

Visage climatique long-terme du bassin de Paris

Damien Huyghe^{1*}, Luca Di Filippo¹

¹ École des Mines de Paris/Université PSL/Centre de Géosciences

* damien.huyghe@minesparis.psl.eu

Résumé

Ce rapport présente les résultats préliminaires d'une étude paléoclimatique menée dans le cadre du programme PIREN-Seine, visant à contraindre les variations de température et le fonctionnement hydrologique du bassin de Paris lors de l'Optimum Climatique de l'Éocène Inférieur (EECO, 53–49 Ma). Cette période, considérée comme un analogue des scénarios de réchauffement climatique extrême du GIEC, permettra d'évaluer la réponse des systèmes continentaux et littoraux à des conditions de serre globale. L'étude repose sur l'analyse couplée de la sédimentologie, de la paléontologie et de la géochimie isotopique ($\delta^{18}\text{O}$ et Δ_{47}) de fossiles provenant de plusieurs sites représentatifs du bassin : Soissons, Cuise-la-Motte et Mancy. Les campagnes de terrain ont permis de constituer une collection de plus de 250 échantillons remarquablement préservés, comprenant des mollusques marins et d'eau douce. Les premiers résultats isotopiques obtenus sur les huîtres fossiles indiquent des variations saisonnières marquées des températures, oscillant entre 20 °C et 35 °C, soit une amplitude d'environ 15 °C. Ces données suggèrent donc un climat chaud et fortement saisonnier durant l'EECO.

La poursuite des analyses du Δ_{47} précisera la composition isotopique des eaux et permettra d'affiner la reconstitution des paléotempératures. Ceci permettra de mieux comprendre la dynamique hydrologique passée du bassin de la Seine et offrira des perspectives pour la modélisation des réponses climatiques futures à un réchauffement global.

Points clefs

- ✓ *L'Optimum Climatique de l'Éocène Inférieur (EECO) constitue un analogue pertinent des scénarios climatiques extrêmes envisagés par le GIEC.*
- ✓ *Plus de 250 fossiles (mollusques marins et d'eau douce) collectés pour la reconstitution des paléotempératures.*
- ✓ *Les premiers résultats isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$) révèlent une forte saisonnalité thermique, avec une amplitude d'environ 15 °C oscillant entre 20 et 35 °C.*

Abstract

This report presents the preliminary results of a palaeoclimatic study conducted within the framework of the PIREN-Seine program, aimed at constraining temperature variations and hydrological dynamics in the Paris Basin during the Early Eocene Climatic Optimum (EECO, 53–49 Ma). This period, considered an analogue for the extreme climate warming scenarios proposed by the IPCC, provides an opportunity to evaluate the response of continental and coastal systems to global greenhouse conditions. The study combines sedimentological, palaeontological, and isotopic geochemical analyses ($\delta^{18}\text{O}$ and Δ_{47}) performed on fossils collected from several representative sites in the basin: Soissons, Cuise-la-Motte and Mancy. Field campaigns have yielded a collection of more than 250 exceptionally well-preserved samples, including both marine and freshwater molluscs.

Preliminary isotopic results obtained from fossil oysters reveal marked seasonal temperature variations, ranging between 20 °C and 35 °C, with an amplitude of about 15 °C. These findings indicate a warm and highly seasonal climate during the EECO. Ongoing Δ_{47} analyses will further refine the isotopic composition of palaeowaters and improve the accuracy of reconstructed palaeotemperatures. This work will enhance our understanding of past hydrological dynamics in the Seine Basin and provide valuable insights for modelling future climate responses under global warming scenarios.

Key points

- ✓ *The Early Eocene Climatic Optimum (EECO) represents a relevant analogue for the extreme climate scenarios proposed by the IPCC.*
- ✓ *More than 250 fossil samples (marine and freshwater molluscs) were collected for palaeotemperature reconstruction.*
- ✓ *Preliminary isotopic results ($\delta^{18}\text{O}$) reveal strong thermal seasonality, with an amplitude of about 15 °C, ranging between 20 °C and 35 °C.*

Introduction

Depuis la fin du 20^e siècle, le changement climatique en cours et l'augmentation des températures globales dans les décennies à venir sont devenus un enjeu sociétal majeur. Une des conséquences anticipées de cette augmentation globale des températures est une perturbation du cycle de l'eau et donc du régime des rivières. Pour mieux appréhender cette évolution, les projections du GIEC proposent différents scénarios de l'évolution des températures essentiellement basés sur des modèles climatiques, et correspondant à un réchauffement global compris entre 1,5 et 8 °C pour le siècle à venir (Masson Delmotte *et al.*, 2021).

Une autre approche permettant d'appréhender indirectement l'évolution climatique future est de s'intéresser à des événements climatiques passés, dont les caractéristiques permettent de les considérer comme des analogues – au moins partiels – du changement climatique actuel. Ceci permet en effet d'étudier l'événement climatique en lui-même, en caractérisant l'amplitude de la variation de température, sa durée, mais aussi le retour aux conditions anté-événement (Bohaty *et al.*, 2009 ; Sluijs *et al.*, 2013 ; Zachos *et al.*, 2006). Il est également possible d'évaluer l'impact de ces événements climatiques sur des paramètres environnementaux majeurs tels que l'évolution du niveau marin, la nature et l'intensité de l'érosion, la dynamique sédimentaire ou encore l'évolution de la biodiversité (Chen *et al.*, 2018 ; Pujalte *et al.*, 2022 ; Schmitz et Pujalte, 2003). Mais surtout, l'état du régime hydrologique des systèmes continentaux sous contrainte climatique extrême peut être appréhendé à partir de ces analogues anciens et pourrait aider à mieux comprendre les trajectoires climatiques que pourrait suivre le bassin de la Seine.

