

**MODELISATION ET PREVISION DES INONDATIONS EN MILIEU  
SUBEQUATORIAL D'AFRIQUE SUBSAHARIENNE PAR  
APPRENTISSAGE PROFOND : CAS DU BASSIN VERSANT DE  
L'OUEME AU BENIN**

**Hubert SALANON  
Sous la direction du Professeur Claude CODJIA  
Novembre 2025**

# Plan

- Contexte
- Problématique
- État des connaissances
- Objectifs
- Hypothèses
- Méthodologie
- Résultats attendus

# Contexte

## Contexte canadien :

- ❖ Risque naturel le plus fréquent
- ❖ Catastrophe naturelle la plus coûteuse
- ❖ Impact économique majeur sur les infrastructures et les collectivités



## Facteurs déterminants des inondations :

- ❖ Cause principale : Mauvaise gestion de l'aménagement du territoire
- ❖ Cause secondaire : Facteurs climatiques
- ❖ Problématique fondamentale : Urbanisation inadaptée et occupation des zones inondables

(Thomas et Fakiroff, 2023)

# Afrique subsaharienne

## Facteurs de vulnérabilité aux inondations :

- Amplification climatique : Pluies intenses accrues par le changement climatique
- Pression urbaine : Urbanisation non planifiée et croissance démographique rapide
- Déficit infrastructurel : Réseaux hydrauliques insuffisants et inadaptés
- Cumul des risques : Interaction dangereuse entre aléas naturels et facteurs humains

## Impacts et conséquences :

- ❖ Exposition accrue des populations urbaines et périurbaines
  - Conséquences majeures :
  - Pertes humaines
  - Dégâts matériels considérables
  - Perturbations socio-économiques durables



## Tendances régionales récentes :

- ❖ Épisodes majeurs : Tchad, Nigéria, Niger et Sénégal
- ❖ Amplification régionale du phénomène
- ❖ Gravité accrue des impacts

# Au Bénin

## Événement significatif : Inondations de 2010

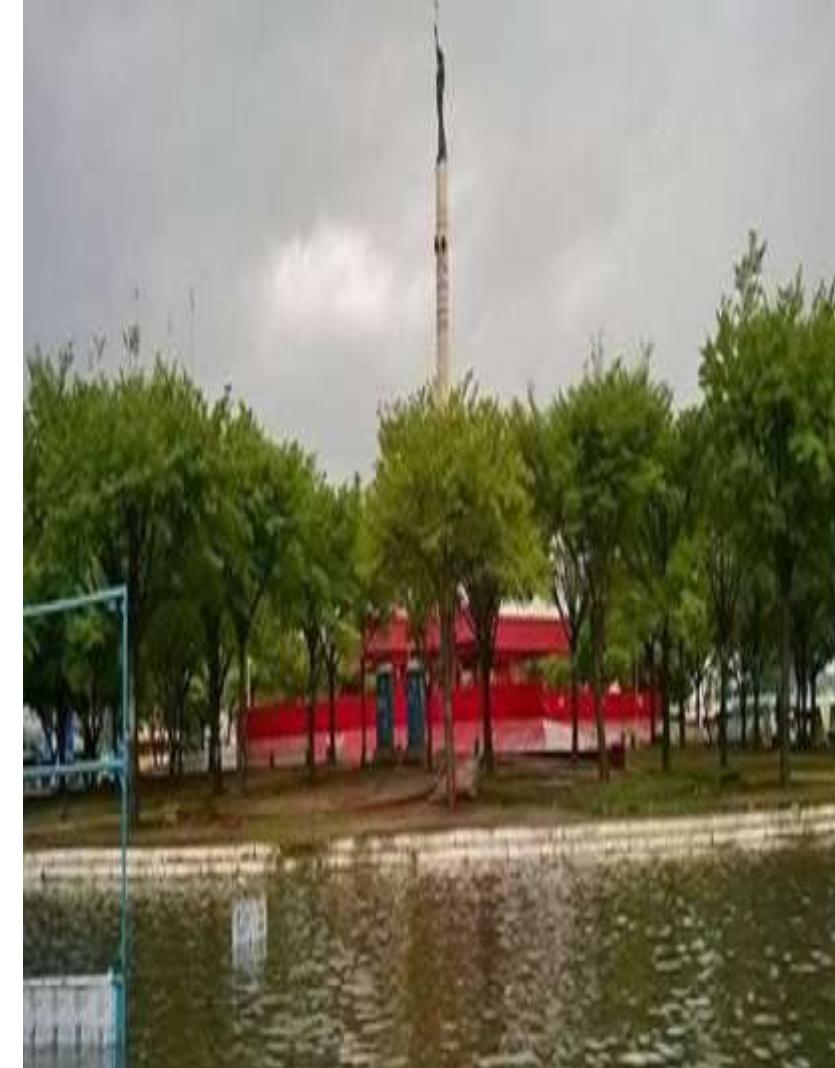
- Impact humain : Pertes de vies et déplacements de population
- Impact matériel : Destructions d'infrastructures et d'habitats
- Échelle affectée : Centaines de milliers de personnes touchées
- Caractérisation : Phénomène récurrent aux conséquences majeures

