

# Analyse paléoclimatique du Younger Dryas : impacts sur l'AMOC, l'Afrique et l'archéologie

Joseph Boulos - Louai Benkhabcheche - Nour Al Bagoury

Mars 2025

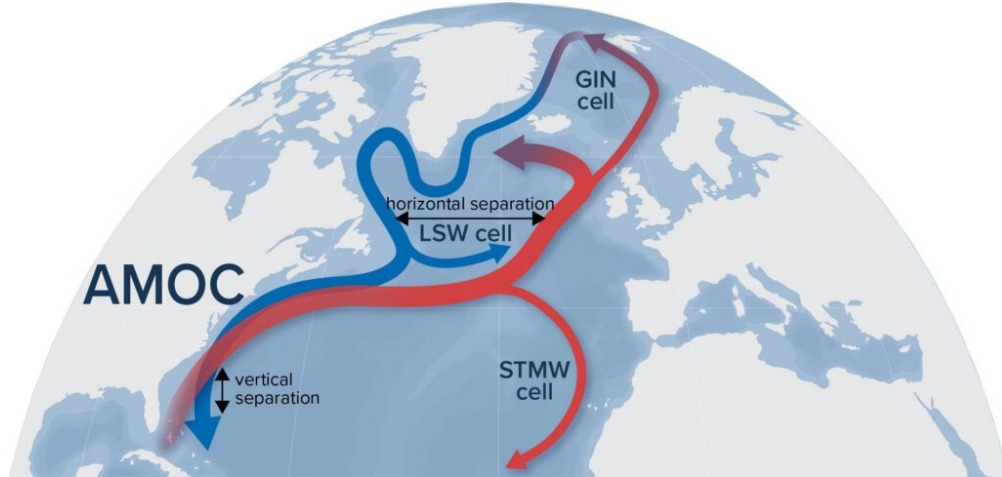
## Abstract

Entre **20 000 et 10 000 ans avant le présent**, la Terre traverse une succession de bouleversements climatiques majeurs marquant la fin de la dernière ère glaciaire, qui avait duré environ **100 000 ans**. Vers **20 000 ans**, le *Dernier Maximum Glaciaire* correspond à l'extension maximale des calottes glaciaires. Un réchauffement progressif s'amorce ensuite, culminant avec le **Bølling-Allerød** (vers 14 700 ans), période de redémarrage brutal de la circulation océanique (AMOC) et de réchauffement global. Ce répit est cependant interrompu brutalement par le **Younger Dryas** (12 900–11 700 ans), un retour soudain au froid. Ce refroidissement pourrait être dû à un **afflux massif d'eau douce** dans l'Atlantique Nord lié à la **vidange de lacs proglaciaires** (comme le lac Agassiz), perturbant l'AMOC, ou à un **impact cosmique** ayant modifié l'atmosphère. Cette séquence illustre la grande sensibilité du système climatique à des forçages multiples.

## 1 Partie I — Comment une fonte glaciaire soudaine a-t-elle propagé une perturbation climatique à l'échelle mondiale ?

### 1.1 L'AMOC

La **circulation méridienne de retournement atlantique (AMOC)** est un composant fondamental du système climatique terrestre. Elle désigne un ensemble de courants océaniques profonds et de surface qui transportent de grandes quantités de chaleur et de sel à travers l'Atlantique. L'AMOC agit comme un extit "tapis roulant océanique" : les eaux chaudes et salées se déplacent vers le nord en surface, se refroidissent et plongent dans les hautes latitudes, avant de retourner vers le sud en profondeur. Ce mécanisme contribue à réguler le climat, notamment en réchauffant l'Europe occidentale. Toutefois, il est sensible aux apports d'eau douce (fonte des glaciers, précipitations accrues) qui réduisent la densité des eaux de surface nordiques et peuvent affaiblir, voire interrompre, cette circulation. Des épisodes climatiques comme le Dryas Récent illustrent le rôle crucial de l'AMOC dans les basculements climatiques rapides du passé.



## 1.2 Modèle conceptuel de Stommel

Nous avons utilisé un modèle à deux boîtes simplifié de type Stommel pour illustrer l'effet d'un apport d'eau douce sur la circulation méridienne de retournement atlantique (AMOC). Une boîte représente les hautes latitudes (froides), l'autre les basses latitudes (chaudes).

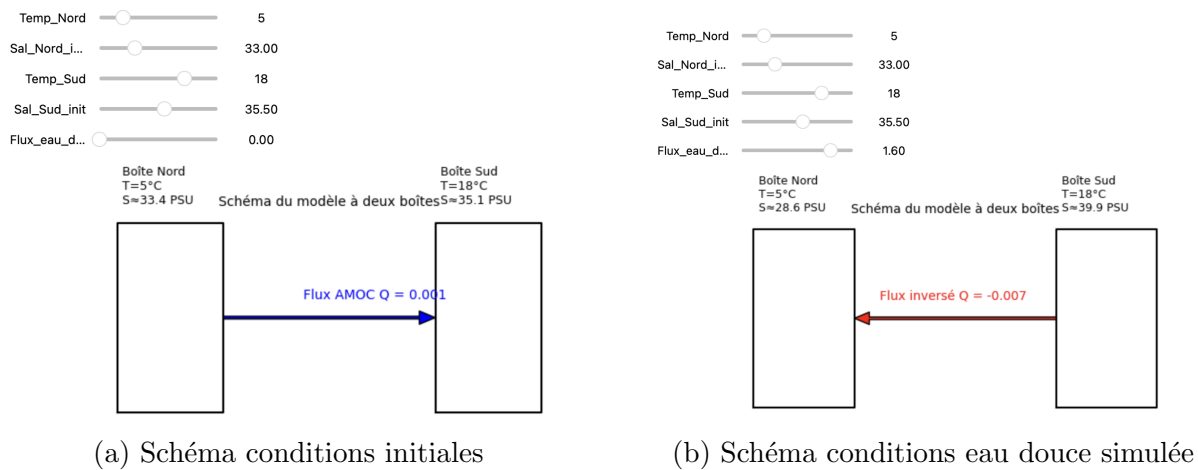


Figure 1: Comparaison de l'évolution de la circulation sur notre AMOC simulé

### 1.2.1 Concept

Ce modèle simplifié à deux boîtes de la circulation méridienne de retournement atlantique (AMOC) permet de simuler la réponse du système à une impulsion d'eau douce, inspirée par des événements comme le Dryas Récent. Le modèle est basé sur la différence de densité due aux contrastes de température et de salinité entre les basses et hautes latitudes, selon l'approche de Stommel (1961).

### 1.2.2 Simulation Numérique

#### Paramètres Physiques

- Coefficient de dilatation thermique:  $\alpha = 2 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- Coefficient de contraction haline:  $\beta = 8 \times 10^{-4} \text{ PSU}^{-1}$
- Constante de couplage hydraulique:  $k = 1.0$

#### Equations

##### Densité et flux de circulation

La densité de l'eau de mer dépend linéairement de la température ( $T$ ) et de la salinité ( $S$ ), selon :

$$\Delta\rho = -\alpha(T_{\text{nord}} - T_{\text{sud}}) + \beta(S_{\text{nord}} - S_{\text{sud}})$$

où :

- $\alpha$  est le coefficient de dilatation thermique (valeur typique :  $2 \times 10^{-4}$ ),
- $\beta$  est le coefficient de contraction haline (valeur typique :  $8 \times 10^{-4}$ ),
- $T_{\text{nord}}, T_{\text{sud}}$  : températures des boîtes nord et sud,
- $S_{\text{nord}}, S_{\text{sud}}$  : salinités des boîtes nord et sud.

