



Projet CClimaTT



Cartographie des retraits glaciaires des Glacier Blanc et Glacier Noir depuis 1815
Application à l'établissement de chrono-séquences de colonisation de la végétation.

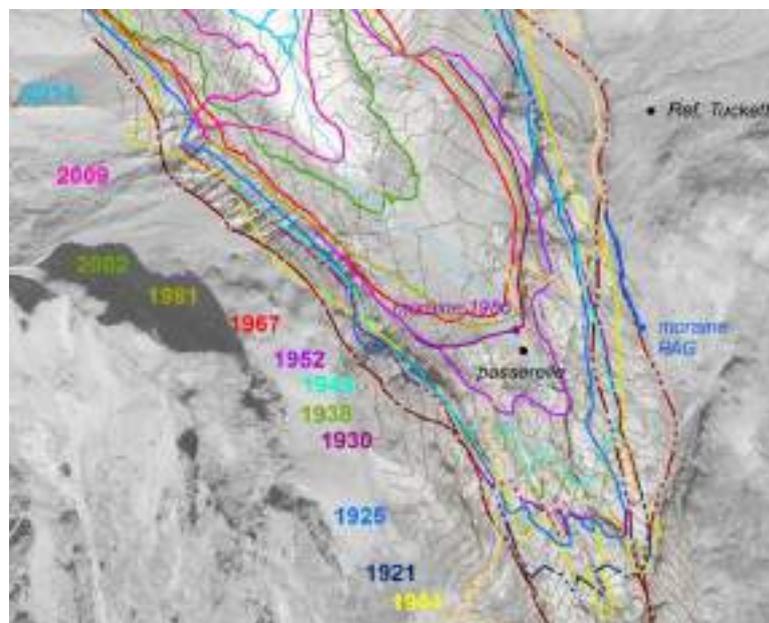
Emmanuel Thibert

Mylène Bonnefoy-Demongeot

Frédéric Nouguier

Université Grenoble Alpes, Irstea, UR ETGR

2 rue de la Papeterie-BP 76, F-38402 St-Martin-d'Hères, France.



I. Introduction et objectifs de l'étude

Dans le cadre du projet de recherche Interreg-Alcofra CClimaTT (Changements Climatiques dans le Territoire Transfrontalier) visant à améliorer la connaissance des effets des changements climatiques dans l'espace transfrontalier alpin (<http://www.cclimatt.eu/fr.html>), le Parc National des Écrins analyse la dynamique de colonisation de la végétation sur les terrains délaissés par les glaciers, notamment dans les bassins du Glacier Blanc et du Glacier Noir (commune de Vallouise-Pelvoux, Parc National des Écrins). Un prérequis est donc d'établir une chronologie « spatialisée » du retrait glaciaire qui intervient sur ces sites depuis environ 200 ans, cette chronologie permettant de dater ensuite l'installation de la végétation. Sur les 2 sites glaciaires retenus, celle-ci s'établit depuis le maximum d'extension des 2 glaciers atteint à la fin du Petit Age de Glace (PAG) vers les années 1810-1820 dans la zone dite du Pré de Madame Carle, vers 1875m, juste à l'amont du refuge Cézanne. Depuis, la langue du Glacier Blanc s'est retirée sur plus de 2 kilomètres de longueur et est remontée de plus de 500 mètres en altitude. Malgré la proximité de ces 2 glaciers, leur recul s'est manifesté de manière contrastée. Ce retrait glaciaire n'est pas synchrone entre les 2 glaciers ni spatialement homogène. Le Glacier Noir réagit en effet plus modérément et plus lentement, donc avec un certain retard (10-15 ans), par rapport au Glacier Blanc qui lui-même manifeste, à son extrémité, des fluctuations retardées de 5 à 10 ans par rapport au signal climatique. Depuis le PAG, le retrait glaciaire n'est également pas uniforme dans le temps et au moins 3 périodes de ré-avancées des glaciers en réponse au signal climatique ont été relativement bien observées (1890, 1920-50, 1970-80). Le retrait glaciaire se manifeste donc par des amplitudes et des temps de réponse bien différents pour ces 2 glaciers pourtant tout proches l'un de l'autre. De sorte que la datation de la disparition du glacier en une localisation donnée est un exercice qui doit aussi prendre en compte des phases de crues (ré-avancées) spécifiques avec, comme caractéristiques, leur amplitude et leur déphasage dans le temps.

II. Méthode générale et démarche suivie

Afin d'établir une cartographie avec chrono-séquences de déglaciation des bassins du Glacier Blanc et du Glacier Noir, nous avons associé des recherches bibliographiques (documents, plans et cartes historiques, photographies aériennes, relevés de terrain déjà disponibles) à des visites de terrain pour topographier les moraines et géoréférencer les documents historiques établis initialement sans rattachement géodésique. L'essentiel de la base documentaire repose sur les plans réalisés par l'administration des Eaux et Forêts entre 1921 et 1965, à la fois sur le Glacier Blanc et le Glacier Noir. Elle a été complétée par des cartes et

plans historiques (1853, 1880, 1920-25, 1967), des photographies aériennes des 2 bassins glaciaires (1975, 1986, 1994), les relevés du front du Glacier Blanc réalisés par le Parc National des Écrins depuis 1984 et les relevés effectués conjointement par Irstea (ex-Cemagref) et le Parc National des Écrins au Glacier Noir depuis 2002. Des relevés réalisés par le LGGE entre 1983 et 1997 ont également été inclus (front du Glacier Noir). Enfin, les cartes glaciologiques spécifiques du Glacier Blanc (1952, 1981, 2002, 2014), réalisées conjointement par le Parc National des Écrins et Irstea, ont été utilisées pour fournir les contours du glacier. Une carte de 2019 est en train d'être établie (images et levé lidar du 18 septembre 2019) mais n'a pas pu être intégrée dans la présente étude.

En complément, essentiellement 3 missions de terrains ont été réalisées (bassins du Glacier Blanc et du Glacier Noir) : travaux de topographie (relevés au GPS différentiel) des moraines construites et reconstruites par ces 2 glaciers depuis 1810-20, relevés de points d'orientation permettant le géoréférencement des plans du Glacier Blanc et du Glacier Noir établis par l'administration des Eaux et Forêts entre 1921 et 1965 et des autres documents non calés en planimétrie IGN (carte de synthèse de Mougin, 1934). Une mission commune avec le Parc National des Écrins (Rémy Moine) a également été réalisée afin de définir la méthode de relevé topographique des placettes botaniques qui ont ensuite été implantées en juillet 2019. Des missions relatives à nos autres études sur le site (octobre et novembre 2019: topographie, nivellement) ont également été conduites et ont bénéficié au présent projet.

Enfin, l'intégration sous plateforme SIG (AGIS) des plans et cartes historiques, pour saisie des fronts, moraines et limites des glaciers, a été réalisée avec la meilleure datation possible pour l'établissement des chrono-séquences. Le géoréférencement des plans et documents cartographiques non calés en NTF (planimétrie IGN) a été effectué à l'aide des nouveaux relevés topographiques. Nous avons effectué une confrontation des données avec les relevés bruts des fronts (non planimétriques et non projetés). Nous avons ainsi proposé une nouvelle courbe des variations de longueur du Glacier Blanc calée sur les documents cartographiques (géométriquement plus exacts).

Les données ont ensuite été extraites de la base SIG sous forme de couches vectorielles (format .shp) contenant limites latérales, moraines et fronts du Glacier Blanc et du Glacier Noir accompagnés de leur datation.

Brève bibliographie des études glaciologiques dans le Massif des Écrins. Documents utilisés.

Comme dans de nombreux massifs de montagne des Alpes, on ne dispose que de peu d'informations précises dans les Écrins sur l'état des glaciers avant les années 1850 à 1870 (Reynaud, 1997). Pourtant, la période 1600-1810 a été relativement riche en événements glaciologiques car cette période correspond à un des petits âges glaciaires (une dizaine) qui sont intervenus sur les 10 000 dernières années (depuis le Tardiglaciaire, -11 000 ans ; Röthlisberger, 1986). Ce dernier petit âge glaciaire, qui est le premier de l'époque « historique », n'a laissé que de rares témoignages directs dans le massif des Écrins. Cependant, sur le terrain, les moraines construites lors du dernier maximum de 1815-20 marquent toujours aujourd'hui ce paysage glaciaire, à l'image de l'ensemble de la chaîne alpine (Leroy Ladurie, 1967). Ce n'est qu'à partir de 1850 que l'établissement de la théorie des grandes glaciations quaternaires va orienter un grand nombre de scientifiques vers l'étude des glaciers et, sur le terrain, cela s'est traduit par un nombre croissant d'observations naturalistes et par des cartographies et des mesures de variation de longueur des glaciers. C'est après la catastrophe de la poche d'eau du glacier de Tête Rousse, à Saint-Gervais en 1892 (175 victimes), que se crée le service national français *d'observation des variations périodiques des glaciers* dont les missions incombent à l'administration des Eaux et Forêts. Parmi les paramètres relevés par ce service, figurent les variations de longueur des glaciers. Aux glaciers Blanc et Noir, les relevés des Eaux et Forêts (E&F) s'inscrivent en continuité avec les travaux précurseurs de la Commission Française des Glaciers qui couvrent la période 1889-1907 (Allix 1927). Ils ont été poursuivis jusqu'en 1966 et sont reportés sous la forme de plans annuels des langues terminales des 2 glaciers, aux échelles comprises entre 1/2000 et 1/5000. Leurs réseaux topographiques reposent sur 2 profils transverses à l'axe d'écoulement des glaciers (rouge à l'aval et bleu à l'amont ; **Figure 1**) à partir desquels sont aussi mesurées les vitesses et les altitudes de la surface des glaciers. Nous avons utilisé 35 plans annuels couvrant la période de 1921 à 1966 pour établir la position des langues frontales des glaciers Blanc et Noir.

Les documents cartographiques complets de ces 2 glaciers sont par contre bien plus rares. La plus ancienne carte où figure une topographie, de bonne qualité géométrique, des glaciers est la carte de l'État-Major qui est représentative de l'état de ces 2 glaciers en 1853 (carte datée de 1866) et 1896. Entre ces 2 dates, une carte du service vicinal de la commune de Pelvoux dresse la position extrême des 2 glaciers en 1880 (Mougin, 1934 ; Poncet, 1966), peu après la séparation des 2 langues terminales des glaciers Noir et Blanc (séparation que l'on peut définir à partir de la carte du Club Alpin Français de 1874 établie par F. Prudent et de celle publiée par H. Duhamel en 1887). La première carte avec système altimétrique (courbes de niveau à 20 m sur le glacier) est celle de C. Lafay, G. Flusin et C. Jacob, préparateurs à la Faculté de Grenoble, établie entre les 18 et 27 août 1904 et publiée en 1905 à l'échelle 1/10 000. Deux éditions de cette carte sont disponibles (annuaire de la STD et Imprimerie Allier frères) et nous avons

utilisé la seconde (Flusin and C. Jacob, 1905, eds. Allier) qui est de meilleure qualité géométrique et mieux calée en altitude par rapport au système actuel que ne l'est l'édition originale publiée en 1905 par la STD.

Nous avons ensuite à disposition pour notre étude la carte du Service Géographique des Armées (SGA) établie sur la période 1925-1930 et publiée en 1932. Les glaciers Noir et Blanc y figurent sur les feuilles no.3&4 de la carte XXXIV-36 de St Christophe-en-Oisans. En 1967, l'IGN a établi la première carte du massif à partir de photographies aériennes réalisées le 27 septembre. La carte est éditée au 1/25000 avec des courbes de niveau à 10 m. Nous avons également utilisé une édition de 1978 (Série Violette, Massif du Pelvoux ; feuille n°241). Toujours sur la base de photographies aériennes pour les années 1952, 1981, 2002 et 2014, des cartes glaciologiques ont été dressées spécifiquement pour l'étude du Glacier Blanc par le Parc National des Écrins et Irstea. Elles fournissent une bonne cartographie de la langue terminale au 1/5000 (Thibert et al., 2005 ; Thibert, 2015).

Aux relevés de terrain des E&F suspendus en 1966 succèdent ceux du Laboratoire de Glaciologie (LGGE) relancés en 1983 jusqu'en 1995, année où le glacier en retrait s'est retrouvé à l'amont du profil inférieur rouge. Des mesures de position du front du glacier ont été initiées par le Parc National des Écrins en 1994 en continuité de ceux des E&F et du LGGE.

Entre 1975 et 1991, le Cemagref réalise 3 campagnes de photogrammétrie aérienne de la langue terminale des glaciers Blanc et Noir. Seule la campagne de vol de 1975 a été utilisée pour construire une carte au 1/1000 du Glacier Blanc. Nous avons utilisé ce document pour établir la position du glacier en 1975.

III. Géoréférencement des données.

1°) Système de projection

Par souci d'homogénéité avec les données existantes (en particulier, les cartes du Service Géographique des Armées de 1920-25 et les premières cartes de l'IGN des années 1960) et afin de réduire les altérations linéaires à la projection des données obtenues avec les appareils optiques (théodolites et stations totales), le système de coordonnées planimétriques retenu est la projection conique conforme Lambert zone III (ellipsoïde Clarke 1880). Ce choix a été maintenu également pour les cartes récentes du Glacier Blanc (2014, future carte 2019). Les altitudes sont données dans le système NPF IGN69.

