

Journée scientifique du PNE, 22 novembre 2018

# Le Glacier Blanc

Évolution entre 1904 et aujourd'hui



M. Bonnefoy-Demongeot, E. Thibert, *ETNA-Irstea, Grenoble*



# Le Glacier Blanc

Évolution entre 1904 et aujourd'hui

M. Bonnefoy-Demongeot, E. Thibert, *ETNA-Irstea, Grenoble*



1965, R. Vivian



2017

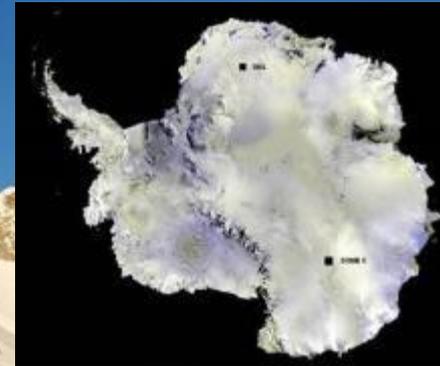
# La glace à la surface de la terre

Glace = 75 % de l'eau douce  
 = 2% de l'eau totale

Quel volume ?



*Inlandsis*  
 68 m niveau des océans



*Antarctique 61 m*

*Groenland 7 m*

*Calottes*

+

*Glaciers*

*40 cm*



*Alpes = 1 cm*

*dilatation océanique = 15 cm*  
*(depuis 1 siècle)*

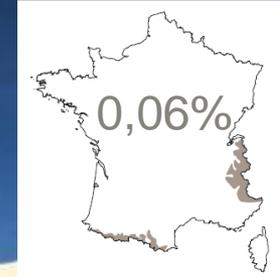
# Pourquoi les glaciers ?

Les glaciers...

des habitats

*Habitats de type rocheux (minéral ± glace pure)*

*-30 à 40 % de surface depuis 1850*



# Pourquoi les glaciers ?

Les glaciers... des espaces pour la végétation pionnière

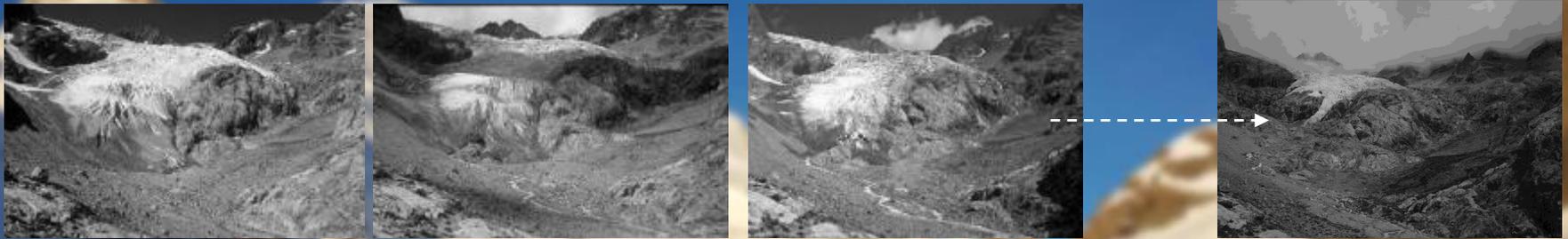
## *Dynamique des marges glaciaires*

2001

2002

2003

2017



## *Végétation*



*Projet CClimateTT*

# Pourquoi les glaciers ?

Les glaciers...

des risques

*Risques liés à l'eau et à la glace*

Lac sur glacier



*...Laves torrentielles*

Chute de Séracs



*...Avalanches de glace*

# Pourquoi les glaciers ?

Les glaciers... une ressource en eau

## *Alimentation des barrages*



Suisse : 60 % d'électricité hydraulique  
dont 20 % neige et glaciers

Norvège : 95 % d'électricité hydraulique

France : 10% d'électricité hydraulique



# Pourquoi les glaciers ?

Les glaciers... une ressource en eau

*Ressource en eau*

*... en haute montagne  
pas vraiment en vallée!*

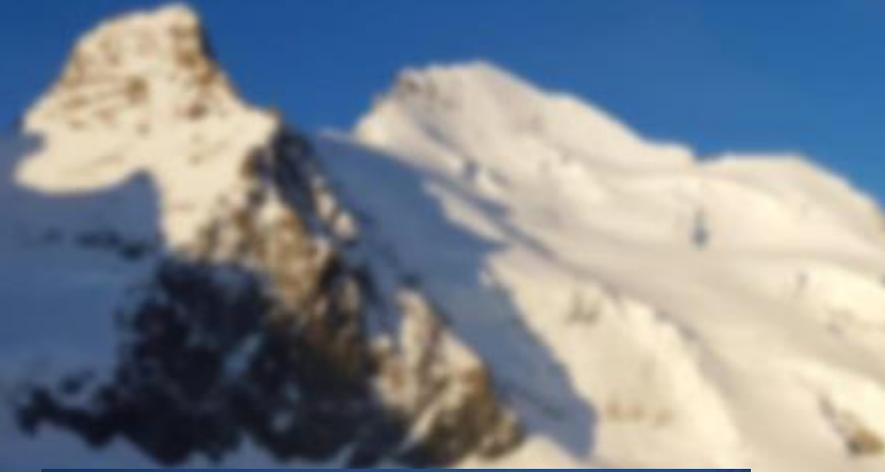
	<i>moy. période ~1950-2000</i>		
	<i>proportion en surface</i>	<i>régime glaciaire août-septembre</i>	<i>% annuel</i>
- <i>Romanche</i> <i>Glaciers : 61 km<sup>2</sup></i>	6,1 %	14 %	3%
- <i>Drac</i> <i>Glaciers : 5,2 km<sup>2</sup></i>	0,53 %	4%	0,3%
- <i>Durance</i> <i>Glaciers : 29 km<sup>2</sup></i>	0,8 %	3%	0,3%

# Pourquoi les glaciers ?

Les glaciers...

une valeur socioéconomique

*Ski d'été sur glacier*



Sarennes, Alpe d'Huez



Tignes



Les Deux Alpes

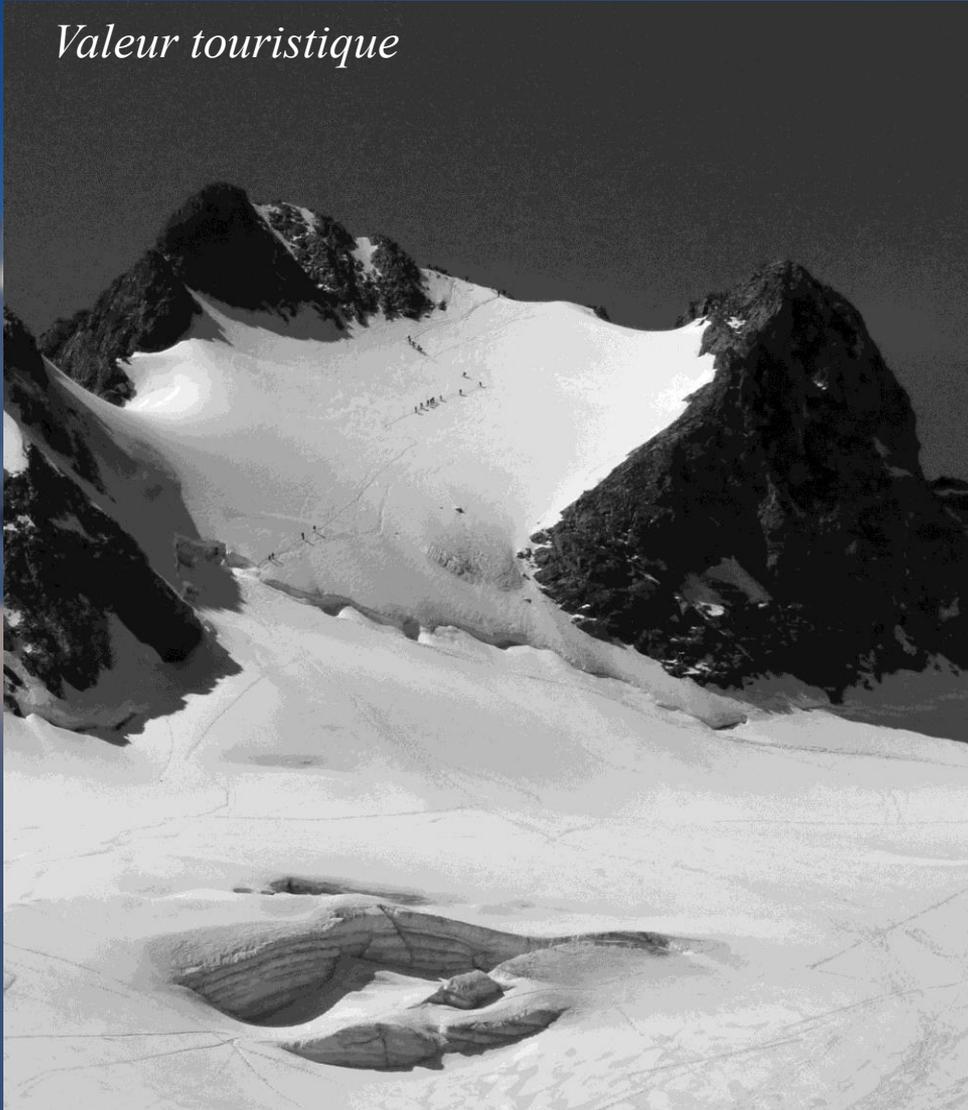


# Pourquoi les glaciers ?

Les glaciers...

une valeur socioéconomique

*Valeur touristique*



*et paysagère*

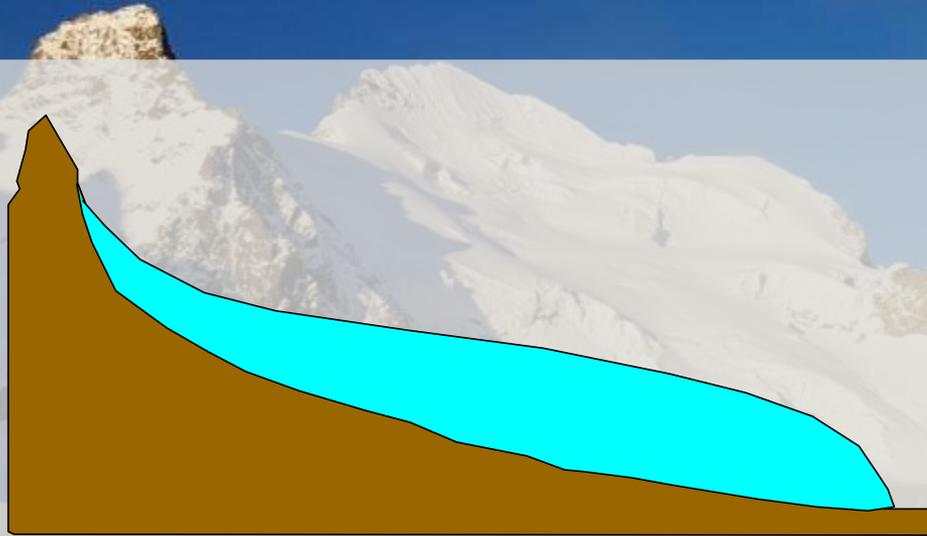


# Pourquoi les glaciers ?

Les glaciers... indicateurs du climat

*Glacier = Stock d'eau solide*

*d'après E. Le Meur, 2005*



*Neige de l'hiver*



*Réservoir d'eau (solide)*

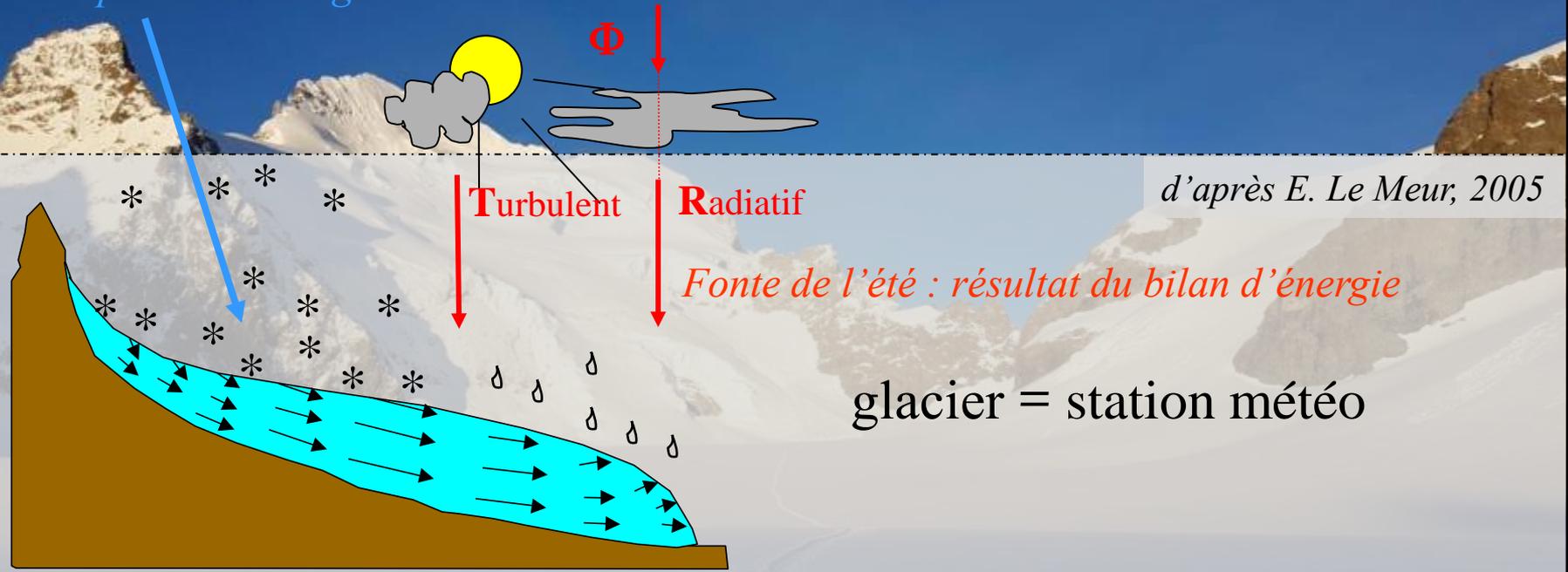


*Fonte d'été*

# Pourquoi les glaciers ?

Les glaciers... indicateurs du climat

*Précipitations : neige de l'hiver*



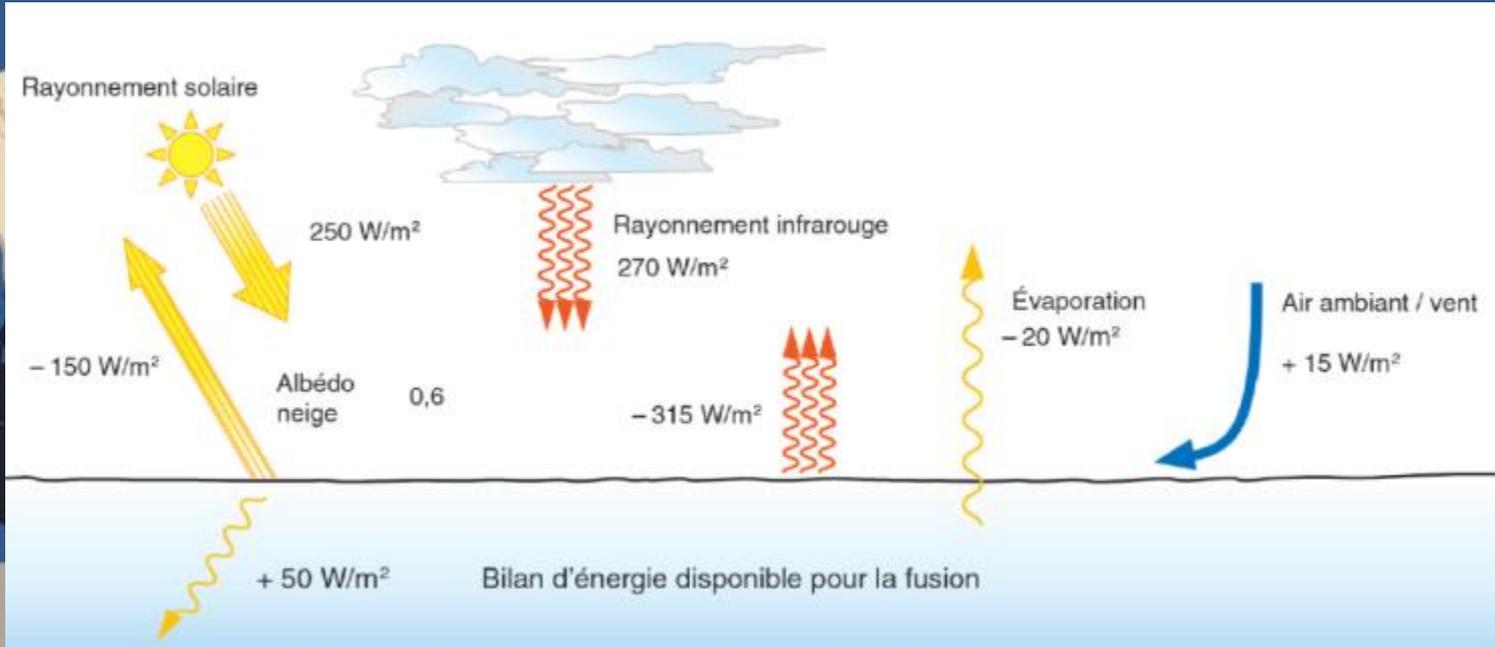
*d'après E. Le Meur, 2005*

*Variations de masse du glacier :*

*Neige de l'hiver – fonte de l'été = info climatique*

# Pourquoi les glaciers ?

*Quels flux d'énergie à l'origine de la fonte ?*



*Les sources d'énergie à la surface du glacier*

*Infra rouge (chaleur rayonnée par la basse atmosphère, les gaz à effet de serre) : 70%*