## Complexité du bassin de l'Ouémé :

- Pression anthropique : Urbanisation croissante et exploitation des plaines inondables
- Variabilités naturelles :
  - Transition climatique sud-nord compliquant la modélisation des pluies extrêmes
  - Variations topographiques importantes
- Grandes plaines inondables favorisant des écoulements lents
- Interactions multi-échelles entre facteurs physiques et climatiques

## Défi principal du bassin de l'Ouémé :

- Prévision des phénomènes d'inondation
- Objectif critique : Réduction des impacts humains et matériels



# Problématique

Rareté des données

Difficulté à modéliser  
les dynamiques non  
linéaires des  
inondations

Limites des outils  
traditionnels de  
modélisation  
hydrologique

## Nouvelles perspectives avec l'apprentissage profond :

- ❖ Modélisation des relations non-linéaires entre les facteurs d'inondation
- ❖ Intégration de données hétérogènes (satellitaires, séries temporelle, socio-économiques)
- ❖ Prévisions plus précises des crues grâce aux réseaux neuronaux
- ❖ Adaptation aux spécificités du bassin de l'Ouémé
- ❖ une gestion proactive du risque inondation

(Kratzert *et al.*, 2018)

# État des connaissances

## □ Causes :

- ❖ Afrique subsaharienne : Interaction entre facteurs naturels et anthropiques.
- ❖ Impact climatique : +7% de vapeur d'eau par °C (intensification des pluies extrêmes)
- ❖ Caractéristiques physiques du bassin : (faibles pentes, sols imperméables) amplifient le ruissellement et la stagnation des eaux.

(Hounguè, 2020 ; Bamory, 2006 ; Djaouga et al., 2017)

## Dommages:

### **Plan économique**

- En 2010
- 82 milliards de FCFA de pertes.
  - (FMI, 2020 ; Gouvernement du Bénin et Banque Mondiale, 2011)

### **Plan social**

- En 2010
- Importants déplacements de population et pertes humaines.
- La destruction de 55 000 habitations et 92 centres de santé
  - (GIEC, 2023 ; Gouvernement du Bénin et Banque Mondiale, 2011 ; Adjimehossou, 2022)

# Mesures de préventions

Méthodes de Gumbel

- Limites face à la non-stationnarité climatique

Models statistiques GEV

- Manque de capacité prédictive et opérationnelle

Intégration des savoirs locaux

- Manque crucial de données hydrologiques fiables.