Le flux méridien de retournement  $Q$  est alors proportionnel à cette différence de densité:

$$Q = K \cdot \Delta\rho$$

où  $K$  est une constante de proportionnalité.

##### Évolution de la salinité

La salinité de chaque boîte évolue selon l'échange d'eau entre les boîtes et un éventuel forçage externe d'eau douce  $F$  appliqué à la boîte nord. On suppose des volumes égaux et constants pour les deux boîtes. Les équations d'évolution sont :

$$\begin{aligned}\frac{dS_{\text{nord}}}{dt} &= |Q|(S_{\text{sud}} - S_{\text{nord}}) - F \\ \frac{dS_{\text{sud}}}{dt} &= |Q|(S_{\text{nord}} - S_{\text{sud}}) + F\end{aligned}$$

Le terme  $|Q|$  représente la quantité d'eau échangée (toujours positive), tandis que le signe du flux  $Q$  donne la direction (nord  $\rightarrow$  sud si  $Q > 0$ , sud  $\rightarrow$  nord si  $Q < 0$ ). Le forçage  $F$  est une entrée d'eau douce qui diminue la salinité du nord et est compensée dans la boîte sud pour conserver la masse d'eau totale.

## Intégration temporelle

Le système est résolu numériquement à l'aide d'une méthode d'Euler explicite, sur un pas de temps discret, sur une période de  $t_{\max}$  unités arbitraires (souvent interprétées comme des années dans les simulations climatiques).

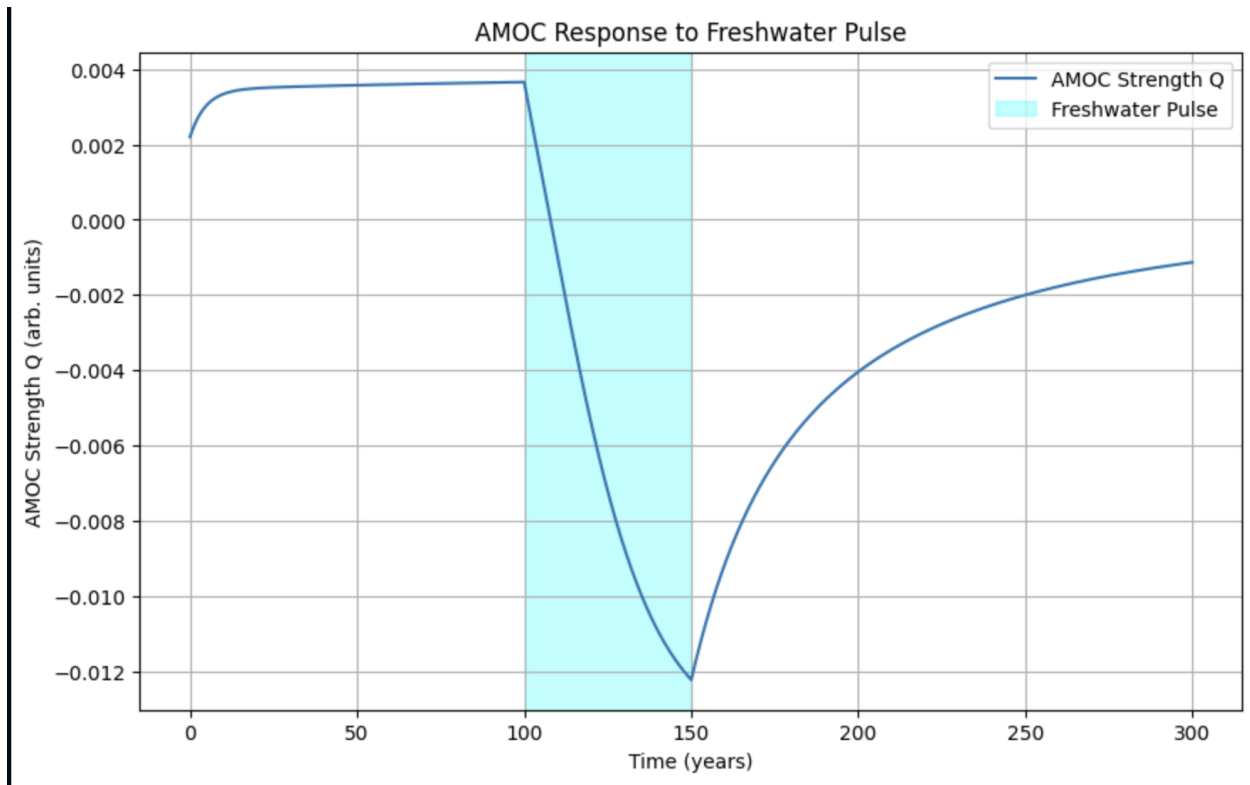


Figure 2: Résultat de la simulation numérique. Une différence de densité liée à la température et à la salinité entre les deux boîtes génère un flux  $Q$ . Lorsqu'on ajoute une perturbation (ex. : fonte glaciaire),  $Q$  diminue voire s'inverse.

## Intuition

Une différence de densité liée à la température et à la salinité entre les deux boîtes génère un flux  $Q$ . Lorsqu'on ajoute une perturbation (ex. : fonte glaciaire),  $Q$  diminue voire s'inverse.

- **Dans un bassin situé dans la partie nord de l'Atlantique**, un affaiblissement de l'AMOC entraîne une **diminution de la température de surface** en raison de la réduction du transport de chaleur depuis les tropiques. En parallèle, une **baisse de la salinité** est souvent observée, car le brassage vertical est moins efficace et les apports d'eaux douces (fonte de glace, précipitations) deviennent plus significatifs à la surface.
- **Dans un bassin situé dans la partie sud de l'Atlantique**, on observe au contraire une **augmentation de la température de surface** causée par un excès de chaleur qui

n'est plus exporté vers le nord. La salinité peut quant à elle **augmenter légèrement**, car l'évaporation est renforcée et les masses d'eau salée restent plus longtemps dans la région.

Nous nous basons sur ces résultats théoriques pour choisir les zones ainsi que les indicateurs climatiques à étudier dans la suite du projet.

## Références

- Stommel, H. (1961). Thermohaline Convection with Two Stable Regimes of Flow. Tellus.
- Rahmstorf, S. (2002). Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. Nature.
- Multiple equilibria in the Atlantic meridional overturning circulation:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Multiple\\_equilibria\\_in\\_the\\_Atlantic\\_meridional\\_overturning\\_circulation](https://en.wikipedia.org/wiki/Multiple_equilibria_in_the_Atlantic_meridional_overturning_circulation)

### 1.3 Conditions dans le Déroit de Floride

Les données du noyau sédimentaire KNR166-2 JPC51 (Schmidt et Lynch-Stieglitz, 2011) montrent l'évolution de la température (SST), de l'oxygène des foraminifères ( $^{18}\text{O}_c$ ) et de la salinité ( $^{18}\text{O}_{sw}$ ).