Dans ce contexte, plusieurs auteurs ont envisagé l'optimum climatique de l'Éocène inférieur (EECO ; 53 – 49 Ma) comme un analogue du scénario le plus extrême proposé par le GIEC pour la fin du 21^e siècle (Fig. 1) (Burke *et al.*, 2018 ; Tierney *et al.*, 2020). L'EECO est en effet la période la plus chaude de ces derniers 80 Ma, avec un état stable du climat sur plusieurs millions d'années et des températures moyennes globales de 12 à 15 °C supérieures à l'actuel (Fig. 1) (Westerhold *et al.*, 2020). Le visage de la Terre était à

cette époque totalement différent, avec une absence de circulation thermohaline induisant un gradient latitudinal très faible et des concentrations en CO₂ pouvant atteindre 1500 ppm, induisant une absence de calottes polaires.

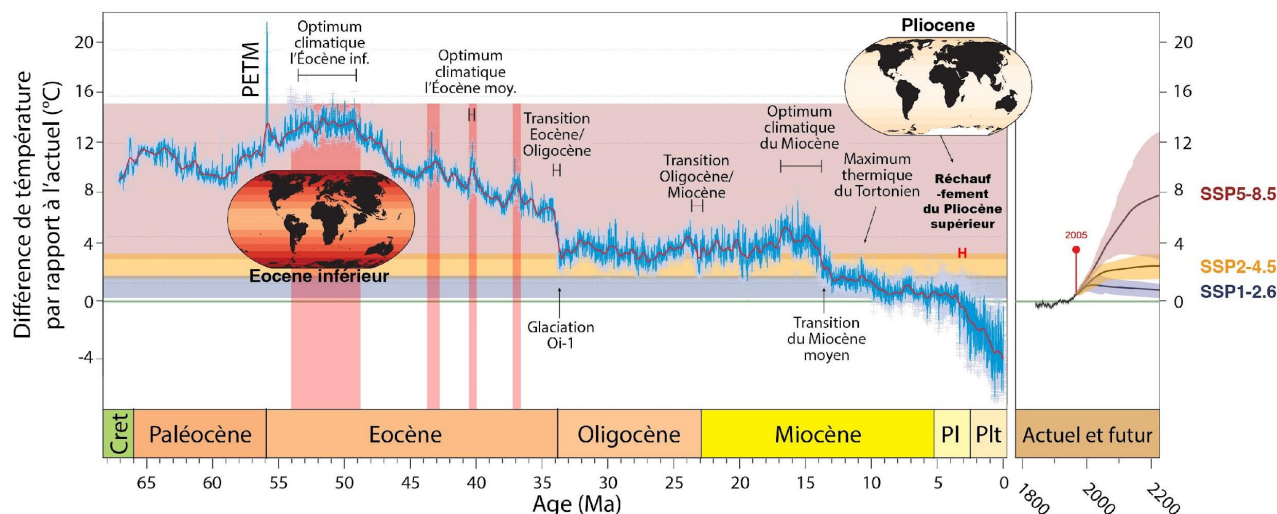


Figure 1 : Évolution de l'écart des températures par rapport à l'actuel (d'après Westerhold et al., 2020) mis en regard des mesures de températures et des projections climatiques pour le siècle à venir (d'après Tierney et al., 2020).

L'EECO a été amplement étudié en domaine marin, notamment via l'analyse géochimique ($\delta^{18}\text{O}$) de foraminifères benthiques profonds et planctoniques (Fig. 1) (e.g. Zachos *et al.*, 2001). L'essentiel des travaux portant sur cette période s'est concentré sur le milieu marin, car il présente l'avantage d'avoir un enregistrement sédimentaire relativement continu et bien daté, ce qui permet un bon suivi du signal climatique. Toutefois, le domaine océanique est tamponné par rapport aux événements climatiques de faible durée et de faible intensité du fait de l'inertie thermique des masses océaniques. De plus, si les porteurs du signal climatique, et notamment les foraminifères, permettent de reconstituer des températures moyennes annuelles et des paramètres majeurs du climat, ils ne permettent pas de reconstituer les variations saisonnières de température.

En comparaison, le contexte climatique en domaine littoral continental est beaucoup moins bien documenté à l'Éocène inférieur (Huyghe *et al.*, 2015). Pourtant, déterminer comment évoluent les températures dans ces environnements pendant un épisode chaud extrême est un enjeu crucial dans l'optique de la compréhension des mécanismes et des conséquences du changement climatique actuel. Ces données pourront notamment servir à alimenter les modèles (paléo)climatiques dans le futur.

1. Objectifs de l'étude

Ce projet vise donc à apporter de nouvelles contraintes sur l'évolution des paléotempératures pendant l'optimum climatique de l'Éocène inférieur, en milieu marin proximal et en domaine continental par une analyse couplée en sédimentologie de faciès, paléontologie et géochimie. Dans ces milieux, les reconstitutions des paléotempératures sont classiquement effectuées sur des macrofossiles comme des coquilles de mollusques, ou des restes de mammifères (Grimes *et al.*, 2003 ; Huyghe *et al.*, 2012). La condition préalable à ce genre d'étude est la disponibilité de dépôts sédimentaires de l'Éocène inférieur contenant des fossiles suffisamment bien préservés. Les mollusques sont des organismes pouvant minéraliser leurs coquilles de manière relativement continue sur plusieurs années, comme les huîtres ou les turrnelles (Andreasson and Schmitz, 1996 ; De Winter *et al.*, 2020 ; Huyghe *et al.*, 2012). L'analyse géochimique de leurs coquilles permet donc théoriquement de reconstituer le gradient saisonnier de température de l'eau dans laquelle ils ont vécu en effectuant plusieurs prélèvements ponctuels sur les coquilles (Huyghe *et al.*, 2020 ; Lartaud *et al.*, 2010).

