



HAL
open science

Déglaciation des Vosges gréseuses et reconstructions paléoclimatiques à partir de datations par le béryllium-10 produit in situ

Chloé Valenti, Vincent Rinterknecht, Héroïse Koehler, Sylvain Griselin,
Lorena Audouard, Benjamin Gehres, Pierre-Olivier Couette

► **To cite this version:**

Chloé Valenti, Vincent Rinterknecht, Héroïse Koehler, Sylvain Griselin, Lorena Audouard, et al..
Déglaciation des Vosges gréseuses et reconstructions paléoclimatiques à partir de datations par le
béryllium-10 produit in situ. *Quaternaire*, 2024, 35 (1), pp.198147. 10.4000/quaternaire.19147.
hal-04576226

HAL Id: hal-04576226

<https://hal.science/hal-04576226v1>

Submitted on 28 Oct 2024

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.

1 DÉGLACIATION DES VOSGES GRÉSEUSES ET RECONSTRUCTIONS
2 PALÉOCLIMATIQUES À PARTIR DE DATATIONS PAR LE BÉRYLLIUM-10
3 PRODUIT *IN SITU*

4 Chloé VALENTI¹, Vincent RINTERKNECHT², Héroïse KOEHLER³, Sylvain GRISELIN⁴,
5 Lorena AUDOUARD⁵, Benjamin GEHRES⁶, Pierre-Olivier COUETTE⁷ & Equipe
6 *ASTER*^{2*}

7 ¹GET, Université de Toulouse, IRD, UPS, CNRS, Observatoire Midi-Pyrénées 14, avenue
8 Édouard Belin 31400 Toulouse, France. *Courriel* : chloe.valenti@get.omp.eu

9 ²Aix-Marseille Univ., CNRS, IRD, INRAE, CEREGE, Technopôle de l'Arbois-
10 Méditerranée, BP80, 13545 Aix-en-Provence, France. *Courriel* : rinterknecht@cerege.fr

11 ³Archéologie Alsace, UMR 7044 Archimède, équipe Préhistoire de l'Europe moyenne, 11
12 rue Champollion, 67600 Sélestat, France. *Courriel* : heloise.koehler@archeologie.alsace

13 ⁴Institut National de Recherches Archéologiques Préventives, UMR 8068 - Technologie et
14 Ethnologie des Mondes Préhistoriques, Centre archéologique de Strasbourg - 10 rue
15 d'Altkirch, CS 10042 - 67027 Strasbourg CEDEX, France. *Courriel* :
16 sylvain.griselin@inrap.fr

17 ⁵Ministère de la Culture et de la Communication, Service régional de l'archéologie du Grand
18 Est, DRAC Grand Est Site de Strasbourg, Palais du Rhin, 2 place de la République, 67000
19 Strasbourg, France. *Courriel* : lorena.audouard@culture.gouv.fr

20 ⁶CRéAAH, UMR 6566, CNRS, Laboratoire Archéosciences, Université de Rennes 1,
21 Campus de Beaulieu, bâtiment 25, 35042 Rennes, France. *Courriel* :
22 benjamin.gehres@cnrs.fr

23 ⁷Institut Terre & Environnement de Strasbourg UMR 7063, CNRS, Université de
24 Strasbourg, 5 Rue René Descartes, 67000 Strasbourg, France / Département de géographie,
25 Université Laval, 2325 Rue de l'Université, Québec, QC G1V 0A6, Canada. *Courriel* :
26 pierre-olivier.couette.1@ulaval.ca

27 * Georges AUMAÎTRE, Karim KEDDADOUCHE & Fawzi ZAID

28 **RÉSUMÉ**

29 Face à la fonte généralisée des masses de glace, l'étude des glaciers et de leurs réponses aux
30 variations climatiques présentes et passées peut fournir des informations nécessaires à la
31 compréhension de leur évolution sur le long terme. Si les glaciers alpins et pyrénéens ont
32 fait l'objet d'études paléoclimatiques, ce n'est pas le cas d'autres massifs de montagnes
33 français, comme les Vosges Gréseuses (VG), un massif de basse à moyenne montagne, situé
34 dans le Nord-Est de la France. Cette étude cible l'analyse des paléoglaciers de cette région,
35 où de nombreuses structures glaciaires suggèrent qu'elle a été englacée au cours de la

36 dernière période glaciaire du Würm. Nous avons déterminé la localisation de quatre
37 paléoglaciers et les avons cartographiés en utilisant ArcGIS et l'outil "GlaRe" (Glacier
38 Reconstructions Tools). Nous avons montré que ces glaciers des VG étaient peu étendus et
39 n'excédaient pas 45 m d'épaisseur. Nous avons daté les moraines les plus proches des
40 cirques en utilisant le ^{10}Be , et confirmé que des glaciers étaient bien présents dans ce secteur
41 des Vosges entre 19,5 et 13,0 ka. Les reconstructions climatiques, obtenues à partir de la
42 Ligne d'Equilibre Glaciaire, montrent que la température estivale moyenne se situait entre
43 1,8 et 2,4°C, en considérant les précipitations moyennes annuelles comme équivalentes aux
44 actuelles. Les glaciers des VG n'ont pas persisté pendant le Dryas Récent, en raison de leur
45 faible étendue, ce qui les différencie des Vosges Cristallines où la déglaciation s'est faite
46 plus tardivement. Enfin, la datation d'un des points culminants des VG, le Rocher de Mutzig,
47 montre qu'une calotte glaciaire coiffait probablement le massif jusqu'à il y a 38000 ans. Il
48 est pertinent de relier ces évolutions glaciaires à la dynamique des populations
49 préhistoriques, qui ont dû s'adapter aux conditions paléoclimatiques, à la fermeture de
50 passages stratégiques et à la diminution de ressources pendant les périodes froides.

51 Mots-clés : glaciation, Vosges, LEG, Quaternaire, Würm, paléoclimat, paléoglaciers

52

53 DEGLACIATION OF VOSGES GRÉSEUSES AND PALEOCLIMATE RECONSTRUCTION
54 BASED ON IN SITU PRODUCED BERYLLIUM-10 EXPOSURE DATING

55 **ABSTRACT**

56

57 In the context of global ice retreat, studying glaciers and glacier responses to present and
58 past climatic variations provides information to understand their long-term evolution. Alpine
59 and Pyrenean glaciers have been the subject of paleoclimate studies but it is not the case of
60 the Vosges Gréseuses (VG), a mountain range in northeastern France. This project focuses
61 on the analysis of the palaeoglaciers of this area, where many landforms suggest the presence

62 of ice during colder periods. We determined the locations of the paleoglaciers and mapped
63 them by using the software ArcGIS and the tool “GlaRe” (Glacier Reconstructions Tools).
64 We show that glaciers in the VG were not very extensive and did not exceed a thickness of
65 45 m. We also dated moraines by mean of cosmogenic ^{10}Be and confirmed that glaciers were
66 last present in this area during the Last Glacial Maximum (LGM) with ages ranging between
67 19.5 and 13.0 ka. Climatic reconstructions, obtained from Equilibrium Line Altitude (ELA),
68 show that mean summer temperatures were between 1.8 and 2.4°C, considering
69 precipitations equivalent to the actual. Glaciers retreated before the beginning of the
70 Younger Dryas (YD) due to their small sizes and as suggested by sedimentary processes in
71 peatbogs. Finally, initial dating of the Rocher de Mutzig, one the highest point of the VG,
72 shows that an ice cap probably covered the massif until 38000 years ago. In a context of cold
73 climatic episodes, it is interesting to link the glacial evolution and prehistoric population
74 dynamics, that must have adapted to paleoclimatic conditions, closing of strategic pathes
75 and decrease of ressources.

76 Keywords : glaciation, Vosges, ELA, Quaternary, Würm, paleoclimate, paleoglaciers

77 1 - INTRODUCTION

78 Alors que les couvertures de glace ne cessent de diminuer depuis le Petit Âge de Glace
79 (PAG) il y a environ 200 ans, l'étude des variations de l'étendues des glaciers passés permet
80 de comprendre l'évolution des conditions paléoclimatiques. En effet, leur évolution dépend
81 en grande partie de la température de surface (T) et des précipitations (P), qui modulent les
82 gains et pertes de glace et qui régissent eux-mêmes le bilan de masse d'un glacier. Dans le
83 contexte climatique actuel, ils permettent l'appréhension des variations climatiques par la
84 détermination de la position de la Ligne d'Equilibre Glaciaire (LEG) qui correspond à
85 l'altitude où le bilan de masse d'un glacier est nul. Cette LEG est directement corrélée à la
86 température moyenne estivale (T) et aux cumuls de précipitations annuels (P) (Ohmura &
87 Boettcher, 2018). Si elle se détermine pour les glaciers actuels, elle peut être estimée
88 également pour les paléoglaciers à l'aide de reconstructions de l'étendue passée des glaciers
89 (Hofmann *et al.*, 2022) et permet ainsi d'établir des conditions de paléotempérature et de
90 paléoprécipitation (Benn & Lehmkuhl, 2000 ; Rea, 2009 ; Reixach *et al.*, 2021).

91 La glaciation würmienne (entre 117 ka et 11 ka) (Monjuvent & Nicoud, 1988) se caractérise
92 par une extension maximale de la grande majorité des glaciers au cours du Dernier
93 Maximum Glaciaire (DMG) (Clark *et al.*, 2009). Il faut ainsi imaginer une calotte glaciaire
94 recouvrant toute l'Europe du Nord jusqu'à la Pologne et le nord de l'Allemagne
95 (Rinterknecht *et al.*, 2006 ; Tylmann *et al.*, 2019). Aujourd'hui, les glaciers persistent
96 seulement à des altitudes élevées, avec une LEG moyenne dans les Alpes de 3035 m \pm 120
97 m (Rabatel *et al.*, 2013). Cependant, les massifs de moyenne et basse montagne, dont font
98 partie les Vosges, ne conservent de cette dernière glaciation, que des formes glaciaires,
99 preuves de la présence d'anciens glaciers.

100 De nombreux massifs français n'ont aujourd'hui pas encore fait l'objet d'études
101 paléoclimatiques à partir de reconstructions paléoglaciales. L'enregistrement pollinique de
102 la tourbière de la Grande Pile, localisée au sud des Vosges (département de Haute-Saône,
103 47°43'47,34"N, 6°30'29,59"E), a permis d'établir une période de grand froid entre 25 et 15
104 ka (Guiot *et al.*, 1993), associée à la glaciation würmienne. D'autre part, quelques
105 travaux sur les modèles glaciaires (Flageollet, 2002 ; Mercier & Jeser, 2004) ont confirmé
106 l'englacement des Vosges Cristallines (Vosges du Sud) au cours de cet épisode, et montré
107 que le retrait glaciaire s'est effectué de manière tardive, au cours du Dryas Récent (DR, 13,0-
108 11,8 ka (Reinig *et al.*, 2021)), et que les glaciers ont pu persister sous forme de glacier de
109 cirque jusqu'entre 11,5 et 8,3 ka, par datation au Béryllium-10 (^{10}Be) (âge directement tirés
110 de Mercier & Jeser, 2004). Cependant, le maigre jeu de données existant à l'échelle des
111 Vosges du Sud ne permet pas d'établir la dynamique glaciaire de l'ensemble du massif. Les
112 Vosges Gréseuses (VG) sont ainsi encore très peu documentées, malgré la mise en évidence
113 de structures glaciaires (Darmois-Théobald, 1972). Les tourbières issues de la dernière
114 glaciation sont de solides marqueurs temporels dont l'analyse pollinique et/ou sédimentaire
115 permet une reconstruction des paléoenvironnements et des climats. Sur la base de la
116 lithostratigraphie et de la susceptibilité magnétique des sédiments tardiglaciaires de la
117 tourbière de la Maxe (48°27'15,79"N, 7° 7'27,27"E, point B sur la [fig. 1](#)) et du Lac de Sewen
118 (47°48'42"N, 6° 53'50"E), l'étude montre un début de sédimentation il y a environ 13 ka et
119 suggèrent un retrait glaciaire il y a au moins 13 ka (Walter-Simonnet *et al.*, 2010). Pour
120 pallier à l'absence de données, malgré une présence évidente de structures glaciaires dans
121 les VG, nous avons cartographié les formes glaciaires situées au plus proche des cirques
122 glaciaires, déterminé l'âge de mise en place des moraines et estimé les conditions
123 paléoclimatiques.