#### 1.3.1 $^{18}\text{O}$ des foraminifères (*G. ruber*)

Le signal isotopique  $^{18}\text{O}$  mesuré chez les foraminifères planctoniques *G. ruber* reflète à la fois la température de l'eau de mer et la composition isotopique de celle-ci ( $^{18}\text{O}_{sw}$ ). Les valeurs plus négatives indiquent généralement des températures plus chaudes ou une dilution accrue de l'eau de mer (liée à une moindre salinité). On observe une variabilité importante de  $^{18}\text{O}_c$  sur l'intervalle étudié, avec des pics vers 12 000–13 000 ans BP, correspondant potentiellement à des épisodes de refroidissement et/ou d'augmentation de la salinité. La baisse progressive des valeurs après le Younger Dryas confirme un réchauffement et un retour à des conditions interglaciaires.

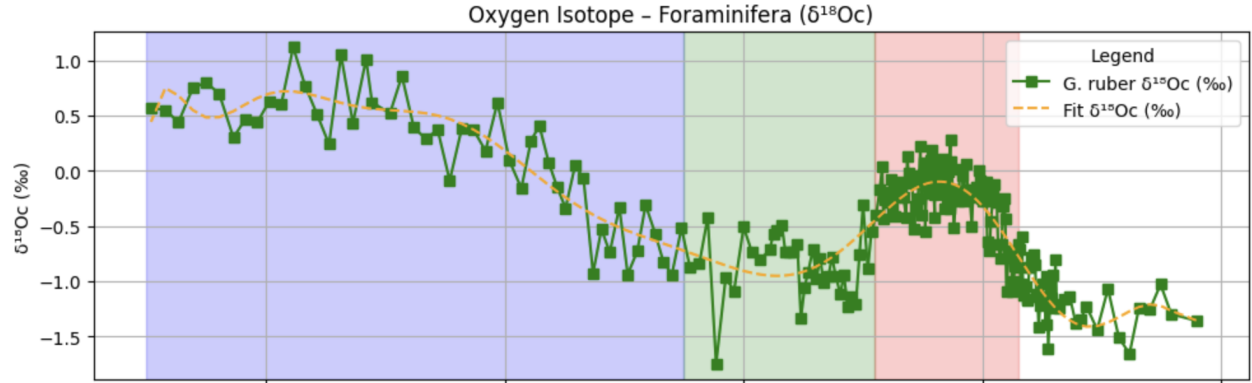


Figure 3:  $\delta^{18}O_c$  + fit Florida Straights

### 1.3.2 Température de surface (SST)

LL'évolution de la température de surface de la mer (SST) dans le détroit de Floride montre des fluctuations notables entre 19 000 et 10 000 ans avant le présent. On observe une tendance générale à la hausse, indiquant un réchauffement progressif post-glaciaire. Cette augmentation s'arrête avec la déglaciation de l'hémisphère nord et le renforcement progressif de l'AMOC qui fait circuler l'eau plus fraîche venant du nord. Cependant, des réchauffements ponctuels sont visibles, notamment durant le Younger Dryas (environ 12 900 à 11 700 ans BP). Cela suggère une réponse directe de la SST aux rythme ralenti de la de circulation océanique durant le younger dryas.

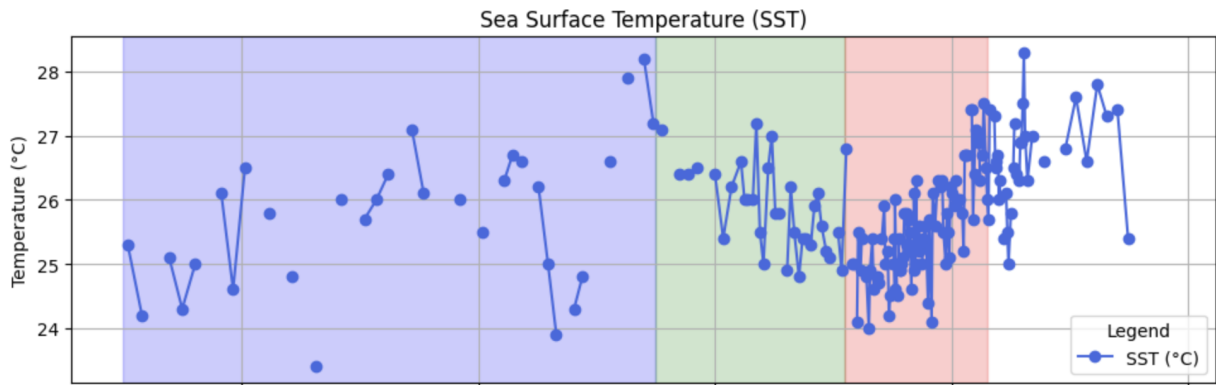


Figure 4: SST reconstruite Florida Straights

### 1.3.3 Proxy de salinité – $^{18}O_{sw}$

Le  $^{18}O_{sw}$  représente un proxy de salinité corrigé de l'effet de volume de glace. Des valeurs plus élevées de  $^{18}O_{sw}$  indiquent une salinité plus importante, tandis que des valeurs plus basses peuvent refléter un apport d'eaux douces (fonte glaciaire, précipitations). Les données montrent une augmentation nette de la salinité pendant certaines périodes froides, notamment lors du Younger Dryas, suggérant une diminution du flux d'eau douce ou un ralentissement de la circulation océanique qui empêcherait le mélange vertical. À l'inverse, des chutes de

salinité vers 14 500 BP coïncident avec le Bølling-Allerød, période connue pour un AMOC en pleine acceleration.

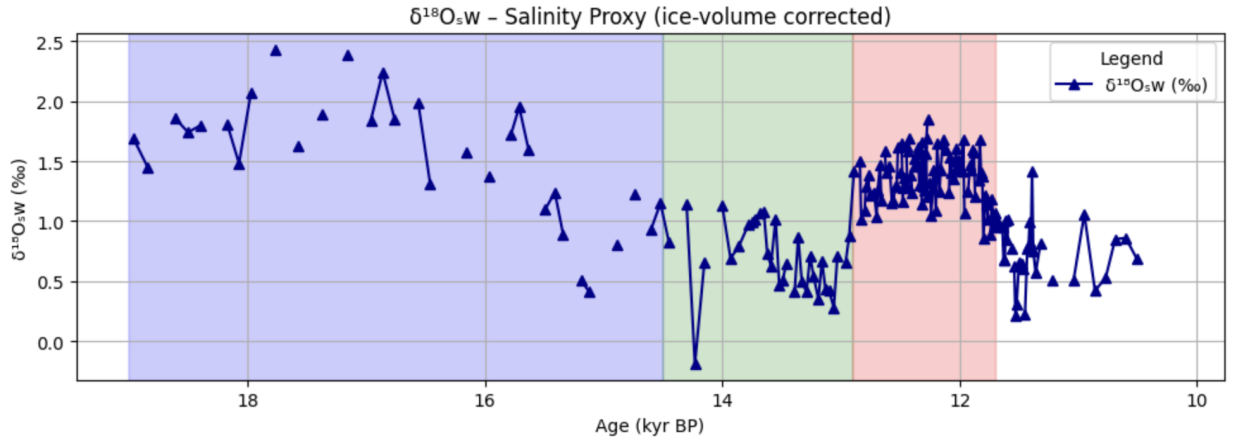


Figure 5:  $\delta^{18}O_{sw}$  Florida Straights

#### 1.4 Conditions dans la mer du Labrador

Les données du noyau HU2001043-008 montrent une réponse opposée à celle de la Floride.

##### 1.4.1 $^{18}O$ planktique (*N. pachyderma*)

Le signal montre un refroidissement net au moment du Younger Dryas, confirmé par une courbe de tendance accentuée autour de 13 ka BP.

