



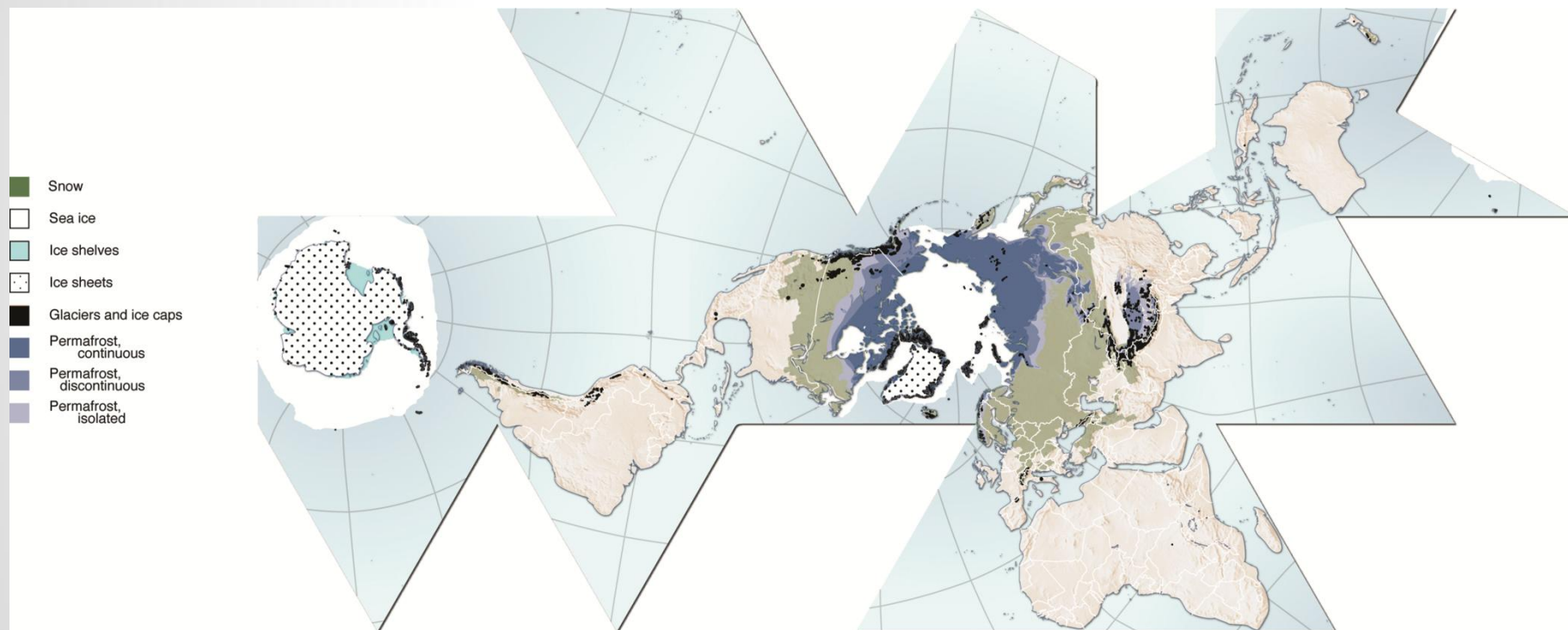


La fonte des glaces s'accélère dans le monde



Bernard Francou
Directeur de Recherche Emérite IRD

Etendue de la « planète blanche »



UNEP-GRIP

Cryosphère: Calottes de glace et plateformes – Banquises (été/hiver) – Glaciers (montagnes, petites calottes) – Pergélisol – Manteaux neigeux saisonniers

52-55% des terres émergées

Contribution de chacune des composantes de la cryosphère au niveau marin

Extension Continents
52–55 % des surfaces continentales

GIEC 2013

GLACES ET NEIGES CONTINENTALES	SURFACE EN KM ² *	% DE LA SURFACE DES CONTINENTS	ÉQUIVALENT EN NIVEAU Océanique (EN MÈTRES)**
Calotte de l'Antarctique	12 250 800	8,3	58,3
Calotte du Groenland	1 771 200	1,2	7,36
Glaciers ***	738 000	0,5	0,41
Pergélisols situés sur les continents	13 284 000 – 17 712 000	9 – 12	0,02 – 0,10
Sols gelés saisonniers	≈ 48 708 000	33	–
Manteau neigeux selon la saison (hémisphère Nord seulement)	1 918 800 – 45 165 600	1,3 – 30,6	0,001 – 0,01
Lacs et rivières gelés (hémisphère Nord)	1 623 600	1,1	–
TOTAL	76 752 000 – 81 180 000 ****	52 – 55	≈ 66,1

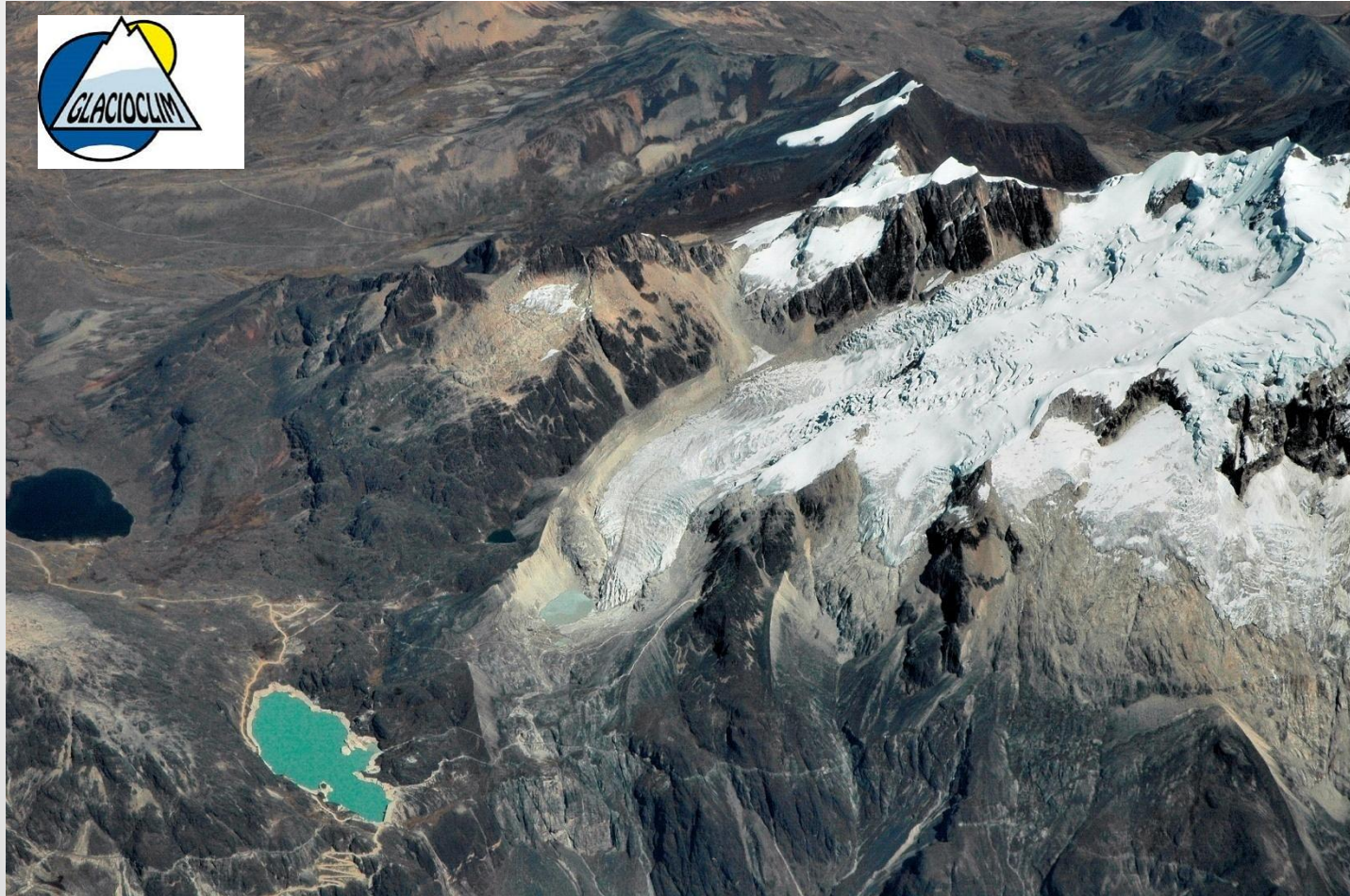
* : avec un total des surfaces occupées par les continents estimé à 147,6 Mkm².
 ** : avec une densité de la glace estimée à 917 kg/m³ et celle de l'eau de mer à 1 028 kg/m³.
 *** : incluant les glaciers situés autour du Groenland et de l'Antarctique.
 **** : la surface totale exclut les manteaux de neige saisonniers (couvrant aussi le pergélisol et les sols gelés saisonniers).