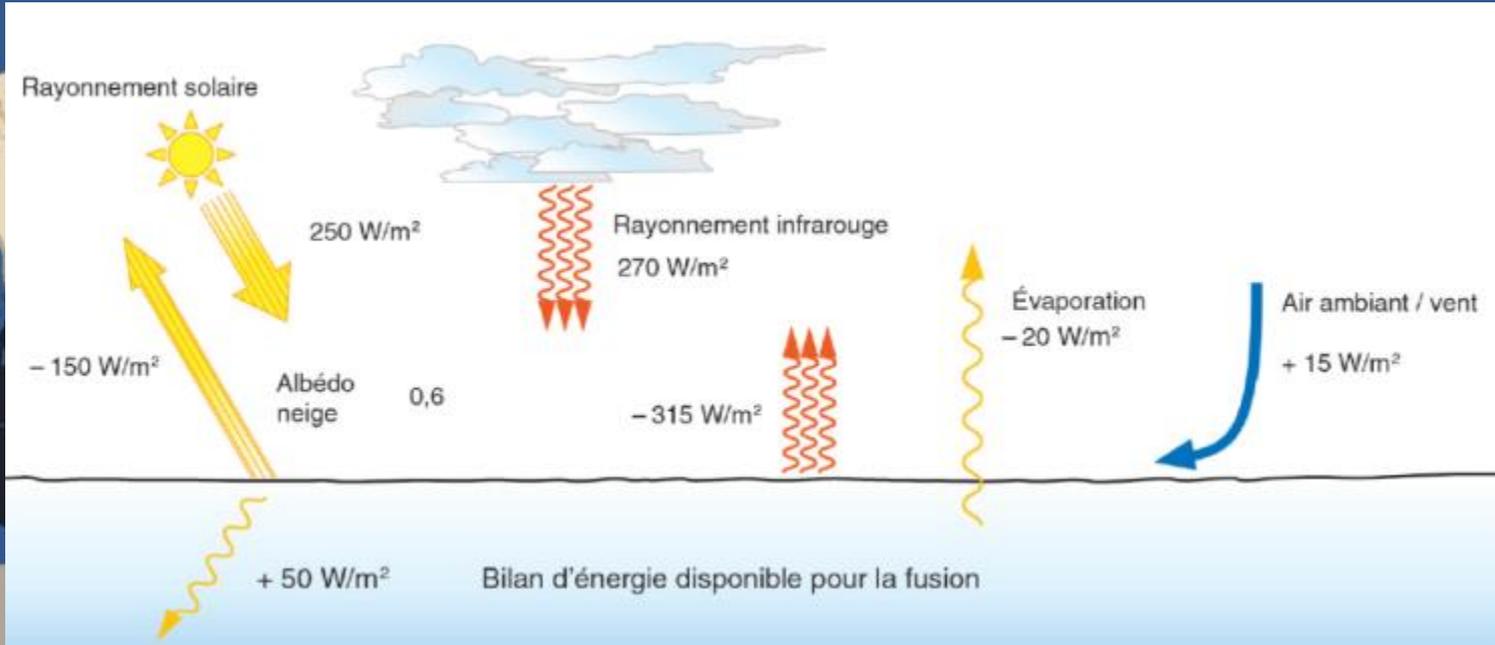
*Solaire : 25%*

*La chaleur de l'air : 5%*

*Le flux géothermique (sous-glaciaire) : 0,03% = 1 cm par an*

# Pourquoi les glaciers ?

*Quels flux d'énergie limitent la fonte ?*



*Les pertes d'énergie à la surface du glacier*

*Infra rouge (chaleur rayonnée par le glacier): 93% du cause du regel nocturne même si  $T^{\circ} > 0$*

*Evaporation de la glace: 7%*

# Mesure du bilan d'hiver

Le bilan d'hiver = cumul de neige de l'hiver

Cumul des précipitations de octobre à mai :

- avril-mai : carottages, mesure de densité,
- équivalent en eau de la neige  
=> bilan d'hiver = pluviomètre



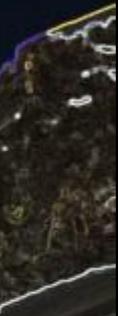
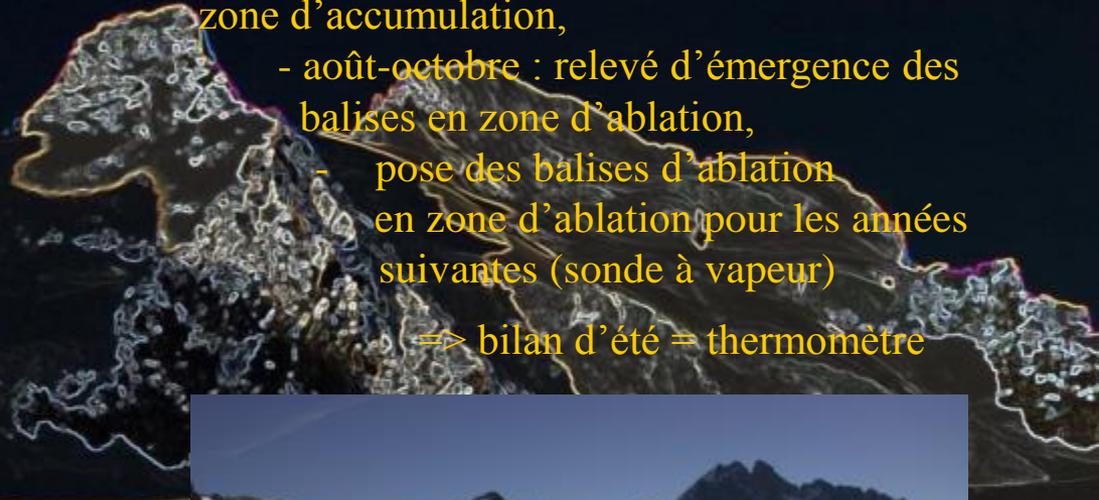
Mise en place des balises d'ablation en zone d'accumulation

# Mesure du bilan d'été

Le bilan d'été = fonte de l'été

Fonte du névé et de la glace :

- juin-octobre : relevé d'émergence des balises en zone d'accumulation,
  - août-octobre : relevé d'émergence des balises en zone d'ablation,
  - pose des balises d'ablation en zone d'ablation pour les années suivantes (sonde à vapeur)
- ⇒ bilan d'été = thermomètre



# Mesure du bilan de masse

Le bilan annuel = accumulation - ablation

Méthode glaciologique :

Pour une année donnée : bilan à chaque balise => bilan moyen pour le glacier  
=> bilan glacier cumulé sur plusieurs saisons

Méthode volumétrique (géodésique, cartographique) :

Variation volume du glacier issue de variation altitude de sa surface (carte topo, MNT)  
=> utilisé comme contrôle ou correctif du bilan de masse glaciologique

Méthodes standardisées :

Combinaison des 2 méthodes glaciologique et volumétrique

- Glacioclim : depuis 2002

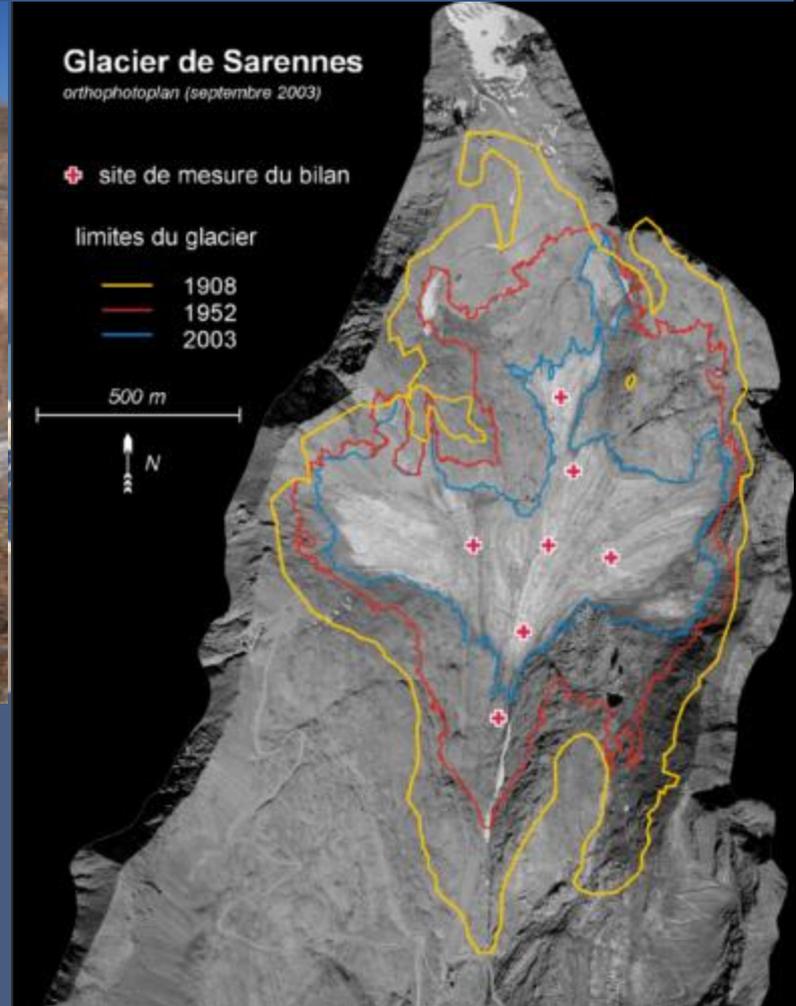
France : Argentière, Mer de glace, Gébroulaz, Saint Sorlin, Sarennes, Glacier Blanc  
=> a inspiré WGMS

- WGMS : recueil de bilans annuels / base de données internationale (depuis années 1980) (~450 glaciers, plus anciennes mesures années 1950-60, Sarennes 1949 / Storeglaciaren, Suède 1946)  
=> Évolution à l'échelle des continents / échelle globale de la planète  
=> Sauf calottes Groënland/Antarctique

# Une histoire climatique commune avec le glacier de Sarennes

*Comparaison des mesures du Glacier Blanc à celle du glacier de Sarennes (depuis 1949)*

Glacier de Sarennes en 2011

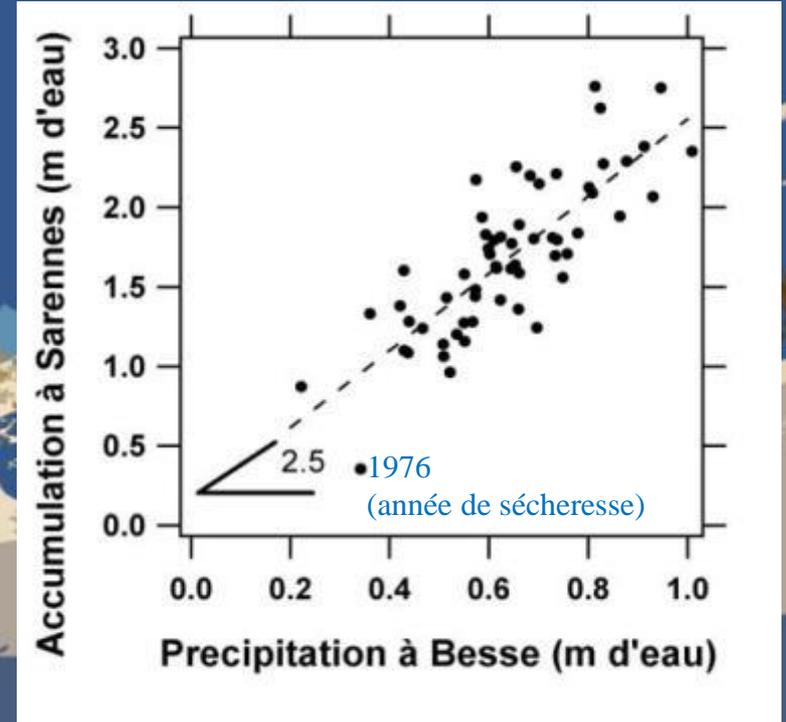


Massif des Grandes Rousses

À 28 km au Nord-Ouest du Glacier Blanc

	1908	1952	2003	2009	2011	2014
Surface:	124 ha	85 ha	41 ha	12 ha	10	9

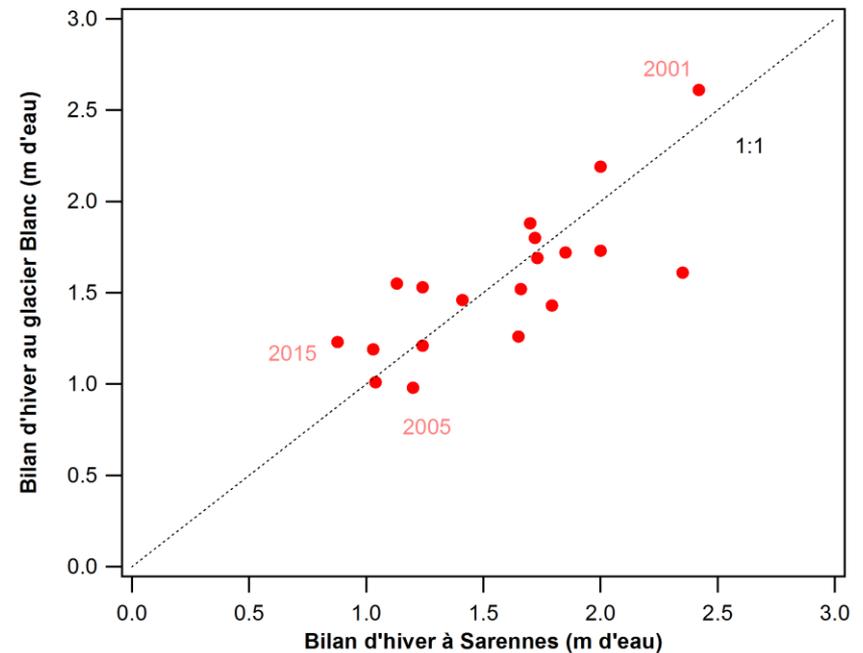
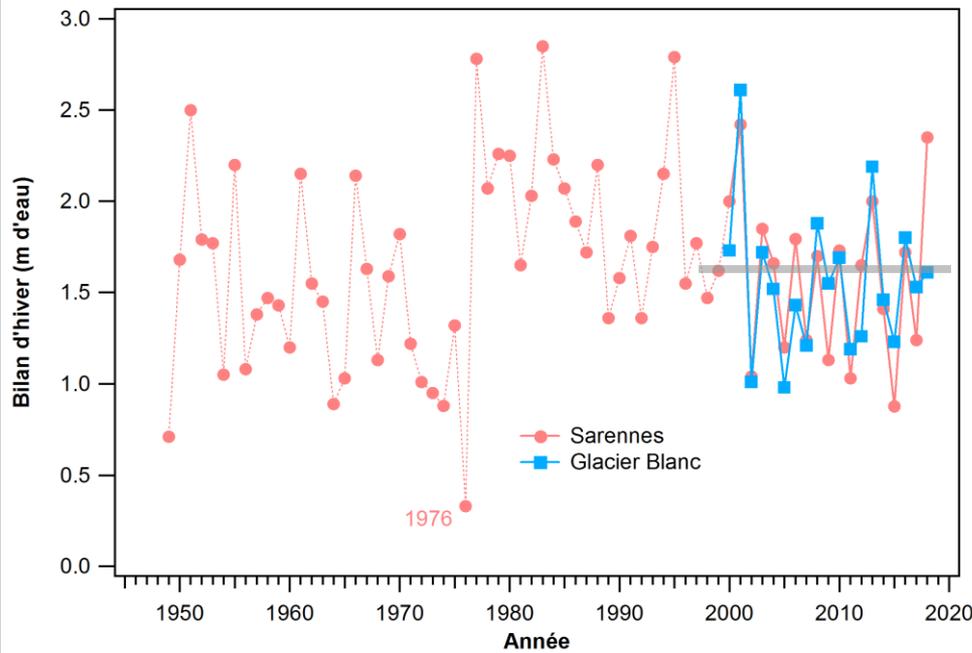
## *Les précipitations de l'hiver (d'octobre à mai)*



*- 2 à 3 fois plus que les précipitations de vallée*

- *4 à 6 fois le gradient altitudinal moyen (précipitations atmosphériques)  
= +20% par 1000 m de dénivelé*
- *transport de neige par le vent*
- *avalanches*
- *autres processus ? (axes de recherche pour l'amélioration des connaissances)*

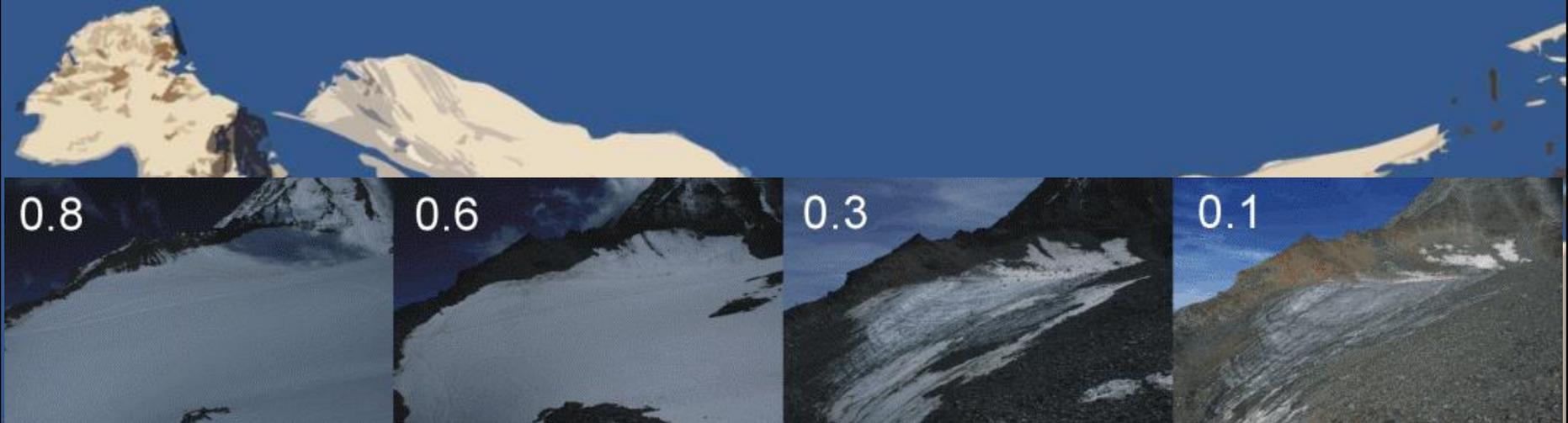
## Les précipitations de l'hiver (d'octobre à mai)



- régime d'accumulation très similaire pour ces 2 glaciers (distant de 28 km)
- en moyenne 1,6 m d'eau
- même variabilité interannuelle +/- 0,4 m d'eau
- 60 % de variabilité commune