Pour l'intégration des données fournies dans un SIG dans le système de référencement standard actuel (RGF93 grille nationale Lambert 93), l'ensemble des couches vectorielles pourront être reprojetées, de Lambert III vers RGF93, sans perte de précision importante, à l'aide du logiciel IGNMap de l'IGN .

Les données, issues des plans du Glacier Blanc et du Glacier Noir au 1/5 000 établis par l'administration des Eaux et Forêts entre 1920 et 1966 (E&F) dans un système de coordonnées locales, ont été transformées en Lambert III par translation, rotation et mise à l'échelle par homothétie assimilant le plan horizontal des levés parallèle à la représentation plane Lambert.

Tableau 1. Réseau des points utilisés pour le référencement des levés topographiques et du calage des plans et cartes non rattachés. Coordonnées Lambert III (XY) et NPF IGN 69 (altitude, Z) en mètres.

Point / coordonnées	X (m)	Y (m)	Z (m)	Source/Date d'implantation/occupation/re-observation
<i>Glacier Noir pivot1</i>	921491.44	299613.44	2127.35	Irstea/8 septembre 2014
<i>Glacier Noir pivot2</i>	920783.31	299348.85	2114.48	Irstea/21 septembre 2016
<i>Station Inf. E&F</i>	920213.19	299181.77	2281.49	E&F/1920/8 septembre 2014
<i>Station Sup. E&F</i>	919717.10	298923.33	2385.76	E&F/1920/8 septembre 2014
<i>croix E&F Sup.</i>	919684.54	298989.67	2409.39	E&F/1920/20 juin 2019
<i>croix E&F Inf</i>	920153.24	299302.82	2290.63	E&F/1920/8 septembre 2014
<i>Point E</i>	921536.76	299201.98	1921.04	Point E plan E&F, 1921 Point "C" Jacob, Flusin, 1904/20 juin 2019
<i>Station Balme</i>	919395.64	298786.50	2462.45	PNE/2003/8 septembre 2014
<i>Plaque A</i>	921383.00	300230.70	2299.27	Réseau local Cemagref années 70/6-7 Aout 2001
<i>Plaque B</i>	921525.97	300677.02	2438.73	Réseau local Cemagref années 70/6-7 Aout 2001
<i>Spit pont du Ban Nord</i>	922996.20	298449.33	1864.04	LGGE/6-7 Aout 2001
<i>Spit pont du Ban Sud</i>	923067.48	298208.69	1849.72	LGGE/ 6-7 Aout 2001

2°) Réseau géodésique utilisé

Les observations récentes par dGPS et théodolite s'appuient de manière locale et différentielle sur un réseau de points géodésiques mis en place par nos soins depuis les années 2000 et les quelques points de l'IGN disponibles sur la commune de Vallouise-Pelvoux (**Tableau 1**). Les levés des E&F du front du Glacier Blanc et du Glacier Noir s'appuyaient historiquement sur 2 profils transverses passant par les

stations de levés installées sur la rive gauche des glaciers et 2 points d’ancrage par profil en rives droite et gauche (**Figure 1**). Ces points E&F et les ancrages des profils ont été remesurés par dGPS pour géoréférencement.

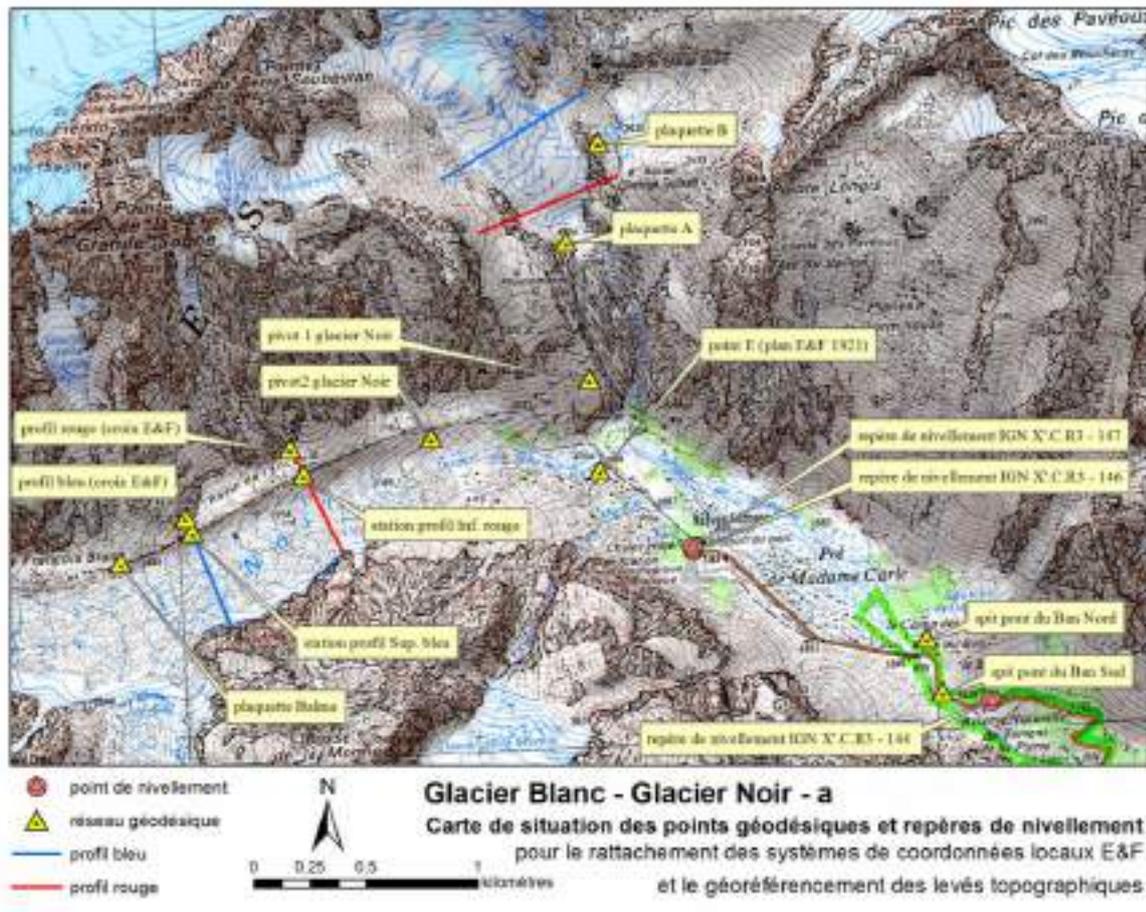


Figure 1. Carte d’implantation des points géodésiques et des repères de nivellement utilisés dans le cadre de l’étude. **a-** points de références et d’ajustement.

Tableau 2. Points utilisés pour rattacher le réseau local (spits pont du Ban Nord et Sud ; pivots 1&2 Glacier Noir) en planimétrie et altimétrie.

Point / coordonnées	X (m)	Y (m)	Z (m)	Source/Date d'implantation/occupation/re-observation
<i>Point géodésique</i> IGN, Pelvoux IV, point a	928041.68	297967.08	1584.63	Ligne de base à spit pont du Bans : 5,939 km
<i>Point de nivellement 146</i> IGN, X'CR3-146	921953.29	298838.85	1874.14	Ligne de base à spit pont du Bans : 1,285 km
<i>Point de nivellement 147</i> IGN, X'CR3-147	921951.14	298855.4	1874.61	Ligne de base à spit pont du Bans : 1,294 km
<i>Point de nivellement 144</i> IGN, X'CR3-144	923283.87	298164.97	1823.33	Ligne de base à spit pont du Bans : 224 m
<i>RGP Puy Aillaud</i>	927274,78	292418,99	1636.34	Ligne de base à spit pont du Bans : 7,162 km
<i>RGP Gap STV2</i>	899328,47	258733,44	762,41	Ligne de base à spit pont du Bans : 46,088 km
<i>RGP Alpe d'Huez</i>	894894,29	316339,47	1839,01	Ligne de base à spit pont du Bans : 33,417 km
<i>RGP Modane</i>	943418,33	332884,04	1128,20	Ligne de base à spit pont du Bans : 40,221 km

3°) Ajustement altimétrique

L'ancien réseau local des E&F disposait de plusieurs points cotés en altitude mais il est apparu une différence moyenne de 1,14 m entre ce système et les 3 points de nivellement de IGN. Nous avons ajusté toutes les altitudes lors de 3 campagnes de nivellement, une dédiée à l'ancien réseau E&F et deux dédiées à notre propre réseau issu des campagnes GPS par homogénéité avec le premier ajustement (E&F). Aujourd'hui, notre réseau de points d'appui est calé à 7-10 cm en altitude par rapport aux 3 points de nivellement X'CR3-144 (-146 ; -147).

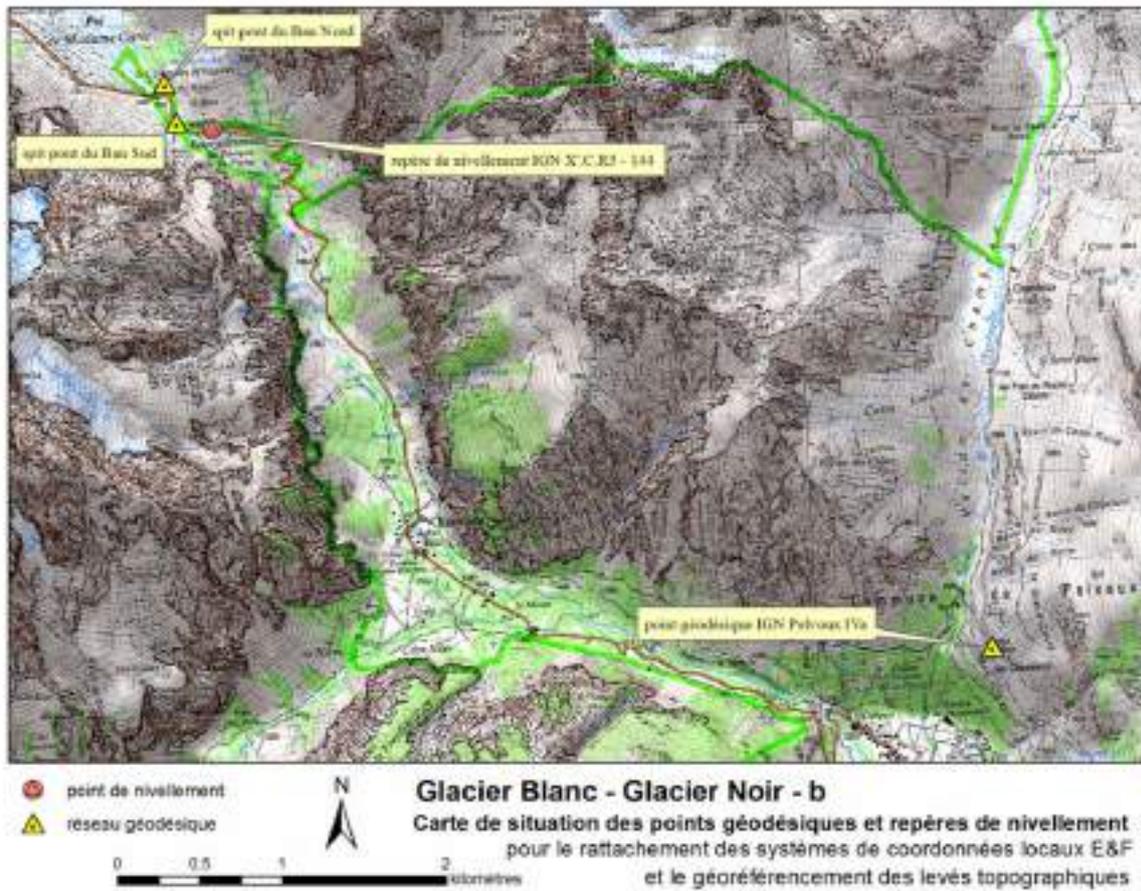


Figure 2. Carte d’implantation des points géodésiques et des repères de nivellement utilisés dans le cadre de l’étude. **b-** point de contrôle planimétrique indépendant.

