

Observations glaciologiques (1998–2015) sur le glacier d'Infierno (Pyrénées, Espagne)

Luis Cancar-Pomar^{1,*}, José Antonio Cuchí², Fernando Lampre-Vitaller³, Javier Del Valle-Melendo⁴ et Gonzalo Fernández-Jarne⁵

¹ Département de Géographie Physique et CEACTIONTierra, Université de Jaén, Jaén, Espagne

² École Polytechnique Supérieure de Huesca, Université de Saragosse, Huesca, Espagne

³ Conseil des Monuments Naturels Glaciers des Pyrénées, Saragosse, Espagne

⁴ Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Saragosse, Espagne

⁵ Prof. de Lycée, Géographie, Pamplona, Espagne

Reçu le 3 octobre 2016 / Accepté le 17 octobre 2019

Résumé – D'une surface de 7,6 ha et une altitude comprise entre 2700 et 2950 m, le glacier d'Infierno est situé dans les Pyrénées aragonaises. Il est localisé dans l'unique chaîne de montagne espagnole qui conserve des glaciers blancs. Nous présentons les données glaciologiques du glacier de la période 1998–2015 en relation avec les facteurs météorologiques : températures, précipitations et rythmes d'accumulation nivale. Ce glacier a un comportement très variable, avec des fréquents rythmes opposés entre des années successives. Ainsi, les années de plus grand recul sont 2006, 2012 et 2015. Et, bien au contraire, dans les années 2013 et 2014 la couverture neigeuse a largement dépassé les limites du glacier. L'étude de l'accumulation nivale montre que les précipitations neigeuses printanières tardives peuvent favoriser le bilan. Elles peuvent même dépasser l'importance de celles des mois d'hiver, grâce à l'effet protecteur qu'elles exercent sur la surface de glace durant la période la plus chaude. Le glacier est sensible au réchauffement global, mais dans le haut bassin du Gállego, nous observons une faible augmentation de l'accumulation de neige tout au long des années écoulées du XXI^e siècle, malgré une forte variabilité interannuelle.

Mots clés : Infierno / Pyrénées / évolution glacier

Abstract – **Glaciological observations (1998–2015) on the Infierno glacier (Aragonese Pyrenees, Huesca, Spain).** The purpose of this research is to show and analyze the evolution data of the little glacier of the Infierno, which lies in the Aragonese Pyrenees. This is the only Spanish mountain range which still maintains white glaciers (160 ha in 2012) in its western extreme. The Infierno glacier, which is located at an altitude between 2700 and 2950 meters and is in a fast-regressing geographic context, covers 7.6 ha. The data from 1998 to 2015 of the evolution of the glacier are presented, associated to crucial meteorological factors such as temperature, rainfall and rhythm of temporal snowbed accumulation. A clear correlation between the annual weather conditions and the behavior of the glacier has been determined. At present, it can be stated that the glacier shows a variable behavior with a very low inertia. In fact, the years with the highest glacier loss rates were 2006, 2012 and 2015, whereas 2013 and 2014 were the most positive ones when the snow coverage exceeded the glacier basin itself and no ice could be seen on the surface. The evolution from 2012 until 2015 shows a significant evidence of the feeble inertia of the glacier as two good years, 2013 and 2014, were followed by an appalling 2014, to finish up with another horrible 2015. Regarding the rhythms of snow accumulated during the analyzed period of time, it has been proven that winters with a high rate of snow production are very positive for the glacier balance. However, these winters may be counteracted too by hot springs and summers which may have caused the total or almost total disappearance of the snowbed piled up throughout the winter. Late-spring snowfalls may enhance the balance, and could be even more important than the winter ones, as they can be very helpful to protect totally or partially the mass of ice during periods of high temperatures. Glaciers are sensitive to global warming but, in the higher basin of the Gállego River, a slight increase of snowbed in the start of the 21st century can be observed, which seems logical in terms of annual variability.

Keywords: Infierno / Pyrenees / glacier evolution

*Correspondance: lcancar@ujaen.es

1 Introduction¹

Les Pyrénées aragonaises abritent les derniers glaciers de la Péninsule Ibérique, entre les vallées de Tena et de Vénasque dans la province de Huesca. Les premières observations ont été réalisées par les naturalistes du début du XIX^e siècle comme Ramond (1801). Depuis lors, certains auteurs ont fait plusieurs plans cadastraux (Chueca et Lampre-Vitaller, 1994 ; Cancer-Pomar *et al.*, 2001 ; Julián *et al.*, 2001 ; Biarge *et al.*, 2002 ; Mora *et al.*, 2006 ; González Trueba *et al.*, 2008).

Le secteur ouest de ces glaciers se trouve dans la haute vallée du fleuve Gállego, près des villes de Panticosa, Sallent de Gállego et la station de ski Aramón-Formigal (Fig. 1). Dans un massif qui compte des sommets de plus de 3000 m (Balaitus, 3151 m, Infierno, 3083 m, Argualas, 3046 m, Gran Facha, 3005 m), le glacier d'Infierno est le plus occidental des glaciers blancs du versant espagnol des Pyrénées. Le reste du massif conserve un grand glacier rocheux de 14 ha dans le pic d'Argualas et aussi deux simples morceaux de glaces mortes stagnantes dans le fond des cirques du nord-est d'Infierno et Punta Zarra, dont les extensions ne dépassent pas 1 ha. Le glacier d'Infierno a fait l'objet d'études spécifiques, limitées dans le temps (Serrano, 1984, 1991).

