

Glaciers. Petite chronique d'une fonte avérée

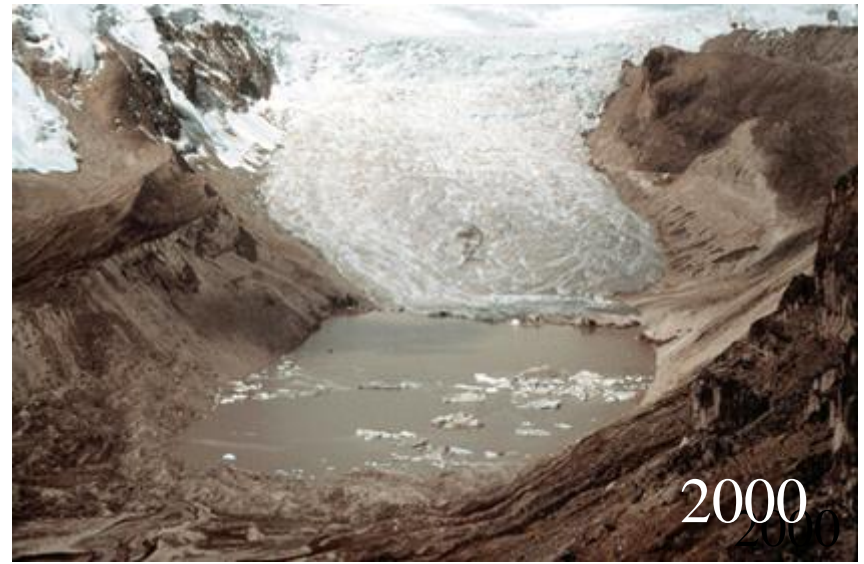
Etienne BERTHIER, LEGOS – CNRS – Observatoire Midi-Pyrénées



Cours ENM – Octobre 2018

*Mt Erebus, Antárctica
SPOT5-HRS*

Glacier Qori Kalis (Pérou)



Glacier Muir (Alaska)

(c) NASA

Athabasca Glacier & Mer de Glace



Diptyque du Glacier d'Ossoue en 1911 et 2012



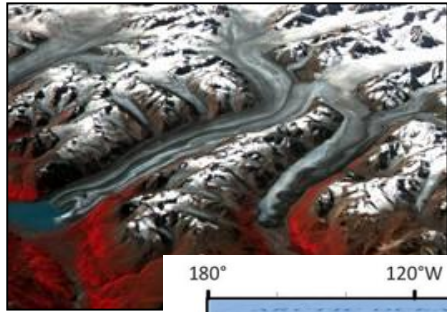
Association Pyrénéenne de Glaciologie

René, La Météorologie, 2014

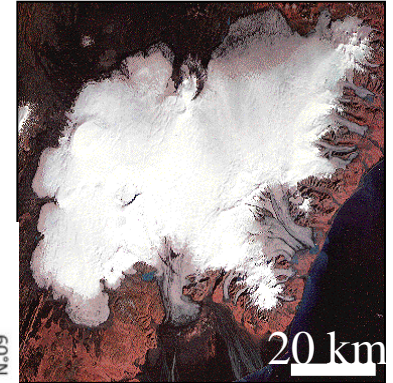
Plan de l'exposé

- I. **Place des glaciers dans la cryosphère**
- II. **Observer les glaciers depuis l'espace**
- III. **Évolutions récentes des glaciers en réponse aux changements climatiques**
- IV. **Conséquences du recul des glaciers**

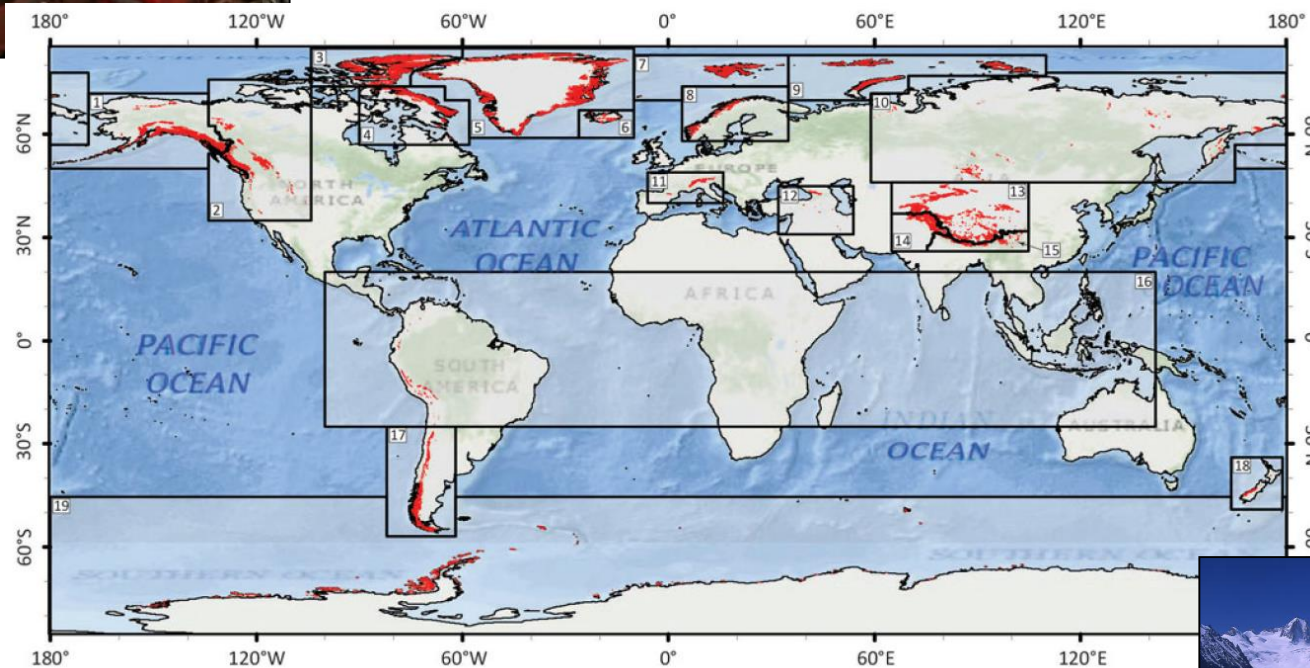
Les Glaciers à travers le Monde



*Champs de glace
d'Alaska*



*Vatnajökull
(Iceland)*



Pfeffer et al., 2014

Surface = 730 000 km²

Epaisseur moy. = 250 m

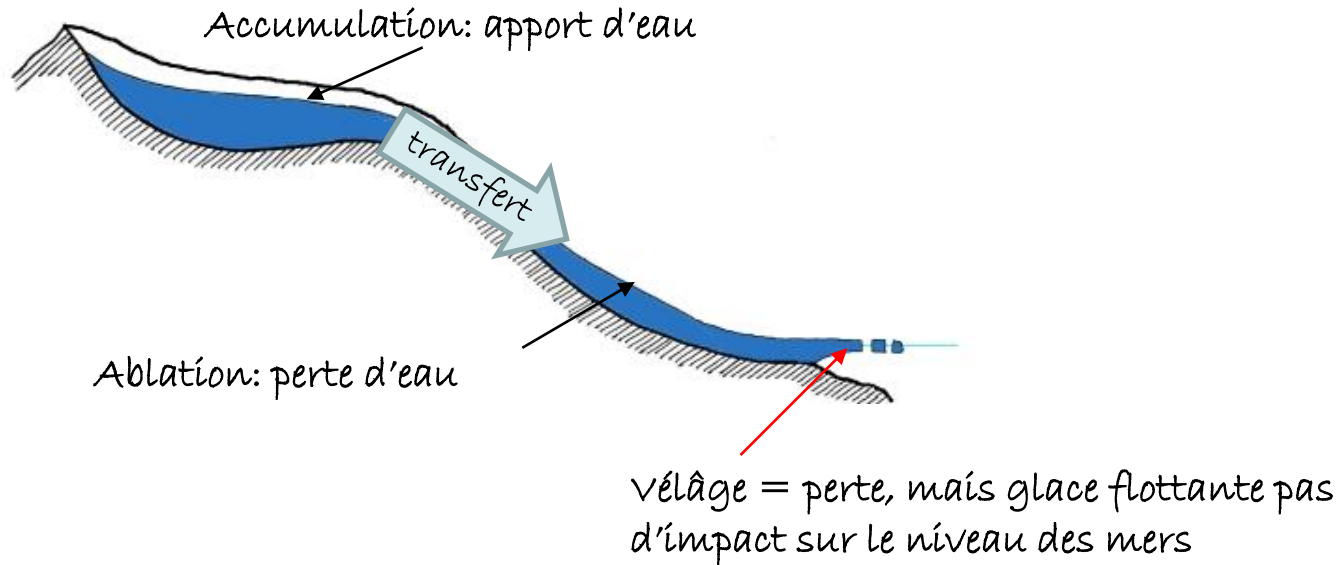
Eq. Niveau marin = 0.4 m

Nombre : >200 000?

