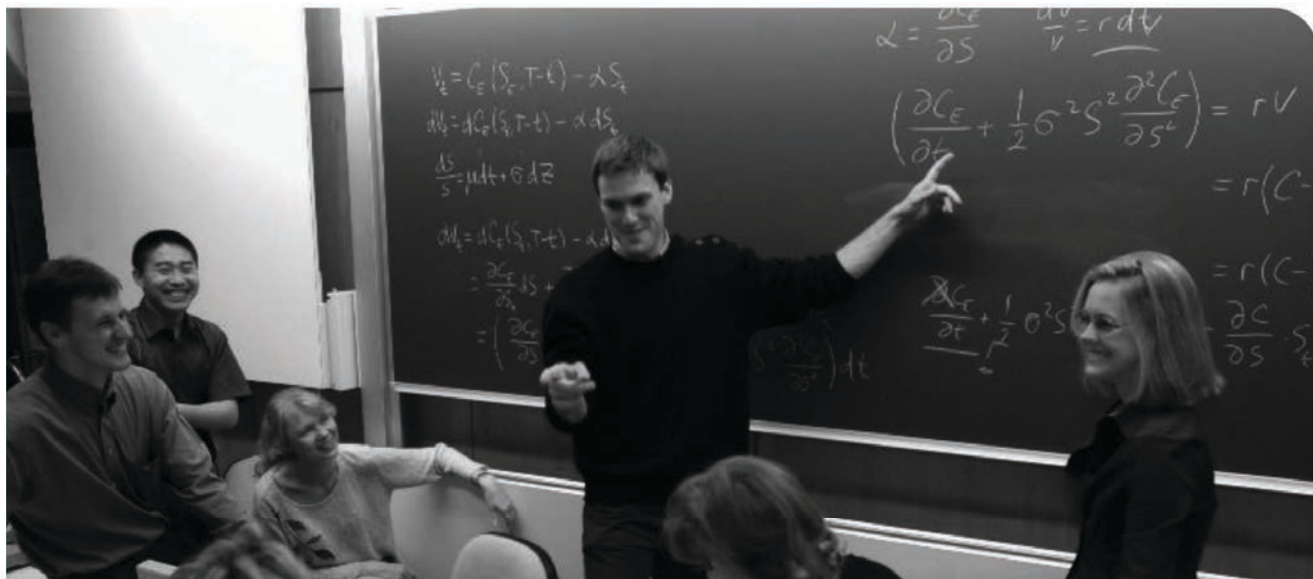


Unil

UNIL | Université de Lausanne



« Peak Oil », « Peak Water », « Peak Sediment »

Les effets du réchauffement climatique sur les glaciers Alpins

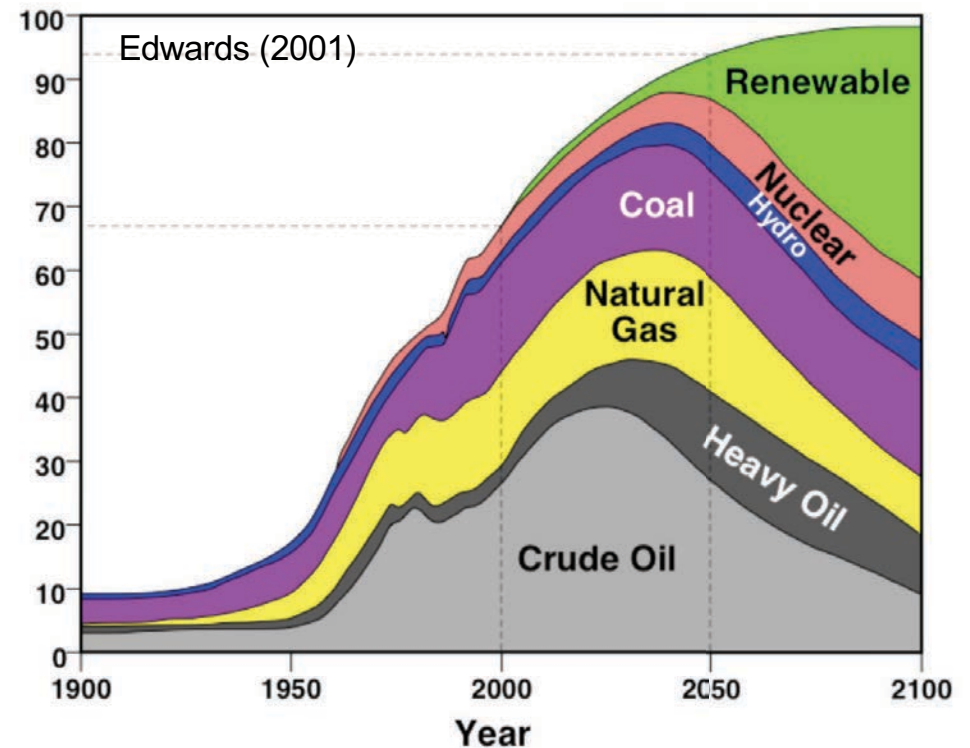
Stuart N. Lane, Maarten Bakker, Chrystelle Gabbud, Christophe Lambiel, Natan Micheletti, Jean-Noël Saugy