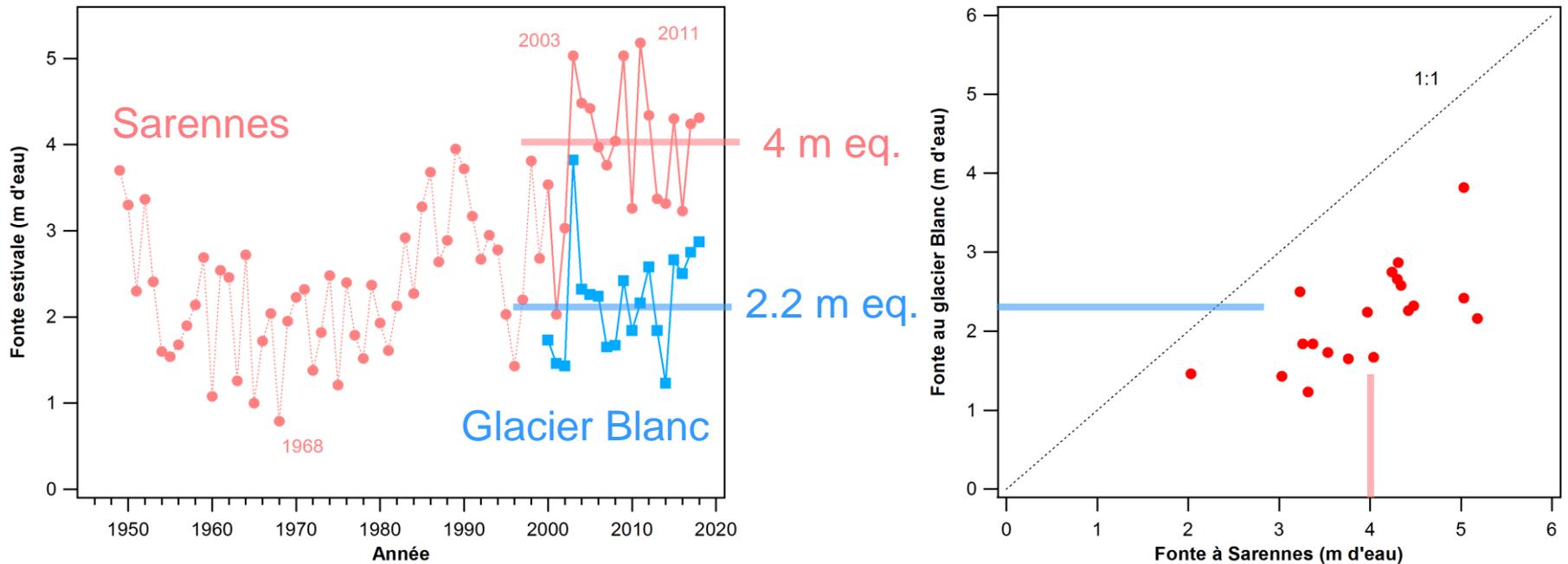
# Une histoire climatique commune avec le glacier de Sarennes

## *La fonte estivale (de mai à octobre)*



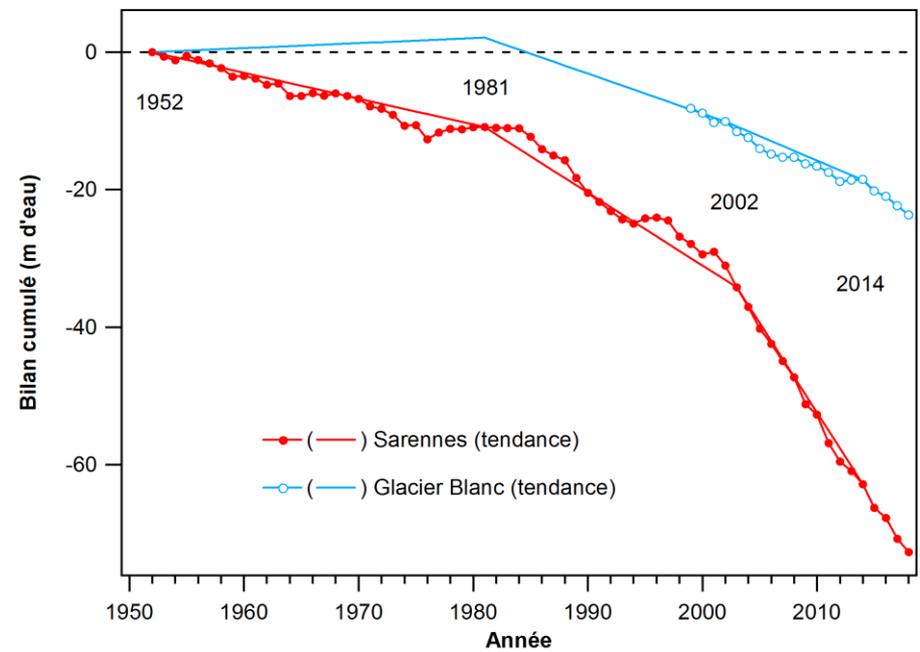
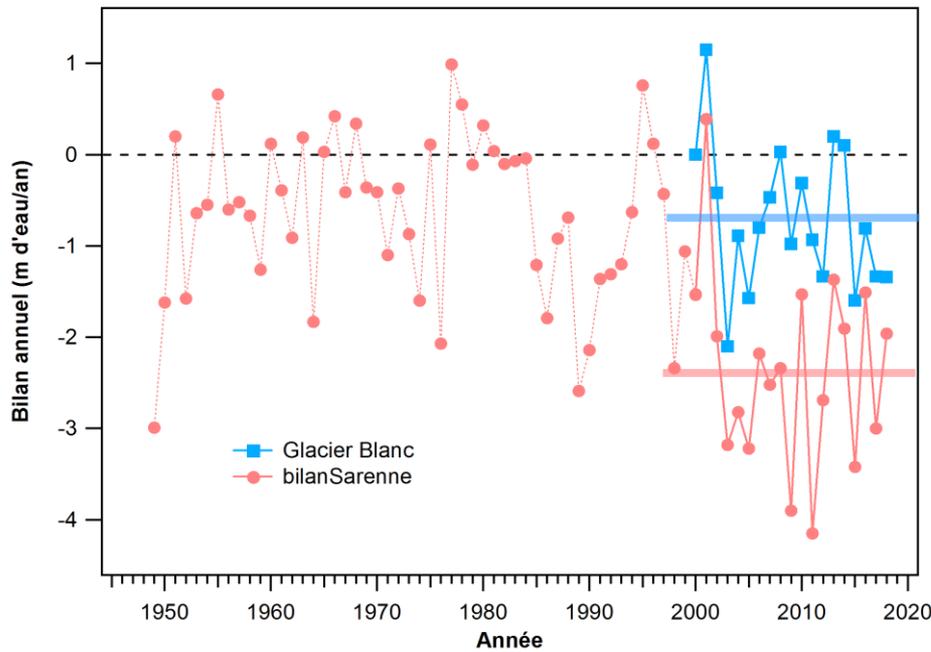
- *forte dépendance à l'altitude :  
de 0 fonte à une altitude > 4000 m à - 10 m de glace à 1700 m d'altitude  
(ex : Mer de glace)*
- *forte dépendance à l'albédo (couverture détritique)*
- *forte dépendance à la pente et à l'exposition*

## La fonte estivale (de mai à octobre)



- fonte quasi 2 x plus forte au glacier de Sarennes (effet de l'altitude et de l'exposition)
- moins de variabilité interannuelle au Glacier Blanc (effet de la taille du glacier – donc du nombre et de la variété des balises, et de l'altitude – donc de la durée d'ablation en neige/glace)
- 50 % de variabilité commune

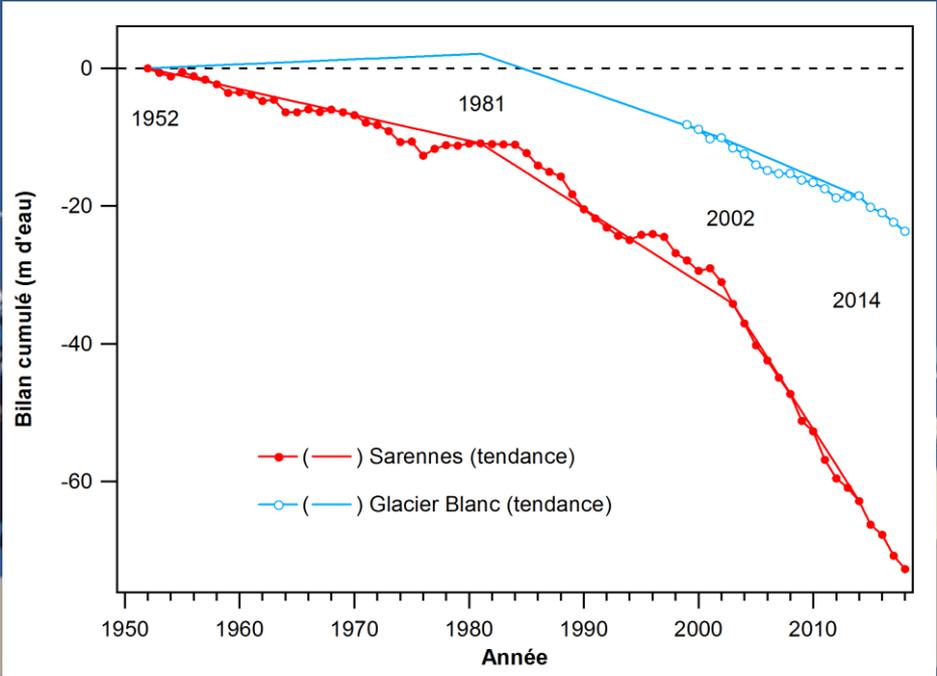
*Bilan annuel = accumulation - fonte*



- *Bilans déficitaires pour les 2 glaciers*
- *en moyenne, glacier de Sarennes plus déficitaire de 1,6 m d'eau*
- *40 % de variabilité commune*
- *Ruptures en 1981, 2002 dans les pertes de masse cumulées*

# Une histoire climatique commune avec le glacier de Sarennes

70 ans de mesure de bilan de masse à Sarennes (Alpe d'Huez)

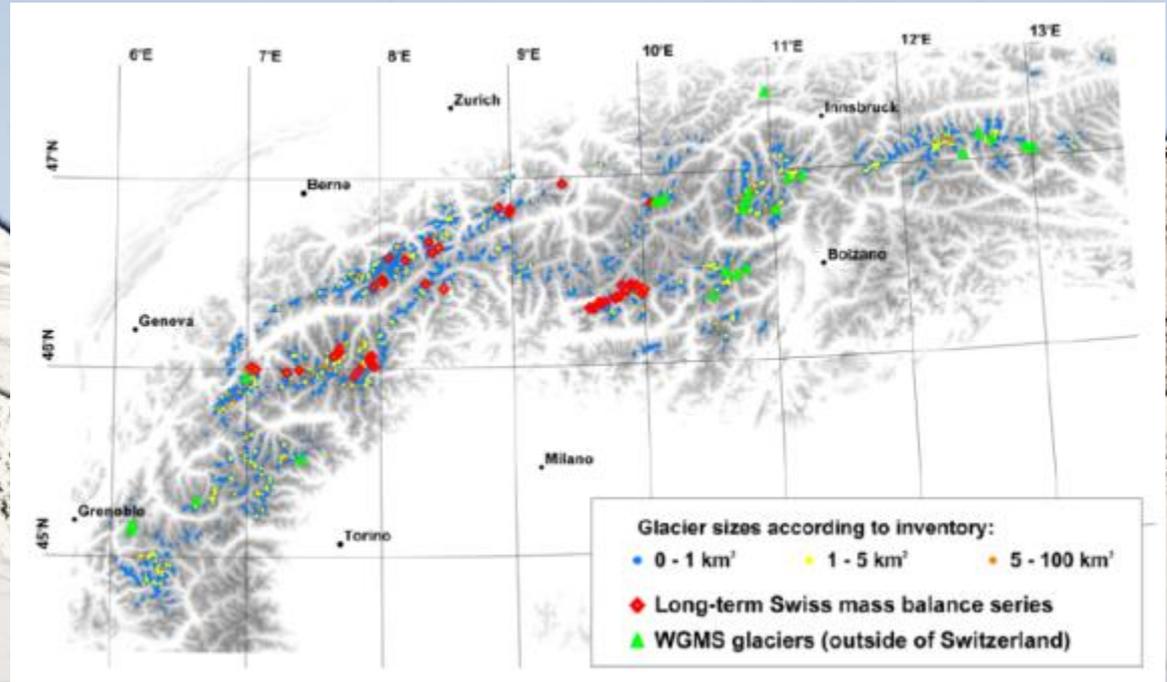


## Les causes de l'évolution du bilan annuel :

- le bilan d'hiver a peu changé à haute altitude (~ période + enneigée 1977 – 1988)
- allongement de la période de fonte de 1 mois (plus précoce et plus tardive de 15 jours)
- intensification de la fonte au cœur de l'été (flux de chaleur turbulents)

tendances et ruptures = climat non stationnaire!! ➡ observer sur le long terme

## Les glaciers des Alpes (année de référence : 2003)



Surf. : 2056 km<sup>2</sup>  
 Vol. : 100-130 km<sup>3</sup>  
 ~ 1 cm eq. sea level rise  
 Épaisseur moy. 55 m

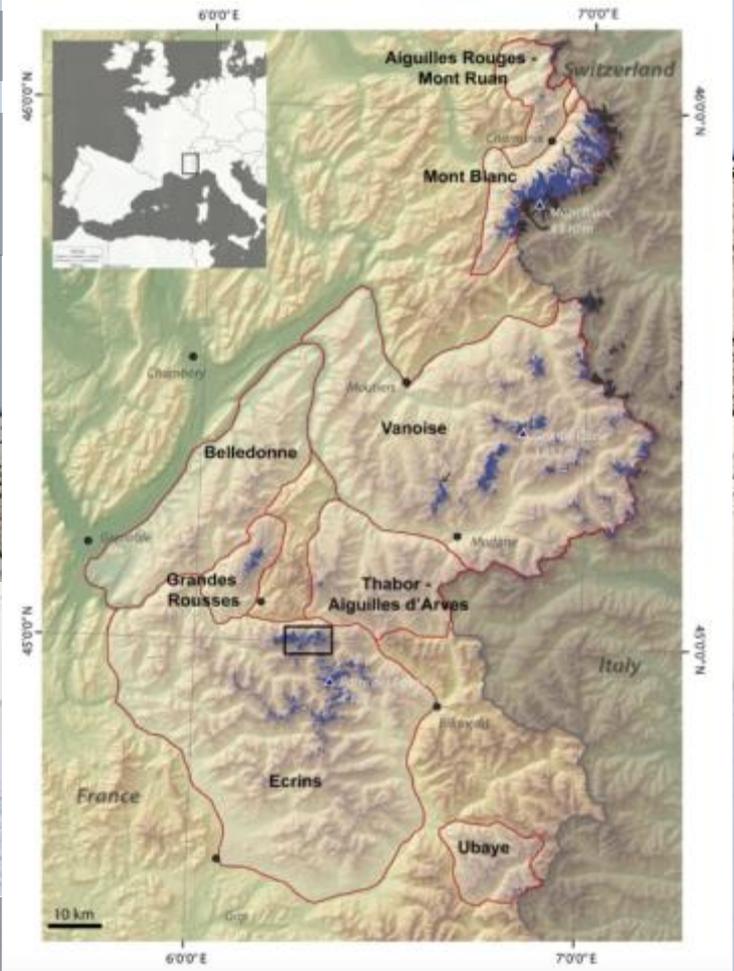
Suisse : 50%  
 Autriche: 19%  
 Italie : 18%  
 France: 13%

*WGMS (UNEP – ONU)  
 Paul et al., Ann. Glaciol., 2011  
 Huss, The Cryosphere, 2012*

## Les glaciers des Alpes en France

548 glaciers dans les Alpes (F)

	2006-2009	2015
Alpes françaises :	275 km <sup>2</sup>	228 km <sup>2</sup>
Mont Blanc :	120 km <sup>2</sup>	92 km <sup>2</sup>
Vanoise :	79 km <sup>2</sup>	70 km <sup>2</sup>
Ecrins :	68 km <sup>2</sup>	59 km <sup>2</sup>
Belledonne	} 8 km <sup>2</sup>	} 7 km <sup>2</sup>
Grandes Rousses		
Ubaye		
Thabor Aiguilles d'Arve		

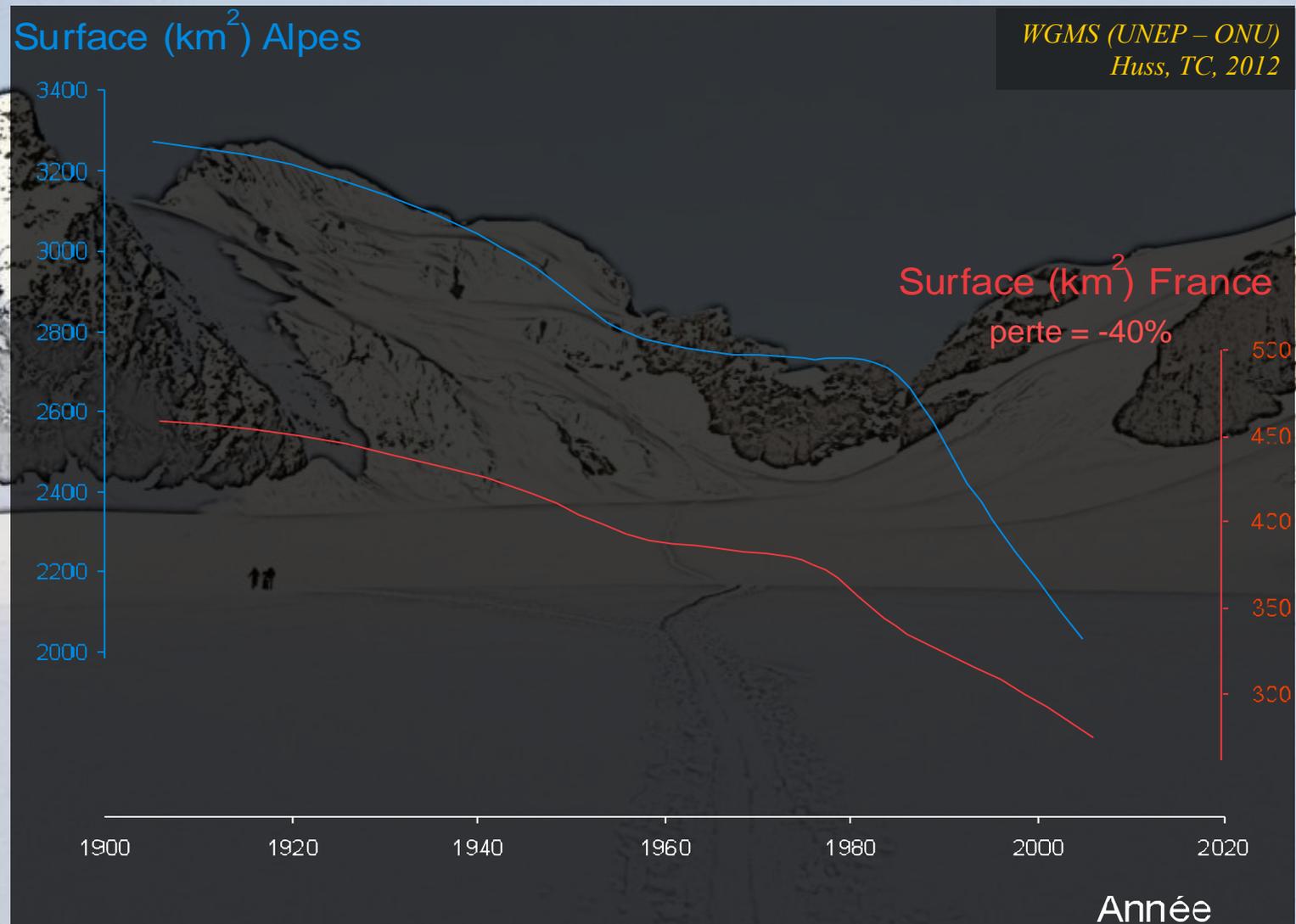


## Les glaciers des Pyrénées

Pyrénées françaises :	1,6 km <sup>2</sup>	1,1 km <sup>2</sup>
-----------------------	---------------------	---------------------