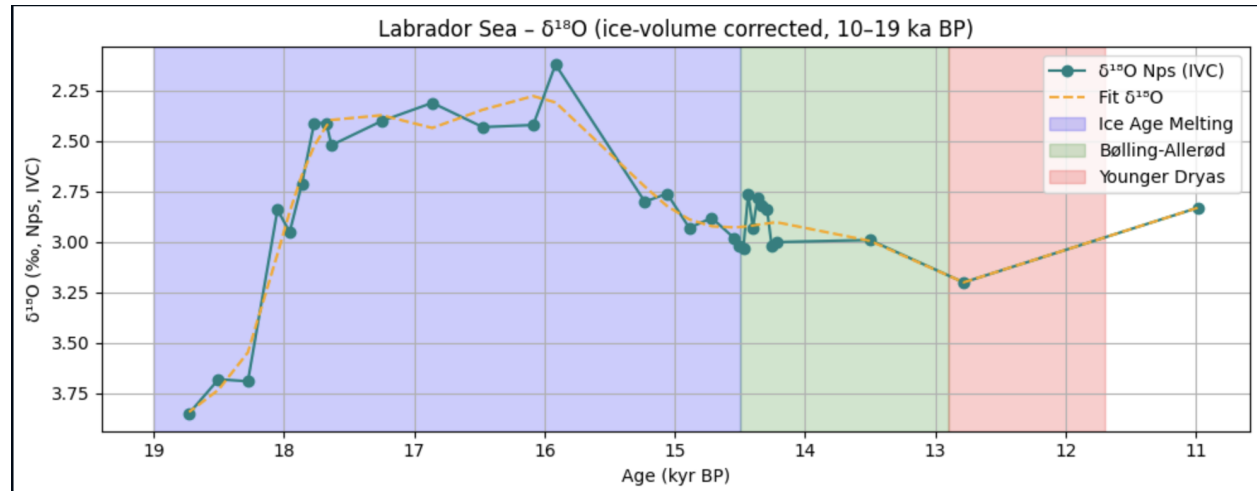


Figure 6:  $^{18}O$  Nps Labrador sea

##### 1.4.2 Indice de stratification verticale

Nous avons calculé la différence entre les isotopes benthiques et planctoniques :

$$\text{Indice de stratification} = \delta^{18}O_{\text{benthique}} - \delta^{18}O_{\text{planctonique}} \quad (1)$$

Une valeur élevée reflète une forte stratification. L'indice atteint un maximum durant le Younger Dryas, indiquant une colonne d'eau fortement stable (eaux douces froides en surface).

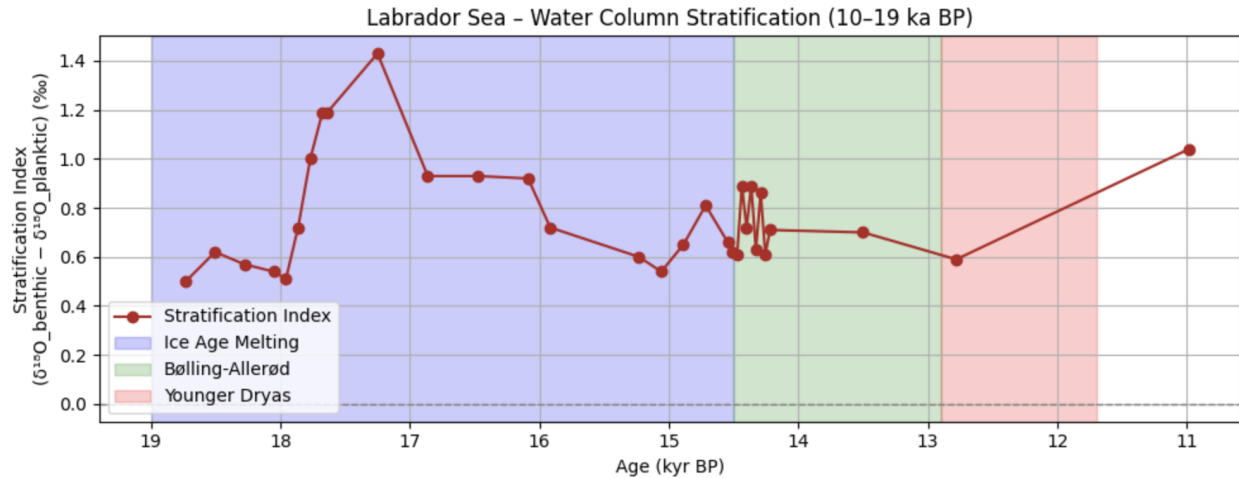


Figure 7: Graphe de l'indice de stratification Labrador sea

## Interprétation générale

Les deux sites montrent des réponses contrastées mais cohérentes avec le modèle conceptuel de Stommel à l'événement du Younger Dryas :

- Au Nord (Labrador) : refroidissement, stratification, convection réduite.
- Au Sud (Floride) : salinisation, assèchement relatif, hausse de SST.

Ces observations soutiennent l'hypothèse d'un affaiblissement de l'AMOC provoqué par un apport soudain d'eau douce.

## Références

- Schmidt, M. W., & Lynch-Stieglitz, J. (2011). *Paleoceanography*
- Hoffman et al. (2016), NOAA Paleoclimate Dataset
- NOAA World Data Service for Paleoclimatology



## 2 Partie II — AMOC affaibli : quelles conséquences sur la mousson africaine ?

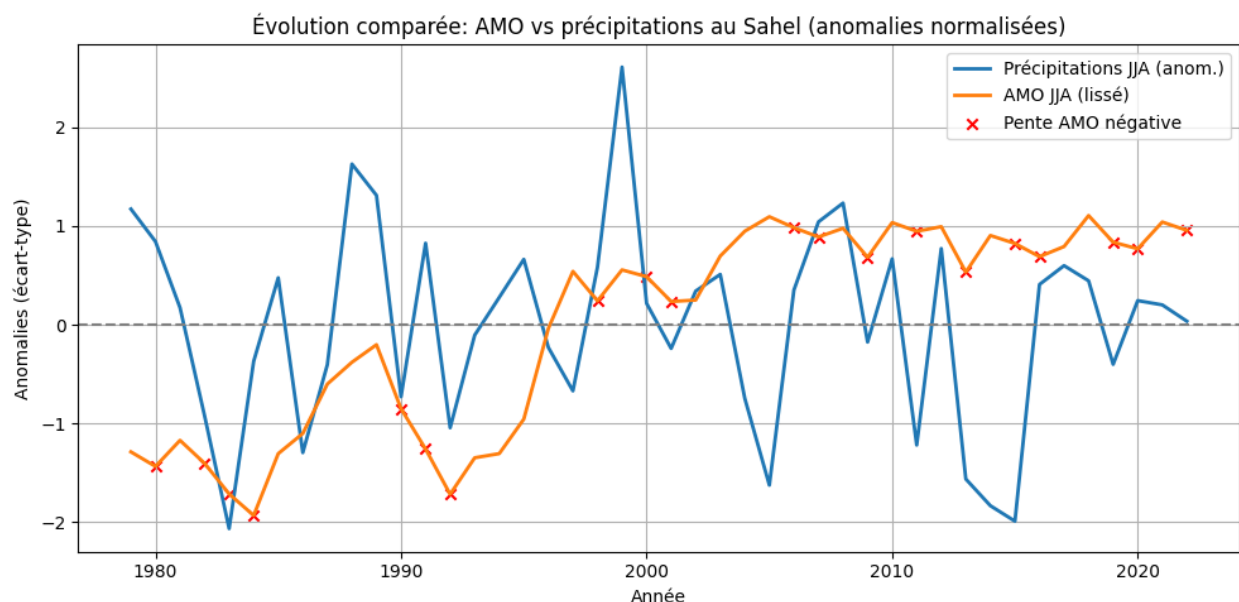
### 2.1 Objectif

Cette partie vise à explorer l'influence d'un AMOC affaibli sur la mousson ouest-africaine. Nous analyserons des données de précipitations (observations et réanalyses) et éventuellement des simulations climatiques pour : (1) extraire les précipitations de la saison d'été (JJA) sur l'Afrique de l'Ouest, (2) calculer des anomalies par rapport à la climatologie, (3) visualiser les cartes d'anomalies et les évolutions temporelles, (4) quantifier le lien statistique via des corrélations ou régressions entre l'AMOC (ou indices associés) et les pluies, et (5) appliquer une classification (clustering) des années humides/sèches.

