low temperatures, and strong winds associated with the northern queensland floods of february 2019. *Weather and Climate Extremes*, 26 :100232, 2019.
- [16] Ben DeVries, Chengquan Huang, John Armston, Wenli Huang, John W Jones, and Megan W Lang. Rapid and robust monitoring of flood events using sentinel-1 and landsat data on the google earth engine. *Remote Sensing of Environment*, 240 :111664, 2020.
- [17] Musandji Fuamba, Flora Branger, Isabelle Braud, Essoyeke Batchabani, Pedro Sanzana, Benoit Sarrazin, and Sonja Jankowsky. Value of distributed water level and soil moisture data in the evaluation of a distributed hydrological model : Application to the pumma model in the mercier catchment (6.6 km<sup>2</sup>) in france. *Journal of hydrology*, 569 :753–770, 2019.
- [18] Zhaoyang Han, Yaoqi Yang, Muhammad Bilal, Weizheng Wang, Moez Krichen, Abeer Abdullah Alsadhan, and Chunpeng Ge. Smart optimization solution for channel access attack defense under uav-aided heterogeneous network. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023.
- [19] Olfa Hrizi, Karim Gasmi, Ibtihel Ben Ltaifa, Hamoud Alshammari, Hanen Karanti, Moez Krichen, Lassaad Ben Ammar, and Mahmood A Mahmood. Tuberculosis disease diagnosis based on an optimized machine learning model. *Journal of Healthcare Engineering*, 2022, 2022.
- [20] Ping-Cheng Hsieh, Wei-An Tong, and Yung-Chieh Wang. A hybrid approach of artificial neural network and multiple regression to forecast typhoon rainfall and groundwater-level change. *Hydrological Sciences Journal*, 64(14) :1793–1802, 2019.
- [21] Rateb Jabbar, Mohammed Shinoy, Mohamed Kharbeche, Khalifa Al-Khalifa, Moez Krichen, and Kamel Barkaoui. Urban traffic monitoring and modeling system : An iot solution for enhancing road safety. In *2019 international conference on internet of things, embedded systems and communications (iintec)*, pages 13–18. IEEE, 2019.
- [22] Harshita Jain, Renu Dhupper, Anamika Shrivastava, Deepak Kumar, and Maya Kumari. Ai-enabled strategies for climate change adaptation : protecting communities, infrastructure, and businesses from the impacts of climate change. *Computational Urban Science*, 3(1) :25, 2023.
- [23] Kyi Lai Lai Khine and Thi Thi Soe Nyunt. Predictive big data analytics using multiple linear regression model. In *Big Data Analysis and Deep Learning Applications : Proceedings of the First International Conference on Big Data Analysis and Deep Learning 1st*, pages 9–19. Springer, 2019.
- [24] Khabat Khosravi, Ebrahim Nohani, Edris Maroufinia, and Hamid Reza Pourghasemi. A gis-based flood susceptibility assessment and its mapping in iran : a comparison between frequency ratio and weights-of-evidence bivariate statistical models with multi-criteria decision-making technique. *Natural hazards*, 83 :947–

- 987, 2016.
- [25] Moez Krichen. A formal framework for black-box conformance testing of distributed real-time systems. *International Journal of Critical Computer-Based Systems*, 3(1-2) :26–43, 2012.
  - [26] Moez Krichen. *Contributions to model-based testing of dynamic and distributed real-time systems*. PhD thesis, École Nationale d’Ingénieurs de Sfax (Tunisie), 2018.
  - [27] Moez Krichen. How artificial intelligence can revolutionize software testing techniques. In *International Conference on Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications*, pages 189–198. Springer Nature Switzerland Cham, 2022.
  - [28] Moez Krichen. Convolutional neural networks : A survey. *Computers*, 12(8) :151, 2023.
  - [29] Moez Krichen. Deep reinforcement learning. In *2023 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, pages 1–7. IEEE, 2023.
  - [30] Moez Krichen. Generative adversarial networks. In *2023 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, pages 1–7. IEEE, 2023.