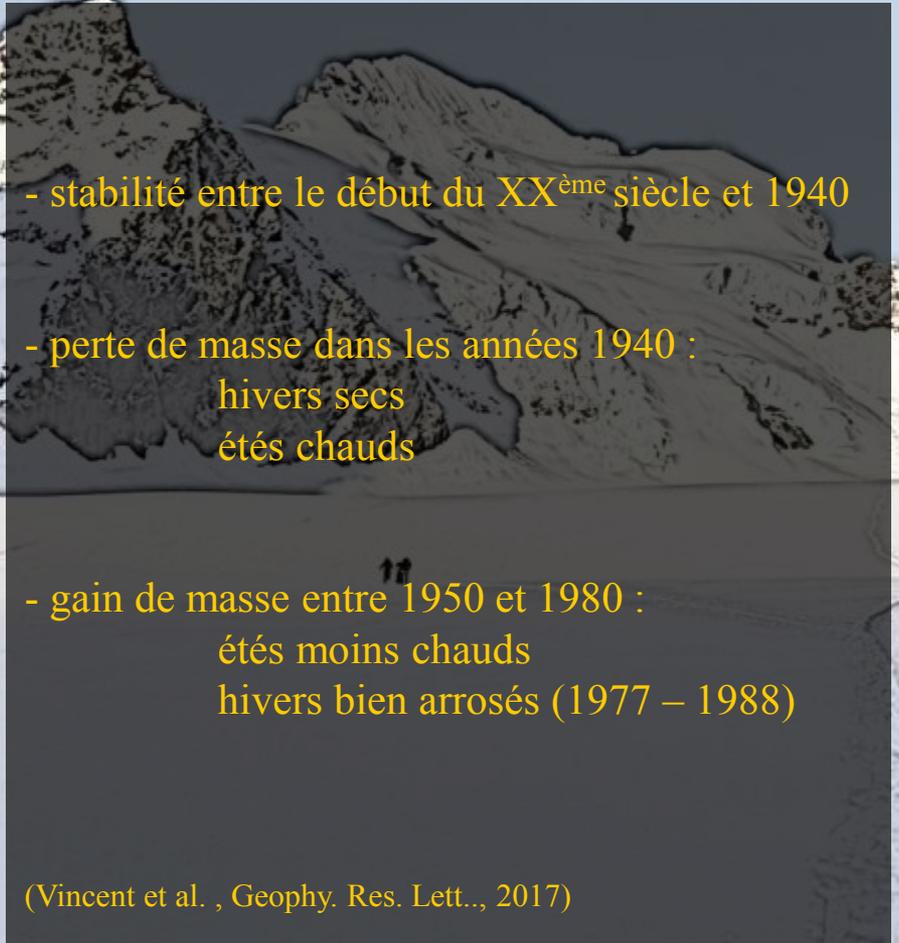
*Gardent et al., Global and Planetary Changes, 2014*  
*Rabatel et al., in press, 2018*  
*P. René, Association Moraine*

## Evolution des surfaces des glaciers des Alpes au XX<sup>ème</sup> siècle

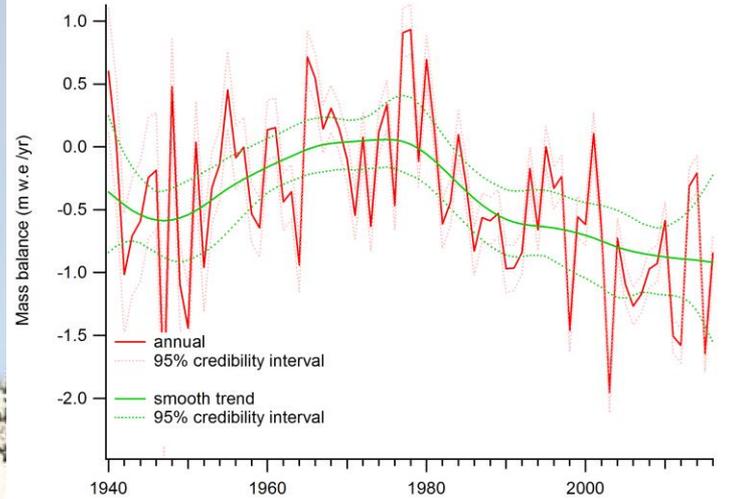


## Signal climatique commun du Dauphiné à l'Autriche

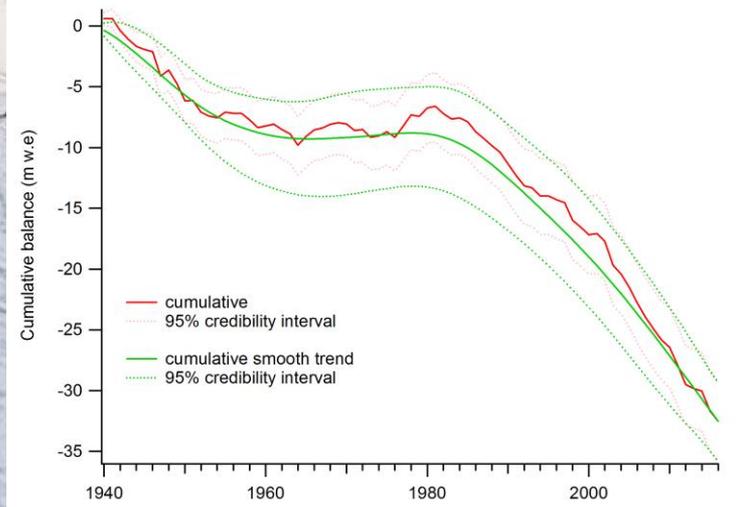
Perte de masse des glaciers des Alpes depuis les années 50



(Vincent et al. , Geophys. Res. Lett., 2017)



Cluster n°11: Central Europe  
59 glaciers

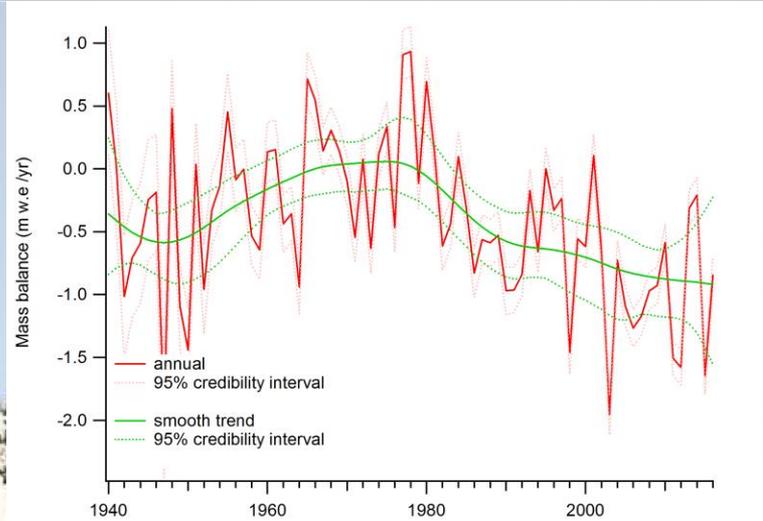


## Signal climatique commun du Dauphiné à l'Autriche

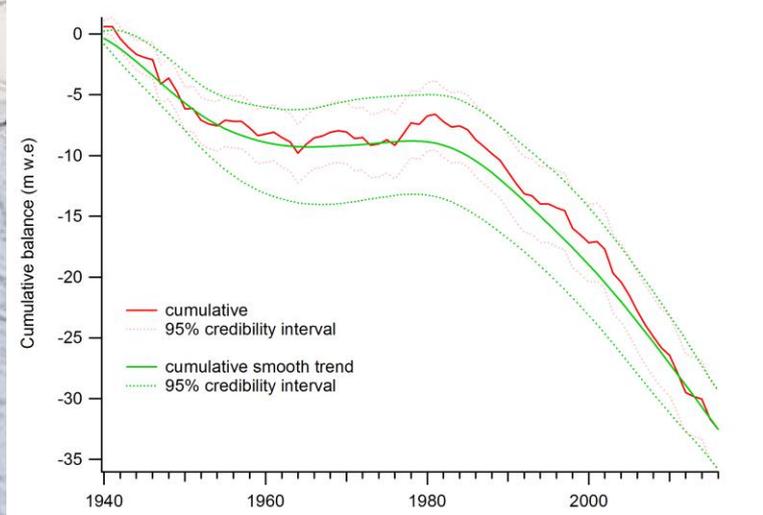
Perte de masse des glaciers des Alpes depuis les années 50

- depuis 1982, 2002, bilans de masse déficitaires fonte estivale plus intense période de fonte plus longue
- différences selon les sites taille du glacier altitude du glacier couverture détritique
- signal climatique commun

(Vincent et al. , Geophy. Res. Lett., 2017)



Cluster n°11: Central Europe  
59 glaciers

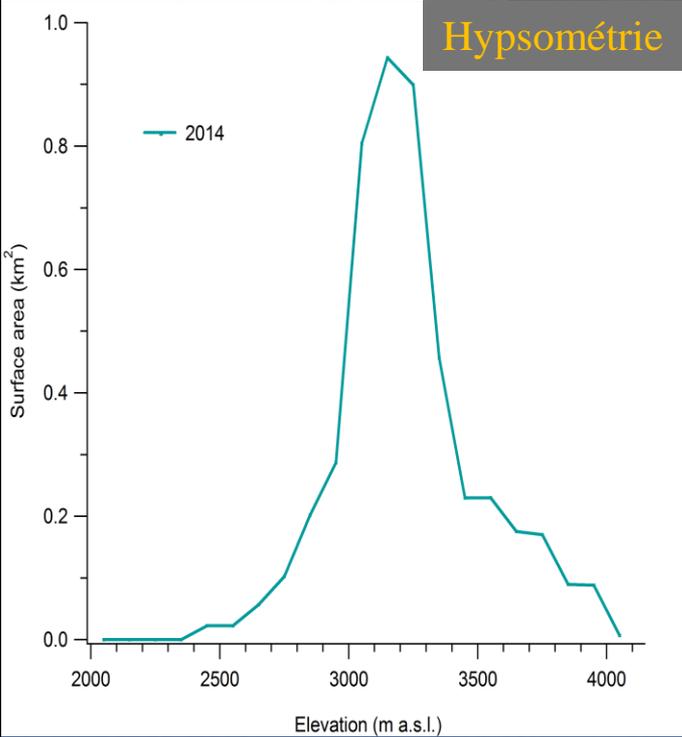


# Le Glacier Blanc aujourd'hui

Quelques chiffres (année de référence : 2014)

Surface : 4 789 000 m<sup>2</sup> ~ 479 ha

Altitude max : 4015 m et altitude min : 2460 m



## Quelques photos



## Quelques photos

Verrou



Quelques photos

Bassin d'accumulation



Quelques photos

Face Nord-Est



Séracs

# Évolution du Glacier Blanc depuis 1904

## Documents sources de données

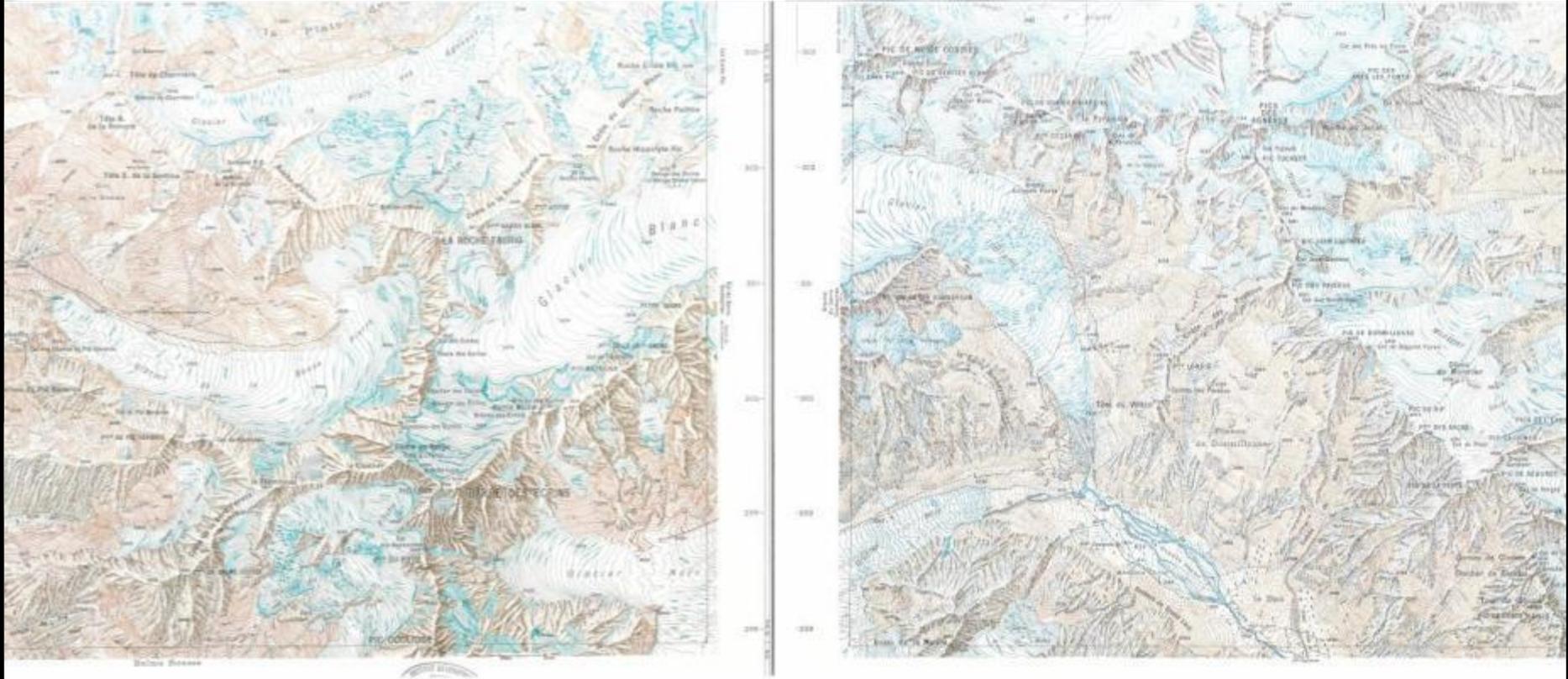
Les cartes historiques => géoréférencement de la carte, saisie des courbes de niveau, reconstitution du modèle numérique de terrain



Universitaire géographes / Faculté des Sciences de Grenoble (Flusin et Jacob; Lafay), 1904

## Documents sources de données

Les cartes historiques => géoréférencement de la carte, saisie des courbes de niveau, reconstitution du modèle numérique de terrain

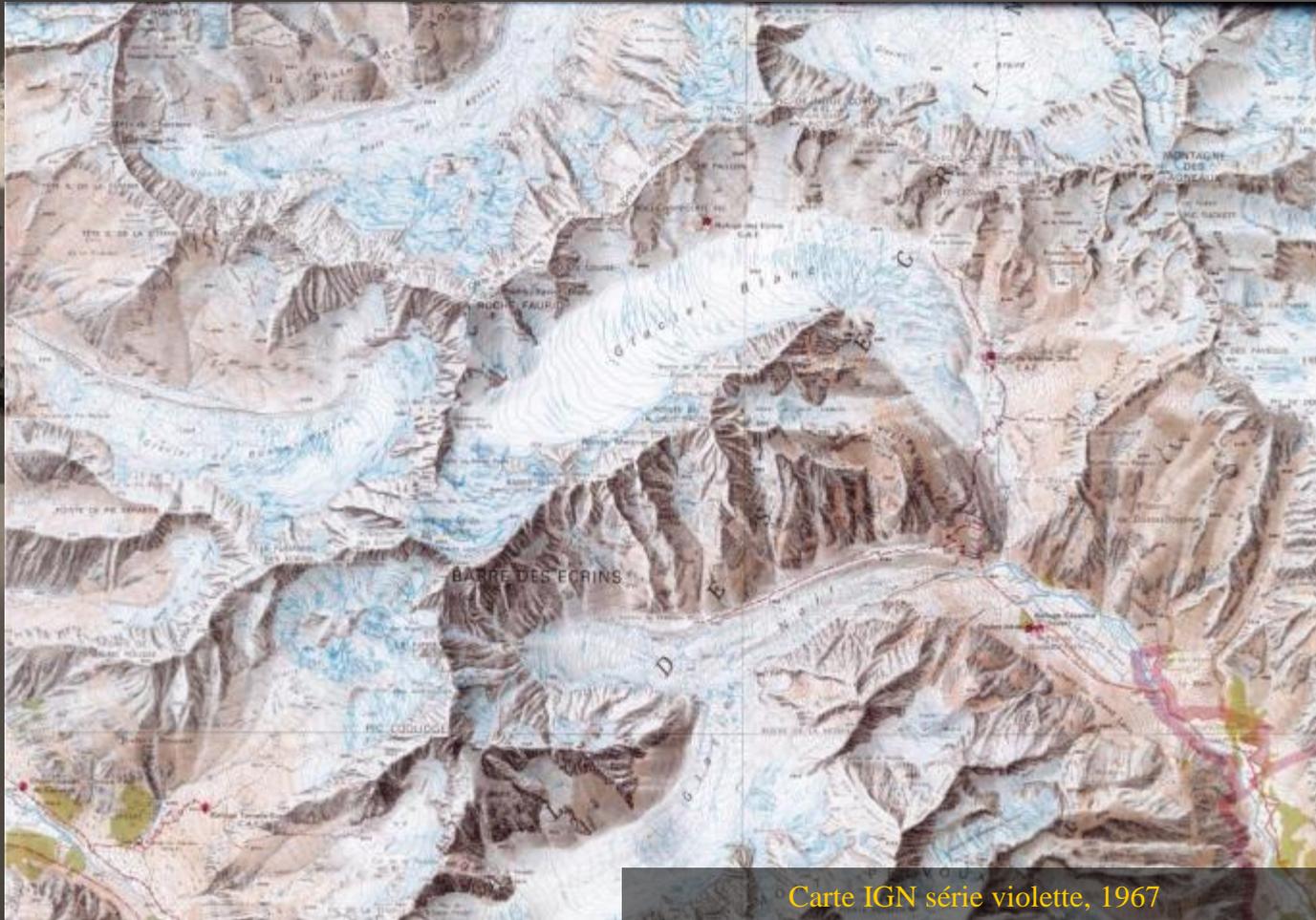


Service Géographique des Armées, 1925-29

# Évolution du Glacier Blanc depuis 1904

Documents sources de données

Les cartes historiques => géoréférencement de la carte, saisie des courbes de niveau, reconstitution du modèle numérique de terrain

