

# Recrudescence des pluies extrêmes au Sahel: quelle hauteur optimale pour la digue de protection de Mopti contre les inondations récurrentes ?



Dr Hamidou DIAWARA  
AGRHYMET CCR-AOS

# Plan de la présentation

- Introduction/Problématique
- Zone d'étude
- Méthodologie (données, outils et méthodes)
- Résultats et discussion
- Conclusion et recommandations



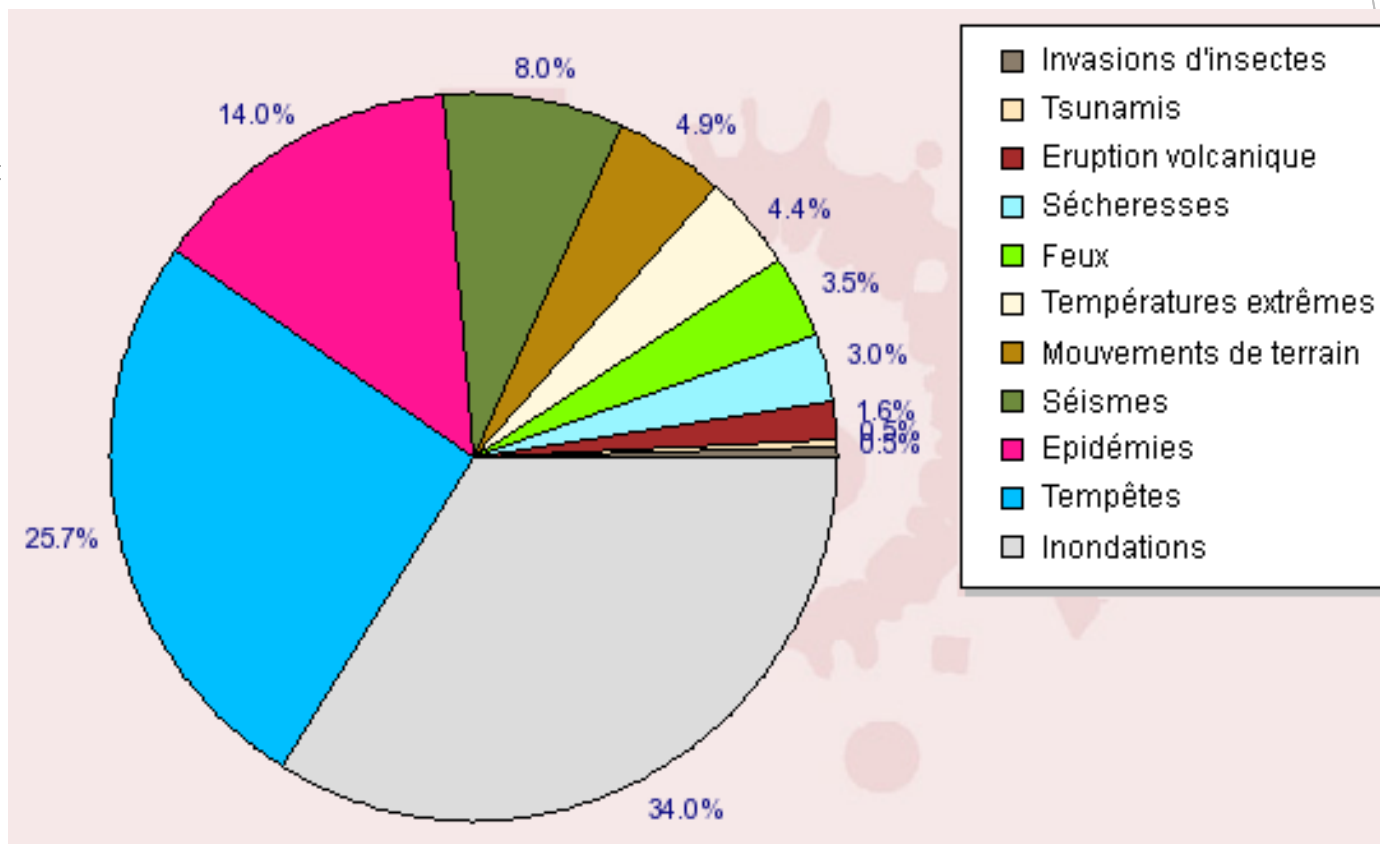
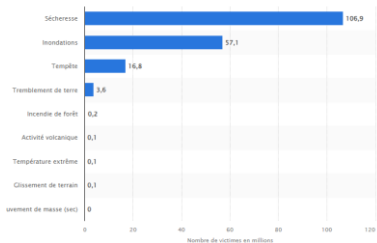
# Introduction/Problématique (1/2)

L'inondation est-elle une catastrophe naturelle aussi rare qu'on pourrait penser ?

