



**HAL**  
open science

# Waziers (France) : les isotopes de l'oxygène des dents de grands mammifères pour reconstruire les paléotempératures de l'avant-dernière transition Glaciaire/Interglaciaire (SIM 6/5)

Chloé Maréchal, Christophe Lécuyer, Romain Amiot, François Fourel, Pierre  
Antoine, P. Auguste, Laurent Deschodt, David Hérisson

## ► To cite this version:

Chloé Maréchal, Christophe Lécuyer, Romain Amiot, François Fourel, Pierre Antoine, et al.. Waziers (France) : les isotopes de l'oxygène des dents de grands mammifères pour reconstruire les paléotempératures de l'avant-dernière transition Glaciaire/Interglaciaire (SIM 6/5). *Quaternaire*, 2022, Waziers le Bas-Terroir. Un gisement eemien du Nord de la France. Tome 1, 33 (4), pp.323-339. 10.4000/quaternaire.17334 . hal-03925368

**HAL Id: hal-03925368**

**<https://hal.science/hal-03925368>**

Submitted on 22 Jun 2023

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0  
International License

# WAZIERS (FRANCE) : LES ISOTOPES DE L'OXYGÈNE DES DENTS DE GRANDS MAMMIFÈRES POUR RECONSTRUIRE LES PALÉOTEMPÉRATURES DE L'AVANT-DERNIÈRE TRANSITION GLACIAIRE/INTERGLACIAIRE (SIM 6/5)

Chloé MARÉCHAL<sup>1</sup>, Christophe LÉCUYER<sup>1</sup>, Romain AMIOT<sup>1</sup>, François FOUREL<sup>2</sup>, Pierre ANTOINE<sup>3</sup>, Patrick AUGUSTE<sup>4</sup>, Laurent DESCHODT<sup>3,5</sup> & David HÉRISSEON<sup>6</sup>

## RÉSUMÉ

La dernière période interglaciaire (Last Interglacial, LIG, ou Stade Isotopique Marin 5.5, SIM 5.5), comprise entre  $\approx 129$  et  $\approx 116$  milliers d'années avant aujourd'hui (ci-dessous ka), est peu documentée, en particulier en domaine continental en raison de la rareté des dépôts attribuables à cette période qui correspond à l'Eemien dans la chronostratigraphie de l'Europe du nord-ouest. Le manque de documentation est encore plus prononcé pour la déglaciation qui précède le LIG, la Transition SIM 6/5 ou Terminaison 2, qui a duré une dizaine de milliers d'années. Dans ce contexte, le site de Waziers, localisé en Europe occidentale (France), présente une séquence exceptionnelle constituée de dépôts successifs fins limono-calcaires couvrant l'avant-dernière déglaciation (SIM 6/5) et des tourbes riches en restes végétaux contemporaines du dernier interglaciaire (SIM 5.5). L'analyse isotopique de l'oxygène du phosphate de l'émail de dents de grands mammifères herbivores (cheval, *Equus sp.*; mégalocéros, *Megaloceros giganteus*; chevreuil, *Capreolus capreolus*) présents dans ces dépôts a permis de reconstituer les paléotempératures de l'air du vivant des animaux. Les résultats donnent des températures moyennes annuelles de  $4,7 \pm 0,6^\circ\text{C}$  pour une première phase de la déglaciation (5 dents d'un même individu), de  $6,9 \pm 0,5^\circ\text{C}$  pour une phase médiane de la déglaciation (1 dent), et de  $8,6 \pm 0,5^\circ\text{C}$  pour une phase précédant l'établissement du dernier interglaciaire, le SIM 5.5 (1 dent). Des artefacts paléolithiques (silex) ont été découverts dans les dépôts contemporains de cette dernière phase - ainsi que dans ceux attribués au SIM 5.5. En accord avec les données palynologiques, les paléotempératures mettent en évidence un réchauffement progressif au cours d'une partie de la transition glaciaire/interglaciaire, la Transition SIM 6/5. L'écart de  $\approx 4^\circ\text{C}$  entre la température minimale et la température maximale reconstituées ici permet de minorer l'écart de température entre la période glaciaire SIM 6.2 et la période interglaciaire SIM 5.5 sur le site de Waziers.

**Mots clés :** Transition glaciaire/interglaciaire, SIM 6/5, Eemien, paléotempératures, isotopes de l'oxygène, phosphates, mammifères, Europe de l'Ouest.

## ABSTRACT

WAZIERS (FRANCE): OXYGEN ISOTOPES OF LARGE MAMMAL TEETH TO RECONSTRUCT PALEOTEMPERATURES OF THE PENULTIMATE GLACIAL/INTERGLACIAL TRANSITION (MIS 6/5)

The Last Interglacial (LIG or Marine Isotopic Substage 5.5, MIS5.5), which is comprised between  $\approx 129$  and  $\approx 116$  thousand years Before Present (hereafter ky BP), is poorly documented, especially in continental areas, owing to the scarcity of deposits attributable to this period, which corresponds to the Eemian in the chronostratigraphy of northwestern Europe. The scarcity of documentation is even more pronounced for the deglaciation that precedes the LIG, the MIS 6/5 Transition or Termination 2, which lasted about ten thousand years. In this context, the site of Waziers, in Western Europe (France), has an exceptional sequence of successive fine silty-limestone deposits covering the penultimate deglaciation (MIS 6/5) and peat rich in plant remains contemporary with the last interglacial (MIS 5.5). Oxygen isotope analysis of phosphate of tooth enamel from large herbivorous mammals (horse, *Equus sp.*; megaloceros, *Megaloceros giganteus*; roe deer, *Capreolus capreolus*) present in these deposits allows the reconstruction of air paleotemperatures during the lifetime of the animals. The results yield annual mean temperatures of  $4.7 \pm 0.6^\circ\text{C}$  for an early phase of the deglaciation (5 teeth of a same individual), of  $6.9 \pm 0.5^\circ\text{C}$  for a mid-phase of the deglaciation (1 tooth), and of  $8.6 \pm 0.5^\circ\text{C}$  for a phase preceding the establishment of the last interglacial, the MIS5.5 (1 tooth). In deposits contemporary with the latter phase, human artifacts were discovered, as well as in those of MIS5.5. In agreement with the palynological data, the paleotemperatures illustrate a gradual warming during part of the glacial/interglacial transition, the MIS6/5 Transition. The difference of  $\approx 4^\circ\text{C}$  between the minimal and maximal temperature reconstructed in this study allows us to minimize the temperature difference between the MIS6.2 glacial period and the MIS5.5 interglacial period at the Waziers site.

**Keywords :** glacial/interglacial transition, MIS 6/5, Eemian, paleotemperatures, oxygen isotopes, phosphate, mammals, Western Europe.

<sup>1</sup> Univ Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, ENSL, CNRS, UMR 5276 LGL-TPE, FR-69622 Villeurbanne. *Courriels*: chloe.marechal@univ-lyon1.fr; christophe.lecuyer@univ-lyon1.fr; romain.amiot@univ-lyon1.fr

<sup>2</sup> Univ Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, ENTPE, UMR 5023 LEHNA, FR-69622 Villeurbanne. *Courriel*: francois.fourel@univ-lyon1.fr

<sup>3</sup> Laboratoire de Géographie Physique, Environnements quaternaires et actuels, UMR 8591 CNRS - Université Paris 1 - UPEC, 2 rue Henri Dunant, FR-94320 THIAIS, FR-92195, Meudon cedex. *Courriel*: pierre.antoin@lgp.cnrs.fr

<sup>4</sup> Univ. Lille, Evo-Eco-Paleo, UMR 8198 CNRS, FR-59000 Lille, France. *Courriel*: patrick.auguste@univ-lille.fr

<sup>5</sup> INRAP Hauts-de-France, Centre archéologique de Villeneuve-d'Ascq, 11 Rue des Champs, FR-59655, Villeneuve d'Ascq. *Courriel*: laurent.deschodt@inrap.fr

<sup>6</sup> CNRS-UMR 7041, ArScAn, MSH Mondes, 21 Allée de l'Université, FR-92023 Nanterre cedex, France. *Courriel*: david.herisson@cnrs.fr

## 1 - INTRODUCTION

L'avant-dernière transition glaciaire/interglaciaire ou Transition SIM 6/5 (Stade Isotopique Marin 6/5) succède à l'avant-dernière phase glaciaire, le SIM 6 ( $\approx 185$  à  $\approx 140$  ka, Jouzel *et al.*, 2007), qui s'achève par un maximum glaciaire autour de  $\approx 140$  ka, le SIM 6.2 (Waelbroeck *et al.*, 2002). Cette phase de transition SIM 6/5 précède la dernière phase tempérée interglaciaire, qui s'ouvre sur la période la plus chaude, le SIM 5.5 ( $\approx 129$  à  $\approx 116$  ka, Masson-Delmotte *et al.*, 2013; Capron *et al.*, 2017) (Eemien). Les transitions glaciaire/interglaciaire au cours des derniers cycles climatiques sont caractérisées par de grands changements en surface du globe terrestre, en particulier par le retrait des immenses calottes de glace de l'hémisphère nord (Amérique du nord et Eurasie), la montée du niveau marin de plus de 120 mètres (Waelbroeck *et al.*, 2002; Lambeck *et al.*, 2014) et les changements majeurs de biomes et d'assemblages fauniques en milieu marin et continental. En Europe de l'Ouest, par exemple, ces transitions sont marquées par une évolution nette de la végétation depuis un milieu ouvert de toundra vers un milieu forestier (de Beaulieu *et al.*, 2006). L'écart de température moyenne annuelle entre le pic des conditions glaciaires et celui des conditions interglaciaires sur les cinq derniers cycles climatiques a été estimée entre 4°C et 8°C (Otto-Bliesner *et al.*, 2006; Shakun and Carlson, 2010; Snyder *et al.*, 2016; Fischer *et al.*, 2018).

Les études centrées sur l'établissement progressif de la Transition SIM 6/5 sont rares, en particulier en milieu continental. En Europe de l'Ouest, le site de Waziers (France) offre un cadre remarquable pour une telle étude. Le travail présenté ici se situe dans la perspective de caractériser la Transition SIM 6/5 à Waziers. Les dépôts sédimentaires sont en effet exceptionnels car ils couvrent les différentes étapes de cette avant-dernière transition glaciaire/interglaciaire avec une résolution temporelle élevée. Par ailleurs, leur nature a permis une excellente conservation de restes organiques (macro-restes végétaux, graines, bois, ossements de mammifères et d'oiseaux, mollusques, insectes). Enfin, le site est remarquable du fait de la présence avérée de l'Homme de Néandertal à la fois durant la transition glaciaire/interglaciaire SIM 6/5 et durant l'interglaciaire du SIM 5.5 (Hérisson *et al.*, 2022). Notons qu'un autre site remarquable pour l'étude de l'établissement et du développement de l'interglaciaire du SIM 5.5 existe en France septentrionale: il est situé à Caours (Baie de Somme, France), à environ 90 km à l'est de Waziers (fig. 1A). Sur ce site, les dépôts de tuf, comprenant plusieurs niveaux archéologiques, ont déjà livré de nombreuses données pour les reconstitutions paléoclimatiques (Antoine *et al.*, 2006; Dabkowski *et al.*, 2015) et continuent d'être étudiés en détail.

L'étude de la stratigraphie et des bio-indicateurs (palynologie, malacologie) des dépôts de Waziers permet de reconstituer l'évolution climatique et paléoenvironnementale au cours du réchauffement contemporain de cette transition (Gauthier, 2022; Limondin-Lozouet, 2022). Une méthode de reconstitution

du climat, parmi d'autres, repose sur l'analyse de la composition isotopique de l'oxygène du phosphate de dents de certaines espèces de grands mammifères fossiles. Cette méthode permet de reconstituer la température de l'air au moment de la vie de l'animal (Longinelli, 1984; Delgado Huertas *et al.*, 1995; Lécuyer *et al.*, 2021). Elle est particulièrement puissante dans la mesure où elle offre la possibilité de proposer des valeurs bien calibrées pour ces températures. Elle est utilisée ici, en s'appuyant sur les échantillons de dents de mammifères disponibles sur le site de Waziers.

Parmi l'ensemble des fossiles fauniques du site de Waziers, plusieurs dents de grands mammifères appartenant à trois niveaux stratigraphiques distincts, contemporains de la Transition SIM 6/5, et pouvant être exploitées pour la reconstitution des paléotempératures, ont été identifiées. L'objectif de ce travail est de présenter et de discuter les paléotempératures de l'air obtenues au cours de phases successives de la Terminaison SIM 6/5.

## 2 - SITE D'ÉTUDE

### 2.1 - LOCALISATION ET CONTEXTE CLIMATIQUE ACTUEL

Waziers est une commune d'Europe occidentale située à 50°23'14"N, 03°06'47"E dans le Nord de la France (région des Hauts de France), à environ 110 km des côtes de la mer de la Manche et à environ 85 km de celles de la Mer du Nord (fig. 1A). Le gisement fossilifère de Waziers, au lieu-dit «Le Bas Terroir», est localisé sur la bordure sud-ouest de la plaine de la Scarpe, à une altitude d'environ 21 m NGF (fig. 1B,C).