Institute of Earth Surface Dynamics

stuart.lane@unil.ch

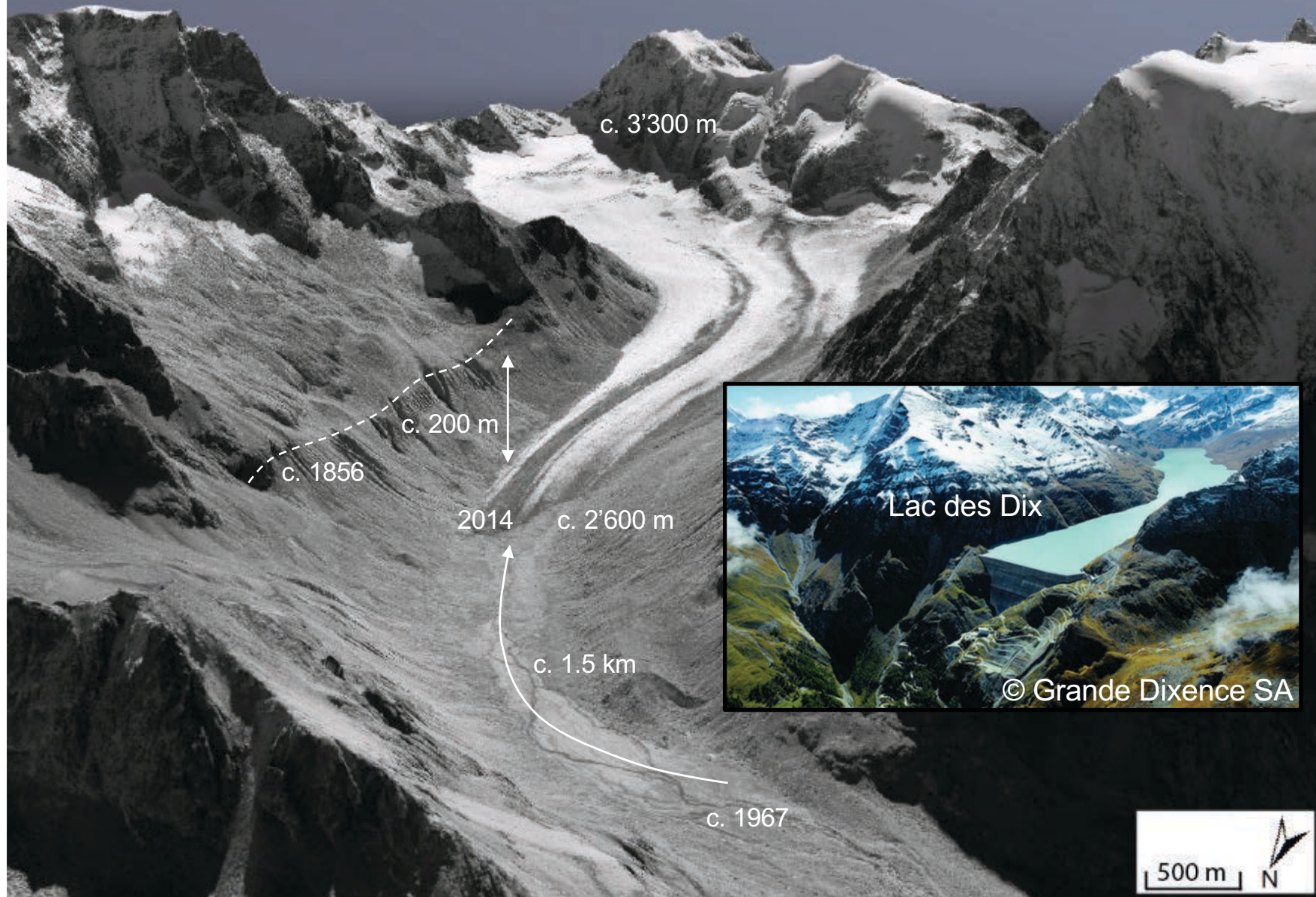
La notion « Peak Oil »