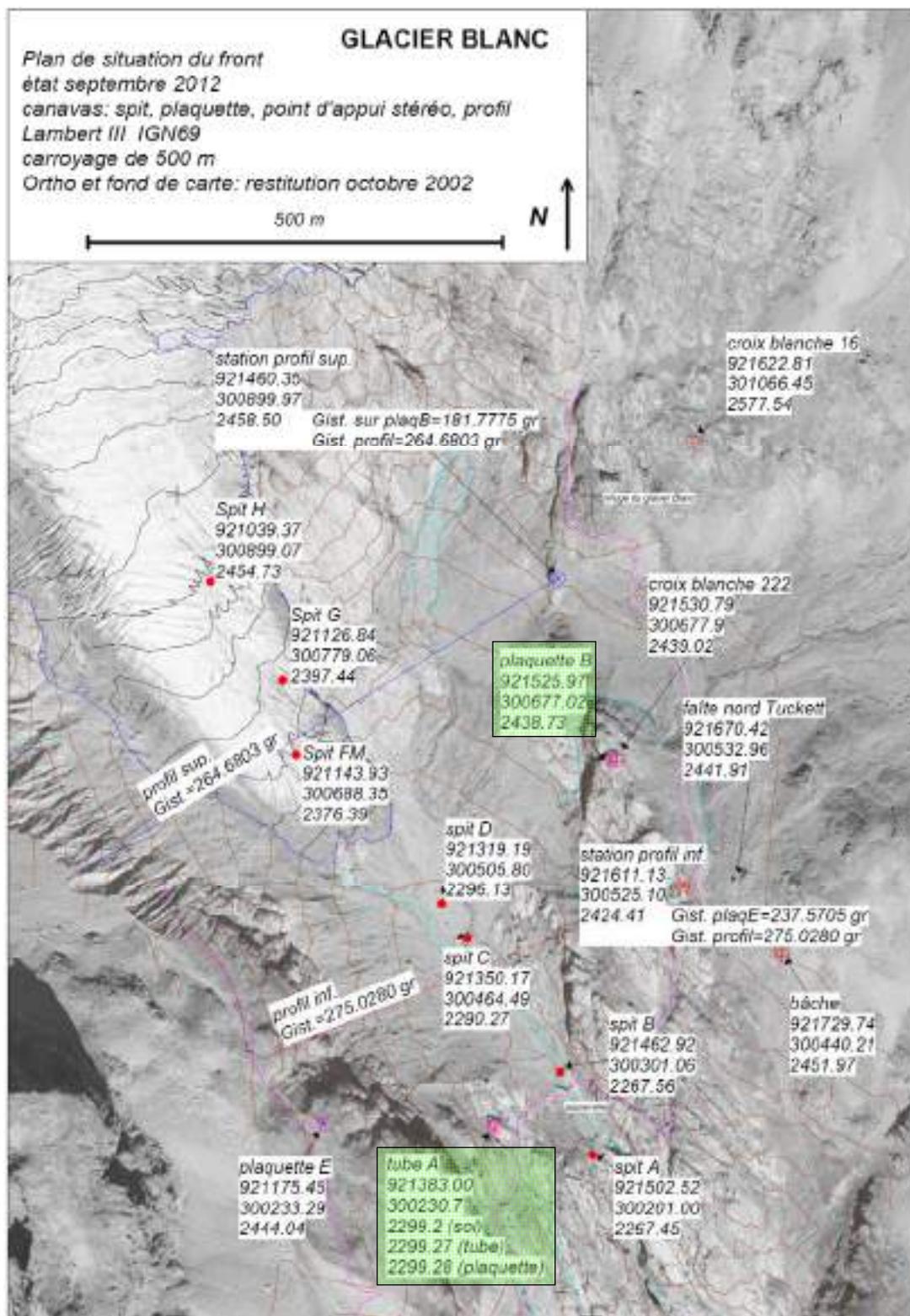


Figure 3. Réseau géodésique du front du Glacier Blanc (points et profils transverses rouge et bleu ; état 2012). Les points plaquette A et plaquette B (encadré vert) ont été utilisés comme références pour implanter les placettes botaniques de juillet 2019.

4°) Contrôle planimétrique

Pour s'assurer un bon référencement absolu en planimétrie de notre réseau, nous avons effectué un contrôle sur le point géodésique de l'IGN (Pelvoux IV a) situé sur la route de Chambran (**Figure 2**). Ce point a été stationné par dGPS 30 mins en statique et recalculé en utilisant comme référence le point spit Pont du Ban en post-traitant les observations brutes Rinex (L1, L2 ; 6 km de ligne de base). Les coordonnées observées sont cohérentes à +/- 7 cm en XY.

Nous avons également profité du stationnement de notre récepteur dGPS fixe de longues heures sur le point spit Pont du Ban pendant les journées de relevé des moraines pour ré-observer ce point en statique (une vingtaine d'heures d'observation à un intervalle d'une seconde) et le contrôler par rapport aux stations du réseau RGP (**Tableau 1**). Les coordonnées ainsi recalculées sont cohérentes à 2-3 cm en XY.

IV. Visites de terrain spécifiques et connexes au projet

Des observations et mesures sur le terrain ont été conduites spécifiquement pour ce projet en plus des campagnes habituelles menées dans le cadre de nos missions d'observation de l'OSUG :

12 septembre 2018 ; E. Thibert, M. Bonnefoy-Demongeot, M. Bouvier (PN Écrins) : topo du front du Glacier Noir par GPS, moraines du PAG rive droite et gauche du Glacier Noir entre 1900 m et 2100 m.

16-19 octobre 2018 ; E. Thibert, E. Dupuis (PN Écrins); topo GPS de la moraine PAG rive gauche du Glacier Blanc vers 1900 m d'altitude.

18 juin 2019 ; E. Thibert, M. Bonnefoy-Demongeot, Marylou Gory, Rémy Moine, Aristide Chauveau, E. Dupuis (PN Écrins) topo dGPS pour les stations de références des levés botaniques Glacier Blanc. Point de référence vers 2300 m (passerelle).

19 juin 2019 ; E. Thibert, M. Bonnefoy-Demongeot, Marylou Gory, Rémy Moine, Aristide Chauveau (PN Écrins) topo GPS pour les stations de références des levés botaniques Glacier Blanc. Point de référence vers 2450 m (plateau Tuckett).

20 juin 2019 ; E. Thibert, M. Bonnefoy-Demongeot, Marylou Gory, topo GPS moraine du Glacier Noir entre 2460 m et 2100 m.

Les 18, 19, 20 et 23 juillet 2019 ; des placettes botaniques de 2x2 m ont été implantées dans le bassin du Glacier Blanc par l'équipe de Rémy Moine. Pour chacune d'entre-elles, les 4 coins des placettes ont été relevés au dGPS. Le centre de ces placettes a été recalculé et positionné dans le SIG pour estimer une date de disparition du glacier. Les **Tableaux 3 à 5** indiquent les coordonnées de chaque placette.

11-12 octobre 2019 ; E. Thibert, M. Bouvier (PN Écrins), levés dGPS en préparation du traitement des photographies aériennes et du Lidar du 18 septembre 2019.

Le 13 novembre 2019 ; E. Thibert, M. Bonnefoy-Demongeot, E. Dupuis (PN Écrins), opérations de nivellement pour ajustement de l'altitude des points du réseau géodésique au Pré de Madame Carle.

V. Datations

Les dates des couches vectorielles sont les dates des documents sources utilisés. On a tenu compte des dates d'observations de terrain et non des dates de publication ou d'édition des documents. La datation du retrait glaciaire, à l'emplacement des placettes botaniques installées en 2019 dans le bassin du glacier Blanc, a également été effectuée (**Figure 4**). Pour ceci, on a choisi d'effectuer une régression linéaire entre le temps et la distance séparant 2 positions du front du glacier, encadrant la placette aux dates les plus proches, et dans une même phase de décrue ou de crue du glacier. Les coordonnées des placettes sont celle du centre et ont été calculées à partir des coordonnées des 4 coins, elles-mêmes mesurées au GPS différentiel. Elles ont une précision absolue de l'ordre de quelques centimètres. Celles des positions des fronts du glacier sont, en moyenne selon les documents sources, de ± 5 m. Ainsi, on peut estimer l'erreur sur les datations à $\pm 2-3$ ans, étant donné que les vitesses de recul et de ré-avancée du glacier sont de l'ordre de 10-15 m/an en moyenne entre 1952 et 2014.

Pour illustrer le principe de cette datation, la placette B4-17 (**Figure 4**, **Tableau 3**), située sur les terrains libérés par le glacier après 1952, est restée épargnée de la crue des années 80 (position externe par rapport à la moraine de 1986). Sa datation s'effectue à partir des positions du glacier en 1952 et 1967 et a été fixée, dans ce cas, à $1955 \pm 2-3$ ans.

Par contre, la placette B3-18 (**Figure 4**, **Tableau 3**) est à l'intérieur de la zone réoccupée par le glacier jusqu'en 1986. Sa datation s'effectue à partir des positions du glacier en 1986 et 2002 et a été fixée, dans ce cas, à $1990 \pm 2-3$ ans.

Les coordonnées des centres des placettes et les dates associées de retrait du glacier sont reportées aux **Tableaux 3 à 6** qui correspondent aux 4 journées d'implantation des placettes.

Tableau 3. Placettes du 18 juillet 2019

			Date de retrait du glacier
B3,01	921354,650	300752,227	1989
B3,02	921278,224	300744,775	1995
B3,06	921269,557	300637,953	2000
B3,08	921299,849	300641,088	1998
B3,11	921254,505	300792,687	1994
B3,14	921208,501	300579,915	2002
B3,18	921390,474	300678,996	1990
B3,21	921296,747	300522,331	1998
B3,23	921283,180	300617,081	2000
B3,24	921420,608	300617,800	1989
B3,25	921307,089	300408,332	1993
B3,26	921220,354	300785,666	1997
B3,27	921362,788	300626,587	1994
B3,29	921267,090	300581,932	2001
B3,30	921340,187	300749,114	1990
B4,10	921390,569	300809,943	1953
B4,11	921418,155	300723,208	1969
B4,17	921334,518	300856,661	1955
B4,19	921260,301	300367,035	1991
B4,28	921410,030	300744,015	1955

Tableau 4. Placettes du 19 juillet 2019

placette	X	Y	Date de retrait du glacier
B1,04	921027,17	300870,116	2012
B1,06	921006,547	300989,808	2015
B1,09	920984,161	301048,589	2015
B1,14	921016,203	300873,323	2013
B1,20	920988,463	301007,152	2017
B1,21	920997,324	301029,337	2014
B1,22	921087,869	300724,914	2008
B1,24	921023,695	300931,002	2014
B2,01	921144,169	300620,604	2004
B2,03	921144,169	300620,647	2004
B2,03-2	921115,818	300680,44	2006
B2,04	921133,18	300722,19	2007
B2,05	921169,907	300585,522	2003
B2,07	921123,667	300733,983	2007
B2,09	921063,3	300907,024	2009
B2,10	921112,147	300782,59	2008
B2,12	921166,974	300715,212	2005
B2,13	921103,851	300811,527	2008-2009
B2,15	921237,583	300618,219	2003
B2,16	921104,482	300757,075	2007
B2,18	921194,484	300679,342	2005
B2,20	921200,821	300659,758	2005
B2,21	921117,442	300660,73	2006
B2,22	921128,032	300703,04	2007
B2,24	921061,359	300778,353	2009
B2,26	921058,517	300860,562	2010
B2,27	921142,645	300721,379	2006
B2,29	921115,307	300774,941	2007
B2,30	921075,621	300913	2008
B4,25	921243,794	300316,097	1986

Tableau 5. Placettes du 22 juillet 2019

placette	X	Y	Date de retrait du glacier
B1,11	921030,476	300950,915	2012
B1,31	921016,094	300984,648	2013
B1,32	921016,286	300958,718	2014
B1,33	921022,249	300994,664	2012
B1,34	921015,212	301004,632	2013
B1,35	920994,788	301078,467	2011
B1,36	921005,585	301056,378	2011
B3,04	921390,748	300573,436	1992
B3,07	921350,969	300556,286	1993
B3,28	921346,692	300567,659	1993
B4,02	921362,41	300268,599	1956
B4,03	921410,862	300283,02	1960
B4,04	921325,624	300297,832	1987
B4,07	921337,246	300304,979	1987
B4,12	921335,125	300254,168	1953
B4,13	921424,224	300214,623	1953
B4,14	921437,115	300171,71	1953
B4,15	921389,116	300326,259	1987
B4,18	921414,137	300179,579	1953
B4,22	921340,784	300239,05	1953
B4,23	921506,963	300199,309	1953
B4,24	921307,062	300331,02	1988
B4,26	921418,667	300216,78	1953
B4,30	921394,59	300227,422	1953

Tableau 6. Placettes du 23 juillet 2019

placette	X	Y	Date de retrait du glacier
C,01	921582,551	300876,712	avant le PAG 1815
C,02	921662,287	300720,903	avant le PAG 1815
C,03	921700,761	300900,531	avant le PAG 1815
C,04	921769,549	300668,463	avant le PAG 1815
C,08	921778,534	300608,893	avant le PAG 1815
C,09	921738,911	300460,373	avant le PAG 1815
C,13	921712,246	300624,135	avant le PAG 1815
C,14	921702,434	300567,864	avant le PAG 1815
C,16	921715,807	300417,424	avant le PAG 1815
C,17	921730,128	300738,769	avant le PAG 1815
C,19	921698,099	300756,443	avant le PAG 1815
C,20	921781,793	300799,52	avant le PAG 1815
C,21	921677,931	300612,06	avant le PAG 1815
C,23	921712,788	300659,936	avant le PAG 1815
C,25	921655,734	300631,033	avant le PAG 1815
C,26	921692,155	300451,461	avant le PAG 1815
C,28	921717,781	300845,901	avant le PAG 1815
C,30	921728,504	300570,005	avant le PAG 1815
C,01	921582,551	300876,712	avant le PAG 1815

VI. Documents et relevés sources des extensions des glaciers Blanc et Noir

Dans cette partie, sont listés les documents qui sont à l'origine des couches vectorielles délivrées avec ce rapport pour les 2 sites glaciaires des glaciers Blanc et Noir. Sont également indiquées les précisions de calage, des plans, cartes et images, obtenues sous SIG. Les **Figures 5 et 6** illustrent les positions des langues terminales des 2 glaciers depuis 1853 pour le Glacier Blanc et 1921 pour le Glacier Noir.