Francois et Vincent, 2015

+99 % des volumes de glaces dans les calottes polaires

Les glaciers de montagne

Fondent-ils tous au même rythme?



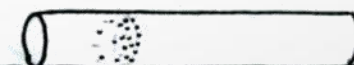
Bernard Francou

Zongo – Bolivie

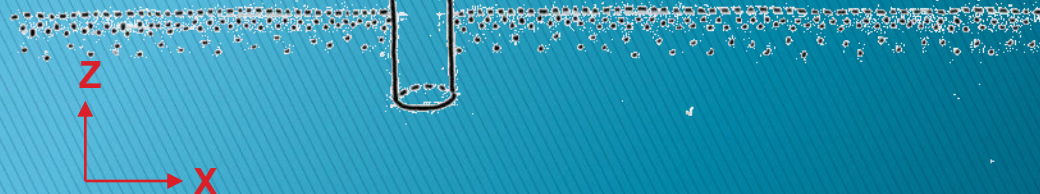
Accumulation measurements: snow core



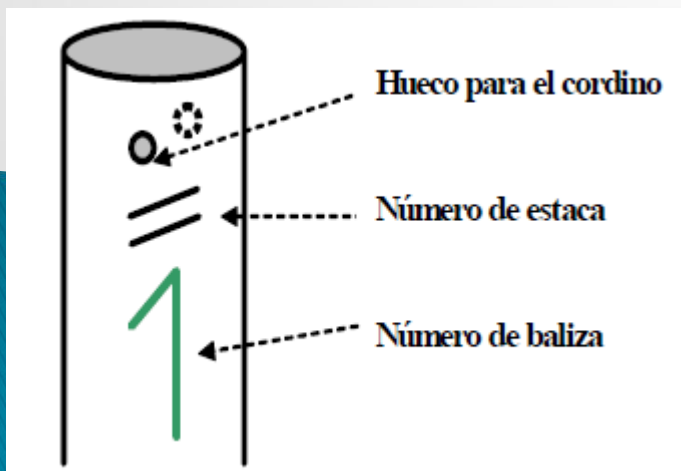
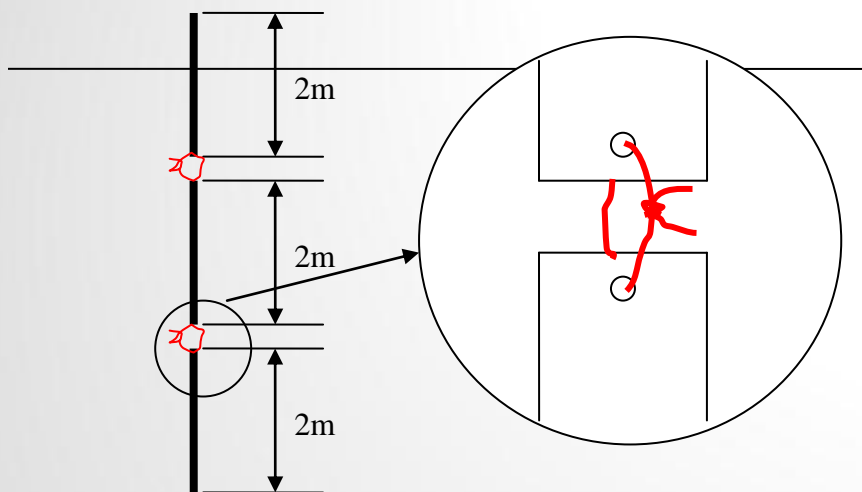
End of winter surface (t2)



End of summer surface (t1)



Ablation measurements at stakes

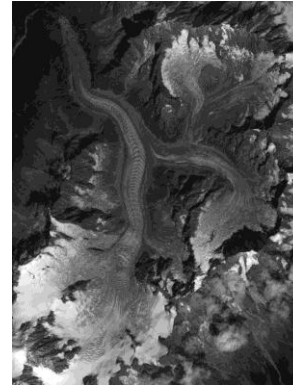


The geodetic method

1994



2003



Aerial photographs pairs

DEM #1

DEM #2



$DEM \#2 - DEM \#1 = \text{thickness changes}$

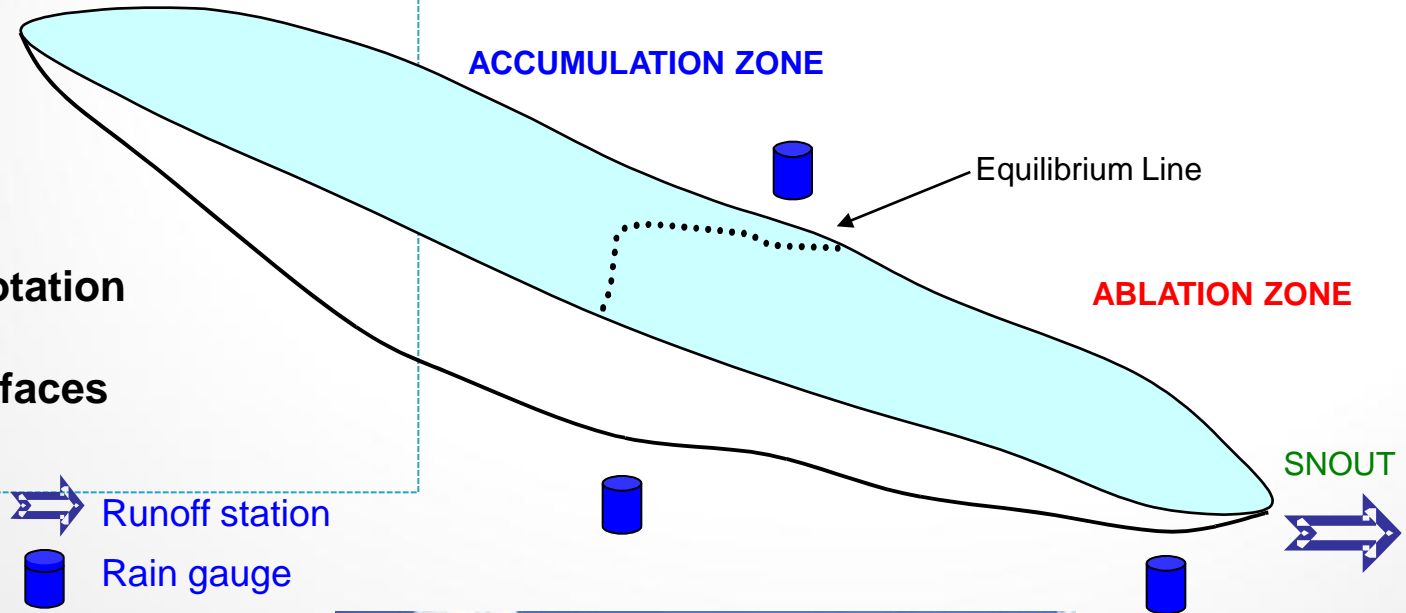
$\Rightarrow \text{Thickness changes} * \text{ice density} = \text{mass balance}$