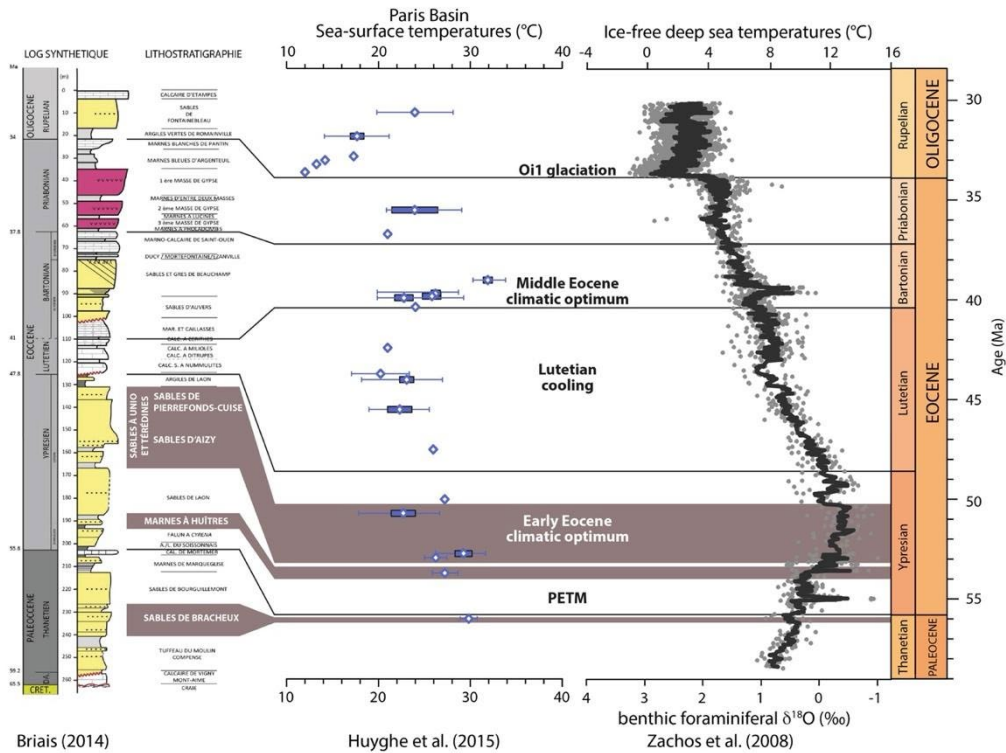


Figure 2 : Log stratigraphique synthétique du Tertiaire du Bassin de Paris (Briais, 2015), illustrant les formations ciblées dans le cadre de ce projet (en grisé) et mis en parallèle de l'évolution des températures moyennes littorales (Huyghe et al., 2015) et de l'évolution des températures océaniques profondes (Zachos et al., 2008).

Le bassin de Paris contient des sédiments contemporains de cet optimum climatique (Briais, 2015 ; Huyghe et al., 2015). Ces dépôts comportent des fossiles extrêmement bien préservés. Des travaux ont d'ores et déjà reconstitué l'évolution long-terme des paléotempératures au cours du Paléogène à partir d'une analyse multi-taxon de coquilles de mollusques marins et d'algues calcifiantes (Huyghe et al., 2017, 2015).

Cependant, les résultats de ces travaux présentaient des limites et incertitudes, les échantillons analysés provenant de collections (collection Cavelier, BRGM et collection MNHN) et n'étant pas replacés dans un cadre stratigraphique précis. Il était de ce fait uniquement possible de reconstituer les valeurs de température moyenne pour chaque formation. Il est donc indispensable d'effectuer une analyse la plus dense possible, du point de vue temporel, de fossiles prélevés sur le terrain et replacés dans un cadre stratigraphique et sédimentologique précis. L'autre incertitude majeure provenait de l'interprétation des données géochimiques, le $\delta^{18}\text{O}$ étant sensible à la température de minéralisation mais aussi à la composition isotopique de l'eau ($\delta^{18}\text{O}_w$) qui fluctue fortement dans le temps – même à l'échelle saisonnière – et dans l'espace. Or, celui-ci avait été uniquement contraint à partir des associations de fossiles.

Pour pallier cette contrainte, l'approche développée dans ce projet utilise la mesure du Δ_{47} ou « *clumped isotopes* » (Ghosh et al., 2006). Cette méthode vise à mesurer la surabondance des liaisons entre deux isotopes lourds de type ^{13}C - ^{18}O dans une molécule de CaCO_3 par rapport à une distribution aléatoire de ces liaisons (Eiler, 2011). Dans les carbonates, ce ratio est uniquement fonction de leur température de formation et est totalement indépendante du $\delta^{18}\text{O}_w$. Cet outil géochimique a été calibré sur des coquilles de mollusques actuels élevés en milieu contrôlé, démontrant une très bonne dépendance du Δ_{47} à la température, quelle que soit la composition isotopique de l'eau (Daëron et al., 2019 ; Huyghe et al., 2022).

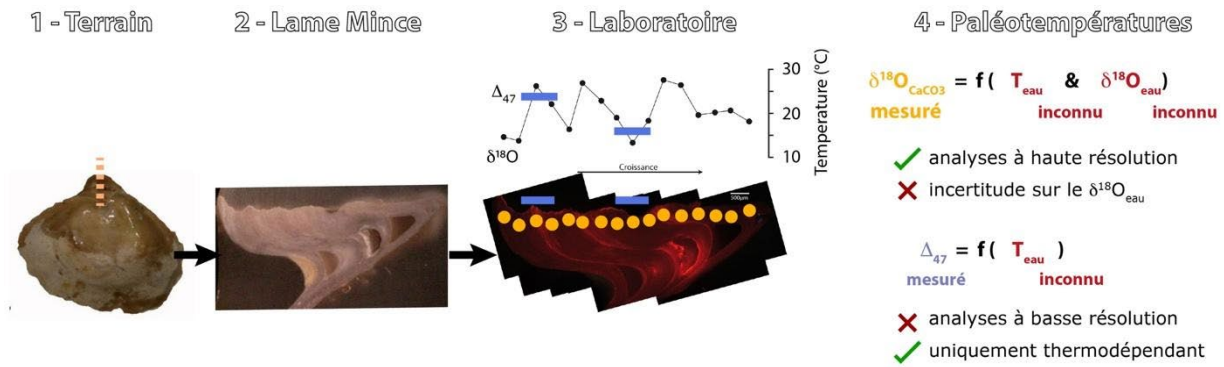


Figure 3 : Illustration du processus analytique depuis le terrain au laboratoire : lame mince, observation en cathodoluminescence, analyses géochimiques ($\delta^{18}\text{O}$ et Δ_{47}) et calcul des paléotempératures.