Les données sur le retrait des glaciers pyrénéens espagnols sont très claires. La perte de la surface totale est de 50 % entre le Petit Âge Glaciaire (1291 ha estimés au milieu du XIX^e siècle) et 1980 (641 ha). Mais entre 1980 et 2012 (160 ha), la perte est encore plus marquée (75 %), et les pertes de surface entre la moitié du XIX^e siècle et 2012 sont de l'ordre de 87,5 % (Lampre-Vitaller, 2016). Pour les glaciers du versant français des Pyrénées, les données globales sont similaires, bien qu'il y ait des différences remarquables entre les massifs (René, 2013, 2014). Au cours d'une période similaire, depuis la fin du Petit Âge Glaciaire, les glaciers des Alpes françaises, à une latitude plus au nord et des altitudes supérieures à 4000 m, ont perdu environ 40 % (Francou et Vincent, 2007). La perte générale de 1980 jusqu'à nos jours est de 25 %, malgré des variations notables selon les massifs. La surface glaciaire du massif du Mont Blanc (glaciers plus hauts et plus grands) n'a diminué que de 11 %, et les glaciers de La Vanoise (plus bas et petits) ont perdu 39 % de leurs surfaces (Gardent, 2014 ; Schoeneich, 2016). Quant aux glaciers italiens, les données sont semblables à celles qui ont été relevées dans le versant français : dans les dernières 50 années, depuis 1960, ils ont perdu 30 % de surface (Smiraglia et Diolauti, 2016). Ces valeurs de 25 à 30 % de perte générale dans les Alpes contrastent avec la perte de 75 % relevée dans les Pyrénées espagnoles au cours de la même période.

Le massif d'Infierno est formé de matériaux métamorphiques, principalement quartzites et marbres paléozoïques, recouvrant le batholite granitique Cauterets-Panticosa. Le glacier est situé à l'abri du vent du nord-ouest dans le côté nord-est du Pic homonyme, dans la partie supérieure du bassin du fleuve Caldarés, affluent du Gállego. Le glacier d'Infierno est un petit glacier qui a connu un recul significatif au cours des dernières décennies.

Le climat général de la région est une combinaison des conditions climatiques de l'Atlantique et de la Méditerranée. En hiver, les fronts atlantiques sont interceptés par la chaîne, mais les précipitations sont affaiblies en raison de la corniche Cantabrique et des Pyrénées plus occidentales. L'anticyclone des Açores bloque souvent les pluies. En été, les hautes températures de la Péninsule Ibérique se font sentir dans le sud des Pyrénées centrales. Dans la proche station météorologique de Balnéaire de Panticosa (1636 m d'altitude), la température moyenne et la précipitation totale annuelles sont respectivement de 6,1 °C et 1694 mm (données de l'Agence Espagnole de Météorologie – AEMET, *Agencia Estatal de Meteorología*). En établissant des corrélations altitude-température analysés dans d'autres endroits des Hautes Pyrénées (Lampre-Vitaller, 2001 ; Cancer-Pomar *et al.*, 2006 ; Del Valle-Melendo et Cancer-Pomar, 2012), nous pouvons estimer une température moyenne annuelle d'environ 0 °C, avec une valeur des précipitations de plus de 2300 mm dans la zone centrale du Glacier d'Infierno, à 2850 m (selon la corrélation logarithmique calculée par Del Valle-Melendo, 1997). Environ 65 % de cette précipitation totale serait sous forme de neige, ce qui permet de calculer un apport de neige annuelle au glacier d'environ 1516 mm d'équivalent en eau.

Le glacier d'Infierno a subi, comme tous les glaciers du sud des Pyrénées, de fortes pertes depuis le Petit Âge Glaciaire. Sa surface a varié de 40 à 14 ha en 1980 (Lampre-Vitaller, 2016), pour atteindre 7,6 ha de nos jours, soit une perte d'environ 81 % de sa surface depuis le Petit Âge Glaciaire, valeur un peu inférieure à la moyenne des glaciers pyrénéens, qui est de l'ordre de 87 % (René, 2014 ; Lampre-Vitaller, 2016). Ce glacier est situé dans un cirque profond (Fig. 2). La glace s'écoule vers le nord jusqu'à un petit canyon qui reçoit les eaux de fusion (Fig. 3). Le glacier est alimenté par les précipitations neigeuses, le transport de neige par le vent de l'ouest et les avalanches du cirque. C'est probablement ce contexte topographique, la forte pente du glacier et les conditions favorables de la suralimentation nivale, qui expliquent ce pourcentage de perte de surface, légèrement inférieure en comparaison de la moyenne pyrénéenne. La glace commence vers les 2950 m et descend jusqu'à 2700 m environ. Cette altitude est la plus basse de tous les glaciers des Pyrénées espagnoles. La longueur maximale du glacier est, actuellement, d'environ 300 m. De nos jours, malgré sa petite surface et en dépit de son apparence concave et biseauté, elle présente rimaye et des crevasses.

D'autre part, dans les dernières années on observe un revêtement progressif de pierres, qui couvrent partiellement la surface de la glace blanche, surtout dans la partie inférieure du glacier, ainsi que dans d'autres zones dispersées. Actuellement, on peut estimer un pourcentage de revêtement proche à 30 %. Ce pourrait être le début d'une évolution vers un glacier noir. Au cours des dernières années, des chutes de rochers se sont produites sur le glacier, phénomène peu fréquent dans les Pyrénées, pouvant être en rapport avec les épisodes de dégel du permafrost. Aussi, de modestes tables glacières, d'environ un mètre de haut, inconnues dans les Pyrénées du sud, ont été formées sur le glacier en 2012 et 2015 (Fig. 4).