124 Les paléoglaciers et leurs surfaces peuvent être cartographiés et reconstruits à l'aide du
125 logiciel ArcGIS (Licence ESRI, version 2.7) et de l'outil *Glacier Reconstruction* (GlaRe)
126 (Pellitero *et al.*, 2016). La datation des dépôts morainiques combinées aux reconstructions
127 spatiales des paléoglaciers et de leur LEG respectives vont permettre la compréhension de
128 l'évolution des paléotempératures au cours du temps.

129 **2 - SECTEUR D'ÉTUDE**

130 Les Vosges sont un massif de moyenne montagne localisé au Nord-Est de la France et qui
131 culmine à 1 424 m. La partie nord du massif où se trouve le Massif du Donon, zone d'étude
132 du projet, est caractérisée par deux sommets culminant à plus de 1 000 m : le Donon (1 009
133 m) et le Rocher de Mutzig (1 008 m).

134 La géologie du secteur présente une lithologie homogène, composée de grès à strates de
135 granulométrie variable, de grès conglomératiques au grès silteux/marneux, qui constitue la
136 formation des « Grès Bigarrés » (Trias Inférieur) (fig. 1). Elles ont été mises en place dans
137 un contexte fluvio-deltaïque de pénéplaine, à la suite du démantèlement de la chaîne
138 hercynienne (325 – 250 Ma). Les couches gréseuses sont caractérisées par des apports
139 importants en éléments détritiques (Chèvremont, 2008).

140 Le Donon correspond à la délimitation de plusieurs bassins versants alimentant la Meurthe
141 (versants Sud/Sud-Ouest), la Bruche (versants Nord, Nord-Est, jusqu'au Sud/Sud-Est),
142 toutes deux affluents du Rhin. Ces distinctions hydrographiques permettent de définir les
143 vallées glaciaires du secteur, reconnaissables par leur structure en « U », dites vallées en
144 auge, dont les dépôts en marge glaciaires n'ont pas été observés. Le Modèle Numérique de
145 Terrain (MNT) de résolution 5 m x 5 m révèle grossièrement les cirques et niches de
146 nivations du secteur (fig. 2). Les cirques sont souvent associés à un ombilic, dont la plupart
147 ont été remplis par des dépôts organiques et sont répertoriés comme des tourbières. A ce

148 jour, il a été dénombré plus de 250 tourbières issues de la dernière glaciation, sur l'ensemble
 149 du massif des Vosges (Mercier & Jeser, 2004). La présence des lacs et tourbières, retrouvés

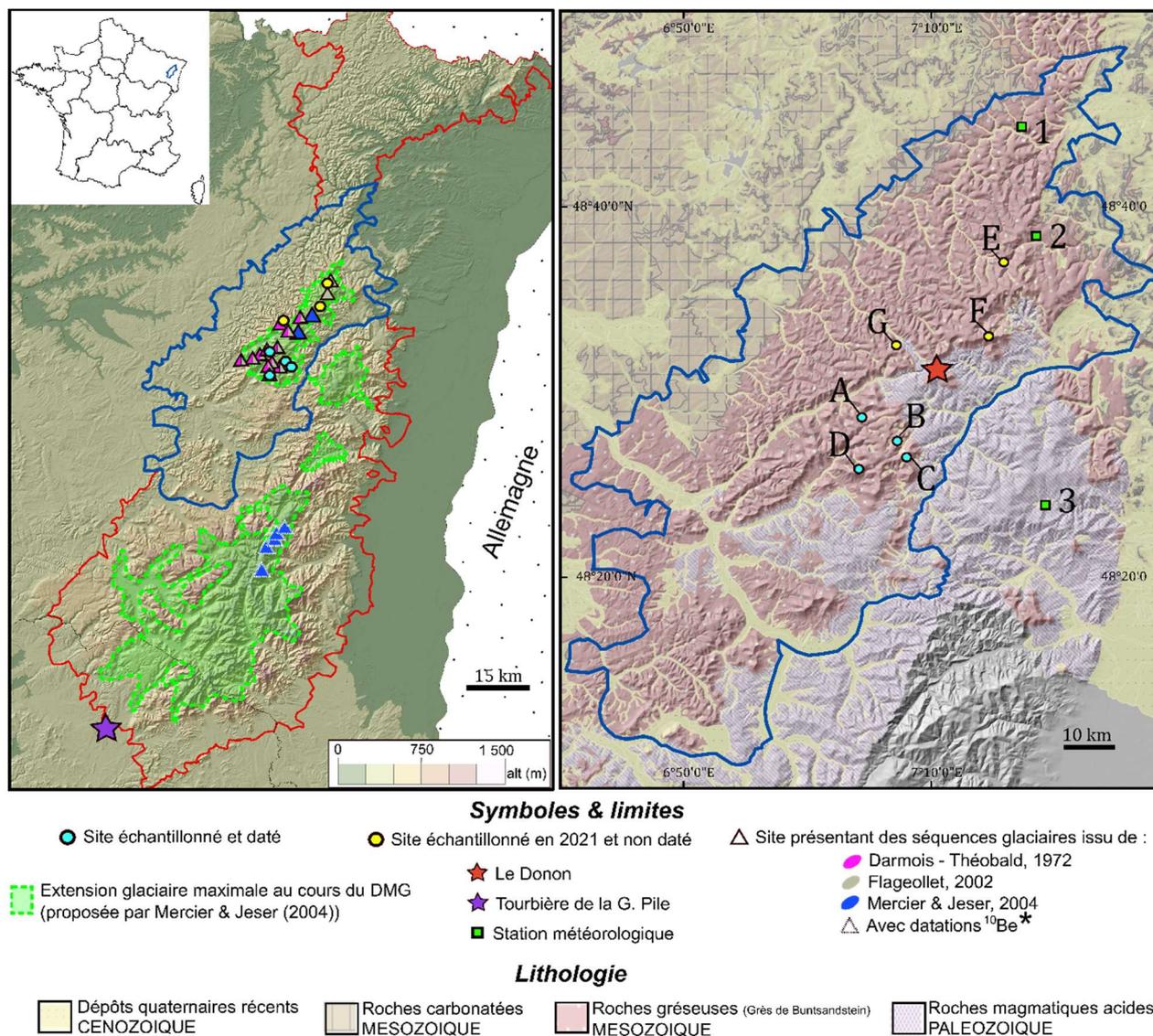


Fig. 1 : A gauche : Carte topographique des Vosges et localisation des sites identifiés dans la littérature; à droite : Géologie simplifiée des VG, localisation des sites d'échantillonnage et des stations météorologiques (1 : Phalsbourg, 2 : Wangenbourg - Engenthal, 3 : Howald). La limite rouge correspond au contour des Vosges et la limite bleue au contour des Hautes Vosges Gréseuses.*Seuls les sites localisés en Vosges du Sud ayant été datés par l'un des auteurs sont représentés ici.

Fig. 1 : Left : Topographic map of the Vosges mountains and location of sites identified in the bibliography; right : simplified geological map of Northern Vosges, locations of sampling sites and meteorological stations (1 : Phalsbourg, 2 : Wangenbourg - Engenthal, 3 : Howald). The red limit corresponds to the boundary of the Vosges Mountains, the blue one corresponds to the Hautes Vosges Gréseuses. * Only sites located in the Southern Vosges and dated are shown here.

150 dans les Vosges, mais également dans les massifs voisins, témoignent d'un englacement
 151 passé des massifs de basse/moyenne montagne et basse/moyenne latitude : Ammersee
 152 (vonGrafenstein *et al.*, 1999), Mondsee (Lauterbach *et al.*, 2011) en Allemagne par

153 exemples, et la tourbière de la Grande Pile en Haute-Saône (Seret *et al.*, 1992). Sept sites
 154 glaciaires caractérisés par des moraines fronto-latérales renfermant lacs ou tourbières (figs.
 155 1 & 2), ainsi que le Rocher de Mutzig ont été sélectionnés et échantillonnés afin
 156 d'investiguer sur la dynamique glaciaire des VG.

157 La localisation des VG conduit à des conditions climatiques spécifiques résultantes de la
 158 jonction entre le climat océanique, continental et montagnard, avec des amplitudes
 159 thermiques annuelles très importantes et des précipitations abondantes, particulièrement sur
 160 les versants Nord/Nord-Ouest, compte tenu de la proximité de la mer du Nord qui favorise
 161 l'arrivée de masses d'air très humides, et du blocage orographique des perturbations
 162 atlantiques arrivant de l'Ouest. Ces précipitations peuvent s'élever jusqu'à 1 500 à 2 000
 163 mm/an et sont réparties sur toutes les saisons. Les hivers sont longs et rudes avec des
 164 températures souvent négatives, d'après les valeurs climatologiques de Météo-France

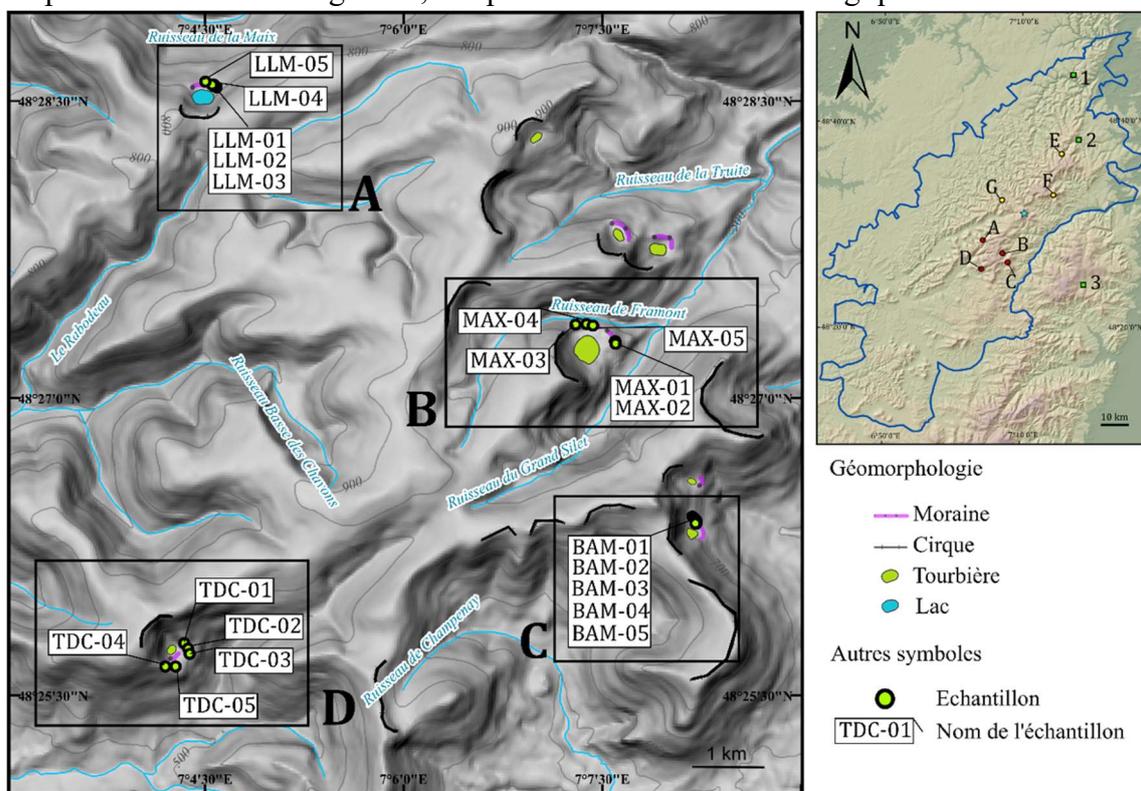


Fig. 2 : Géomorphologie des sites étudiés; à gauche : les quatre sites échantillonnés et datés, A : Lac de la Maix, B : Tourbière de la Maxe, C : Chatte Pendue, D : Trou du Cuveau. Le MNT utilisé est issu de la base de données BD ALT de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière, de résolution 5 x 5 m.

Fig.2: Geomorphology of investigated sites. Left : four sampled and dated sites. A : Lac de la Maix, B : Tourbière de la Maxe, C : Chatte Pendue, D : Trou du Cuveau. DEM sourced from the database BD ALTI of the Institut National de l'Information Géographique et Forestière, with a 5 x 5 m resolution.