## La Réponse en quelques chiffres

- 34,0% des catastrophes naturelles survenues dans le monde entre 1990 et 2007 sont des inondations
- 1,47 milliard de personnes dans le monde sont exposées à un risque modéré d'inondation dont 171,4 millions en Afrique subsaharienne selon Rentschler et al. (2020), Banque mondiale<sup>1</sup>.
- La deuxième catastrophe naturelle après la sécheresse, en nombre de victimes de dans le monde en 2022.

<https://fr.statista.com/statistiques/659874/nombre-victimescatastrophes-naturelles-par-continent-et-type/>



Statistiques sur les types de catastrophes naturelles de catastrophes survenues dans le monde de 1990 à 2007

Source : EM-DAT ([https://www.notre-planete.info/terre/risques\\_naturels/catastrophes\\_naturelles.php#nombre](https://www.notre-planete.info/terre/risques_naturels/catastrophes_naturelles.php#nombre))

<sup>1</sup><https://blogs.worldbank.org/fr/voices/1-47-milliard-de-personnes-sont-exposees-risque-inondation>


# Introduction/Problématique (2/2)

## Contexte national

Plusieurs zones urbaines du Mali connaissent des inondations régulières qui sont multi facteurs (**Diawara et al., 2019 ; Chahinian et al., 2023**).

La commune urbaine de Mopti est particulièrement exposée et vulnérable aux inondations à cause de sa géographie et d'autres facteurs :

- située à la confluence du fleuve Niger et du Bani,
- située majoritairement dans le Delta Intérieur du Niger<sup>2</sup> (DIN) et,
- densément peuplée,
- limitation de l'extension territoriale à cause des contraintes naturelles,
- 75% des habitations de la région de Mopti sont en banco (INSTAT, 2012),
- etc.

Depuis le début du 21<sup>e</sup> siècle, la ville de Mopti est protégée des inondations fluviales par des digues (Gayme et al., 2009). Malgré cela, les inondations y sont récurrentes ces dernières 

***Problématique : Les côtes maximales journalières du fleuve ont-elles significativement évolué par rapport aux années antérieures ?***

<sup>2</sup> <https://ml.chm-cbd.net/fr/delta-interieur-du-niger>

# Présentation de la zone d'étude (1/2)

## Situation géographique

- D'une superficie de 125 km<sup>2</sup>, elle est située à la confluence du fleuve Niger et d'un de ses affluents majeurs, le Bani.
- Communément appelée la « Venise malienne », Mopti est entourée par une vaste plaine rizicole qui fait que la ville est enclavée en période de crue car ne disposant que d'une seule voie bitumée qui la relie à l'extérieur.



Source : RAMSAR, <https://rsis.ramsar.org/fr/rs/1365?language=fr>

# Présentation de la zone d'étude (2/2)

## Situation socioéconomique

- La commune urbaine de Mopti comptait 185 339 hbts en 2022 (**DNP, 2022**).
- Carrefour : 25,5% de la population urbaine de Mopti sont des immigrants (**INSTAT, 2012**), principalement venus des régions du Nord (Tombouctou, Gao et Kidal) et un peu de Ségou. La densité de la population en 2009 : 51,4 hbts/km<sup>2</sup> (**BERD/CADIS, 2011**)
- A cause des contraintes territoriales et des besoins croissants, il y a de plus en plus de construction d'habitats dans des zones inondables (**Touré et al., 2021**).
- Prédominance des maisons en banco.
- Activités principales : la pêche, la riziculture, l'élevage, le commerce.



# Méthodologie (1/4)

## Données

Les côtes maximales journalières annuelles (Hmax-j) de 1922 à 2022 à la station hydrométrique de Mopti sur le fleuve Niger. Il y avait environ 9% de données manquantes (pour les périodes 1930-1933 et 1937-1942).