Le but de cet article est donc de présenter les résultats de dix-huit années d'observations du glacier d'Infierno (période 1998–2015) et d'analyser son évolution, en rapport avec les données climatiques et d'enneigement qui permettent de comprendre cette évolution.

¹Un résumé de ce travail a été présenté aux Journées SHF *Glaciologie-Nivologie-Hydrologie de Montagne*. 8–9 mars 2016, Grenoble.

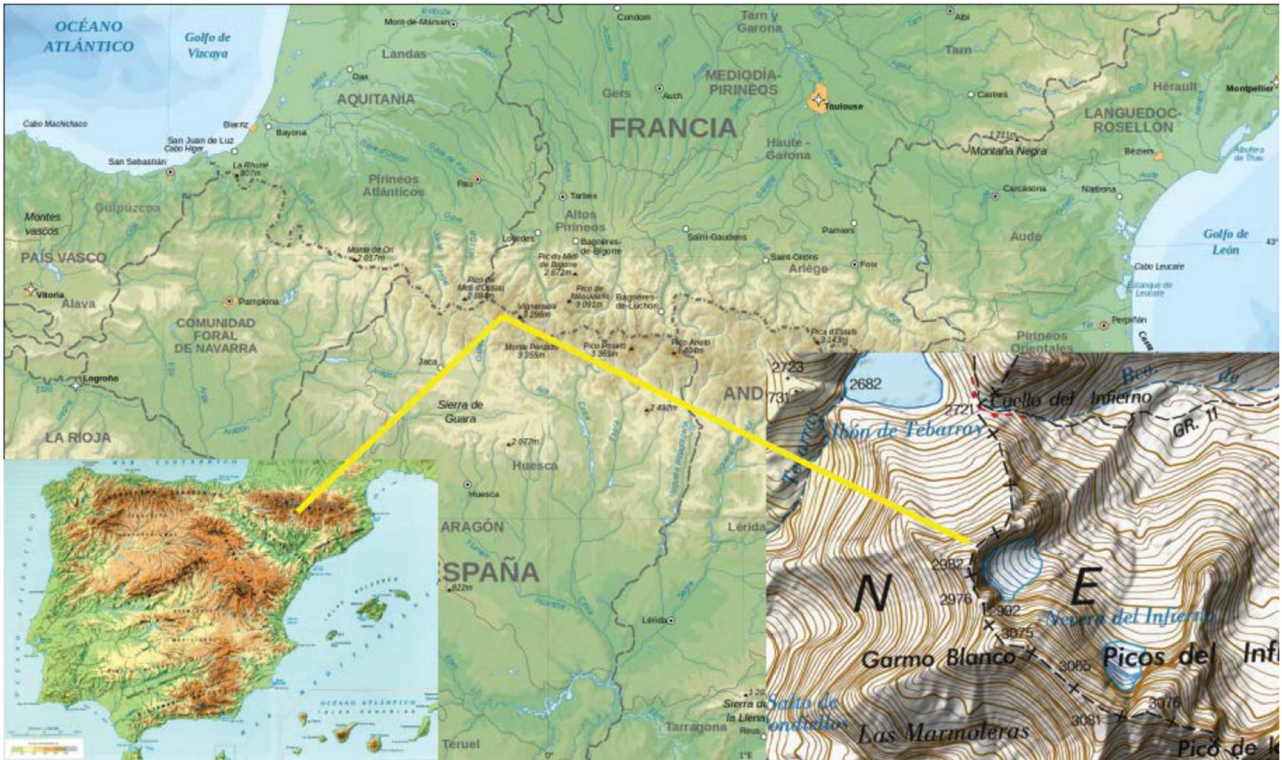


Fig. 1. Emplacement du glacier d'Inferno (source : Iberpix, IGN).



Fig. 2. Vue générale du glacier d'Inferno. Photographie du 05/09/2015 (photo de l'équipe rédactrice).

2 Matériel et méthode

Pour étudier l'évolution du glacier d'Inferno et son manteau neigeux au cours de la période 1998–2015, nous avons recueilli des données climatologiques de AEMET (2016) et des données de l'Agence du Bassin de l'Ebro–Confédération Hidrográfica del Ebro (CHE, 2016).

L'évolution de la température et de la pluviométrie de septembre 2007 à septembre 2015 pour les Pyrénées centrales espagnoles est reportée sur les figures 5 et 6. Au cours de cette période, l'ensemble glacier-manteau neigeux présente des avancées et des reculs.

L'accumulation de neige sur le glacier est directement liée à l'évolution de la température et de la pluviométrie dans la période hiver-printemps. Comme *proxy* on a utilisé les données d'évolution de la neige accumulée (hm^3 d'équivalent en eau) dans le bassin du Haut Gállego, jusqu'au réservoir de Búbal, pour les années hydrologiques – 1^{er} septembre jusqu'au 30 août (Fig. 7). Un autre aspect important à considérer dans l'analyse du comportement des glaciers est la durée de la couverture de neige. La figure 8 montre la durée de la période annuelle avec plus de 1 hm^3 d'équivalent en eau) dans le même haut bassin. Les données proviennent du réseau de télé-nivomètres du SAIH (système automatique d'information hydrologique) de la CHE (2016).

En 1998, nous avons mis en place deux stations de contrôle topographique, en utilisant un système de référence basé sur deux stations fixes installées sur des rochers stables. Les deux stations permettent une estimation de l'évolution du bilan de masse du glacier (masse de glace et la couverture neigeuse). De 1998 à 2015, les mesures ont été effectuées systématiquement au cours de la première moitié du mois de septembre.