(Badou et al. 2021 ; Hounkpè et al. 2015 ; Togbodouno 2020)

# Objectifs et hypothèses

## Objectif principal :

Développer et valider un modèle de prévision des inondations basé sur l'apprentissage profond en intégrant les données hydrométéorologiques, topographiques, et satellitaires afin d'anticiper les crues et de soutenir la mise en place d'un système d'alerte précoce participatif dans le bassin versant de l'Ouémé

## Objectifs spécifiques :

- OS1 : Analyser et modéliser les déterminants spatio-temporels des inondations dans le bassin de l'Ouémé à partir des séries de données hydrométéorologiques, topographiques et satellitaires, afin d'établir une cartographie dynamique des zones à risque.
- OS2 : Concevoir, entraîner et valider un modèle hybride d'apprentissage profond (LSTM-CNN) pour la prévision des inondations, et comparer ses performances à celles des modèles hydrologiques traditionnels.
- OS3 : Co-construire un système d'alerte précoce intelligent fondé sur les sorties du modèle développé et intégrant les savoirs locaux, en vue d'améliorer la réactivité et la résilience communautaire face aux inondations.

## Hypothèse principale :

L'intégration d'un modèle hybride d'apprentissage profond (LSTM-CNN) avec les savoirs locaux et les mécanismes communautaires de prévention permet de développer un système de prévision des inondations précis, opérationnellement et socialement acceptable, conduisant à une réduction significative de la vulnérabilité des populations du bassin versant de l'Ouémé

## Hypothèse spécifiques :

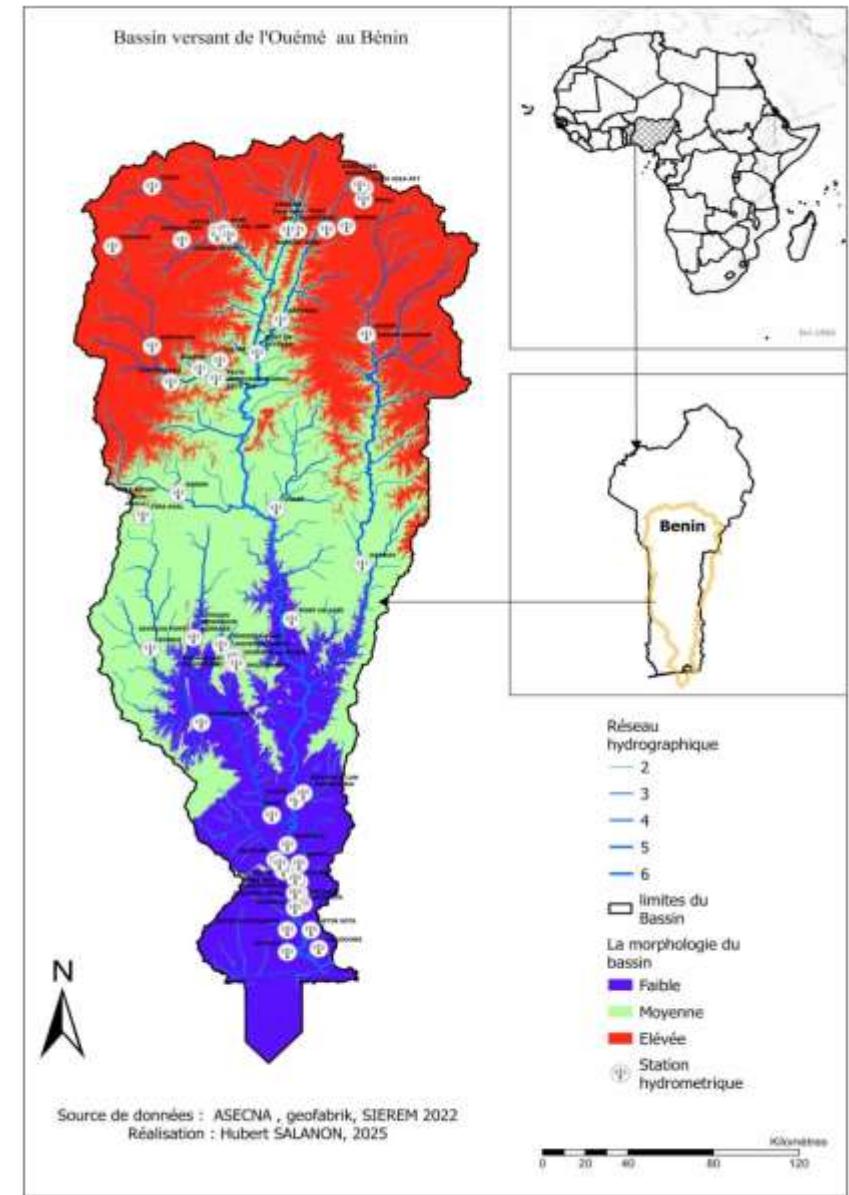
- H1 : La combinaison de données hydrométéorologiques, topographiques et satellitaires améliore significativement la détection des facteurs déclencheurs des inondations et la précision de la cartographie des zones inondables du bassin de l'Ouémé.
- H2 : Le modèle hybride LSTM-CNN offre une performance prédictive supérieure aux modèles hydrologiques classiques, en raison de sa capacité à apprendre simultanément les dépendances temporelles et les structures spatiales.
- H3 : L'intégration des prévisions issues du modèle hybride avec les indicateurs empiriques locaux des communautés riveraines augmente la fiabilité, l'acceptabilité et l'efficacité opérationnelle du système d'alerte précoce.