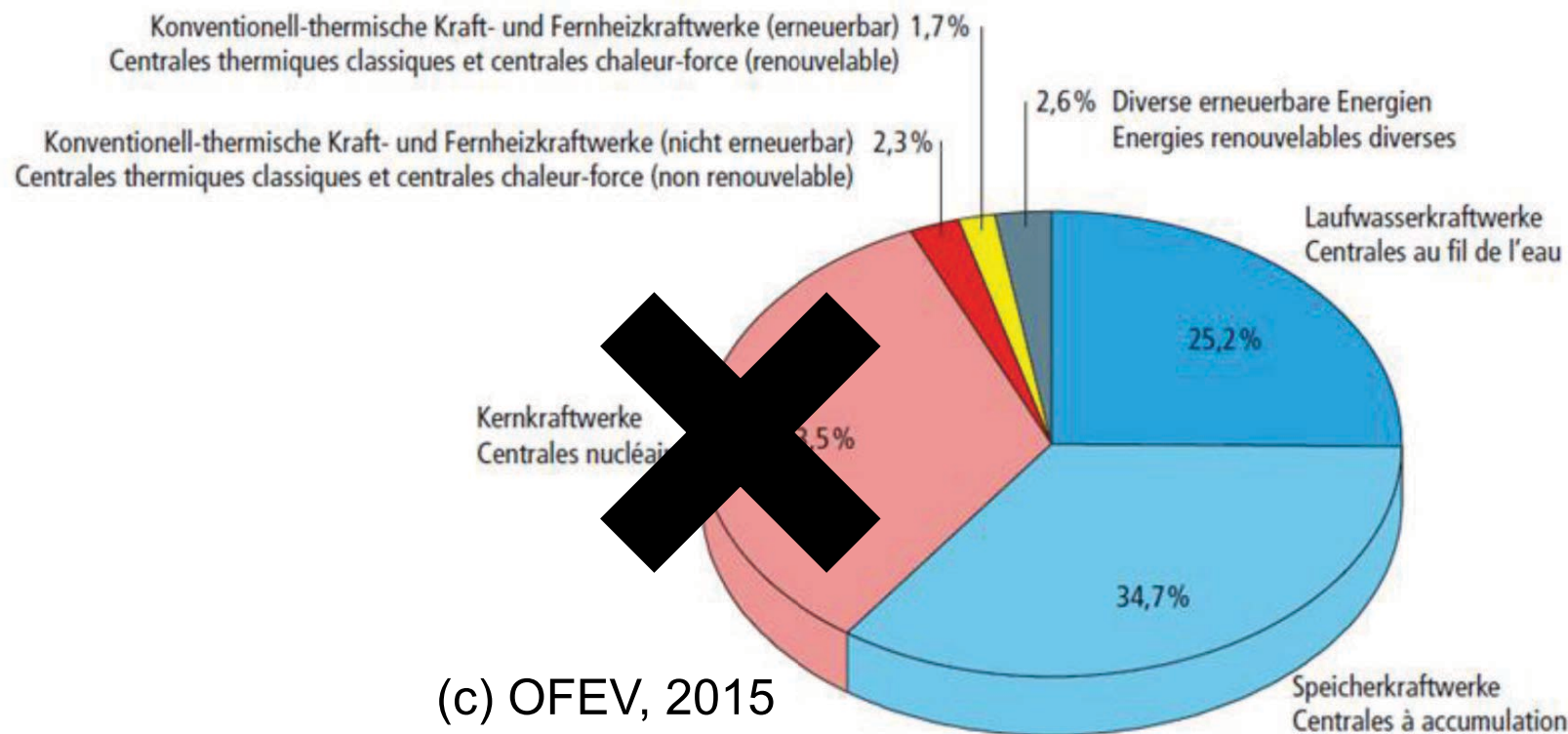
d'après M.K. Hubbart (1956)