1°) Glacier Blanc

Contours du glacier

Nous avons délimité les contours du glacier à partir de cartes historiques ou de travaux de restitution photogrammétrique depuis photographies aériennes.

Fichier type. contour_XXX.shp

1853 et 1896

Cartes de l'Etat-Major (d'après Mougin, 1934).

1880

Carte du service vicinal (d'après Mougin, 1934).

1904

C. Jacob et G. Flusin. Étude sur le Glacier Noir et le Glacier Blanc dans le Massif du Pelvoux. Allier (Frères), Grenoble, 1905, 62p. Carte des glaciers Blanc et Noir au 1/10 000. Calage à ± 4 m.

1925-29

Carte du Service Géographique de l'Armée (SGA), édition 1932. Feuilles no.3&4 des planches XXXIV-36 St Christophe-en-Oisans. Carte au 1/20 000 issue de levés effectués entre 1925 to 1929 par topographie, nivellement et stéréophotographie terrestre. Calage à ± 2 m

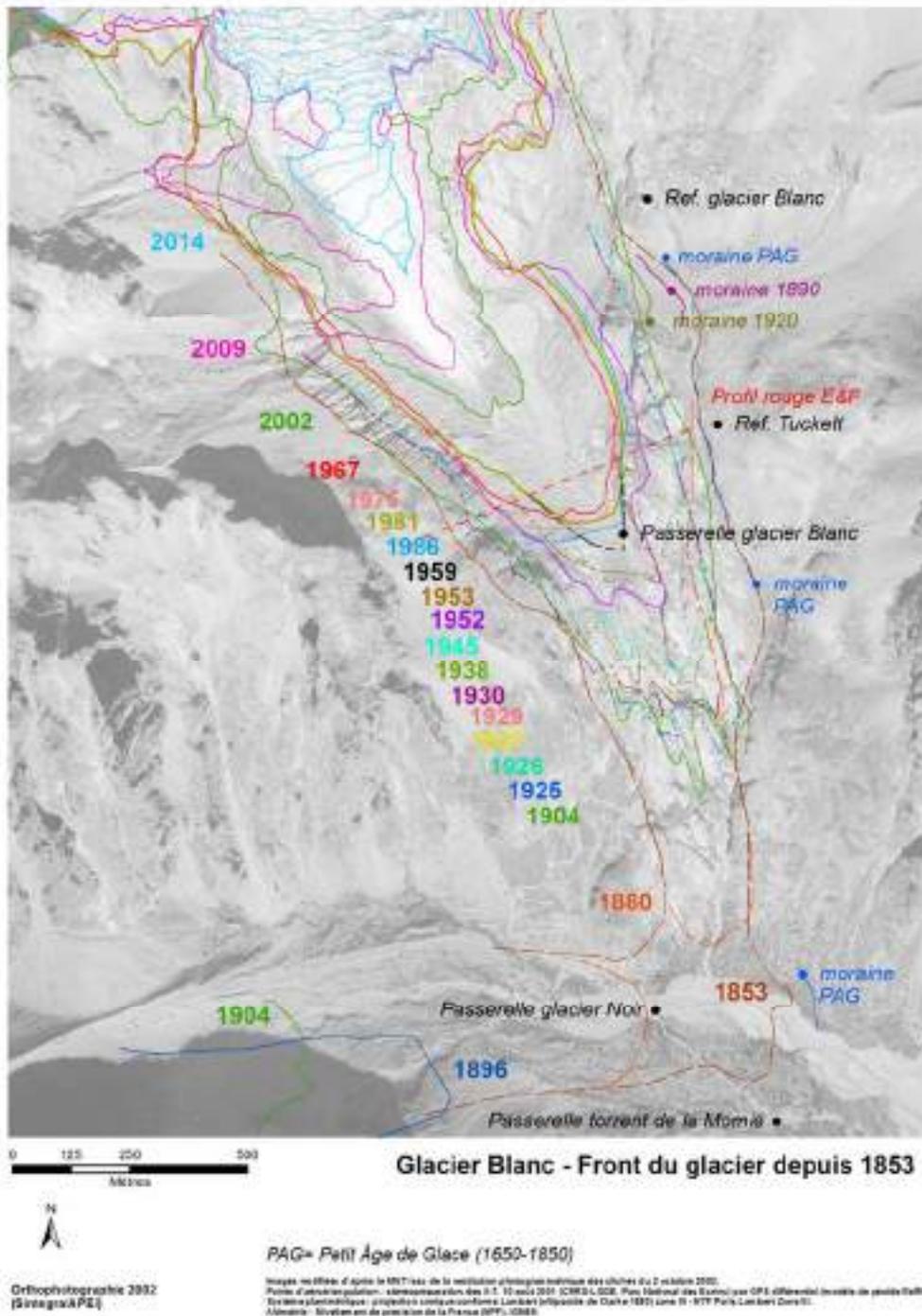


Figure 5. Positions de la langue frontale du Glacier Blanc entre 1853 et 2014 issues des documents de Mougou de 1927 et 1934 (cartes de 1853 et 1880), Flusin (carte de 1904), des plans des Eaux et Forêts (1925-27, 1929, 1930, 1938, 1945, 1953, 1959), des cartes du glacier établies spécifiquement (1952, 1981, 2002, 2014), des cartes SGA-IGN (1925-30, 1967) et de l'orthophoto de l'IGN de 2009.

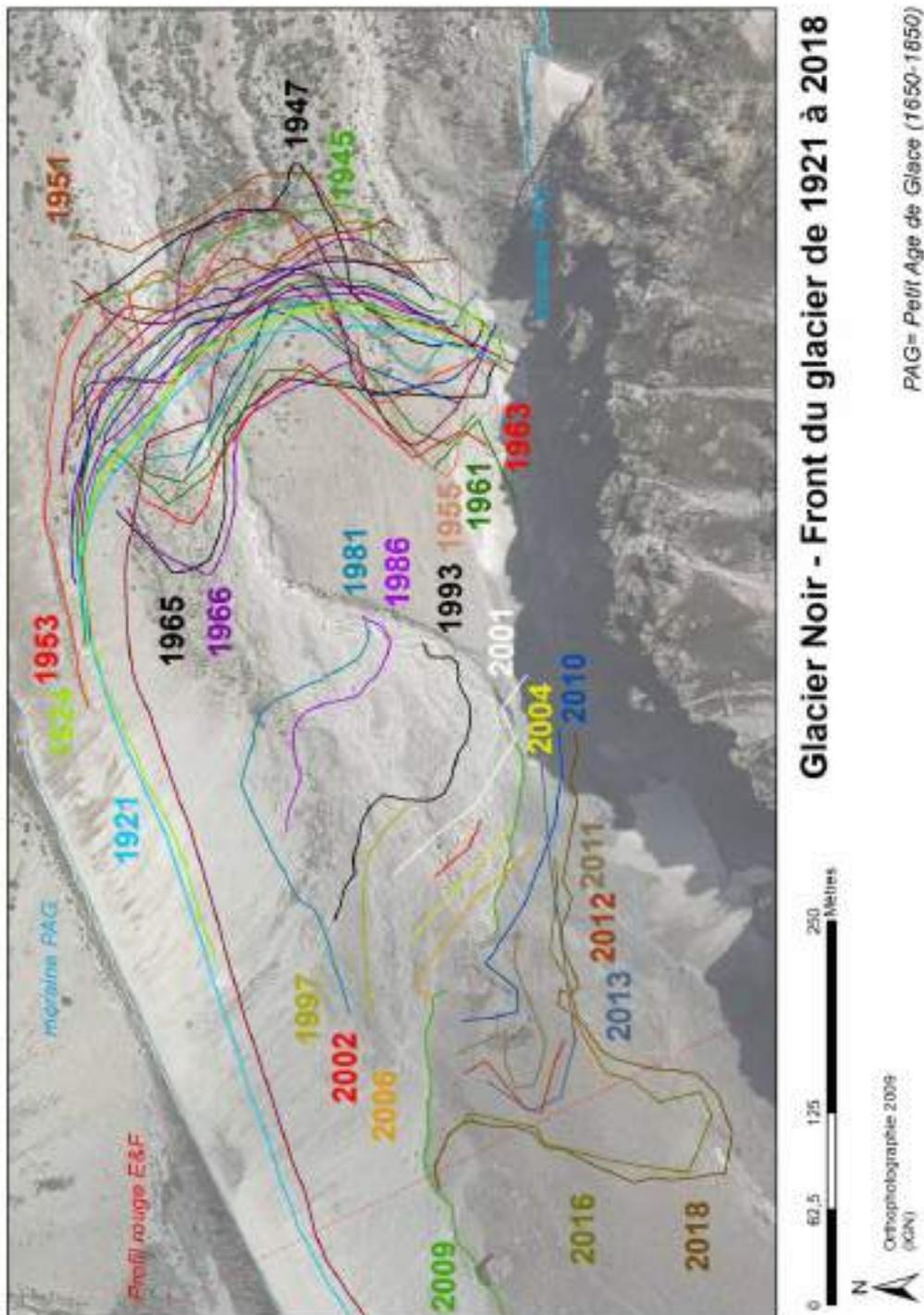


Figure 6. Positions de la langue frontale du Glacier Noir entre 1921 et 2018 issues des plans des Eaux et Forêts (1921, 1924 à 30, 32, 33, 35, 38, 45, 47, 49, 51, 53 à 56, 58, 59, 61, 62, 65, et 1966), de l'orthophoto de l'IGN de 2009 et des levées de terrain du PN Écrins et Irstea de 2002 à 2018.

1952

Carte au 1/5 000. Restitution des photographies aériennes de la mission IGN « La Grave— Chorges » (IGN référence F3435-3438) du premier août 1952. Cf. Thibert, E., Faure, J. et Vincent, C. (2005). Bilans de masse du Glacier Blanc entre 1952, 1981 et 2003 obtenus à partir de modèles numériques de terrain. La Houille Blanche, n°2-2005, 72-78. Calage à $\pm 1,5$ m

1967

Carte de l'Institut Géographique National, édition de 1978. Carte n° 241 Série violette, Massif des Écrins Meije-Pelvoux au 1/25 000 issue de la restitution d'images aériennes du 27 septembre 1967. Calage à ± 3 m

1981

Carte au 1/5 000. Restitution des photographies aériennes de la mission IGN mission IFN05P du 29 juillet 1981. Cf. Thibert, E., Faure, J. et Vincent, C. (2005). Bilans de masse du Glacier Blanc entre 1952, 1981 et 2003 obtenus à partir de modèles numériques de terrain. La Houille Blanche, n°2-2005, 72-78. Calage sub-métrique.

2002 et 2014

Cartes au 1/5 000 et 1/1 000. Vols dédiés opérés par APEI (Aéro Photo Europe Investigation), Octobre 2002 [1/25 600—1/15 200] et 27 Septembre 2014 [1/35 100—1/20 800]. Calage sub-métrique.

2009

Orthophotographie de l'IGN. Contour du glacier tracé sur les images métriques déjà orientées. Photo-interprétation estimée à ± 1 m pour les limites du glacier.

Fronts du glacier

Fichier type front_XXX.shp

1921, 1924 à 27, 29, 30, 38, 45, 53, 59.

Plans du Glacier Blanc (partie inférieure) au 1/5 000 établis par l'administration des Eaux et Forêts, 10^{ème} conservation, Département des Hautes-Alpes, Commission des Aménagements, Reboisement et

Améliorations pastorales et forestières. Calage en Lambert III sous SIG sur les 4 points d'ancrage des profils rouge et bleu. Calage à ± 5 m.

1975.

Carte de la langue frontale du Glacier Blanc. Restitution photogrammétrique au 1/2000 des clichés de la campagne du 24 septembre 1975 des glaciers de l'Oisans par Sintegra, courbes de niveau à 2,5 m sur le glacier, à 5 m sur le terrain nu. Système planimétrique local. Altimétrie IGN69. Calage en Lambert III sous SIG sur 4 points d'orientation. Calage à $\pm 0,70$ m.

Moraines

1986. Topographie réalisée en septembre 2002 au théodolite. Relevé de la crête de la moraine construite lors de l'extension maximale de 1986. Relevés établis par E. Thibert, S. Jendoubi, J. Faure (PN Écrins), L. Reynaud (LGGE). Détermination de la moraine à $\pm 0,50$ m.

Fichier moraine_1986.shp

Moraine du Petit Age de Glace (PAG)

moraine_PAG_X(ABCDE).shp, levés au GPS différentiel lors des journées de terrain :

E. Thibert (Irstea), 21-22 août 2018.

E. Thibert, M. Bonnefoy-Demongeot, M. Bouvier, 11-12 septembre 2018.

E. Thibert, E. Dupuis, du 16 au 19 octobre 2018.

E. Thibert, M. Bonnefoy-Demongeot, M. Gory, 20 juin 2019.

Détermination des moraines à $\pm 0,50$ m.

L'ensemble des positions de la langue frontale du Glacier Blanc sur des documents planimétriques, tels que plans et cartes (qu'ils soient ou non rattachés à l'IGN), permet de corriger les mesures de terrain de certains biais, comme celui de la mesure de la distance inclinée, c'est-à-dire selon la pente du terrain qui est très variable sur ces sites.