Chacune des deux méthodes, $\delta^{18}\text{O}$ et Δ_{47} , présente des avantages et des inconvénients. Les mesures du $\delta^{18}\text{O}$ nécessitent de faibles quantités de carbonates (< à 100 μg de poudre), ce qui permet des analyses à très haute résolution. A l'inverse, les mesures du Δ_{47} requièrent une quantité beaucoup plus importante de poudre (minimum 5 x 3 mg), ce qui diminue la résolution des mesures. C'est pourquoi, nous adopterons une approche couplant ces deux méthodes, pour contraindre le $\delta^{18}\text{O}_w$ local grâce au Δ_{47} , puis utiliser cette valeur pour reconstituer des valeurs à haute résolution de température grâce aux mesures du $\delta^{18}\text{O}$ sur les mêmes échantillons. Cette démarche analytique est détaillée sur la Fig. 3.

2. Sites étudiés

Au début de l'ère tertiaire, le bassin de Paris était un golfe marin peu profond, alimenté par des fleuves provenant du sud et de l'ouest (Figure 4). La latitude du bassin était comparable à l'actuel (40 °S pour Paris), ce qui permet une comparaison relativement fiable avec l'actuel.

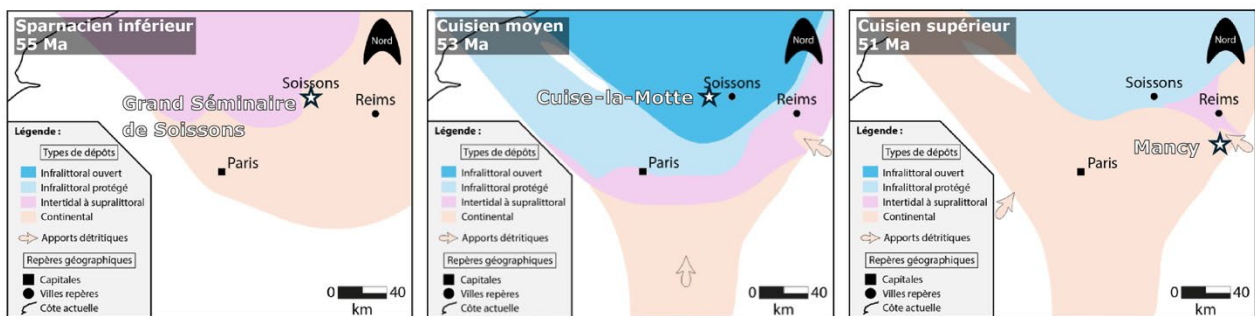


Figure 4 : Cartes paléogéographiques du bassin de Paris au cours de l'Éocène inférieur illustrant la localisation des sites étudiés, replacés dans le contexte des dépôts qu'ils comportent respectivement (d'après Gély, 2016).

La première année du projet a été essentiellement consacrée à l'échantillonnage des fossiles qui seront analysés pour les reconstitutions paléoclimatiques. À l'heure actuelle, trois sites principaux ont été échantillonnés et correspondent aux sites du Grand Séminaire à Soissons, Cuise-la-Motte, à l'est de Compiègne et Mancy, au sud d'Épernay (Fig. 4, 5 et 6). Ces trois sites sont complétés par des échantillons provenant de collections provenant d'universités ou privées, et qui permettent d'obtenir des fossiles provenant d'affleurements n'existant plus à l'heure actuelle.

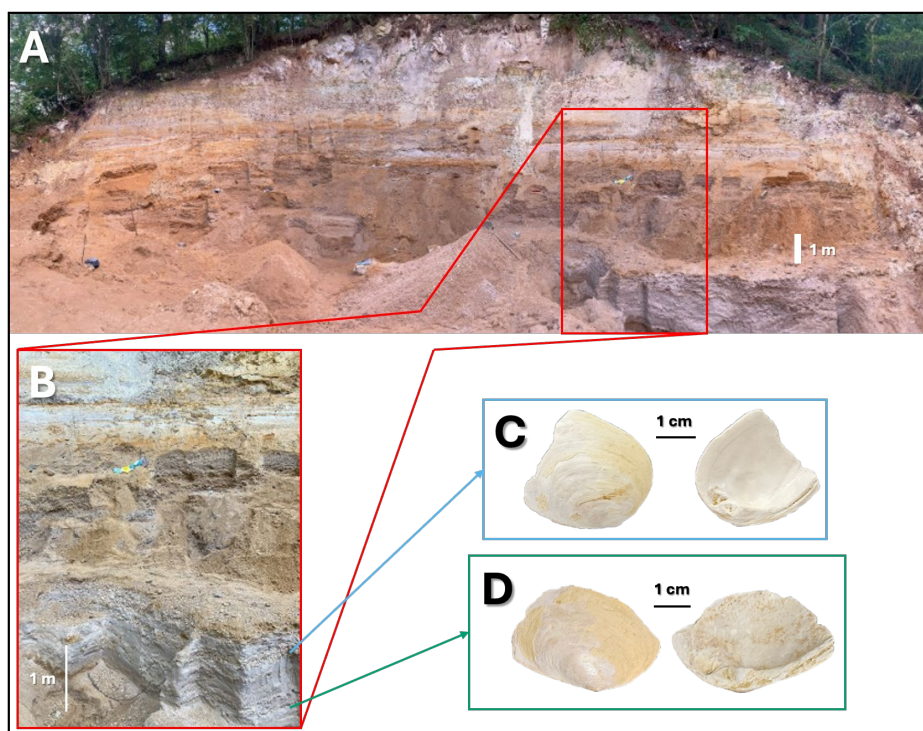


Figure 5 : Affleurement et fossiles du site de Mancy (51). A : Affleurement complet, B : Zoom sur l'emplacement des niveaux à unios (moules d'eau douce), C et D : unios de 2 niveaux différents. Les cassures sont mécaniques du fait de l'allongement de ce type de coquilles et non pas dues à des processus d'altération physico-chimiques.