# Méthodes

## Milieu d'étude

- ❖ 50 000 km<sup>2</sup> (44% du territoire béninois)
- ❖ Source : Montagnes de l'Atakora (Nord-Ouest)
- ❖ Embouchure : Lac Nokoué et lagune de Porto-Novo (Sud)
- ❖ Particularité : Déborde sur le Togo et le Nigeria

(Lawin et al., 2019)



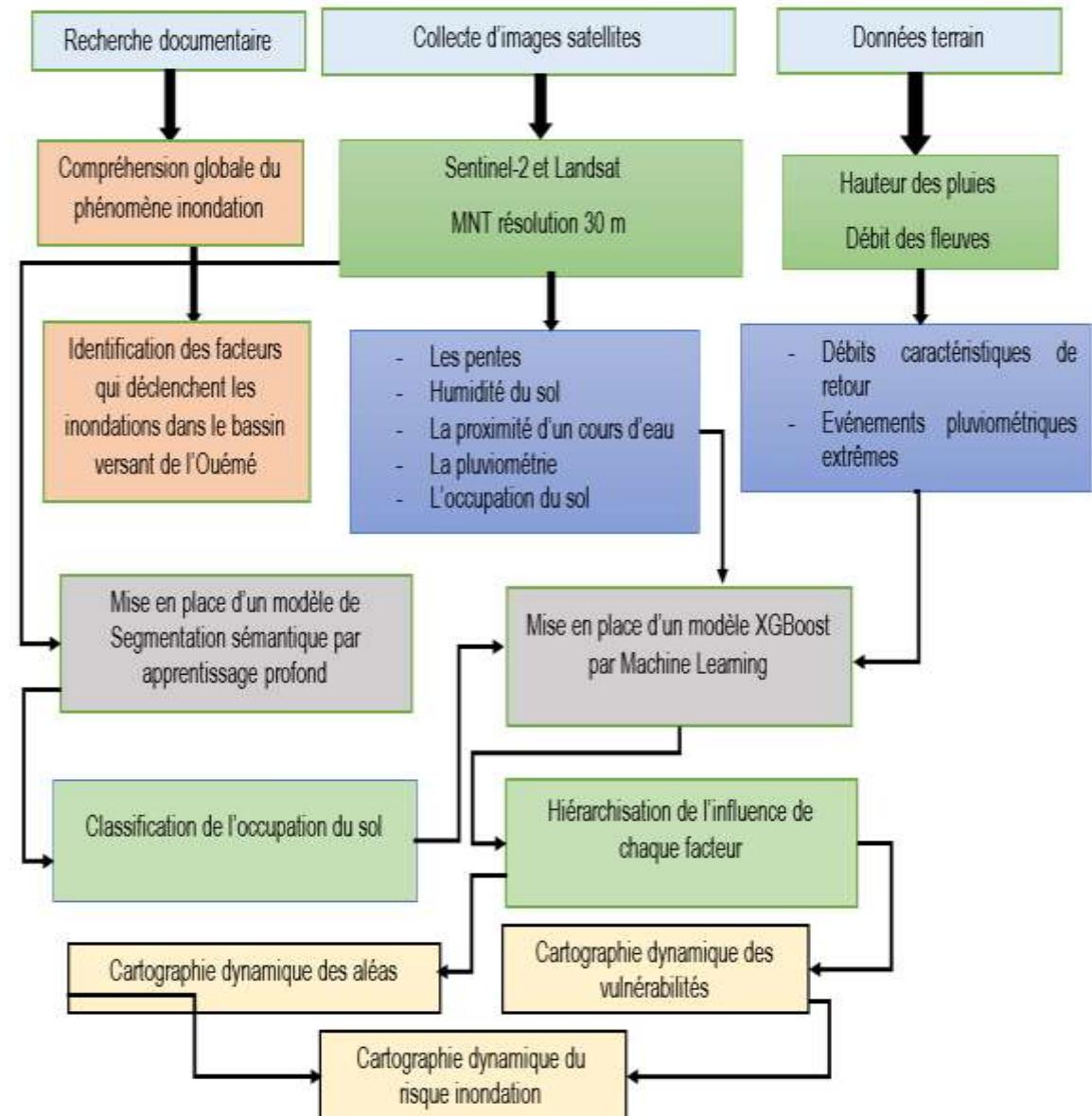
# Méthodologie de l'objectif spécifique 1