Edwards, J. D., 2001, Twenty-first-century energy; decline of fossil fuel, increase of renewable nonpolluting energy sources, in Downey, M. W., Threet, J. C., and Morgan, W. A., eds., Petroleum provinces of the twenty-first century: Tulsa, OK, United States, Association of Petroleum Geologists, AAPG Memoir 74, p. 21-34

Le Haut Glacier d'Arolla, VS





La force hydraulique en Suisse:

Etat actuel: en moyenne, **36.3** gigawatt-heures par année

Objectif 2035: **37.4** gigawatt-heures par année

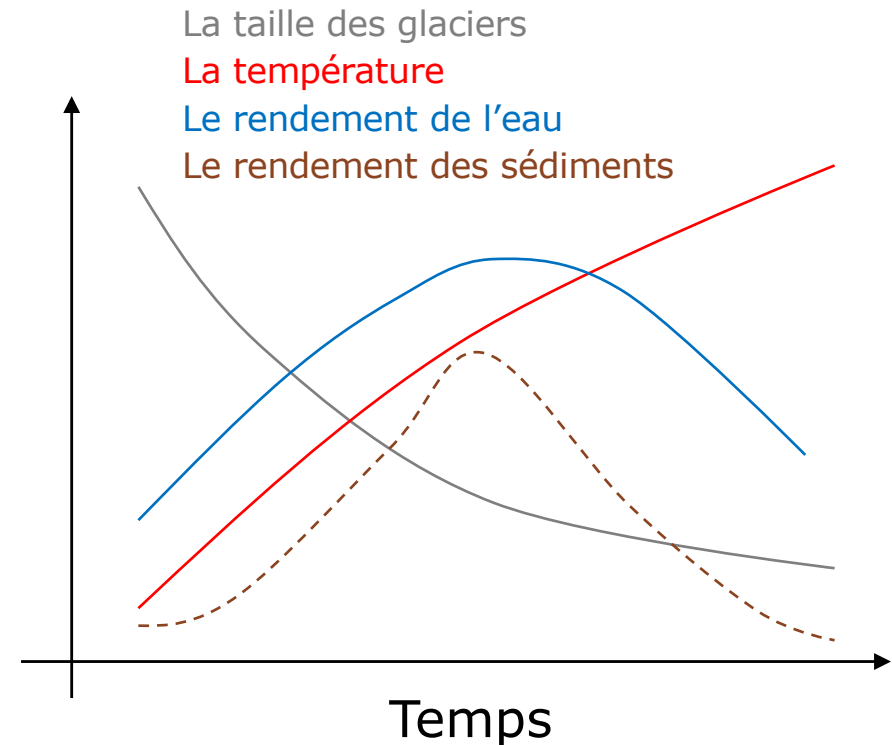
Loi Suisse Leaux: assainissement des cours d'eau par un débit résiduelle c. - 2-3% de production

Les notions

« Peak Water » et « Peak Sediment »

Nos hypothèses:

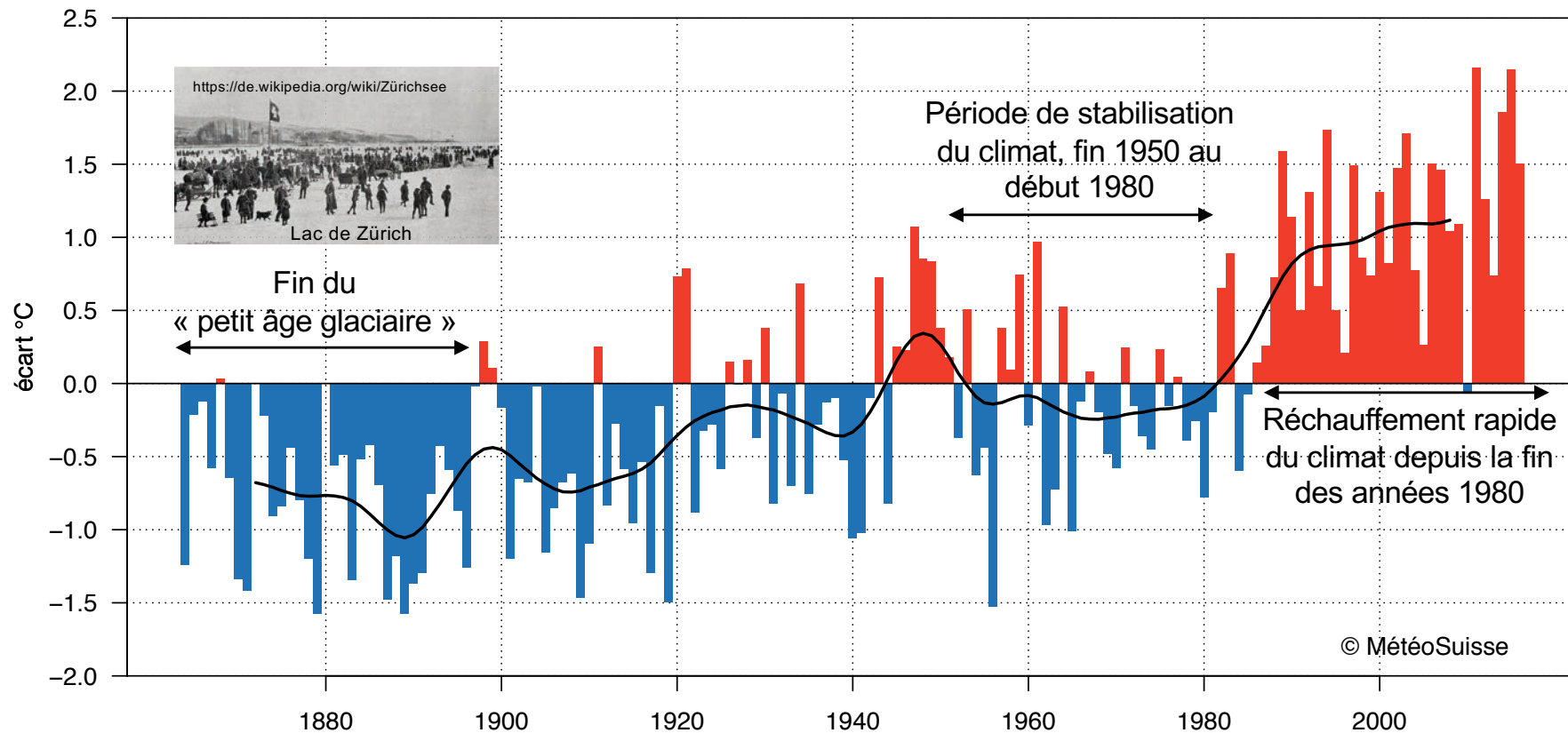
1. La taille des glaciers diminue progressivement
2. A cause du réchauffement et donc un taux de fonte de glace plus élevé
3. Le rendement de l'eau augmente mais au dessous d'une taille critique d'un glacier, il y a une pénurie de rendement car il y a moins de glace à fondre
4. L'eau transport les sédiments et donc le taux de transfert des sédiments va suivre le rendement