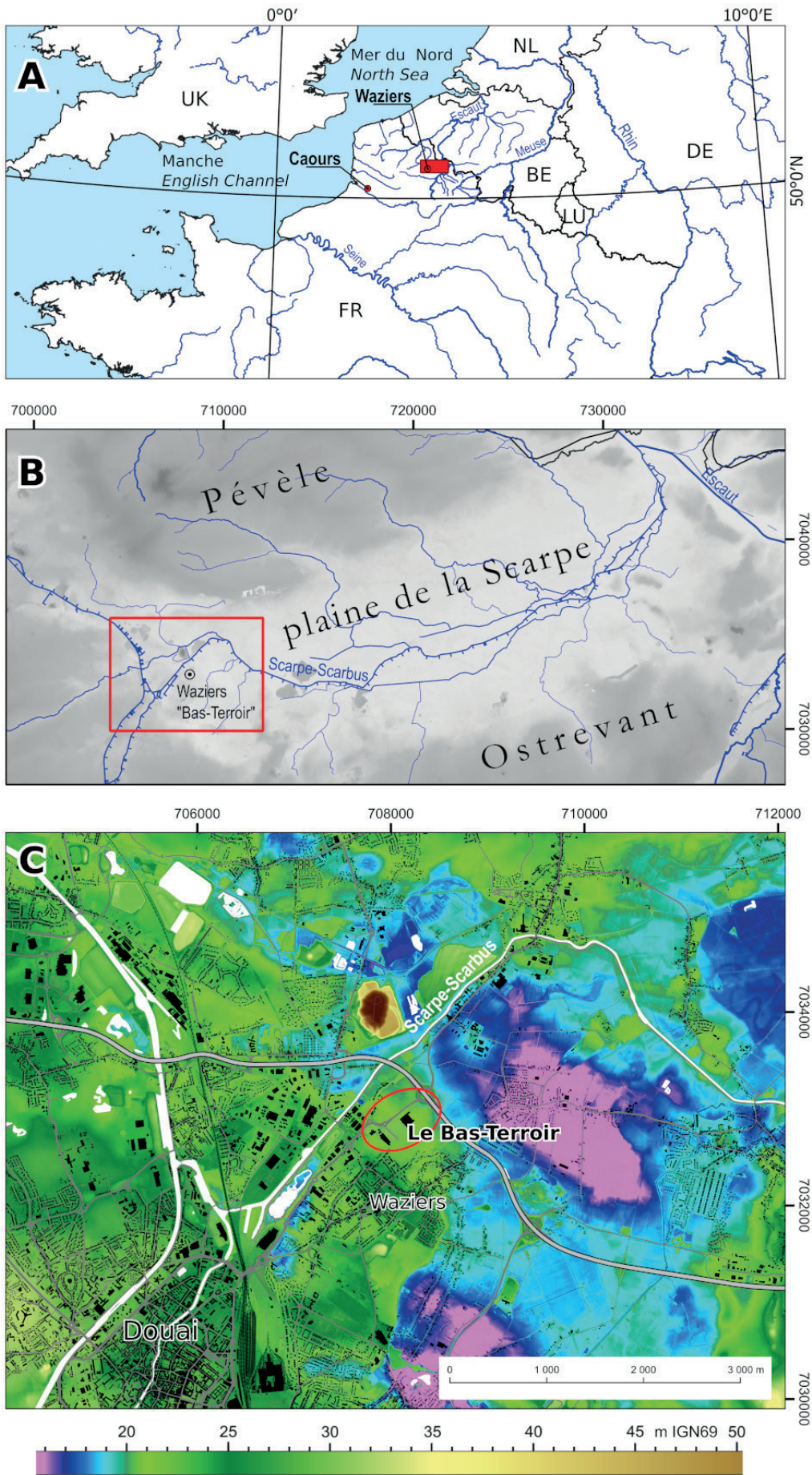
La région des Hauts de France est caractérisée par un climat de type océanique tempéré. A Waziers, les précipitations sont de 748 mm en moyenne annuelle (entre 1999 et 2019) et distribuées de façon relativement uniforme au cours de l'année (Climate-data.org, basé sur les données ECMWF). La température, quant à elle, est de 11,0°C en moyenne annuelle sur la période 1999-2019, avec des moyennes mensuelles saisonnières variant de 4,0°C en janvier à 18,6°C en juillet (Climate-data.org). La température moyenne annuelle est typique des moyennes latitudes en milieu continental tempéré dans l'hémisphère nord.

### 2.2 - LE GISEMENT FOSSILIFÈRE DE WAZIERS

#### 2.2.1 - Intérêt du gisement

Observé une première fois en 2011 puis mis en évidence en 2013 lors d'un diagnostic archéologique, le gisement paléolithique de Waziers a fait l'objet de fouilles programmées de 2013 à 2015, puis en 2017 (pour l'historique des observations et opérations, voir Hérisson *et al.*, 2022). La séquence de dépôts fluviatiles et tourbeux du dernier interglaciaire au site de Waziers correspond au remplissage d'un large paléo-





**Fig. 1: Localisation du gisement de Waziers «Bas-Terroir» (France).**

(A) Localisation de la plaine de la Scarpe en Europe du nord-ouest. Coordonnées UTM. (B) Localisation du gisement de Waziers dans la plaine de la Scarpe. Coordonnées en mètres Lambert 93. (C) Localisation du gisement de Waziers «Bas-Terroir» sur un MNT issu du Lidar Scarpe (Source DREAL).

*Fig. 1: Location of the Waziers «Bas-Terroir» deposit (France). (A) Location of the Scarpe Plain in northwestern Europe. UTM coordinates. (B) Location of the Waziers deposit in the Scarpe plain. Coordinates in metres Lambert 93. (C) Location of the Waziers «Bas-Terroir» deposit on a DTM from the Scarpe Lidar (Source DREAL).*

méandre localisé sur la bordure sud-ouest de la plaine de la Scarpe (fig. 1B-C) (Deschodt *et al.*, 2022). Cette séquence est constituée de limons organiques carbonatés et de tourbes attribuées à l'avant-dernière transition glaciaire/interglaciaire (SIM 6/5) et à la dernière période interglaciaire (SIM 5.5). Ces dépôts ont été fortement érodés puis préservés par une épaisse couverture de dépôts éoliens périglaciaires (loess) de plus de 3 m d'épaisseur, attribués à la dernière période glaciaire (SIM 4 à 2, ou Weichselien). Les pollens, les bois, les macro-restes végétaux, les mollusques, les restes de mammifères et d'insectes y sont particulièrement bien conservés (Locht *et al.*, 2014; Hérisson *et al.*, 2015, 2017). Enfin, des artefacts (silex taillés dont des éclats Levallois, et des os portant des traces de découpes et de combustion) attestent d'une occupation humaine néandertalienne dans ce lieu à différentes périodes autour du dernier interglaciaire et, à ce titre, font de Waziers un site majeur.

## 2.2.2 - Stratigraphie

La stratigraphie au droit de la fouille 2014 (d'où provient le matériel étudié) et de la fouille 2015 est synthétisée sur la figure 2 (pour une présentation plus détaillée voir Deschodt *et al.*, 2022). Le substrat géologique du gisement de Waziers est constitué de formations tertiaires (Thanétien) surmontant la craie sénonienne. Au-dessus

de la craie, les niveaux fossilifères sont encadrés par deux types de dépôts grossiers. Le plus ancien (US3, «US» signifiant «Unité Stratigraphique») correspond à un dépôt de nappe alluviale sablo-graveleuse mis en place sous un régime périglaciaire attribué à l'avant-dernière période glaciaire (SIM 6). Ce dernier comprend, en particulier, l'avant-dernier maximum glaciaire (SIM 6.2). Le plus récent consiste en un dépôt nettement érosif (US6) qui ravine les dépôts fossilifères. Ce dépôt est recouvert par des sédiments sablo-craveux (US7a) puis des limons sableux (US7b), enfin des loess (US7c). Les unités US6 et US7 sont attribuées à la dernière période glaciaire (SIM 4 à 2, Weichselien). La transition glaciaire/interglaciaire du SIM 6/5 et la dernière période interglaciaire du SIM 5.5 sont donc enregistrées dans les unités US4 et US5.

L'US4 (fig. 2) est caractérisée par des dépôts fluviatiles fins à dominante minérale. Localement, quand l'unité est bien dilatée, on y distingue cinq sous-unités aux limites diffuses: US4a, les limons gris inférieurs (gris vert); US4b, les limons intermédiaires légèrement organiques (gris brun); US4c, les limons gris supérieurs; US4d, les limons supérieurs légèrement brunâtres; US4e, le limon brun avec des traits pédogénétiques présents sur la seule fouille de 2015 (amorce probable d'une rive).

L'US5 est dominée par des dépôts fluviatiles fins à dominante organique et se divise en cinq sous-unités:

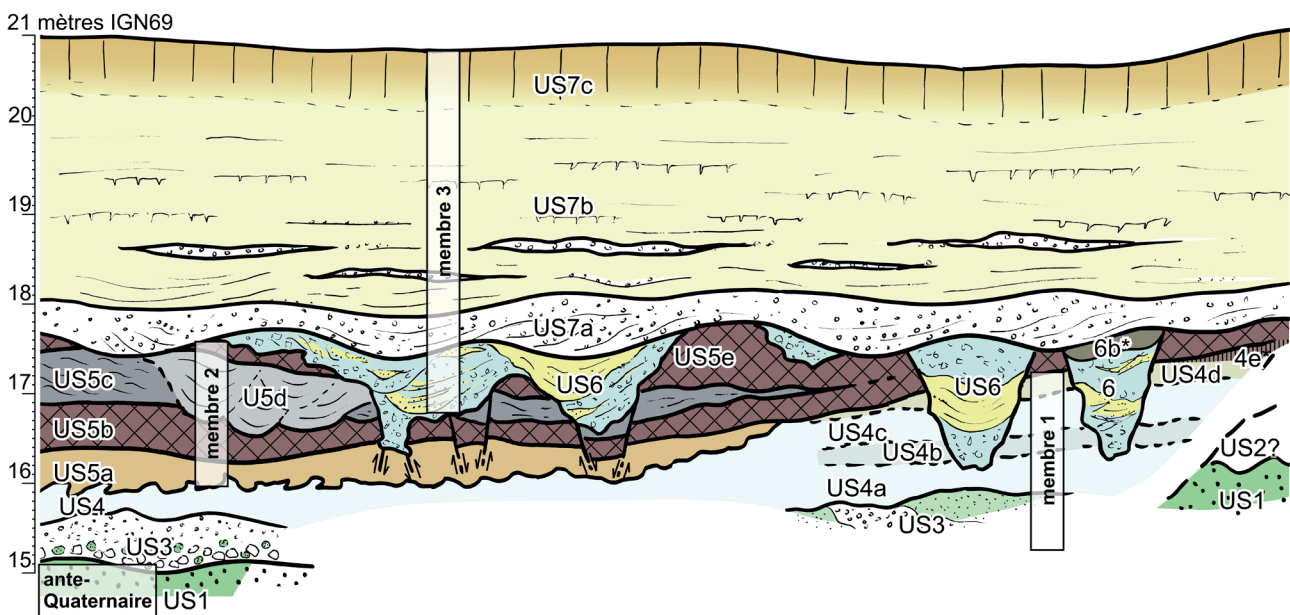


Fig. 2: Synthèse stratigraphique du site de Waziers sur la fouille 2014-2015.

Les unités stratigraphiques (US) sont indiquées pour chaque niveau. US1: Substrat antéquatenaire (sable éocène), US2: Formation de versant, US3: Dépôts grossiers fluviatiles (craie, sable glauconieux, grès glauconieux), US4: Dépôts fluviatiles fins à dominante clastique (4a: Limon gris inférieur, 4b: Limon légèrement organique, 4c: Limon gris supérieur, 4d: Limon brunâtre, 4e: Horizons pédologiques), US5: Dépôts fluviatiles fins à dominante organique (5a: Limon brunâtre inférieur, 5b: Tourbe laminée inférieure, riche en avifaune, 5c: Limon gris laminé, remplissage d'un large chenal, 5d: Limon gris, remplissage de chenaux étroits, 5e: Limon brunâtre supérieur et tourbe, riche en bois et en os de castors), US6: Dépôts fluviatiles remaniés, graviers d'argile et figures thermokarstiques, US7: Dépôts de couverture (7a: Graviers de craie, 7b: Sable et limon lité, 7c: Loess et pédogenèse). \*: Unité exclusivement présente sur l'excavation 2015. Les «membres 1 à 3» correspondent à des regroupements d'unités stratigraphiques.

Fig. 2: Stratigraphic synthesis of the Waziers site for the 2014-2015 excavation. The stratigraphic units (US) are indicated for each level. US1: Antequaternary substratum (Eocene sand), US2: Slope formation, US3: Fluvial coarse deposits (chalk, glauconitic sand and glauconitic sandstones), US4: Thin fluvial mainly clastic deposits (4a: Lower grey silt, 4b: Slightly organic silt, 4c: Upper grey silt, 4d: Upper brownish loam, 4e: Soil horizons), US5: Thin fluvial mainly organic deposits (5a: Lower brownish silt, 5b: Lower laminated peat, with rich avifauna, 5c: Laminated grey silt, large channel infilling, 5d: Grey silt, narrow channels infilling, 5e: Upper brownish silt and peat, rich in wood pieces and beavers bones), US6: Reworked fluvial deposit, clayey gravels and thermokarstic figures, US7: Covering deposits (7a: chalk gavel shee, 7b: Bedded sand and silt, 7c: loess and weathering). \*: Unit exclusively present on the 2015 excavation. "Members 1 to 3" correspond to groupings of stratigraphic units.



US5a, les limons bruns inférieurs; US5b, la tourbe inférieure (dite tourbe «à canards»); US5c, le limon gris en large chenal; US5d, le limon gris en petits chenaux (qui érodent localement US5b et US5c); US5e, les limons bruns et la tourbe supérieure (dite tourbe «à castors»).

### 2.2.3 - Environnement des niveaux fossilifères US4 et US5

L'US4 correspond à la zone malacologique locale WZM1 (Limondin-Lozouet, 2022) et aux zones palynologiques locales Waz-1 et Waz-2 (Gauthier, 2022). Biozones et lithologie traduisent un environnement principalement émergé (berge herbeuse et berge sèche) avec une tendance à une stabilisation des dépôts au cours du temps. L'US4 est attribuée à une première phase de période tardiglaciaire (encore appelée transition glaciaire/interglaciaire).

L'US5 est marquée par une sédimentation plus organique (US5a) voire franchement tourbeuse (US5b, US5e) entrecoupée de dépôts fluviaux limoneux (US5c, US5d). Elle correspond à un environnement aquatique (eau calme) attribué à une période de climat plus chaud. Malacologie et palynologie confirment les changements d'environnement et de climat déduits de la lithologie. L'étude palynologique menée à la base de l'ensemble US5 dans l'US5a (palynozone locale Waz-3) et US5b (Waz-4) indique l'établissement d'une végétation aquatique et l'apparition d'arbres pionniers. Bien qu'entrecoupé de quelques niveaux stériles (correspondant aux alluvions clastiques), l'enregistrement malacologique indique une zone dulcicole pour l'ensemble de l'US5 (Ma2) et la présence de berges boisées dans la partie supérieure (US5e, malacozone Ma2b). La présence du gastéropode *Belgrandia marginata* dès la base de l'US5e, puis son développement, implique clairement des conditions interglaciaires. Ainsi les successions US5a à US5e traduisent la fin du tardiglaciaire saalien puis le développement du dernier interglaciaire (Eemien).

## 3 - MATÉRIEL

### 3.1 - MATÉRIEL FOSSILE UTILISÉ

#### 3.1.1 - Sélection du matériel

Une très grande variété de restes fauniques (ossements et dents) en excellent état de conservation a été découverte dans les différentes unités du site de Waziers (Auguste *et al.*, 2022). Plus d'une quinzaine de taxons ont pu être identifiés : l'aurochs (espèce la mieux représentée), l'ours brun, le castor, la loutre, divers rongeurs, le chevreuil, le cheval, le rhinocéros de prairie, le cerf élaphe, le mégalocéros, le daim, plusieurs espèces de canards, le cygne, le grand échassier et la tortue. L'extraordinaire état de conservation du matériel fossile végétal (bois, macro-végétaux) mais aussi animal (mammifères,

mollusques, insectes) au sein des sédiments fluviaux du site de Waziers montre que celui-ci n'a subi qu'une altération très marginale, garantissant une exploitation optimale des compositions isotopiques enregistrées dans les dents des vertébrés.