Mer de Glace



Fonctionnement d'un glacier



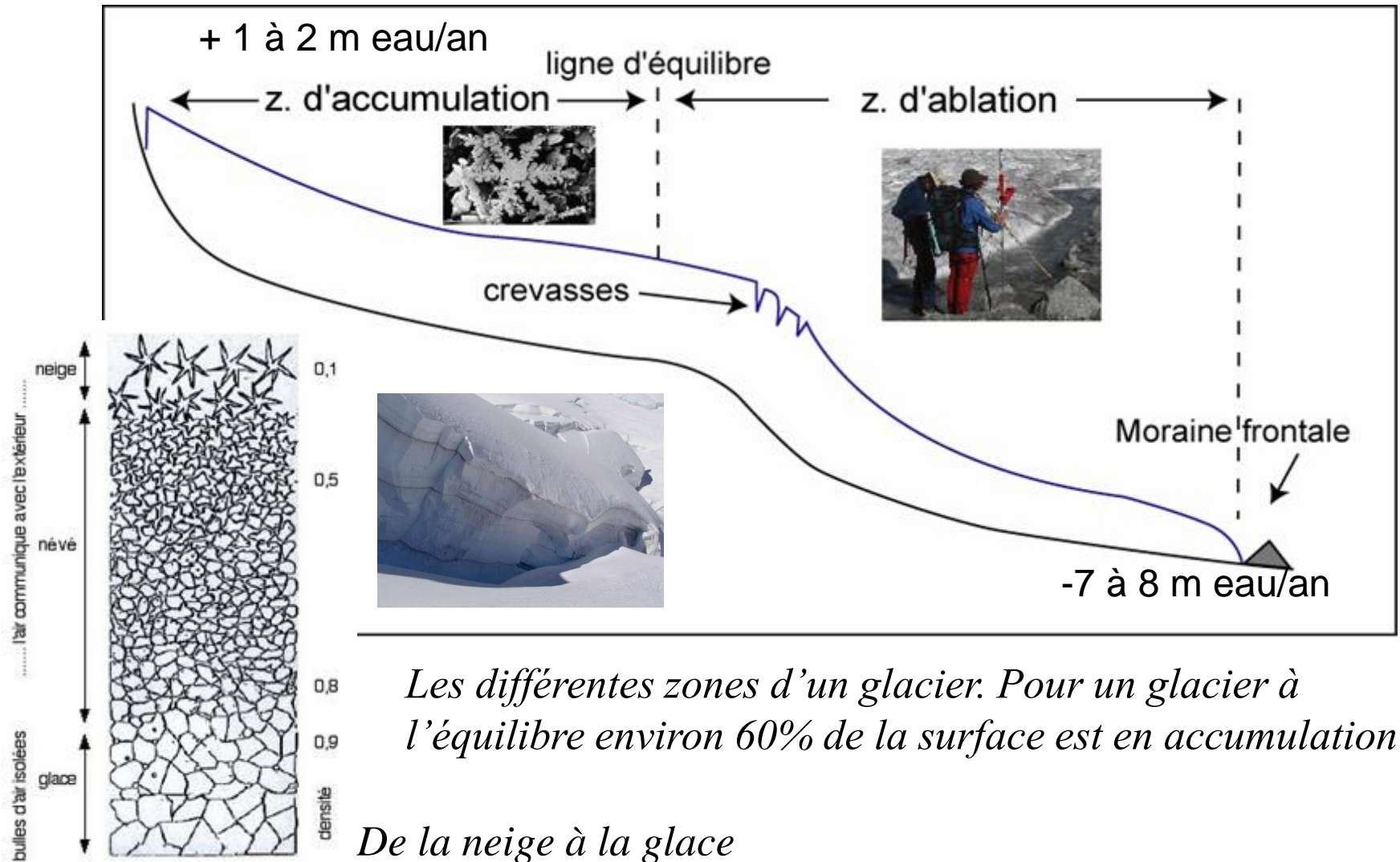
Perte ou gain de masse

Gains : précipitations neigeuses, condensation solide

Pertes : fonte (surface, basale, contact océan), sublimation, vêlage

Bilan de Masse = Gain – Pertes

Fonctionnement d'un glacier



Les différentes zones d'un glacier. Pour un glacier à l'équilibre environ 60% de la surface est en accumulation

De la neige à la glace

Zone d'accumulation



**Mesure du
bilan de masse
in situ**

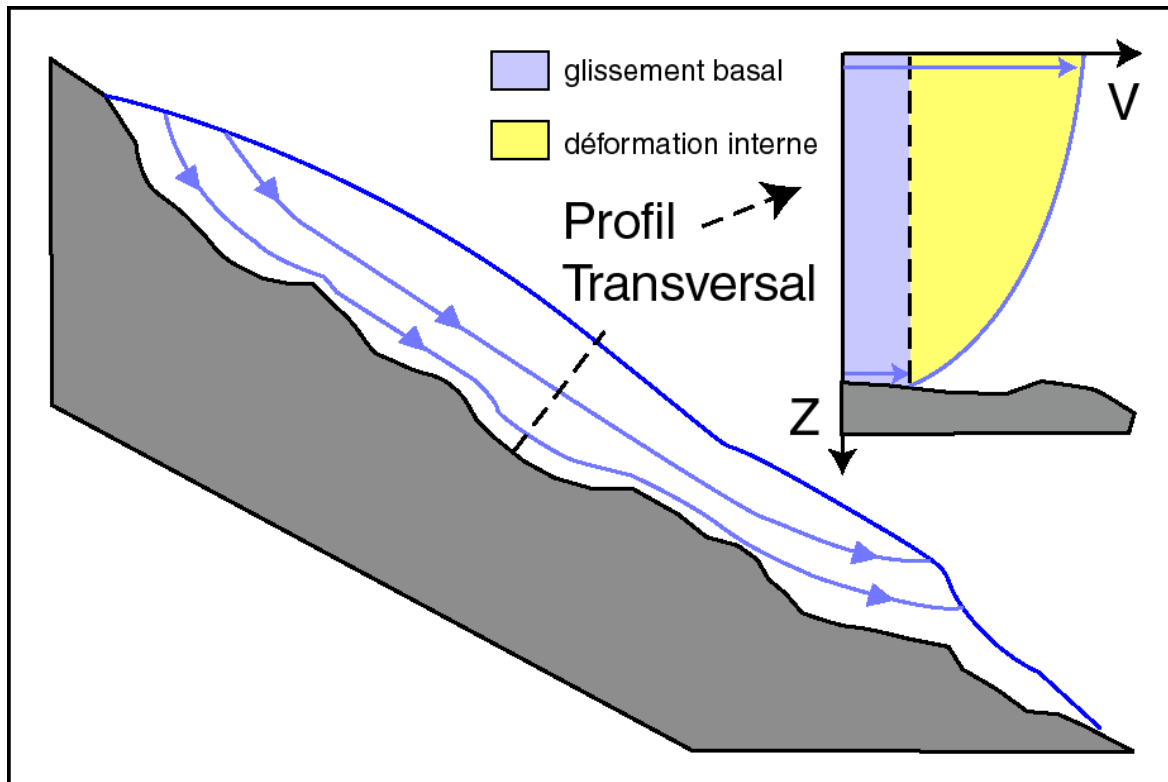


Association Pyrénéenne de Glaciologie

Zone d'ablation



Mouvement d'un glacier



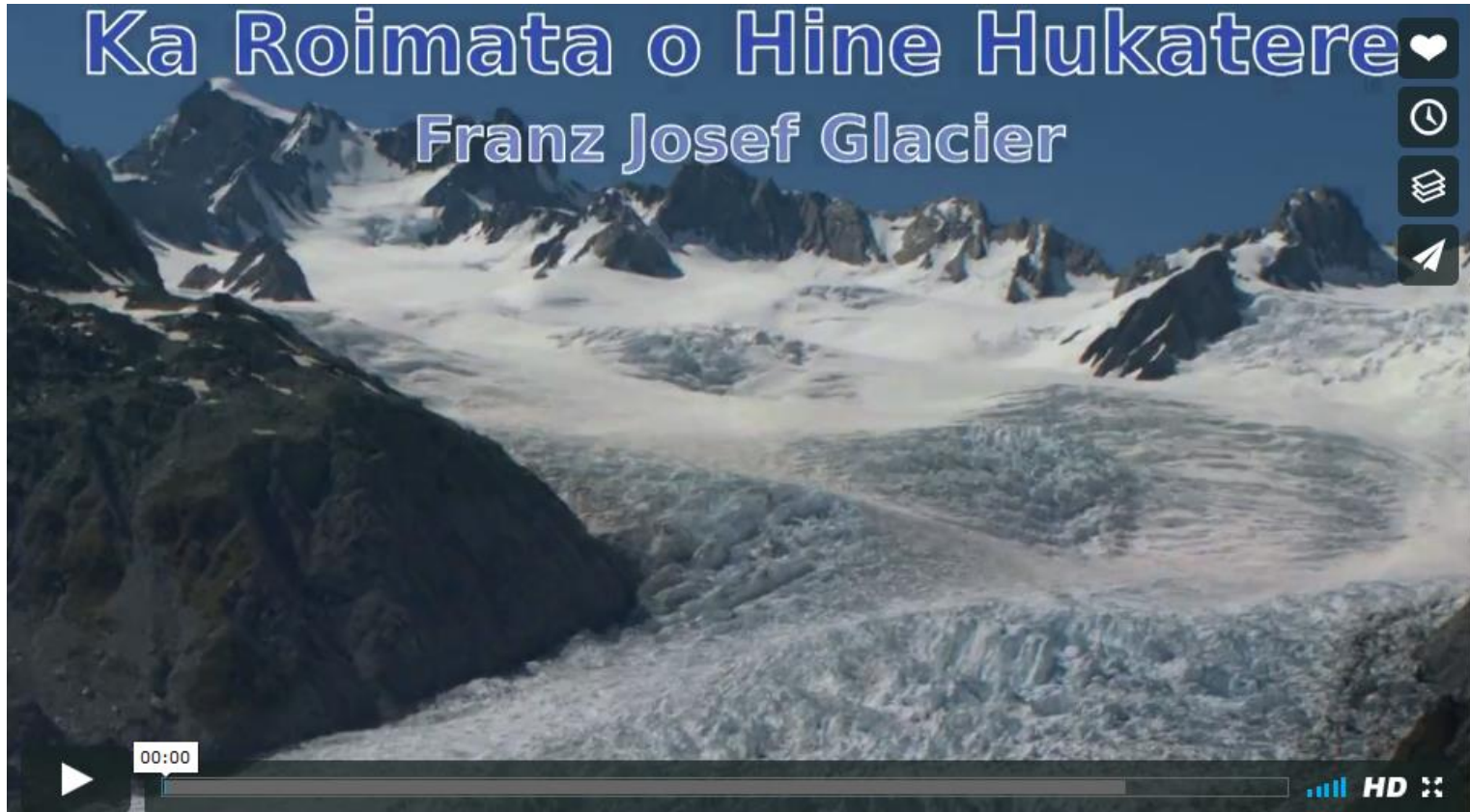
Écoulement glaciaire : glissement basal + déformation interne

Conséquence. Il faut un certain temps pour que le front du glacier réponde à un changement du climat (= anomalie du bilan de masse).