### 2.2 Évolution temporelle des précipitations et de l'AMOC(AMO)

Afin de mieux comprendre la relation entre l'AMOC et les précipitations estivales en Afrique de l'Ouest, nous avons tracé une série temporelle comparée de deux indicateurs clés :

- l'anomalie moyenne régionale de précipitations JJA (mousson)
- et l'indice AMO JJA, utilisé ici comme proxy de l'intensité de l'AMOC. Les deux



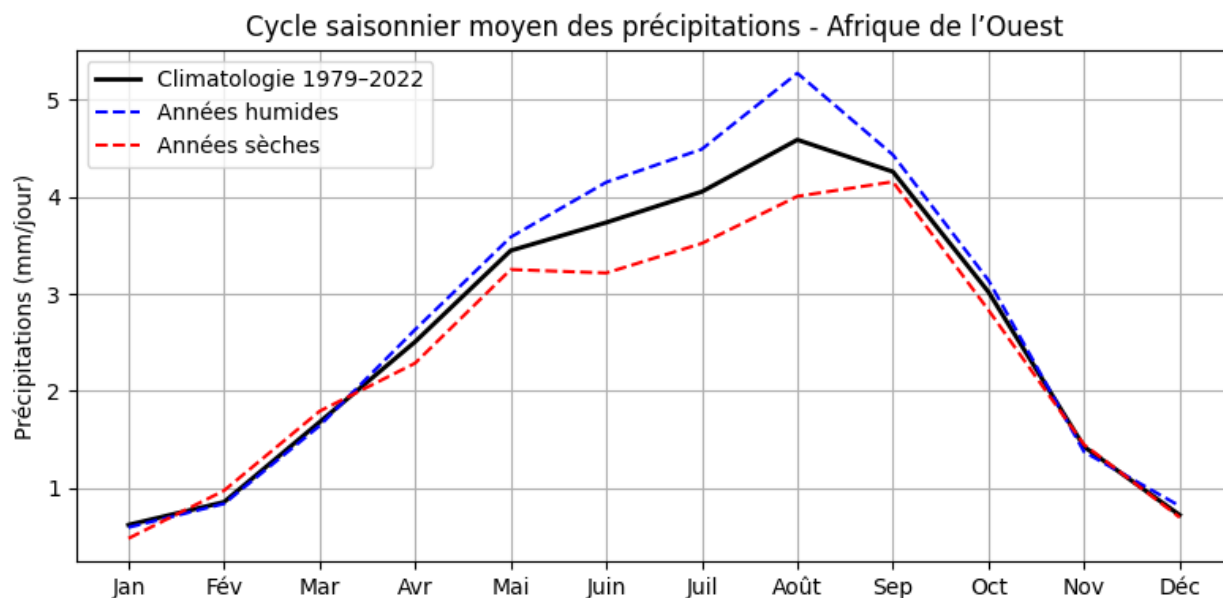
séries ont été normalisées pour permettre une comparaison visuelle directe (valeurs centrées réduites). Le graphique obtenu montre l'évolution conjointe des deux phénomènes de 1979 à 2022.

On observe une corrélation positive : dans les années 1980, période marquée par une sécheresse prolongée au Sahel, l'indice AMO est globalement négatif, tout comme les anomalies de précipitations. À partir des années 1990, la remontée progressive de l'AMO coïncide avec un retour des pluies sur la région. Cette synchronisation visuelle renforce l'idée d'un lien entre l'état thermique de l'Atlantique Nord (AMO/AMOC) et la vigueur de la mousson ouest-africaine.

## 2.3 Cycle saisonnier moyen

Le climat de type mousson se distingue par un cycle saisonnier marqué, alternant une longue période sèche (hiver) et une période humide plus courte mais intense en été. Pour mieux cerner ce fonctionnement, nous avons comparé le cycle annuel moyen des précipitations sur l'Afrique de l'Ouest, en distinguant trois cas :

- la climatologie moyenne sur toute la période 1979–2022,
- les années humides (associées à un AMOC fort),
- les années sèches (associées à un AMOC faible).



Cette comparaison met en évidence des différences nettes entre les régimes climatiques :

- La courbe climatologique montre une hausse progressive des pluies à partir de mai, un pic en août, puis une baisse rapide dès septembre.

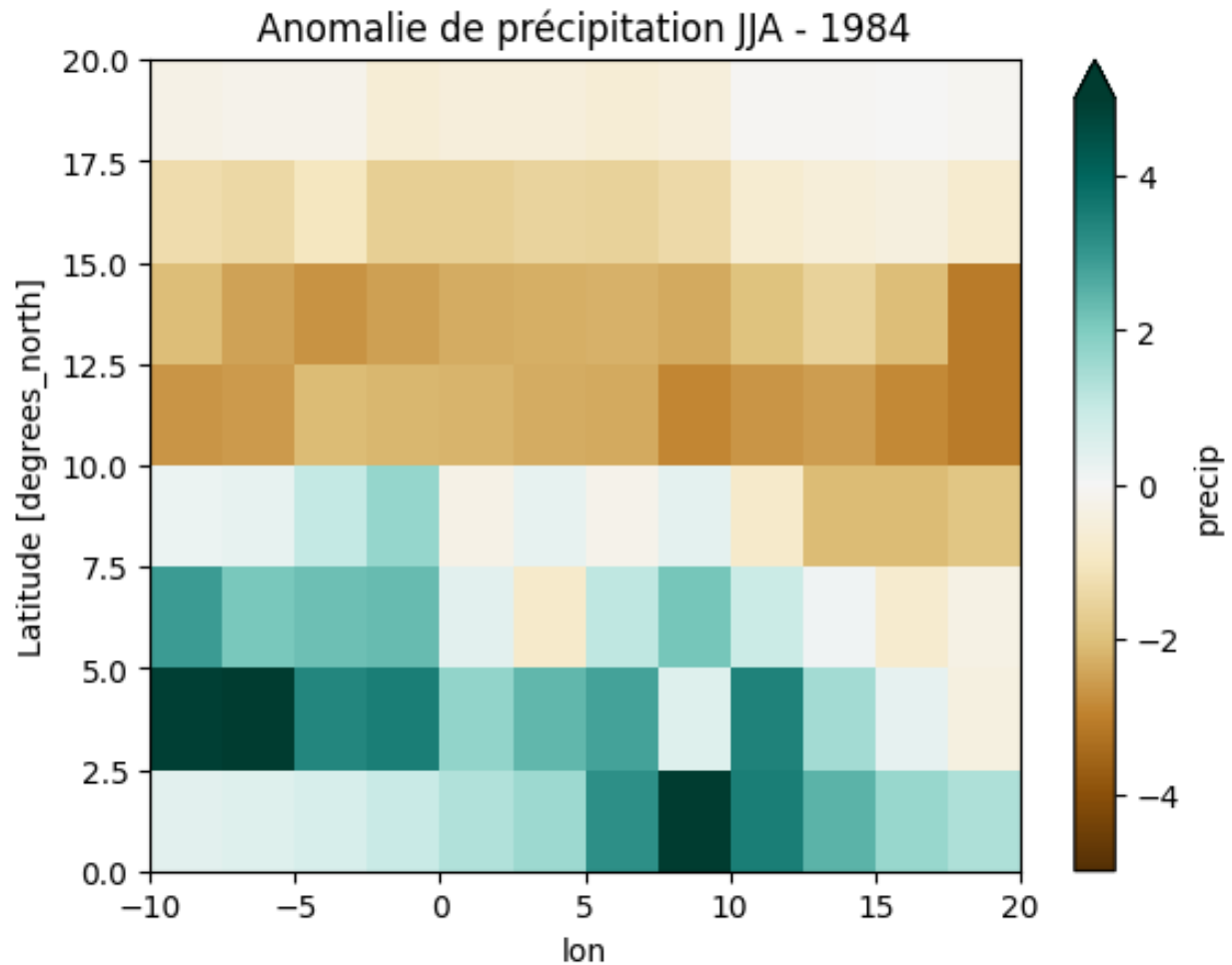
- Pendant les années sèches, la saison des pluies est plus courte et moins intense, avec un maximum plus bas et une montée tardive.