165 (service météorologique et climatique nationale de France). Les normales de saison
166 (moyenne sur la période 1981 – 2010) montrent des températures moyennes oscillantes entre
167 0,0°C et 18,5°C et des précipitations abondantes, notamment sur la période hivernale, avec
168 un cumul annuel de 1 182 mm, à la station de Wangenbourg – Engenthal (altitude : 465 m)
169 (point 2 fig. 1).

170 3 - MÉTHODOLOGIE

171 3.1 - CARTOGRAPHIE ET RECONSTRUCTIONS DES PALÉOGLACIERS

172 Les formes glaciaires telles que les moraines frontales et latérales observées sur le terrain
173 sont cartographiées à l'aide du logiciel ArcGIS (Version 2.7, Licence ESRI) et servent de
174 contraintes spatiales pour la reconstruction des paléoglaciers. Sur l'ensemble du secteur du
175 Donon, les sept sites sélectionnés (fig. 1) se caractérisent chacun par un cirque glaciaire,

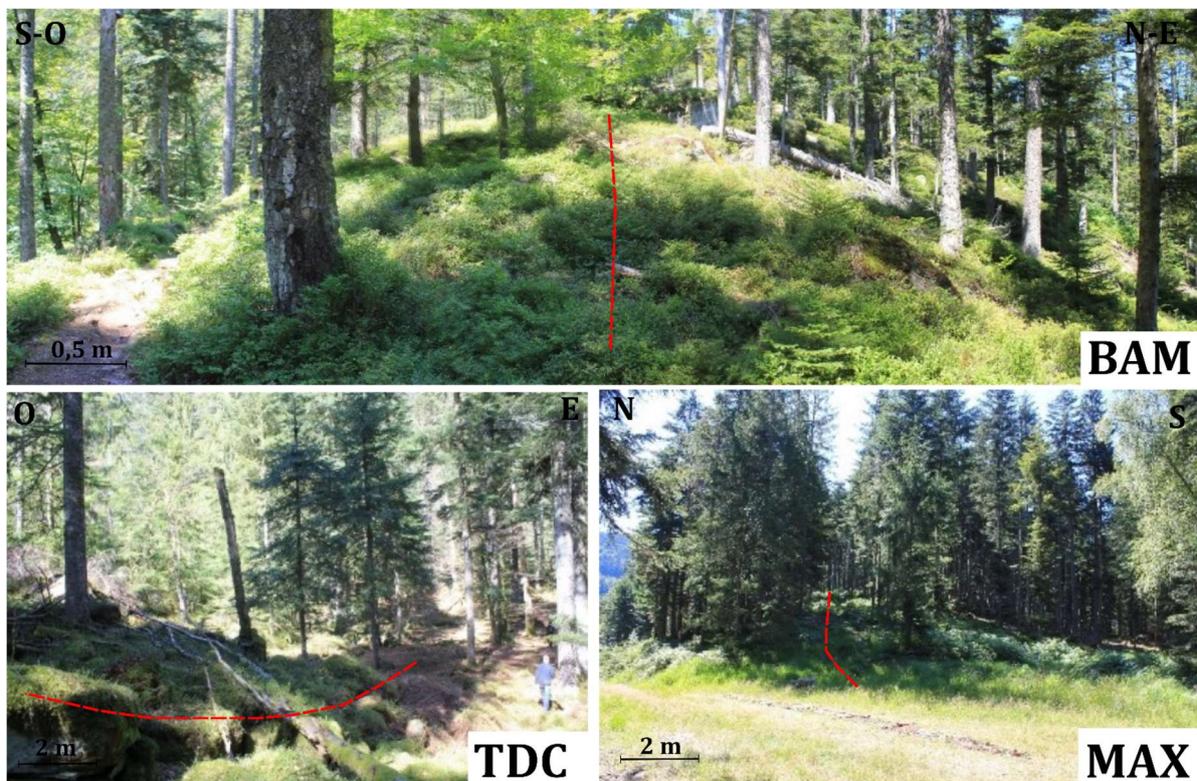


Fig. 3 : Exemple de moraines trouvées sur le terrain. En haut : moraine latérale de la Chatte Pendue; en bas gauche :
moraine interne du Trou du Cuveau; en bas droite : moraine latérale de la tourbière de la Maxe.
Fig; 3 : Example of moraines found during the field trip. At the top : lateral moraine of la Chatte Pendue; at the left bottom
: internal moraine of Trou du Cuveau; at the right bottom : lateral moraine of la Tourbière de la Maxe.

176 flanqué d'un arc morainique unique ou multiple et d'une tourbière ou d'un lac (fig. 3). Parmi
177 eux, quatre sites visités en 2020 ont fait l'objet d'une étude intégrale : le Lac de la Maix, la
178 Tourbière de la Maxe, la Chatte Pendue et le Trou du Cuveau (points A, B, C et D figs. 1 &
179 2). L'origine glaciaire est illustrée par les bourrelets morainiques identifiés sur le terrain,
180 avec, au sommet, des blocs enchâssés. La lithologie étant gréseuse, la force érosive des
181 glaciers, même faible, suffit à la mise en place de glaciers de faible extension. La formation
182 des cirques étudiés s'est très probablement effectuée sur plusieurs cycles glaciaires et
183 l'information nouvelle de cette étude est de dater le retrait des derniers glaciers dans les VG.
184 Les reconstructions de surface de ces paléoglaciers sont ensuite générées avec ArcGis et
185 l'outil GlaRe (Pellitero *et al.*, 2016). Pour cela, la ligne d'écoulement est obtenue à partir du
186 réseau hydrographique actuel et une contrainte de cisaillement qui correspond à la force de
187 mise en mouvement du glacier. Cette dernière est appliquée le long de la ligne d'écoulement
188 afin de déterminer l'épaisseur de la glace et la superficie du glacier, en contraignant le calcul
189 par les moraines en aval et le relief du site en amont.

190 Les LEG sont déterminées à partir des reconstructions cartographiques et des estimations
191 surfaciques de glace reconstruites à l'aide de la position des moraines frontales ou latérales.
192 Les variations de LEG sont des indicateurs du mouvement du glacier : un glacier qui recule
193 se caractérise par un bilan de masse négatif et donc par une élévation de sa LEG. Corrélée
194 aux valeurs de température estivale moyenne (T) et précipitations annuelles (P), la paléo-
195 LEG sera utilisée pour déterminer les conditions paléoclimatiques de chaque site (Ohmura
196 & Boettcher, 2018). Elles sont déterminées selon la méthode de Area x Altitude Balance
197 Ratio (AABR) (Osmaston, 2005). La méthode se compose d'étapes successives au cours
198 desquelles le bilan de masse est calculé pour une LEG hypothétique et se réitère tant qu'il

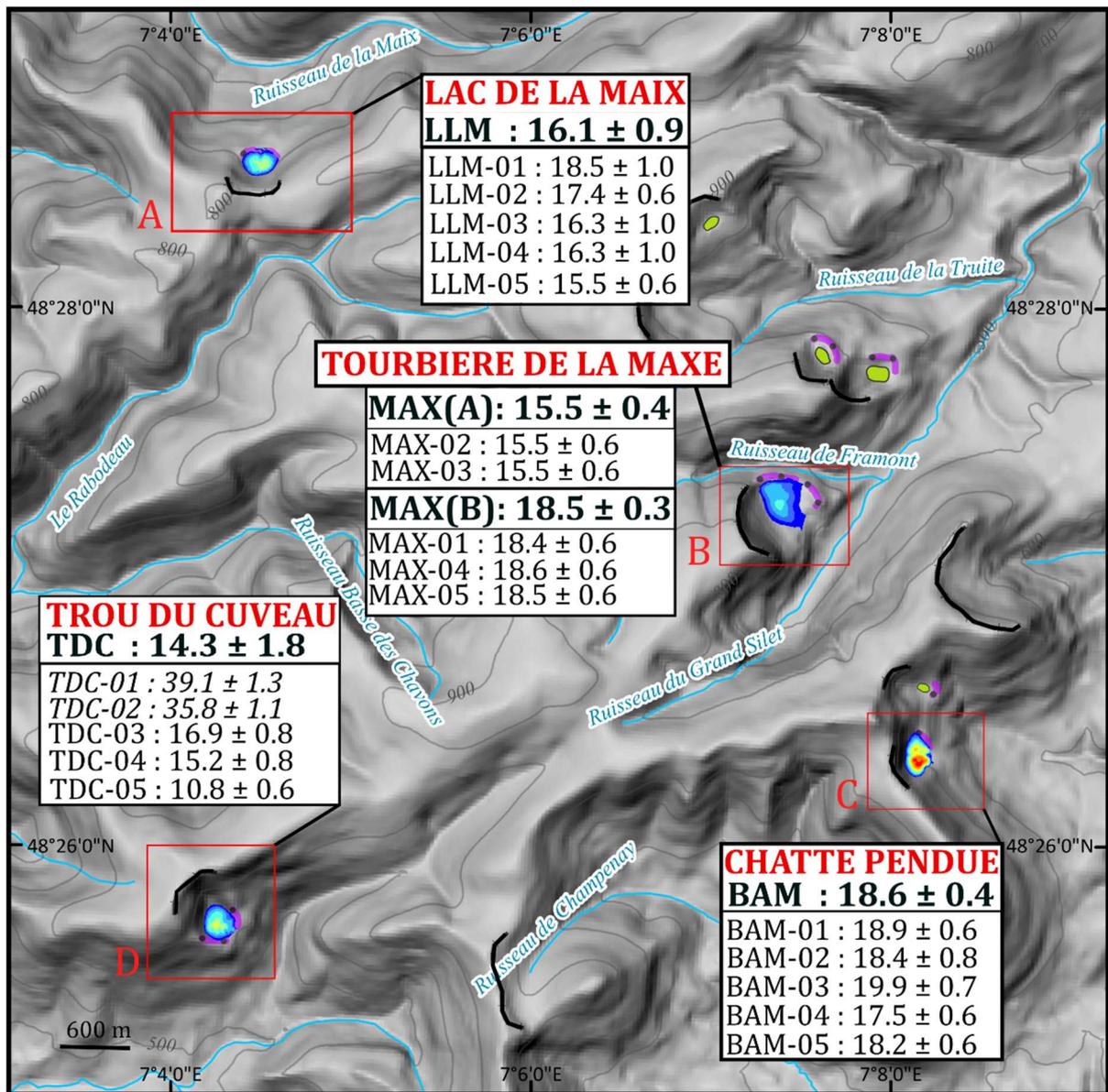


Fig. 4 : Reconstructions des glaciers de BAM, MAX, TDC et LLM obtenues à partir de GlaRe, pour une contrainte de cisaillement variable suivant la ligne d'écoulement entre 10 et 50 kPa ; en gras : âge de la moraine du glacier = ; en police normale : âge des échantillons en ka (cinq par site) ; en police italique : échantillons écartés pour le calcul de l'âge de la moraine.

Fig.4 : Glacier reconstructions for BAM, MAX, TDC and LLM obtained by using GlaRe, considering a variable shear stress along the flow line between 10 and 50 kPa. In bold : age of moraine; in normal policy : age of samples in ka (five per site); in italic : samples considered as outliers.

199 n'est pas nul. Le Balance Ratio (BR) prend en compte les différences de gradient entre les
 200 zones d'accumulation et d'ablation ainsi que leur contribution au bilan de masse et apporte

201 de la précision au calcul. La valeur du BR des glaciers de type alpin est de $1,59 \pm 0,6$
202 (Rea, 2009). Les paléotempératures moyennes estivales (T), peuvent être estimées à
203 l'altitude de la LEG à partir de la relation ($P = 264,1 T + 957$) (Ohmura & Boettcher, 2018),
204 en considérant des valeurs de P à cette même altitude. Dans le cadre de notre étude nous
205 avons considéré les précipitations comme étant équivalentes aux actuelles. Elles sont
206 déterminées en moyennant les normales de cumuls annuels moyens (sur la période 1981-
207 2010) de trois stations météorologiques locales appartenant au réseau de Météo France
208 (indiquées 1, 2 et 3 sur la fig. 1). Les précipitations variant avec l'altitude, un gradient
209 altitudinal est appliqué sur la donnée de P actuelle (fixé à 200 mm/100 m (Joly *et al.*, 2009)
210 pour prendre en compte la différence d'altitude entre la station météorologique et la LEG.
211 Afin de prendre en compte d'éventuelles variations de P au cours de l'évolution climatique,
212 les paléotempératures sont calculées pour des variations de P comprises entre - 50 et 50 %.