Seconde variable clef : la vitesse de surface des glaciers



Mouvement du glacier Franz Joseph (NZ)

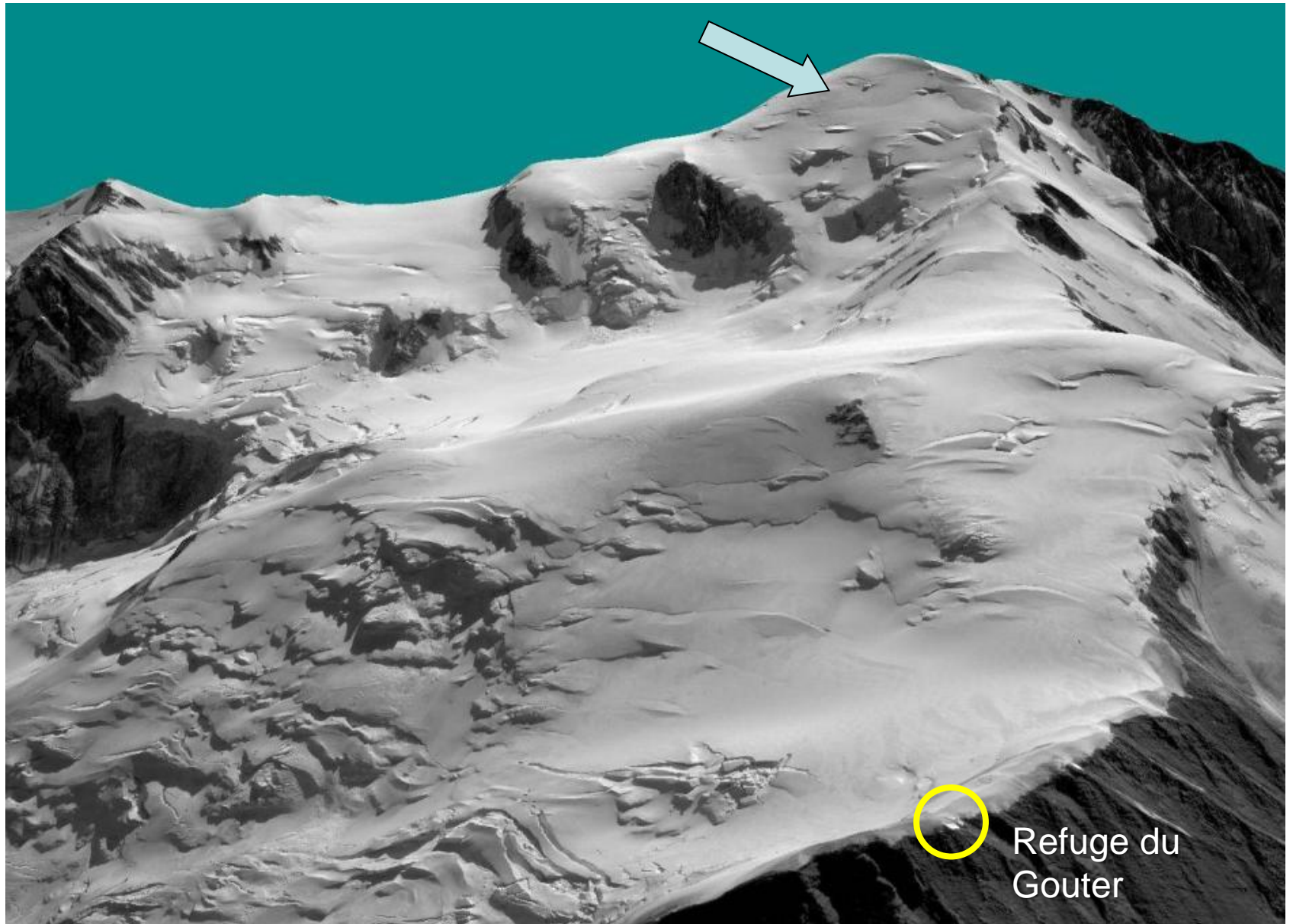


L'écoulement d'un glacier en Nouvelle Zélande vu par une série de photographies. Source <https://vimeo.com/glacier>, B. Anderson. La séquence, qui couvre un an et demi (Janvier 2013 à Juin 2014) est répétée 4 fois au cours de la video

Plan de l'exposé

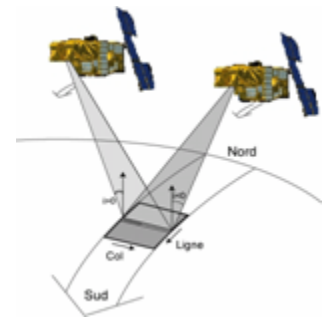
- I. **Place des glaciers dans la cryosphère**
- II. **Observer les glaciers depuis l'espace**
- III. **Évolutions récentes des glaciers en réponse aux changements climatiques**
- IV. **Conséquences du recul des glaciers**

Images optiques très haute résolution



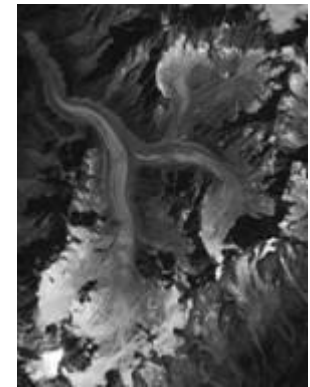
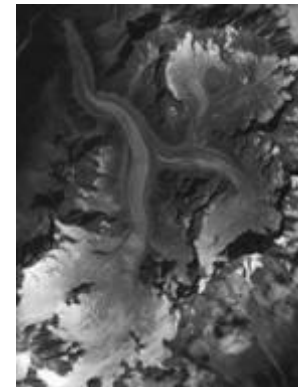
Refuge du
Gouter

Mesure satellitaire du bilan de masse des glaciers



PRINCIPE

Couple stéréo (Spot, Pleiades)