Depuis ces deux stations on mesure la distance jusqu'à la surface glaciaire. La première station est située dans la partie finale de la langue du glacier (front du glacier) et ces mesures concernent des variations longitudinales. La langue du glacier d'Inferno finit actuellement dans un petit canyon emboîté et très étroit, d'environ seulement 2–3 m de largeur et la mesure



Fig. 3. Petit canyon qui reçoit les eaux de fusion du glacier d'Infierno (10/09/2011) (photo de l'équipe rédactrice).



Fig. 4. Revêtement de pierres et petites tables glacières (08/09/2012) (photo de l'équipe rédactrice).

de ses fluctuations permet de déterminer la variabilité de ce front (Fig. 3). La deuxième station est placée sur la rive droite du glacier (latéral du glacier), à la hauteur du tiers inférieur, et les mesures concernent des variations d'épaisseur.

3 Résultats et discussion

3.1 Analyse climatique

Les figures 5 et 6 montrent l'irrégularité climatique, inter et intra annuelle, caractéristique de la condition climatique partiellement méditerranéenne qui affecte les Pyrénées centrales du sud. La figure 7 montre une nette différence entre les années hydrologiques 2002/2003 jusqu'à 2007/2008, d'une part, et 2008/2009 jusqu'à 2014/2015, d'autre part. Au cours de la première période, l'enneigement dans le bassin Haut Gállego n'a pas dépassé les 85 hm³. Au cours de la deuxième période, l'enneigement dépasse cette valeur toutes les années (avec l'exception de 2011/2012), et 2009/2010 et 2013/2014 atteignent des valeurs supérieures à 140 hm³. On peut noter deux années hydrologiques catastrophiques : 2004/2005, avec une valeur maximale légèrement inférieure à 25 hm³, et 2011/2012, où l'accumulation maximale est de 35 hm³. Dans la figure 7, on relève une tendance où l'on observe une certaine augmentation de l'accumulation de neige dans le bassin du Haut Gállego. En ce qui concerne la durée de la période annuelle avec plus de 1 hm³ de neige dans le même haut bassin, elle est comprise entre 229 et 266 jours (Fig. 8). Malgré une variabilité interannuelle importante, on peut discerner aussi une tendance positive.

3.2 Évolution du glacier

L'évolution du front et latéral du glacier d'Infierno est reportée au tableau 1. Les données d'évolution ont été analysées en rapport avec les données climatiques et d'enneigement des figures 5–8.

Nous présentons une brève description de l'évolution du glacier pour la période 1998–2015. On considère que le niveau

zéro est la position en 1998. Avec de nombreuses fluctuations, il y a une récession globale du glacier. En 2015, le retrait du front a été de $-23,9$ m par rapport à la position de 1998, alors que dans la même période la perte d'épaisseur à la zone de contrôle latéral a été de $-4,1$ m. Le recul de ce glacier est important, mais quelque peu inférieur par rapport aux données provenant d'autres glaciers des Pyrénées, comme on l'a vu dans l'introduction.

Il convient d'expliquer dans ce point que dans les années de progression, il s'agit d'accumulations de la couverture de neige ou névé : celle qui s'étend au-delà du front glaciaire et celle d'épaisseur variable qui se place sur la glace du glacier (voir le Tab. 1), à ne pas confondre avec une avancée glaciaire réelle.

Entre 1999 et 2006, on observe une tendance au décroissement. Ainsi, en 2006 le front a reculé $-21,7$ m et le bord latéral $-3,2$ m par rapport à 1998. Mais cette tendance change en 2007, année d'avancée par rapport à 2006, bien qu'on n'atteigne pas la situation de 1998. En 2008, on dépasse vraiment, pour la première fois, la situation de départ de 1998 ($+2,2$ m au front, $+0,1$ m au bord latéral), bien que la variation par rapport à 2006 soit plus forte ($+23,9$ m au front, $+3,3$ m au bord latéral). Cette période jusqu'à 2015 montre d'intéressants changements de tendance d'avancée et de recul.

La situation de 2008 s'explique par le comportement de l'année hydrologique 2007/2008. Après une fin d'hiver chaud et pluvieux, suivi par un printemps normal en température et humide, l'été fut moyen en température et pluie. D'autre part, 2009, 2010 et 2011 sont des années de fluctuations alternées : 2009, recul ; 2010, récupération ; et 2011, nouveau recul. En 2009 se brise la tendance des deux ans précédents et le glacier recule : $-12,2$ m au front et -2 m au bord latéral par rapport à 2008 (-10 m et $-1,9$ m respectivement par rapport à 1998). Cette année, le printemps et l'été ont été secs et pendant les mois de mai à août, les températures étaient très élevées. En 2010, la couverture neigeuse s'est fortement augmentée : $+22,6$ m au front et $+1,9$ m au bord latéral par rapport à l'année précédente ($+12,6$ m et niveau zéro respectivement par rapport à 1998). De décembre 2009 à mars 2010, les précipitations