213 3.2 - DATATION PAR LE ^{10}BE PRODUIT *IN SITU*

214 Un total de seize échantillons ont été prélevés lors de la campagne de terrain de 2020, et
215 vingt-cinq autres lors de la campagne de terrain de 2021. Environ cinq blocs par moraine ont
216 été sélectionnés, et tous présentent une surface sommitale plane et donc une exposition
217 optimale. Les blocs sont suffisamment enchâssés dans la matrice de la moraine afin de
218 minimiser l'hypothèse de blocs éboulés ou déplacés (Heyman *et al.*, 2011 ; Tomkins *et*
219 *al.*, 2021). Enfin, les blocs échantillonnés sont répartis sur l'ensemble de l'arc morainique.
220 Les échantillons ont été prélevés à l'aide d'un marteau et d'un burin et leur position
221 enregistrée à l'aide d'un GPS (*Trimble GeoXT*) (fig. 5).



Fig. 5 : Exemples de blocs morainiques échantillonnés lors de la campagne terrain de 2021. Les blocs ont des surfaces subhorizontales et sont solidement ancrés dans la matrice des moraines.

Fig. 5 : Examples of sampled boulders during the field trip in 2021. Boulders have horizontal surfaces and are strongly anchored in the moraine matrix.

222 En plus des blocs glaciaires, deux échantillons ont été collectés en 2021 sur le Rocher de
 223 Mutzig (Point F **figs. 1 & 6**), l'un des deux points culminant des VG. Sommet constitué de
 224 blocs entièrement exposés sous l'action des forces érosives, il s'agit d'un tor, dont l'analyse
 225 amènera des réponses quant à la présence ou non d'une calotte glaciaire sur les VG et sa
 226 période de mise en place.



Fig. 6 : A gauche : Vue depuis le Rocher de Mutzig, sommet rocheux fortement altéré et fracturé. A droite : exemple d'échantillonnage et mise en évidence de l'érosion de la surface.

Fig. 6 : Left : View from the Rocher de Mutzig, rocky summit very altered and fractured. Right : example of sampling and evidence of surface erosion.

227 Les échantillons ont ensuite été traités au LN₂C (Laboratoire National des Nucléides
228 Cosmogéniques) selon un protocole mécanique et chimique modifié (Kohl &
229 Nishiizumi, 1992 ; Child *et al.*, 2000). Après un premier traitement mécanique par broyage
230 et tamisage, la fraction de granulométrie 250-710 µm est passée dans un séparateur
231 magnétique pour éliminer les minéraux tels que les magnétites et les biotites. Une flottation
232 est effectuée pour éliminer les feldspaths avant de lessiver les échantillons par bains
233 successifs d'acide fluorhydrique et nitrique afin d'obtenir un quartz le plus pur possible ([Al]
234 inférieure à 200 ppm vérifié par analyse ICP-OES). A ce quartz pur est ajouté un entraîneur
235 ⁹Be d'une concentration de 3025 ± 9 g/g, (Merchel *et al.*, 2008) avant d'être complètement
236 dissout dans de l'acide fluorhydrique. Les éluions successives des échantillons sur colonnes
237 anioniques et cationiques permettent de séparer le titane, le fer et l'aluminium du Be. L'ajout
238 d'ammoniaque permet de précipiter le Be et les rinçages successifs à l'eau ultrapure à pH 8
239 permettent l'élimination du bore-10 (¹⁰B), un isobare du ¹⁰Be. L'oxydation du Be est réalisée
240 à l'aide d'un oxydateur thermique à 900 °C. L'oxyde de Be est finalement mélangé à une
241 poudre de niobium puis pressé dans une cathode en cuivre.

242 Les cibles de BeO sont analysées par Spectrométrie de Masse par Accélérateur (SMA) pour
243 obtenir les ratios ¹⁰Be/⁹Be. Ces mesures sont effectuées à ASTER (Accélérateur pour les
244 Sciences de la Terre, Environnement et Risques), au Centre Européen de Recherche et
245 d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE), Aix-en-Provence
246 (France). Les concentrations en ¹⁰Be sont calculées à partir de ces ratios. Les concentrations
247 sont calibrées à l'aide d'un standard propre au SMA (STD-11), avec pour ratio (1,191 ±
248 0,013) × 10⁻¹¹ (Braucher *et al.*, 2015) et un temps de demi-vie pour le ¹⁰Be de 1,387 ±
249 0,012 Ma (Chmeleff *et al.*, 2010). Quatre blancs issus des préparations chimiques ont été
250 utilisés pour corriger les ratios ¹⁰Be/⁹Be des échantillons. Les valeurs de ces blancs

251 sont $1,10 \times 10^{-15}$, $1,06 \times 10^{-15}$, $8,35 \times 10^{-16}$ et $5,93 \times 10^{-15}$. Les incertitudes
252 analytiques des ratios $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ sont constituées des erreurs statistiques du comptage par le
253 SMA, des erreurs sur le standard et d'une erreur externe de 0,5% prenant en compte les effets
254 de variabilités du SMA en se basant sur des mesures long-terme du standard (Arnold *et*
255 *al.*, 2010). Les âges d'expositions sont calculés à l'aide du calculateur anciennement connu
256 sous le nom de calculateur en ligne CRONUS-Earth version 3 (Balco *et al.*, 2008)
257 (<https://hess.ess.washington.edu/>, dernier accès 2021).

258 4 - RÉSULTATS

259 4.1 - ÂGES D'EXPOSITION DES BLOCS MORAINIQUES ET ÂGES DES 260 MORAINES

261 Les résultats de la datation par le ^{10}Be apportent un nouvel éclairage dans la compréhension
262 de la dynamique glaciaire du massif du Donon au cours de la dernière glaciation. Les âges
263 d'expositions compris entre 10,8 et 39,1 ka (figs. 4 & 7, tab. 1) indiquent la mise en place de
264 moraines à la fin du Würm. L'âge de chaque moraine est alors calculé (fig. 4, tabs. 2 & 3) à
265 partir des âges individuels appartenant à un même groupe et correspond soit à la moyenne
266 des âges d'exposition si l'erreur analytique est inférieure à l'erreur géologique (i.e. l'écart
267 type de la population des âges d'exposition), soit à la moyenne pondérée par les erreurs
268 analytiques si l'erreur analytique est supérieure à l'erreur géologique. La distribution des
269 âges est complexe et montre des stades glaciaires différents au cours desquels les moraines
270 ont été formées.

| Echantillon | Lat | Lon | Altitude | Epaisseur | Facteur d'écrantage | Volume minimum | Masse dissoute | Entraîneur | $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$ | $[\text{}^{10}\text{Be}]$ | 1σ | Age d'exposition (ka, sans érosion et sans couverture neigeuse) |
|-------------------------------|--------------|-------------|----------|-----------|---------------------|----------------|----------------|------------|--------------------------------|----------------------------|-----------|--|
| | DMS | DMS | m | cm | | m^3 | g | g | $\times 10^{-13}$ | $\times 10^4 \text{ at/g}$ | | |
| Echantillonnés en 2020 | | | | | | | | | | | | |
| Chatte Pendue | | | | | | | | | | | | |
| BAM - 01 | 48°26'24,11" | 7°08'10,90" | 705 | 2,3 | 0,9242 | 1,0 | 30,3766 | 0,1125 | 1,826 | 13,589 | ± 0,464 | 18,9 ± 0,6 |
| BAM - 02 | 48°26'23,57" | 7°08'11,65" | 698 | 1,6 | 0,9242 | 6,6 | 30,9801 | 0,1248 | 1,633 | 13,213 | ± 0,571 | 18,4 ± 0,8 |
| BAM - 03 | 48°26'22,92" | 7°08'12,62" | 691 | 2,7 | 0,9242 | 5,0 | 30,4207 | 0,1261 | 1,697 | 14,130 | ± 0,500 | 19,9 ± 0,7 |
| BAM - 04 | 48°26'21,98" | 7°08'12,55" | 689 | 2,2 | 0,9206 | 4,1 | 30,4732 | 0,1244 | 1,514 | 12,408 | ± 0,442 | 17,5 ± 0,6 |
| BAM - 05 | 48°26'22,02" | 7°08'12,26" | 690 | 2,3 | 0,9242 | 4,6 | 30,0789 | 0,1236 | 1,568 | 12,956 | ± 0,408 | 18,2 ± 0,6 |
| Lac de la Maix | | | | | | | | | | | | |
| LLM - 01 | 48°28'34,84" | 7°04'33,99" | 683 | 1,6 | 0,9849 | 2,5 | 29,4202 | 0,1269 | 1,625 | 14,071 | ± 0,752 | 18,6 ± 1,0 |
| LLM - 02 | 48°28'34,09" | 7°04'35,21" | 691 | 2,0 | 0,9849 | 2,5 | 30,9768 | 0,1255 | 1,618 | 13,161 | ± 0,421 | 17,4 ± 0,6 |
| LLM - 03 | 48°28'34,38" | 7°04'34,04" | 685 | 1,7 | 0,9849 | 2,3 | 31,2584 | 0,1253 | 1,523 | 12,276 | ± 0,718 | 16,3 ± 1,0 |
| LLM - 04 | 48°28'34,82" | 7°04'33,13" | 682 | 1,9 | 0,9849 | 2,2 | 30,1141 | 0,1230 | 1,187 | 9,729 | ± 0,323 | 13,0 ± 0,4 |
| LLM - 05 | 48°28'35,76" | 7°04'30,11" | 683 | 1,8 | 0,9849 | 4,3 | 30,1719 | 0,1217 | 1,440 | 11,674 | ± 0,430 | 15,5 ± 0,6 |
| Tourbière de la Maxe | | | | | | | | | | | | |
| MAX - 01 | 48°27'17,17" | 7°07'35,87" | 618 | 3,5 | 0,9945 | 0,6 | 32,8140 | 0,1241 | 1,725 | 13,101 | ± 0,425 | 18,4 ± 0,6 |
| MAX - 02 | 48°27'16,52" | 7°07'36,01" | 616 | 2,1 | 0,9945 | 15,1 | 31,6161 | 0,1239 | 1,415 | 11,117 | ± 0,426 | 15,5 ± 0,6 |
| MAX - 03 | 48°27'22,25" | 7°07'17,90" | 668 | 1,8 | 0,9945 | 2,4 | 33,8506 | 0,1268 | 1,543 | 11,602 | ± 0,420 | 15,5 ± 0,6 |
| MAX - 04 | 48°27'22,43" | 7°07'22,91" | 653 | 3,1 | 0,9945 | 9,6 | 30,1954 | 0,1188 | 1,737 | 13,730 | ± 0,433 | 18,6 ± 0,6 |
| MAX - 05 | 48°27'21,96" | 7°07'25,75" | 647 | 1,5 | 0,9945 | 5,0 | 30,9200 | 0,1225 | 1,719 | 13,681 | ± 0,430 | 18,5 ± 0,6 |
| Trou du Cuveau | | | | | | | | | | | | |
| TDC - 01 | 48°25'45,73" | 7°04'20,52" | 747 | 4,5 | 0,9926 | 3,6 | 30,3795 | 0,1232 | 3,796 | 31,048 | ± 1,032 | 39,1 ± 1,3 |
| TDC - 02 | 48°25'44,16" | 7°04'22,27" | 740 | 3,1 | 0,9926 | 25,0 | 30,8444 | 0,1256 | 3,472 | 28,509 | ± 0,905 | 35,8 ± 1,1 |
| TDC - 03 | 48°25'42,57" | 7°04'22,92" | 735 | 2,6 | 0,9926 | 3,0 | 30,5200 | 0,1253 | 1,615 | 13,311 | ± 0,693 | 16,9 ± 0,9 |
| TDC - 04 | 48°25'38,73" | 7°04'11,94" | 748 | 2,4 | 0,9926 | 3,0 | 30,8350 | 0,1254 | 1,490 | 12,160 | ± 0,627 | 15,2 ± 0,8 |
| TDC - 05 | 48°25'38,74" | 7°04'16,59" | 720 | 2,6 | 0,9926 | 2,6 | 30,2918 | 0,1195 | 1,052 | 8,308 | ± 0,482 | 10,8 ± 0,6 |
| Blanc | | | | | | | | | | | | |
| BKCV01 | | | | | | | | 0,0923 | 0,011 | | | |
| BKVR21 | | | | | | | | 0,1248 | 0,011 | | | |
| BKVR-23 | | | | | | | | 0,1225 | 0,008 | | | |
| Echantillonnés en 2021 | | | | | | | | | | | | |
| Rocher de Mutzig | | | | | | | | | | | | |
| RDM - 01 | 48°32'57,41" | 7°14'23,53" | 1 004 | | 1,0000 | | 20,8035 | 0,4161 | 2,992 | 39,128 | ± 0,168 | 38,9 ± 1,7 |
| RDM - 02 | 48°32'57,41" | 7°14'23,53" | 1 004 | | 1,0000 | | 22,2903 | 0,4157 | 3,09 | 37,721 | ± 0,162 | 37,4 ± 1,6 |
| Blanc | | | | | | | | | | | | |
| BKVR-26 | | | | | | | | 0,4150 | 0,060 | | | |

Tab. 1 : Age d'exposition minimal et incertitudes analytiques ; les coordonnées géographiques sont référencées en WGS84; les échantillons ont été analysés par SMA par l'équipe d'ASTER; les âges sont calculés à l'aide de la version 3 du calculateur en ligne connu anciennement sous le nom de CRONUS-Earth et en prenant en compte la mise à l'échelle de Lm, une densité de $2,4 \text{ g.cm}^{-3}$ (valeur de référence pour une roche gréseuse), une atmosphère standard, une couverture neigeuse nulle et un taux d'érosion nul. Les calculs pour les échantillons RDM-01 et RDM-02 ont été effectués en prenant en compte les mêmes paramètres exceptés une densité de $2,7 \text{ g.cm}^{-3}$ (.