An1

An2

Distorsions : effet stéréoscopique

MNT #1

MNT #2

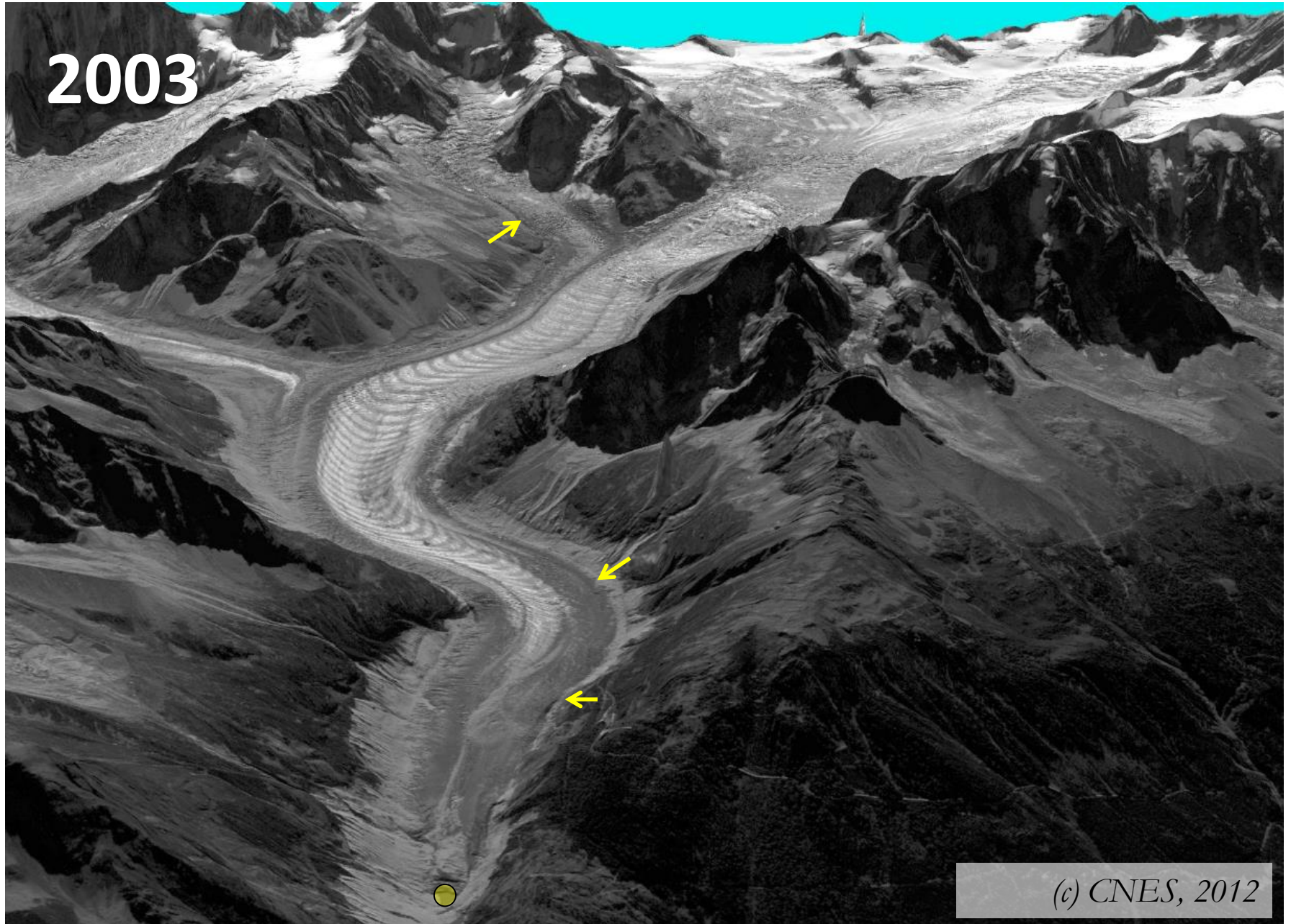
MNT #2 - MNT #1

= MNT différentiel

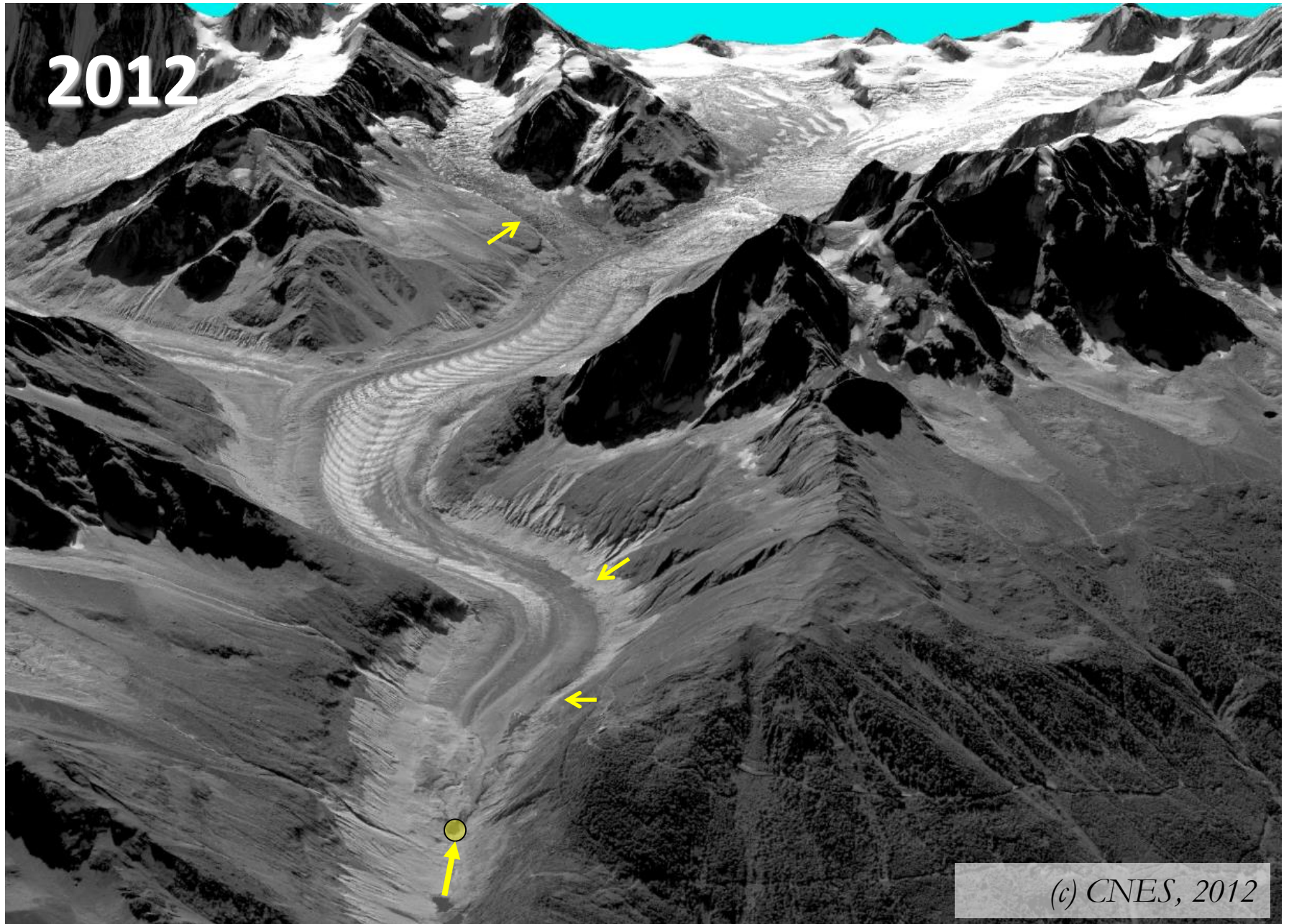
⇒ Variations d'épaisseur

MNT ?
Modèle Numérique de Terrain =
Représentation numérique du relief

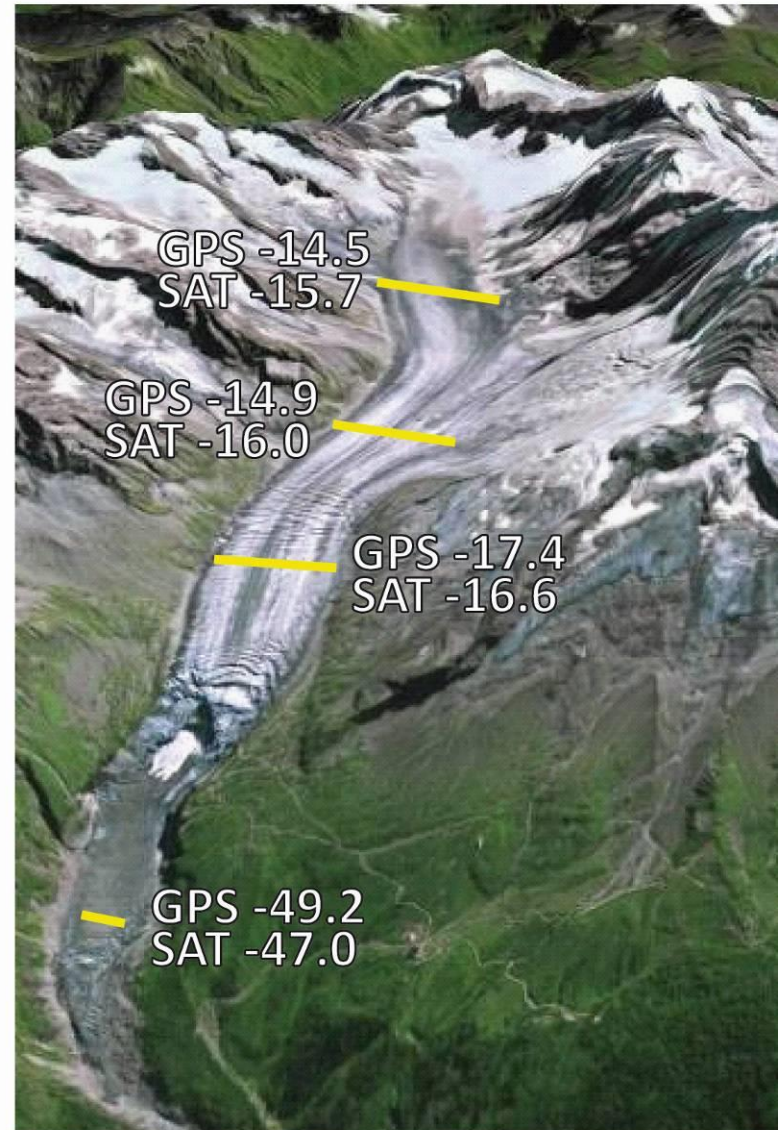
Mer de Glace en 2003 et 2012



Mer de Glace en 2003 et 2012

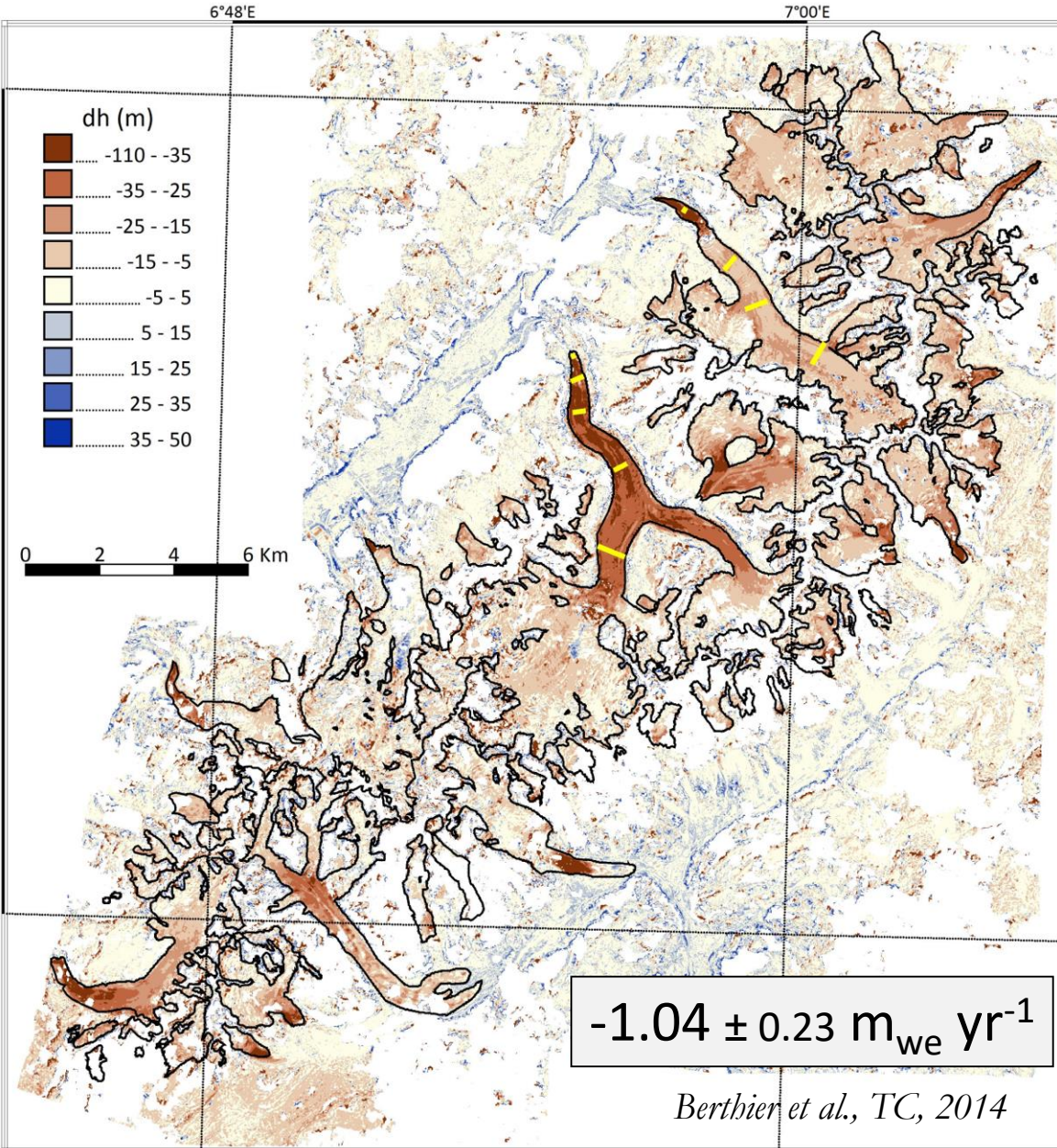


Validation à partir de données in situ



Comparaison des changements d'altitude (m) entre 2003 et 2012 déduits du différentiel de MNT et des profils GPS (données LGGE, Glacioclim). $\mu = 0.3 \text{ m}$; $\sigma = 1.3$; $N = 8$

Accélération des pertes de masse



Ci contre. Carte des changements d'altitude des glaciers du Mont-Blanc entre 2003 et 2012

Ci-dessous. Bilans de masse (en m par an équivalent en eau) des principaux glaciers du Massif du Mont Blanc entre 1979-2003 et 2003-2012