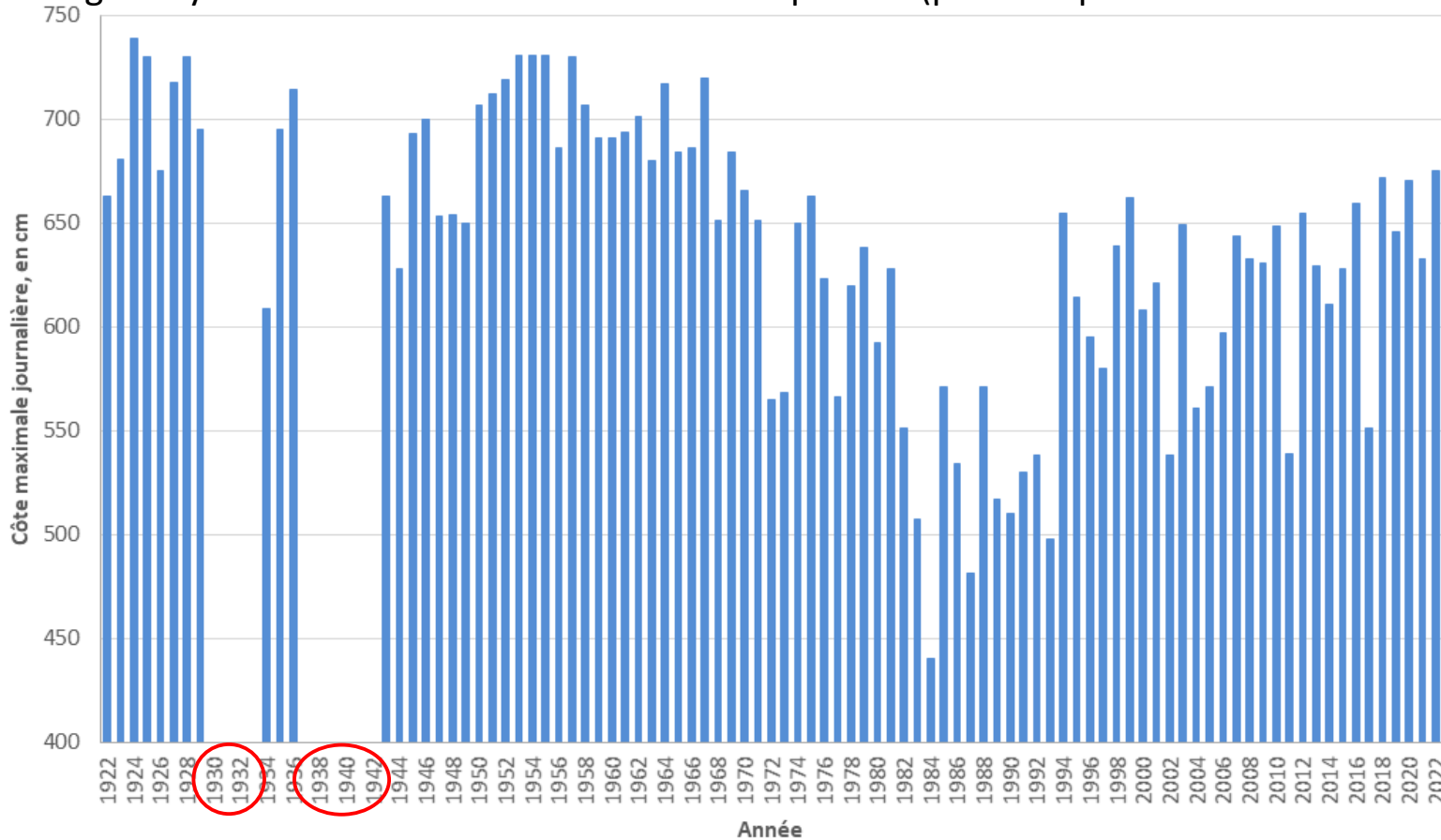


Fig. 1 : Série chronologique.

# Méthodologie (2/4)

## ☐ Méthodes

### Comblement des vides

Afin de disposer d'une longue série pour des analyses plus poussées, et vu la courte longueur des vides, il a été effectué de façon linéaire en deux étapes :

- les côtes des  $k-1$  et  $k+n+1$  de part et d'autre du vide ont été utilisées pour calculer une constante additionnelle  $C$  :

$$C = \frac{H_{k+n+1} - H_{k-1}}{\text{Année}_{k+n+1} - \text{Année}_{k-1}} \quad (1)$$

- Ensuite la valeur de chaque année manquante a été calculée en additionnant la constante  $C$  à celle de l'année précédente :

$$H_i = H_{i-1} + C, \quad (2)$$

où  $i$  varie de  $k$  à  $k+n$ .