Une telle courbe corrigée pourra être établie pour le Glacier Noir si des études botaniques de recolonisation y sont envisagées.

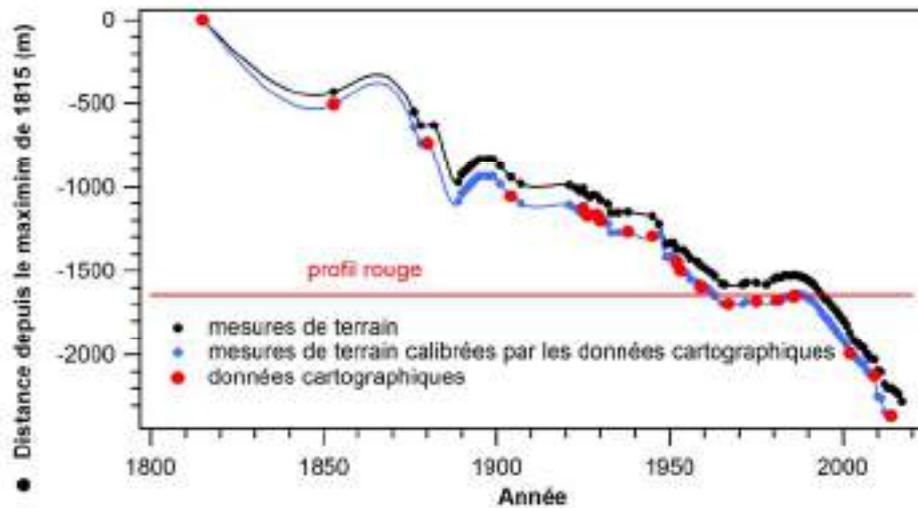


Figure 6. Variations de longueur du Glacier Blanc depuis le maximum d'extension du Petit Age de Glace (1815-1820). La courbe noire est la courbe des relevés de terrain. La courbe bleue est obtenue par ajustement des relevés de terrain sur les retraits cumulés fournis par les documents cartographiques utilisés dans cette étude (points rouges).

Glacier Noir

1853 et 1896

Cartes de l'Etat-Major (d'après Mougin, 1934).

1880

Carte du service vicinal (d'après Mougin, 1934).

1904

C. Jacob et G. Flusin. Étude sur le Glacier Noir et le Glacier Blanc dans le Massif du Pelvoux. Allier (Frères), Grenoble, 1905, 62p. Carte des glaciers Blanc et Noir au 1/10 000. Calage à ± 4 m.

1981

Photographie aérienne n°411 de la mission IGN IFN05P du 29 juillet 1981. Image brute orientée sur 8 points de contrôle d'altitudes voisines au centre de l'image. Calage à ± 10 m.

1986

Photographie aérienne n°0030 de la mission IGN IGNF-3536-3636 du 5 septembre 1986. Image brute orientée sur 6 points de contrôle d'altitudes voisines au centre de l'image. Calage à ± 5 m.

1994

Photographie aérienne n°1172 de la mission IGN CN93000024_1993_IFN05_IRC du 3 août 1994 (image infrarouge-couleur). Image brute orientée sur 5 points de contrôle d'altitudes voisines au centre de l'image. Calage à ± 5 m.

1921, 1924 à 30, 32, 33, 35, 38, 45, 47, 49, 51, 53 à 56, 58, 59, 61, 62, 65, et 1966.

Plans du Glacier Noir (partie inférieure) au 1/5 000 et 1/2 000 établis par l'administration des Eaux et Forêts, 10^{ème} conservation, Département des Hautes-Alpes, Commission des Aménagements, Reboisement et Améliorations pastorales et forestières. Calage des plans à ± 5 m.

Références bibliographiques

Allix, A. (1927). Mémoire sur les observations glaciologiques faites en Dauphiné jusqu'en 1924. Études glaciologiques, Tome VI, p. 1-138. Imprimerie Nationale, Paris.

Club Alpin Français, Annuaire 1874, Carte topographique du massif du Mont-Pelvoux, reproduction (avec l'autorisation spéciale du ministre de la guerre) des minutes de l'état-major français, au 40.000e, gravée sur pierre par Erhard (en couleur).

Carte du Massif du Pelvoux au 40.000e, capitaine F. Prudent.

Feuille de la carte d'État-Major n° 189, au 80.000e, de la région de Briançon, en 1866.

Duhamel, H. (1887). Carte du massif en 4 feuilles au 100.000e, dessinée par Henry Duhamel et jointe au Guide du Haut-Dauphiné.

- Mougin, P. (1927). Le Glacier Blanc et le Glacier Noir, Études Glaciologiques, Volume 6 Numéro 1 pp. 157-162 Tome VI. (cartes 1853, 1880, 1896)
- Mougin, P. (1934). Glaciers du Pelvoux et du Vénéon, (p. 84) ; Variations du volume des langues terminales. In « Études glaciologiques », Paris, Imprimerie Nationale, Tome VII.
- Helbronner, P. (1935) Description géométrique détaillée des Alpes françaises, tome X : Massifs du Champsaur, du Dévoluy, des Écrins et du Pelvoux (campagnes 1904-05-06-18-21-22). Gauthier-Villars, Paris, 839 p.
- Jacob, C. et G. Flusin, 1905. Étude sur le Glacier Noir et le Glacier Blanc dans le Massif du Pelvoux. Editions Allier frères, Grenoble, 62p.
- Lafay, C., G. Flusin, et C. Jacob, 1905 Cartes des glaciers Blanc et Noir au 1/10000. Éditions Allier frères, Grenoble.
- Leroy Ladurie, E., 1967. Histoire du climat depuis l'an Mil. Flammarion, Paris, 374p.
- Reynaud, L., 1997. Rapport d'étude sur les suivis glaciologiques dans le Parc National des Écrins. Mars 1997. Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement. 11p.
- Röthlisberger, F., 1986. 1000 Jahre Gletschergeschichte der Erde. Aarau: Verlag. 416p.
- Service Géographique des Armées (SGA), 1932. Carte établie sur la période 1925-1930 et publiée en 1932. Feuilles no.3&4 de la carte XXXIV-36 de St Christophe-en-Oisans.
- Thibert, E., Faure, J. et Vincent, C. (2005). Bilans de masse du Glacier Blanc entre 1952, 1981 et 2003 obtenus à partir de modèles numériques de terrain. La Houille Blanche, n°2-2005, 72-78.
- Thibert, 2015. Glacier Blanc, Rapport sur le bilan photogrammétrique 2002-2014. Convention Parc National des Écrins n° 402/2014. 10p.

E. Thibert, M. Bonnefoy-Demongeot, F. Nouguier, le 20/11/2019

Caractérisation dendrochronologique de la forêt de mélèze en marge pro-glaciaire : Apport pour la connaissance du climat dans les Alpes françaises



Rapport novembre 2019 convention PNE 244/2018

Dr Jérôme Lopez-Saez
Expert en dendrochronologie



Rappel du contexte et des objectifs

Dans les régions à climat saisonnier contrasté, les espèces ligneuses pérennes, dont les arbres, génèrent un cerne de croissance annuel. L'épaisseur d'un cerne est la résultante d'un ensemble de facteurs intrinsèques (spécifiques et géométriques) et extrinsèques (écologiques : substrat, sol, exposition, conditions météorologiques-climatiques, et accessoirement anthropiques) intervenus lors de la mise en place de ce cerne (Körner, 1994).

Les séries dendrochronologiques sont ainsi considérées comme des archives naturelles des événements climatiques ou écologiques passés qui permettent de comprendre les impacts passés des fluctuations climatiques sur différents écosystèmes mais également d'anticiper sur les impacts futurs du changement climatique en cours. La confrontation des chronologies de largeur de cernes et des données climatiques instrumentales, au moyen d'une approche dendroécologique, permet de mettre en évidence l'impact des fluctuations climatiques sur la croissance des arbres; corrélativement, les informations climatiques contenues dans ces chronologies peuvent être utilisées pour la reconstruction de paramètres climatiques simples (précipitations, températures) ou synthétiques (évapotranspiration potentielle, bilan hydrique), avec une résolution annuelle, sur plusieurs siècles (Buntgen et al., 2006; Corona et al., 2010a,b).

Les travaux récents montrent que les arbres les plus sensibles aux variations du climat sont localisés dans les zones de bordure des écosystèmes et en limite de leurs aires de répartition (Guisan et al., 1995). Ainsi, les transitions entre les biomes aux hautes latitudes (Guisan et al., 1995), et surtout les limites supraforestières aux hautes altitudes (Graumlich et al., 1989 ; Nicolussi et al., 1995; Belingard et al., 1998; Didier et Brun, 1998), ont été utilisées comme enregistreurs des fluctuations climatiques. Plusieurs travaux ont également mis en évidence le rôle des variations climatiques et de la dynamique glaciaire sur la colonisation végétale arborée. Ils montrent, dans certaines chaînes de montagnes américaines ou européennes, que la fin du 19e et le début du 20e siècle coïncident avec une période d'établissement de jeunes arbres dans les marges pro-glaciaires (Masiokas et al, 2010 ; Capps et al, 2011).

Dans ce contexte, les forêts de mélèzes localisées dans le secteur du Pré de Madame Carle et de la vallée de Celse Nière sont des bio-indicateurs particulièrement intéressants pour la reconstruction du climat dans des secteurs où les séries climatiques sont courtes et fragmentaires (Véron et al., 2003).

L'objectif du projet est double. Il s'agit :

- (i) de cerner les impacts des variations climatiques et notamment du réchauffement récent, sur la croissance radiale des mélèzes au moyen d'une approche dendroécologique ;
- (ii) de valider le potentiel de ce bioindicateur pour la reconstruction pluriséculaire du climat dans un contexte en marge pro-glaciaire, au moyen d'une approche dendroclimatique ;

Le projet de recherche est organisé en deux axes distincts:

Axe 1 : Détermination des facteurs climatiques expliquant la croissance radiale du mélézin

Axe 2 : Reconstruction millénaire du climat à l'échelle des Alpes françaises

AXE 1 : détermination des facteurs climatiques expliquant la croissance radiale du mélèzin



Figure 1 : Localisation des sites qui ont fait l'objet d'une campagne d'échantillonnage : en jaune, la placette PMC (Pré de Madame Carle), en orange, la placette CLAP (Clapouse) dans la vallée de Celse Nière.

Dans le cadre de la convention PNE 244/2018, nous avons effectué une première campagne d'échantillonnage dendrochronologique de mélèzes, localisées au niveau du Pré de Madame Carle, en amont du bar-restaurant (cf. encadré jaune). En présence de Matthieu Chaney, technicien ONF, nous avons effectué, au moyen d'une tarière de Pressler, l'échantillonnage de 16 mélèzes. Cette population de référence a été complétée par l'échantillonnage de 28 mélèzes localisés dans la vallée de Celse Nière, en aval d'Ailefroide. Cet échantillonnage a été réalisé au niveau et à proximité de la Bosse de Clapouse, à une altitude comprise entre 2160 et 2180 m (cf. encadré orange).

En laboratoire, les échantillons (nb. 88) ont été analysés et les données traitées suivant les procédures standards en dendrochronologie décrites par Stokes et Smiley (1968). Les étapes incluent la préparation de la surface, le décompte des cernes de croissance, le skeleton plot (Schweingruber, 1988) et la mesure de la largeur des cernes à l'aide d'un programme informatique d'analyse de séries temporelles (Coorecorder et Cdendro).