## • Données utilisées :

- ❖ Images satellitaires (Sentinel-2, Landsat) et MNT
- ❖ Séries temporelles pluviométrie/débits

## • Mise en oeuvre :

- ❖ Recherche documentaire
- ❖ Cartes thématiques (occupation sol, pente, humidité du sol, proximité d'un cours d'eau et la pluviométrie)
- ❖ Pondération des facteurs par méthode AHP de Saaty
- ❖ Segmentation sémantique des images Sentinel-2
- ❖ Pondération des facteurs avec le modèle XGBoost (Machine Learning)
- ❖ Production de cartes d'aléa, vulnérabilité et risque



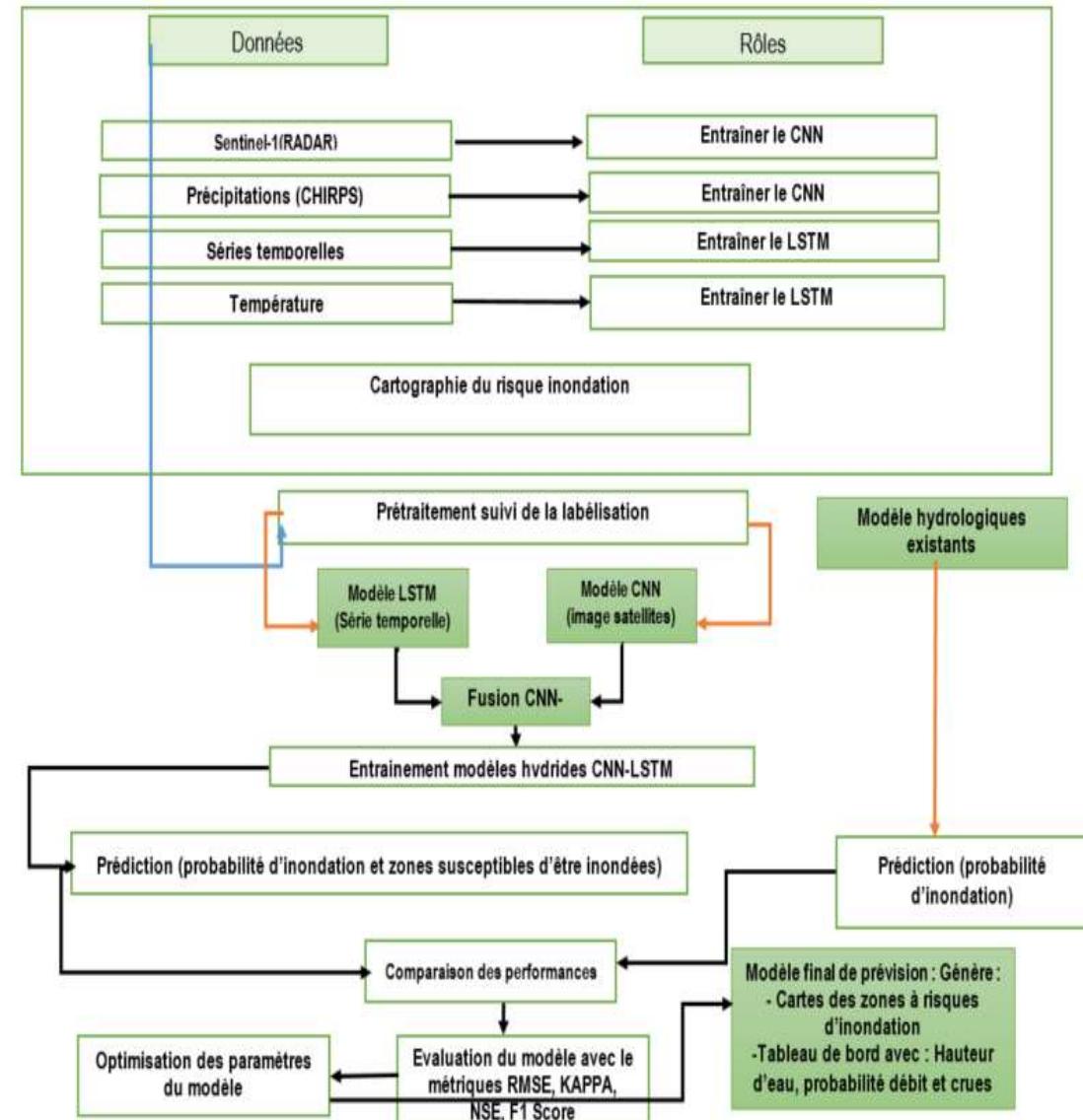
# Méthodologie de l'objectif spécifique 2

- Données utilisées :