Tab. 1 : Minimum exposure age and analytical uncertainties ; the geographical coordinates are referenced in WGS84; samples have been analysed by AMS by the ASTER Team; ages have been calculated by using the online calculators formerly known as the CRONUS-Earth online calculators version 3, and taking into account a density of $2,4 \text{ g.cm}^{-3}$ (reference value for a sandstone), a standard atmosphere, no snow cover and no erosion. Ages of RDM-01 and RDM-02 have been calculated by taking into account the same parameters excepted a density of $2,7 \text{ g.cm}^{-3}$.

271 Toutefois, les résultats montrent une convergence des valeurs maximales pour chaque
 272 moraine : BAM-01 : 19,9 ka ; LLM-01 : 18,6 ka ; MAX-04 : 18,6 ka ; TDC-03 : 16,8 ka. Ce
 273 n'est pas le cas pour les valeurs minimales (BAM-04 : 17,5 ka ; LLM-04 : 13,0 ka ; MAX-
 274 03 : 15,5 ka ; TDC-05 : 10,8 ka), suggérant ainsi des variabilités plus ou moins marquées au
 275 sein de chaque site.

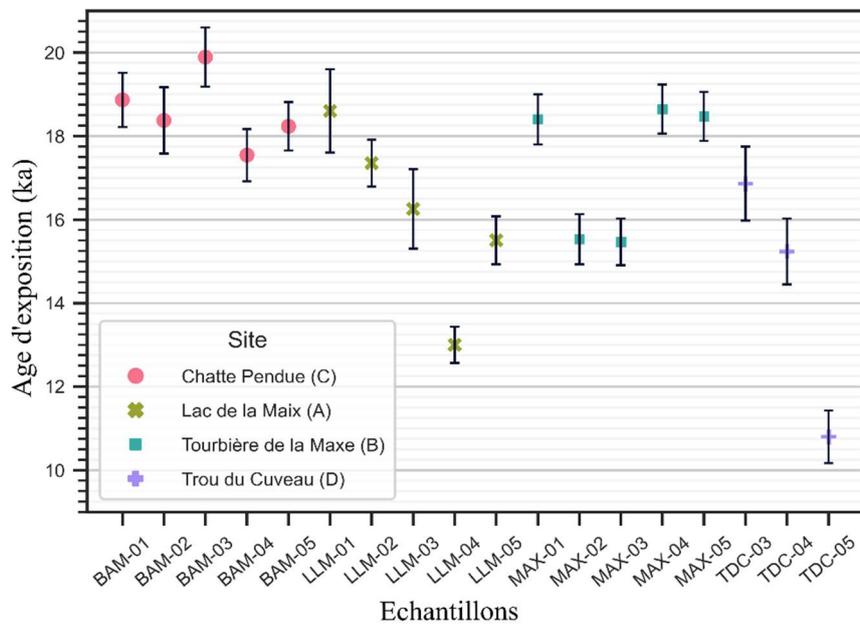


Fig. 7 : Age d'exposition des échantillons de chaque site accompagné de leurs incertitudes analytiques; Les sites de la Chatte Pendue et du Lac de la Maix présentent des résultats homogènes, contrairement à la moraine de la tourbière de la Maxe et au Trou du Cuveau où la mise en place des moraines reflète probablement des dynamiques glaciaires plus complexes. Les âges des échantillons TDC-01 (39,1 ka) et TDC-02 (35,8 ka) ne sont pas représentés pour des raisons de clarté.

Fig. 7 : Exposure age of samples of each site and their corresponding analytical uncertainties; Chatte Pendue and Lac de la Maix have homogeneous results unlike the Tourbière de la Maxe and Trou du Cuveau where the moraine formation probably reflects a more complex glacial dynamics . TDC-01 (39,1 ka) and TDC-02 (35,8 ka) exposure ages are not plotted on the graph for clarity purpose.

276 Les moraines du Lac de la Maix et de la Chatte Pendue présentent des résultats homogènes
 277 et les âges d'exposition sont associés à un âge unique de dépôt : LLM : $16,1 \pm 0,9$ ka et
 278 BAM : $18,6 \pm 0,4$ ka respectivement, confirmé par un test statistique d'Anderson – Darling
 279 (test de normalité d'une population par détection de l'écart des extrema d'une distribution
 280 par rapport à la normalité).

281 Au contraire, les moraines de la Tourbière de la Maxe et du Trou du Cuveau montrent des
 282 résultats hétérogènes. Deux groupes d'âges se distinguent pour la tourbière de la Maxe : avec

283 les échantillons MAX-02 : 15,5 ka et MAX-03 : 15,5 ka ; et les échantillons MAX-01 : 18,4
284 ka, MAX – 04 : 18,6 ka et MAX-05 : 18,5 ka. Le test statistique d'Anderson-Darling
285 confirme une distribution bimodale des données, suggérant donc que la moraine de la
286 Tourbière de la Maxe est polygénique, c'est-à-dire qu'elle aurait été construite pendant deux
287 phases distinctes d'avancée ou de stabilité du glacier, avec des âges de dépôts à $18,5 \pm 0,3$
288 ka et $15,5 \pm 0,4$ ka (fig. 4).

289 Le Trou du Cuveau présente des résultats hétérogènes avec un âge maximal de 39,1 ka
290 (TDC-01) et un âge minimal de 10,8 ka (TDC-05), s'expliquant par la complexité des dépôts
291 d'origine glaciaires du site, formés lors de différents stades glaciaires. Les échantillons TDC-
292 01 et TDC-02, datés à 39,1 ka et 35,8 ka respectivement, sont donc écartés du calcul de l'âge
293 de la moraine et considérés comme appartenant à un segment de moraine plus ancien, du fait
294 de leur localisation géomorphologique. L'échantillon TDC-05, daté à 10,8 ka, est considéré
295 comme une valeur aberrante et est donc également écarté. Plusieurs hypothèses peuvent
296 expliquer que ce bloc présente un âge significativement plus jeune : il peut être issu d'un
297 éboulement post – glaciaire, peut avoir été déplacé lors de travaux forestiers, ou encore peut
298 présenter une érosion mal évaluée sur le terrain. Les futures analyses, relevant de la
299 campagne d'échantillonnage de 2021, pourront confirmer ces hypothèses ou, à l'inverse,
300 montrer l'existence d'une moraine plus récente. De même, elles permettront également de
301 déterminer si les âges de 39,1 ka et 35,8 ka représentent effectivement un stade glaciaire ou
302 s'ils reflètent un héritage de ^{10}Be dû à une exposition antérieure au dépôt final des blocs
303 échantillonnés. La présence d'un cordon morainique, observé et échantillonné en 2021 plus
304 à l'aval de la moraine du Trou du Cuveau datée ici, suggère cependant que ces blocs
305 appartiennent à un complexe morainique plus ancien et d'extension plus importante. L'âge
306 de la moraine, de $16,0 \pm 0,8$ ka, est donc déterminé à partir des seuls échantillons TDC-03
307 et TDC-04.

308 L'extension maximale des glaciers au cours du DMG est très probablement située à l'aval
309 des moraines échantillonnées. Cependant, notre étude se focalise sur les formes glaciaires
310 les plus proches des têtes de cirques, correspondant ainsi à la phase terminale du DMG.

311 Enfin, le Rocher de Mutzig, daté par le ^{10}Be (tab. 3), complète ce jeu de données. Les âges
312 d'exposition des échantillons RDM-01 et RDM-02, $39,0 \pm 1,7$ ka et $37,4 \pm 1,6$ ka
313 respectivement, sont contemporains des âges les plus anciens calculés sur le site du Trou du
314 Cuveau (TDC-01 : $39,1 \pm 1,3$ ka et TDC-02 : $35,8 \pm 1,1$ ka), ce qui ouvre la perspective de
315 trouver des traces glaciaires plus anciennes que le DMG dans le secteur des VG. Ces
316 premiers résultats permettent d'avancer l'hypothèse que la surface du Rocher de Mutzig est
317 exposée depuis au moins 37,4 ka. Ces âges correspondent à la fin du MIS3 et peuvent
318 correspondre à une avancée glaciaire similaire à celle enregistrée dans les Alpes
319 Occidentales, sur la période 40-30 ka, déterminée par Luminescence Optiquement Stimulée
320 (OSL) sur des grains de quartz et feldspath (Gribenski *et al.*, 2021). Seuls les résultats des
321 mesures ^{26}Al combinées aux mesures ^{10}Be apporteront une explication plus complète quant
322 à l'exposition continue ou non de ces tors.

323 4.2 - RECONSTRUCTIONS DES LIGNES D'EQUILIBRE GLACIAIRE ET 324 ESTIMATIONS PALÉOCLIMATIQUES

325 Afin d'obtenir des reconstructions cohérentes avec les observations géomorphologiques, il
326 a fallu ajuster les paramètres utilisés dans l'outil GLaRE. La moyenne globale de la valeur
327 de contrainte de cisaillement est de 100 kPa (Locke, 1995)). Toutefois, dans le cas des VG,
328 les reconstructions de ces glaciers de cirque ont montré qu'elle est comprise en 10 et 50 kPa
329 maximum et est variable le long de la ligne d'écoulement du glacier.

330 Les reconstructions paléoglaciales mettent en évidence un faible développement des
331 glaciers avec des épaisseurs de glace n'excédant pas 45 m (fig. 4), justifié par les altitudes

332 de basse montagne auxquelles les glaciers se situent (entre 640 et 720 m). Les cirques sont
 333 localisés essentiellement sur les versants Nord ou Est, zones où l'ensoleillement est plus
 334 faible et les précipitations et apports de neige soufflée, du fait de la topographie et du climat
 335 vosgien, sont les plus importants. Le site de la Chatte Pendue présente l'accumulation de
 336 glace maximale (45 m), étant donné son orientation N-NE et le caractère isolé et abrité du
 337 site, le protégeant de l'exposition au soleil.

338 Les LEG sont obtenues à partir de l'outil GlaRe et sont comprises entre 646 et 728 m
 339 d'altitude (tab. 2).

| Moraine | | | Age (ka) | LEG (m) |
|---------------------------------|---|---------|------------|---------|
| Chatte Pendue | C | BAM | 18,6 ± 0,4 | 728 |
| Tourbière de la Maxe (2) | B | MAX (B) | 18,5 ± 0,3 | 646 |
| Lac de la Maix | A | LLM | 16,1 ± 0,9 | 695 |
| Tourbière de la Maxe (1) | B | MAX (A) | 15,5 ± 0,4 | 646 |
| Trou du Cuveau | D | TDC | 16,0 ± 0,8 | 729 |

340 Tab. 2 : Age des moraines pour chaque site (les lettres en majuscules correspondent aux repères sur la Fig. 1). Les LEG
 341 déterminées avec la méthode AABR pour un BR de 1,59.
 342 *Tab. 2 : Moraine ages (capital letters correspond to the marks in Fig.1). ELA have been determined by using the AABR*
 343 *method, considering a BR of 1.59*

344 Les paléotempératures moyennes estivales (T), sont estimées à l'altitude de la LEG à partir
 345 de la relation ($P = 264,1 T + 957$) (Ohmura & Boettcher, 2018).