La méthode de reconstitution des paléotempératures utilisée dans ce travail s'appuie (1) sur l'analyse isotopique du phosphate de l'émail dentaire de mammifères ainsi que (2) sur des équations de fractionnement isotopique pour certaines espèces de mammifères, disponibles dans la littérature. Parmi les restes fossiles en place sur la zone fouillée en 2014-2015, seules trois séries d'échantillons appartenant à trois espèces de mammifères satisfont ces deux conditions, dans l'ensemble des niveaux stratigraphiques. Ainsi, seuls trois ensembles de dents bien conservées ont pu être étudiés. Il s'agit d'un ensemble de cinq dents de cheval (*Equus sp.*) provenant d'un même individu dans le dépôt US4, d'une dent de mégalocéros (*Megaloceros giganteus*) en limite US4-US5a, et d'une dent de chevreuil (*Capreolus capreolus*) provenant du dépôt US5b (figs. 2 & 3). Sur le site, ces divers éléments sont distants de plusieurs mètres les uns des autres.

Ces grands herbivores ont des caractéristiques particulières :

- Les chevaux (*Equus sp.*) ont été présents sur de larges zones géographiques en Eurasie et en Amérique du nord au cours du Pléistocène. Les équidés sont adaptés aux environnements ouverts et froids de type toundras, steppes, taïgas, aussi bien qu'aux environnements tempérés de prairies, voire de forêt.

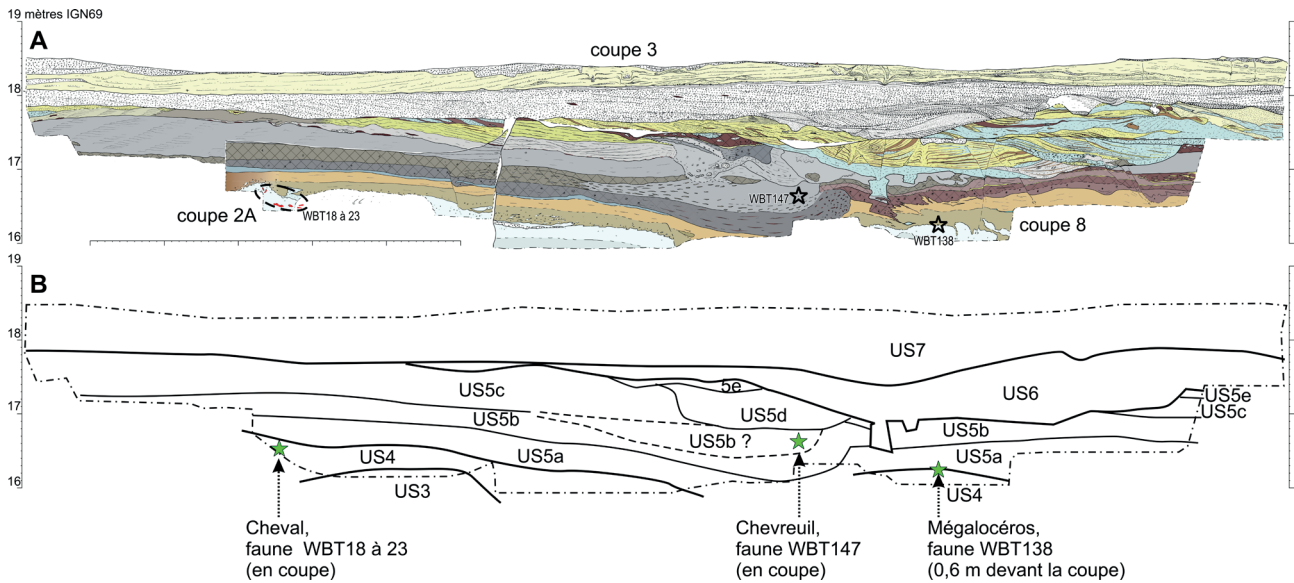
- Les mégalocéros (*Megaloceros giganteus* Blumenbach 1799), parfois appelés «Grands cerfs des tourbières», sont les plus grands cervidés connus et ont été présents sur une grande partie de l'Eurasie durant le Pléistocène. Ces cerfs géants vivaient en milieu ouvert, sec, et froid, de type toundra ou steppe, mais aussi dans des prairies, avant de s'éteindre il y a environ 11 000 ans.

- Les chevreuils (*Capreolus capreolus* Linné 1758) ont colonisé l'Europe et l'Asie au cours du Pléistocène. Ils vivent en milieu fermé, dans des forêts de feuillus ou de forêt mixtes (feuillus et conifères). Ils consomment les feuilles de nombreux arbres feuillus (ex. : chêne, charme, érable) et des graminées. Le chevreuil est une espèce considérée comme pionnière des climats tempérés interglaciaires.

#### 3.1.2 - Position stratigraphique précise et description

##### 3.1.2.1 - WBT19 et 22, cheval (*Equus sp.*), US4c-d

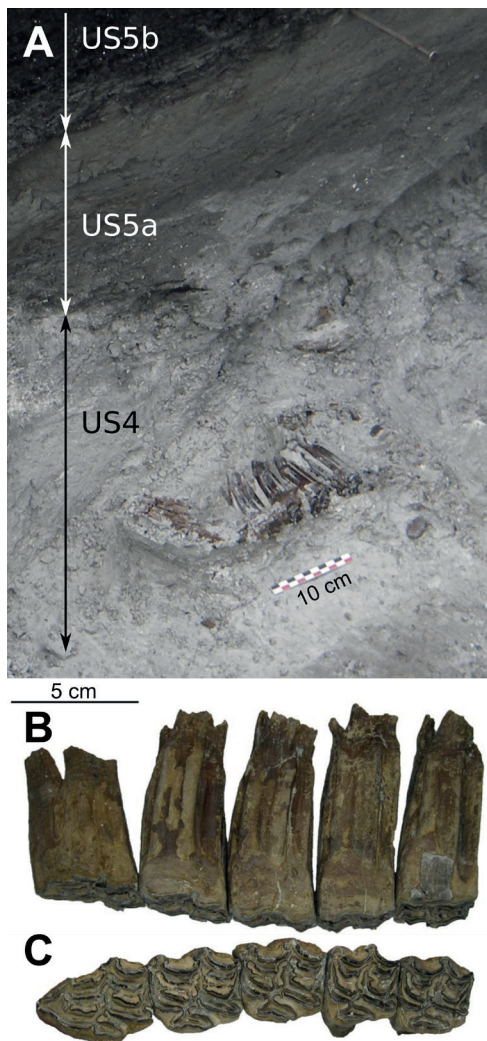
Les cinq dents du cheval (*Equus sp.*) sont des prémolaires et des molaires supérieures provenant du maxillaire d'un même individu, enregistrées sous les numéros WBT19 à WBT22 (figs. 4 & 5). Elles ont été découvertes en connexion anatomique et l'examen des facettes de contact, des stades d'usure et la cohérence de la géométrie de l'arcade dentaire confirment cette appartenance à un même individu (Auguste *et al.*, 2022).



**Fig. 3: Position du matériel analysé sur l'assemblage des coupes 2A, 3 et 8, de la fouille 2014-2015.**

(A) Coupe stratigraphique synthétique. Les dents analysées en  $\delta^{18}\text{O}$  dans cette étude sont indiquées par la zone pointillée correspondant aux restes WBT18 à WBT23 (cheval), l'étoile correspondant à la dent WBT138 (mégalocéros), et l'étoile correspondant à la dent WBT147 (chevreuil). (B) Coupe schématique des différentes unités stratigraphiques (US). Les étoiles vertes représentent les restes de cheval (de dents et de mandibule WBT18 à 23, dont les cinq dents analysées), la dent de mégalocéros (WBT138) et la dent de chevreuil (WBT147).

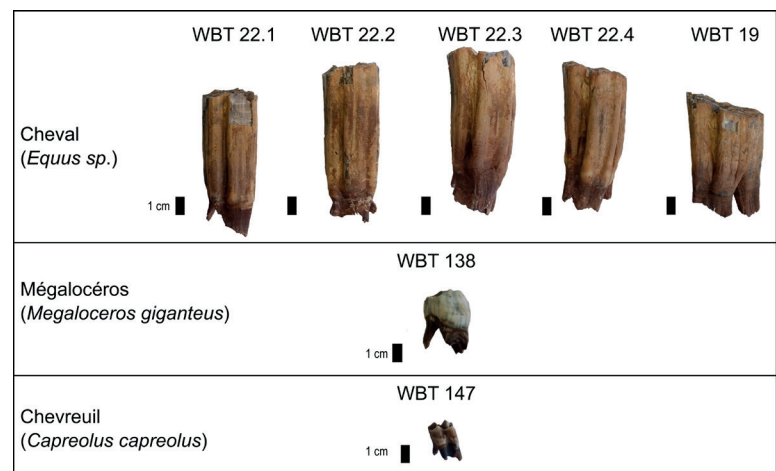
*Fig. 3: Position of the analysed material on the assemblage of sections 2A, 3 and 8, from the 2014-2015 excavation. (A) Synthetic stratigraphic section. The teeth analysed in  $\delta^{18}\text{O}$  in this study are indicated by the dotted area corresponding to remains of teeth and mandible WBT18 to WBT23 (horse), the star corresponding to tooth WBT138 (megaloceros), and the star corresponding to tooth WBT147 (roe deer). (B) Schematic section of the different stratigraphic units (US). The green stars represent the horse remains (WBT18 to 23, including the five analysed teeth), the megaloceros tooth (WBT138) and the roe deer tooth (WBT147).*



**Fig. 4: Os et dents du cheval WBT19 à WBT23.**

(A) Os et dents du cheval en place dans l'unité stratigraphique US4c-d de la coupe 2A de Waziers « Bas-Terroir ». La règle posée sous les fossiles mesure 10 cm au total (Locht *et al.*, 2014). (B) Vue vestibulaire et (C) vue occlusale de la série dentaire supérieure droite du cheval comprenant les trois prémolaires et les deux premières molaires (dents WBT19, 22.4, 22.3, 22.2 et 22.1, de gauche à droite) (photos N. Sévêque).

*Fig. 4: Horse bones and teeth of the horse in place in stratigraphic unit US4c-d of Waziers section 2A 'Bas-Terroir'. The ruler placed under the fossils measures 10 cm (Locht *et al.*, 2014). (B) Vestibular view and (C) occlusal view of the upper right dental series of the horse including the three premolars and the first two molars (teeth WBT19, 22.4, 22.3, 22.2 and 22.1, from left to right) (photos N. Sévêque).*



**Fig. 5: Photographies des dents de cheval (*Equus sp.*) WBT22.1, WBT22.2, WBT22.3, WBT22.4 et WBT19, de la dent de mégalocéros (*Megaloceros giganteus*) WBT138, et de la dent de chevreuil (*Capreolus capreolus*) WBT147.**

Les vues correspondent à la face linguale. Barres noires verticales: 1 cm.

*Fig. 5: Photos of horse (*Equus sp.*) teeth WBT22.1, WBT22.2, WBT22.3, WBT22.4 and WBT19, megaloceros (*Megaloceros giganteus*) tooth WBT138, and roe deer (*Capreolus capreolus*) tooth WBT147. The views correspond to the lingual side. Black vertical bars: 1 cm.*

Les pièces ont été observées dans la coupe 2A avec une dispersion modérée au sommet de l'US4. Outre des pièces en connexion anatomique (fig. 5), les fragments récoltés ont une dispersion horizontale maximum de 61 cm et verticale de 22 cm (fig. 4). Après la fouille, le recul de la coupe a donné lieu à un nouveau levé utilisé dans l'assemblage des coupes et la synthèse stratigraphique (Deschodt *et al.*, 2022). À cet endroit, l'unité est moins développée qu'au sud-est de l'emprise où ont été définies les sous-unités US4a à US4e. Cependant, les dents sont localisées vers le haut de l'unité US4, à proximité de l'US5 et au-dessus d'une unité un peu plus sombre (coupe 2B, unité de détail «ud»136) qui de proche en proche (coupe 8, «ud»1) peut être corrélée avec la zone de passage plus sombre du log 6 («ud»251) où a été définie l'US4b. Les dents étudiées sont donc postérieures et appartiennent à l'US4c ou à l'US4d.

Les dents WBT22.1 et WBT22.2 sont des molaires supérieures droites M1 et M2. Les dents WBT19, WBT22.3 et WBT22.4 sont des prémolaires supérieures droites P2, P3 et P4, respectivement. Les chevaux ont des dents hypsodontes, avec un taux de croissance dentaire d'environ 4 cm/an (Hoppe *et al.*, 2004).

#### 3.1.2.2 - WBT138, Mégalocéros (*Megaloceros giganteus*), US4-US5a

La dent de mégalocéros (*Megaloceros giganteus*), WBT138, est localisée en limite US4-US5a (pour la projection de la dent sur un levé détaillé, voir fig. 7 Deschodt *et al.*, 2022). C'est une troisième prémolaire supérieure droite (fig. 5). Cette espèce éteinte de grand cervidé possède des dents brachyodontes.

#### 3.1.2.3 - WBT147, Chevreuil (*Capreolus capreolus*), US5b

La dernière dent, WBT147, provient d'un limon alluvial clastique (unité de détail «ud» 11) qui remanie une partie de la tourbe US5b. L'«ud» 11 est distincte toutefois des unités limoneuses US5c ou US5d et est intégrée à l'unité de synthèse US5b (pour la position exacte de la dent sur un levé détaillé, voir fig. 7 Deschodt *et al.*, 2022). WBT147 est une troisième molaire supérieure droite de chevreuil (*Capreolus capreolus*) (fig. 5). La dentition du chevreuil est également brachyodonte. La dent est peu usée, ce qui indique que l'individu était jeune au moment de son décès.

### 3.2 - DATATION DU MATÉRIEL FOSSILE

Des datations par ESR-U/Th ont été réalisées sur les dents de cheval et de mégalocéros analysées dans cette étude. Les dents du cheval WBT20 du dépôt US4c-d (WBT19, WBT22.1 et WBT22.2) donnent un âge moyen de  $128 \pm 20$  ka ( $\pm 2\sigma$ ), tandis que la dent de mégalocéros (WBT138), à la limite US4-US5a, un âge moyen de  $132 \pm 8$  ka ( $\pm 2\sigma$ ) (Bahain *et al.*, 2022). Ces deux résultats sont cohérents. Notons qu'ils sont en accord avec un âge U/Th *minimal* de  $103 \pm 3,5$  ka obtenu sur des oogones de Characée provenant des niveaux tuffacés de l'unité 14 sous-jacente à la tourbe dans le puisard 2013 (Deschodt *et al.*, 2022; Bahain *et al.*, 2022b). Les résultats sur les dents de cheval confirment que la

séquence représentée par les unités US4 et US5 s'est bien mise en place au cours d'une phase comprenant la dernière période interglaciaire. Ils montrent également que la déglaciation précédente a pu être enregistrée dans les faciès limoneux formant la transition entre la nappe alluviale grossière et la base des tourbes, en accord avec les données stratigraphiques, malacologiques, palynologiques, et fauniques.