  - [31] Moez Krichen. Strengthening the security of smart contracts through the power of artificial intelligence. *Computers*, 12(5) :107, 2023.
  - [32] Moez Krichen, Wilfried Yves Hamilton Adoni, Alaeddine Mihoub, Mohammed Y Alzahrani, and Tarik Nahhal. Security challenges for drone communications : Possible threats, attacks and countermeasures. In *2022 2nd International Conference of Smart Systems and Emerging Technologies (SMARTTECH)*, pages 184–189. IEEE, 2022.
  - [33] Moez Krichen and Alaeddine Mihoub. Unmanned aerial vehicles communications security challenges : A survey. In *Unmanned Aerial Vehicles Applications : Challenges and Trends*, pages 349–373. Springer International Publishing Cham, 2023.
  - [34] Moez Krichen and Stavros Tripakis. Real-time testing with timed automata testers and coverage criteria. In *Formal Techniques, Modelling and Analysis of Timed and Fault-Tolerant Systems*, pages 134–151. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004.
  - [35] Moez Krichen and Stavros Tripakis. State identification problems for timed automata. In *Testing of Communicating Systems : 17th IFIP TC6/WG 6.1 International Conference, TestCom 2005, Montreal, Canada, May 31-June, 2005. Proceedings 17*, pages 175–191. Springer Berlin Heidelberg, 2005.
  - [36] Moez Krichen and Stavros Tripakis. Interesting properties of the real-time conformance relation tioco. In *International Colloquium on Theoretical Aspects of Computing*, pages 317–331. Springer Berlin Heidelberg Berlin, Heidelberg, 2006.
  - [37] Mariam Lahami, Fairouz Fakhfakh, Moez Krichen, and Mohamed Jmaiel. Towards a ttcn-3 test system for runtime testing of adaptable and distributed systems. In *Testing Software and Systems : 24th IFIP WG 6.1 International Conference, ICTSS 2012, Aalborg, Denmark, November 19-21, 2012. Proceedings 24*, pages

- 71–86. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [38] Mariam Lahami, Moez Krichen, Hajer Barhoumi, and Mohamed Jmaiel. Selective test generation approach for testing dynamic behavioral adaptations. In *Testing Software and Systems : 27th IFIP WG 6.1 International Conference, ICTSS 2015, Sharjah and Dubai, United Arab Emirates, November 23-25, 2015, Proceedings 27*, pages 224–239. Springer International Publishing, 2015.
- [39] Mariam Lahami, Moez Krichen, Mariam Bouchakwa, and Mohamed Jmaiel. Using knapsack problem model to design a resource aware test architecture for adaptable and distributed systems. In *Testing Software and Systems : 24th IFIP WG 6.1 International Conference, ICTSS 2012, Aalborg, Denmark, November 19-21, 2012. Proceedings 24*, pages 103–118. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [40] Mariam Lahami, Moez Krichen, and Mohamed Jmaiel. Runtime testing approach of structural adaptations for dynamic and distributed systems. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 51(4) :259–272, 2015.
- [41] Afef Jmal Maâlej, Manel Hamza, Moez Krichen, and Mohamed Jmaiel. Automated significant load testing for ws-bpel compositions. In *2013 IEEE sixth international conference on software testing, verification and validation workshops*, pages 144–153. IEEE, 2013.
- [42] Afef Jmal Maâlej and Moez Krichen. A model based approach to combine load and functional tests for service oriented architectures. In *VECoS*, pages 123–140, 2016.
- [43] Afef Jmal Maâlej, Moez Krichen, and Mohamed Jmaiel. Conformance testing of ws-bpel compositions under various load conditions. In *2012 IEEE 36th annual computer software and applications conference*, pages 371–371. IEEE, 2012.
- [44] Afef Jmal Maâlej, Mariam Lahami, Moez Krichen, and Mohamed Jmaiel. Distributed and resource-aware load testing of ws-bpel compositions. In *ICEIS (2)*, pages 29–38, 2018.