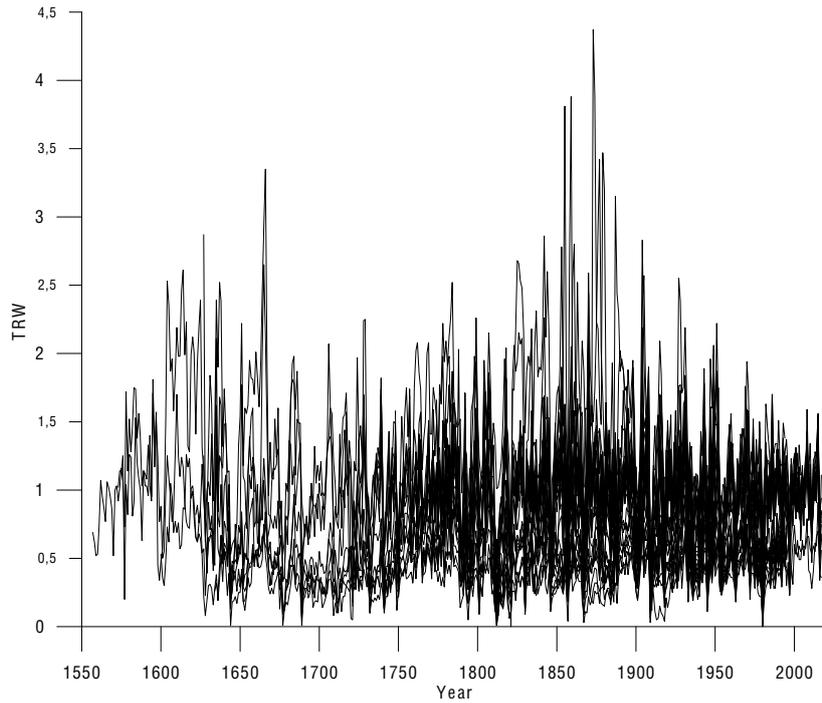


Figure 2 : *Séries moyennes individuelles (en mm) des cernes de croissance de la placette CLAP.*

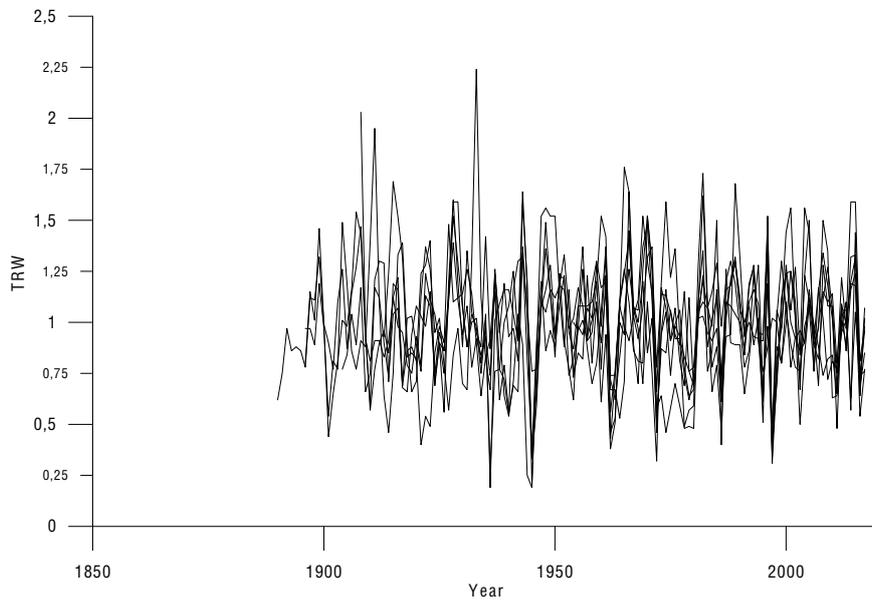


Figure 3 : *Séries moyennes individuelles (en mm) des cernes de croissance de la placette PMC.*

Afin d'assurer l'interdatation, les séries individuelles ont été comparées graphiquement et statistiquement. La comparaison graphique inclut une superposition des courbes de croissance (figures 2 et 3). En ce qui concerne, la placette CLAP (figure 2), le processus d'interdatation a permis de dater la totalité des arbres échantillonnés. L'arbre le plus vieux comporte 460 cernes pour un premier cerne daté en 1557. L'arbre le plus jeune échantillonné contient 169 cernes (1848). La moyenne du nombre de cernes pour la placette CLAP est de

311 avec un écart type de 97 cernes. Sans surprise, la placette PMC est bien plus jeune (figure 3), avec un nombre de cernes moyen de 108 pour un écart type de 18 cernes. Cependant, sur les 16 individus échantillonnés, 4 n'ont pas été intégrés dans la chronologie. Ils sont considérablement plus vieux que les 12 autres, et ont été datés, pour le plus vieux en 1795 (1795-1807). Ces arbres présentent des patrons de croissance significativement différents des plus jeunes. Ils ont été témoins de la dernière avancée glaciaire. Nous souhaitons prospecter davantage la placette PMC afin de tenter d'échantillonner un nombre suffisant d'arbres (nb 10-12) contemporain à cette période.

Afin de faire ressortir les variations interannuelles du signal dendrochronologique, les séries individuelles ont été standardisées au moyen de différentes routines R.

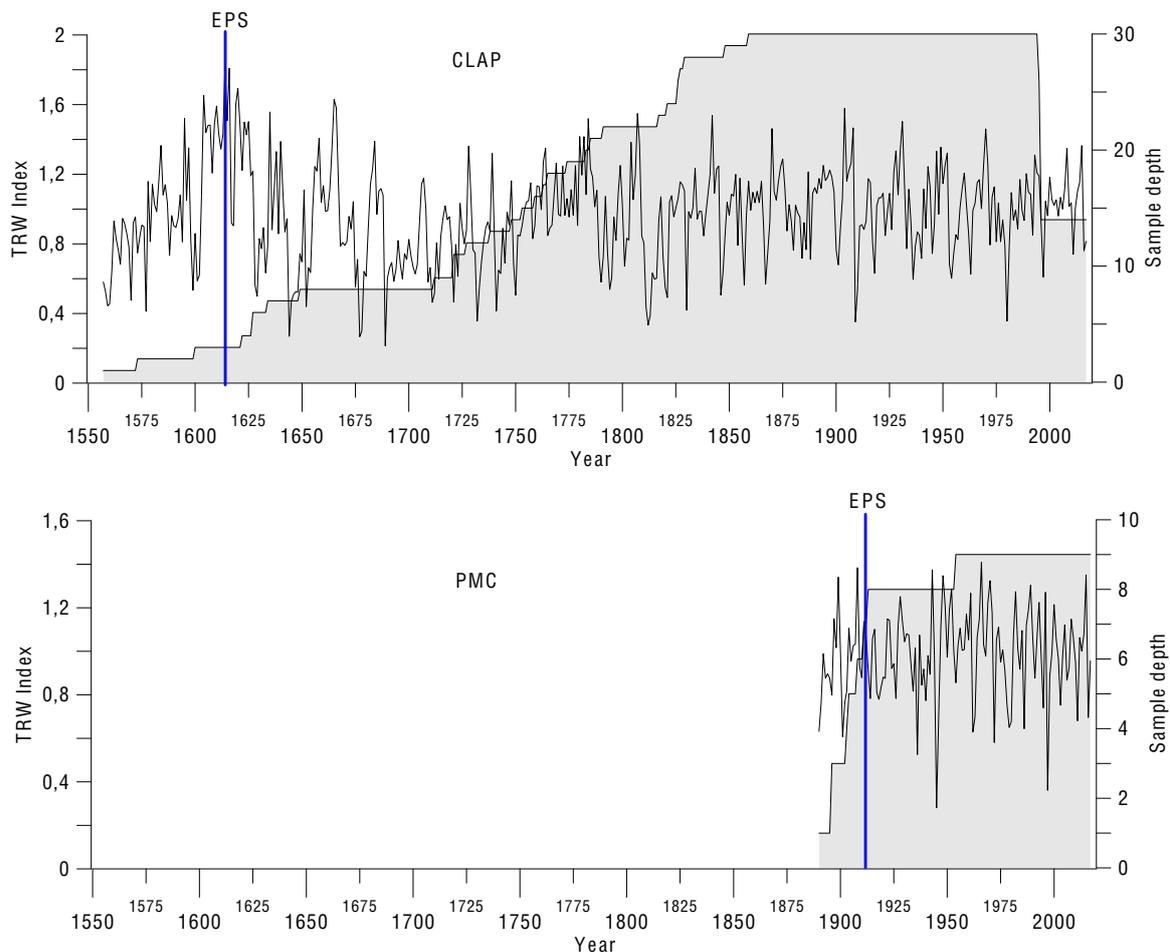


Figure 4 : Chronologies de références standardisées des placettes CLAP et PMC.

Les données brutes de largeur de cernes (figures 2 et 3) ont d'abord été corrigées par une fonction exponentielle négative permettant de retirer la tendance d'âge, puis par une fonction *spline* cubique flexible (fenêtre 20 ans) qui permet de retirer les fluctuations de basse fréquence (liés aux phénomènes de compétition, par exemple).

Ce processus statistique a un double objectif. Il permet une : (i) uniformisation des variations de croissance au cours du temps, indépendamment des différences d'âge et des différences de croissance inter-arbres ; (ii) extraction optimale du signal climatique afin de permettre une reconstruction des fluctuations interannuelles, décennales et centennales du climat.

La chronologie de référence de la placette CLAP couvre la période 1557-2017 et est robuste, d'un point de vue statistique, à partir de 1618 (Indice EPS systématiquement supérieur à 0.8). En ce qui concerne celle de PMC, la chronologie de référence est plus courte, couvrant la période 1890-2017. Le seuil EPS est robuste à partir de 1908 (figure 4).

L'étape suivante consiste à utiliser des fonctions de réponse mensuelles (août n-1 à septembre de l'année n) qui permettent de déterminer les paramètres climatiques qui conditionnent la croissance de l'arbre, mais également de quantifier leur poids dans la variabilité de la croissance radiale.

Dans les fonctions de réponse, les variables météorologiques ont été considérées comme régresseurs (températures et précipitations moyennes mensuelles), les données indexées et standardisées comme variables dépendantes. La robustesse des relations cernes/climat a été testée au moyen d'une technique de type « bootstrap » qui permet, par tirage aléatoire avec remise, d'estimer l'écart-type des coefficients de régression au cours des différents tirages.

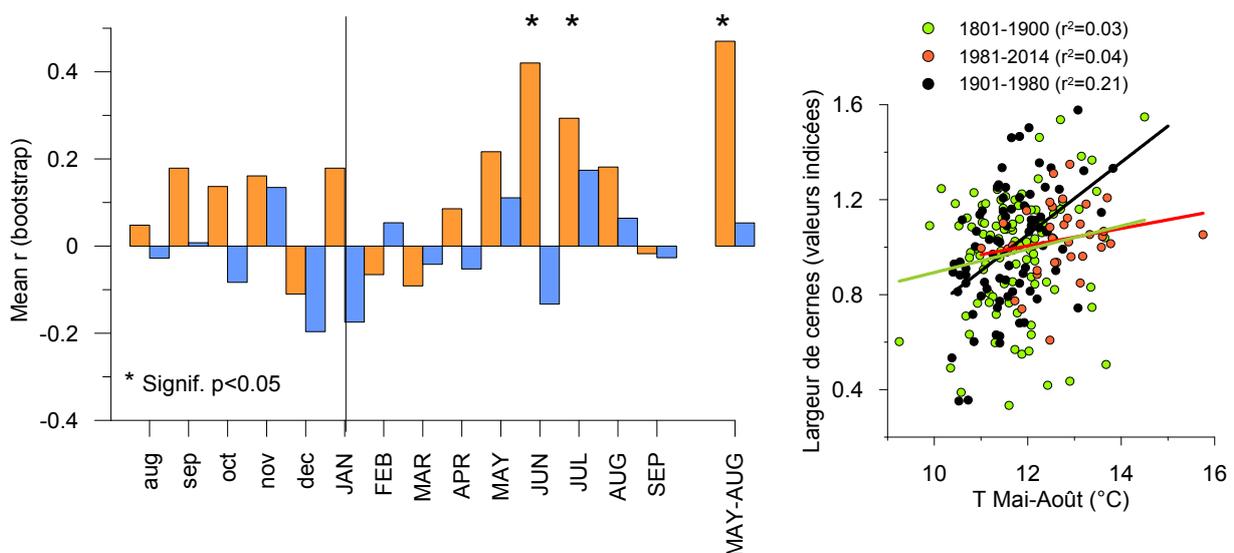


Figure 5 : Fonctions de réponse de la placette de CLAP.

Dans le cadre de cette analyse, nous avons extrait, au point de grille le plus proche des placettes, les données températures (orange) et précipitations (bleu) mensuelles du Climate Research Unit comme variables météorologiques. Ces données couvrent les 200 dernières années avec une résolution de 0.5*0.5 Lat-Long.

La croissance de la placette CLAP répond positivement aux températures estivales (moyenne des températures des mois de mai, juin, juillet et août). De manière plus simple, plus les températures estivales sont clémentes, plus le cerne sera large. En ce qui concerne les précipitations, aucune corrélations significatives ne ressortent.

Dans le cas de CLAP, le principal facteur explicatif reste donc les températures estivales.

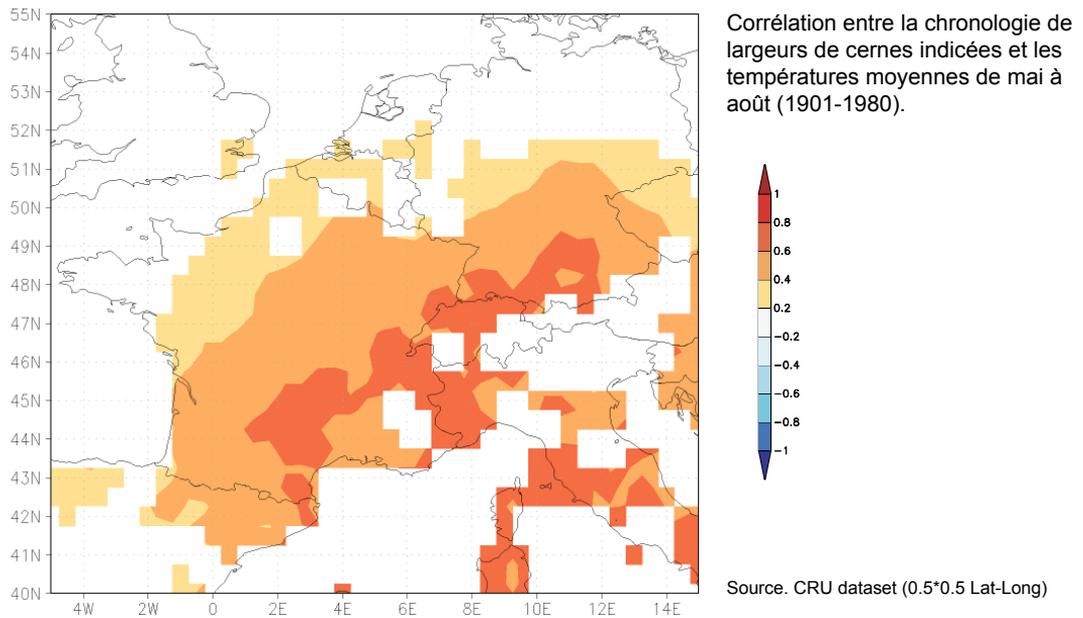


Figure 6: *Corrélations spatiales entre la chronologie de largeurs de cernes indicées et les températures estivales.*

Cette analyse de la relation cerne/climat est confirmée par des résultats similaires obtenues par les corrélations spatiales positives (0.6) entre la chronologie et les températures moyenne estivales (figure 6). En ce qui concerne la placette PMC, en l'état actuel, la chronologie de référence est trop courte et ne permet pas ce genre d'analyse.