## 4 - MÉTHODES

### 4.1 - PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS ET ANALYSES PAR SPECTROMÉTRIE DE MASSE

Les échantillons de dents ont été nettoyés mécaniquement, lavés à l'eau distillée, puis placés dans une cuve à ultrason afin d'éliminer les traces possibles de sédiment, enfin séchés à l'étuve. Environ 20 mg de poudre d'émail ont été collectés à l'aide d'une microforeuse ©Dremel équipée d'une pointe diamantée. L'émail a été prélevé parallèlement à l'axe de croissance de la dent, de l'apex au cervix. Pour chaque dent, une analyse a été réalisée.

Les poudres d'émail ont été traitées chimiquement dans le but d'analyser les isotopes de l'oxygène du groupement phosphate, selon le protocole de Crowson *et al.* (1991) modifié par Lécuyer *et al.* (1993). La préparation chimique des échantillons ainsi que du matériel de référence NBS ont été réalisées au LGL-TPE à l'Université Claude Bernard Lyon 1.

Les analyses isotopiques  $\delta^{18}\text{O}$  des échantillons ont été réalisées sur la Plateforme d'Ecologie Isotopique du LEHNA (membre du réseau RéGEF) à l'Université Claude Bernard Lyon 1 par un analyseur élémentaire de type varioPYROcube (Elementar GmbH). Cet analyseur élémentaire, qui fonctionne en mode «purge and trap», est couplé en ligne et en flux continu à un spectromètre de masse isotopique (Elementar Isoprime<sup>TM</sup>; EA-PY-CF-IRMS) selon la technique décrite par Fourel *et al.* (2011). À haute température (1450°C, obtenue dans un four vitrifié), le carbone du réacteur réagit avec le phosphate d'argent pour former du monoxyde de carbone (CO). Ce gaz est ensuite introduit par un flux continu d'hélium dans la source du spectromètre de masse isotopique pour déterminer le rapport  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ . Une calibration est effectuée par rapport aux standards NBS120c ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}} = 21,7 \pm 0,14$  ‰) et NBS127 ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}} = 9,3 \pm 0,40$  ‰). Les valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  sont normalisées au V-SMOW. Les statistiques sur les mesures répliquées des échantillons et du standard NBS120c fournissent une incertitude analytique globale sur le  $\delta^{18}\text{O}$  de  $\pm 0,25\%$ .

### 4.2 - RELATION ENTRE LE $\delta^{18}\text{O}$ DES PHOSPHATES DENTAIRE ET LE $\delta^{18}\text{O}$ DE L'EAU DE L'ENVIRONNEMENT

De nombreux travaux, s'inspirant de ceux de Longinelli (1984), ont montré qu'il existe des relations étroites entre la composition isotopique de l'oxygène



de l'émail dentaire de mammifères et la composition isotopique de l'oxygène de l'eau de l'environnement de ces mammifères. Ces relations expriment que le  $\delta^{18}\text{O}$  de l'eau de l'environnement, dont l'origine sont les eaux météoriques (pluie, neige), contrôle principalement le  $\delta^{18}\text{O}$  de l'eau consommée par les vertébrés, qui lui-même se reflète dans le  $\delta^{18}\text{O}$  du phosphate de leur émail dentaire ( $\delta^{18}\text{O}_p$ ), avec un fractionnement isotopique dépendant de la physiologie et de l'écologie des animaux. Ces effets écophysiologiques sont intégrés dans les équations (Longinelli, 1984; Luz & Kolodny, 1985; Kohn *et al.*, 1996; Langlois *et al.*, 2003). Ces équations ont été établies à partir de mesures du  $\delta^{18}\text{O}$  du phosphate osseux ou dentaire réalisées sur plusieurs individus d'une même espèce, et parfois sur plusieurs individus d'espèces différentes, vivant actuellement dans différentes régions sous des conditions climatiques et environnementales variées. Des couples de valeurs (i) composition isotopique de l'oxygène du phosphate dentaire d'un individu actuel et (ii) composition isotopique moyenne de l'oxygène de l'eau de l'environnement local actuel de cet individu (mesures directes sur le terrain - précipitations, etc. - ou valeurs extraites de bases de données référencées, telle que la base GNIP de l'IAEA; IAEA/WMO, 2021) ont été établis. L'ensemble de ces couples de valeurs a ainsi permis de déterminer une équation empirique. En faisant l'hypothèse que ces relations sont extrapolables dans le passé, le  $\delta^{18}\text{O}_p$  des phosphates dentaires permet donc de déterminer le  $\delta^{18}\text{O}_w$  des eaux météoriques au temps de vie de l'animal. Cette méthode, en dépit des limites qu'elle peut présenter (Lécuyer *et al.*, 2021), se révèle particulièrement intéressante pour la reconstruction des paléoclimats.

Les équations utilisées dans ce travail ont été établies à partir de données disponibles dans la littérature en utilisant la méthode «transposed fit» décrite dans Pryor *et al.* (2014) et Skrzypek *et al.* (2016). Ce sont les suivantes :

- Pour le cheval (*Equus sp.*):

$$\delta^{18}\text{O}_w = 1,08(\pm 0,13) \cdot \delta^{18}\text{O}_p - 25,82(\pm 2,42) \quad (n = 23; R^2 = 0,77) \quad (1)$$

Cette équation a été établie par compilation des données de Bryant *et al.* (1994), Sanchez Chillon *et al.* (1994), Delgado Huertas *et al.* (1995) sur *Equus caballus*, *E. burchelli*, *E. asinus*, *E. zebra*, *E. przewalskii*. Notons que comme dans Delgado Huertas *et al.* (1995) deux valeurs aberrantes ont été extraites de la base des données originales de Bryant *et al.* (1994). Naturellement nous obtenons une équation différente de l'équation (8) de Delgado Huertas *et al.* (1995) car nous cherchons une relation  $\delta^{18}\text{O}_w$  vs  $\delta^{18}\text{O}_p$ .

- Pour le mégalocéros (*Megaloceros giganteus*):

L'espèce du «Grand cerf des tourbières» étant une espèce éteinte de cervidés, nous avons utilisé par convention et homologie de forme le cerf élaphe (*Cervus elaphus*). La reprise des données D'Angela et Longinelli (1990) permet d'établir (Lécuyer *et al.*, 2021):

$$\delta^{18}\text{O}_w = 0,88(\pm 0,03) \cdot \delta^{18}\text{O}_p - 22,50(\pm 0,52) \quad (n = 7; R^2 = 0,99) \quad (2)$$

- Pour le chevreuil (*Capreolus capreolus*):

$$\delta^{18}\text{O}_w = 1,12(\pm 0,04) \cdot \delta^{18}\text{O}_p - 27,08(\pm 0,73) \\ (n = 14; R^2 = 0,98) \quad (3)$$

Cette équation a été obtenue à partir des données de Delgado Huertas *et al.* (1995) sur *Capreolus capreolus*, *Capra ibex*, *Capra sp.*, *Ovis ammon musimon*.

#### 4.3 - RELATION ENTRE LE $\delta^{18}\text{O}$ DE L'EAU DE L'ENVIRONNEMENT ET LA TEMPÉRATURE MOYENNE ANNUELLE DE L'AIR

La température moyenne annuelle de l'air ( $T_{\text{air}}$ , en °C) est calculée, par la suite, grâce à la relation linéaire empirique établie entre le  $\delta^{18}\text{O}_w$  de l'eau météorique et la température de l'air, en Europe, à l'époque moderne (Skrzypek *et al.*, 2011):

$$T_{\text{air}} (\text{°C}) = 1,41(\pm 0,02) \cdot \delta^{18}\text{O}_w + 21,63(\pm 0,22) \\ (n = 13347; R^2 = 0,70) \quad (4)$$

Pour le site de Waziers, proche du littoral et en zone de plaine, les masses d'air humides ne sont pas affectées par des effets de fractionnement de Rayleigh continentaux ou altitudinaux. Nous faisons l'hypothèse que cette relation, déterminée pour les temps modernes, s'applique à la période étudiée, comme cela a été discuté dans des travaux analogues (e.g. Lécuyer *et al.*, 2021).

Avant d'utiliser la relation entre le  $\delta^{18}\text{O}_w$  de l'eau météorique et la température moyenne annuelle de l'air (équation (4)), établie pour la période actuelle, le  $\delta^{18}\text{O}_w$  de l'eau météorique locale reconstitué à partir du  $\delta^{18}\text{O}_p$  de l'émail dentaire des échantillons doit être corrigé de la signature isotopique de la source des précipitations à l'époque du dépôt de chaque série d'échantillons. En effet, toute variation de composition isotopique de cette source par rapport à l'actuel se répercute dans le cycle de l'eau. À Waziers, la source des eaux météoriques est l'eau de surface de l'océan Atlantique nord-est. Or, entre les climats glaciaires et interglaciaires, la composition isotopique en oxygène de l'océan global évolue suite à la croissance puis à la fonte des calottes de glace sur les continents nord-américain et eurasiens, et secondairement antarctique. Dans le cadre d'une transition glaciaire/interglaciaire, nous cherchons donc à évaluer la variation du  $\delta^{18}\text{O}$  moyen de l'eau océanique résultant de la présence de ces calottes de glace aux époques échantillonnées, par rapport à l'actuel. Cette évaluation est basée sur la variation du niveau marin par rapport à l'époque moderne, pour chacune des trois époques où l'échantillonnage a été réalisé. Il nous faut donc estimer ces variations.

Dans un premier temps, nous évaluons ainsi la baisse relative du niveau marin contemporaine des trois époques successives relatives à l'unité US4c-d, puis à la limite US4-US5a, enfin à l'unité US5b. À la période glaciaire du SIM 6.2 (non échantillonnée ici), l'abaissement du niveau marin relativement à l'époque moderne était compris entre 120 et 130 m (Waelbroeck *et al.*, 2002), de l'ordre de grandeur de celui du SIM 2 (Waelbroeck *et al.*,

2002 ; Lisiecki & Raymo, 2005 ; Lambeck *et al.*, 2014). Le dépôt US4c-d étudié ici correspond, nous l'avons vu, à un début d'époque tardiglaciaire succédant à la glaciation du SIM 6.2, la limite US4-US5a à une époque tardiglaciaire intermédiaire, enfin le dépôt US5b à une époque tardiglaciaire avancée, précédant l'établissement du SIM 5.5. Par conséquent, pour le dépôt US4c-d (dents de cheval), qui a eu lieu après le maximum glaciaire SIM 6.2, nous estimons l'abaissement du niveau marin de l'ordre de  $110 \pm 10$  m : il est en effet inférieur à 120-130 m car la déglaciation a déjà débuté. Par ailleurs, au commencement de l'interglaciaire actuel, soit l'Holocène (SIM 1), le niveau marin était situé à une cinquantaine de mètres sous le niveau actuel suite à la dynamique de fonte des calottes glaciaires (Jouzel *et al.*, 2007 ; Lambeck *et al.*, 2014). Nous faisons l'hypothèse d'un décalage comparable lors de l'établissement de l'interglaciaire précédent, le SIM 5.5 (Maréchal *et al.*, 2020). Compte tenu de cet élément, nous évaluons l'abaissement du niveau marin lors du dépôt US5b (dent de chevreuil), qui est antérieur à l'interglaciaire SIM 5.5, de l'ordre de  $60 \pm 10$  m. Enfin, nous estimons la baisse du niveau marin pour la limite US4-US5a (dent de mégalocéros), qui est un niveau médian, de l'ordre de  $90 \pm 10$  m.

Dans un second temps, la variation de composition isotopique en oxygène de l'océan global par rapport à l'actuel est estimée pour chacune des trois périodes étudiées. Au préalable, nous nous focalisons sur l'avant-dernier maximum glaciaire, le SIM 6.2 (non échantillonné ici), et son analogue, le dernier maximum glaciaire, le SIM 2. Connaissant, au SIM 2, (i) le  $\delta^{18}\text{O}$  moyen de la calotte fennoscandienne et de la calotte nord-américaine (Hillaire-Marcel & Causse, 1989 ; Duplessy *et al.*, 2002 ; Sima *et al.*, 2006), de la calotte groenlandaise (GRIP et North Greenland Ice Sheet Project Members, 2004), de la calotte antarctique (Landais *et al.*, 2008 ; Dome Fuji Ice Core Project Members, 2017), (ii) la contribution relative des différentes calottes à l'abaissement marin (Simms *et al.*, 2019), (iii) la profondeur moyenne de l'océan (Charette & Smith, 2010), et (iv) l'abaissement moyen de l'océan par rapport au niveau actuel (Waelbroeck *et al.*, 2002 ; Lambeck *et al.*, 2014), nous déduisons que le  $\delta^{18}\text{O}$  moyen de l'océan global a augmenté d'environ  $+1,2\%$  au SIM 2 par rapport à l'interglaciaire actuel. Cette valeur est en accord avec celle proposée par Fairbanks (1989) ( $+1,3\%$ ), Duplessy *et al.* (2002) ( $+1,05 \pm 0,20\%$ ) et Waelbroeck *et al.* (2002) ( $+1,00$  à  $+1,05\%$ ) pour l'océan global. Elle est un peu plus élevée que celle donnée pour l'Atlantique nord au SIM 2 par Schrag *et al.* (2002) ( $+0,7\%$  à  $+0,8\%$ ). Pour l'avant-dernier maximum glaciaire, le SIM 6.2, un  $\delta^{18}\text{O}$  moyen de l'océan global proche de  $+1,05\%$  est donné par Waelbroeck *et al.* (2002). Ces résultats sont cohérents entre eux. Nous prendrons ici une valeur moyenne de  $+1,00 \pm 0,20\%$  au SIM 6.2, lorsque le niveau marin était d'environ  $\approx 125 \pm 5$  m plus bas que l'actuel. Compte tenu de l'abaissement marin de  $\approx 110 \pm 10$  m lors du dépôt US4c-d (dents de cheval), de  $\approx 90 \pm 10$  m au moment de la limite US4-US5a (dent de mégalocéros), et de  $\approx 60 \pm 10$  m lors du dépôt US5b (dent de chevreuil), nous déduisons que la source océanique

des eaux météoriques à Waziers était de  $+0,88 \pm 0,25\%$ ,  $+0,72 \pm 0,25\%$ , et  $+0,48 \pm 0,25\%$  plus élevée que l'époque moderne, respectivement. Par conséquent, ces valeurs sont retranchées au  $\delta^{18}\text{O}_w$  de l'eau météorique locale reconstitué pour chaque échantillon, au préalable de l'application de l'équation (4) qui permet d'établir la température de l'air.