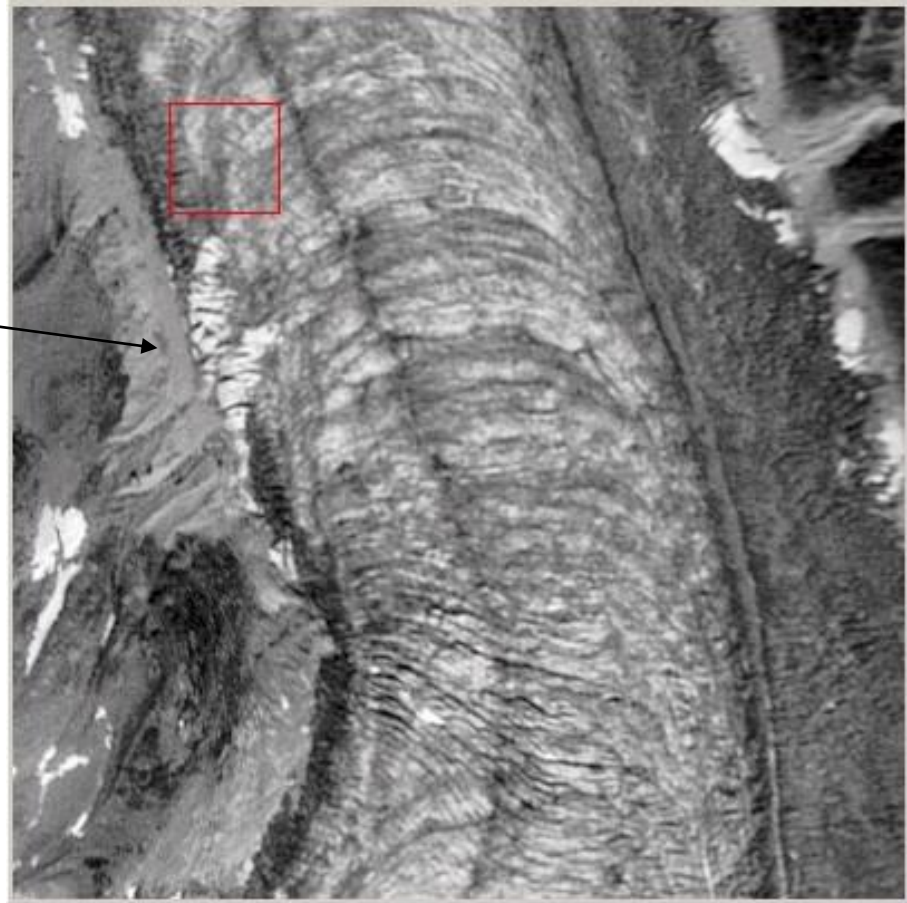
x3-4

Glacier	1979-2003	2003-2012
Mer de Glace	-0.40	-1.22
Argentière	-0.31	-1.12
Bossons	-0.10	-0.32
Talèfre	-0.38	-1.28
Tour	-0.24	-1.34

Mouvement de la Mer de Glace



© CNES 2007 ; Distribution Spot Image



© CNES 2007 ; Distribution Spot Image

*Le mouvement de la Mer de Glace observé par satellite
(images du 19 juillet, 23 août et 18 septembre)*

Plan de l'exposé

- I. **Place des glaciers dans la cryosphère**
- II. **Observer les glaciers : terrain et mesures satellitaires**
- III. **Évolutions récentes des glaciers en réponse aux changements climatiques**
- IV. **Conséquences du recul des glaciers**

Premières preuves des fluctuations glaciaires

Première moitié du XIX^e siècle...



Figure 1. Photographie du "Gros Caillou" sur le Plateau de la Croix-Rousse, Lyon (69

L'observation de blocs erratiques loin des glaciers est la preuve que ces derniers fluctuent au cours du temps donc que le climat a changé
Agassiz (1840, Études sur les glaciers)

Recul des glaciers : moraines

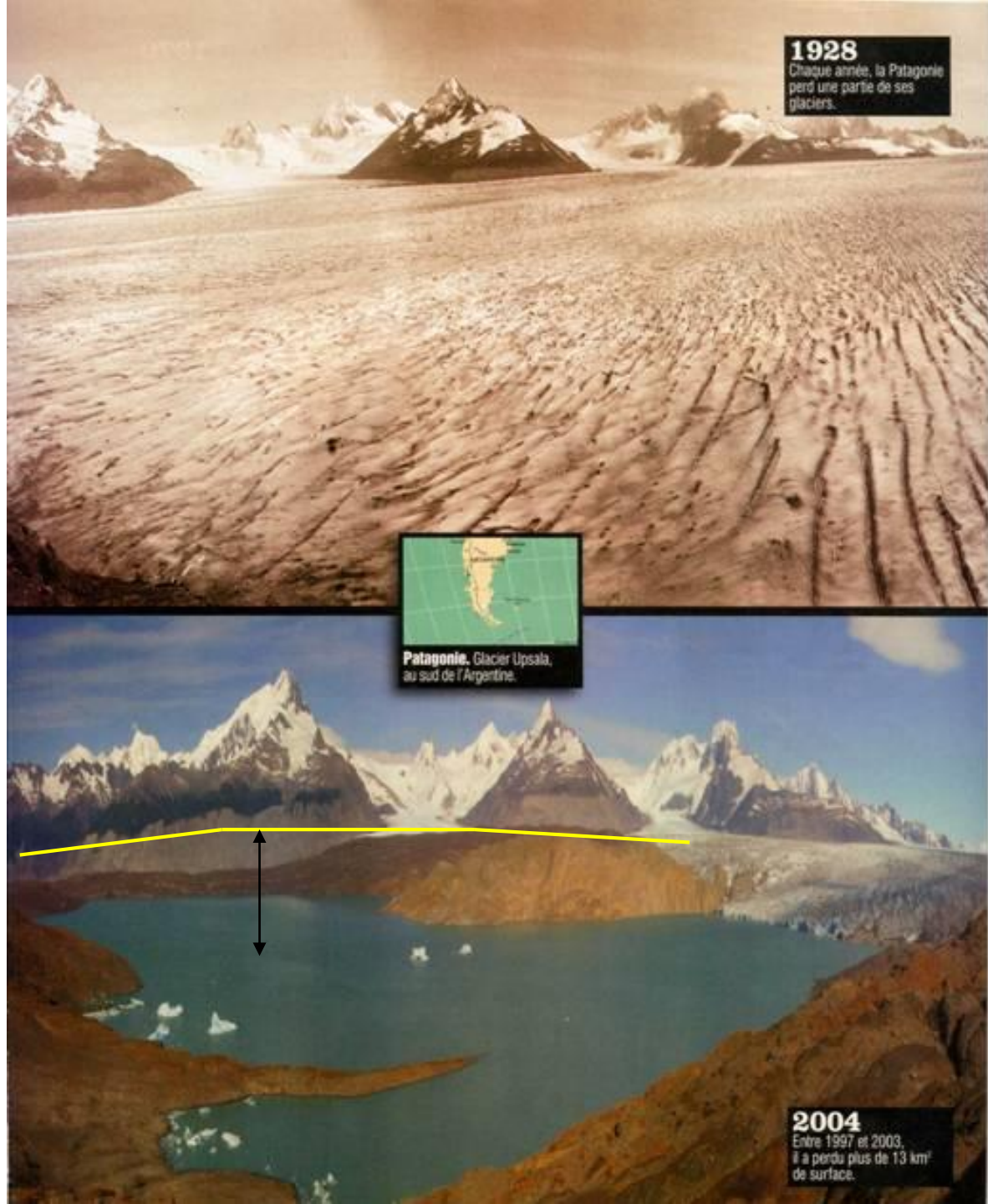


Moraine glaciaire himalayenne (Photo Jeff Kargel, Univ Arizona)