- ❖ Séries temporelles pluie-débit
- ❖ Radar Sentinel-1

- Mise en oeuvre

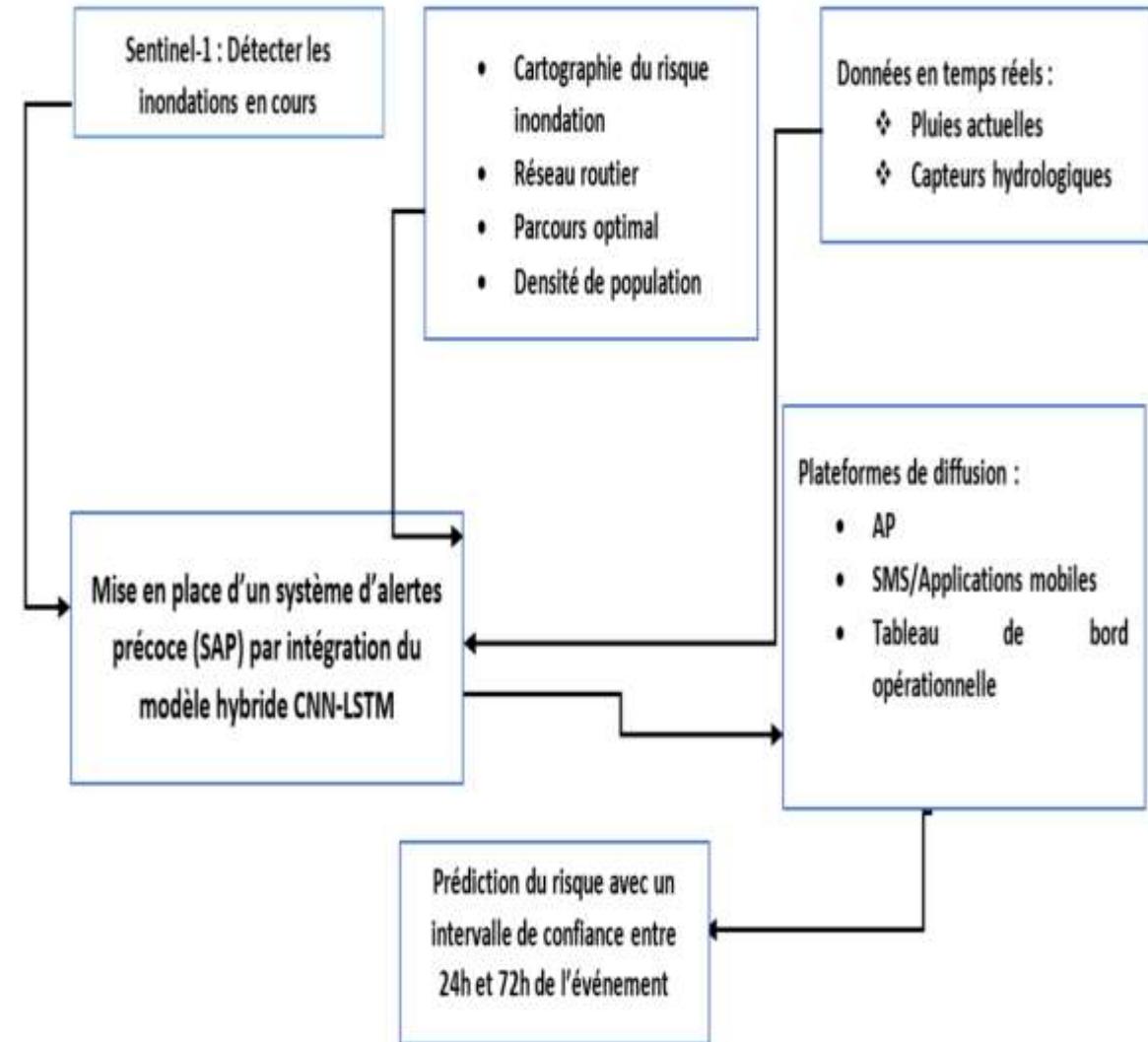
- ❖ Modèle LSTM pour la prévision des crues à partir des séries temporelles pluie-débit
- ❖ Modèle CNN pour la détection des zones inondées via images Sentinel-1
- ❖ Modèle CNN pour pour apprentissage supervisé avec images drone haute résolution
- ❖ Fusion des capacités temporelles (LSTM) et spatiales (CNN)



# Méthodologie de l'objectif spécifique 3

## • Mise en oeuvre

- ❖ Développer un SAP opérationnel fondé sur le modèle hybride LSTM-CNN, en collaboration avec les populations locales de Bonou et de Bétérou.
- ❖ Méthodologie : questionnaires CSPRO pour interroger la population vivant à proximité du cours d'eau afin de définir les seuils d'alerte et les canaux de communication. )



# Résultats attendus

## Principaux résultats attendus :

- Base de données spatio-temporelle interopérable
- Identification et pondération des facteurs déclencheurs d'inondations
- Modèle hybride LSTM-CNN pour la prévision des crues
- Système d'alerte précoce co-construit avec les communautés

## Impact :

- ✓ Cadre méthodologique reproductible pour la région
- ✓ Renforcement significatif de la résilience aux inondations
- ✓ Approche intégrée combinant innovation technique et participation locale

MERCI POUR VOTRE ATTENTION