- À l'inverse, dans les années humides, la saison commence plus tôt, atteint un pic plus marqué, et semble se prolonger légèrement en septembre.

Ces résultats suggèrent que l'affaiblissement de l'AMOC, en influençant la distribution de chaleur et d'humidité sur l'Atlantique tropical, peut raccourcir la saison des pluies au Sahel tout en en réduisant l'intensité – ce qui est cohérent avec les projections issues des modèles climatiques.

## 2.4 Clustering des anomalies régionales

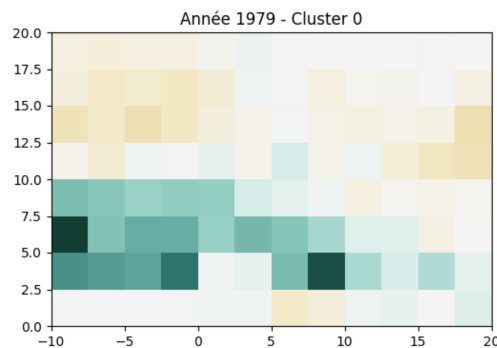
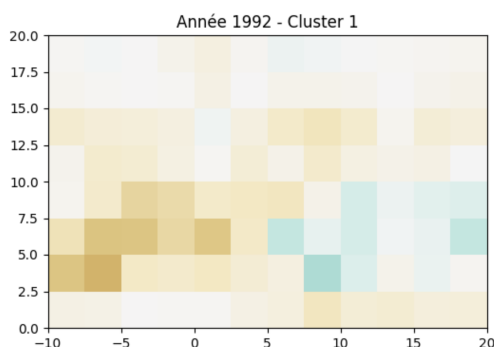
Enfin, nous avons appliqué une méthode de clustering non supervisé afin d'identifier d'éventuels régimes climatiques distincts à partir des anomalies de précipitations estivales (JJA) sur l'Afrique de l'Ouest. Chaque année est représentée comme un vecteur d'anomalies spatiales, et le regroupement est effectué selon la similarité de ces motifs.



Nous avons utilisé un algorithme K-Means avec deux clusters ( $k = 2$ ), dans l'hypothèse que le système climatique peut naturellement distinguer deux régimes principaux :

- un régime humide, associé à un AMOC plus vigoureux,
- un régime sec, correspondant à un AMOC affaibli.

Les années ont ainsi été automatiquement réparties en deux groupes. Une comparaison avec les années identifiées comme sèches ou humides selon l'AMO ou les anomalies régionales montre une bonne cohérence, renforçant la pertinence du clustering.



Pour mieux comprendre les caractéristiques de chaque groupe, nous avons représenté les centroïdes (moyenne des anomalies de chaque cluster). Ces cartes révèlent deux signatures bien distinctes :

- Le premier cluster montre un déficit généralisé de précipitations sur le Sahel (carte dominée par des tons bruns),
- Le second un excédent régionalisé, notamment au centre ouest du Sahel (tons verdâtres).

Ce résultat suggère que la mousson ouest-africaine présente une dynamique bimodale, influencée par l'AMOC. Il rejoint l'idée que ce système pourrait posséder des points de bascule climatiques (tipping points), dont l'activation pourrait entraîner des changements brusques et durables du régime des pluies dans la région.

## 2.5 Conclusion

nous avons exploré l'influence d'une diminution de l'AMOC sur la mousson d'Afrique de l'Ouest à travers l'analyse de données climatiques. Les principales conclusions et observations sont :

- La **corrélation positive** entre l'état de l'AMOC (approché par l'indice AMO) et les précipitations du Sahel est mise en évidence, confirmant qu'un **AMOC affaibli s'accompagne d'un déficit de pluies monsooniques** [Berntell et al.]. Historiquement, ceci correspond à la sécheresse du dernier tiers du 20<sup>e</sup> siècle, concomitante à un AMO négatif.
- La visualisation du **cycle saisonnier** suggère qu'en cas d'AMOC faible, la saison des pluies est non seulement moins intense, mais aussi possiblement plus **courte**, démarrant tardivement et se terminant précocement. Ceci est en accord avec les projections de scénarios extrêmes où un effondrement de l'AMOC entraîne un **raccourcissement de la saison humide au Sahel** [Preprint — AMOC collapse impacts on monsoons].
- Le **clustering** des années humides/sèches a permis de distinguer deux régimes cohérents de pluie. Les années regroupées dans le cluster "sec" correspondent à un AMO bas, et présentent un motif spatial d'anomalies négatives généralisées, tandis que le cluster "humide" (AMO haut) montre l'inverse. Ceci renforce l'idée d'une **réponse**

systémique de la mousson aux variations de l'Atlantique, avec des basculements possibles d'un état à l'autre.

### 3 Partie III — L'interruption de la Période Humide Africaine : preuves empiriques d'un climat sec

L'objectif principal est de fournir une analyse descriptive des conditions hydroclimatiques passées dans plusieurs régions du continent, à partir d'enregistrements géochimiques et minéralogiques. Cette étude met en lumière un **changement climatique brutal et synchronisé** autour de 12 500 BP, à travers différents indicateurs de sécheresse et de dynamique de précipitations.

Les données exploitées proviennent de plusieurs sites stratégiques :

- La **marge ouest-africaine** (Sénégal, Mauritanie), pour la reconstitution des régimes de précipitation.
- Le **plateau continental nord-est atlantique**, pour l'analyse des dépôts minéraux (ratio Kln/Chl).
- Le **lac Challa** (Kenya/Tanzanie), pour le signal isotopique C28\_dD.
- Le **lac Bosumtwi** (Ghana), pour l'analyse du d13CleafwaxC31.