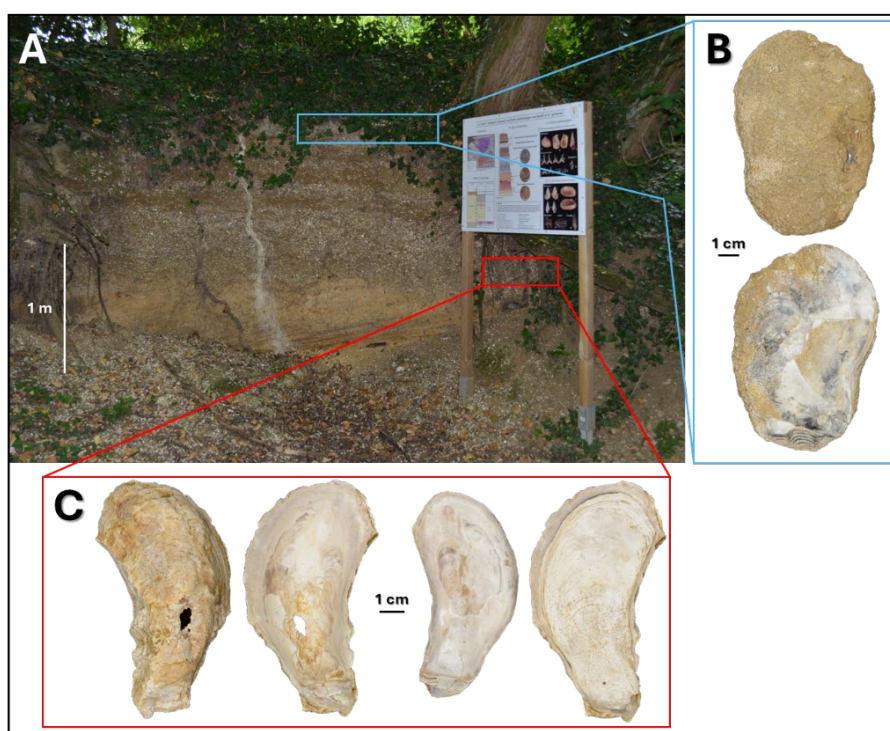


Figure 6 : Affleurement et fossiles du site du Grand Séminaire de Soissons (02). A : Affleurement, B et C : coquilles d'*Ostrea bellovacina*.

La distribution stratigraphique de ces trois sites est présentée sur la figure 7. Les sites échantillonnés permettent de recouvrir une grande partie du réchauffement de l'EECO, à la fois en domaine marin, saumâtre

et continental. De plus, le site du Grand Séminaire à Soissons permet d'accéder à l'état climatique avant ce pic de réchauffement, afin d'évaluer l'amplitude et l'impact du réchauffement.

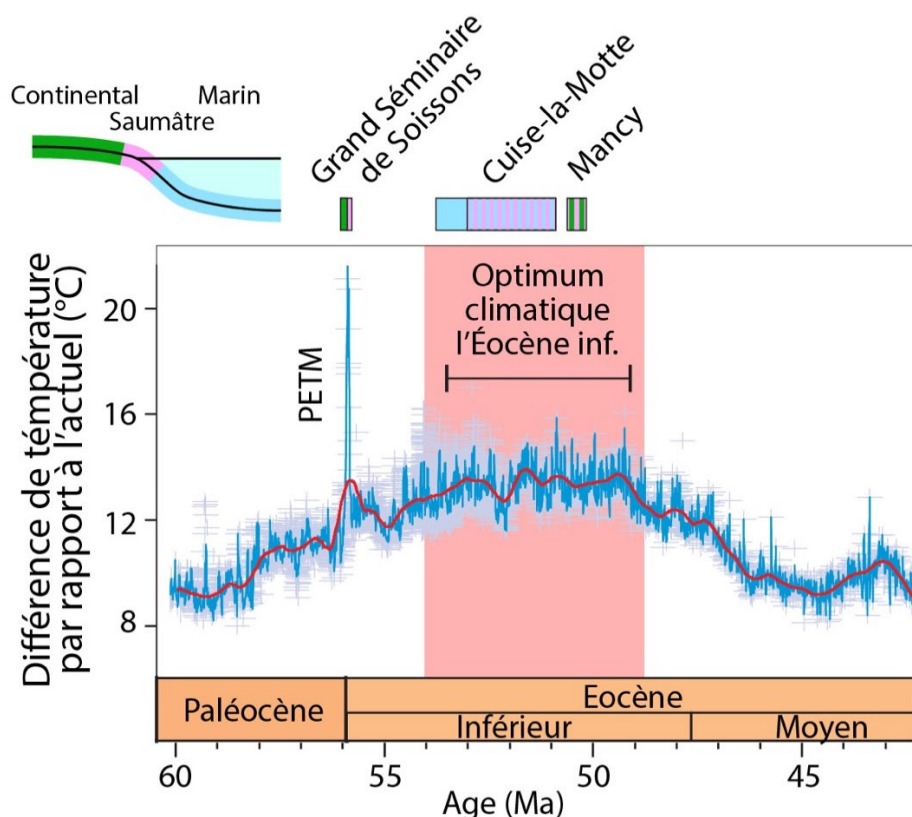


Figure 7 : Distribution stratigraphique des sites échantillonnés, à Soissons, Cuise-la-Motte et Mancy, mis en regard de l'évolution paléoclimatique du Paléocène et de l'Éocène inférieur. Ces sites permettent de recouvrir une grande partie de l'Optimum Climatique de l'Éocène Inférieur et d'obtenir des données anté-EECO à Soissons, pendant le maximum thermique de la Limite Paléocène – Éocène (PETM). L'environnement de dépôt de chacun des sites est également précisé.

3. Résultats

3.1. Collecte et préservation des échantillons

À l'heure actuelle, 250 échantillons, comprenant des coquilles de bivalves et de gastéropodes, ont été obtenus, par des campagnes d'échantillonnage sur le terrain ou à partir de collections. À cela s'ajouteront des dents de mammifères et de crocodiles une fois qu'elles auront été étudiées par les paléontologues du MNHN. Pour ces derniers échantillons, les analyses seront réalisées à l'automne 2026 à Université de Lyon.