# Méthodologie (3/4)

## ☐ Méthodes

### Analyse de la série temporelle

L'ensemble des tests statistiques réalisés :

- Tests d'égalité des variances (F-test) et des moyennes (t-test) sous XLSTAT (**Ondo et al., 1997**)
- Test de rupture de Pettitt, appliqué de façon progressive avec Khronostat (**Faye et al., 2015**)
- Test de tendance de Man-Kendall dans XLSTAT, à chacune des séries délimitées dans la précédente étape (**Hirsch et al., 1984**)

### Analyse du régime des côtes maximales journalières

La référence pour cette analyse est la côte d'alerte qui est de **650 cm** (DNH, 2024).

- Les déviations des côtes maximales journalières par rapport à la côte d'alerte ont été générées et réduites par la formule ci-dessous :

$$\delta H = \frac{\Delta H}{\alpha_{\Delta H}} = \frac{H_i - H_a}{\alpha_{\Delta H}}, \quad (8)$$

d'où  $\Delta H$  - déviation absolue, en cm ;  $H_i$  - côte maximale journalière de l'année  $i$ , en cm ;  $H_a$  - côte d'alerte inondation ( $H_a = 650$  cm) ;  $\alpha_{\Delta H}$  - écart-type de la déviation absolue, en cm ;  $\delta H$  - déviation réduite.

# Méthodologie (4/4)

## ☐ Méthodes

### Analyse du régime des côtes maximales journalières

- Ensuite à partir du nombre de jours où la côte est supérieur à la côte d'alerte, l'indice suivant à été calculé afin d'observer les moments les plus critiques de la crue à l'échelle décadaire :

$$I = \frac{N_{H_a^+}}{D_p D_d}, \quad (9)$$

d'où  $N_{H_a^+}$  – nombre de jours où  $H \geq H_a$  ;  $D_p$  – longueur de la période (nombre d'années) ;  $D_d$  – longueur de la décade (nombre de jours). Théoriquement, cet indice varie de 0 (lorsque  $H < H_a$  durant toute la décade) à 1 (lorsque  $H \geq H_a$  pendant tous les jours de la décade).

- Enfin, une analyse comparative des ajustements des côtes par la loi de Gumbel a été effectuée afin d'évaluer leur évolution entre différentes périodes (**Kouassi et al., 2018**).

# Résultats et discussion (1/4)

## Estimation des valeurs manquantes et tests d'homogénéité

Les tests ont montré une inégalité significative entre les variances et entre les moyennes des deux parties de la série analysée, avec une p-value < 0,0001.