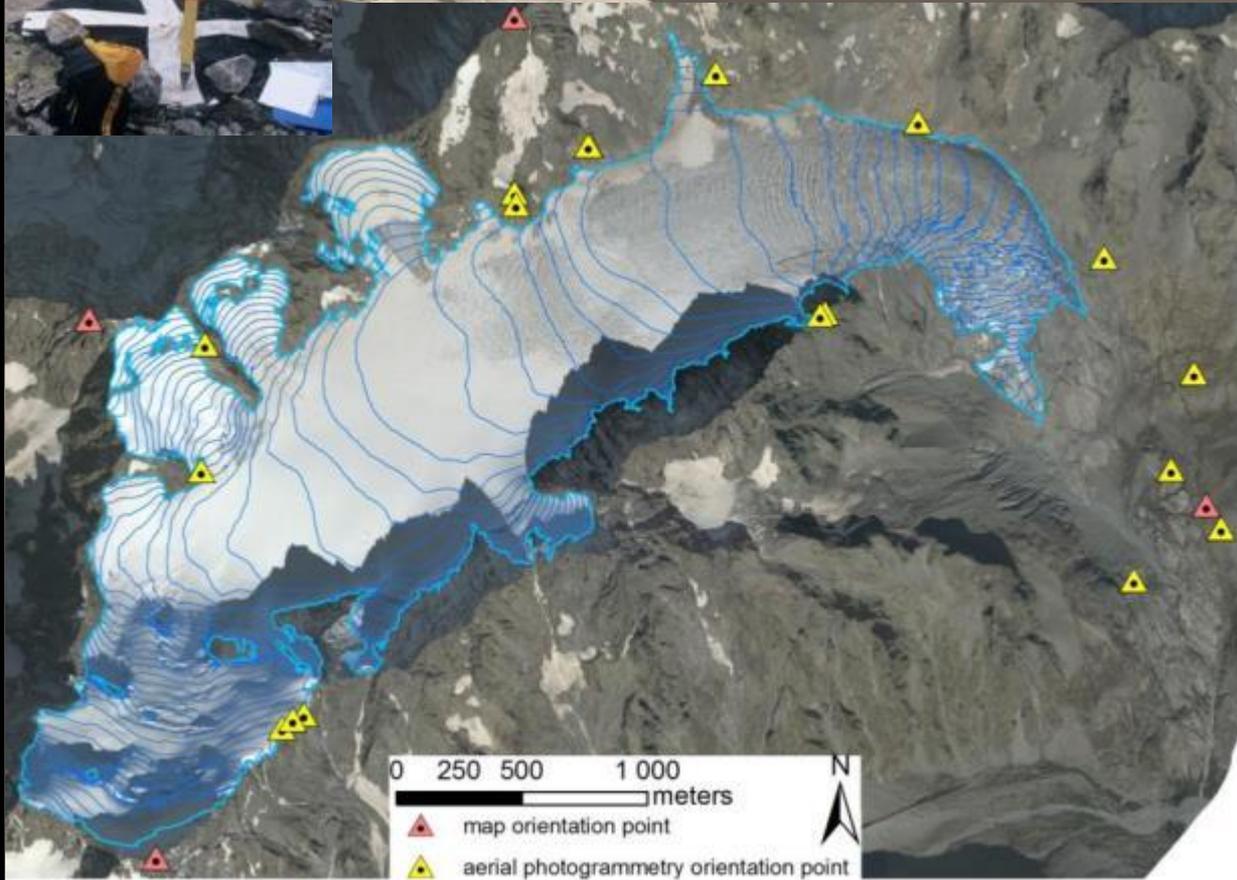


Carte IGN série violette, 1967

## Documents sources de données

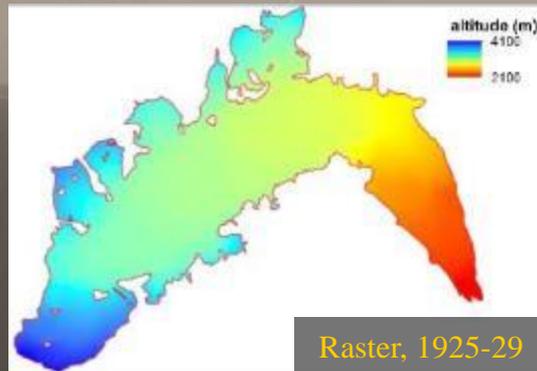
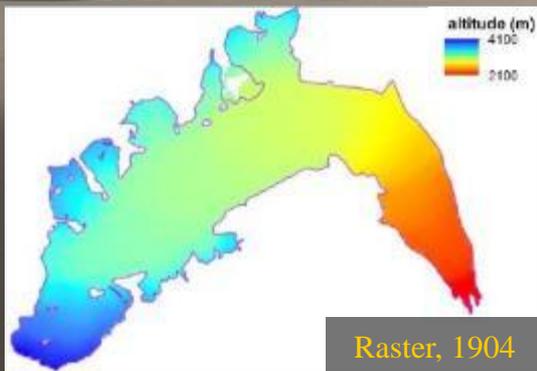
Géo-référencement des cartes et images sur points de contrôles

- Mesurés au GPS différentiel/théodolite sur le terrain
- Visibles sur les cartes et images aériennes (croix de peinture, bâches)



## Documents sources de données

Les modèles numériques de terrain  
issus des cartes historiques (saisie des courbes de niveau)



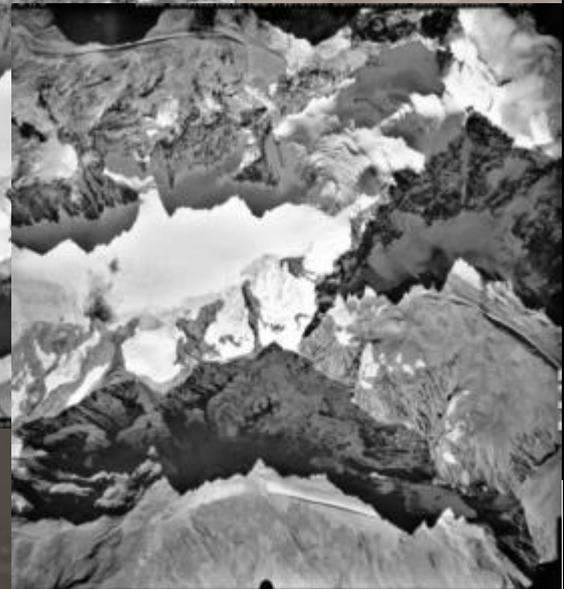
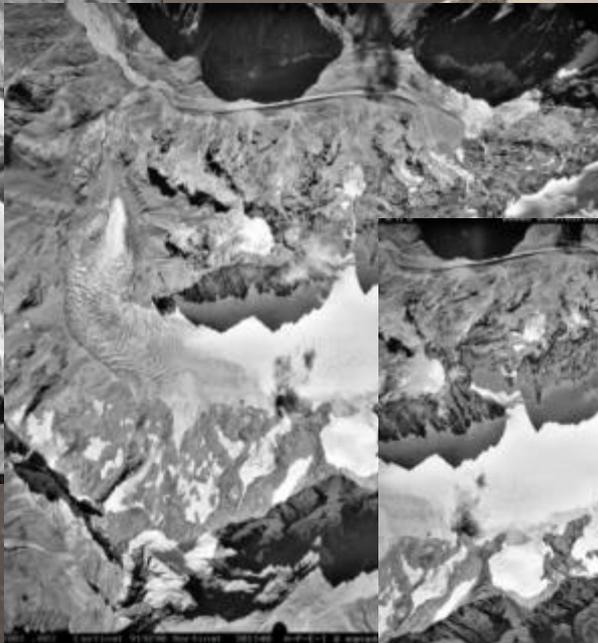
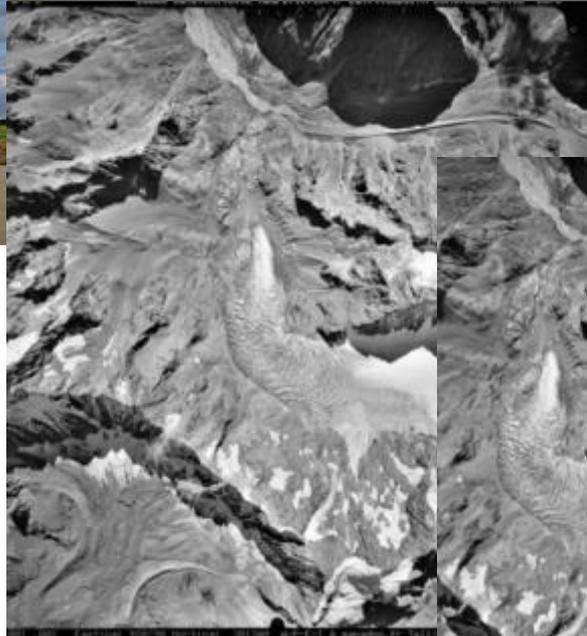
Rasters (grilles de pixels) d'altitude (1 pixel = 1 valeur d'altitude)

## Documents sources de données

Images aériennes APEI septembre 2014 (Sintegra, vol programmé)



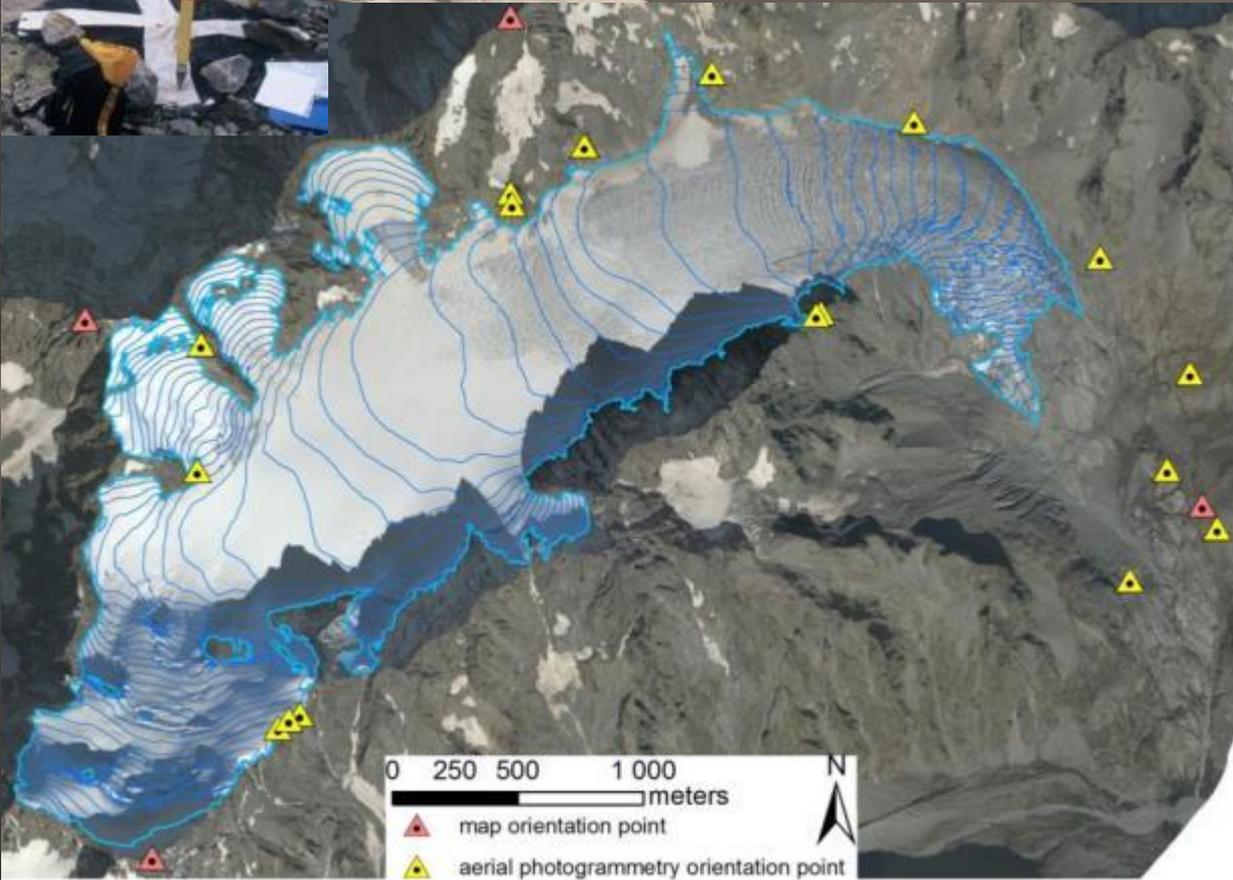
hauteur sol : 6200 m  
taille du pixel au sol :  
10 cm



## Documents sources de données

Géo-référencement des cartes et images sur points de contrôles

- Mesurés au GPS différentiel/théodolite sur le terrain
- Visibles sur les cartes et images aériennes (repères naturels ou artificiels – bâtiments, croix de peinture, bâches)

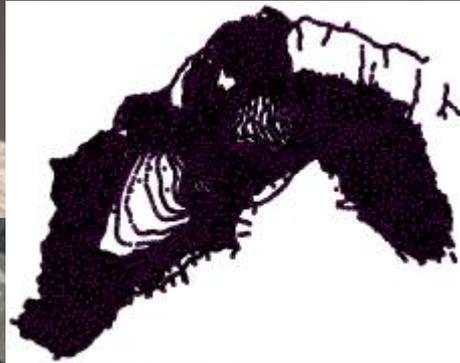


## Documents sources de données

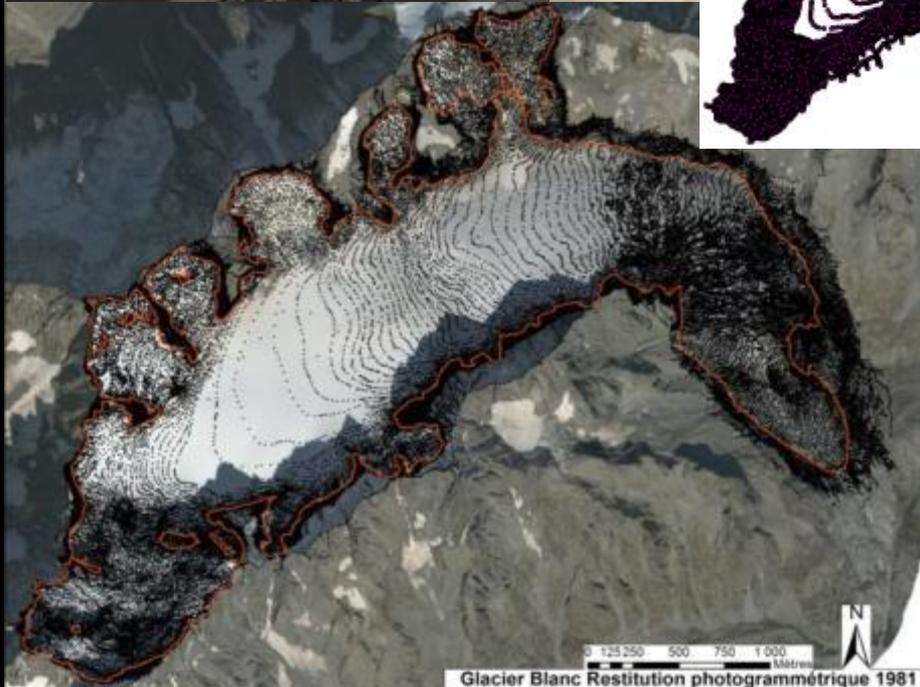
Les modèles numériques de terrain  
dérivés des photographies (restitution photogrammétrique)



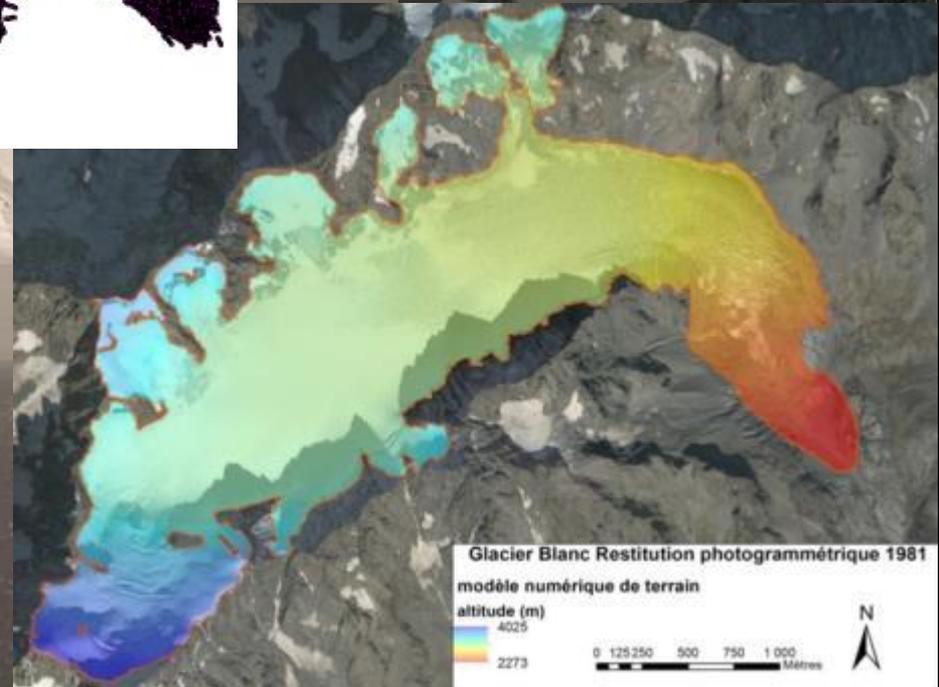
Nuage de points issus de la restitution photogrammétrique de 1981