Les changements climatiques en Suisse depuis le « Petit Age Glaciaire »

température annuelle – nord de la Suisse au-dessus de 1000 m/m – 1864–2016

écart à la moyenne 1961–1990

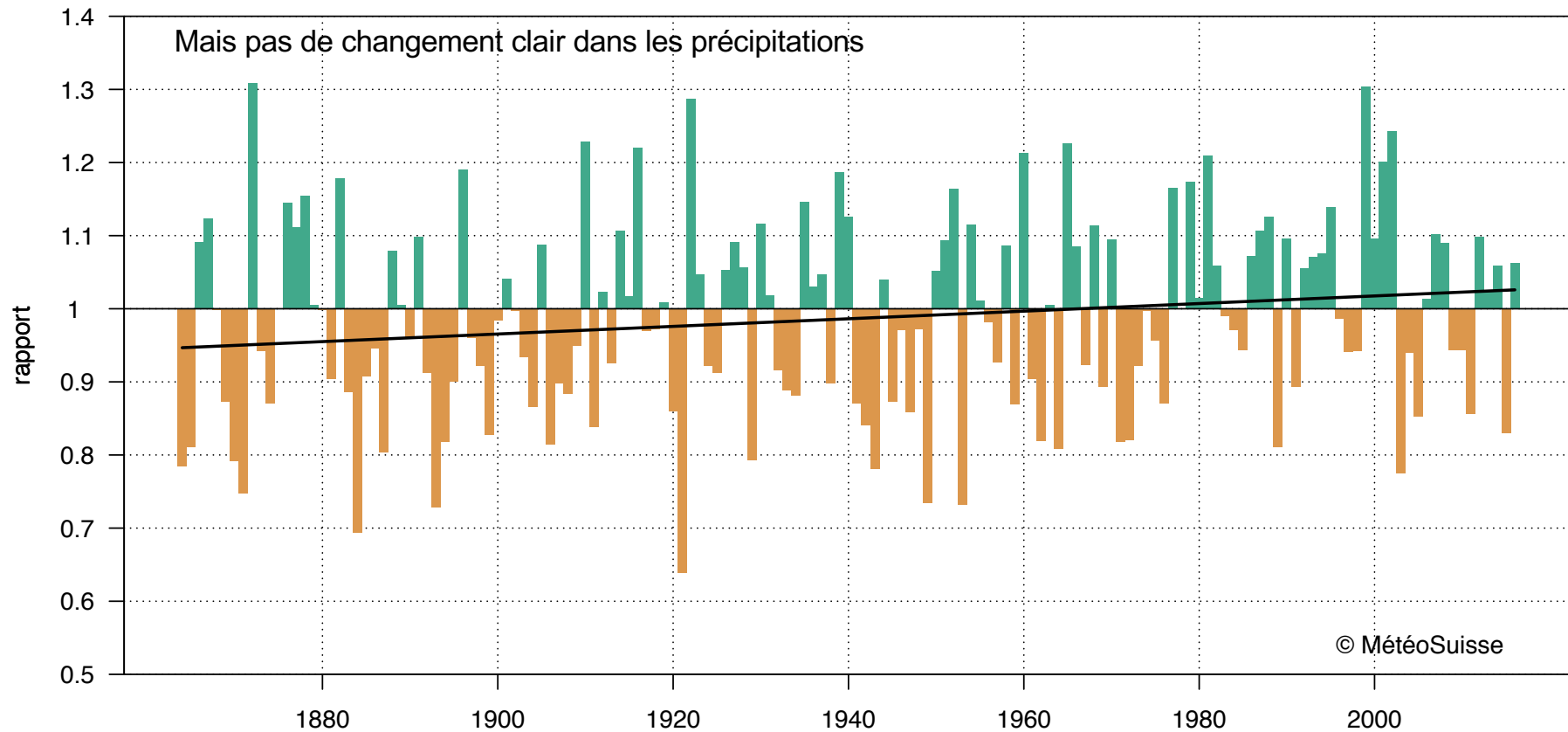


- années au dessus de la moyenne 1961–1990
- années en dessous de la moyenne 1961–1990
- moyenne pondérée sur 20 ans (filtre gaussien passe-bas)