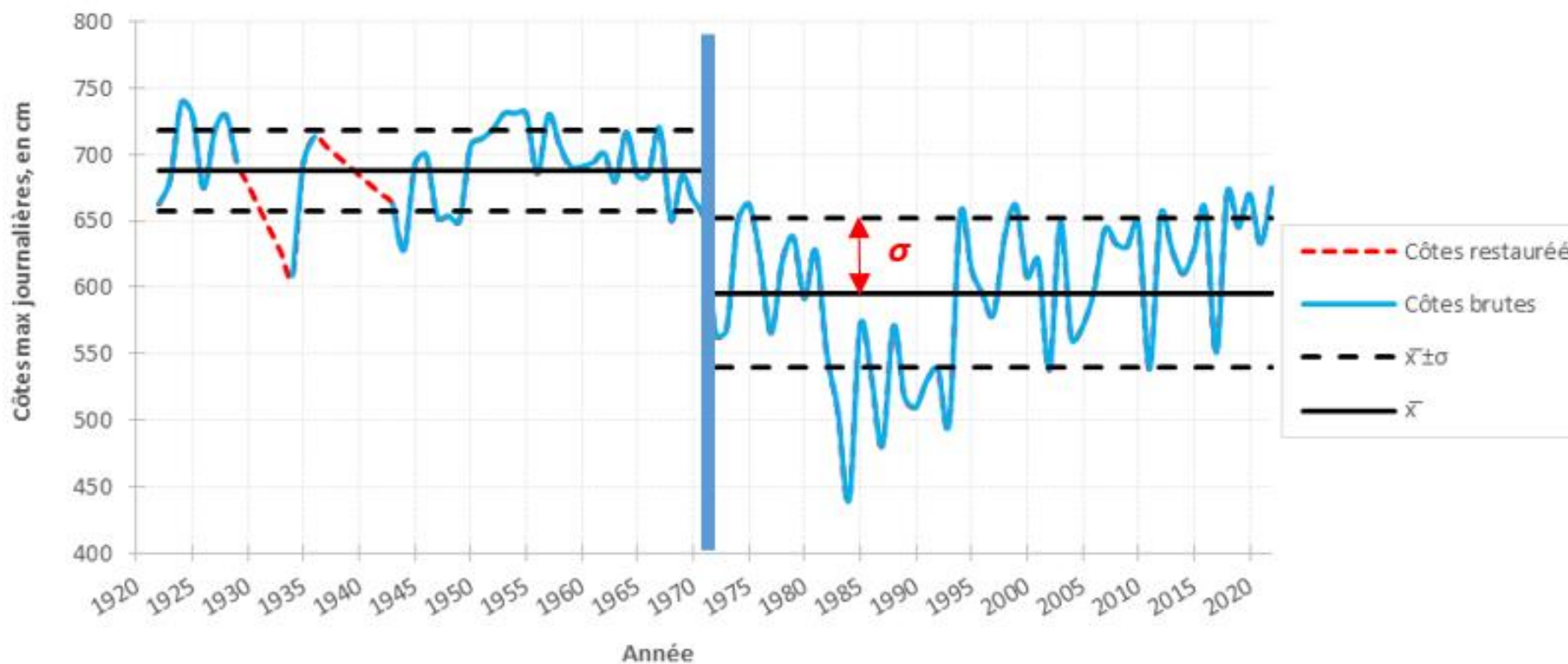


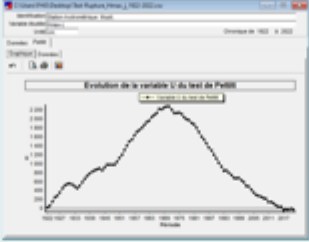





Fig. 2 : Série chronologique restaurée de Hmax-j et illustration des tests  $F$  et  $t$ .

# Résultats et discussion (2/4)

## Ruptures et tendances

1. Les années de rupture détectées sont 1970 et 1993, ce qui concorde avec ceux obtenus dans plusieurs recherches menées sur le changement climatique en l'Afrique de l'Ouest (**Patrel et al., 1998** ; **AGRHYMET/CILSS, 2010**).
2. Le test de Man-Kendall montre une tendance à la baisse hautement significative entre 1971 et 1993, avec une p-value de 0,001. C'est au cours de cette période que l'occupation des zones à risque d'inondation à Mopti s'est intensifiée (**Touré et al., 2021**). Le même constat a été fait par **Diawara et al. (2019)** à Bamako.

Tab. 1 : Synthèse des tests de rupture et des tendances

Tests de Pettitt		Test de Man-Kendall	
N°	Caractéristiques	Illustration	
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Période du test : 1922-2022</li> <li>• p-value : &lt; 0,0001</li> <li>• <b>année de rupture : 1970</b></li> <li>• <b>sous période détectée : 1922-1970</b></li> <li>• <b>longueur : 49 ans</b></li> </ul>		<p>Tendance à la hausse pas significative (p-value = 0,763 &gt; 0,05*)</p> 
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Période du test : 1971-2022</li> <li>• p-value : 0,0083</li> <li>• <b>année de rupture : 1993</b></li> <li>• <b>sous période détectée : 1971-1993</b></li> <li>• <b>longueur : 23 ans</b></li> </ul>		<p>Tendance à la baisse hautement significative (p-value = 0,001**)</p> 
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Période du test : 1971-2022</li> <li>• p-value : néant</li> <li>• <b>année de rupture : pas de rupture</b></li> <li>• <b>sous période détectée : 1994-2022</b></li> <li>• <b>longueur : 29 ans</b></li> </ul>		<p>Tendance à la hausse pas significative (p-value = 0,084 &gt; 0,05*)</p> 

# Résultats et discussion (3/4)

## Chronologie et intensité des côtes au déçu du niveau d'alerte

Selon la distribution des déviations standardisées (Fig. 3), 83,3% des dépassements de la côte d'alerte ont eu lieu jusqu'en 1970, et seulement 13,0% à partir de 1994.