Axe 2 : Reconstruction millénaire du climat à l'échelle des Alpes françaises

Contrairement aux archives naturelles qui présentent un moins bon contrôle temporel, la dendrochronologie nous assure que chaque cerne de croissance est comparé à des variables climatiques de la même année. Comme il est possible de tester les reconstitutions climatiques directement dans le temps, tout en évitant, comme on le fait pour les archives à basse résolution temporelle (par exemple pour les données polliniques, on utilise un référentiel collecté sur une zone géographique aussi diversifiée que possible), des méthodes d'évaluation robustes ont pu être mises en place.

Dans le cadre du projet, les fonctions de transfert entre données dendrochronologiques et données climatiques ont été étalonnées au moyen d'une méthode de régression multiple. La validation des reconstitutions s'est fait en deux temps. Une validation croisée a d'abord été obtenue en divisant l'intervalle d'étalonnage (couvert par données météorologiques) en deux périodes P1 (dans notre cas : 1901-1949) et P2 (1950-2017). Dans un premier temps, la fonction de transfert a été étalonnée sur la période 1 puis validée sur la période 2. Dans un second temps, la fonction de transfert a été étalonnée sur P2 puis validée sur P1.

Dans chacun des cas, la qualité de la reconstruction a été évaluée au moyen d'indices statistiques couramment utilisés en dendroclimatologie (coefficient de détermination R^2 , erreur quadratique moyenne RMSE, réduction de l'erreur RE, Coefficient d'efficacité CE).

Un post-traitement, de type correction de variance, a été appliqué aux données reconstruites afin de remédier à la perte de variance inhérente à la régression multiple.

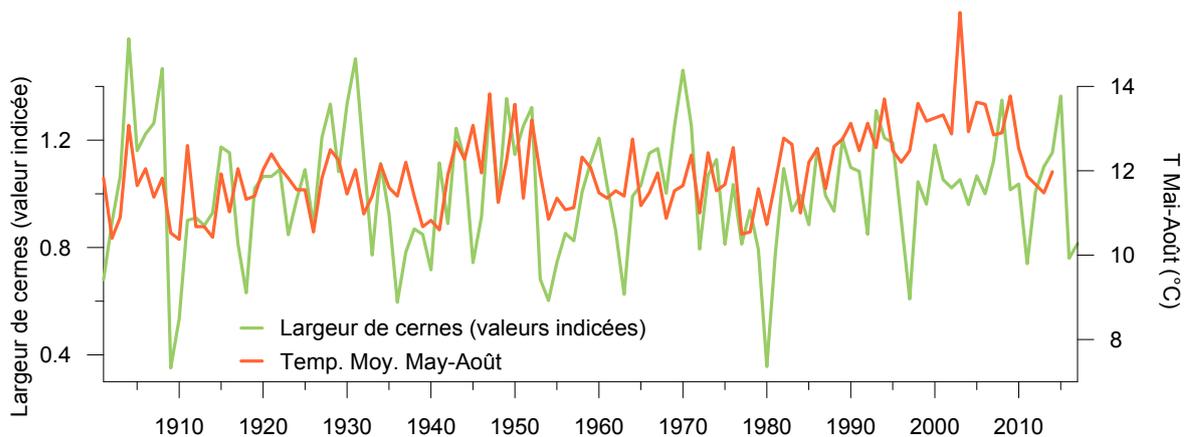


Figure 7 : Comparaison entre les données dendrochronologiques (en vert) et les données climatiques (en orange).

Cette fonction de transfert permet, par la suite de comparer objectivement les données dendrochronologiques et le paramètre climatique qui va être reconstruit (figure 7). Sur la période d'étalonnage (1901-2017), les données cernes sont relativement bien corrélées avec les températures estivales jusqu'à la fin des années 80.

A partir de 1990, on observe une divergence entre les séries. Cela signifie que la largeur des cernes ne « suit » plus la tendance à l'augmentation des températures estivales récentes.

L'hypothèse probable de cette divergence s'explique par l'apparition d'un autre facteur explicatif de la croissance depuis une trentaine d'années. Dans le cas de notre étude, nous pensons à l'effet du stress hydrique hivernale et/ou estivale qui s'observe récemment.

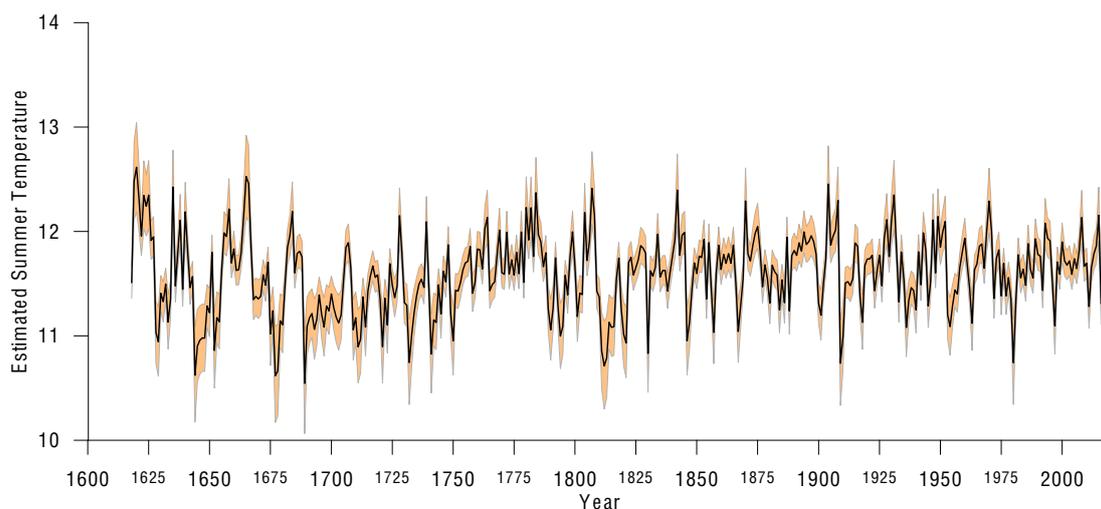


Figure 8 : Reconstruction des températures estivales depuis 1618 au moyen d'une approche dendroclimatique (en orange, l'intervalle de confiance à 95%).

Malgré cette divergence observée, les fonctions de transfert nous permettent d'estimer les températures estivales sur la période 1618-1990 avec un intervalle de confiance satisfaisant (Figure 8).

Cette reconstruction non lissée nous permet de mettre en évidence une période plus chaude, 1618-1635 et des périodes estivales plus froides pendant le PAG.

Afin d'estimer au mieux les températures estivales dans le passé et de palier au biais lié à la divergence, nous avons utilisé un jeu de données dendrochronologique régionale plus vaste et robuste. Dans un premier temps, nous avons utilisé les séries dendrochronologiques du mélèze disponibles à l'échelle des Alpes françaises (figure 9, Saulnier et al., 2019). Ces données acquises par Jean-Louis Edouard (CR CNRS, IMBE), Mélanie Saulnier (IMBE), Christophe Corona (CR CNRS, GEOLAB) et complétées dans le cadre du projet, comportent 43 populations de mélèzes réparties à l'échelle des Alpes françaises. Ces séries dendrochronologiques vont nous permettre de reconstituer, à l'échelle régionale, les températures estivales au cours du dernier millénaire.

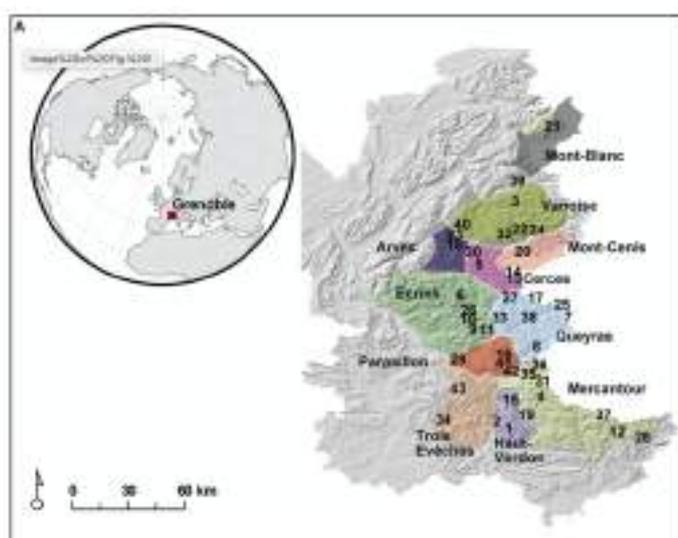


Figure 9 : Localisation des séries dendrochronologiques utilisées dans le cadre du projet (D'après Saulnier et al., 2019).

Dans le cadre du projet et à la différence de la méthode employée pour les séries de CLAP et PMC, nous avons déployé une approche statistique par standardisation de la courbe de croissance régionale en fonction de l'âge cambial (RCS). C'est une méthode efficace permettant de conserver les fluctuations de basse fréquence au sein des séries. Celle-ci est couramment utilisée à des fins de reconstitution climatique (Büntgen et al., 2005 ; Wilson et Jacoby, 2006). Les séries individuelles sont d'abord représentées sur l'échelle des années calendaires, puis alignées selon l'âge cambial des cernes. Le premier cerne de la série, le plus proche de la moelle, est aligné sur la valeur 1 de l'abscisse (1 an d'âge), plutôt que sur l'année calendaire de sa formation. On assume que la tendance globale de cet ensemble de séries alignées selon leur âge cambial représente la tendance de la croissance radiale liée à l'âge des individus d'une espèce donnée, dans une région donnée. On peut dire que cette tendance collective représente le bruit des processus non stationnaires reliés à l'âge. On assume aussi que la forme structurale de cette courbe, à n'importe quel âge biologique, est indépendante de l'année de formation des cernes et donc des conditions climatiques. La RCS est obtenue en calculant la moyenne de cet ensemble de courbes (Nicault et al., 2010).

En ce qui concerne notre chronologie RCS (Figure 10), elle couvre les 1200 dernières années. 43 populations la composent et plus de 500 séries ont été datées. Ces séries proviennent d'arbres vivants, morts et de bois issus de charpentes. Nos séries de CLAP, PMC ont été implémenté dans cette chronologie régionale.

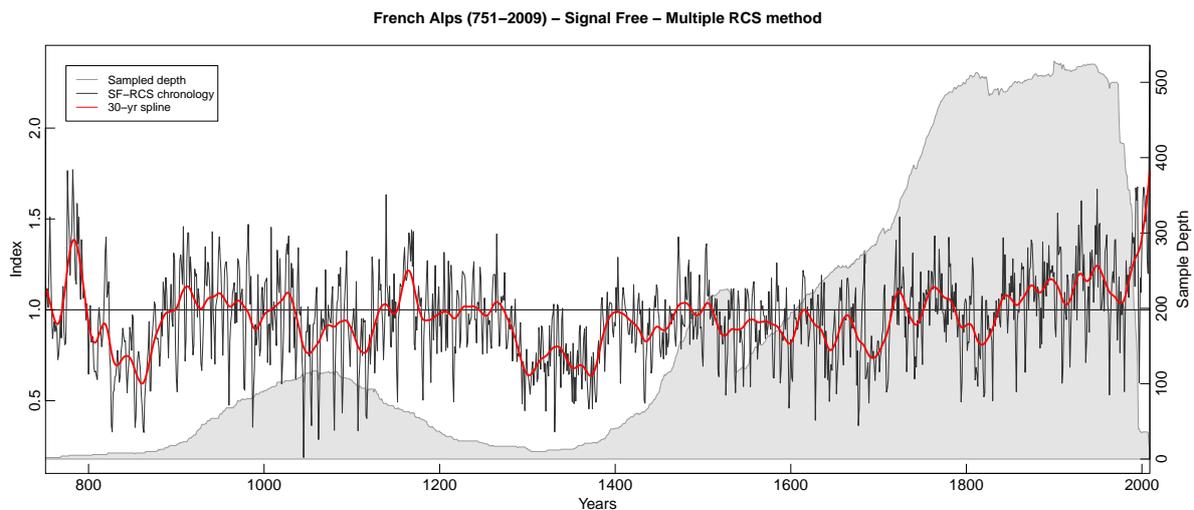


Figure 10 : Chronologie dendrochronologique RCS à l'échelle des Alpes Françaises et profondeur de l'échantillonnage.