#### 4.4 - ESTIMATION DE L'INCERTITUDE TOTALE SUR LA TEMPÉRATURE

Il existe différentes sources d'incertitudes associées au calcul des paléotempératures moyennes annuelles de l'air. Des analyses de ces incertitudes sont disponibles dans Pryor *et al.* (2014) et Skrzypek *et al.* (2016). La méthode que nous avons employée est en accord avec les recommandations de ce dernier auteur. La reproductibilité externe du  $\delta^{18}\text{O}_p$  mesuré dans les phosphates d'email dentaire ( $\pm 0,25\%$ ) produit une erreur moyenne sur le  $\delta^{18}\text{O}_w$  de  $\pm 0,26\%$  ( $\sigma_{w/p}$ ) (voir équations (1) à (3)). L'erreur moyenne sur la composition isotopique de la source océanique des eaux météoriques à Waziers pour les différentes époques étudiées est, d'autre part, de  $\pm 0,25\%$  ( $\sigma_{oc}$ ) (voir section 4.3).

Considérons maintenant l'incertitude  $\sigma_{w/p\ eq}$  associée aux régressions linéaires des données empiriques ( $y = mx + b$ ), qui établissent les relations entre le  $\delta^{18}\text{O}_p$  des phosphates dentaires des mammifères et le  $\delta^{18}\text{O}_w$  des eaux météoriques au temps de vie de l'animal (équations (1), (2) et (3)). L'incertitude n'est pas disponible dans les publications originales. Nous utilisons les fonctions «lm()» (régression linéaire) et «pred()» (utilisation des résultats de la régression) du langage R (Chambers & Hastie, 1992) et obtenons  $\pm 0,75\%$  pour l'incertitude associée à l'équation pour le cheval (Eq. (1)),  $\pm 0,07\%$  pour l'incertitude associée à l'équation pour le mégalocéros (Eq. (2)), et  $\pm 0,13\%$  pour l'incertitude associée à l'équation pour le chevreuil (Eq. (3)).

Par conséquent, l'erreur sur le  $\delta^{18}\text{O}_w$  reconstitué après correction de la source océanique,  $\sigma_{w\ corr}$ , est de  $\pm 0,83\%$  pour les données du cheval, de  $\pm 0,37\%$  pour les données du mégalocéros, et de  $\pm 0,38\%$  pour les données du chevreuil. Elle est calculée comme suit :

$$\sigma_{w\ corr} = \sqrt{(\sigma_{w/p})^2 + (\sigma_{oc})^2 + (\sigma_{w/p\ eq})^2} = \sqrt{(0,26)^2 + (0,25)^2 + (\sigma_{w/p\ eq})^2} \quad (5)$$

Ces erreurs donnent une incertitude  $\sigma_T$  de  $\pm 1,2^\circ\text{C}$  pour les températures reconstituées du cheval, et de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  pour les températures reconstituées du mégalocéros et du chevreuil, d'après l'équation (4).

Enfin, nous considérons l'incertitude  $\sigma_{T/w\ eq}$  associée à la régression linéaire des données empiriques ( $y = mx + b$ ), qui établit la relation entre le  $\delta^{18}\text{O}_w$  de l'eau météorique et la température de l'air en Europe (équation (4)). L'incertitude n'est pas disponible dans la publication originale. De la même manière que précédemment, nous utilisons les fonctions «lm()» et «pred()» du langage R (Chambers & Hastie, 1992) et obtenons  $\pm 0,06^\circ\text{C}$  (Eq. (4)). Cette incertitude est négligeable par rapport à  $\sigma_T$  et la valeur de l'incertitude totale est égale à  $\sigma_T$ .

## 5 - RÉSULTATS

### 5.1 - RÉSULTATS $\delta^{18}\text{O}$ DES DENTS DE GRANDS MAMMIFÈRES

Le  $\delta^{18}\text{O}_p$  des dents de cheval, de mégalocéros et de chevreuil varient de  $13,20 \pm 0,25 \text{ ‰}$  à  $16,36 \pm 0,25 \text{ ‰}$  (tab. 1). Les cinq dents de cheval analysées ont des valeurs isotopiques remarquablement proches les unes et des autres, et fournissent une moyenne de  $13,61 \pm 0,43 \text{ ‰}$  ( $1\sigma$ ). Ce résultat est cohérent puisqu'il s'agit d'un seul et même individu. L'incertitude sur la moyenne ( $\pm 0,43 \text{ ‰}$ ) est faible, ce qui montre la robustesse des résultats et de la méthode. De manière similaire, nous faisons l'hypothèse que l'analyse du  $\delta^{18}\text{O}_p$  de la dent de mégalocéros d'une part, de la dent de chevreuil d'autre part, donne une bonne estimation de la valeur moyenne du signal des dents de chaque individu. La dent de mégalocéros (limite US4-US5a), située dans une unité stratigraphique reposant sur celle ayant livré les dents de cheval (US4c-d), donne une valeur de  $14,53 \pm 0,25\text{‰}$ . Enfin, la dent de chevreuil (US5b), dans une unité stratigraphique supérieure à celle du mégalocéros, donne une valeur de  $16,36 \pm 0,25\text{‰}$ . On observe donc une augmentation progressive des valeurs du  $\delta^{18}\text{O}_p$  des dents échantillonnées entre ces unités stratigraphiques successives.

### 5.2 - RECONSTITUTION DES PALÉOTEMPÉRATURES

Les températures moyennes reconstituées varient entre  $4,1 \pm 1,2 \text{ °C}$  et  $8,6 \pm 0,5 \text{ °C}$  (tab. 1). Rappelons que les résultats présentés ici sont obtenus par un nombre limité d'échantillons, qui sont aujourd'hui les seuls disponibles pour le site de Waziers avec la méthode utilisée.

La moyenne des températures des cinq dents du cheval, comprises entre  $4,1 \pm 1,2 \text{ °C}$  et  $5,5 \pm 1,2 \text{ °C}$ , est de  $4,7 \pm 0,6 \text{ °C}$  ( $1\sigma$ ). Les dents de cheval, hypsodontes,

se forment sur une période de temps comprise entre  $\approx 1,5$  et 2,8 ans selon le type de dent (Hoppe *et al.*, 2004). La température reconstituée pour chaque dent est donc proche de la température moyenne annuelle. La faible dispersion de l'ensemble des températures obtenues à partir de chacune des cinq dents du cheval conforte cette analyse. Ainsi la valeur de  $4,7 \pm 0,6 \text{ °C}$  représente une moyenne annuelle. Cette température moyenne annuelle de l'air correspond stratigraphiquement au dépôt US4c-d, qui marque la première phase mise en place après le début de la déglaciation. Un analogue actuel au climat de Waziers du vivant du cheval étudié est, par exemple, celui de Magerholm en Norvège, à  $62^{\circ}27'0''\text{N}$ ,  $6^{\circ}30'0''\text{E}$ : la température moyenne annuelle est de  $4,8 \text{ °C}$  pour la période 1999-2019 (Climate-data.org). La température reconstituée par la dent de mégalocéros est de  $6,9 \pm 0,5 \text{ °C}$ . L'échantillon provient de la limite US4-US5a: il est postérieur au dépôt US4c-d, et antérieur au dépôt US5b dans lequel est située la dent de chevreuil. La température associée à cette dernière dent est de  $8,6 \pm 0,5 \text{ °C}$ .

Le mégalocéros et le chevreuil, dont les dents étudiées ici sont respectivement une prémolaire et une molaire, ont des dents brachyodontes. Les données de la littérature relatives au cerf élaphe, qui possède également des dents brachyodontes, et qui est un bon homologue actuel au mégalocéros (espèce éteinte de cervidés), indiquent que la croissance des dents se déroule sur une période intégrant les deux saisons extrêmes (Stevens *et al.*, 2011) et couvre souvent un cycle annuel (Fricke *et al.*, 1998). Les prémolaires, notamment, ont une période de croissance qui s'étend entre 11 et 19 mois, voir jusqu'à 30 mois (Ecker *et al.*, 2013). Ainsi, l'analyse isotopique d'une dent entière conduit à l'obtention d'une valeur proche de la température moyenne annuelle de l'air. C'est ce que confirment les travaux de Fabre *et al.* (2010) qui obtiennent des valeurs de températures annuelles

Échantillon	Taxon	Unité stratigraphique (US) ou limite stratigraphique	$\delta^{18}\text{O}_p$ (‰) mesuré	$\delta^{18}\text{O}_w$ (‰) calculé, corrigé de la source des eaux météoriques	$T_{\text{air}}$ (°C)	SD (°C)
WBT 147	<i>Capreolus capreolus</i>	US5b	16.36	-9.24	8,6	$\pm 0,5$
WBT 138	<i>Megaloceros giganteus</i>	Limite US4-US5a	14.53	-10.43	6,9	$\pm 0,5$
WBT 19	<i>Equus sp.</i>	US4c-d	13.20	-12.44	4,1	$\pm 1,2$
WBT 22.1	<i>Equus sp.</i>	US4c-d	13.32	-12.31	4,3	$\pm 1,2$
WBT 22.2	<i>Equus sp.</i>	US4c-d	14.01	-11.57	5,3	$\pm 1,2$
WBT 22.3	<i>Equus sp.</i>	US4c-d	14.13	-11.44	5,5	$\pm 1,2$
WBT 22.4	<i>Equus sp.</i>	US4c-d	13.40	-12.23	4,4	$\pm 1,2$

**Tab. 1 :**  $\delta^{18}\text{O}_p$  (‰) mesurés et températures moyennes annuelles reconstituées ( $T_{\text{air}}$ , °C) au site de Waziers pour les différents échantillons de dents de grands mammifères.

Les paléotempératures sont estimées d'après les valeurs  $\delta^{18}\text{O}$  (‰) mesurées dans le phosphate de l'émail dentaire de grands mammifères herbivores au site de Waziers: le cheval (*Equus sp.*), le mégalocéros (*Megaloceros giganteus*), et le chevreuil (*Capreolus capreolus*). L'incertitude analytique sur le  $\delta^{18}\text{O}$  est de  $\pm 0,25 \text{ ‰}$ ; l'incertitude calculée sur les paléotempératures est indiquée dans la dernière colonne (Déviation Standard, SD (°C)). Les unités stratigraphiques (US) dans lesquelles ont été retrouvés les fossiles sont indiquées dans le tableau. Les  $\delta^{18}\text{O}_w$  (‰) des eaux météoriques au temps de vie de l'animal ont été calculés d'après les équations disponibles dans la littérature et sont exprimés ici corrigés de la source océanique des eaux météoriques à Waziers (voir texte).

*Tab. 1 : Measured  $\delta^{18}\text{O}_p$  (‰) and reconstructed mean annual temperatures ( $T_{\text{air}}$ , °C) at the Waziers site for the different large mammal tooth samples. Paleotemperatures are estimated from  $\delta^{18}\text{O}$  (‰) values measured in tooth enamel phosphate of large herbivorous mammals at the Waziers site: horse (*Equus sp.*), megaloceros (*Megaloceros giganteus*), and roe deer (*Capreolus capreolus*). The analytical uncertainty on  $\delta^{18}\text{O}$  is  $\pm 0,25 \text{ ‰}$ ; the uncertainty calculated on the paleotemperatures is indicated in the last column (Standard Deviation, SD (°C)). The stratigraphic units (US) in which the fossils were found are indicated in the table. The  $\delta^{18}\text{O}_w$  (‰) of meteoric water at the time of the animal's life were calculated from equations available in the literature and are expressed here corrected for the oceanic source of meteoric water at Waziers (see text).*



comparables en travaillant sur l'émail des dents de cheval et de cerf élaphe fossiles, sur une époque allant de 145 ka à 33 ka. Nous assimilerons donc la température moyenne obtenue à partir de la dent du mégalocéros à une valeur moyenne annuelle. Pour le chevreuil, dont l'éruption des molaires a lieu au cours de la première année (Tomé et Vignes, 2003; Ecker *et al.*, 2013), la certitude n'est pas acquise que toutes les saisons soient enregistrées par l'émail dentaire de la dent étudiée ici. Nous ferons néanmoins l'hypothèse que l'enregistrement de la molaire étudiée inclut les deux saisons extrêmes et que la température obtenue est proche de la température moyenne annuelle de l'air.

## 6 - DISCUSSION

### 6.1 - CHRONOLOGIE ET ENVIRONNEMENT DES DÉPÔTS ÉTUDIÉS

Les datations par ESR-U/Th, qui donnent des âges de  $128 \pm 20$  ka pour les dents de cheval du dépôt US4c-d et  $132 \pm 8$  ka pour la dent de mégalocéros à la limite US4-US5a (Bahain *et al.*, 2022), sont cohérentes avec la stratigraphie et les données paléoenvironnementales, compte tenu de leur précision. La stratigraphie, établie de façon particulièrement fine sur l'ensemble du gisement, montre en effet que les dépôts étudiés n'ont pas été perturbés par des inversions de couches et qu'ils se situent dans une succession stratigraphique normale. D'autre part, le dépôt US4c-d, la limite US4-US5a, et le dépôt US5b, sont situés stratigraphiquement sous le dépôt US5e des limons bruns et de la tourbe supérieure (dite tourbe «à castors»), attribué à l'interglaciaire SIM 5.5 (Eemien). Ces résultats indiquent que les niveaux comprenant le matériel étudié (US4c-d, limite US4-US5a, et US5b) se sont mis en place au cours de la transition entre la glaciation SIM 6.2 et l'interglaciaire SIM 5.5.

Les données malacologiques (Limondin-Louzouet, 2022) et palynologiques (Gauthier, 2022) sont cohérentes avec les reconstitutions de température de chacun des trois niveaux stratigraphiques étudiés ici, ainsi qu'avec les âges estimés par ESR-U/Th (Bahain *et al.*, 2022). Les trois séries d'échantillons étudiés correspondent successivement :

(i) à un climat rigoureux, frais et sec, lors de la première phase de déglaciation (couverture végétale ouverte clairsemée de type tundra-steppe, palynozone Waz-2; dépôt US4c-d) (échantillons de dents de cheval; température reconstituée de  $4,7 \pm 0,6$  °C),

(ii) à un climat rigoureux devenant un peu plus tempéré et moins sec (couverture végétale ouverte plus dense avec une disparition de la tundra et l'essor d'une prairie steppique plus ou moins arbustive, passage de la palynozone Waz-2 à Waz-3; limite des dépôts US4-US5a) (échantillon de dent de mégalocéros; température reconstituée de  $6,9 \pm 0,5$  °C),

(iii) enfin à un climat moins rigoureux mais toujours frais (couverture végétale ouverte avec une évolution vers des prairies à hautes graminées et une quasi disparition des herbacées steppiques, présence de bosquets d'arbres pionniers, palynozone Waz-4; dépôt US5b) (échantillon de dent de chevreuil; température reconstituée de  $8,6 \pm 0,5$  °C).