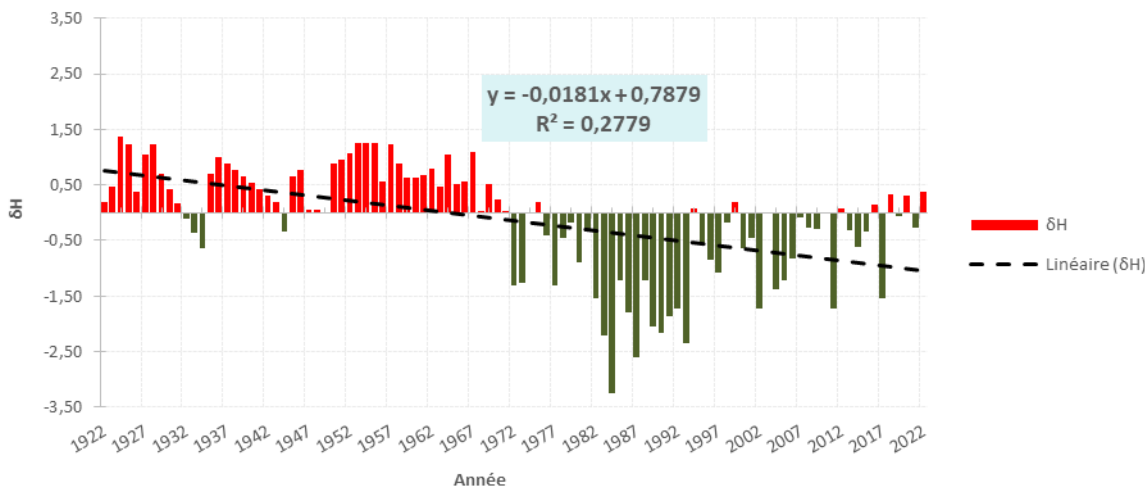


Fig. 3 : Distribution des déviations standardisées.

### Analyse de la Fig. 4 :

- période plus longue (de fin septembre à début décembre) entre 1944 et 1970, avec le pic dans la dernière décennie d'octobre.
- une intensité faible à modérée dans la dernière décennie du mois d'octobre entre 1994 et 2009.