Raster (grille de pixels) d'altitude (1 pixel = 1 valeur d'altitude) de 1981



Glacier Blanc Restitution photogrammétrique 1981



Glacier Blanc Restitution photogrammétrique 1981  
modèle numérique de terrain  
altitude (m)  
4025  
2273

## Documents sources de données

Les photographies aériennes (1952, 1981, 2002, 2014)  
=> restitution photogrammétrique, coordonnées des points, reconstitution des modèles numériques de terrain

Orthophoto de 2002

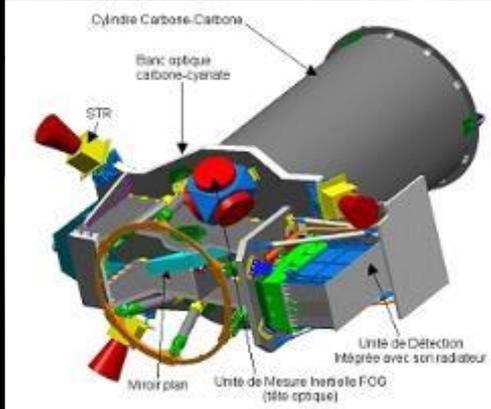


Orthophoto de 2014



## Documents sources de données

Images satellite Pléiades octobre 2014 (CNES, sur programmation)



hauteur sol : 700 km

taille du pixel au sol :  
50 cm

## Documents sources de données



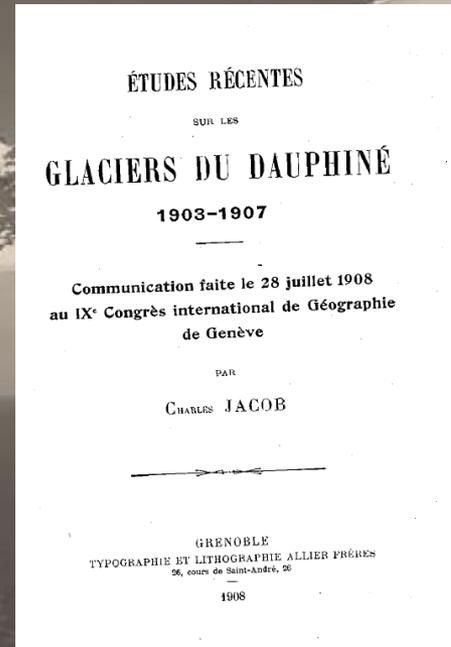
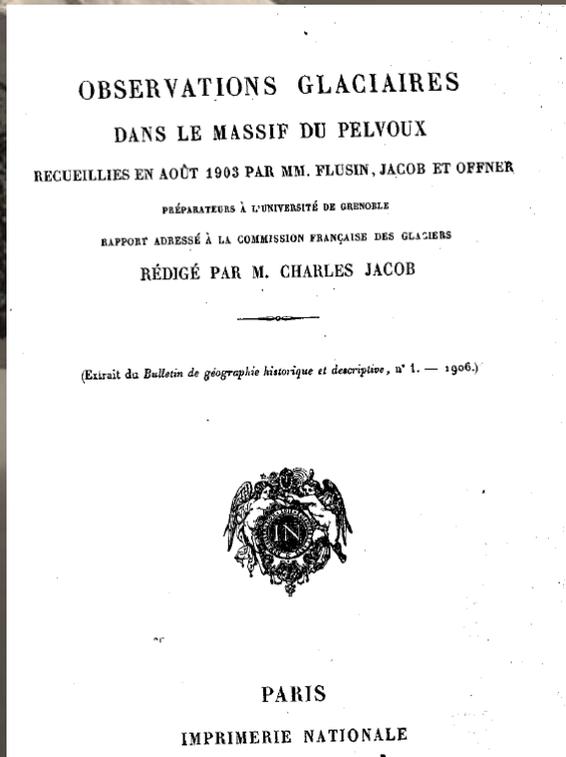
- Position du front :
- Cartes historiques,
  - Photographies aériennes,
  - Photographies de terrain, gravures,
  - Plans type géomètre, cadastre (Napoléon)
  - Position des moraines, de blocs erratiques



Documents sources de données

Position du front :

- Rapports Commission Française des Glaciers (1891-1904)



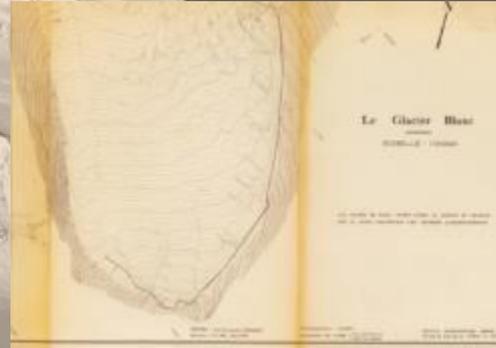
# Évolution du Glacier Blanc depuis 1904

Documents sources de données

Position du front :

levés topographiques E&F, Parc National des Écrins (depuis 1983), LGGE, Irstea (théodolithe, GPS)

- Plans type géomètre : Mougin 1934, CTGREF 1975



## Documents sources de données



Vers 1920

Position du front :

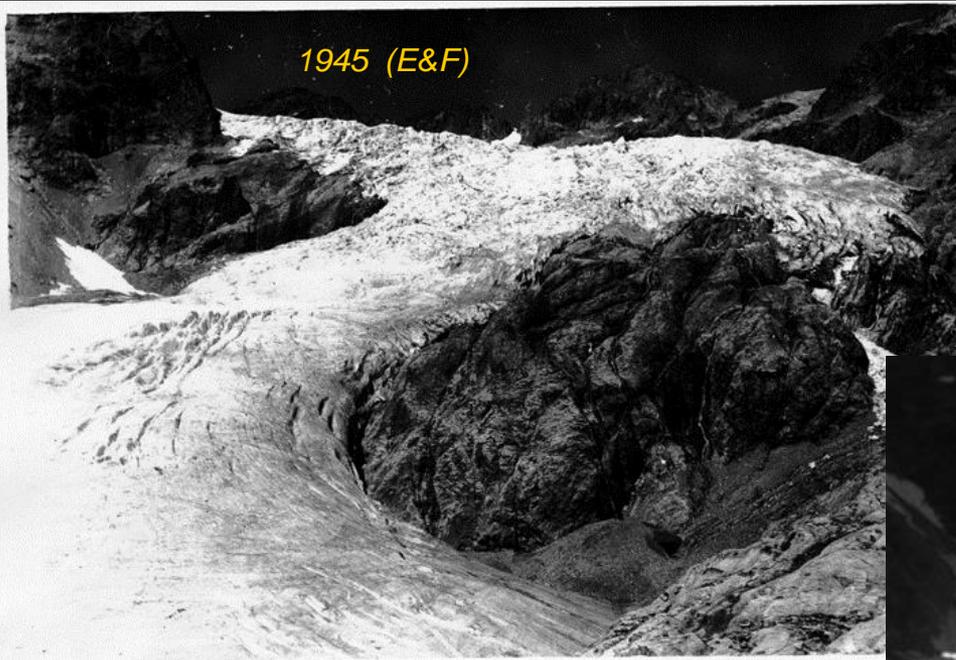
- Photographies de terrain



2018

## Documents sources de données

1945 (E&F)



Position du front :

- Photographies de terrain

2003



Documents sources de données

Position du front :

- Photographies de terrain



1965, R. Vivian



2007



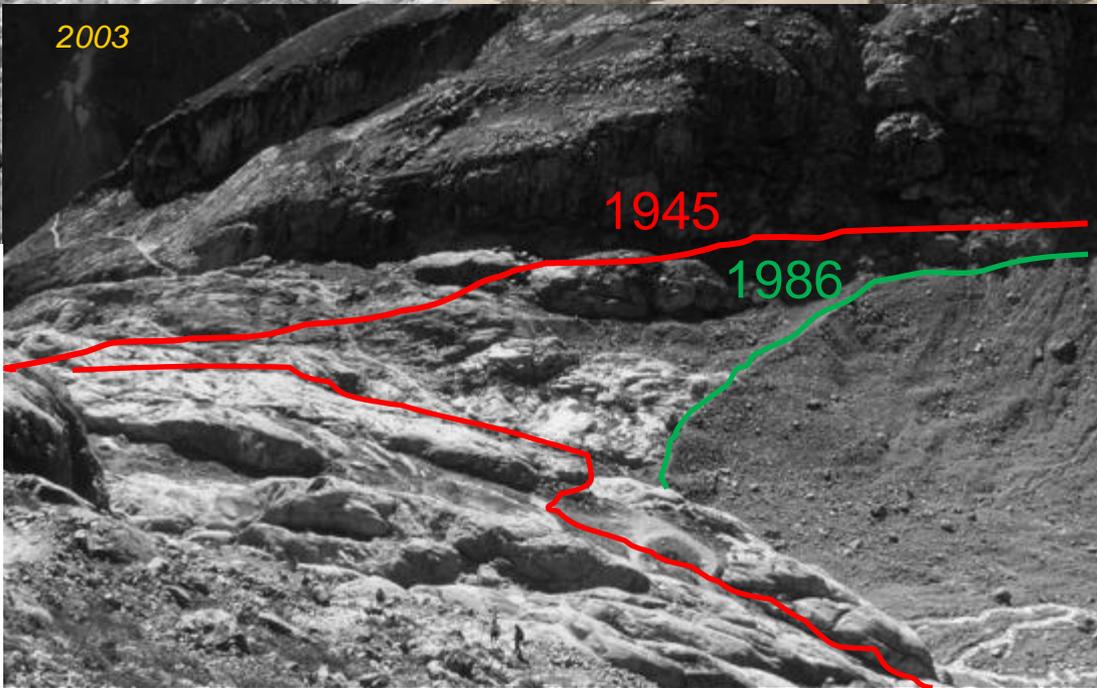
2017

## Documents sources de données



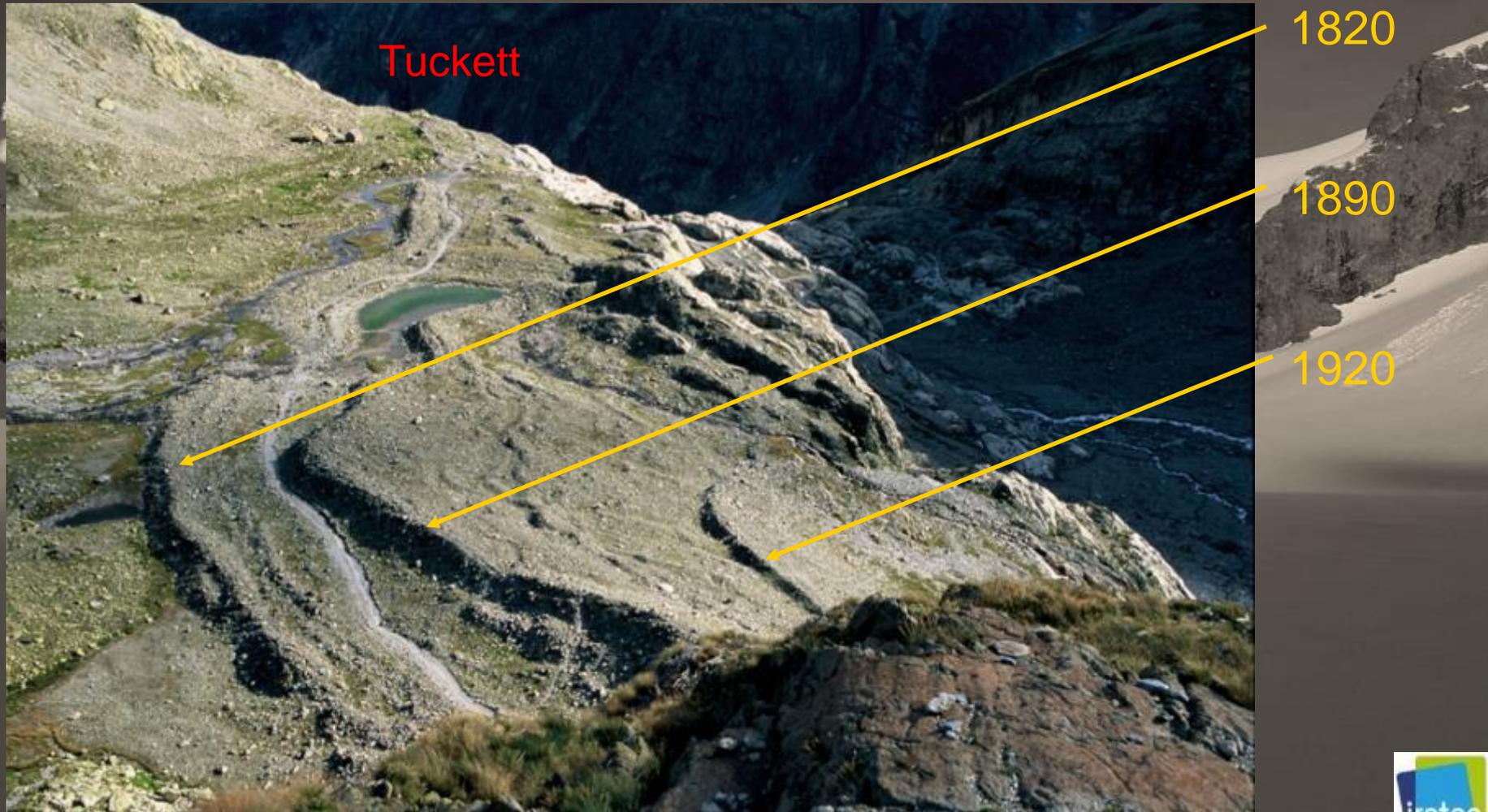
Position du front :

- Photographies de terrain
- Moraines (géomorphologie) : latérales (Petit Âge Glaciaire, 1920), frontale (1986)