Le préalable à toute étude géochimique ayant pour but de reconstituer les paléoenvironnements et les paléotempératures est que les échantillons soient bien préservés. Pour les bivalves, cela peut être effectué par observation en cathodoluminescence. Selon cette méthode, une lame mince est réalisée pour chaque fossile. Puis les échantillons sont placés dans une chambre sous vide et bombardés par un faisceau d'électrons. Ceci permet de faire ressortir les incréments de croissance naturels des mollusques si ceux-ci sont bien préservés.

Jusqu'à présent, 30 coquilles d'huîtres et 16 coquilles d'unios ont été observées en cathodoluminescence. L'ensemble des échantillons présente des qualités d'observation exceptionnelles pour des fossiles si vieux (Figures 8 et 9).

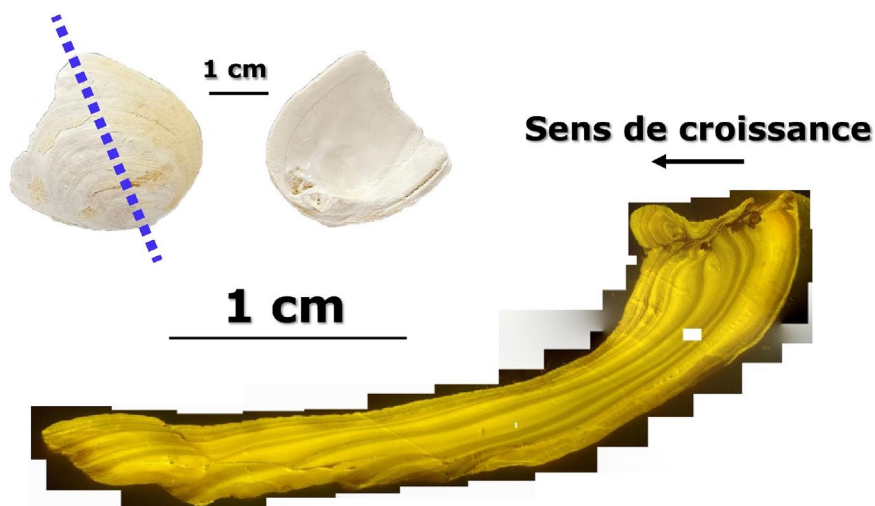


Figure 8 : Section d'une coquille d'unio (bivalve d'eau douce) du site de Mancy observée en cathodoluminescence.

3.2. Résultats isotopiques

Les résultats isotopiques sont en cours d'acquisition pour les différents fossiles. Pour l'instant, trois huîtres du gisement du Grand Séminaire de Soissons et trois autres du site de Cuise-la-Motte ont été analysées ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$). Les profils obtenus montrent une très nette cyclicité de l'enregistrement isotopique, pouvant être interprétée comme reflétant les variations saisonnières de températures pour le $\delta^{18}\text{O}$.

À Soissons, le $\delta^{18}\text{O}$ des huîtres fluctue entre -2,9 et -6,3 ‰, alors qu'à Cuise, les valeurs s'échelonnent entre -1,9 et -4,5 ‰ (Figure 9).

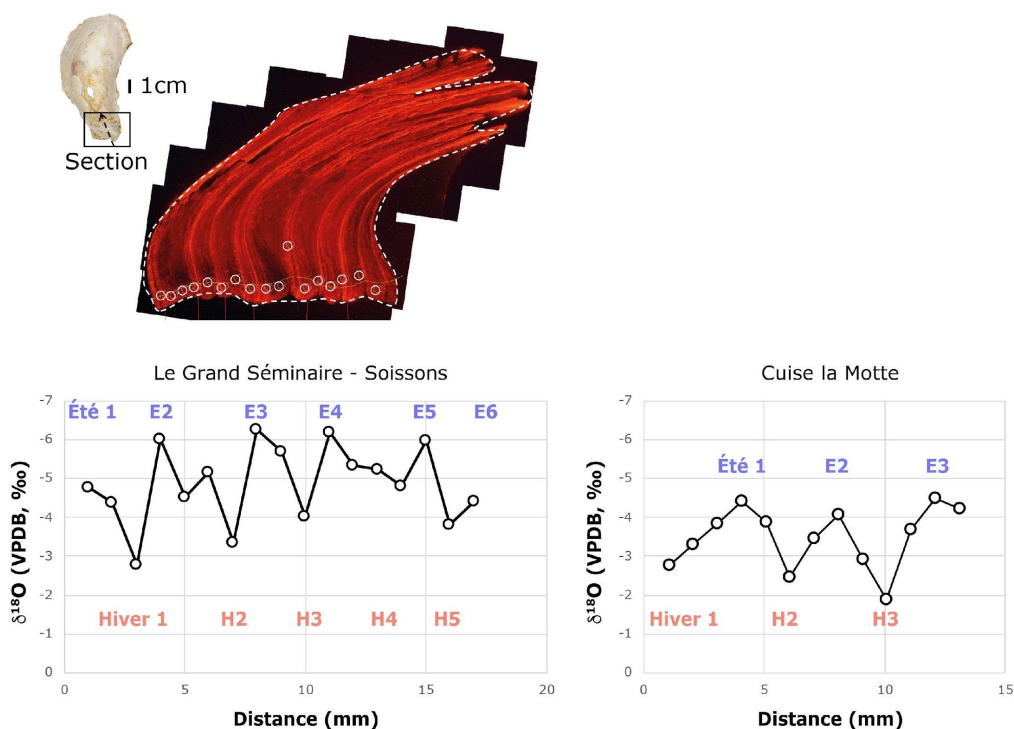


Figure 9 : Profils isotopiques des coquilles d'huîtres des sites du Grand Séminaire (Soissons) et de Cuise-la-Motte illustrant les variations saisonnières enregistrées par ces mollusques. L'image du haut montre une

section du crochet de l'huître de Soissons observée en cathodoluminescence sur laquelle les points de prélèvement ont été reportés.