Au final, les périodes échantillonnées succèdent à la période glaciaire du SIM 6.2 et précèdent la période interglaciaire du SIM 5.5 (en particulier l'optimum thermique de cette période).

D'autre part, les trois espèces échantillonnées pour ce travail évoluent dans des milieux différents, qui sont compatibles avec les reconstitutions des paléotempératures. Le cheval occupe principalement les milieux ouverts. Cette espèce s'est largement développée aux moyennes latitudes durant les périodes glaciaires où régnaient les milieux ouverts. Le mégalocéros est caractéristique également des milieux ouverts des climats glaciaires, mais aussi interglaciaires. Le chevreuil, quant à lui, est une espèce caractéristique des milieux fermés à semi-fermés. Il possède une certaine plasticité adaptative lui permettant de jouer le rôle d'espèce pionnière au début des interglaciaires sans que le couvert végétal soit très développé. Notons que des restes de rhinocéros des prairies (*Stephanorhinus hemitoechus*) ont été trouvés dans le même dépôt que le chevreuil (unité US5b, voir Auguste *et al.*, 2022) : la présence de cette espèce, au côté du chevreuil, confirme que le milieu était plutôt semi-fermé.

La succession stratigraphique des dépôts étudiés, les conditions climatiques déduites par les séries polliniques de ces dépôts, enfin les habitats caractéristiques des espèces étudiées dans ces dépôts sont cohérents entre eux, ainsi qu'avec les paléotempératures reconstituées ici par analyse isotopique. La période étudiée comprend le début de la déglaciation puis son développement progressif au cours de la Terminaison SIM 6/5, avant l'entrée en période interglaciaire SIM 5.5.

### 6.2 - PALÉOTEMPÉRATURES DE LA TRANSITION GLACIAIRE/INTERGLACIAIRE SIM 6/5

Les résultats de cette étude montrent une augmentation progressive des températures moyennes annuelles, de  $4,7 \pm 0,6$  °C, à  $6,9 \pm 0,5$  °C, puis à  $8,6 \pm 0,5$  °C, durant les trois phases qui se succèdent au cours de la déglaciation SIM 6/5 (figs. 6 & 7). Situons ces données par rapport aux paléotempératures estimées dans la littérature.

Les reconstitutions des températures glaciaires en Europe de l'ouest concernent principalement le dernier maximum glaciaire (SIM 2,  $\approx 23$  à  $\approx 19$  ka BP). Nous nous baserons sur ces données comme analogues au maximum glaciaire de l'avant-dernière période glaciaire (SIM 6.2). En effet, les données disponibles dans la littérature permettent de supposer que la température moyenne annuelle globale au SIM 6.2 est du même ordre de grandeur que celle du SIM 2 (Jouzel *et al.*, 2007; Fischer *et al.*, 2018). Au SIM 2, Brulhet & Petit-

Maire (1999), Gornitz Ed. (2009), Antoine *et al.* (2014, 2016) et Bertran *et al.* (2017) mettent en évidence des structures associées à un pergélisol continu dans le Nord de la France. De façon comparable, le site de Waziers aurait donc été affecté par un pergélisol au cours du SIM 6.2. Ceci implique une température moyenne annuelle inférieure à 0°C, plus généralement inférieures à -6 °C par comparaison avec les données actuelles dans le Nord du Canada (Marchand, 2017). Or la température reconstituée pour le dépôt US4c-d est de  $4,7 \pm 0,6$  °C, indiquant que le pergélisol avait disparu lors de ce dépôt. Cette situation est cohérente avec le fait que les sédiments se sont mis en place après l'avant-dernier maximum glaciaire du SIM 6.2.

Replaçons maintenant les températures déterminées dans notre étude dans le cadre des températures reconstituées lors de l'interglaciaire du SIM 5.5. Des paléotempératures ont été déterminées en Europe de l'Ouest pour cette période. Basées sur des proxys polliniques, les reconstitutions de Brewer *et al.* (2008) sur les sites d'Eiffel Maar et Hoher List (Allemagne de l'est) localisés aux mêmes latitudes que Waziers affichent une anomalie comprise entre +3 °C et +4,5 °C il y a 127 ka par rapport aux valeurs modernes, à une époque correspondant au maximum thermique de l'Eemien (SIM 5.5). La température moyenne annuelle moderne à Waziers (11,0 °C) permet de déduire une température

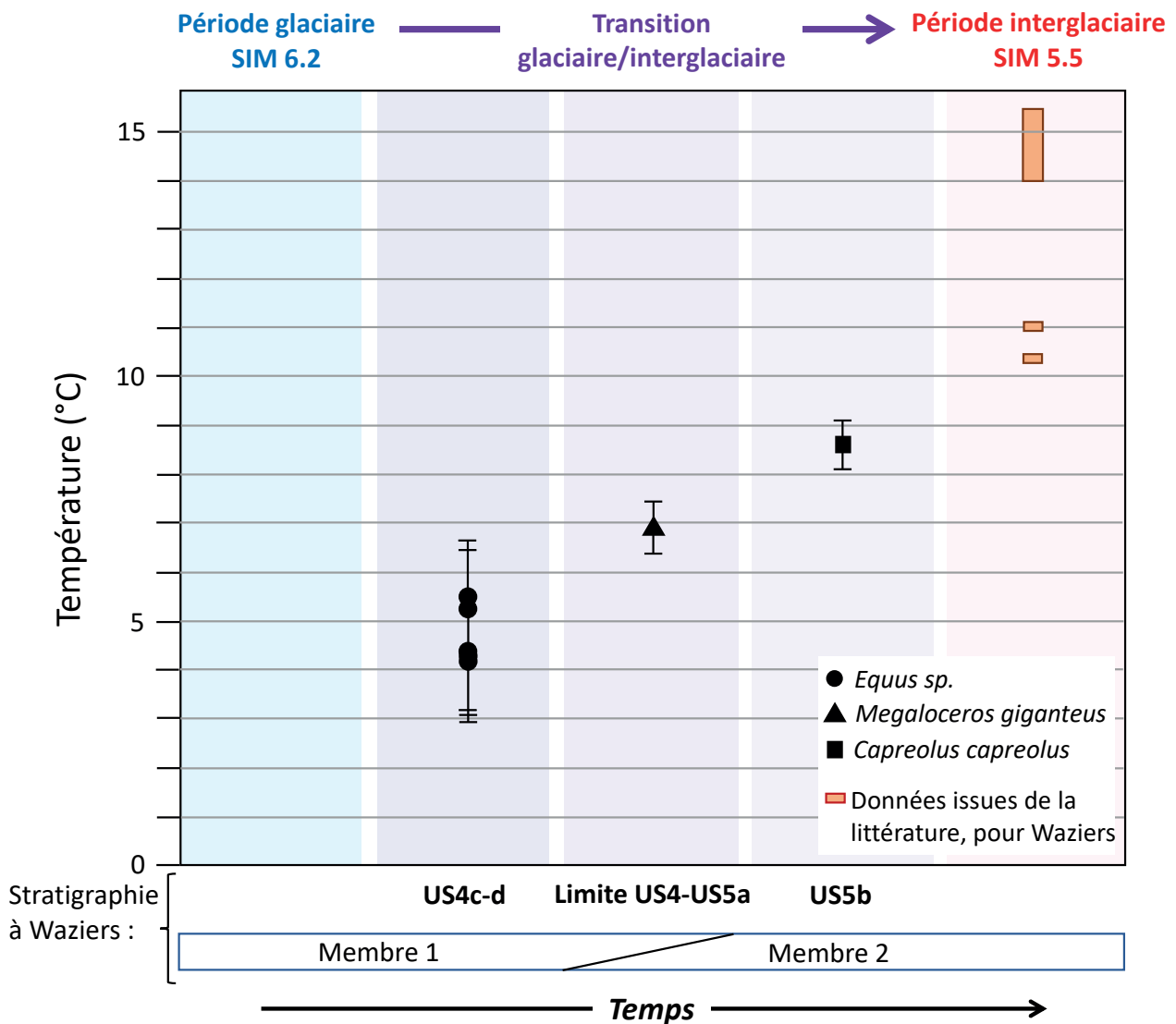


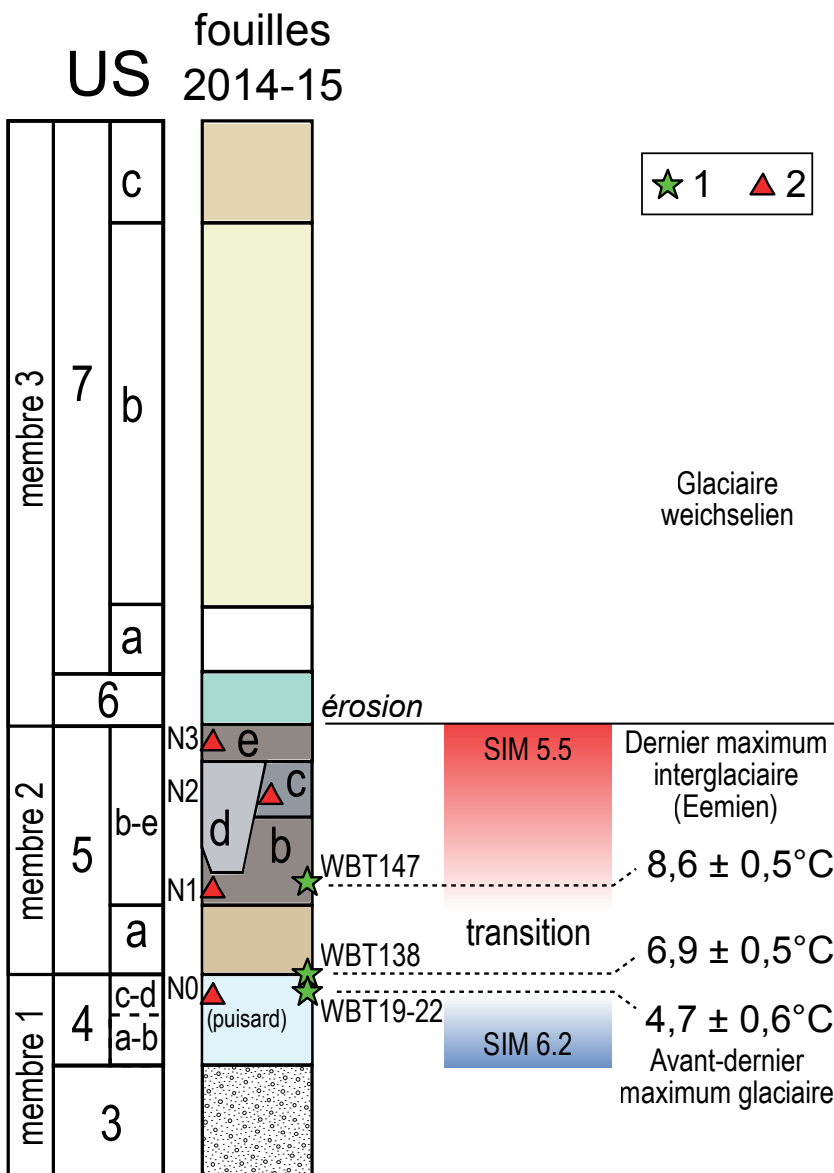
Fig. 6: Synthèse des températures moyennes annuelles reconstituées ( $T_{air}$ , °C) à Waziers en fonction du temps.

Les paléotempératures ont été déterminées d'après les valeurs  $\delta^{18}O$  (‰) du phosphate de l'émail dentaire de grands mammifères herbivores au site de Waziers. Les valeurs de température de l'air déduites de l'analyse  $\delta^{18}O$  des 5 dents de cheval (*Equus sp.*) du dépôt US4c-d, de la dent de mégalocéros (*Megaloceros giganteus*) à la limite US4-US5a, et de la dent de chevreuil (*Capreolus capreolus*) du dépôt US5b sont représentées en noir par des cercles, triangle et carré, respectivement. Les incertitudes associées sont également reportées. En orange figurent les températures à Waziers pour l'Optimum climatique du SIM 5.5 déduites des travaux de Kaspar *et al.* (2005), Gebhardt *et al.* (2007) et Brewer *et al.* (2008) (voir texte).

Fig. 6: Summary of reconstructed mean annual air temperatures (°C) at the Waziers site as a function of time. The air temperature values deduced from the  $\delta^{18}O$  analysis of the 5 horse (*Equus sp.*) teeth from the US4c-d deposit, the megaloceros (*Megaloceros giganteus*) tooth at the US4-US5a boundary, and the deer (*Capreolus capreolus*) tooth from the US5b deposit are represented in black by circles, triangle and square, respectively. The associated uncertainties are also reported. In orange are the temperatures inferred for the SIM 5.5 climate Optimum at Waziers from the work of Kaspar *et al.* (2005), Gebhardt *et al.* (2007) and Brewer *et al.* (2008) (see text).

comprise entre 14,0 °C et 15,5 °C durant l'Optimum climatique de l'Eemien en ce lieu (fig. 6 et 7). Une autre reconstitution utilisant un modèle statistique basé sur des proxys de pollens et de macrofossiles donnent des anomalies de températures au site de Waziers pour la « phase du *Corylus* (noisetier) à l'Eemien » d'environ -1 °C en janvier et +2 °C en juillet par rapport à la période 1961-1990 (Gebhardt *et al.*, 2007), soit une anomalie proche de +0,5 °C pour la température moyenne annuelle à l'Optimum climatique de l'Eemien par rapport à 1961-1990, ou 1975 ± 15. Environ trente-cinq ans séparent cette date des années 2009 ± 10 (période 1999-2019) pour lesquelles la température moyenne annuelle de 11,0 °C a été déterminée à Waziers. Or la température moyenne annuelle a augmenté d'environ 1,2 °C en France métropolitaine entre les années 1975 et les années 2010 (données Météo France). Il en résulte que, d'après les données de Gebhardt *et al.* (2007), la température avoisinait ≈10,3 °C à l'Optimum climatique à Waziers au cours du SIM 5.5. Enfin, le modèle de Kaspar *et al.* (2005) fournit des anomalies de températures dans la

zone de Waziers de +2 °C à +3 °C en juillet et de l'ordre de +0,5 °C en janvier il y a 125 ka par rapport à la période préindustrielle, soit une moyenne annuelle de l'anomalie de température d'environ +1,5 °C. Les données Météo France pour la France métropolitaine montrent que le réchauffement en France a été d'environ 1,5 °C entre l'époque préindustrielle et les années 2010. On déduit que la température moyenne annuelle à Waziers était de ≈11,0 °C au SIM 5.5 d'après les travaux de Kaspar *et al.* (2005). Les températures issues des travaux de Gebhardt *et al.* (2007) et Kaspar *et al.* (2005) pour Waziers au dernier interglaciaire (de ≈10,3 °C et ≈11,0 °C, respectivement) sont très probablement sous-évaluées. L'anomalie de température moyenne sur l'ensemble du globe au SIM 5.5 est en effet estimée à ≈+2,0 °C par rapport à l'optimum de l'Holocène (Fischer *et al.*, 2018), ce qui donne, ramené au local, une température moyenne annuelle >13 °C à Waziers au dernier interglaciaire. Au final, l'exploitation des données des études précédemment citées donne une température moyenne annuelle à Waziers lors du dernier interglaciaire s'échelonnant entre ≈10,3 °C et ≈15,5 °C.