The hydrological method:

Are considered:

- Precipitation
- Melting (runoff)
- Sublimation/evapotatation
- Infiltration
- No glacierized surfaces

$$Bh = Pg - Mg - Ig - Sg$$



Rain gauge

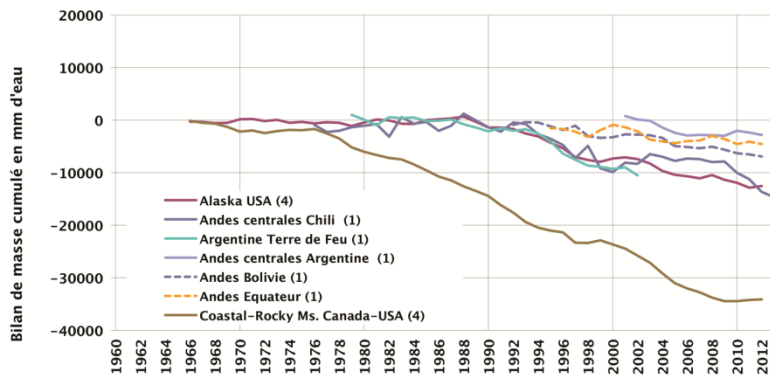


Runoff station

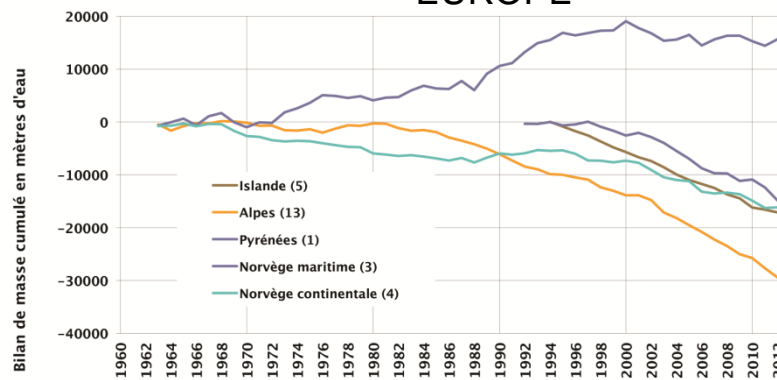
Bilan de masse des glaciers dans le monde

Un signal cohérent venant des 57 glaciers mesurés depuis 4 décennies et plus

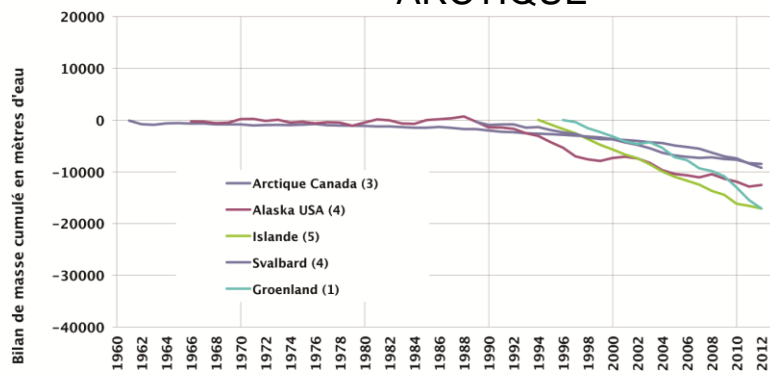
AMERIQUES



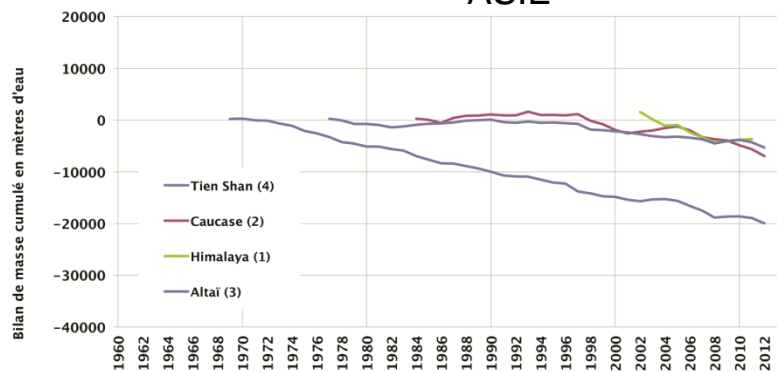
EUROPE



ARCTIQUE



ASIE



Sauf exceptions, tous les glaciers perdent de la masse depuis **1976, 1986, 1991 ou 2000**

Que faut-il retenir de ces tendances ?

- 1) Une large majorité de glaciers ont perdu de la masse, les premiers depuis **1976-1986**, les autres depuis **1991** ou **2000**
- 2) Depuis le milieu du 19^{ème} siècle (fin du *petit âge glaciaire*) , les glaciers dans le monde ont perdu en moyenne **0.2-0.3 m éq. eau /an**
- 3) Ces pertes se sont accrues fortement depuis la dernière décennie du 20^{ème} siècle et la première du 21^{ème} siècle **: 0.5-0.8 m éq. eau/an**
- 4) Un tel déclin peut être considéré comme sans précédent depuis le début des observations sur les glaciers : **nous sommes entrés dans un nouvel âge pour les glaciers**
- ▶ 5) Néanmoins, ces données globales doivent être nuancées !