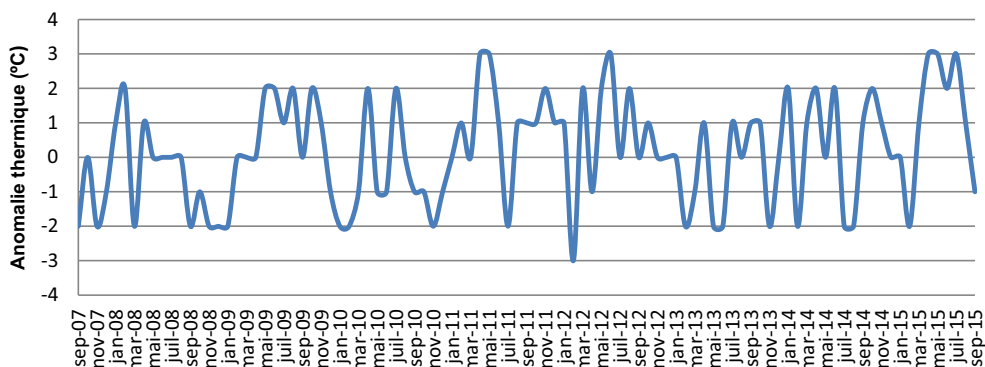


Fig. 5. Anomalies thermiques dans les Pyrénées centrales (septembre 2007–septembre 2015). Période de référence 1971–2000 (Élaboration propre. Source des données : [AEMET, 2016](#)).

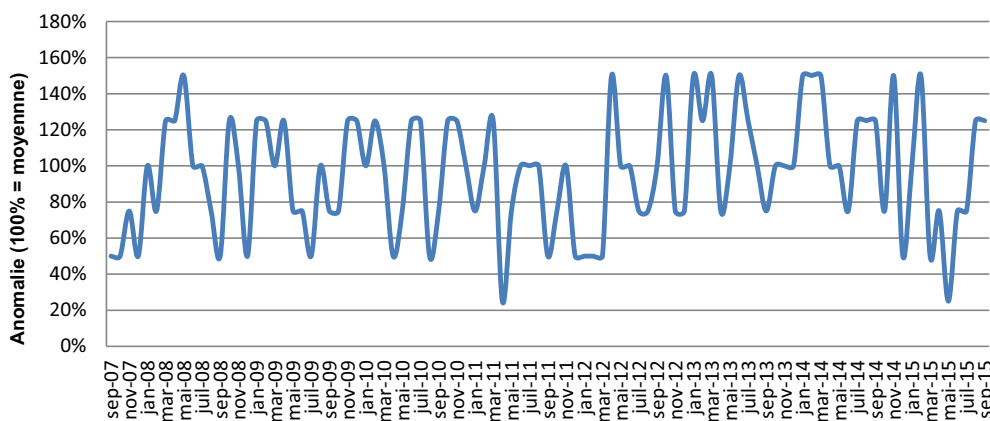


Fig. 6. Anomalies des précipitations dans les Pyrénées centrales (septembre 2007–septembre 2015). Période de référence 1971–2000 (Élaboration propre. Source des données : [AEMET, 2016](#)).

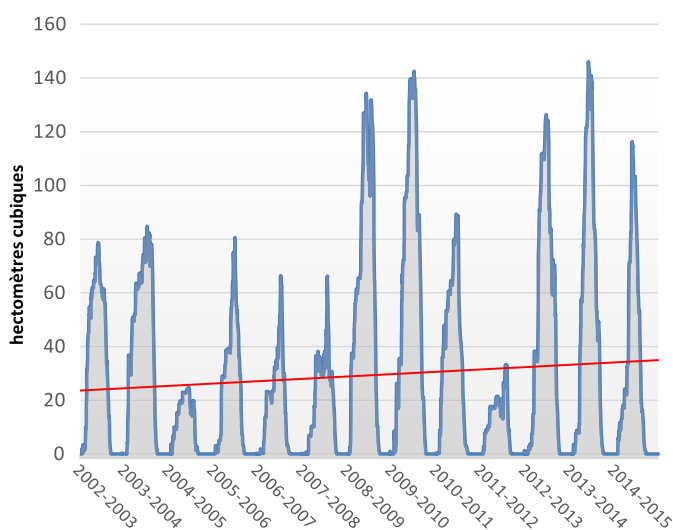


Fig. 7. Évolution de la neige accumulée dans le bassin de Haut Gállego (hm^3 d'équivalent en eau) jusqu'au réservoir de Búbal. Pour les années hydrologiques (1^{er} septembre jusqu'au 30 août) et ligne de tendance (Élaboration propre. Source des données : SAIH–CHE, 2016).

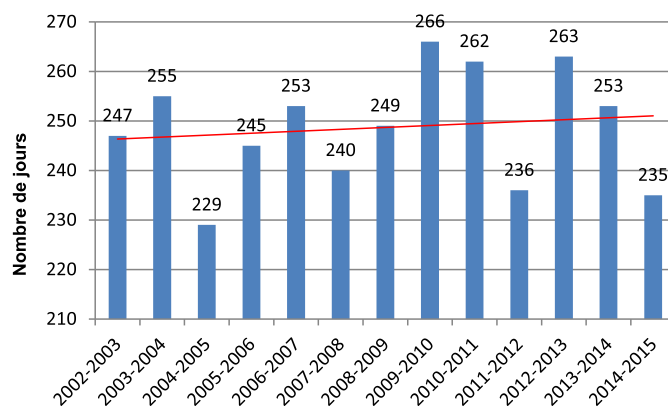


Fig. 8. Nombre de jours avec accumulation de neige supérieure à 1 hm^3 (volume d'équivalent en eau) dans le bassin de Haut Gállego jusqu'au réservoir de Búbal. Pour les années hydrologiques et ligne de tendance (Élaboration propre. Source des données : SAIH–CHE, 2016).