#### Proxys utilisés

Les indicateurs suivants sont utilisés pour reconstruire les conditions hydroclimatiques à l'échelle régionale :

- **dDwax (C30)** : trouvé par analyse isotopique de l'hydrogène dans les cires foliaires extraites des sédiments marins de la marge ouest-africaine. *Une augmentation indique un climat plus sec et une moindre disponibilité en eau.*
- **C28\_dD** : obtenu par chromatographie et spectrométrie isotopique sur des sédiments du lac Challa. *Des valeurs élevées reflètent une intensification de la sécheresse régionale.*
- **d13CleafwaxC31** : mesuré à partir des rapports isotopiques du carbone dans des composés végétaux au sein des sédiments du lac Bosumtwi. *Une augmentation suggère une dominance des plantes C4, typiques des environnements arides.*
- **Kln/Chl** : calculé à partir de l'analyse minéralogique par diffraction des rayons X sur les sédiments de carottes marines. *Un pic traduit une hausse du transport éolien de poussière, associé à des conditions plus sèches.*

## Méthodologie et équations de reconstruction

$$\delta D_{wax} = \left( \frac{R_{sample}}{R_{standard}} - 1 \right) \times 1000 \quad \text{où } R = \frac{{}^2H}{{}^1H}$$

$$\delta^{13}C = \left( \frac{R_{sample}}{R_{standard}} - 1 \right) \times 1000 \quad \text{où } R = \frac{{}^{13}C}{{}^{12}C}$$

$$\text{Kln/Chl} = \frac{[\text{kaolinite}]}{[\text{chlorite}]}$$

Des valeurs élevées de  $\delta D$  ou  $\delta^{13}C$  indiquent une baisse de l'humidité. Un pic du ratio Kln/Chl indique une augmentation du transport de poussière.

### 3.1 Conditions sur la Côte Ouest Africaine

#### 3.1.1 Précipitations (25 000 ans) – Côte Ouest Africaine

Les données issues de l'étude *West African Margin 25,000 Year Leaf Wax Isotope Data and Precipitation Reconstruction* montrent un pic de précipitations vers 15 000 BP, suivi d'une chute rapide autour de 12 500 BP.

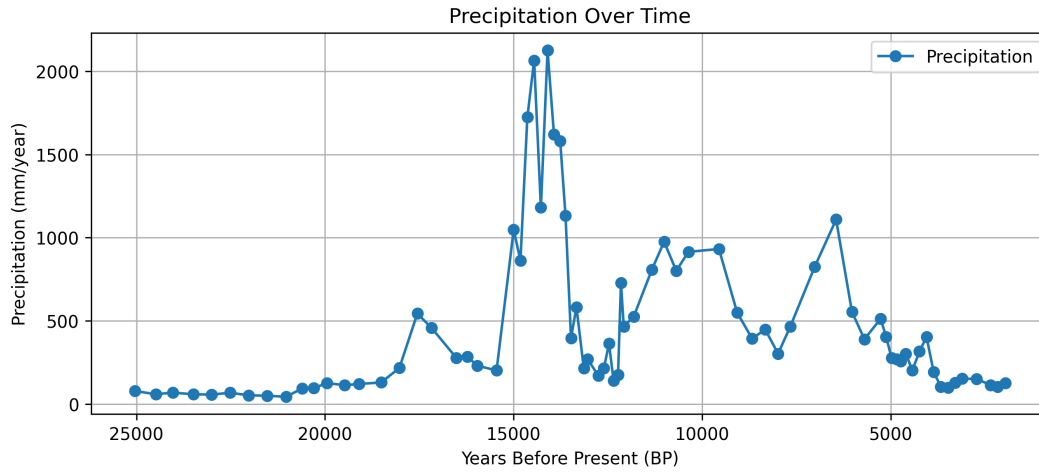


Figure 9: Évolution des précipitations sur 25 000 ans (West African Margin)

#### 3.1.2 Corrélation entre dDwax et Précipitations – Côte Ouest Africaine

Une corrélation inverse est observée : plus les précipitations diminuent, plus dDwax augmente, indiquant une sécheresse accrue.

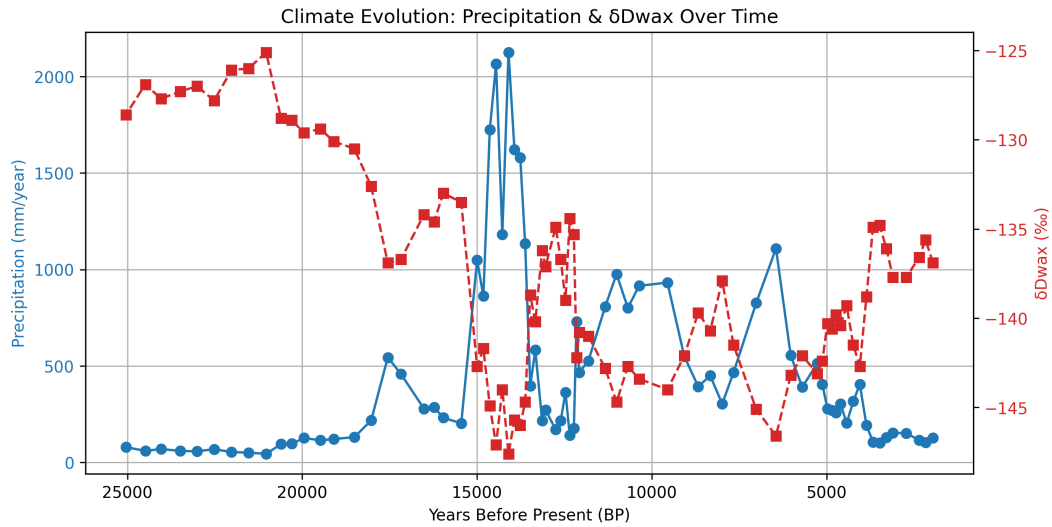


Figure 10: Relation entre dDwax et précipitations

### 3.1.3 Flux de Sable (Kln/Chl) – Atlantique Nord-Est

Un pic du ratio est visible pendant le Younger Dryas, traduisant un renforcement de l'aridité et du transport éolien.

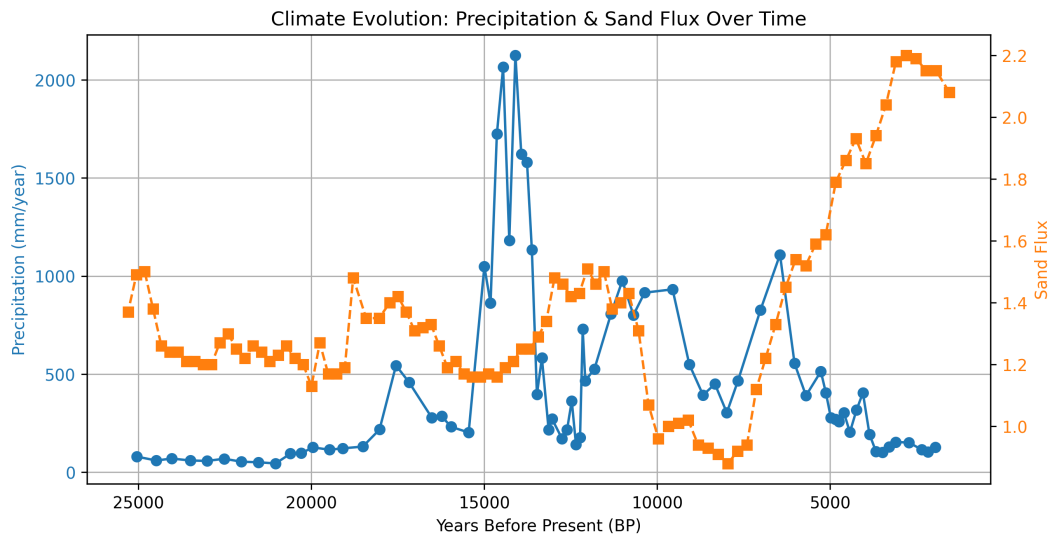


Figure 11: Évolution du ratio Kln/Chl – Proxy de flux de sable

## 3.2 Conditions au Kenya et Ghana

### 3.2.1 Isotopes Supplémentaires – Kenya et Ghana

Les deux indicateurs montrent une hausse synchronisée vers 12 500 BP, indiquant une aridification généralisée.