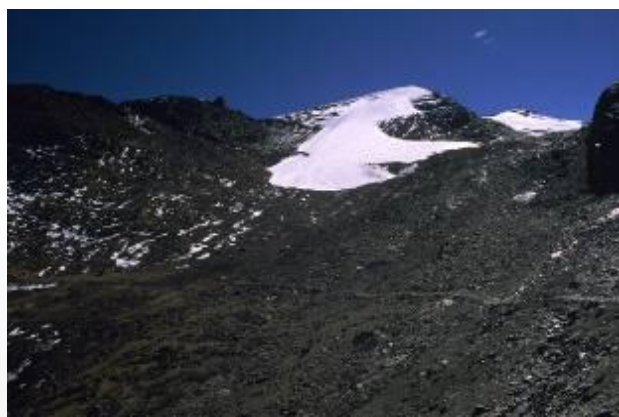
Ce sont les petits glaciers (privés de zone d'alimentation) qui sont les plus vulnérables

Exemple: le glacier de CHACALTAYA (5400m, Andes de Bolivie)
disparu en 2010

Ville de La Paz (El Alto) concernée (30% de son alimentation en eau en saison sèche)



1994

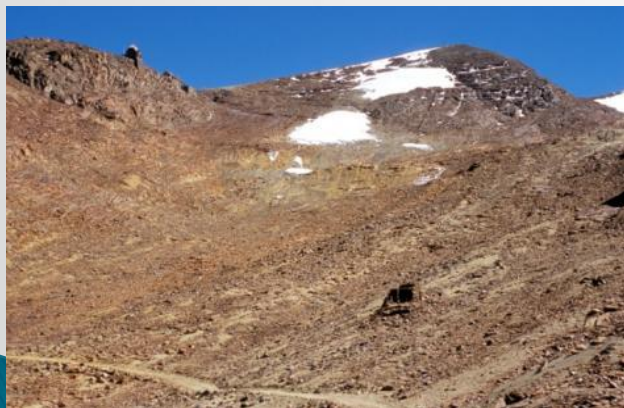


2000

Photos B.Francou



2003



2005



2009



2010

Glacier de Sarennes – Grandes Rousses

~0,5 km²

Évolution du glacier de Sarennes entre 1906 et 2016



1906 © G. Flusin



2016 © E. Thibert/Irstea



Ce sont les glaciers « maritimes » (vêlant dans l'océan) qui offrent les perspectives les plus inquiétantes



Ph. Bernard Francou

Tierra del Fuego, Chile (BF)

Bilans de masse = -0.5/-0.6 m éq. eau /an

Fort impact sur le niveau des océans.

Exemples : Alaska, territoires arctiques, Patagonie

Cependant, les glaciers des régions continentales et sèches résistent mieux ...



Ph. Bernard Francou

Exemples : Karakorum/Kun Lun (ouest Himalaya et nord Tibet :
glaciers proches de l'équilibre : pourquoi ?
glaciers « froids », localement + de précipitations hivernales

Des glaciers dans le monde ont avancé durant des périodes récentes ...

Ex: Franz-Joseph Glacier, Nouvelle Zélande

1893-1983

- 3 km

1983-2008

+ 1.5 km

ENSO/PDO
Phase chaude

2008-2012

- 0.5 km



Ph. NZTP

Franz-Joseph Glacier: **un signal positif** de 1983 à 2008

Ces glaciers répondent à des modes cycliques de circulation atmosphérique régionale : phase chaude de l'ENSO = plus de précipitations sur les montagnes de N.Z.

Des glaciers dans le monde ont avancé durant des périodes récentes ...

Ex: façade maritime de la Scandinavie

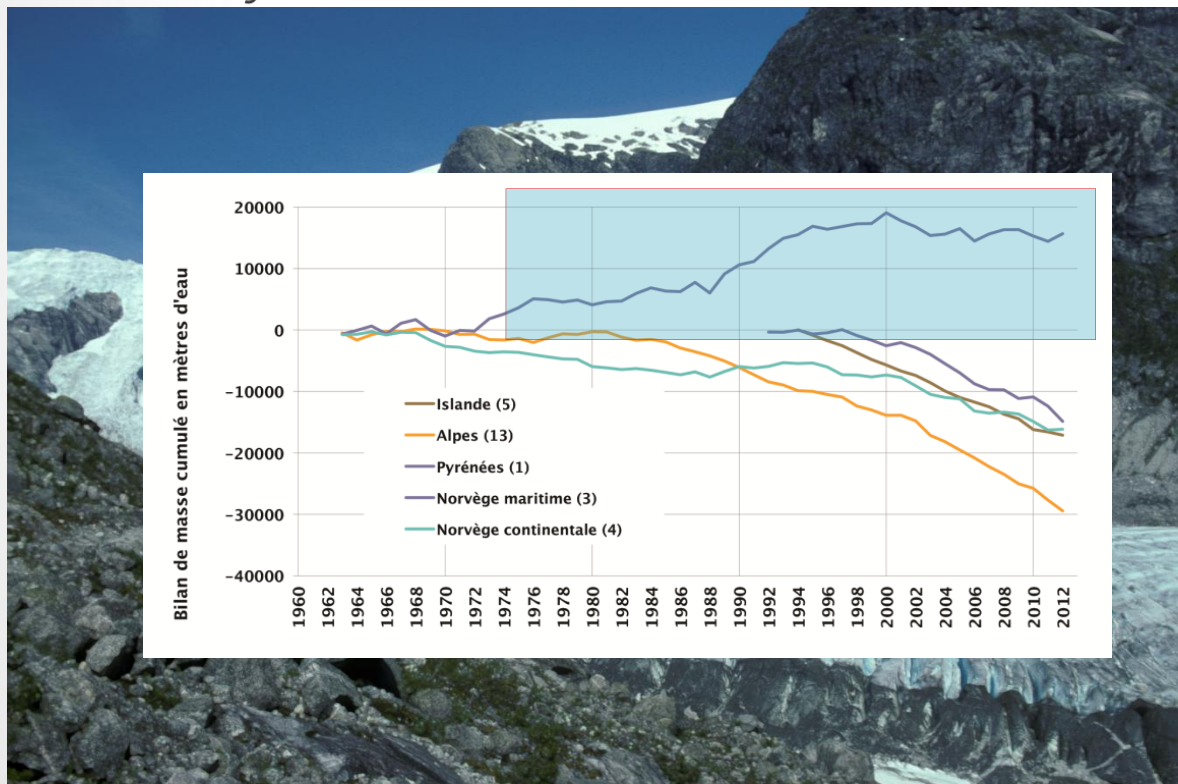


Ph. Lefauconnier

Le Nigardsbreen (Norvège) a avancé entre les années 1990 et le début du 21ème siècle

Des glaciers dans le monde ont avancé durant des périodes récentes ...