**Fig. 7: Position des dents étudiées et températures moyennes annuelles de l'air reconstituées correspondantes sur un log schématique de la stratigraphie de la fouille 2014-2015.**

(1) Etoile verte: dent(s) analysée(s) pour la reconstitution des températures. (2) Triangle rouge: artefact lithique non remanié. Les unités stratigraphiques (US) ainsi que les niveaux archéologiques correspondant aux artefacts lithiques non remaniés (N0 à N3) sont indiquées sur le schéma.

Fig. 7: Position of the studied teeth and corresponding reconstructed mean annual air temperatures (°C) on a schematic log of the 2014-2015 excavation stratigraphy. (1) Green star: tooth(s) analysed for temperature reconstruction. (2) Red triangle: unworked lithic artefact. The stratigraphic (US) as well as the archaeological levels corresponding to the unworked lithic artefacts (N0 to N3) are indicated in the diagram.



La paléotempérature de  $8,6 \pm 0,5$  °C calculée pour l'US5b à Waziers est inférieure à celles issues de la littérature pour le dernier interglaciaire SIM 5.5. D'autre part, la température moyenne annuelle actuelle à Waziers, de 11,0 °C, supérieure à celle du dépôt US5b ( $8,6 \pm 0,5$  °C), indique que ce dépôt est contemporain d'une période plus froide que celle du présent interglaciaire, l'Holocène. Comme ce dernier est répertorié pour être plus frais que le dernier interglaciaire, ceci corrobore le fait que le dépôt US5b précède le dernier interglaciaire (SIM 5.5).

Ainsi, les températures reconstituées dans ce travail, en accord avec les données stratigraphiques, palynologiques, malacologiques et les datations ESR-U/Th, montrent que les deux extrêmes climatiques de l'avant-dernière période glaciaire (SIM 6.2) et de la dernière période interglaciaire (SIM 5.5) n'ont pas été échantillonnés à Waziers - en raison de l'absence, à ce jour, de dents de mammifères pouvant être utilisées pour les reconstitutions de paléotempératures pour ces deux périodes climatiques extrêmes.

La température à la limite US4-US5a est de  $6,9 \pm 0,5$  °C. Cette limite est postérieure au dépôt US4c-d (température reconstituée de  $4,7 \pm 0,6$  °C) et antérieure au dépôt US5b (température reconstituée de  $8,6 \pm 0,5$  °C). La température de  $6,9 \pm 0,5$  °C s'inscrit donc bien dans le réchauffement progressif du climat au cours de la déglaciation SIM 6/5.

Enfin, l'écart de température reconstitué entre le dépôt US4c-d (la plus ancienne dans notre étude) et le dépôt US5b (la plus récente dans notre étude) peut être comparé aux données disponibles dans la littérature. Cet écart est d'environ 4 °C (= ( $8,6$  °C -  $4,7$  °C)). Puisqu'il est relatif seulement à une partie de la période de la transition glaciaire/interglaciaire SIM 6/5, il permet donc d'établir que l'écart total de température entre la période froide de la glaciation du SIM 6.2 et la période tempérée de l'interglaciaire suivant, le SIM 5.5, est au minimum de 4 °C. Cette donnée n'est pas anodine : elle suggère que l'écart glaciaire/interglaciaire est vraisemblablement supérieur à cette valeur puisque les deux milieux extrêmes n'ont pu être échantillonnés. Elle contribuera ainsi à la validation des simulations réalisées par différents modèles climatiques sur l'écart de la température régionale à Waziers entre le SIM 6.2 et le SIM 5.5. Lécuyer *et al.* (2021) ont déterminé un écart de température entre le SIM 2 et la température préindustrielle (SIM 1) au site de Laugerie Haute (France ; 45°N, environ 625 km au sud-sud-est de Waziers) d'environ 6 °C. En faisant l'hypothèse (i) que l'écart de température moyenne annuelle entre le maximum glaciaire du SIM 6.2 et l'interglaciaire du SIM 5.5 est du même ordre de grandeur que celui entre le SIM 2 et le SIM 1, et (ii) que cet écart est comparable au premier ordre entre les sites de Laugerie Haute et de Waziers, l'écart de  $\approx 4$  °C déduit des dépôts échantillonnés ici, plus petit que  $\approx 6$  °C, est cohérent puisqu'il n'est relatif qu'à une partie de la période de la transition glaciaire/interglaciaire.

## CONCLUSION

La transition glaciaire/interglaciaire est une étape climatique importante à documenter tant les changements en surface du globe sont de large amplitude et relativement rapides. La Transition SIM 6/5 ou Terminaison 2 est difficile à documenter car elle est rarement enregistrée, notamment en domaine continental. Le site de Waziers dans le Nord de la France (Europe de l'Ouest) offre une grande diversité de dépôts sédimentaires fins comprenant des restes fauniques sur cette période, ainsi que durant l'interglaciaire du SIM 5.5. Ces dépôts s'avèrent également particulièrement intéressants car ils attestent de l'occupation des lieux par l'Homme de Neandertal à ces époques, notamment à travers la production d'artefacts lithiques. Le site, étudié en détail a permis d'identifier des séries stratigraphiques où les dépôts se succèdent chronologiquement. Les fouilles ont permis de prélever trois séries d'échantillons de dents de grands herbivores dont l'analyse isotopique de l'oxygène du phosphate de l'émail dentaire permet de reconstituer la température moyenne de l'air grâce à l'existence d'équations de fractionnement isotopique disponibles dans la littérature pour les espèces considérées. Les trois espèces se répartissent dans des couches successives correspondant à trois périodes de la transition : une période initiale correspondant à la première phase de la transition glaciaire/interglaciaire (dents de cheval, *Equus sp.*), une période médiane (dent de mégalocéros, *Megaloceros giganteus*), puis une période correspondant à une phase encore plus avancée de la transition (dent chevreuil, *Capreolus capreolus*) qui précède la dernière période interglaciaire (SIM 5.5). L'habitat de ces différentes espèces est cohérent avec les données polliniques recueillies sur le site. Les paléotempératures sont de  $4,7 \pm 0,6$  °C,  $6,9 \pm 0,5$  °C et  $8,6 \pm 0,5$  °C, respectivement, pour chacun des trois dépôts. La première valeur ( $4,7 \pm 0,6$  °C) apparaît cohérente puisqu'elle caractérise une période postérieure au maximum glaciaire (SIM 6.2) où la température moyenne annuelle à Waziers serait responsable d'un sol gelé en permanence, et donc de température inférieure à 0 °C. La dernière valeur ( $8,6 \pm 0,5$  °C) est également cohérente puisqu'elle est relative à un dépôt situé stratigraphiquement en-dessous des dépôts de l'interglaciaire du SIM 5.5, qui, d'après les données de la littérature, affichaient une température comprise entre  $\approx 10,3$  °C et  $\approx 15,5$  °C : elle est en effet inférieure. Il est particulièrement intéressant de noter que des artefacts lithiques paléolithiques ont été trouvés dans la première et la dernière couche étudiée sur le site de Waziers, ainsi que dans les dépôts de l'interglaciaire du SIM 5.5. Ces résultats sont basés sur un nombre restreint d'échantillons, les seuls actuellement disponibles sur le site de Waziers pour la méthode utilisée. Ils pourraient être confortés à l'avenir si d'autres échantillons supplémentaires pouvaient être collectés.

Enfin, nos mesures indiquent qu'un réchauffement d'environ 4 °C a eu lieu entre le début du tardiglaciaire étudié ici et l'entrée progressive en interglaciaire (fin du tardiglaciaire). Ce réchauffement ne couvre pas

l'intégralité de la période de transition SIM 5/6 qui débute au maximum glaciaire du SIM 6.2 et se termine à l'Optimum thermique de l'interglaciaire du SIM 5.5 (Eemien). L'écart de 4 °C entre les températures moyennes annuelles mesurées correspond donc à une partie seulement du réchauffement lors de la précédente transition glaciaire/interglaciaire (Terminaison 6/5).

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Mathilde Devidet pour l'aide apportée à la réalisation de cette étude dans le cadre de son stage de Master 2.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANTOINE P., LIMONDIN-LOZOUET N., AUGUSTE P., LOCHT J.-L., GALÉHB B., REYSS J.-L., ESCUDÉ É., CARBONEL P., MERCIER P., BAHAIN J.-J., FALGUÈRES C. & VOINCHET P., 2006 - Le tuf de Caours (Somme, France): mise en évidence d'une séquence eemienne et d'un site paléolithique associé. *Quaternaire*, 17 (4), 281-320, doi: 10.4000/quaternaire.880.
- ANTOINE P., GOVAL E., JAMET G., COUTARD S., MOINE O., HERISSON D., AUGUSTE P., GUERIN G., LAGROIX F., SCHMIDT E., ROBERT V., DEBENHAM N., MESZNER S. & BAHAIN J.-J., 2014 - Les séquences loessiques pléistocène supérieur d'Havrincourt (Pas-de-Calais, France): stratigraphie, paléoenvironnement, géochronologie et occupations paléolithiques. *Quaternaire*, 25 (4), 321-368, doi: 10.4000/quaternaire.7278.
- ANTOINE P., COUTARD S., GUERIN G., DESCHODT L., GOVAL E., LOCHT J.-L. & PARIS C., 2016 - Upper Pleistocene loess-palaeosol records from Northern France in the European context: Environmental background and dating of the Middle Palaeolithic. *Quaternary International*, 411, 4-24, doi:10.1016/j.quaint.2015.11.036.
- AUGUSTE P., SÉVÈQUE N. & LOUGUET S., 2022 - La mésofaune et macrofaune mammalienne de Waziers (Nord), Le Bas-Terroir (Campagnes 2014-2015). Données Paléontologiques. *Quaternaire*, 33 (4), 311-322.
- BAHAIN J.-J., GHALEB B., SHAO Q. & FALGUÈRES C., 2022a - Datation du site de Waziers (Nord de la France) par uranium-thorium (U-Th) et Résonance de Spin électronique combinée à l'uranium-thorium (ESR/U-Th). *Quaternaire*, 33 (4), 279-290.
- BAHAIN J.-J., FARKH S., FALGUÈRES C., SHAO Q., VOINCHET P., GHALEB B., HÉRISSEON D., LOCHT J.-L., LIMONDIN-LOZOUET N., AUGUSTE P., GAUTHIER A., DABKOWSKI J., DESCHODT L. & ANTOINE P., 2022b - ESR/U-series dating Eemian human occupations of Northern France. *Quaternary Geochronology*, 71, 101305, doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101305.
- BERTRAN P., ANDRIEUX E., ANTOINE P., DESCHODT L., FONT M. & SICILIA D., 2017 - Pleistocene Involutions and Patterned Ground in France: Examples and Analysis Using a GIS Database: Pleistocene Involutions and Patterned Ground in France. *Permafrost and Periglacial Processes*, 28 (4), 710-725, doi:10.1002/ppp.1957.
- BREWER S., GUIOT J., SÁNCHEZ-GOÑI M.F. & KLOTZ S., 2008 - The climate in Europe during the Eemian: a multi-method approach using pollen data. *Quaternary Science Reviews*, 27 (25-26), 2303-2315.
- BRULHET J. & PETIT-MAIRE N. (éds.), 1999 - *La France pendant les deux derniers extrêmes climatiques : variabilité naturelle des environnements. Cartes au 1/1 000 000 et notice explicative : 1. Le dernier maximum glaciaire (18 000 ± 2 000 ans BP), 2. L'optimum holocène (8 000 ± 1 000 ans BP)*. Collection Sciences & techniques, 184B, Chatenay-Malabry, Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) & Comité National Français de Union Internationale pour l'Étude du Quaternaire (CNF-INQUA), 59 p.
- BRYANT J. D., LUZ B. & FROELICH F. N., 1994 - Oxygen isotopic composition of fossil horse tooth phosphate as a record of continental paleoclimate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 107, 303-316.
- CAPRON É., GOVINA A. & STONE E.J., 2017 - Recent advances on the dynamical representation and our understanding of the warmer-than-present last interglacial climate. *Quaternaire*, 28 (2), 185-193.
- CHAMBERS J.M. & HASTIE T.J. (EDS.), 1992 - *Statistical Models in S*. Chapman & Hall computer science series, New York, 624 p.
- CHARETTE M.A. & SMITH W.H., 2010 - The volume of Earth's ocean. *Oceanography*, 23 (2), 112-114.
- CROWSON R.A., SHOWERS W.J., WRIGHT E.K. & HOERING T.C., 1991 - Preparation of phosphate samples for oxygen isotope analysis. *Analytical chemistry*, 63 (20), 2397-2400.
- DABKOWSKI J., ROYLE S.H., ANTOINE P., MARCA-BELL A. & ANDREWS J.E., 2015 - High-Resolution  $\delta^{18}O$  Seasonality Record in a French Eemian Tufa Stromatolite (Caours, Somme Basin). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 438, 277-284, doi: 10.1016/j.palaeo.2015.08.017.
- D'ANGELA D. & LONGINELLI A., 1990 - Oxygen isotopes in living mammal's bone phosphate: Further results. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 86, 75-82.
- DE BEAULIEU J.-L., ANDRIEU-PONEL V., CHEDDADI R., GUITER F., RAVAZZI C., REILLE M. & ROSSI S., 2006 - Apport des longues séquences lacustres à la connaissance des variations des climats et des paysages pléistocènes. *Comptes Rendus Palevol*, 5, 65-72, doi:10.1016/j.crpv.2005.11.016
- DELGADO HUERTAS A., IACUMIN P., STENNI B., SÁNCHEZ CHILLÓN B. & LONGINELLI A., 1995 - Oxygen isotope variations of phosphate in mammalian bone and tooth enamel. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 59, N°20, 4299-4305.
- DESCHODT L., ANTOINE P., JAMET G., PETITE Y., HÉRISSEON D., COUTARD S. & LIMONIN-LOZOUET N., 2022 - Waziers (Plaine de la Scarpe, Nord de la France): synthèse lithostratigraphique des observations effectuées de 2011 à 2015. *Quaternaire*, 33 (4), 247-272.
- DOME FUJI ICE CORE PROJECT MEMBERS, 2017 - State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling. *Science Advances*, 3 (2), e1600446, doi: 10.1126/sciadv.1600446.
- DUPLESSY J.-C., LABEYRIE L. & WELBROECK C., 2002 - Constraints on the ocean oxygen isotopic enrichment between the Last Glacial Maximum and the Holocene: Paleooceanographic implications. *Quaternary Science Reviews*, 21 (1-3), 315-330.
- ECKER M., BOCHERENS H., JULIEN M.-A., RIVALS F., RAYNAL J.-P. & MONCEL M.-H., 2013 - Middle Pleistocene ecology and Neanderthal subsistence: Insights from stable isotope analyses in Payre (Ardèche, southeastern France). *Journal of Human Evolution*, 65, 363-373.
- FABRE M., LÉCUYER C., BRUGAL J.-P., AMIOT R., FOUREL F. & MARTINEAU F., 2011 - Late Pleistocene climatic change in the French Jura (Gigny) recorded in the  $\delta^{18}O$  of phosphate from ungulate tooth enamel. *Quaternary Research*, 75, 605-613.
- FAIRBANKS R.G., 1989 - A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature*, 342 (6250), 637-642.
- FISCHER H., MEISSNER K.J., MIX A.C., ABRAM N.J., AUSTERMANN J., BROVKN V., CAPRON E., COLOMBAROLI D., DANIAU A.-L., DYEZ K.A., FELIS T., FINKELSTEIN S.A., JACCARD S.L., MCCLYMONT E.L., ROVERE A., SUTTER J., WOLFF E.W., AFFOLTER S., BAKKER P., BALLESTEROS-CÁNOVAS J.A., BARBANTE C., CALEY T., CARLSON A.E., CHURAKOVA O., CORTESI G., CUMMING B.F., DAVIS B.A.S., DE VERNAL A., EMILE-GEAY J., FRITZ S.C., GIERZ P., GOTTSCHALK J., HOLLOWAY M.D., JOOS F., KUCERA M., LOUTRE M.-F., LUNT D.J., MARCISZ K., MARLON J.R., MARTINEZ P., MASSON-DELMOTTE V., NEHRBASS-AHLES C., OTTO-BLIESNER B.L., RAIBLE C.C., RISEBROKKEN B., SÁNCHEZ GOÑI M.F., SALEEM ARRIGO J., SARNTHEIN M., SJOLTE J., STOCKER T.F., VELASQUEZ ALVÁREZ P.A., TINNER W., VALDES P.J., VOGEL H., WANNER H., YAN Q., YU Z., ZIEGLER M. & ZHOU L., 2018 - Palaeoclimate constraints on the impact of 2°C anthropogenic warming and beyond. *Nature Geoscience*, 11, 474-485, doi:10.1038/s41561-018-0146-0.
- FOUREL F., MARTINEAU F., LÉCUYER C., KUPKA H.J., LANGE L., OJEMI C. & SEED M., 2011.  $^{18}O/^{16}O$  ratios measurements of inorganic and organic materials by EA-Pyrolysis-IRMS continuous flow techniques. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 25, 2691-2696.