346 Ces résultats sont présentés dans le tab. 2.

347 Les résultats montrent, en prenant le scénario de variation de précipitations de 0 %, que les
 348 températures étaient comprises entre 1,8 et 2,4 °C sur la période entre 18,6 et 15,5 ka. Le
 349 manque de données sur les paléoprécipitations limite l'interprétation de nos résultats et
 350 mettent en évidence la nécessité d'obtenir des simulations plus précises à l'échelle nationale,
 351 voire régionale, de l'évolution des paléoprécipitations ; ces résultats pourront alors améliorer
 352 l'exactitude des reconstructions climatiques.

| Moraine | Age (ka) | LEG estimée (m) | Paléo T estimées à partir de variation des précipitations ($P = 264,1 \times T + 957$) °C | | | | | | | | | | |
|-----------|------------|-----------------|--|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | | -50% | -40% | -30% | -20% | -10% | 0% | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% |
| BAM | 18,6 ± 0,4 | 728 | -0,6 | 0,0 | 0,6 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | 3,0 | 3,6 | 4,2 | 4,8 | 5,4 |
| MAX (b) | 18,5 ± 0,3 | 646 | -0,9 | -0,4 | 0,1 | 0,7 | 1,2 | 1,8 | 2,3 | 2,8 | 3,4 | 3,9 | 4,5 |
| LLM | 16,1 ± 0,9 | 695 | -0,7 | -0,2 | 0,4 | 1,0 | 1,6 | 2,1 | 2,7 | 3,3 | 3,9 | 4,4 | 5,0 |
| MAX (a) | 15,5 ± 0,4 | 646 | -0,9 | -0,4 | 0,1 | 0,7 | 1,2 | 1,8 | 2,3 | 2,8 | 3,4 | 3,9 | 4,5 |
| TDC | 16,0 ± 0,8 | 729 | -0,6 | 0,0 | 0,6 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | 3,0 | 3,6 | 4,2 | 4,8 | 5,4 |
| Théorique | 0 | 2600 | | | | | | | | | | | |

353 Tab. 3 : Paléotempératures moyennes estivales à l'altitude des LEG pour chaque site, pour des P variables par rapport au
354 P actuelles, 0% correspondant à une valeur de $P = P$ actuelles; les calculs sont effectués à partir de la relation (Ohmura &
355 Boettcher, 2018); les LEG sont estimées à partir de (Osmaston, 2005).

356 *Tab. 3 : Mean summer paleotemperatures estimated by using the ELA and considering variable P; 0% corresponding to*
357 *current P value; we used the Ohmura & Boettcher (2018) relation; and ELA have been estimated from Osmaston (2005).*

358 5 - DISCUSSION

359 5.1 - PALEOCLIMAT DES VOSGES GRESEUSES DURANT LE DERNIER 360 MAXIMUM GLACIAIRE

361 En prenant le scénario où les paléoprécipitations sont équivalentes aux actuelles (environ
362 1200 mm par an), il apparaît que les températures moyennes estivales étaient faibles,
363 oscillant entre 1,8 et 2,4 °C sur la période de 19 à 14 ka. Ces faibles températures définissent
364 des anomalies de températures moyennes estivales entre -14,5 et -13,4°C par rapport à
365 l'actuel : 16,1 °C pour la Chatte Pendue et le Trou du Cuveau, 16,3°C au Lac de la Maix et
366 16,6 °C à la Tourbière de la Maxe, température moyenne estivale estimée à l'altitude de
367 chaque LEG. Ces valeurs n'étant pas négatives, elles indiquent que les précipitations dans
368 le secteur auraient pu être suffisamment abondantes pour permettre un enneigement
369 susceptible de nourrir des glaciers. Le scénario pour lequel les précipitations varient de 50
370 % suppose des températures estivales moyenne de 4,5 à 5,0 °C. Ces températures sont très
371 élevées et l'hypothèse d'une anomalie positive de 50% sur les précipitations ne s'accorde

372 pas avec les données de reconstruction paléoclimatique de la tourbière de la Grande Pile
373 (Guiot *et al.*, 1989). Ces travaux ont établi des anomalies de précipitations annuelles sur la
374 période entre 18 et 10 ka comprises entre -200 et 600 mm en considérant une valeur actuelle
375 de 1 080 mm. Ces anomalies suggèrent ainsi une variation de paléoprécipitations annuelles
376 comprise entre -18% et -55 % sur la période. Les scénarios les plus favorables dans le cas
377 des VG sont donc ceux à anomalies négatives, comprises entre 0 et -50%. Toutefois, les
378 climats et paléoclimats des VG et du secteur de la Grande Pile étant localement variables,
379 les scénarios à anomalies positives (ou plus importantes) ne sont pas écartés. L'anomalie de
380 température sur la période entre 14 et 19 ka varie entre -14,5 et -13,4 °C dans les VG et est
381 à mettre en perspective avec l'anomalie de température reconstruite sur la même période
382 mais sur des bases polliniques et sédimentologiques à la Grande Pile et qui varie entre -9,7
383 et -10,6 °C.

384 5.2 - DYNAMIQUE GLACIAIRE DES VOSGES GRESEUSES CORRÉLÉE AUX 385 DONNÉES RÉGIONALES

386 Ces premiers résultats suggèrent que trois épisodes d'avancée glaciaire, au moins, ont eu
387 lieu dans les VG au cours de la dernière glaciation de Würm. Les âges d'exposition obtenus
388 sur les moraines externes du Trou du Cuveau (39,1 et 35,8 ka) et sur le Rocher de Mutzig
389 (39,0 et 37,4 ka) sont associés au stade MIS3. Les moraines de la Chatte Pendue et de la
390 Tourbière de la Maxe (2) sont plus jeunes (respectivement 18,6 et 18,5 ka) et ont
391 probablement été déposées à la fin du DMG. La mise en place de ces moraines en période
392 de déglaciation est cohérente avec l'évènement Heinrich Stadial 1 (HS1) entre 18,2 et 16,7
393 ka. Il est associé à un ralentissement de la déglaciation suite à l'arrivée d'eaux douces en
394 Atlantique Nord venant des inlandsis scandinave et laurentidien, qui ont perduré suites aux
395 débâcles provenant de la calotte laurentide, perturbant ainsi la circulation méridienne de

396 retournement Atlantique et transportant la chaleur des tropiques par l'intermédiaire du
397 courant de surface du Gulf Stream (Toucanne *et al.*, 2015). Les moraines du Trou du Cuveau,
398 de la Tourbière de la Maxe (1) et du Lac de la Maix ont des âges similaires (14,3, 15,5 et
399 16,1 ka respectivement), et sont probablement liées au même épisode de refroidissement
400 pendant le Tardiglaciaire.

401 Les stades glaciaires exprimés dans les VG que nous avons cartographiés et datés sont
402 corrélés à des périodes froides ou de refroidissement (fig. 8). L'évolution de la concentration
403 en $\delta^{18}\text{O}$ (corrélée aux températures de surface) dans la carotte de glace NorthGRIP au
404 Groenland (Buizert *et al.*, 2018) représente l'évolution moyenne du climat à l'échelle
405 planétaire et a permis d'établir l'évolution du climat au cours de la glaciation Würm. Les
406 VG ont été englacées au cours du DMG et le sont restées jusqu'au milieu du Tardiglaciaire,
407 périodes pendant lesquelles les températures étaient globalement les plus basses. De

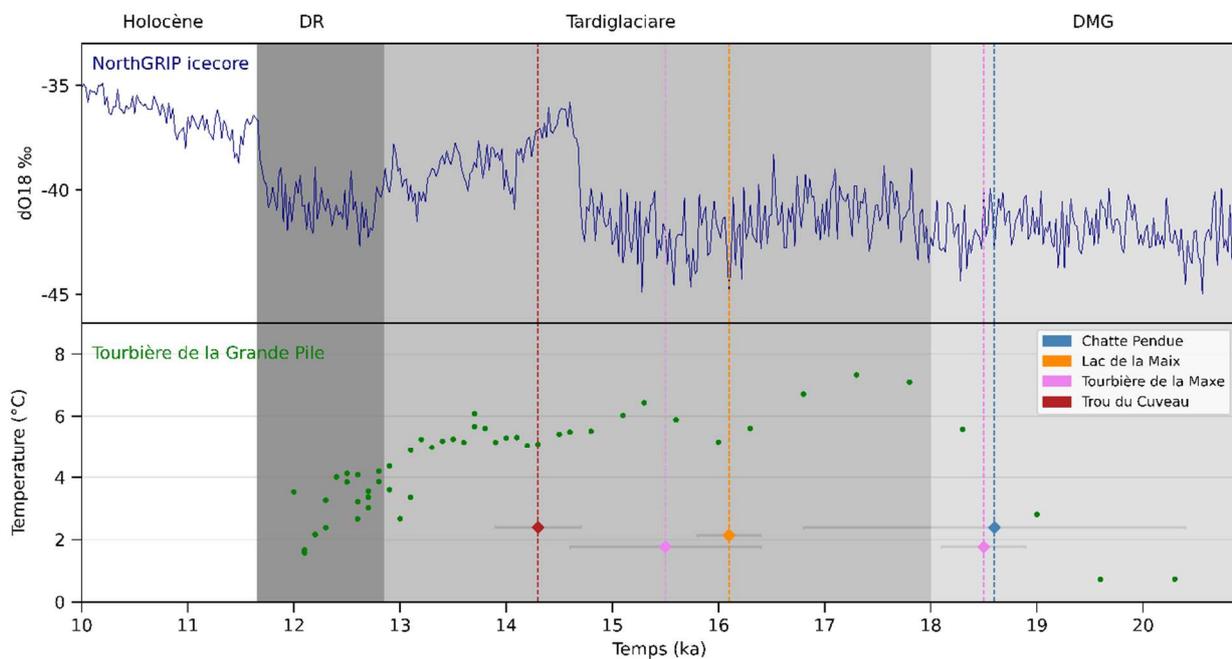


Fig. 8 : Evolution des concentrations en $\delta^{18}\text{O}$ d'après la carotte de glace NorthGrip (Buizert *et al.*, 2018) ; Température moyenne annuelle estimée à la tourbière de la Grande Pile (Guiot *et al.*, 1993) ; Age des moraines et température moyenne estivale déterminée pour une valeur de précipitation moyenne annuelle équivalente à l'actuel, sur la période de 22 à 8 ka.

Fig. 8 : Evolution of $\delta^{18}\text{O}$ concentrations, from the NorthGrip ice core (Buizert *et al.*, 2018); Mean annual temperature estimated at the tourbière de la Grande Pile (Guiot *et al.*, 1993); Moraine ages and mean summer temperature determined with a value of mean annual precipitation equivalent to actual during the period 22 to 8 ka.

408 nombreux glaciers de cirques étaient en place à la fin du DR (Darmois-Théobald, 1972),
409 identifiés selon des arguments géomorphologiques, les datations au ^{14}C et l'étude pollinique
410 de la tourbière de la Grande Pile, située dans les Vosges du Sud (fig. 1), montrent une
411 période de grand froid entre 25 et 15 cal ka (Guiot *et al.*, 1993). Cette étude pollinique
412 consiste en la recherche d'analogues de spectres polliniques fossiles parmi des spectres
413 modernes de références, en considérant que les climats associés à une végétation et à un
414 spectre pollinique types présentent des analogues actuels (Guiot, 1990).