Ex: façade maritime de la Scandinavie



Ph. Lefauconnier

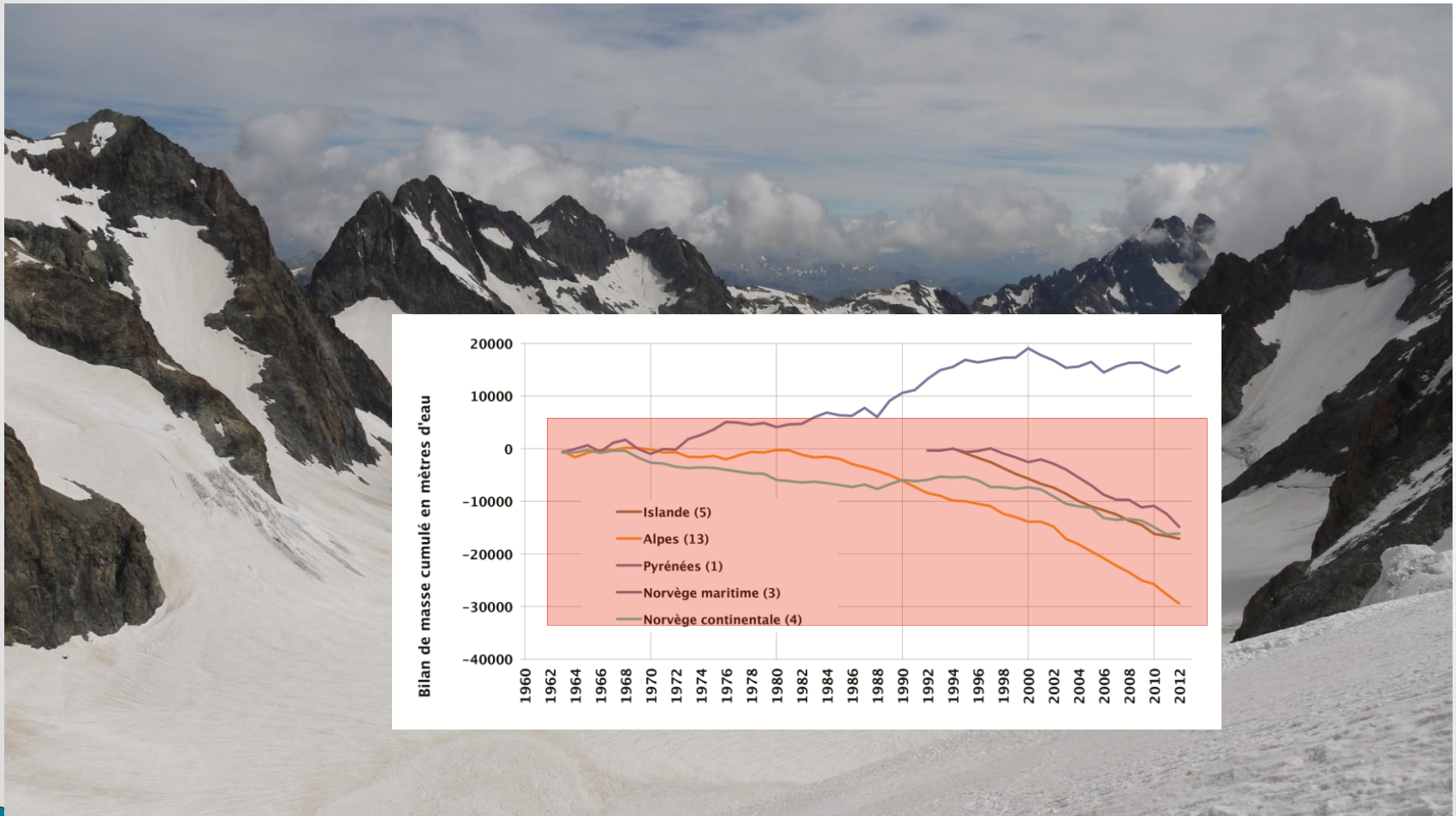
Ces glaciers répondent à un mode de circulation atmosphérique propre à l'Atlantique nord : mode NAO positif = + de précipitations hivernales

et les Alpes ? Où en est-on ?



Glacier Blanc, 2018

et les Alpes ? Où en est-on ?



Bernard Francou

Glacier Blanc, 2018

Dans les Alpes, on note une forte accélération de la fonte depuis le milieu des années 1980

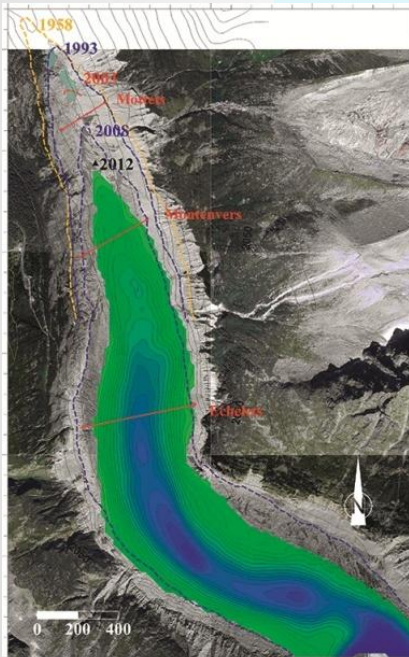
- ▶ 1962–1982 : bilans équilibrés ($B_m = 0$)
- ▶ 1983–2002 : les déficits passent à -0.85m éq.eau/an
- ▶ Depuis 2002, les déficits ont doublé passant à $-1.50\text{ m/ } -1.80\text{ m éq.eau/an}$

Des glaciers en déséquilibre ...

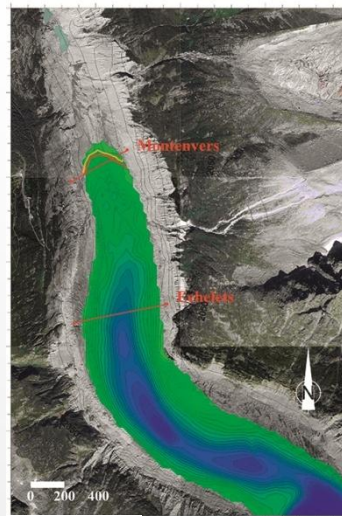
le recul dans les années qui viennent est inévitable, car les glaciers doivent s'équilibrer au climat actuel

Exemple de la Mer de Glace (Alpes françaises)

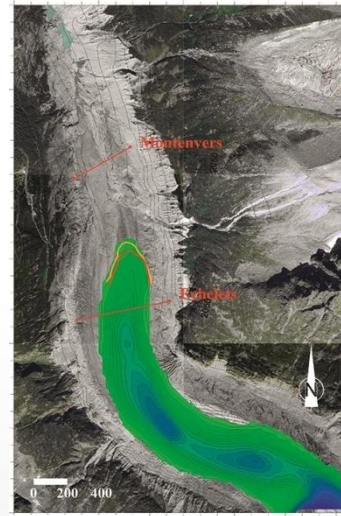
Recul : ~0,8 km entre 1958 et 2012



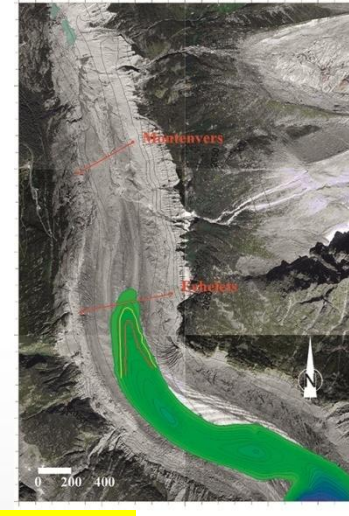
2012



2020



2030



2040

Vincent et al. 2014

- **CONSTAT** : Recul de 0.8 km entre 1958 et 2012
- **SIMULATIONS** : Recul de 1.0 km d'ici 2040 en climat constant
Recul de 1.2 km d'ici 2040 avec le scénario +4°C d'ici la fin du siècle