Tableau 1. Évolution du glacier d'Infierno (front et latéral du glacier), période 1998–2015. Par référence à sa place en 1998 et l'année précédente (glace et couverture de neige-névé s'il y en a). Données en mètres. Front : variation longitudinale. Latéral : variation d'épaisseur.

Année	Front glacier (sur 1998 = 0)	Front glacier (sur l'année précédente)	Latéral glacier (sur 1998 = 0)	Latéral glacier (sur l'année précédente)	Glace/névé/neige
1998	0	0	0	0	Névé
1999	-8,5	-8,5	-1	-1	Glace
2000	-9,4	-0,9	-1,8	-0,8	Glace
2001 ^a					
2002	-7,3	+2,1	-1,6	+0,2	Névé
2003 ^a					
2004 ^a					
2005 ^a					
2006	-21,7	-14,4	-3,2	-1,6	Glace
2007	-5,7	+16	-1,9	+1,3	Névé
2008	+2,2	+7,9	+0,1	+2	Névé
2009	-10	-12,2	-1,9	-2	Glace
2010	+12,6	+22,6	0	+1,9	Neige
2011	-9,4	-22	-1,9	-1,9	Glace
2012	-23,9	-14,5	-4,3	-2,4	Glace
2013	+275	+298,9	-0,7	+3,6	Neige
2014	+275	0	-1	-0,3	Neige
2015	-23,9	-298,9	-4,1	-3,1	Glace

^a Années sans données par problèmes de logistique ou parce que dans les dates prévues pour faire les mesures, les premières chutes de neige étaient déjà tombées.

étaient plutôt humides et il a fait froid. L'accumulation de neige dans le bassin de Haut Gállego a été très forte, avec un maximum de 142,4 hm³ le 3 avril. Avril et juillet ont été très chauds, mai froid, juin et août normaux. Et en 2011, le glacier recule à nouveau, revenant ainsi aux valeurs proches de 2009. L'automne et l'hiver ont été plutôt froids mais pas humides et la neige était peu abondante. Mais le printemps et l'été ont été très chauds, sauf juillet. Les données météorologiques expliquent le recul du glacier, qui aurait pu être plus élevé si le comportement de juillet n'avait pas été si atypique, alors que les températures dans la zone étaient d'environ 1,5 °C inférieures à la moyenne. Par exemple, à la proche centrale hydroélectrique Biescas II, la moyenne historique en juillet était de 20,4 °C et en 2011 de 18,9 °C (IAE, 2016).

En continuant avec la tendance de 2011, l'année 2012 a vécu la pire situation de la langue glaciaire observée depuis 1998 (-23,9 m au front et -4,3 m au bord latéral par rapport à cette année). Le nombre de jours d'accumulation de neige supérieure à 1 hm³ (volume d'équivalent en eau) a été bien inférieur à celui des autres années (d'environ 30 jours de moins). Selon la classification d'AEMET, durant cinq mois de cette période les températures ont été extrêmement chaudes ou très chaudes, y compris mai, juin (très chaud) et août, situation très favorable pour la fonte de la neige et la glace. De plus, trois autres mois sont considérés comme chauds, y compris décembre et janvier, très importants dans les processus d'accumulation de neige. En ce qui concerne les précipitations, la période de décembre à mars fut très sèche, donc les précipitations dans les mois d'enneigement beaucoup plus

faibles que la normale, ce qui réduisit le stockage de neige sur le glacier pendant la période clé.

Par contre, 2013 et 2014 représentent des années avec de très intéressants changements de tendance par rapport à 2011 et 2012. Ainsi, 2013 est la meilleure année observée dans la période 1998–2015. Durant 263 jours il y a eu une accumulation de plus de 1 hm³ de neige (volume d'équivalent en eau) et dans l'année hydrologique 2012/2013, octobre, janvier, février, mars et juin sont classés comme très humides, et février et mars sont aussi très froids. Mai et juin sont considérés comme très froids, de sorte que la fusion est inférieure à la moyenne de ces mois de fusion significative. Tous ces facteurs expliquent qu'en septembre 2013, la couverture neigeuse a une avancée sur le front de +298,9 m et de +3,6 m sur le bord latéral par rapport à 2012 (+275 m au front par rapport à 1998, bien que le bord latéral n'atteigne pas la valeur de cette année, avec -0,7 m). La situation de septembre de 2014 est très similaire à celle de 2013, après l'année hydrologique 2013/2014 avec 253 jours d'accumulation de neige de plus de 1 hm³ (volume d'équivalent en eau) dans le bassin du Haut Gállego. Janvier, février et mars 2014 ont été des mois très humides. Février, juillet et août sont considérés comme très froids. Les données de 2013 et 2014 correspondent à la limite de la couverture neigeuse qui couvrirait la totalité de la glace, de façon que toute la masse du glacier fût couverte.

En revanche, 2015 est considérée comme une très mauvaise année. En septembre 2015, le solde positif gagné dans les deux années antérieures est perdu et se retrouve aux valeurs de 2012. La glace est découverte et on constate un recul

de $-23,9$ m au front et de $-4,1$ m sur le bord latéral par rapport au niveau zéro de la série, en 1998. Dans le bassin du Gállego, il y a eu un enneigement nettement inférieur à celui des deux années précédentes (235 jours avec un manteau neigeux de plus de 1 hm^3). Décembre 2014 et mars–avril 2015 sont classés comme très secs. D'autre part, toute la période d'avril à août 2015 a été très chaude. Donc, le processus de fusion de glace et sa couverture neigeuse protectrice a été particulièrement intense.