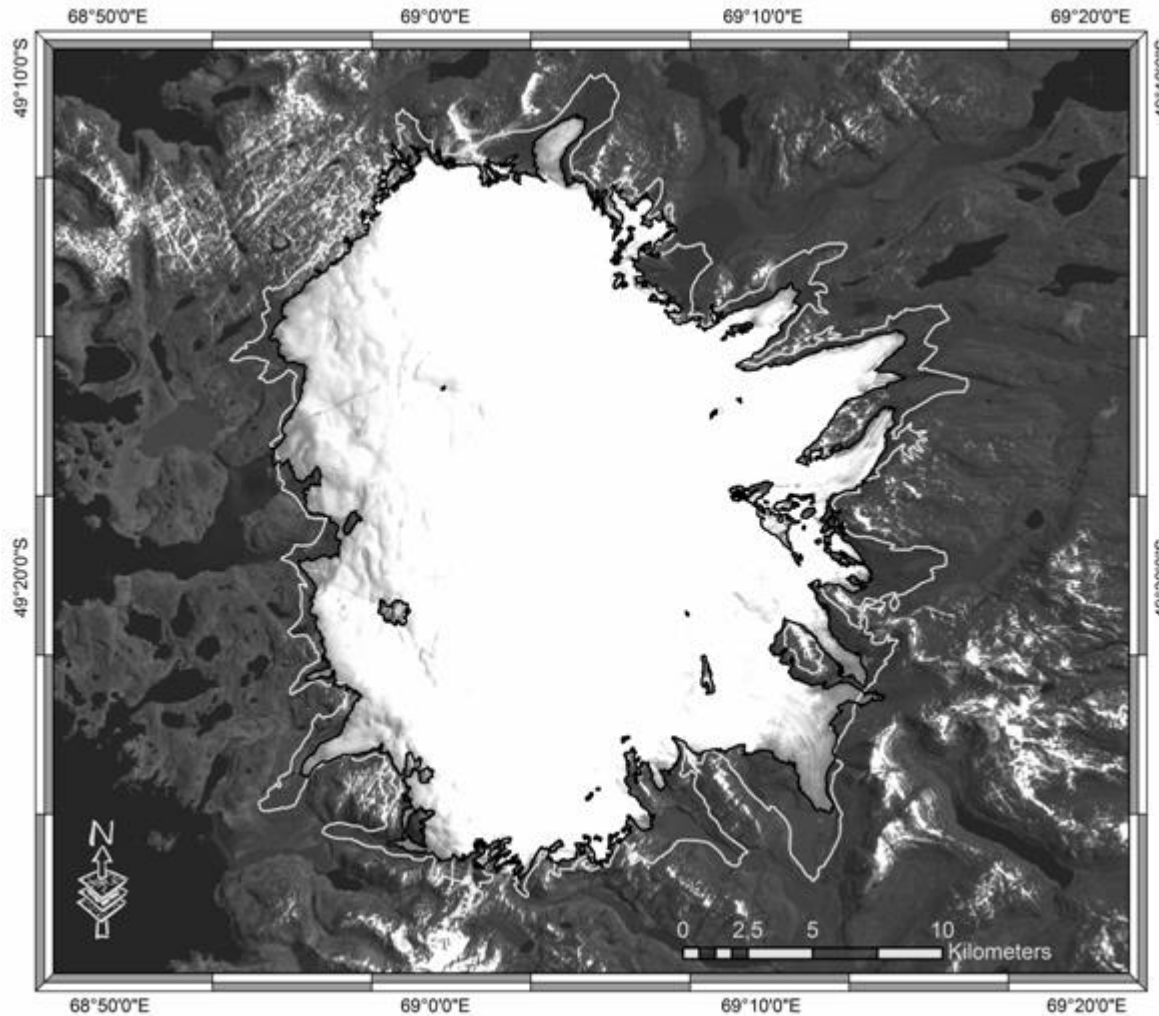
Recul des glaciers : photos

Recul d'un glacier de Patagonie : le glacier Upsala

(c) R. Villalba



Evolution de la superficie de la calotte Cook



1963 : 501 km²

-53 km²

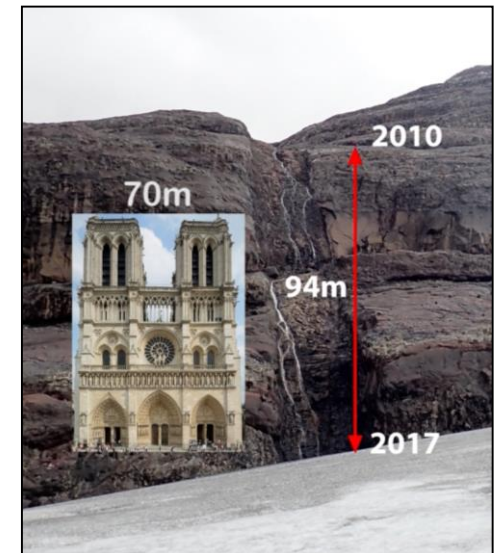
1991 : 448 km²

-45 km²

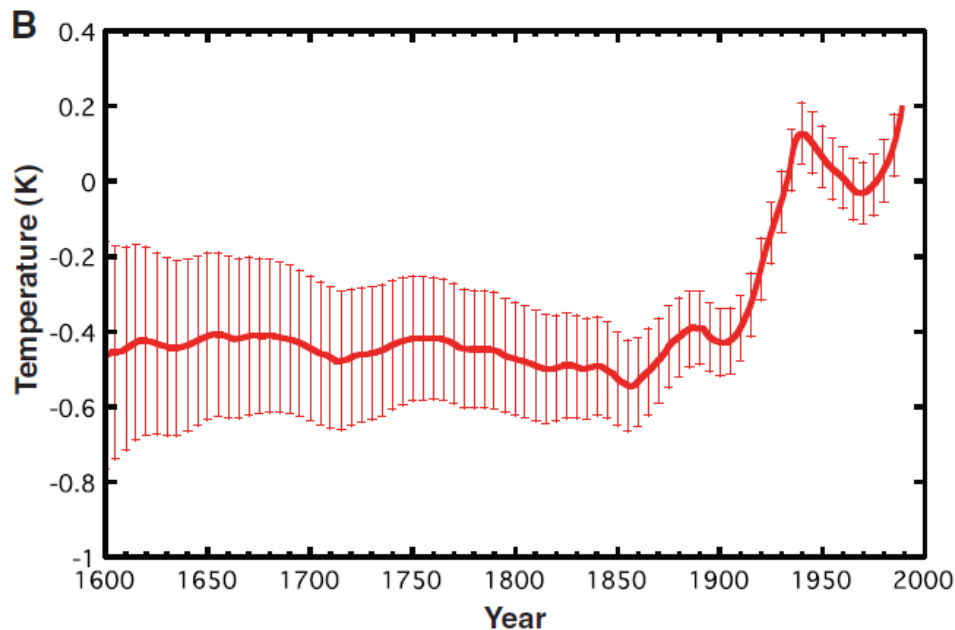
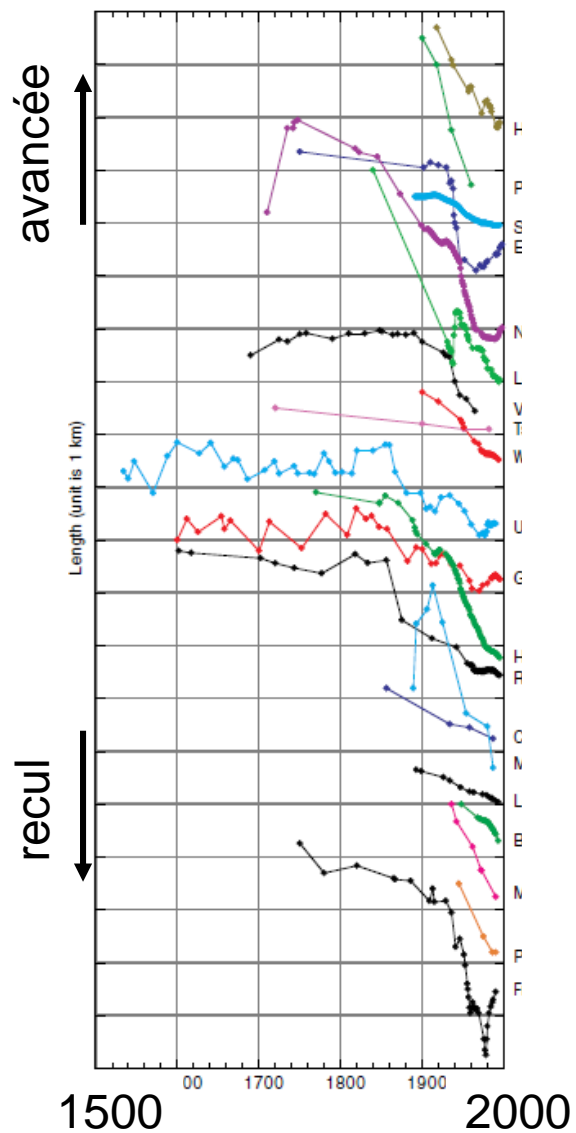
2003 : 403 km²

Perte de 98 km² en 38 ans
= 20% de la superficie initiale
a disparu

En blanc la limite des glaciers en 1963, en noire en 2003 (fond: image SPOT5 de 2003)



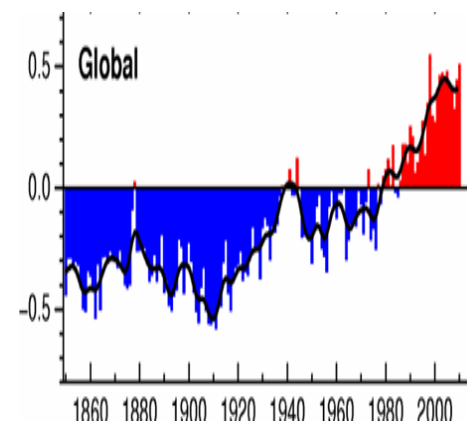
Un thermomètre indépendant...



Reconstruction de la température globale à partir de l'évolution de la longueur des glaciers (Oerlemans, Science, 2005)