Mer de Glace

Alpes françaises



1895



2010

Recul de 650 m au cours
des 3 dernières décennies



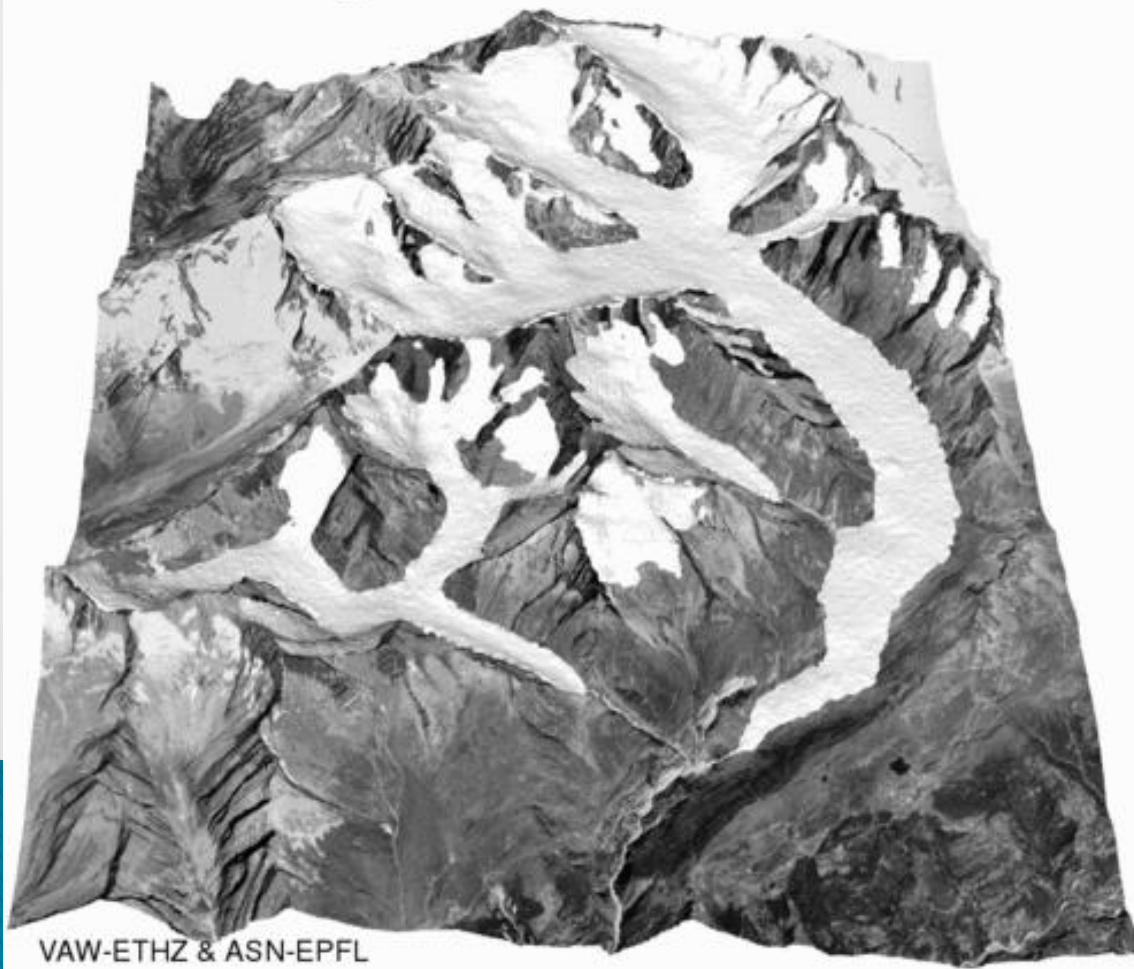
Simulation

2040

Christian Vincent

SIMULATION SUR LE GLACIER D'ALETSCHE (Suisse)

Aletsch glacier (Suisse) 22 km de long, ép. max ~700 m



Scenario constant:
le glacier perd
40% de son volume
d'ici 2100

Scenario à +2°C:
le glacier perd 10
km et 90% de son
volume d'ici 2100

LES ALPES SANS GLACIERS A LA FIN DU SIECLE ?

D'après une modélisation faite par une équipe de Zurich (Huss et al., 2012)

Scénario +2°C (2100) et pas de changements dans les précipitations

Subsistent 18% des surfaces glaciaires (de 2003) en 2100

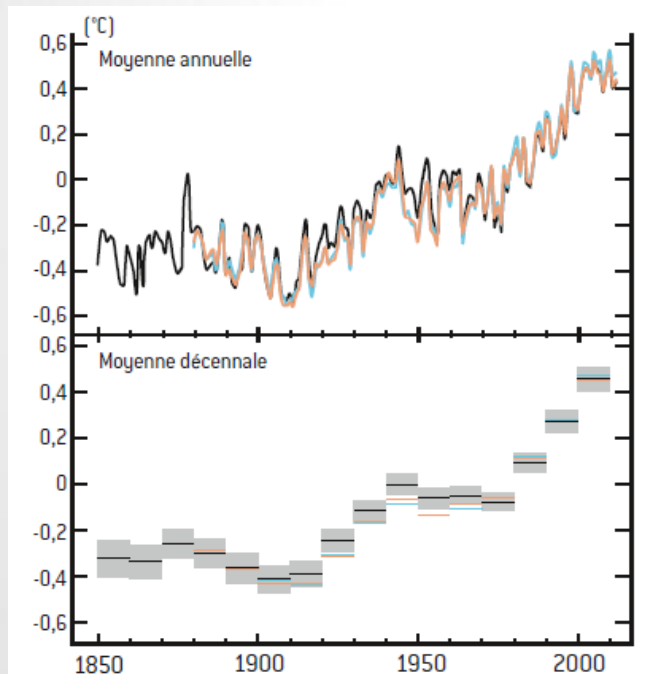
Scénario +5°C (2100) et pas de changements dans les précipitations

Subsistent 4% des surfaces glaciaires (de 2003) en 2100

Cause du déclin des glaces :

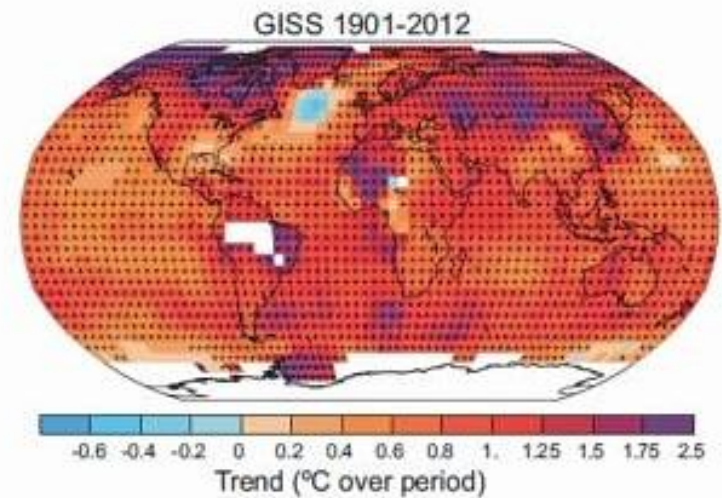
le réchauffement de l'atmosphère et de l'océan est dû pour l'essentiel au « forçage radiatif » d'origine anthropique

+2.3 W/m² depuis 1750



Evolution de la température (**continents et océans combinés**) depuis 1850 GIEC 2013

Hausse moyennée de **0,9°C** depuis 1880 et de **0,8°C** depuis 1970



Hausse des températures de 1901 à 2012 (mesures + modèles). Goddard Institute for Space Studies GIEC, 2013

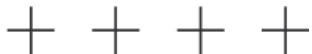
Amplification sur les continents, **surtout dans les zones polaires** et **en haute montagne**

Quel est le lien entre la hausse des températures et le retrait glaciaire ?