415 Les datations confirment que la déglaciation des VG s'est faite indépendamment des Vosges
416 du Sud. La déglaciation dans les Vosges du Sud s'est effectuée de manière tardive, et les
417 glaciers ont pu localement persister jusqu'au DR. Les âges d'exposition des moraines du
418 bassin de la Grande Fecht, rivière du département du Haut Rhin, située dans les Vosges du
419 Sud, déterminés par datation au ^{10}Be , montrent que le retrait du glacier s'est effectué à la fin
420 du DR et a donc été plus tardif (Mercier *et al.*, 2000). Ces données sont corrélées avec le
421 début de sédimentation des tourbières et des séquences palynologiques il y a au moins 9 ka
422 (Flageollet, 2002). En revanche, les glaciers des VG n'ont pas persisté jusqu'au DR. L'étude
423 du forage de la tourbière de la Maxe, par palynologie et sédimentologie, apporte des
424 informations sur le retrait de la glace dans le cirque de la Maxe (Walter-Simonnet *et*
425 *al.*, 2010). La présence de cendres volcaniques Vedde et Laacher See Tephra, datées
426 respectivement à 12,1 ka (Lane *et al.*, 2013) et 13,0 ka (Reinig *et al.*, 2021), permet de
427 contraindre indirectement la disparition des glaciers dans ce secteur des Vosges. Le spectre
428 pollinique de la tourbière de la Maxe débute il y a au moins 13 ka. Il est associé à un
429 environnement dépourvu de glace, et permet d'écarter l'hypothèse d'une déglaciation tardive
430 dans les VG s'étalant sur la période du DR.

431 5.3 - VERS UNE COMPRÉHENSION DE LA CHRONOLOGIE DE RETRAIT DES
432 GLACIERS SUR UNE ÉCHELLE TEMPORELLE PLUS LONGUE AU COURS DE LA
433 GLACIATION WÜRMIENNE

434 Le Trou du Cuveau présente des âges d'exposition supérieurs à 35 ka, et se caractérise par
435 divers complexes morainiques issus de différents stades glaciaires; il représente donc un site
436 intéressant pouvant concentrer, à une échelle réduite, la chronologie de
437 glaciation/déglaciation des Vosges. Ces deux âges de $39,1 \pm 1,3$ ka et $35,8 \pm 1,1$ ka suggèrent
438 donc un englacement des VG au cours du MIS3 (57 à 30 ka). L'extension de ces glaciers
439 était plus importante que celle des glaciers du DMG dont, le Trou du Cuveau est à ce jour le
440 seul site échantillonné ayant conservé des moraines de cet épisode glaciaire. L'étude ne
441 remet pas en cause la présence éventuelle de moraine en aval pouvant être associée à cette
442 période, qui n'ont à ce jour, pas encore été observées. Les âges d'exposition obtenus sur le
443 Rocher de Mutzig, argumentent en faveur d'un englacement à l'altitude de 1 008 m jusqu'à
444 au moins 38 ka, corroborent les données obtenues sur le site du Trou du Cuveau et suggèrent
445 la présence d'une petite calotte de glace sur l'ensemble des VG. Cette hypothèse ne pourra
446 toutefois être validée que par l'analyse en cours de nouveaux sites (sites E et G fig. 1) et les
447 datations par l'²⁶Al des échantillons du Rocher de Mutzig. Les résultats viendront compléter
448 le jeu de données chronologiques actuel et permettront d'affiner les reconstructions
449 paléoclimatiques effectuées pour les VG.

450 5.4 - L'IMPACT DES GLACIERS VOSGIENS SUR LA DYNAMIQUE DES
451 POPULATIONS

452 L'étude de l'évolution des glaciers dans les VG permet également de mieux documenter les
453 dynamiques de peuplement des premiers européens le long de l'espace rhénan. En effet, les
454 populations préhistoriques ont dû s'adapter aux importantes variations climatiques qui ont

455 rythmé le Quaternaire et notamment la glaciation würmienne, entraînant des stratégies
456 cynégétiques, de déplacement et d'implantation contraintes par des périodes d'enneigement
457 ou de glaciation plus ou moins marquées, comme celle documentée dans les VG durant le
458 Tardiglaciaire avec des T moyennes estivales estimées à 2,1°C. L'enneigement et la
459 fermeture de certains passages par les glaces et la présence d'une calotte glaciaire, ont, à
460 n'en pas douter, eu un impact sur la présence de certaines espèces et sur la migration
461 saisonnière des grands troupeaux d'herbivores (rennes, mammouth, etc.) traqués par les
462 hommes pour la chasse, ainsi que sur l'accessibilité des gîtes de silex exploités pour la
463 confection de l'outillage et de l'armement.

464 Bien qu'il soit communément admis une désertion des populations humaines dans l'Est de
465 la France ou en Allemagne durant les maximums glaciaires, notamment durant le DMG, les
466 questions relatives aux modalités de la reconquête de ces territoires se posent dès le
467 Badegoulien et le Magdalénien supérieur, reconquêtes attestées par la découverte des sites
468 archéologiques en Alsace (Morschwiller-le-Bas et Wolschwiller (Koehler *et al.*, 2016 ;
469 Koehler *et al.*, 2019), en Allemagne (Munzingen (Floss & Terberger, 1987 ; Pasda, 1998))
470 et dans le nord de la Suisse (Kastelhöhle (Le Tensorer, 1999)). Il reste à comprendre d'où
471 viennent ces populations et si les cols, les vallées et les plaines ont pu être empruntés et à
472 partir de quand.

473 **6 - CONCLUSIONS**

474 La datation des formes glaciaires des VG a confirmé l'englacement du massif au cours de la
475 dernière glaciation. Le retrait des glaciers a débuté il y a environ ~19 ka à la fin du DMG
476 pour les sites de la Chatte Pendue (18,6 k ± 0,4 ka), et de la Tourbière de la Maxe (2) (18,5
477 ± 0,3 ka) et s'est prolongée sur quelques milliers d'années pour les sites du Lac de la Maix,
478 de la Tourbière de la Maxe (1), par son caractère polygénique, et du Trou du Cuveau

479 (respectivement, $16,1 \pm 0,9$ ka, $15,5 \pm 0,4$ ka et $14,3 \pm 1,8$ ka), selon les spécificités
480 caractéristiques à chaque glacier (altitude, orientation,...). Ces âges d'exposition confirment
481 que les paléoglaciers ont disparu avant le début du DR il y a 13,0 ka. Les extensions spatiales
482 des paléoglaciers ont servi de base pour une reconstruction paléoclimatique du secteur des
483 VG, la température moyenne estivale de l'époque ayant été estimée en moyenne à $2,1^{\circ}\text{C}$,
484 pour des précipitations annuelles semblables aux actuelles (environ 1200 mm/an). L'analyse
485 en cours de nouveaux sites dans les VG et la datation par l' ^{26}Al des échantillons du Rocher
486 de Mutzig, apporteront des informations nouvelles et permettront de confirmer l'hypothèse
487 de la présence d'une calotte glaciaire sur ce secteur des Vosges antérieure au DMG.
488 L'analyse de l'évolution paléoclimatique, couplée à la dynamique glaciaire et son emprise
489 géographique dans le massif des Vosges, sont des éléments essentiels pour la compréhension
490 de la place de l'Homme dans la région, de son évolution et des contraintes de déplacement
491 liées à la présence de glaciers.

492 **REMERCIEMENTS**

493 Ces travaux ont été soutenus par le Programme Collectif de Recherches (PCR) dédié au
494 "Paléolithique et au Mésolithique d'Alsace, des massifs montagneux à la plaine :
495 Ressources, localisation des sites et approches territoriales" (PaleoEls) et financé par le
496 Service Régional de l'Archéologie du Grand Est, site de Strasbourg. Le projet a également
497 bénéficié de financement d'un AAP interne du CEREGE (APIC 2020). Le spectromètre
498 national ASTER (CEREGE, Aix-en-Provence) est financé par l'INSU/CNRS, l'ANR à
499 travers le programme Projets thématiques d'excellence pour l' « Equipements d'excellence »
500 ASTER-CEREGE et l'IRD.

501 Nous remercions l'équipe d'ASTER pour leur travail de qualité. Je remercie
502 personnellement Vincent pour son accompagnement et ses enseignements durant tout le
503 projet.

504 **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

505

506

507

508

509

510

511

512

**ARNOLD M., MERCHEL S., BOURLÈS D.L., BRAUCHER R.,
BENEDETTI L., FINKEL R.C., AUMAÎTRE G., GOTTDANG A. & KLEIN
M., 2010** - The French Accelerator Mass Spectrometry Facility ASTER: Improved
Performance and Developments. *Nuclear Instruments and Methods in Physics
Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **268**, (11),
1954-1959, 10.1016/j.nimb.2010.02.107.

513

514

515

516

517

518

BALCO G., STONE J.O., LIFTON N.A. & DUNAI T.J., 2008 - A Complete
and Easily Accessible Means of Calculating Surface Exposure Ages or Erosion
Rates from ¹⁰Be and ²⁶Al Measurements. *Quaternary Geochronology*, **3**, (3),
174-195, 10.1016/j.quageo.2007.12.001.

519

520

521

522

523

BENN D.I. & LEHMKUHL F., 2000 - Mass balance and equilibrium-line
altitudes of glaciers in high-mountain environments. *Quaternary International*,
65-66, 15-29, 10.1016/S1040-6182(99)00034-8.

524

525

526

527

528

529

530

**BRAUCHER R., GUILLOU V., BOURLÈS D.L., ARNOLD M., AUMAÎTRE
G., KEDDADOUCHE K. & NOTTOLI E., 2015** - Preparation of ASTER In-
House ¹⁰Be/⁹Be Standard Solutions. *Nuclear Instruments and Methods in Physics
Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **361**, 335-340,
10.1016/j.nimb.2015.06.012.

531

532

533

534

535

536

**BUIZERT C., KEISLING B.A., BOX J.E., HE F., CARLSON A.E.,
SINCLAIR G. & DECONTO R.M., 2018** - Greenland-Wide Seasonal
Temperatures During the Last Deglaciation. *Geophysical Research Letters*, **45**, (4),
1905-1914, 10.1002/2017GL075601.

537

538

539

540

CHÈVREMONT P., 2008 - *Carte géologique harmonisée du département des
Vosges (88). Notice géologique. BRGM/RP-56439- FR. 2008.*

541

542

543

544

CHILD D., ELLIOTT G., MIFSUD C., SMITH A.M. & FINK D., 2000 -
Sample Processing for Earth Science Studies at ANTARES. *Nuclear Instruments
and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and*

- 545 *Atoms*, **172**, (1), 856-860, 10.1016/S0168-583X(00)00198-1.
546
- 547
548 **CHMELEFF J., BLANCKENBURG F. VON, KOSSERT K. & JAKOB D.,**
549 **2010** - Determination of the ¹⁰Be Half-Life by Multicollector ICP-MS and Liquid
550 Scintillation Counting. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*
551 *Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **268**, (2), 192-199,
552 10.1016/j.nimb.2009.09.012.
553
- 554
555 **CLARK P.U., DYKE A.S., SHAKUN J.D., CARLSON A.E., CLARK J.,**
556 **WOHLFARTH B., MITROVICA J.X., HOSTETLER S.W. & MCCABE**
557 **A.M., 2009** - The Last Glacial Maximum. *Science (New York, N.Y.)*, **325**, (5941),
558 710-714, 10.1126/science.1172873.
559
- 560
561 **DARMOIS-THÉOBALD M., 1972** - Cirques glaciaires et niches de nivation sur
562 le versant lorrain des Vosges à l'Ouest du Donon. *Revue Géographique de l'Est*,
563 **12**, (1), 55-67, 10.3406/rge.1972.1222.
564
- 565
566 **FLAGEOLLET J.-C., 2002** - Sur les traces des glaciers vosgiens.
567 *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, **8**, (4), 340-341.
568
- 569
570 **FLOSS H. & TERBERGER T., 1987** - Die Konzentration II von Andernach. Ein
571 Beitrag zur Kenntnis der Variationsbreite spätjungpaläolithischer
572 Steinartefaktensembles. *Die Konzentration II von Andernach. Ein Beitrag zur*
573 *Kenntnis der Variationsbreite spätjungpaläolithischer Steinartefaktensembles*, **17**,
574 (3), 287-294.
575
- 576
577 **GRIBENSKI N., VALLA P.G., PREUSSER F., ROATTINO T., CROUZET**
578 **C. & BUONCRISTIANI J.-F., 2021** - Out-of-phase Late Pleistocene glacial
579 maxima in the Western Alps reflect past changes in North Atlantic atmospheric
580 circulation. *Geology*, **49**, (9), 1096-1101, 10.1130/G48688.1.
581
- 582
583 **GUIOT J., 1990** - Methodology of palaeoclimatic reconstruction from pollen in
584 France: Palaeogeography. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*,
585 **80**, 49-69, 10.1016/0031-0182(90)90033-4.
586

587
588
589
590
591
592
593

GUIOT J., DEBEAULIEU J., CHEDDADI R., DAVID F., PONEL P. & REILLE M., 1993 - THE CLIMATE IN WESTERN-EUROPE DURING THE LAST GLACIAL INTERGLACIAL CYCLE DERIVED FROM POLLEN AND INSECT REMAINS. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **103**, (1-2), 73-93, 10.1016/0031-0182(93)90053-L.