corr Jun–Aug averaged RCS French Alps
with Jun–Aug averaged CRU TS4.03 temperature 1901:2008 $p < 10\%$

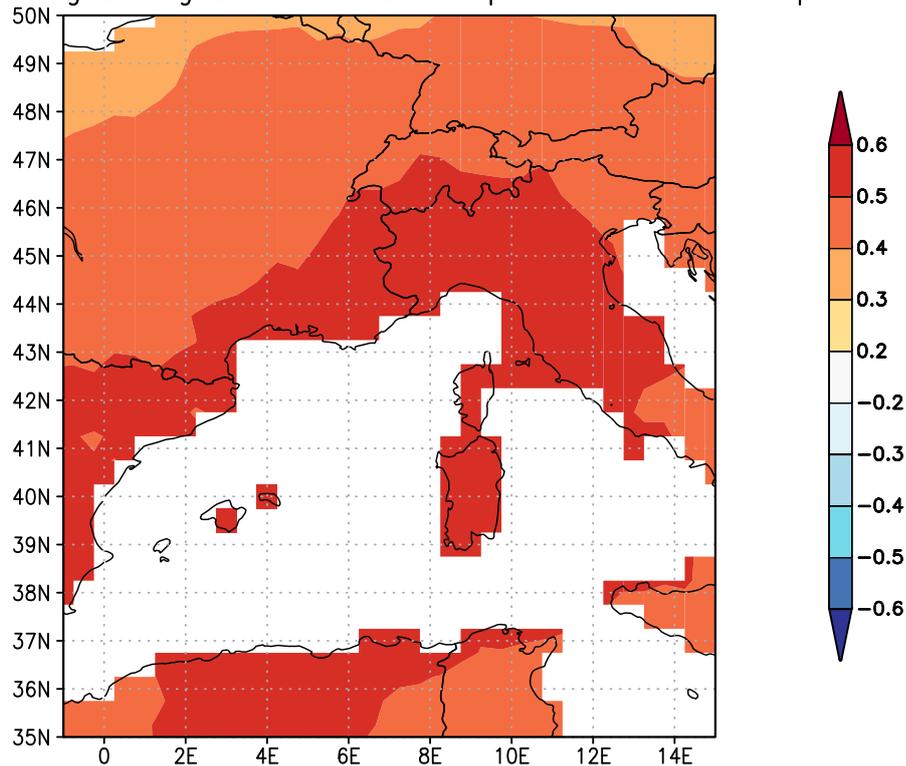


Figure 11: Corrélations spatiales entre la chronologie RCS et les températures estivales

la relation cerne/climat observée à l'échelle locale (série de CLAP), est confirmée par des résultats similaires obtenues par les corrélations spatiales positives (0.6) entre la chronologie RCS et les températures moyenne estivales (figure 11).

Nous avons, ensuite, déployé la même méthodologie pour reconstituer les températures estivales. Une validation croisée a d'abord été obtenue en divisant l'intervalle d'étalonnage (couvert par données météorologiques) en deux périodes P1 (dans notre cas : 1901-1949) et P2 (1950-2008). Dans un premier temps, la fonction de transfert a été étalonnée sur la période 1 puis validée sur la période 2. Dans un second temps, la fonction de transfert a été étalonnée sur P2 puis validée sur P1.

Dans chacun des cas, la qualité de la reconstruction a été évaluée au moyen d'indices statistiques couramment utilisés en dendroclimatologie (coefficient de détermination R^2 , erreur quadratique moyenne RMSE, réduction de l'erreur RE, Coefficient d'efficacité CE).

Un post-traitement, de type correction de variance, a été appliqué aux données reconstruites afin de remédier à la perte de variance inhérente à la régression multiple.

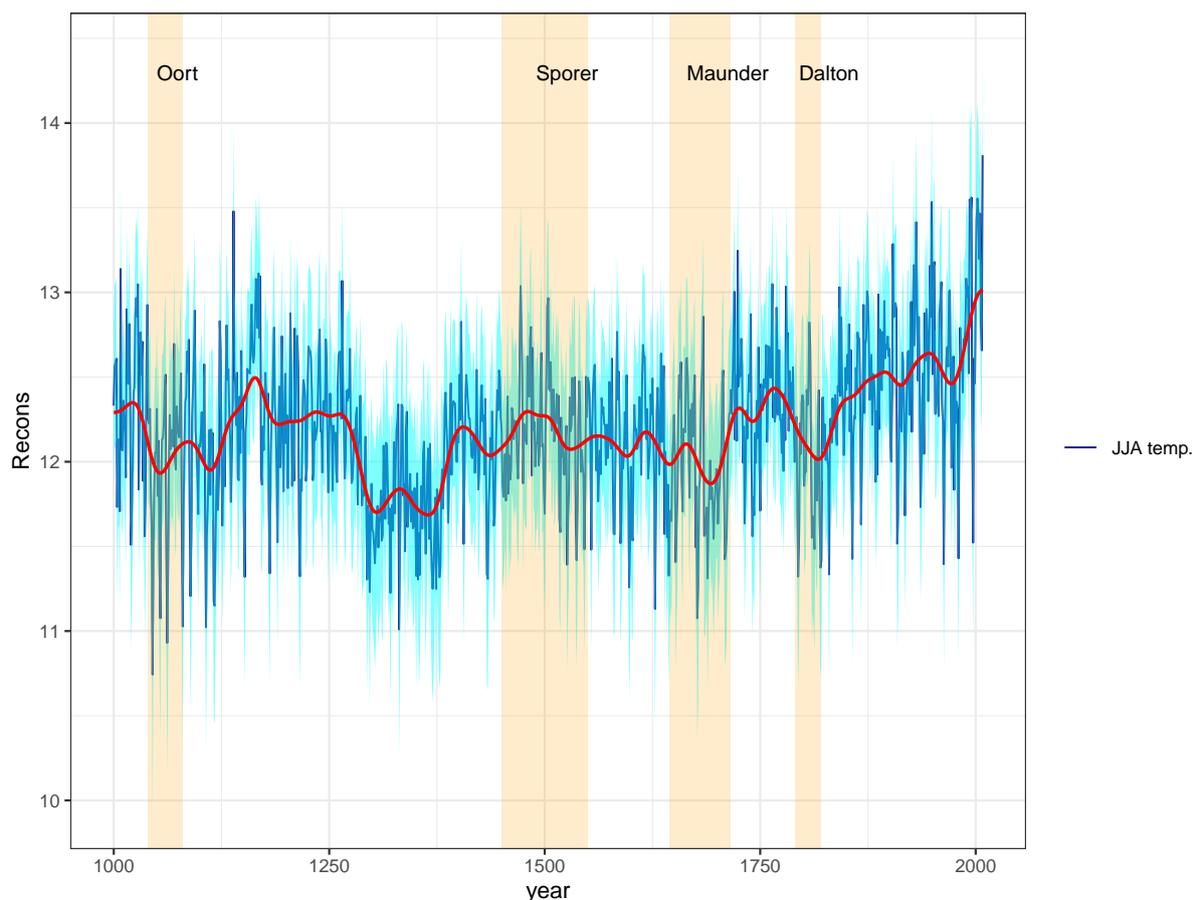


Figure 12 : Reconstruction des températures estivales (moy. Juin-Juillet-Août) depuis l'an 1000 au moyen d'une approche dendroclimatique (en bleu, l'intervalle de confiance à 95%).

Cette chronologie RCS nous permet d'obtenir, pour la première fois, une reconstitution des températures estivales depuis l'an 1000, à l'échelle des Alpes françaises. Celle-ci confirme l'impact des principaux minimums solaires, notamment Maunder et Dalton. Grâce à cette méthode, nous pouvons également mieux quantifier le réchauffement climatique récent (Figure 12).

Conclusion et perspectives de recherche

Suite à la première campagne d'échantillonnage menée durant l'été 2018, les séries dendrochronologiques ont permis de déterminer les facteurs climatiques expliquant la croissance radiale du mélèze à proximité des glaciers Blanc et Noir. Sans surprise, la croissance radiale du mélèze est conditionnée par les températures estivales. Cependant, à l'échelle locale, nous observons une divergence depuis 1990, liée probablement aux effets des stress hydriques estivaux et/ou hivernaux observés dans la région. A partir de ce constat, nous avons opté pour le déploiement d'une approche statistique plus régionale. Pour cela nous avons utilisé et complété un jeu de données dendrochronologique disponible à l'échelle des Alpes françaises.

A partir de plusieurs populations, nous avons monté une chronologie régionale de type RCS. Celle-ci nous permet de reconstituer les températures estivales depuis l'an 1000. Nous sommes actuellement en train d'actualiser un certain nombre de populations qui composent cette RCS. Certaines d'entre-elles ont été échantillonnées au début des années 1990. Il faut donc les compléter afin de mieux cerner le réchauffement climatique récent. Nous sommes également

en train de recentrer notre chronologie RCS à l'échelle du massif des Écrins. Les résultats seront disponibles début 2020. Nous avons également, à disposition, des chronologies de référence de pin cembro pluri-centennaires à proximité des glaciers. Celles-ci vont être de nouveau échantillonnées afin de couvrir les 25 dernières années (échantillonnées en 1995). De récentes études mettent en évidence le potentiel de reconstruction de cet espèce. Il s'agira ici de proposer une étude comparative entre les deux espèces.

Enfin, en partenariat avec IRSTEA, nous sommes également en train d'analyser les données des bilans de masse du glacier Blanc. En fonction de la longueur de la série temporelle, nous pourrions envisager d'estimer ce bilan de masse, sur plusieurs centaines d'années, à partir des données dendrochronologiques.

Références bibliographiques

- Belingard, C., Tessier, L. et Édouard, J.-L., 1998. Reboisement et dynamique naturelle dans les forêts sub-alpines (Haut-Verdon, Alpes du Sud, France). *Géographie physique et Quaternaire*, 52 : 227-236.
- Büntgen U., Franck D., Wilson R., Carrer M., Urbinati C., 2008. Testing for tree-ring divergence in the European Alps. - *Global Change Biology*, vol. 14, n° 10, pp. 2443-2453.
- Capps, D. L., Wiles, G.C., Clague, J.J and Luckman, B.H. 2011 'Tree-ring dating of the nineteenth-century advance of Brady Glacier and the evolution of two marginal lakes, Alaska' *The Holocene* 21(4): 641-649
- Cook E.R., Holmes R.L., 1984. Program ARSTAN and users manual. Lamont Doherty Geological Observatory, Palisades, New York, 78 p.
- Cropper, J.P., 1979. Tree-ring skeleton plotting by computer. *Tree-ring Bulletin* 39: 47-59.
- Corona C., Guiot J., Edouard J.L., Chalié F., Büntgen U., Nola P., and Urbinati C., 2010a. Millennium-long summer temperature variations in the European Alps as reconstructed from tree rings. *Climate of the Past*, 379-400.
- Corona C, Edouard J.L., Guibal F., Guiot J., Bernard S., Thomas A., Denelle N., 2010b. Long-term summer (751-2008) temperature fluctuation in the French Alps based on tree-ring data. *Boreas*, DOI: 10.1111/j.1502-3885.2010.00185.x
- Didier, L. et Brun, J.-J., 1998. Limite supraforestière et changements environnementaux : pour une approche pluriscalaire et spatialisée des écosystèmes d'altitude. *Géographie physique et Quaternaire*, 52 : 245-253.
- Guisan, A., Holten, J. I., Spichiger, R., and Tessier, L., 1995. Potential Ecological Impacts of Climate Change in the Alps and Fennoscandian Mountains, *Conservatoire et Jardin botaniques, Genève*, p. 194.
- Graumlich, L.J., Brubaker, L.B., Grier, C.C., 1989. Long-term trends in forest net primary productivity: Cascade mountains, Washington. *Ecology* 70, 405-410.
- Masiokas, M.H., Luckman, B.H., Villalba, R., Ripalta, A. and Rabassa, J. 2010 'Little Ice Age fluctuations of Glaciar Río Manso in the north Patagonian Andes of Argentina' *Quaternary Research* 73: 96-106
- Nicault A., Bégin Y., Guiot J. 2010. Standardisation des séries dendrochronologiques.
- Nicolussi, K., Bortenschlager, S. and Korner, C., 1995. Increase in tree-ring width in subalpine *Pinus cembra* from the central Alps that may be CO₂-related. *Trees* 9: 181-189.
- Veron, F., Bornard, A., Bernard Brunet, C., Bernard Brunet, J., Favier, G., Doree, A., 2004. Dynamiques respectives des pelouses et de la pinède de Pins à crochets (*Pinus uncinata* Miller ex Mirbel in Buffon) sous l'influence du pâturage ovin. Conséquences pour la gestion de la biodiversité dans la réserve naturelle des Hauts-Plateaux du Vercors.. 140 p.
- Saulnier M., Corona C., Stoffel M., Guibal F., Edouard J.-L., 2019. Climate-growth relationships in a *Larix decidua* Mill. Network in the French Alps. *Science of the total environment* 664 554-566.
- Schweingruber F. H., 1988. *Tree-rings : basics and applications of dendrochronology*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Boston, Lancaster, Tokyo, 276 p.
- Till C, Guiot J., 1990. Reconstruction of precipitation in Morocco since 1100 A.D. based on *Cedrus atlantica* tree-ring widths. *Quat Res* 33 : 337-351