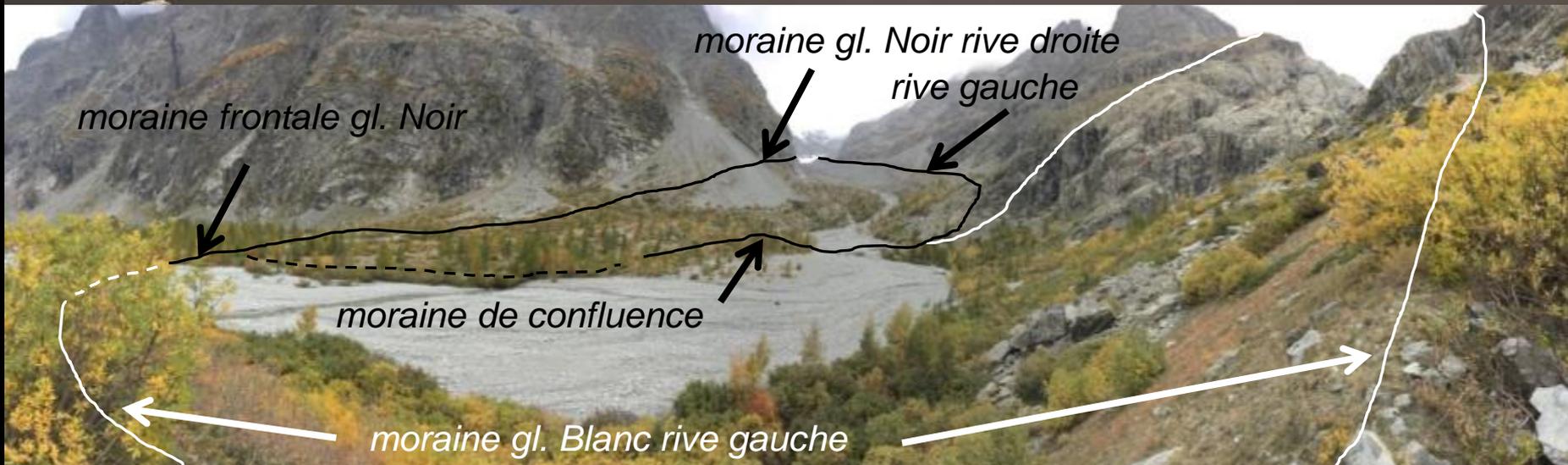


Documents sources de données

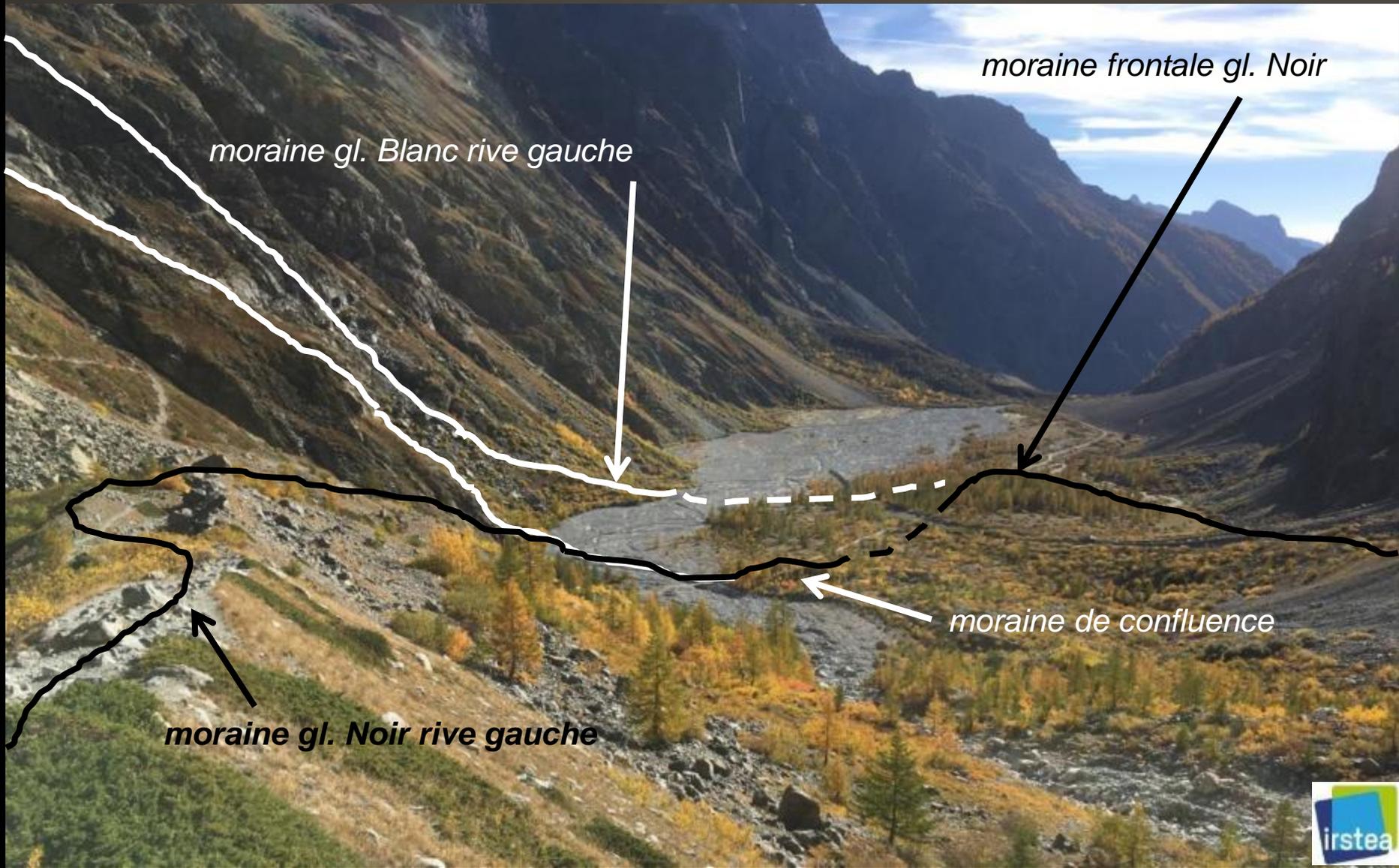
Extension latérales : moraines



Documents sources de données



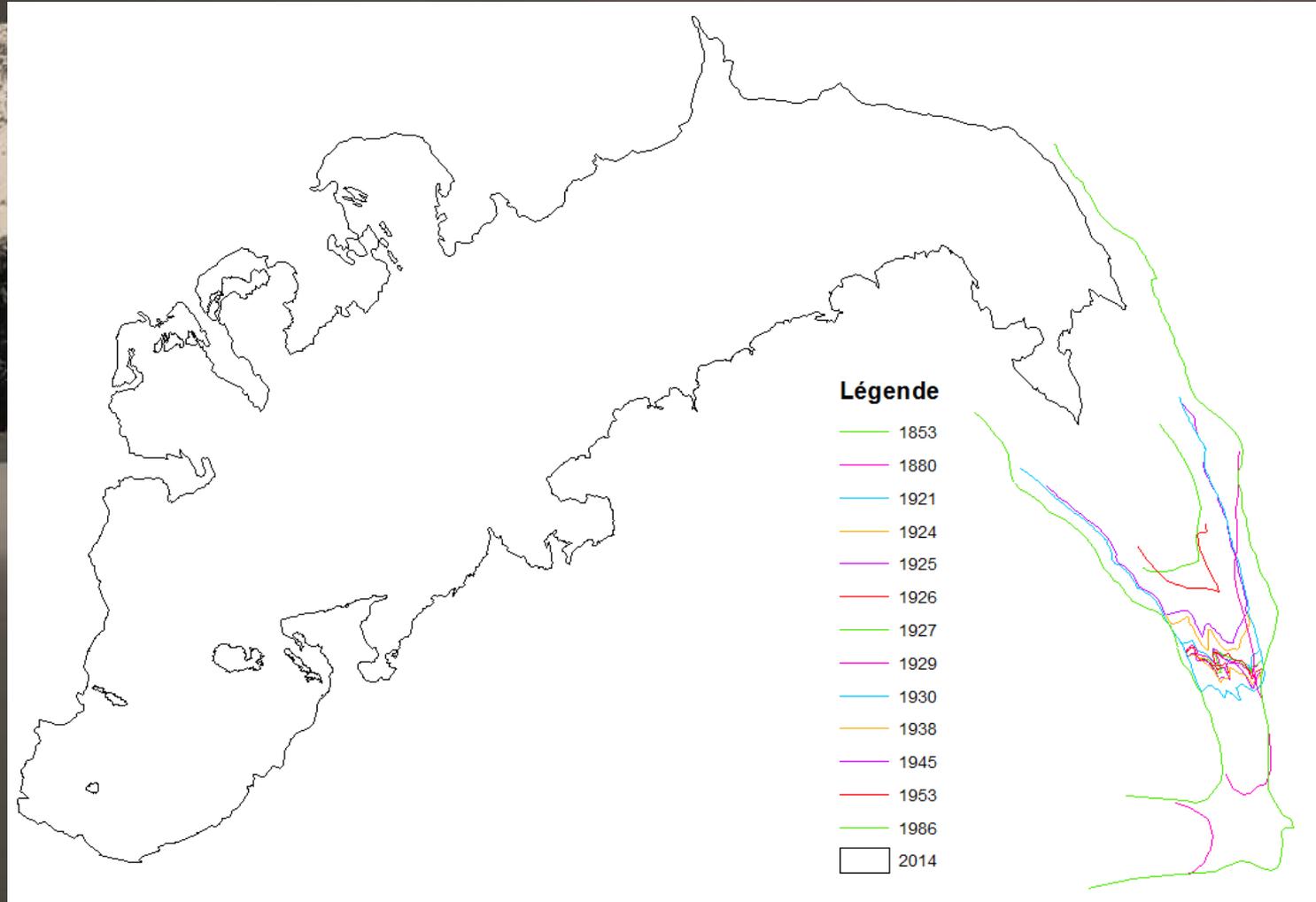
Documents sources de données



# Évolution du Glacier Blanc depuis 1904

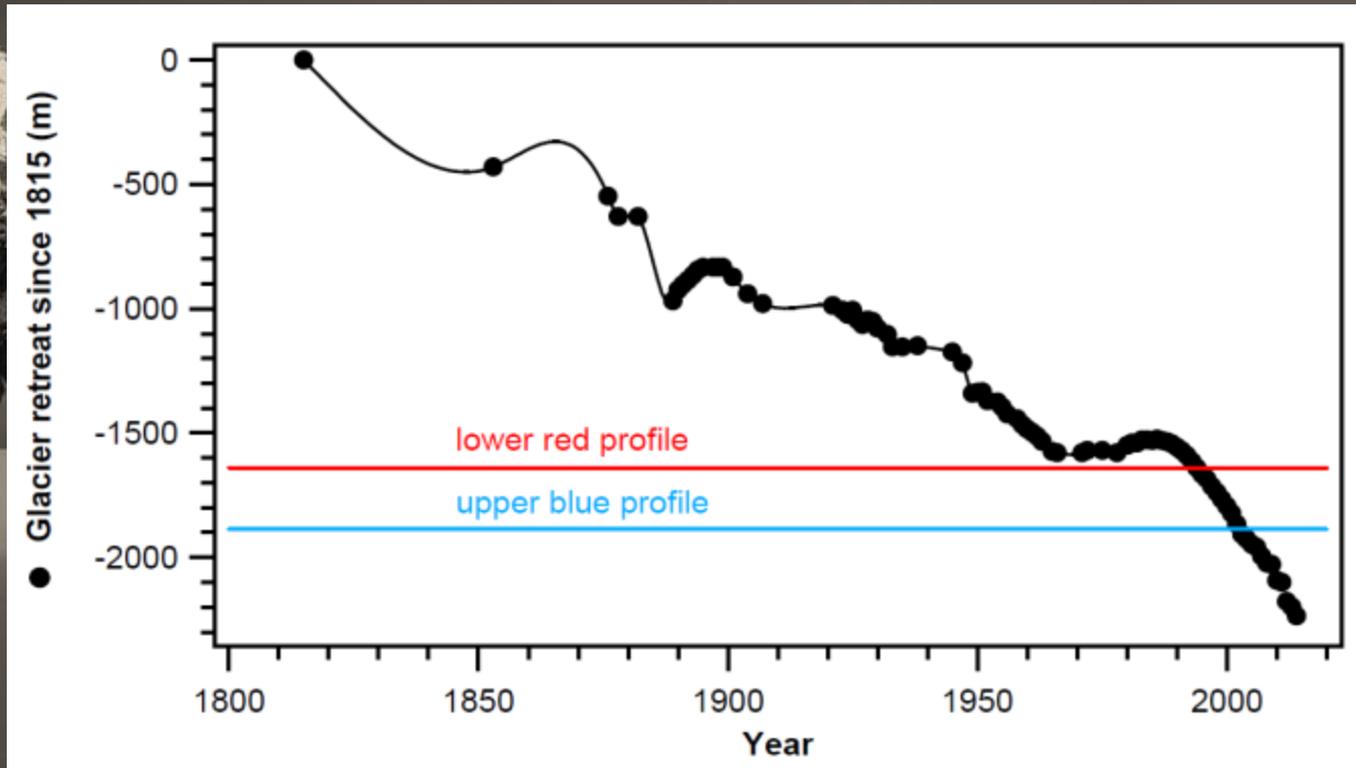
Synthèse des documents sources

Position du front : cartographie des positions du front depuis 1815



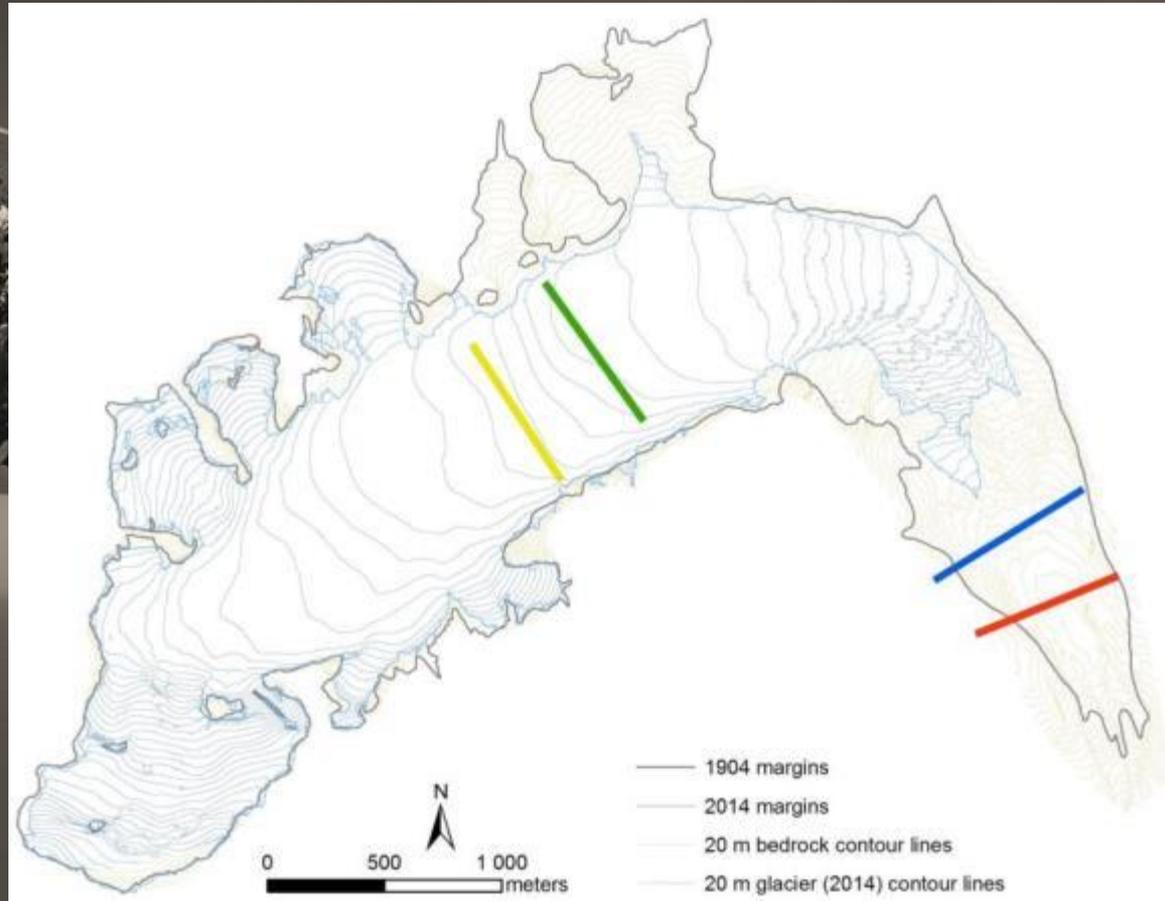
## Synthèse des documents sources

Les variations de longueur depuis 1815 (maximum du PAG)



## Profils topographiques

Les profils transverses  
(Gluck sismique, profils E&F aujourd'hui déglacés)

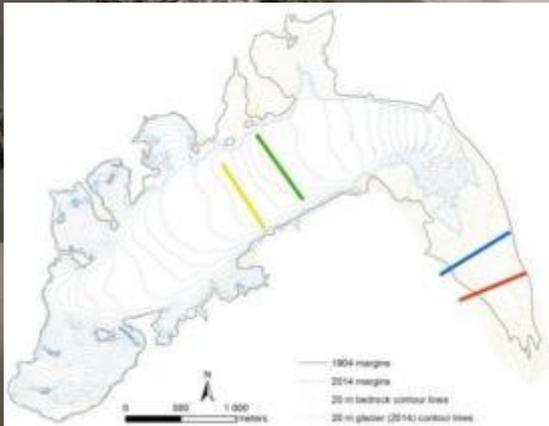


# Évolution du Glacier Blanc depuis 1904

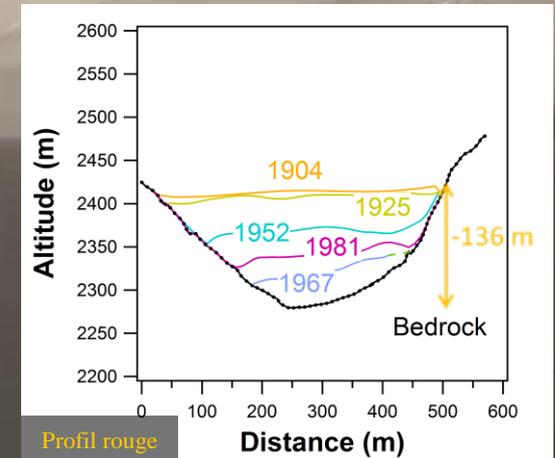
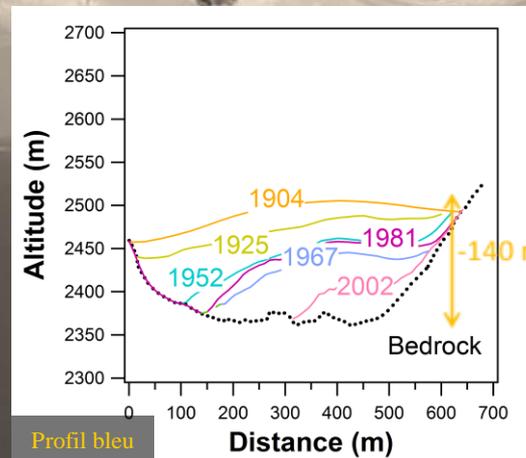
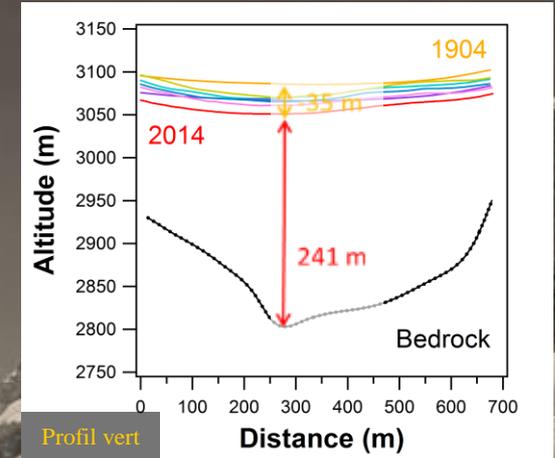
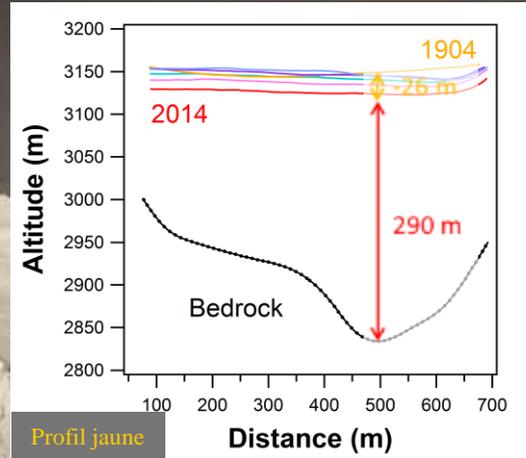
## Synthèse des profils topographiques

Les changements d'épaisseur sur les profils transverses

Profils Gluck sismique



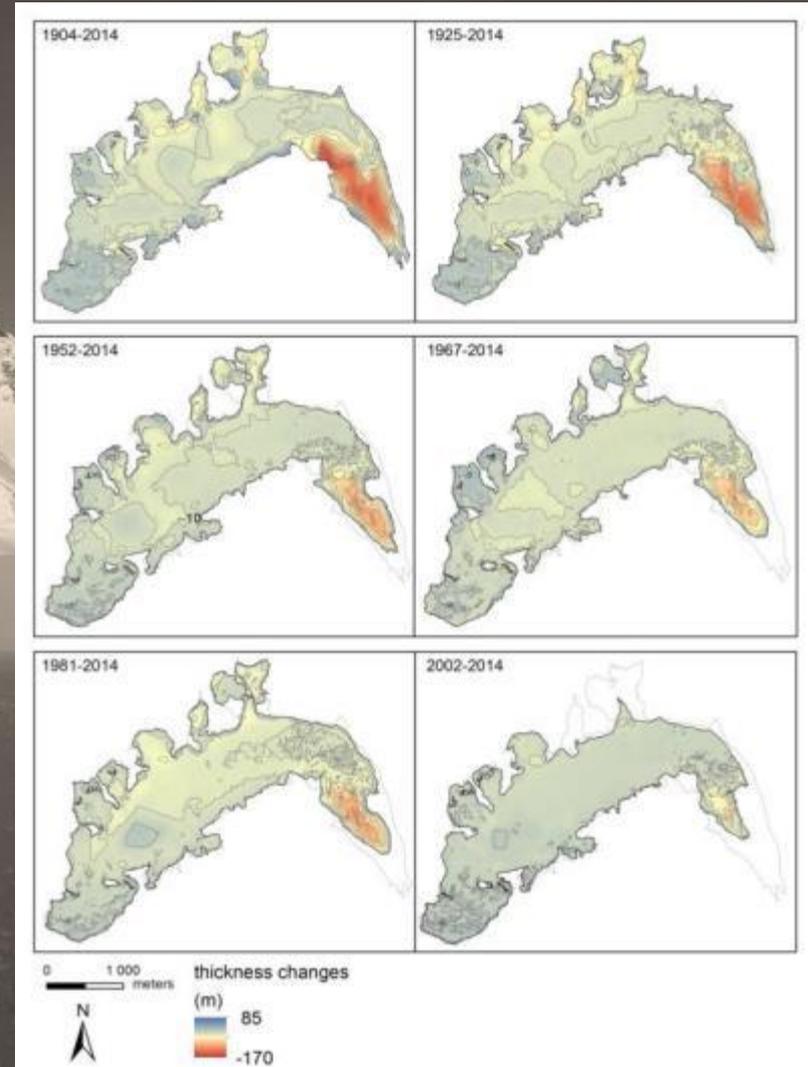
Profils E&F  
(aujourd'hui déglacés)