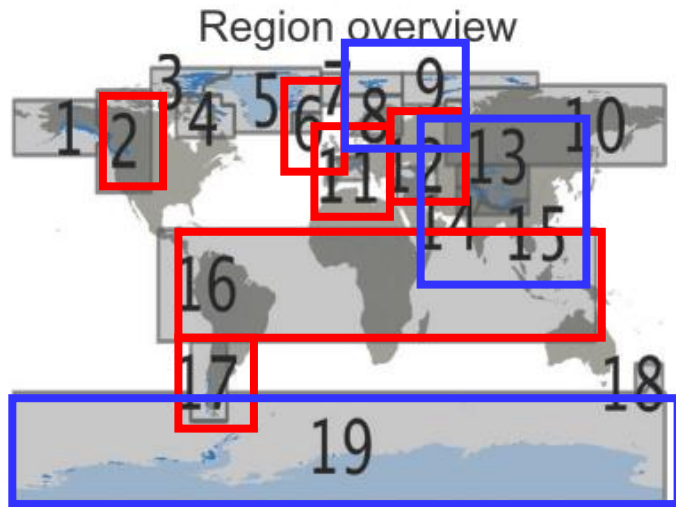
Ce que mesurent les thermomètres

GIEC, 2007



Témoins indépendants de la hausse de la température globale ~ 0.6 à 0.7°

Toutes les grandes régions glaciaires du globe perdent de la masse



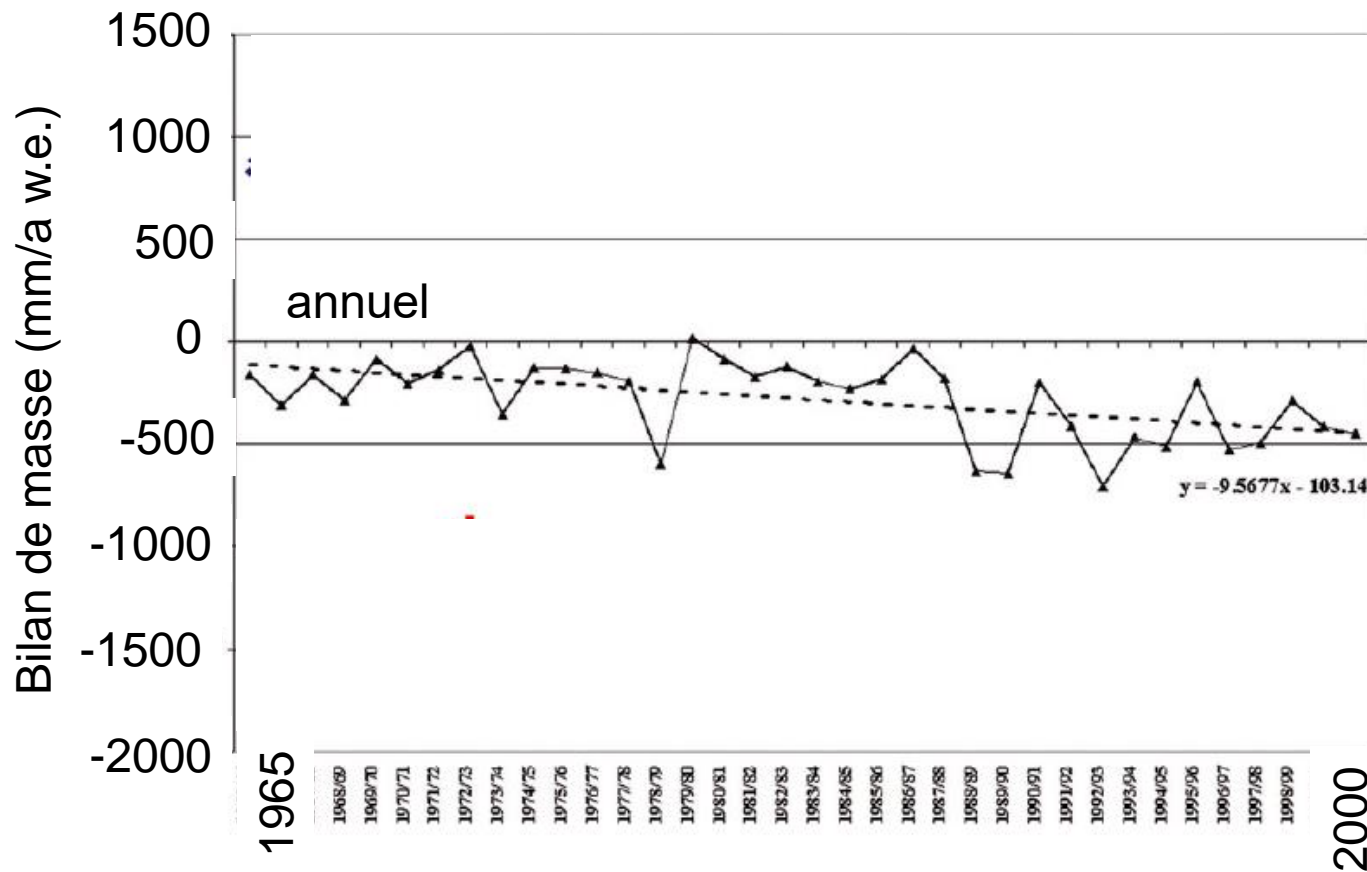
mm a⁻¹ w.e.

No.	Region Name	(kg m ⁻² yr ⁻¹)	(Gt yr ⁻¹)
1	Alaska	-570 ± 200	-50 ± 17
2	Western Canada and USA	-930 ± 230	-14 ± 3
3	Arctic Canada North	-310 ± 40	-33 ± 4
4	Arctic Canada South	-660 ± 110	-27 ± 4
5	Greenland periphery	-420 ± 70	-38 ± 7
6	Iceland	-910 ± 150	-10 ± 2
7	Svalbard	-130 ± 60	-5 ± 2
8	Scandinavia	-610 ± 140	-2 ± 0
9	Russian Arctic	-210 ± 80	-11 ± 4
10	North Asia	-630 ± 310	-2 ± 1
11	Central Europe	-1060 ± 170	-2 ± 0
12	Caucasus and Middle East	-900 ± 160	-1 ± 0
13-15	High Mountain Asia	-220 ± 100	-26 ± 12
16	Low Latitudes	-1080 ± 360	-4 ± 1
17	Southern Andes	-990 ± 360	-29 ± 10
18	New Zealand	-320 ± 780	0 ± 1
19	Antarctic and Sub-Antarctic	-50 ± 70	-6 ± 10
	Total	-350 ± 40	-259 ± 28

0.7 mm / an niveau mer

Bilans de masse cumulés (m) dans les différentes grandes régions glaciaires entre 2003 et 2009. Gardner et al., Science, 2013; GIEC, 2013

Pertes de masse des glaciers : causes?



Perte de masse
annuelle → recul

*Bilans de masse hivernaux, estivaux et annuels entre 1965 et 2000
pour ~50 de glaciers du globe*

⇒ **Glaciers = indicateurs climatiques**

Ohmura et al, 2006, 2011

Mt Blanc

4800 m

-0.3 m

**Et à très
haute
altitude?**

**Variations
d'épaisseur entre
1905 et 2005**

Dôme du Goûter

4300 m

-3 m

Vincent et al, JGR, 2007

Plan de l'exposé

- I. Place des glaciers dans la cryosphère**
- II. Observer les glaciers depuis l'espace**
- III. Évolutions récentes des glaciers en réponse aux changements climatiques**
- IV. Conséquences du recul des glaciers**

Conséquences de la fonte glaciaire

Destabilisation des terrains environnants (moraines)



Une année de recul du glacier Fox en Nouvelle Zélande. Source <https://vimeo.com/glacier>, B. Anderson.

La séquence dure 1'14s et correspond en réalité à un an. Des personnages venant voir le glacier donnent l'échelle.

Conséquences de la fonte glaciaire

Le réchauffement accroît les risques de vidange accidentelle de lacs glaciaires

LE MONDE | 09.10.04 | 14h38

Le Monde.fr



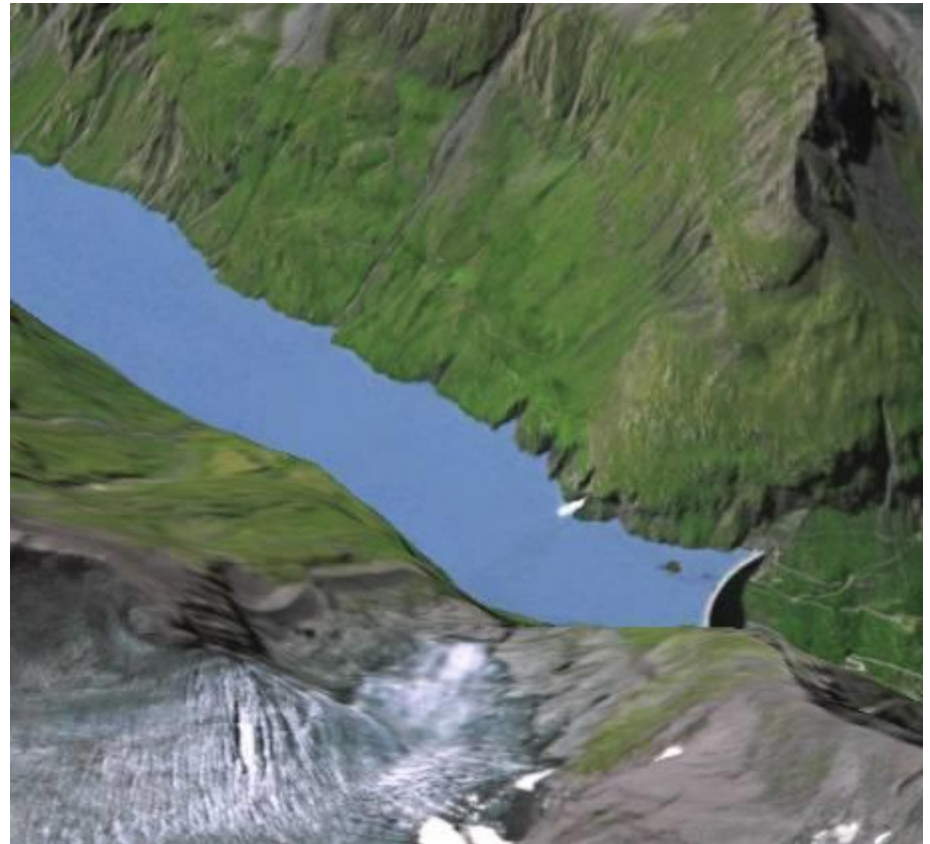
Photo du Lac glaciaire de Rochemelon qui menace Villard de Lans (Vanoise, Savoie)