594
595
596
597
598
599

GUIOT J., PONS A., DEBEAULIEU J. & REILLE M., 1989 - A 140,000 YEARS CONTINENTAL CLIMATE RECONSTRUCTION FROM 2 EUROPEAN POLLEN RECORDS. *Nature*, **338**, (6213), 309-313, 10.1038/338309a0.

600
601
602
603
604
605

HEYMAN J., STROEVEN A.P., HARBOR J.M. & CAFFEE M.W., 2011 - Too Young or Too Old: Evaluating Cosmogenic Exposure Dating Based on an Analysis of Compiled Boulder Exposure Ages. *Earth and Planetary Science Letters*, **302**, (1), 71-80, 10.1016/j.epsl.2010.11.040.

606
607
608
609
610
611
612
613

HOFMANN F.M., PREUSSER F., SCHIMMELPFENNIG I., LÉANNI L., & ASTER TEAM (GEORGES AUMAÎTRE, KARIM KEDDADOUCHE & FAWZI ZAID, 2022 - Late Pleistocene Glaciation History of the Southern Black Forest, Germany: ¹⁰Be Cosmic-ray Exposure Dating and Equilibrium Line Altitude Reconstructions in Sankt Wilhelmer Tal. *Journal of Quaternary Science*, **37**, (4), 688-706, 10.1002/jqs.3407.

614
615
616
617
618
619

JOLY D., THIERRY B., CARDOT H., CAVAILHÈS J., HILAL M. & WAVRESKY P., 2009 - Interpolation par régressions locales : application aux précipitations en France. *L'Espace géographique*, **38**, (2), 157-170, 10.3917/eg.382.0157.

620
621
622
623
624
625

KOEHLER H., BACHELLERIE F., AFFOLTER J., BONILAURI S., KUCHARSKI M., SALOMON H. & PATRICE W., 2016 - Occupations du Paléolithique supérieur de Morschwiller-le-Bas. *Cahiers alsaciens d'archéologie d'art et d'histoire*, **LIX**, 5.

626
627
628
629
630

KOEHLER H., GRISELIN S., BACHELLERIE F., BIGNON-LAU O. & MEVEL L., 2019 - Neue Ergebnisse zum Jüngeren Magdalénien imElsass. Die Fundstellen Morschwiller-le-Bas undWolschwiller (Dép. Haut-Rhin, Frankreich). *In Das Magdalénien im Südwesten Deutschlands, im Elsass und in der Schweiz*.

631 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02896409>.
632

633
634 **KOHL C.P. & NISHIZUMI K., 1992** - Chemical Isolation of Quartz for
635 Measurement of In-Situ-Produced Cosmogenic Nuclides. *Geochimica et*
636 *Cosmochimica Acta; (United States)*, **56:9**, 10.1016/0016-7037(92)90401-4.
637

638
639 **LANE C.S., BRAUER A., BLOCKLEY S.P.E. & DULSKI P., 2013** - Volcanic
640 ash reveals time-transgressive abrupt climate change during the Younger Dryas.
641 *Geology*, **41**, (12), 1251-1254, 10.1130/G34867.1.
642

643
644 **LAUTERBACH S., BRAUER A., ANDERSEN N., DANIELOPOL D.L.,**
645 **DULSKI P., HÜLS M., MILECKA K., NAMIOTKO T., OBREMSKA M.,**
646 **VON GRAFENSTEIN U. & PARTICIPANTS D., 2011** - Environmental
647 Responses to Lateglacial Climatic Fluctuations Recorded in the Sediments of Pre-
648 Alpine Lake Mondsee (Northeastern Alps). *Journal of Quaternary Science*, **26**, (3),
649 253-267, 10.1002/jqs.1448.
650

651
652 **LE TENSORER J.-M., 1999** - Le Paléolithique en Suisse. *Bulletin de la Société*
653 *préhistorique française*, **96**, (1), 79-79.
654

655
656 **LOCKE W.W., 1995** - Modelling of Icecap Glaciation of the Northern Rocky
657 Mountains of Montana. *Geomorphology*, **14**, (2), 123-130, 10.1016/0169-
658 555X(95)00053-5.
659

660
661 **MERCHEL S., ARNOLD M., AUMAÎTRE G., BENEDETTI L., BOURLÈS**
662 **D.L., BRAUCHER R., ALFIMOV V., FREEMAN S.P.H.T., STEIER P. &**
663 **WALLNER A., 2008** - Towards More Precise ¹⁰Be and ³⁶Cl Data from
664 Measurements at the 10–14 Level: Influence of Sample Preparation. *Nuclear*
665 *Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with*
666 *Materials and Atoms*, **266**, (22), 4921-4926, 10.1016/j.nimb.2008.07.031.
667

668
669 **MERCIER J.-L. & JESER N., 2004** - The Glacial History of the Vosges
670 Mountains. In J. Ehlers et P.L. Gibbard (eds.), *Developments in Quaternary*
671 *Sciences*. Quaternary Glaciations Extent and Chronology. Elsevier, 113-118,
672 10.1016/S1571-0866(04)80061-7.
673

674
675
676
677
678

MERCIER J.-L., KALVODA J., BOURLÈS D.L., BRAUCHER R. & ENGEL Z., 2000 - Preliminary results of ^{10}Be dating of glacial landscape in the Giant Moutains. *Geographica*, **35**, 157-170.

679
680
681
682
683

MONJUVENT G. & NICOUD G., 1988 - Modalités et chronologie de la déglaciation würmienne dans l'arc alpin occidental et les massifs français : synthèse et réflexions. *Quaternaire*, **25**, (2), 147-156, 10.3406/quate.1988.1876.

684
685
686
687
688

OHMURA A. & BOETTCHER M., 2018 - Climate on the equilibrium line altitudes of glaciers: theoretical background behind Ahlmann's P/T diagram. *Journal of Glaciology*, **64**, 1-17, 10.1017/jog.2018.41.

689
690
691
692
693
694

OSMASTON H., 2005 - Estimates of Glacier Equilibrium Line Altitudes by the Area \times Altitude, the Area \times Altitude Balance Ratio and the Area \times Altitude Balance Index Methods and Their Validation. *Quaternary International*, **138-139**, 22-31, 10.1016/j.quaint.2005.02.004.

695
696
697
698
699

PASDA C., 1998 - *Wildbeuter im archäologischen Kontext: das Paläolithikum in Südbaden*. Archäologie im Südwesten, **ARRAY(0x56495a7ce308)**. Folio-Verlag Dr. G. Wesselkamp, Bad Bellingen, 179 Seiten p.

700
701
702
703
704
705

PELLITERO R., REA B.R., SPAGNOLO M., BAKKE J., IVY-OCHS S., FREW C.R., HUGHES P., RIBOLINI A., LUKAS S. & RENSSSEN H., 2016 - GlaRe, a GIS tool to reconstruct the 3D surface of palaeoglaciers. *Computers and Geosciences*, (94), 77-85, 10.1016/j.cageo.2016.06.008.

706
707
708
709
710
711

RABATEL A., LETRÉGUILLY A., DEDIEU J.-P. & ECKERT N., 2013 - Changes in Glacier Equilibrium-Line Altitude in the Western Alps from 1984 to 2010: Evaluation by Remote Sensing and Modeling of the Morpho-Topographic and Climate Controls. *The Cryosphere*, **7**, (5), 1455-1471, 10.5194/tc-7-1455-2013.

712
713
714
715
716

REA B.R., 2009 - Defining Modern Day Area-Altitude Balance Ratios (AABRs) and Their Use in Glacier-Climate Reconstructions. *Quaternary Science Reviews*, **28**, (3), 237-248, 10.1016/j.quascirev.2008.10.011.

717
718
719
720
721
722
723

REINIG F., WACKER L., JÖRIS O., OPPENHEIMER C., GUIDOBALDI G., NIEVERGELT D., ADOLPHI F., CHERUBINI P., ENGELS S., ESPER J., LAND A., LANE C., PFANZ H., REMMELE S., SIGL M., SOOKDEO A. & BÜNTGEN U., 2021 - Precise date for the Laacher See eruption synchronizes the Younger Dryas. *Nature*, **595**, (7865), 66-69, 10.1038/s41586-021-03608-x.

724
725
726
727
728
729

REIXACH T., DELMAS M., BRAUCHER R., GUNNELL Y., MAHÉ C. & CALVET M., 2021 - Climatic Conditions between 19 and 12 Ka in the Eastern Pyrenees, and Wider Implications for Atmospheric Circulation Patterns in Europe. *Quaternary Science Reviews*, **260**, 106923, 10.1016/j.quascirev.2021.106923.

730
731
732
733
734
735
736

RINTERKNECHT V.R., CLARK P.U., RAISBECK G.M., YIOU F., BITINAS A., BROOK E.J., MARKS L., ZELCS V., LUNKKA J.P., PAVLOVSKAYA I.E., PIOTROWSKI J.A. & RAUKAS A., 2006 - The Last Deglaciation of the Southeastern Sector of the Scandinavian Ice Sheet. *Science (New York, N.Y.)*, **311**, (5766), 1449-1452, 10.1126/science.1120702.

737
738
739
740
741
742

SERET G., GUIOT J., WANSARD G., DEBEAULIEU J. & REILLE M., 1992 - TENTATIVE PALEOCLIMATIC RECONSTRUCTION LINKING POLLEN AND SEDIMENTOLOGY IN LA-GRANDE PILE (VOSGES, FRANCE). *Quaternary Science Reviews*, **11**, (4), 425-430, 10.1016/0277-3791(92)90024-3.

743
744
745
746
747
748
749
750
751

TOMKINS M.D., DORTCH J.M., HUGHES P.D., HUCK J.J., PALLÀS R., RODÉS Á., ALLARD J.L., STIMSON A.G., BOURLÈS D., RINTERKNECHT V., JOMELLI V., RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ L., COPONS R., BARR I.D., DARVILL C.M. & BISHOP T., 2021 - Moraine Crest or Slope: An Analysis of the Effects of Boulder Position on Cosmogenic Exposure Age. *Earth and Planetary Science Letters*, **570**, 117092, 10.1016/j.epsl.2021.117092.

752
753
754
755
756
757
758

TOUCANNE S., SOULET G., FRESLON N., SILVA JACINTO R., DENNIELOU B., ZARAGOSI S., EYNAUD F., BOURILLET J.-F. & BAYON G., 2015 - Millennial-scale fluctuations of the European Ice Sheet at the end of the last glacial, and their potential impact on global climate. *Quaternary Science Reviews*, **123**, 113-133, 10.1016/j.quascirev.2015.06.010.

759
760

TYLMANN K., RINTERKNECHT V., WOŹNIAK P., BOURLES D.,

761 **SCHIMMELPFENNIG I., GUILLOU V., AUMAITRE G. &**
762 **KEDDADOUCHE K., 2019** - The Local Last Glacial Maximum of the southern
763 Scandinavian Ice Sheet front: Cosmogenic nuclide dating of erratics in northern
764 Poland. *Quaternary Science Reviews*, **219**, 36-46, 10.1016/j.quascirev.2019.07.004.
765

766
767 **VONGRAFENSTEIN U., ERLLENKEUSER H., BRAUER A., JOUZEL J. &**
768 **JOHNSEN S.J., 1999** - A Mid-European Decadal Isotope-Climature Record from
769 15,500 to 5000 Years B.P. *Science (New York, N.Y.)*, **284**, (5420), 1654-1657,
770 10.1126/science.284.5420.1654.
771

772
773 **WALTER-SIMONNET A.-V., BOSSUET G., J.P. S., DEVELLE A.-L.,**
774 **BÉGEOT C., RUFFALDI P., RÉGENT B. & CH W., 2010** - Sédimentation
775 tardiglaciaire dans le Marais de la Maxe et le lac de Sewen (massif des Vosges,
776 France) - premiers résultats. *Annales scientifiques de la réserve de Biosphère*
777 *transfrontalière Vosges du Nord, Pfälzerwald*, 251-266.
778

779