La mauvaise année 2015 dans le glacier d'Infierno est en accord avec la situation des autres glaciers pyrénéens. Le glacier de Maladeta servira de référence comparative, par rapport au troisième bilan plus défavorable depuis 1991/1992 (CHE, 2015).

Avec les données du [tableau 1](#), nous pouvons constater une certaine cohérence entre l'évolution mesurée par les deux stations de contrôle du glacier d'Infierno : front et latéral rive droite. Cependant, nous devons souligner un détail important. Les années 2006, 2012 et 2015 ont été les pires années quant à la régression de langue terminale, en donnant des résultats semblables. Mais ce comportement similaire ne se reflète pas totalement dans les valeurs d'épaisseur mesurées dans le bord latéral rive droite. Les années 2012 et 2015 offrent des valeurs semblables, mais qui représentent une perte de -1 m par rapport à 2006. Cela confirme la perte progressive de masse de glace du glacier, bien qu'il y ait des années dans lesquelles la couverture de neige ou névé (surtout 2013 et 2014) nous donnent des résultats plus positifs.

Il y a une claire relation entre la climatologie et l'évolution du glacier. Il y a des étés chauds ou très chauds, comme en 2012 et 2015, qui font reculer la glace. Par contre, des hivers neigeux, ou printemps froids et neigeux, ainsi que des étés froids, fournissent une couverture protectrice de neige estivale qui ralentit la fonte du glacier, comme en 2013 et 2014.

Une donnée intéressante à ce sujet est la dernière date de l'année hydrologique pour laquelle il y a une accumulation de neige supérieure à 1 hm^3 (volume d'équivalent en eau) dans le bassin de Haut Gállego, jusqu'au réservoir de Búbal. Normalement, cette date se situe vers la moitié ou la troisième semaine de juin. Cependant, les années de plus grande progression du glacier (2008, 2010, 2013 et 2014), la date se retarde jusqu'au 10–15 de juillet (CHE, 2016).

Il est intéressant de remarquer que les chutes de neige dans les Pyrénées ne sont pas inhabituelles à la fin du printemps et parfois même l'été, mais elles regèlent difficilement et bien souvent ne subsistent pas jusqu'à l'hiver suivant. Leur contribution à la masse de glace totale est mal connue. Dans le glacier d'Infierno, des tentatives de placer des perches à neige en 2012 ont échoué parce qu'elles n'ont pas été retrouvées en 2015. On pense qu'elles ont été balayées par la chute de rochers après la fonte de la couverture protectrice de neige.

4 Conclusions

Le petit glacier d'Infierno a souffert d'une régression de sa surface et de son volume dans le cadre du contexte général des glaciers pyrénéens. Après avoir analysé le comportement du glacier d'Infierno dans la période évaluée (1998–2015), on peut formuler quelques conclusions.

Il existe une claire corrélation entre les conditions climatiques de chaque année (température, pluie et neige enregistrés dans des stations météorologiques proches) et le comportement du glacier. On peut affirmer que le glacier a un comportement très variable, avec des fréquents rythmes opposés entre des années successives. Dans la zone analysée, les anomalies thermiques et pluviométriques sont habituelles, aussi bien dans la même année hydrologique qu'entre différentes années hydrologiques. Ce comportement réagit directement sur un glacier qui, malgré sa petite taille, semble être particulièrement sensible à n'importe quel changement. C'est la raison pour laquelle le glacier présente des contrastes importants entre ces années.

Entre 1998 et 2015, les années de plus grand recul sont 2006, 2012 et 2015. Et, bien au contraire, dans les années 2013 et 2014 la couverture neigeuse a dépassé largement le bassin du glacier et la glace n'est pas apparue. L'évolution 2012–2015 atteste bien la très forte variabilité, de sorte qu'après la très mauvaise année 2012, il y a eu deux bonnes années, 2013 et 2014, et après cela, une très mauvaise en 2015.

Nous pouvons relever une corrélation significative entre le comportement du glacier et les rythmes d'accumulation hivernale dans le Haut Gállego : les hivers avec beaucoup de neige favorisent son avancée, mais ils peuvent être compensés par des printemps et des étés chauds qui font disparaître totalement ou presque la couverture neigeuse accumulée en hiver et printemps. Une neige printanière tardive peut favoriser l'avancée. Elle peut être même plus importante qu'en hiver, parce qu'elle peut protéger partiellement ou totalement la masse de glace pendant la période des hautes températures, bien que difficilement elle puisse devenir de la glace et ainsi alimenter le glacier. Dans ce sens, l'année 2012 est remarquable, par une faible accumulation de neige et un recul marqué du glacier. Parmi les quatre années d'accumulation nivale maximale (2009, 2010, 2013 et 2014), les trois dernières ont eu des résultats positifs pour le glacier. Cela n'a pas été le cas pour 2009, l'année de baisse significative. Le facteur température et sa performance mensuelle, avec un printemps et un été chaud, expliquent la différence.

Le glacier est sensible au réchauffement global, mais dans le haut bassin du Gállego on peut discerner une tendance positive de l'accumulation de neige tout au long des années écoulées du *xxi*^e siècle, malgré une variabilité interannuelle importante, ce qui rend favorable sa survie. Au cours des dernières années ont eu lieu des chutes de rochers, même des gros blocs, phénomène peu fréquent dans les Pyrénées, lié aux épisodes de dégel du permafrost. À terme, ces chutes peuvent être l'origine d'un glacier noir, surtout dans le tiers inférieur.

Remerciements. L'aide de François Valla a été très importante. Le Conseil des Monuments Naturels *Glaciers des Pyrénées* et les gardes des refuges *Casa de Piedra* et *Bachimaña* (FAM–Fédération Aragonaise de Montagne) sont remerciés par leur support.