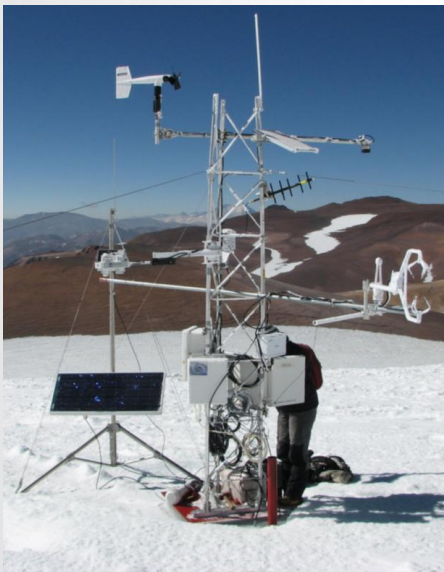
Pour répondre à cette question, besoin de mesurer les flux d'énergie à la surface du glacier

AWS (5430 m a.s.l.)
Guanaco Glacier, Andes, Norte Chile



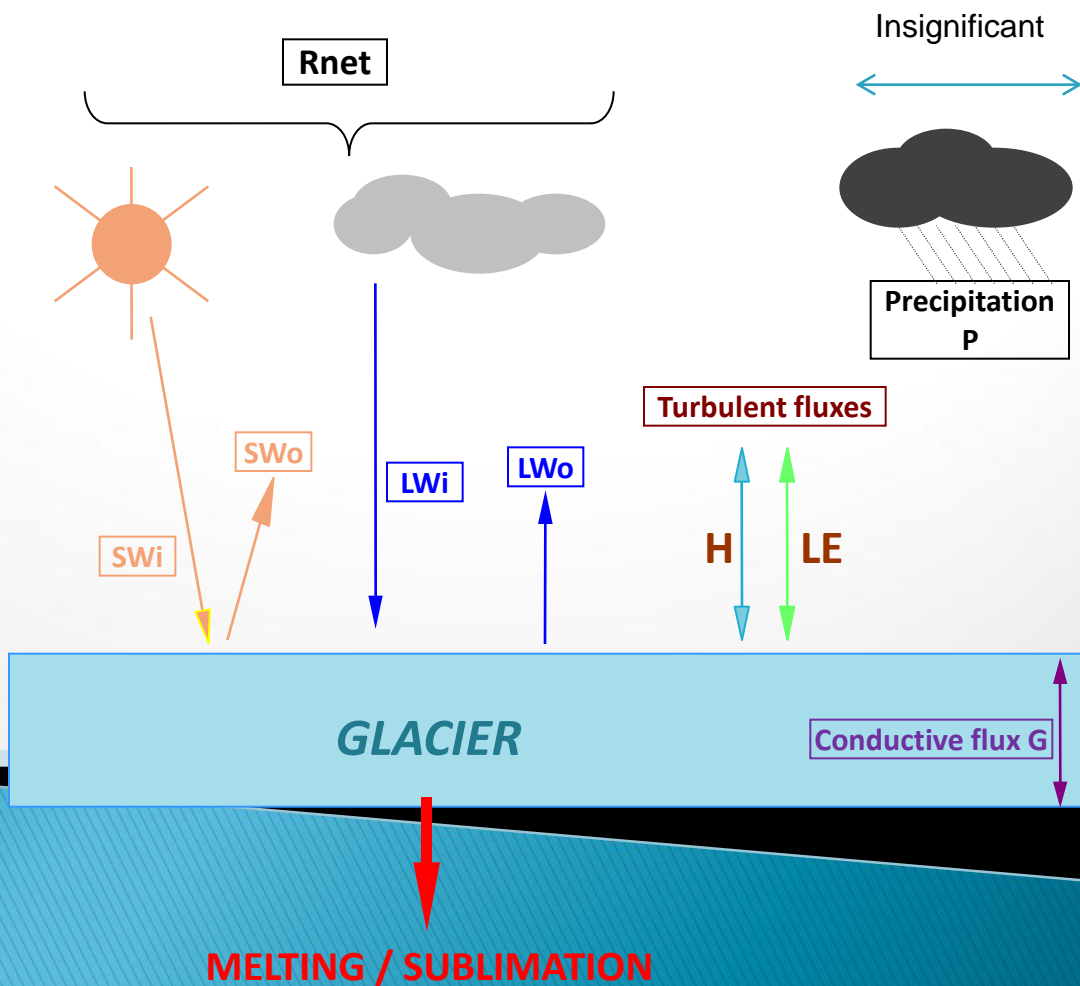


Surface energy balance



$$S + L + H + LE + G + P = \Delta Q$$

ATMOSPHERE



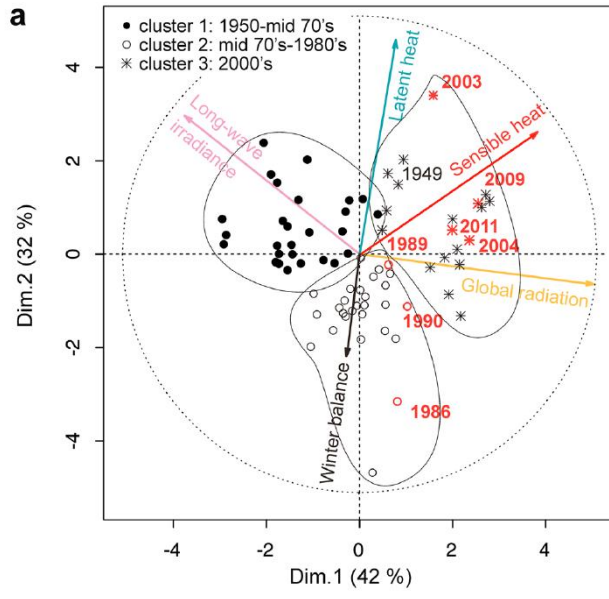
Pourquoi l'ablation augmente-t-elle avec la température ?

Ablation = bilan d'énergie

- les glaciers absorbent davantage d'énergie (le bilan radiatif est plus positif)
 - feed-back avec l'albédo (rayonnement de courte longueur d'onde davantage absorbé par la surface quand la neige disparaît plus tôt)
 - le bilan dans les grandes longueurs d'onde croît (conséquence de l'effet de serre : davantage d'humidité quand la T^{air} croît)
- air turbulent de chaleur sensible plus chaud à la surface des glaciers
- air turbulent de chaleur latente plus fort quand l'atmosphère est plus humide : la fonte croît aux dépens de la sublimation

Exemple du glacier de Sarennes (Thibert et al. 2017)

Données de bilans d'été et de bilan d'hiver depuis 1949



Facteurs contrôlant le bilan d'énergie de surface (composantes principales)
Variance expliquée = 74 %

Dim 1 (42%) : Radiation globale (RG)

Dim 2 (32%) : Flux de chaleur latente LH

Dim 3 (19%) : bilan d'hiver (q. neige au printemps)

Clust. 1 (1950-1975): fort LW et faible RG

Clust. 2 (1975-1980s) : faibles H et LE

Clust. 3: (depuis 2000): fort RG et fort H

Dit plus simplement....