# Évolution du Glacier Blanc depuis 1904

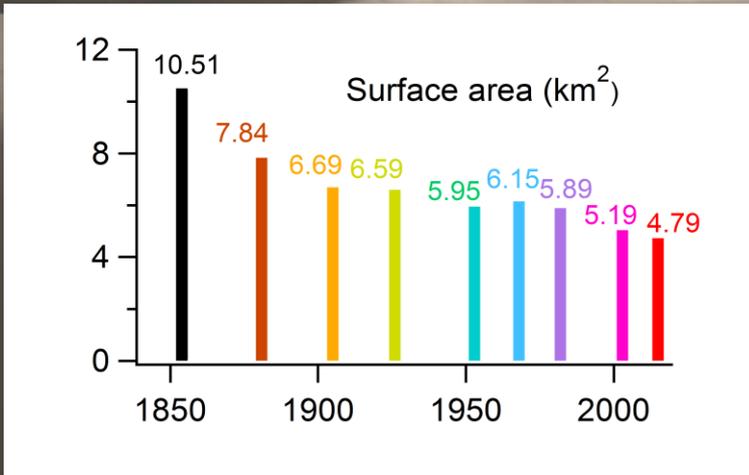
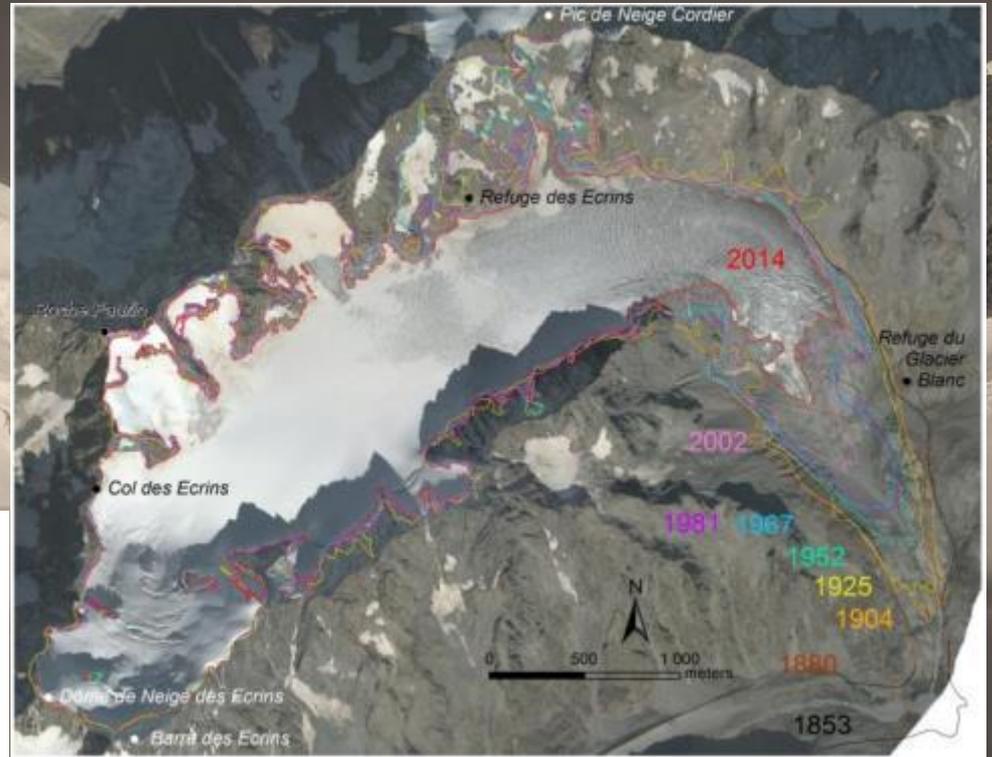
## Synthèse des traitements MNT

### Les variations d'épaisseur depuis 1904



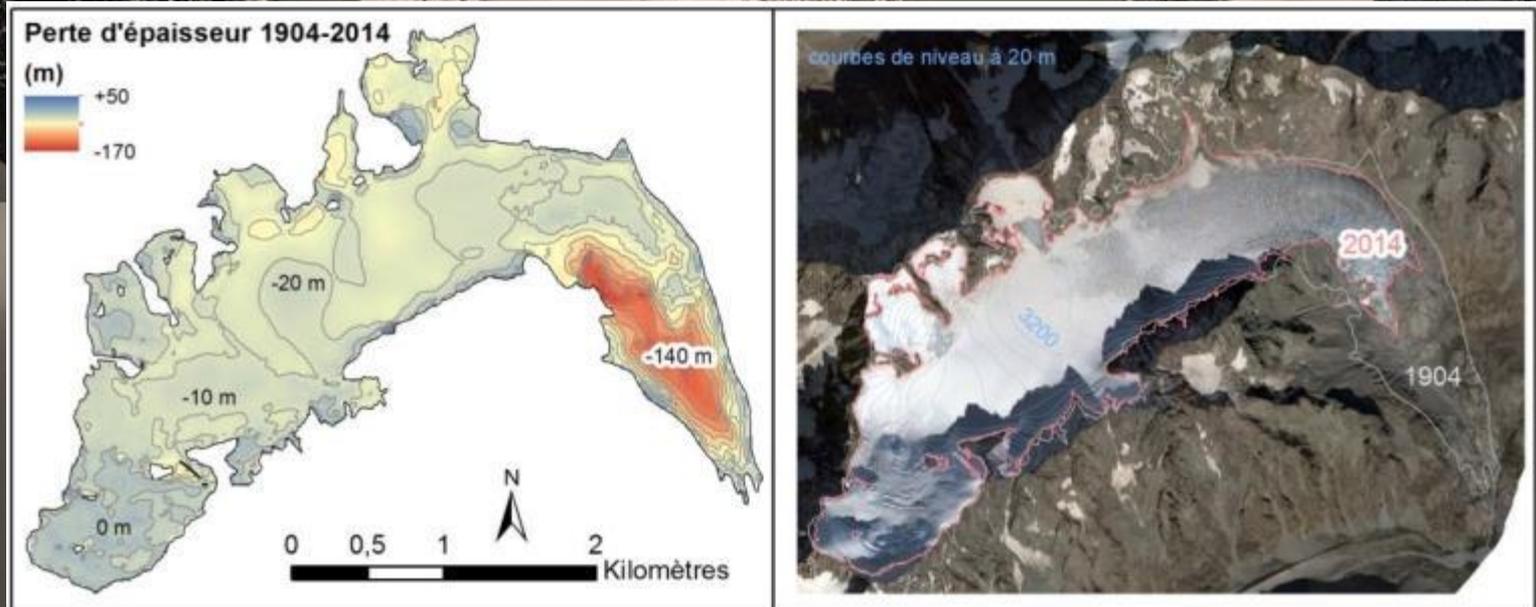
## Synthèse des traitements MNT

### Les variations de surface depuis 1904



## Synthèse des traitements MNT

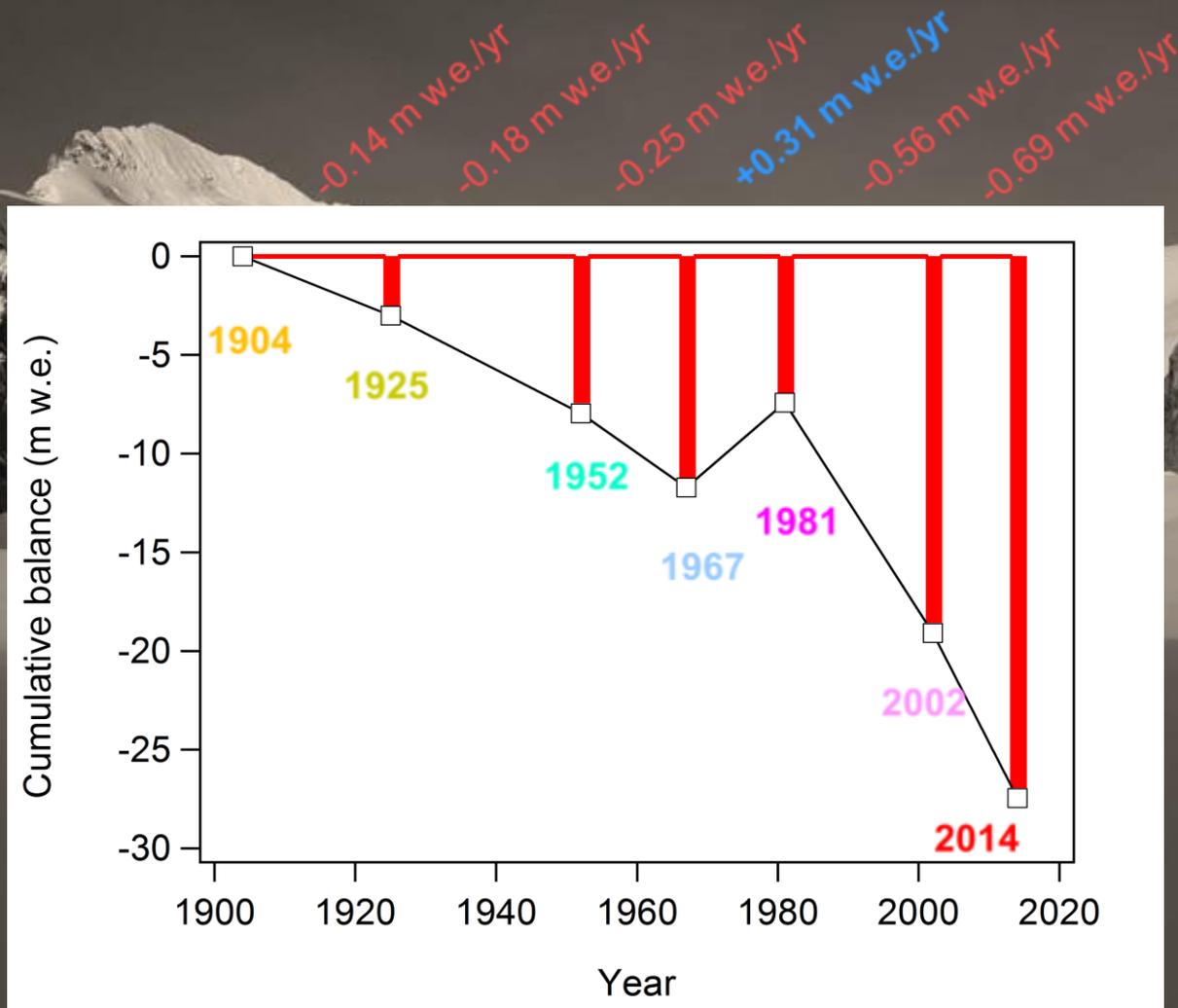
Les variations d'épaisseur et de surface entre 1904 et 2014



# Évolution du Glacier Blanc depuis 1904

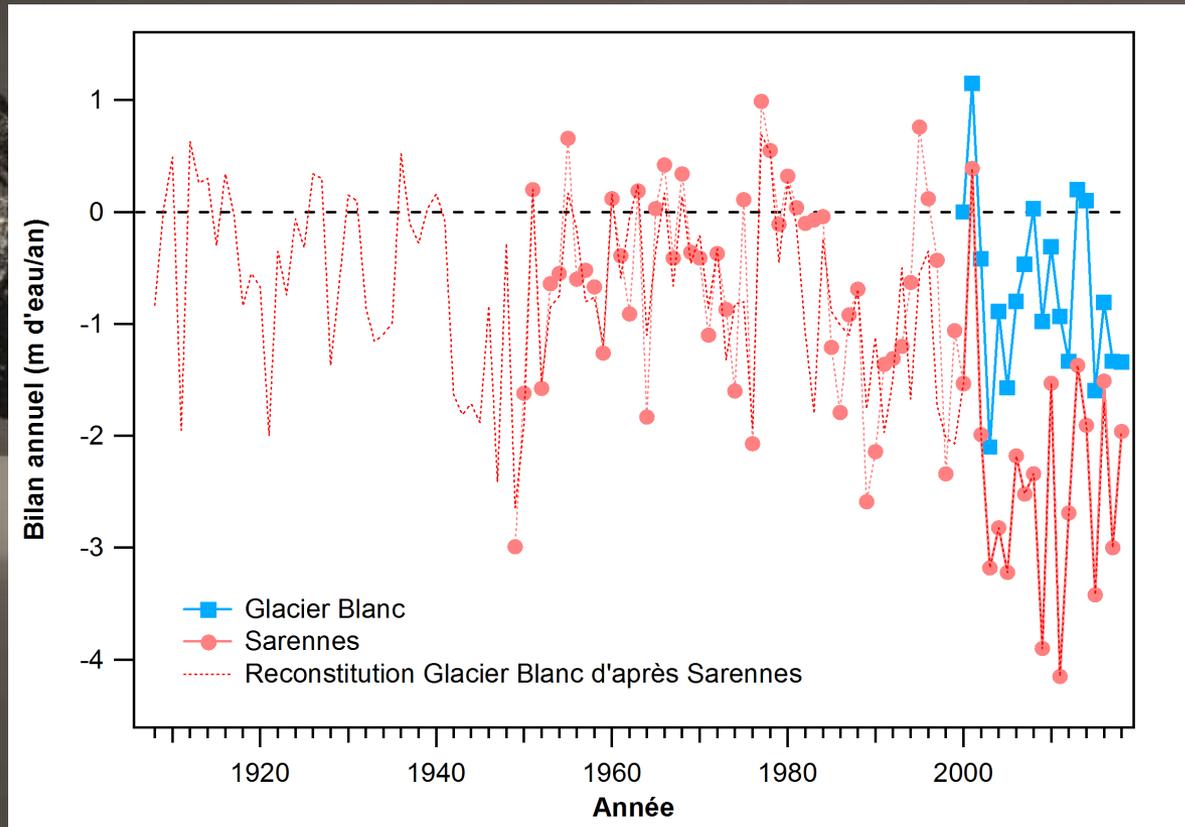
## Synthèse des traitements MNT

Changements de masse cumulés sur de longues périodes



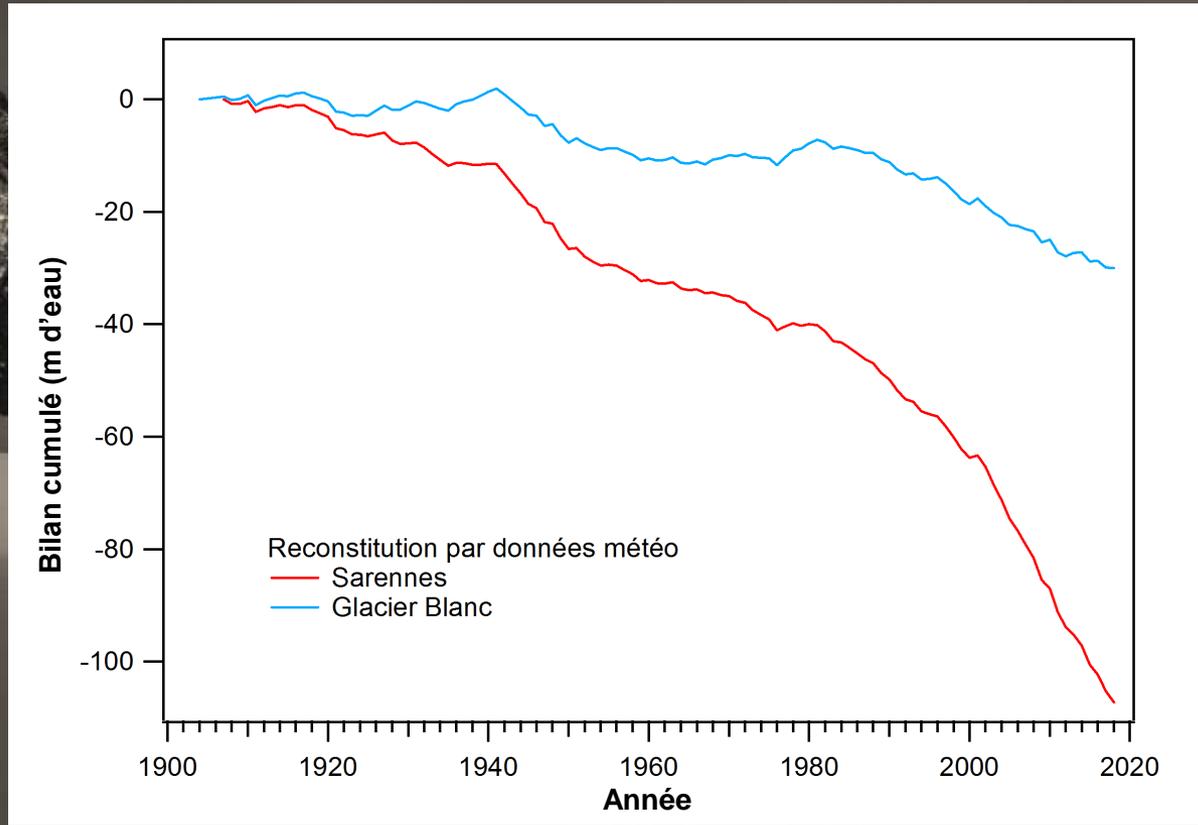
# Évolution du Glacier Blanc depuis 1904

Bilan reconstitués à partir des données météo



# Évolution du Glacier Blanc depuis 1904

Bilan reconstitués à partir des données météo



Merci pour votre attention