Les changements climatiques en Suisse depuis le « Petit Age Glaciaire »

précipitation annuelle – Suisse – 1864–2016

rapport avec la moyenne 1961–1990



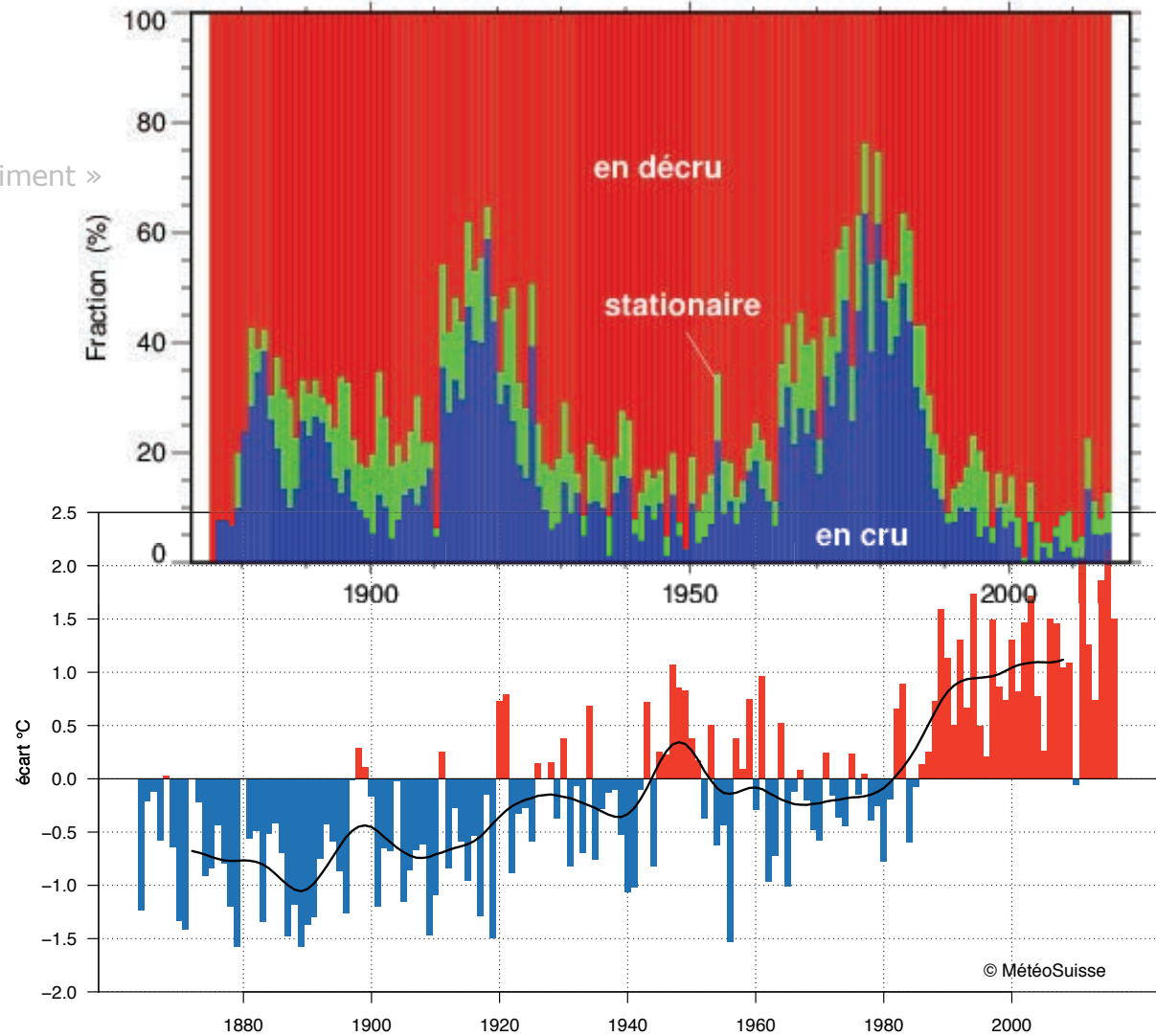
- années au dessus de la moyenne 1961–1990
- années en dessous de la moyenne 1961–1990
- tendance linéaire 1864–2016 (Theil–Sen): 5.2%/100y (p-val: 0.05)