- FRICKE H., CLYDE W. C. & O'NEIL J., 1998 - Intra-tooth variations in  $\delta^{18}\text{O}$  (PO<sub>4</sub>) of mammalian tooth enamel as a record of seasonal variations in continental climate variables. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **62**, 1389-1850.
- GAUTHIER A., 2022 - Dynamique de la végétation et changements environnementaux en réponse aux variations climatiques de la fin du Saalien à l'Eemien : résultats de l'analyse palynologique. *Quaternaire*, **33** (4), 291-299.
- GEHARDT C., KÜHL N., HENSE A. & LITT T., 2007 - Reconstruction of Quaternary temperature fields by dynamically consistent smoothing. *Climate dynamics*, **30** (4), 421-437, doi:10.1007/s00382-007-0299-9.
- GORNITZ V. (ed.), 2009 - *Encyclopedia of paleoclimatology and ancient environments*. Encyclopedia of earth sciences series. Springer, Dordrecht, Netherlands, New York, 1047 p., doi: 10.1007/978-1-4020-4411-3.
- HÉRISSON D., DESCHODT L., ANTOINE P., LOCHT J.-L., LACROIX S., SERGENT A., PETITE Y., VALLIN L., RORIVE S., SIMON F. & NOÛS C., 2022 - Waziers, Le Bas-Terroir : historique de dix années de recherches archéologiques et géomorphologiques dans un marais pléistocène de la plaine de la Scarpe (2011-2021). *Quaternaire*, **33** (4), 225-246.
- HÉRISSON D., ANTOINE P., AUGUSTE P., BAHAIN J., DESCHODT L., GAUTHIER A., GHALEB B., HULIN G., JAMET G., LECUYER C., LIMONDIN-LOZOUET N., MASSON B., PONEL P., SÈVÈQUE N. & VALLIN L., 2015 - *Rapport de fouille programmée Waziers « Le Bas Terroir ». Année 2015*. Rapport d'opération de recherches archéologiques programmées, INRAP, UMR8591 du CNRS, Ministère de la Culture, 123 p.
- HÉRISSON D., LOCHT J.-L., VALLIN L., MASSON B., HULIN G., VIRMOUX C., DESCHODT L., ANTOINE P., COUTARD S., LIMONDIN-LOZOUET N., GAUTHIER A., PONEL P., BAHAIN J., TOMBRET O., GHALEB B., AUGUSTE P., SEVEQUE N., LEFEBVRE S., LÉCUYER C., AMIOT R., DEVIDET M., CHICAT-LEFORT T., ALI A., POIRIER P. & FIELD M., 2017 - *Rapport de fouille programmée Waziers « Le Bas Terroir ». Première année de la triennale 2017-2019*. Rapport de fouille programmée, 241 p.
- HILLAIRES-MARCEL C. & CAUSSE C., 1989 - The late Pleistocene Laurentide Glacier: Th/U dating of its major fluctuations and  $\delta^{18}\text{O}$  range of the ice. *Quaternary Research*, **32** (2), 125-138.
- HOPPE K., STOVER S., PASCOE J. & AMUNDSON R., 2004 - Tooth enamel biomineralization in extant horses: implications for isotopic microsampling. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **26**, 355-365.
- JOUZEL J., MASSON-DELMOTTE V., CATTANI O., DREYFUS G., FALOURD S., HOFFMANN G., MINSTER B., NOUET J., BARNOLA J.-M. & CHAPPELLAZ J., 2007 - Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years. *Science*, **317** (5839), 793-796.
- KASPAR F., KÜHL N., CUBASCH U. & LITT T., 2005 - A model-data comparison of European temperatures in the Eemian interglacial. *Geophysical Research Letters*, **32** (11), L11703, doi:10.1029/2005GL022456.
- KOHN M. J., SCHOENINGER M. J. & VALLEY J. W., 1996 - Herbivore tooth oxygen isotope compositions: Effects of diet and physiology. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **60**, N° 20, 3889-3896.
- LAMBECK K., ROUBY H., PURCELLA, SUN Y. & SAMBRIDGE M., 2014 - Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **111** (43), 15296-15303.
- LANDAIS A., BARKAN E. & LUZ B., 2008 - Record of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $^{17}\text{O}$ -excess in ice from Vostok Antarctica during the last 150,000 years. *Geophysical Research Letters*, **35** (2), L02709, doi:10.1029/2007GL032096.
- LANGLOIS C., SIMON L. & LÉCUYER C., 2003 - Box-modeling of bone and tooth phosphate oxygen isotope compositions as a function of environmental and physiological parameters. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, **39** (4), 259-272, doi.org/10.1080/10256010310001621146.
- LÉCUYER C., GRANDJEAN P., O'NEIL J.R., CAPPETTA H. & MARTINEAU F., 1993 - Thermal excursions in the ocean at the Cretaceous — Tertiary boundary (northern Morocco):  $\delta^{18}\text{O}$  record of phosphatic fish debris. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **105** (3-4), 235-243.
- LÉCUYER C., HILLAIRES-MARCEL C., BURKE A., JULIEN M.-A. & HÉLIE J.-F., 2021 - Temperature and precipitation regime in LGM human refugia of southwestern Europe inferred from  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of large mammal remains. *Quaternary Science Reviews*, **255**, 106796, doi: 10.1016/j.quascirev.2021.106796.
- LIMONDIN-LOZOUET N., 2022 - Waziers (Plaine de la Scarpe, Nord de la France): données malacologiques. *Quaternaire*, **33** (4), 301-310.
- LISIECKI L.E. & RAYMO M.E., 2005 - A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records. *Paleoceanography*, **20** (1), 10.1029/2004PA001071.
- LOCHT J.-L., VALLIN L., DESCHODT L., ANTOINE P., HÉRISSON D., MASSON B., AUGUSTE P. & LEFEBVRE S., 2014 - *Rapport de fouille programmée Waziers « Le Bas Terroir »*. Rapport d'opération de recherches archéologiques programmées, INRAP, UMR8591 du CNRS, Ministère de la Culture, 138 p.
- LONGINELLI A., 1984 - Oxygen isotopes in mammal bone phosphate: a new tool for paleohydrological and paleoclimatological research? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **48**, 385-390.
- LUZ B. & KOLODNY Y., 1985 - Oxygen isotope variations in phosphate of biogenic apatites, IV. Mammal teeth and bones. *Earth and Planetary Science Letters*, **75**, 29-36.
- MARCHAND N., 2017 - *Suivi de la température de surface du sol en zones de pergélisol Arctique par l'utilisation de données de télédétection satellite assimilées dans le schéma de surface du modèle climatique canadien (CLASS)*. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke (Québec, Canada) et Université de Grenoble Alpes (France), 191 p.
- MARÉCHAL C., BOUTIER A., MÉLIÈRES M.-A., CLAUZEL T., BETANCORT J.F., LOMOSCHITZ A., MECO J., FOUREL F., BARRAL A. & AMIOT R., 2020 - Last Interglacial sea surface warming during the sea-level highstand in the Canary Islands: Implications for the Canary Current and the upwelling off African coast. *Quaternary Science Reviews*, **234**, 106246, doi: 10.1016/j.quascirev.2020.106246.
- MASSON-DELMOTTE V., SCHULZ M., ABE-OUCHI A., BEER J., GANOPOLSKI A., GONZÁLEZ ROUCO J.G., JANSEN E., LAMBECK K., LUTERBACHER J., NAISH T., OSBORN T., OTTO-BLIESNER B., QUINN T., RAMESH R., ROJAS M., SHAO X. & TIMMERMANN A., 2013 - Information from paleoclimatic archives. In T. Stocker, D. Qin, G.-K Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P.M. Midgley P.M. (eds.), *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge university press, Cambridge, New York, 383-464.
- NORTH GREENLAND ICE CORE PROJECT MEMBERS, 2004 - High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the Last Interglacial period. *Nature*, **431** (7005), 147-151, doi:10.1038/nature02805.
- OTTO-BLIESNER B.L., BRADY E.C., CLAUZEL G., TOMAS R., LEVIS S. & KOTHAVALA Z., 2006 - Last glacial maximum and Holocene climate in CCSM3. *Journal of Climate*, **19** (11), 2526-2544.
- PRYOR A., STEVENS R.E., O'CONNELL T.C. & LISTER J.R., 2014 - Quantification and propagation of errors when converting vertebrate biomineral oxygen isotope data to temperature for palaeoclimate reconstruction. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **412**, 99-107.
- SÁNCHEZ CHILLÓN B., ALBERDI M. T., LEONE G., BONA-DONNA F. P., STENNI B. & LONGINELLI A., 1994 - Oxygen isotopic composition of fossil equid tooth and bone phosphate: an archive of difficult interpretation. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **107**, 317-328.
- SCHRAG D.P., ADKINS J.F., MCINTYRE K., ALEXANDER J.L., HODELL D.A., CHARLES C.D. & MCMANUS J.F., 2002 - The oxygen isotopic composition of seawater during the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, **21** (1-3), 331-342.
- SHAKUN J.D. & CARLSON A.E., 2010 - A global perspective on Last Glacial Maximum to Holocene climate change. *Quaternary Science Reviews*, **29** (15-16), 1801-1816.
- SIMA A., PAUL A., SCHULZ M. & OERLEMANS J., 2006 - Modeling the oxygen-isotopic composition of the North American Ice Sheet and its effect on the isotopic composition of the ocean during the last glacial cycle. *Geophysical Research Letters*, **33** (15), doi: 10.1029/2006GL026923.
- SIMMS A.R., LISIECKI L., GEBBIE G., WHITEHOUSE P.L. & CLARK J.F., 2019 - Balancing the last glacial maximum (LGM) sea-level budget. *Quaternary Science Reviews*, **205**, 143-153.
- SKRZYPEK G., WIŚNIEWSKI A. & GRIERSON P.F., 2011 - How cold was it for Neanderthals moving to Central Europe during warm phases of the last glaciation? *Quaternary Science Reviews*, **30** (5-6), 481-487, doi:10.1016/j.quascirev.2010.12.018.
- SKRZYPEK G., SADLER R. & WIŚNIEWSKI A., 2016 - Reassessment of recommendations for processing mammal phosphate  $\delta^{18}\text{O}$



- data for paleotemperature reconstruction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **446**, 162–167, doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.01.032.
- SNYDER C.W., 2016** - Evolution of global temperature over the past two million years. *Nature*, **538** (7624), 226-228, doi: 10.1038/nature19798.
- STEVENS R., BALASSE M. & O'CONNELL T., 2011** - Intra-tooth oxygen isotope variation in a known population of red deer: Implications for past climate and seasonality reconstructions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **301**, 64-74.
- TOMÉ C. & VIGNE J-D., 2003** - Roe deer (*Capreolus capreolus*) age at death estimates: New methods and modern reference data for tooth eruption and wear, and for epiphyseal fusion. *Archaeofauna*, **12**, 157-173.
- WAELEBROECK C., LABEYRIE L., MICHEL E., DUPLESSY J.C., MCMANUS J.F., LAMBECK K., BALBON E. & LABRACHERIE M., 2002** - Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records. *Quaternary science reviews*, **21** (1-3), 295-305.