Références

AEMET. 2016. Avances climatológicas de Aragón. 2007–2015. Gobierno de España, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Agencia Estatal de Meteorología. Site web: <http://www.aemet.es/es/noticias>.

- Biarge F, Chueca J, Julián A. 2002. Los glaciares pirenaicos aragoneses. Evolución. Fotografías 1880–1999. *Boletín Glaciológico Aragonés*. Num. extraordinaire.
- Cancer-Pomar L, Lampre-Vitaller F, Ollero Ojeda A. 2001. Glaciares actuales del Pirineo español. Catálogo de masas y aproximación hidrológica. *Treballs de la Societat Catalana de Geografia* 52: 165–193.
- Cancer-Pomar L, Lampre-Vitaller F, Del Valle-Melendo J. 2006. Análisis de los primeros datos de la estación meteorológica del Aneto (3.050 m, macizo de la Maladeta, Pirineo aragonés). Su interés glaciológico. En: Cuadrat JM *et al.*, eds. *Clima, sociedad y medio ambiente*. Madrid: Asociación Española de Climatología, pp. 541–551.
- CHE. 2015. Determinación del balance anual de masa y movimiento del hielo en el glaciar de la Maladeta. Año hidrológico 2014–2015. Gobierno de España, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Confederación Hidrográfica del Ebro, 59 p. (Rapport technique du Programme ERHIN: Evaluación de los Recursos Hídricos procedentes de la Innivación).
- CHE. 2016. Evolución de la nieve acumulada en la cuenca del Alto Gállego. 2002–2015. Gobierno de España, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Confederación Hidrográfica del Ebro. Site web: <http://oph.chebro.es/Notasprensa>.
- Chueca J, Lampre-Vitaller F. 1994. Los glaciares del Alto Aragón. Huesca: Instituto de Estudios Altoaragoneses.
- Del Valle-Melendo J. 1997. La precipitación media anual en el sector alto de la cuenca del Cinca (Pirineo aragonés, España). *Pirineos* 149–150: 121–144.
- Del Valle-Melendo J, Cancer-Pomar L. 2012. Análisis de los datos climáticos de la estación del Aneto (Pirineo aragonés, 3050 m) durante el verano de 2009. Actas Congreso Nacional de Medio Ambiente, Madrid. Formato DVD.
- Francou B, Vincent C. 2007. Les glaciers à l'épreuve du climat. Paris : IRD Éditions et Belin, 274 p.
- Gardent M. 2014. Inventaire et retrait des glaciers dans les Alpes françaises depuis la fin du Petit Âge Glaciaire. Thèse Doctoral, Université de Grenoble, 443 p.
- González Trueba JJ, Martín Moreno R, Serrano E. 2008. “Little Ice Age”, glaciation and current glaciers in the Iberian Peninsula. *The Holocene* 18(4): 551–568.
- IAE. 2016. Datos climatológicos. 1998–2015. Instituto Aragonés de Estadística. Site web: http://www.aragon.es/DepartamentosOrganismosPublicos/Institutos/InstitutoAragonésEstadística/ÁreasTemáticas/14_Medio_Ambiente_Y_Energía.
- Julián A, Chueca J, Peña JL, López I, Lapeña. 2001. Dinámica de los glaciares del Pirineo aragonés: resultado de la campaña glaciológica del año 1999. *Boletín glaciológico aragonés* 2: 13–36.
- Lampre-Vitaller F. 2001. Clima de alta montaña y sistemas morfoclimáticos fríos en el macizo de La Maladeta (Pirineo Aragonés). *Treballs de la Societat Catalana de Geografia* 52: 195–231.
- Lampre-Vitaller F. 2016. Situación actual de los glaciares pirenaicos aragoneses. Zaragoza: Patronato de los Monumentos Naturales de los Glaciares Pirenaicos. (Document interne).
- Mora J, Arenillas M, Cobos G, Navarro J. 2006. Évolution récente des glaciers des Pyrénées espagnoles. *La Houille Blanche* 3: 65–70.
- Ramond LF. 1801. Voyages au Mont-Perdu et dans la partie adjacente des Hautes-Pyrénées. Paris : Belin.
- René P. 2013. Glaciers des Pyrénées. Le réchauffement climatique en images. Pau : Cairn Éditions, 167 p.
- René P. 2014. Le suivi des glaciers dans les Pyrénées françaises. *La Météorologie* 85: 27–34.
- Schoeneich P. 2016. Tournée IGS-SAO 2016. La Bérade-vallée du Vénéon. 25–28 août 2016. International Glaciological Society, Section des Alpes Occidentales, 28 p. (Document interne).
- Smiraglia C, Diolauti G. (eds.) 2016. Il nuovo catastro dei Ghiacciai Italiani. Università degli Studi di Milano.
- Serrano E. 1984. Geomorfología del Alto Gállego. Pirineo Aragonés. Zaragoza: Institución Fernando el Católico, 501 p.
- Serrano E. 1991. Glacial evolution of the Upper Gállego valley (Panticosa mountains and ribera de Biescas, Aragonese Pyrenees, Spain). *Pirineos* 138: 83–78.

Citation de l'article : Cancer-Pomar L, Cuchí JA, Lampre-Vitaller F, Del Valle-Melendo J, Fernández-Jarne G. 2019. Observations glaciologiques (1998–2015) sur le glacier d'Infierno (Pyrénées, Espagne). *La Houille Blanche* 1: 84–91.