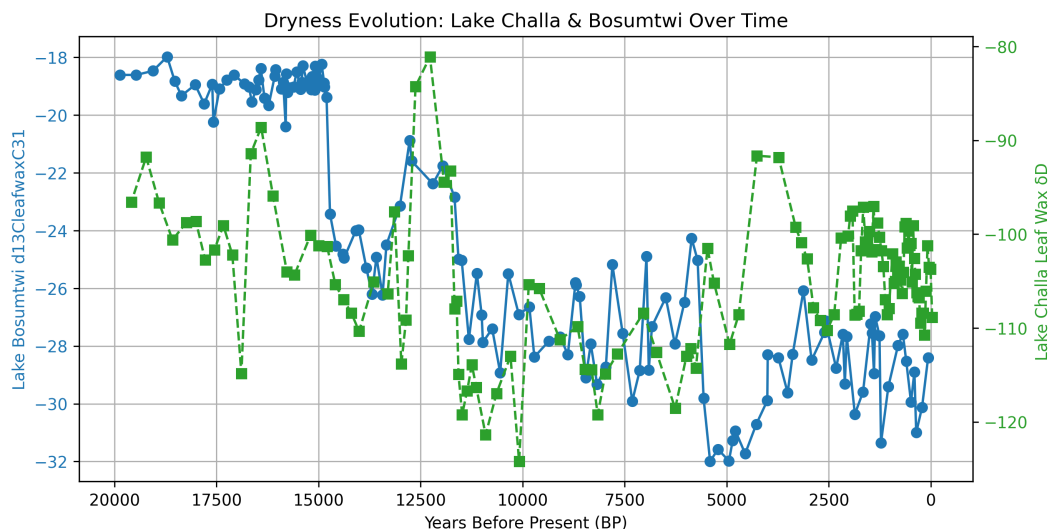


Figure 12: C28\_dD (Lac Challa) et d13CleafwaxC31 (Lac Bosumtwi)

### 3.3 Interprétation générale

Les résultats présentés dans cette troisième partie viennent consolider de manière empirique les hypothèses formulées dans les phases précédentes du projet. Nous avons proposé qu'un affaiblissement de la circulation méridienne atlantique (AMOC) entraîne une interruption du African Monsoon, provoquant une réduction marquée des précipitations et une intensification de la sécheresse — un phénomène caractéristique des périodes telles que le Younger Dryas.

À travers l'analyse de plusieurs proxys paléoclimatiques indépendants — isotopiques (dDwax, C28\_dD, d13CleafwaxC31) et minéralogiques (Kln/Chl) — nous apportons désormais des éléments de preuve solides venant confirmer cette hypothèse. Ces indicateurs montrent de manière cohérente et synchronisée un changement abrupt autour de 12 500 BP, illustrant une aridification régionale sévère en réponse à la perturbation du système de mousson.

Cette validation empirique constitue une avancée importante dans la compréhension des liens entre dynamique océanique et régimes climatiques continentaux. Elle démontre que la variabilité de l'AMOC ne se traduit pas uniquement par des effets globaux, mais impacte directement des systèmes climatiques sensibles comme le African Monsoon, avec des conséquences environnementales majeures.

Nos résultats confirment ainsi que l'interruption du African Monsoon — déclenchée par un AMOC affaibli — est un mécanisme clé expliquant les phases de sécheresse intense observées dans les archives sédimentaires et isotopiques du continent africain à la fin du Pléistocène.

### Références

- Tierney, J.E., Pausata, F.S.R., deMenocal, P.B. (2017). *Rainfall Regimes of the Green Sahara*. Science Advances, 3(1), e1601503. <https://www.ncei.noaa.gov/access/paleo-search/study/21091>
- Ehrmann, W. et al. (2016). *Clay mineralogy on sediment core M40/4-SL71*. PAN-GAEA. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.869095>



- Tierney, J.E. et al. (2011). *Late Quaternary behavior of the East African monsoon*. Quaternary Science Reviews, 30(7–8), 798–807. <https://www.ncei.noaa.gov/access/paleo-search/study/10889>
- Shanahan, T.M. et al. (2015). *The time-transgressive termination of the African Humid Period*. Nature Geoscience, 8(2), 140–144. <https://www.ncei.noaa.gov/access/paleo-search/study/18355>

## 4 Partie IV — Ouverture : liens entre paléoclimatologie et controverse sur la datation du Sphinx



### 4.1 Hypothèse de l'érosion hydrique du Sphinx

L'une des hypothèses les plus controversées sur la datation du Grand Sphinx de Gizeh repose sur l'observation de marques d'érosion sur son corps. Légèrement différentes des traces d'érosion éolienne typiques du désert, ces marques présentent un profil arrondi et vertical qui suggérerait une érosion causée par des précipitations abondantes. Selon l'analyse du géologue Robert Schoch, ces traces seraient compatibles avec une forte érosion hydrique, potentiellement liée à des pluies intenses ayant eu lieu bien avant l'Ancien Empire égyptien. Cela impliquerait que le Sphinx pourrait dater de la fin du Pléistocène, soit plus de 9 000 ans avant notre ère, à une époque où le climat de la région était plus humide qu'aujourd'hui.

The pattern of weathering and erosion seen on the body of the Sphinx and on the walls of the Sphinx enclosure indicates substantial rainfall, which could not have occurred in the Sahara after 2500 BCE.

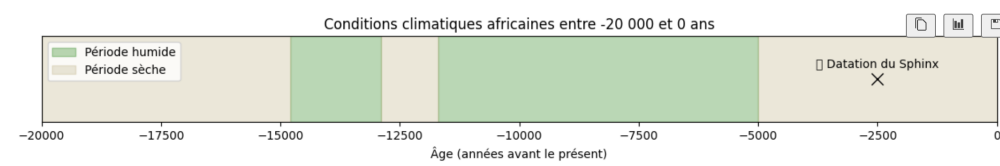
— Robert M. Schoch, *Voices of the Rocks*, 1999

Cette théorie, bien qu'elle suscite de vifs débats parmi les égyptologues, met en lumière le rôle que peut jouer la paléoclimatologie dans la remise en question des chronologies archéologiques établies.

## 4.2 Lien avec notre étude

La Partie III, qui étudie en détail les conditions climatiques de l'Afrique durant l'Holocène, nous a permis de :

1. Mettre en évidence une interruption de la Période Humide Africaine durant le Younger Dryas ;
2. Identifier une reprise des conditions humides après cet épisode, suivie d'un assèchement progressif qui s'achève autour de 5000 ans avant notre ère.



Le Sphinx, ne serait-il pas plus vieux après tout ?!