3.3. Évolution des paléotempératures

Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ obtenues sur les huîtres des deux sites peuvent être converties en valeurs de températures grâce à l'équation de transfert de Andreasson et Arthur (1983). Le $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates est dépendant à la fois de la température de minéralisation et de la valeur isotopique de l'eau à partir de laquelle ils ont été minéralisés ($\delta^{18}\text{O}_w$), lui-même assimilé à la valeur de la salinité en domaine marin. Avant d'obtenir une estimation précise de ce paramètre grâce à des mesures du Δ_{47} , la salinité peut être estimée à partir des associations de fossiles. Pour le site de Soissons, les mollusques rencontrés suggèrent un environnement influencé par les apports d'eau douce, avec une salinité comprise entre 20 et 25 psu. À Cuise la Motte, une plus grande diversité de fossiles est rencontrée, ce qui suggère un milieu plus marin, avec une salinité comprise entre 25 et 30 psu.

Ainsi, les températures reconstituées s'échelonnent entre 20 et 35 °C pour les salinités les plus fortes et entre 30 et 15 °C si on considère une salinité plus faible (Figure 10).

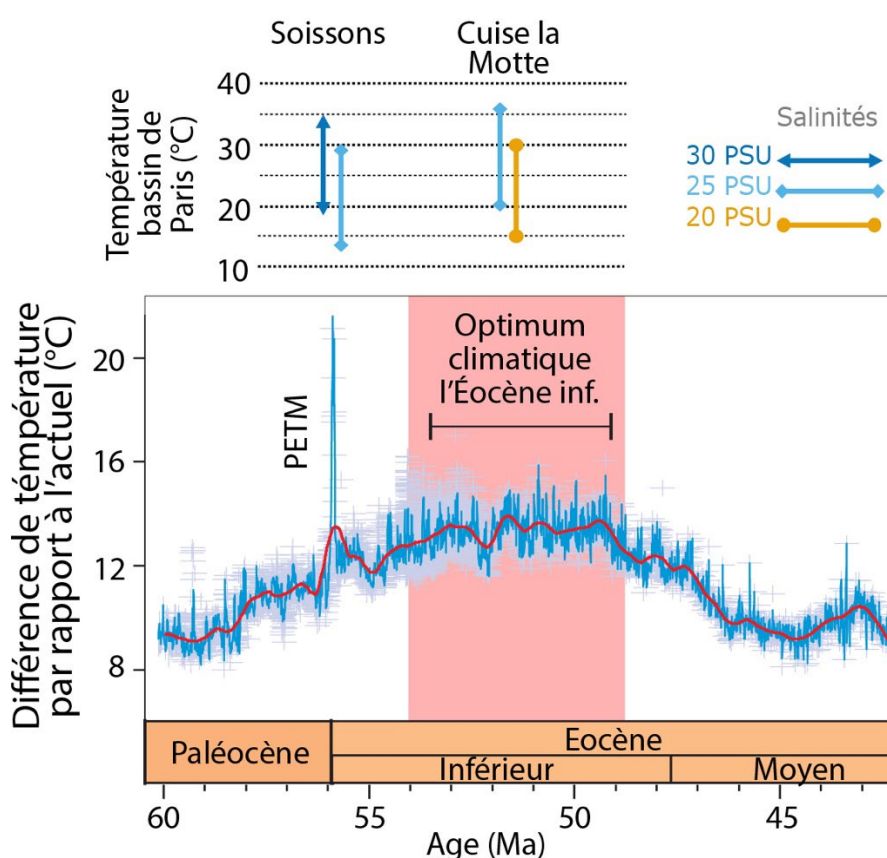


Figure 10 : Fluctuation des paléotempératures sur les sites de Soissons, avant l'EEOCO et de Cuise-la-Motte, pendant l'EEOCO, en considérant différentes valeurs de salinités.

Ces résultats préliminaires montrent que les températures de l'eau de mer étaient élevées durant l'optimum climatique de l'Éocène Inférieur, avec une saisonnalité importante, de l'ordre de 15 °C. Ces résultats nécessiteront d'être confirmés par des analyses du Δ_{47} , ce qui permettra de tester l'existence de potentielles dessalures saisonnières. Cela permettra dès lors de déterminer la saison durant laquelle les pluies sont les plus importantes et donc le fonctionnement hydrologique à grande échelle du paléo-bassin versant de la Seine.

Ces analyses des mollusques marins seront également complétées par des mesures sur les faunes d'eau douces (moules d'eau douce) et des vertébrés continentaux (mammifères primitifs et crocodiles).

Conclusion

Cette première année du projet a permis de poser les bases d'une reconstitution paléoclimatique pendant l'Optimum Climatique de l'Éocène Inférieur dans le Bassin de Paris, période considérée comme un analogue extrême du réchauffement climatique anthropique actuel. La collecte d'un ensemble conséquent et diversifié de fossiles bien préservés permettra l'étude du signal isotopique de carbonates continentaux et marins.

Les premières analyses géochimiques, menées sur des huîtres fossiles, mettent en évidence des cycles saisonniers nets, traduisant des variations de température importantes et un climat caractérisé par une forte amplitude thermique annuelle. Ces résultats préliminaires confirment le potentiel exceptionnel des séries éocènes du bassin de Paris pour documenter la dynamique des environnements littoraux et continentaux sous conditions climatiques extrêmes.

Les prochaines étapes du projet porteront sur la poursuite des analyses des différents fossiles, avec des mesures du $\delta^{18}\text{O}$ et du Δ_{47} afin de mieux contraindre les valeurs de paléotempératures, la salinité de l'eau et donc le régime hydrologique du système fluvial éocène du bassin de Paris.

Pour retrouver les outils et données

Les données seront publiées sous forme d'un article au cours de l'année 2026. Les données seront rendues accessibles dès lors.