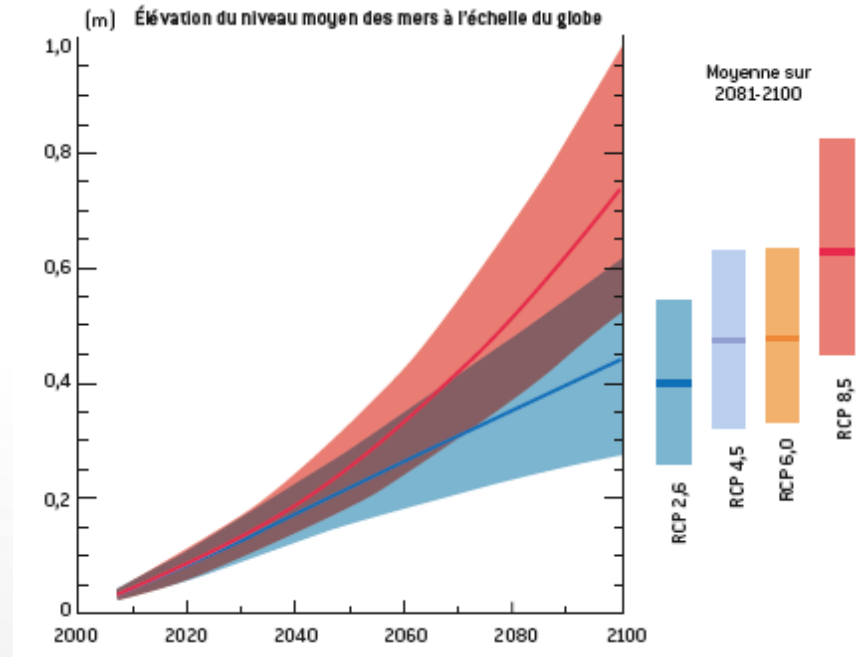
- saison d'ablation de plus en plus longue (annexe juin et septembre et partie d'octobre)
- Déneigement plus précoce (albédo faible dès juin)
- Étés de plus en plus chauds et secs (RG et H)
- Plus d'humidité dans l'atmosphère : transfert d'énergie de la sublimation (LE) à la fusion

Fonte des glaces et niveau des mers

ACTUEL

FUTUR

sources	1993–2010
Expansion thermique	1,1 ± 0,3 (actuellement majoré à 1,4mm)
Glaciers, petites calottes	0,76 ± 0,4
Groenland	0,33 ± 0,08
Antarctique	0,27 ± 0,11
Eaux continentales	0,38 ± 0,11
Somme des contributions	2,80 ± 0,5
Observations altimétriques	3,2 ± 0,4



Hausse du niveau des mers selon les scénarios de réchauffement (RCP) GIEC, 2013

Part des glaces : 45%

La part des calottes glaciaires devrait dépasser assez vite celle des glaciers de montagne (Groenland + Antarctique)

Merci...

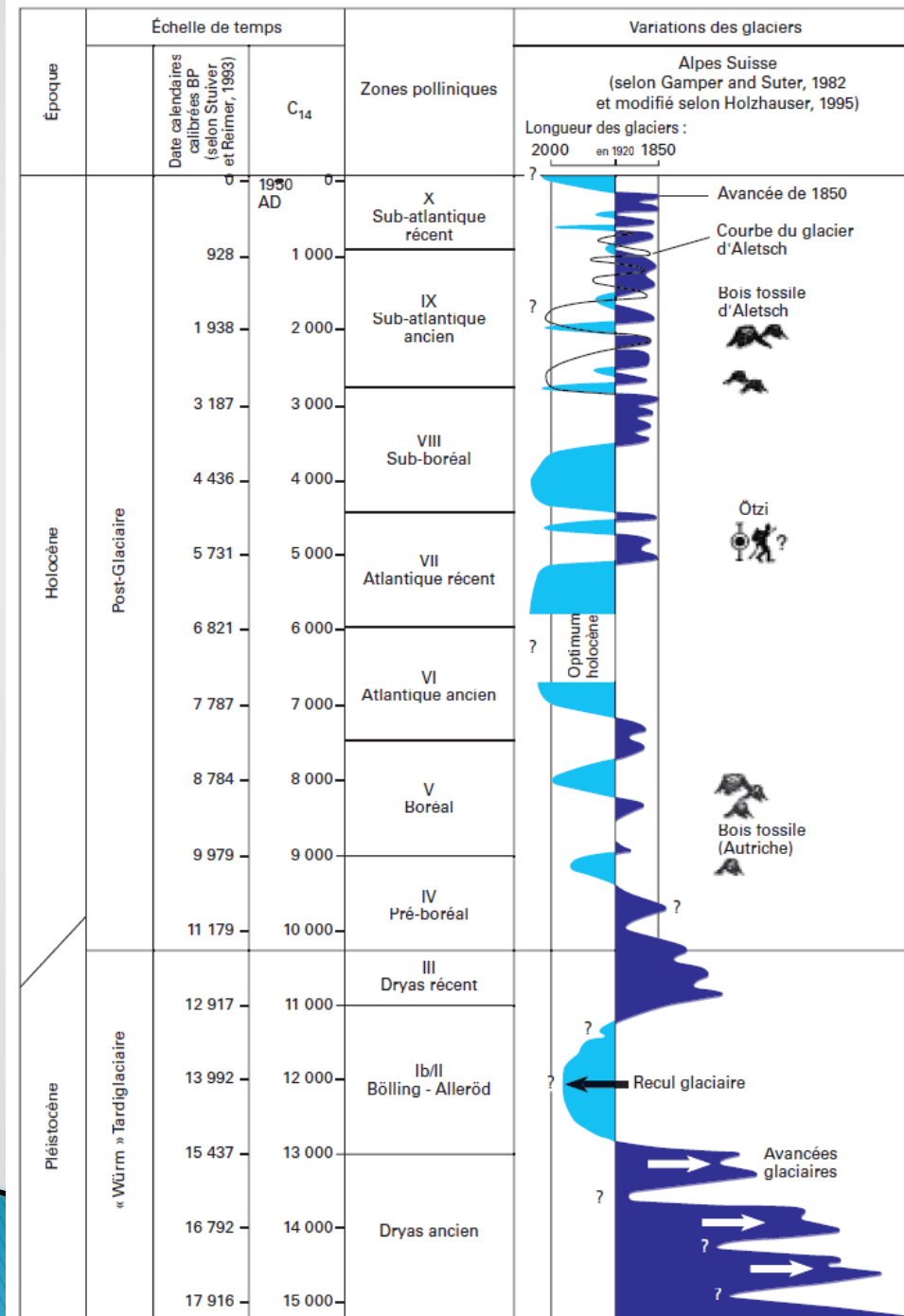
Pour en savoir plus....



Francou, B., & Vincent, C., 2007



Francou, B., & Vincent, C., 2015



Fluctuations glaciaires depuis 20 millénaires dans les Alpes suisses

(d'après Maisch et al., 1999)