- [45] Fatemeh Fadia Maghsood, Hamidreza Moradi, Ali Reza Massah Bavani, Mostafa Panahi, Ronny Berndtsson, and Hossein Hashemi. Climate change impact on flood frequency and source area in northern iran under cmip5 scenarios. *Water*, 11(2) :273, 2019.
- [46] Malika Makker, Ramya Ramanathan, and Sindhu B Dinesh. Post disaster management using satellite imagery and social media data. In *2019 4th International Conference on Computational Systems and Information Technology for Sustainable Solution (CSITSS)*, pages 1–6. IEEE, 2019.
- [47] Zaira Manzoor, Muhsan Ehsan, Muhammad Bashir Khan, Aqsa Manzoor, Malik Muhammad Akhter, Muhammad Tayyab Sohail, Asrar Hussain, Ahsan Shafi, Tamer Abu-Alam, and Mohamed Abioui. Floods and flood management and its socio-economic impact on pakistan : A review of the empirical literature. *Frontiers in Environmental Science*, 10 :2480, 2022.
- [48] Hafiz Suliman Munawar, Ahmed WA Hammad, and S Travis Waller. Remote sensing methods for flood prediction : A review. *Sensors*, 22(3) :960, 2022.

- [49] Robert Ogie, Juan Castilla Rho, Rodney J Clarke, and Alison Moore. Disaster risk communication in culturally and linguistically diverse communities : the role of technology. In *Proceedings*, volume 2, page 1256. MDPI, 2018.
- [50] Ashis Pradhan. Support vector machine-a survey. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(8) :82–85, 2012.
- [51] Memoona Sadaf, Zafar Iqbal, Abdul Rehman Javed, Irum Saba, Moez Krichen, Sajid Majeed, and Arooj Raza. Connected and automated vehicles : Infrastructure, applications, security, critical challenges, and future aspects. *Technologies*, 11(5) :117, 2023.
- [52] Thomas W Sanchez. Planning on the verge of ai, or ai on the verge of planning. *Urban Science*, 7(3) :70, 2023.
- [53] Sara Saravi, Roy Kalawsky, Demetrios Joannou, Monica Rivas Casado, Guangtao Fu, and Fanlin Meng. Use of artificial intelligence to improve resilience and preparedness against adverse flood events. *Water*, 11(5) :973, 2019.
- [54] Guy Schumann, Laura Giustarini, Angelica Tarpanelli, Ben Jarihani, and Sandro Martinis. Flood modeling and prediction using earth observation data. *Surveys in Geophysics*, pages 1–26, 2022.
- [55] Stephen C Slota, Kenneth R Fleischmann, Sherri Greenberg, Nitin Verma, Brenna Cummings, Lan Li, and Chris Shenefiel. Good systems, bad data ? : Interpretations of ai hype and failures. *Proceedings of the Association for Information Science and Technology*, 57(1) :e275, 2020.
- [56] Chanin Songchon, Grant Wright, and Lindsay Beevers. The use of crowdsourced social media data to improve flood forecasting. *Journal of Hydrology*, page 129703, 2023.
- [57] Mohammad Mustafa Taye. Understanding of machine learning with deep learning : Architectures, workflow, applications and future directions. *Computers*, 12(5) :91, 2023.
- [58] Amir Hossein Zaji, Hossein Bonakdari, and Bahram Gharabaghi. Developing an ai-based method for river discharge forecasting using satellite signals. *Theoretical and Applied Climatology*, 138 :347–362, 2019.
- [59] Salah Zidi, Alaeddine Mihoub, Saeed Mian Qaisar, Moez Krichen, and Qasem Abu Al-Haija. Theft detection dataset for benchmarking and machine learning based classification in a smart grid environment. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 35(1) :13–25, 2023.
- [60] Ainaa Hanis Zuhairi, Fitri Yakub, Sheikh Ahmad Zaki, and Mohamed Sukri Mat Ali. Review of flood prediction hybrid machine learning models using datasets. In *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, volume 1091, page 012040. IOP Publishing, 2022.