Bibliographie

- Andreasson, F. P., and Schmitz, B. (1996). Winter and summer temperatures of the early middle Eocene of France from *Turritella* $\delta^{18}\text{O}$ profiles. *Geology*, 24(12), 1067-1070.
- Bohaty, S. M., Zachos, J. C., Florindo, F., and Delaney, M. L. (2009). Coupled greenhouse warming and deep-sea acidification in the middle Eocene. *Paleoceanography*, 24(2).
- Briais, J., 2015. Le Cénozoïque du bassin de Paris : un enregistrement sédimentaire haute résolution des déformations lithosphériques en régime de faible subsidence (Thèse). Université Rennes 1, Rennes.
- Burke, K. D., Williams, J. W., Chandler, M. A., Haywood, A. M., Lunt, D. J., and Otto-Bliesner, B. L. (2018). Pliocene and Eocene provide best analogs for near-future climates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(52), 13288-13293.
- Chen, C., Guerit, L., Foreman, B. Z., Hassenruck-Gudipati, H. J., Adatte, T., Honegger, L., Perret, M., Sluijs, A., and Castellort, S. (2018). Estimating regional flood discharge during Palaeocene-Eocene global warming. *Scientific Reports*, 8(1), 13391.
- Daëron, M., Drysdale, R.N., Peral, M., Huyghe, D., Blamart, D., Coplen, T.B., Lartaud, F. and Zanchetta, G. (2019). Most Earth-surface calcites precipitate out of isotopic equilibrium. *Nature communications*, 10(1), 429.
- De Winter, N. J., Vellekoop, J., Clark, A. J., Stassen, P., Speijer, R. P., and Claeys, P. (2020). The giant marine gastropod *Campanile giganteum* (Lamarck, 1804) as a high-resolution archive of seasonality in the Eocene greenhouse world. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21(4), e2019GC008794.
- Eiler, J. M. (2011). Paleoclimate reconstruction using carbonate clumped isotope thermometry. *Quaternary Science Reviews*, 30(25-26), 3575-3588.
- Gély, J. P. (2016). Le Paléogène du Bassin de Paris : Corrélation et reconstitutions paléogéographiques. *Bull. Inf. Géol. Bassin Paris*, 53, 2-13.
- Ghosh, P., Adkins, J., Affek, H., Balta, B., Guo, W., Schauble, E. A., ... and Eiler, J. M. (2006). 13C–18O bonds in carbonate minerals: A new kind of paleothermometer. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(6), 1439-1456.
- Grimes, S. T., Matthey, D. P., Hooker, J. J., and Collinson, M. E. (2003). Paleogene paleoclimate reconstruction

- using oxygen isotopes from land and freshwater organisms: the use of multiple paleoproxies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(21), 4033-4047.
- Huyghe, D., Merle, D., Lartaud, F., Cheype, E., and Emmanuel, L. (2012). Middle Lutetian climate in the Paris Basin: implications for a marine hotspot of paleobiodiversity. *Facies*, 58(4), 587-604.
- Huyghe, D., Lartaud, F., Emmanuel, L., Merle, D., and Renard, M. (2015). Palaeogene climate evolution in the Paris Basin from oxygen stable isotope ($\delta^{18}\text{O}$) compositions of marine molluscs. *Journal of the Geological Society*, 172(5), 576-587.
- Huyghe, D., Emmanuel, L., Renard, M., Lartaud, F., Génot, P., Riveline, J., and Merle, D. (2017). Significance of shallow-marine and non-marine algae stable isotope ($\delta^{18}\text{O}$) compositions over long periods: Example from the Palaeogene of the Paris Basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 485, 247-259.
- Huyghe, D., Emmanuel, L., De Rafelis, M., Renard, M., Ropert, M., Labourdette, N., and Lartaud, F. (2020). Oxygen isotope disequilibrium in the juvenile portion of oyster shells biases seawater temperature reconstructions. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 240, 106777.
- Huyghe, D., Daëron, M., De Rafelis, M., Blamart, D., Sebilo, M., Paulet, Y. M., and Lartaud, F. (2022). Clumped isotopes in modern marine bivalves. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 316, 41-58.
- Lartaud, F., Emmanuel, L., De Rafelis, M., Ropert, M., Labourdette, N., Richardson, C.A., and Renard, M., (2010). A latitudinal gradient of seasonal temperature variation recorded in oyster shells from the coastal waters of France and The Netherlands. *Facies* 56, 13–25.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., ... and Zhou, B. (2021). Climate change 2021: the physical science basis. *Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, 2(1), 2391.
- Pujalte, V., Schmitz, B., and Payros, A. (2022). A rapid sedimentary response to the Paleocene-Eocene Thermal Maximum hydrological change: New data from alluvial units of the Tremp-Graus Basin (Spanish Pyrenees). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 589, 110818.
- Schmitz, B., and Pujalte, V. (2003). Sea-level, humidity, and land-erosion records across the initial Eocene thermal maximum from a continental-marine transect in northern Spain. *Geology*, 31(8), 689-692.
- Sluijs, A., Zeebe, R. E., Bijl, P. K., and Bohaty, S. M. (2013). A middle Eocene carbon cycle conundrum. *Nature Geoscience*, 6(6), 429-434.
- Tierney, J. E., Poulsen, C. J., Montañez, I. P., Bhattacharya, T., Feng, R., Ford, H. L., ... and Zhang, Y. G. (2020). Past climates inform our future. *Science*, 370(6517), eaay3701.
- Westerhold, T., Marwan, N., Drury, A. J., Liebrand, D., Agnini, C., Anagnostou, E., ... and Zachos, J. C. (2020). An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. *science*, 369(6509), 1383-1387.
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., and Billups, K. (2001). Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *science*, 292(5517), 686-693.
- Zachos, J. C., Dickens, G. R., and Zeebe, R. E. (2008). An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. *nature*, 451(7176), 279-283.
- Zachos, J. C., Schouten, S., Bohaty, S., Quattlebaum, T., Sluijs, A., Brinkhuis, H., ... and Bralower, T. J. (2006). Extreme warming of mid-latitude coastal ocean during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum: Inferences from TEX86 and isotope data. *Geology*, 34(9), 737-740.