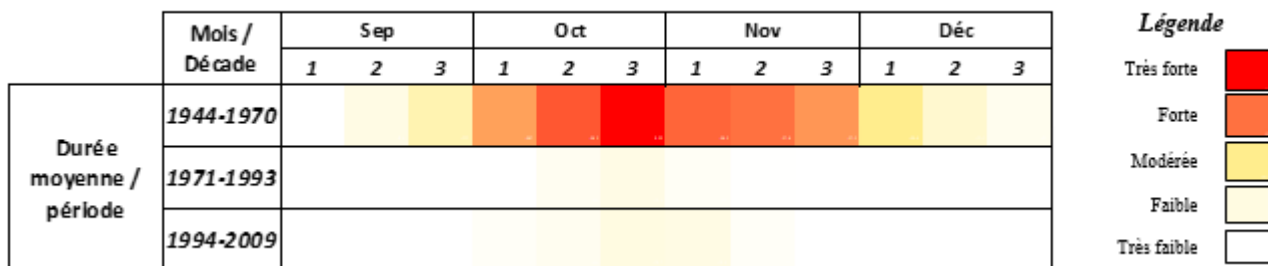


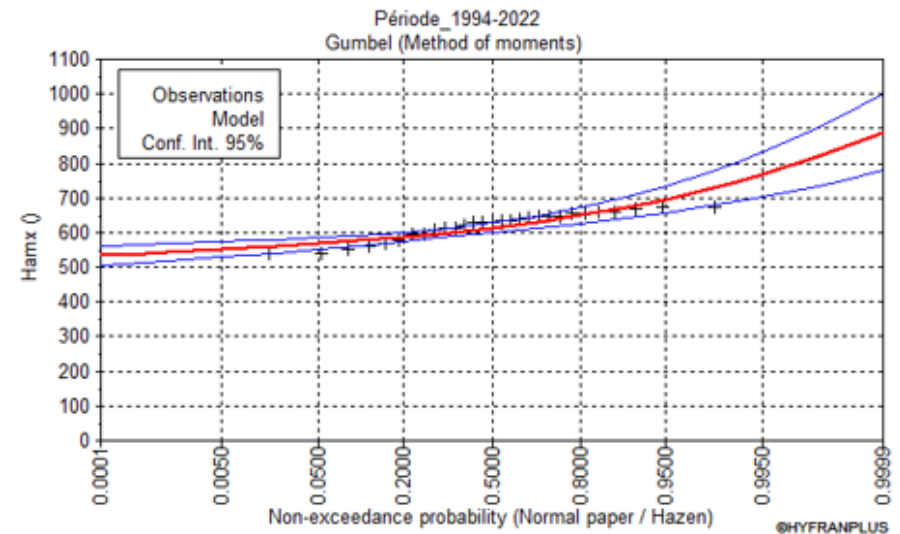
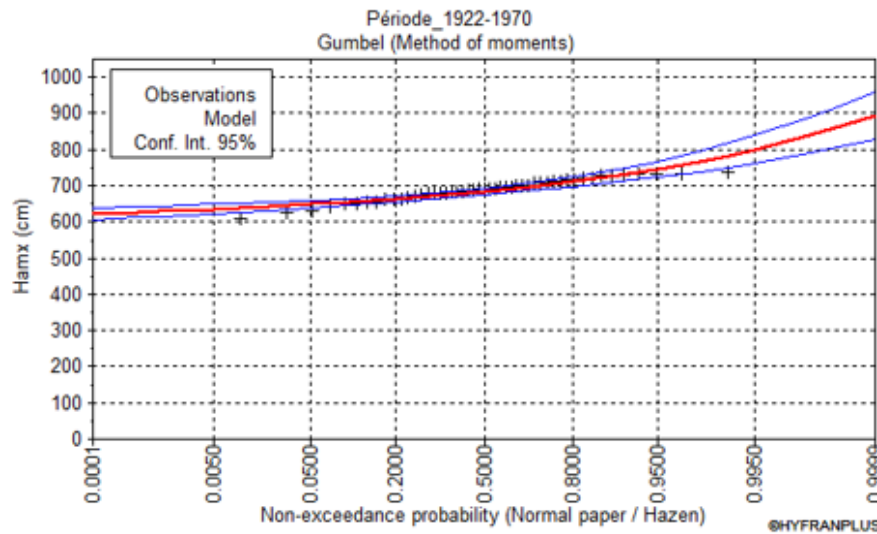
Fig. 4 : Chronologie et intensité des côtes maximales au dessus de la côte d'alerte.

# Résultats et discussion (4/4)

## Analyse comparative des distributions

Malgré une tendance à la hausse, pour le moment non significative, la fréquence et la grandeur des côtes maximales au cours de près des 30 dernières années (1994-2022) n'ont pas atteint le niveau de 1922-1970 (Tab. 2).

**Fig. 5 :**  
Ajustement des côtes maximales journalières par la loi de Gumbel.



**Tab. 2 :** Comparaison des côtes de même fréquence de deux périodes différentes

Fréquence de non-dépassement	Temps de retour (en an)	Côte, en cm		Evolution (en %)
		1922-1970	1994-2022	
0,900	10	728	673	-07,6
0,500	2	684	615	-10,1
0,100	≈ 1	655	577	-11,9

# Conclusion et recommandations

En conclusion de cette étude nous pouvons dire que pour le moment, ni la fréquence, ni l'intensité des côtes maximales du fleuve Niger à Mopti n'ont atteint le niveau au cours de la période d'avant 1970. Cependant, il est observé une légère tendance à la hausse, certes non significative, qui, si elle se maintient laisse présager une augmentation des inondations. Celles-ci pourraient fortement impacter la commune de Mopti tant les enjeux exposés aux inondations (dans les zones inondables) ont fortement augmenté depuis les années 1971-1993 au cours desquelles la tendance était à la baisse de façon très hautement significative.

En ce moment où les prévisions tables sur une accélération des extrêmes climatiques, il est opportun de faire les recommandations ci-après pour la commune urbaine de Mopti :

- entreprendre des travaux de rehaussement de la hauteur des digues et/ou ;
- empêcher de nouvelles installations dans des zones exposées à l'inondation fluviale, voire déguerpir celles déjà occupées.

**Merci !**