Conséquences de la fonte glaciaire

Tourisme & Ressource en eau



Le recul des glaces du Kilimandjaro



Barrage hydroélectrique au pied du glacier Suisse du Pirletta

Bolivie, La Paz

➔ % Eau potable provenant
De la fonte des glaciers

En saison humide (oct-mars): 12 %

En saison sèche (avril-sept): 27 %

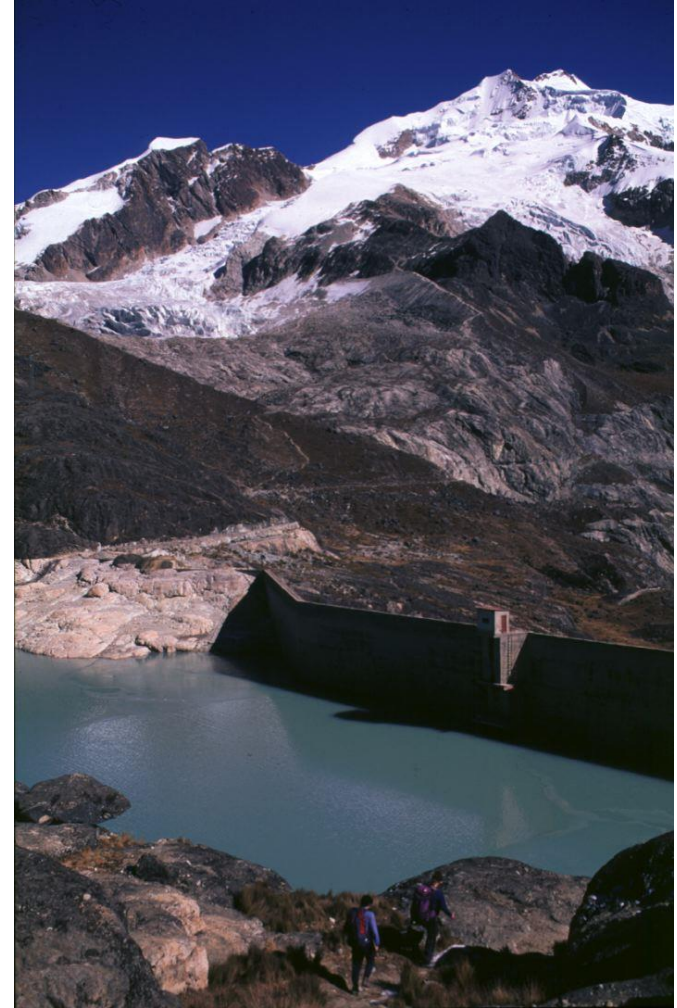
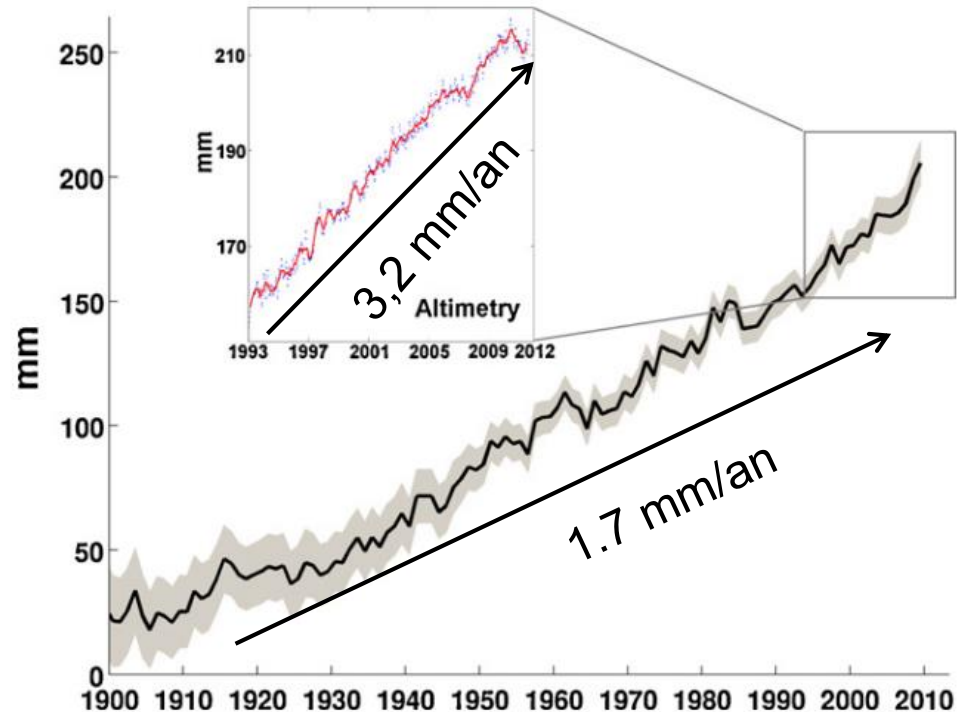
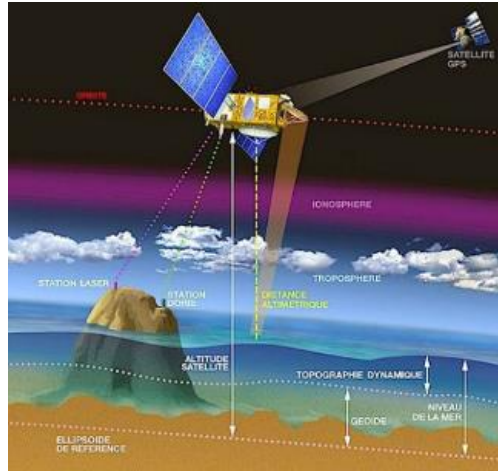


Photo : P.Wagnon, Glacier Zongo, Bolivie

Conséquences de la fonte glaciaire

Montée du niveau marin

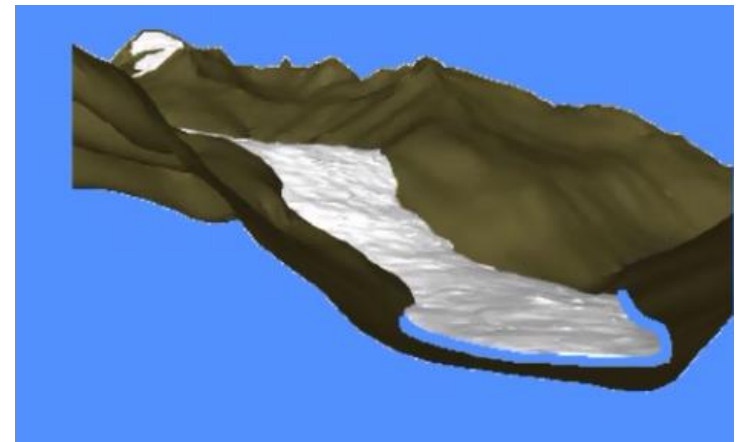
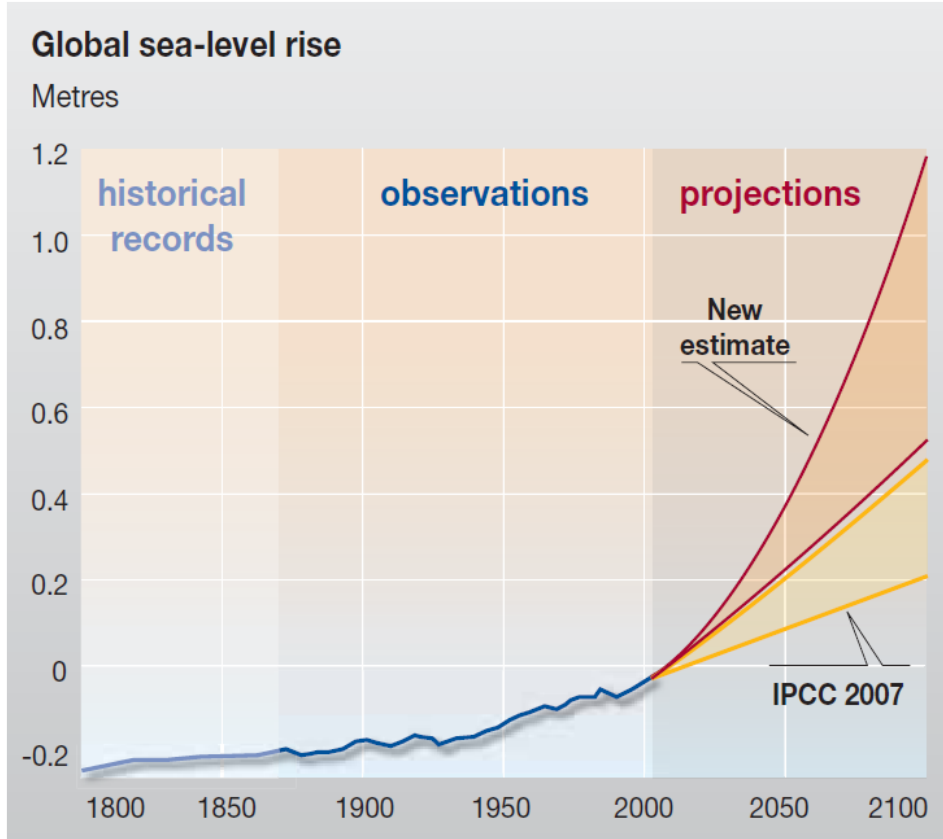


Hausse observée	~3.1 mm/a
Dilatation thermique	+1.3 mm/a
Calottes Polaires	+0.7 mm/a
Glaciers	+0.6 mm/a
Eaux continentales	???

Bilan des contribution à la hausse du niveau marin entre 1993 et 2017

Fonte future des glaciers

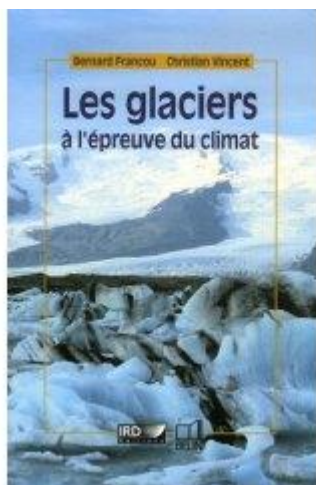
Projection: montée du niveau marin



Video Guillaume Jouvet. Le devenir des glaciers (5 mn)

Montée prédite du niveau marin au 21^è siècle (GIEC, 2007 et Rahmstorf, 2007)

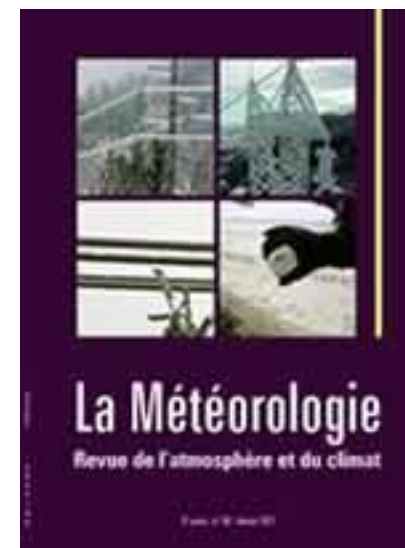
Bibliographie



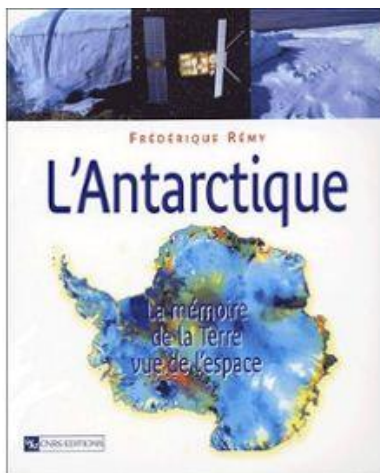
Francou &
Vincent, 2007



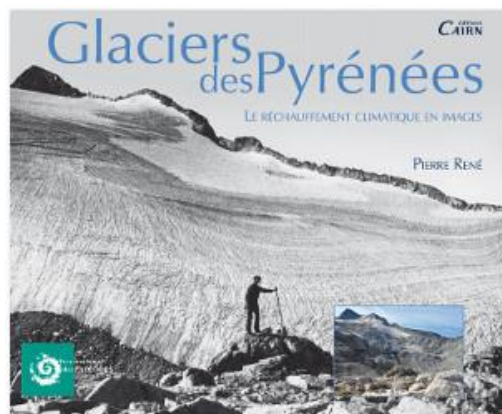
Francou & Vincent, 2015



Revue La Météorologie,
éditée par Météo & Climat
<http://meteoetclimat.fr/>



Remy, 2003



René, 2013

Trimestriel. Beaucoup
d'articles Neige/Glace.