Le recul des glaciers

Nos hypothèses:

1. Glaciers deviennent plus petit
2. Le liens avec le réchauffement
3. Le rendement de l'eau - « peak water »
4. Le rendement des sédiments - « peak sediment »

le réseau de relevés
glaciologiques (GLAMOS)
ETHZ/ScNAT



- années au dessus de la moyenne 1961-1990
- années en dessous de la moyenne 1961-1990
- moyenne pondérée sur 20 ans (filtre gaussien passe-bas)

Le recul des glaciers

Nos hypothèses:

1. Glaciers deviennent plus petit
2. Le liens avec le réchauffement
3. Le rendement de l'eau – « peak water »
4. Le rendement des sédiments – « peak sediment »

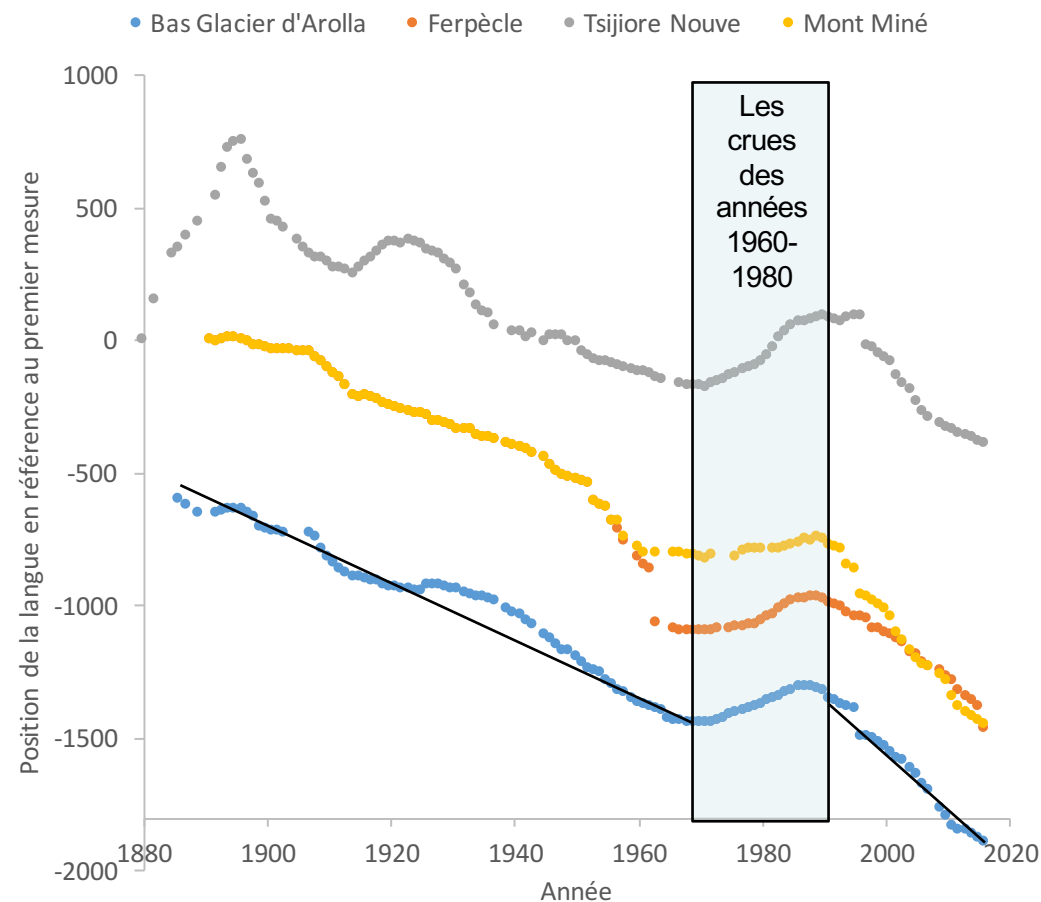
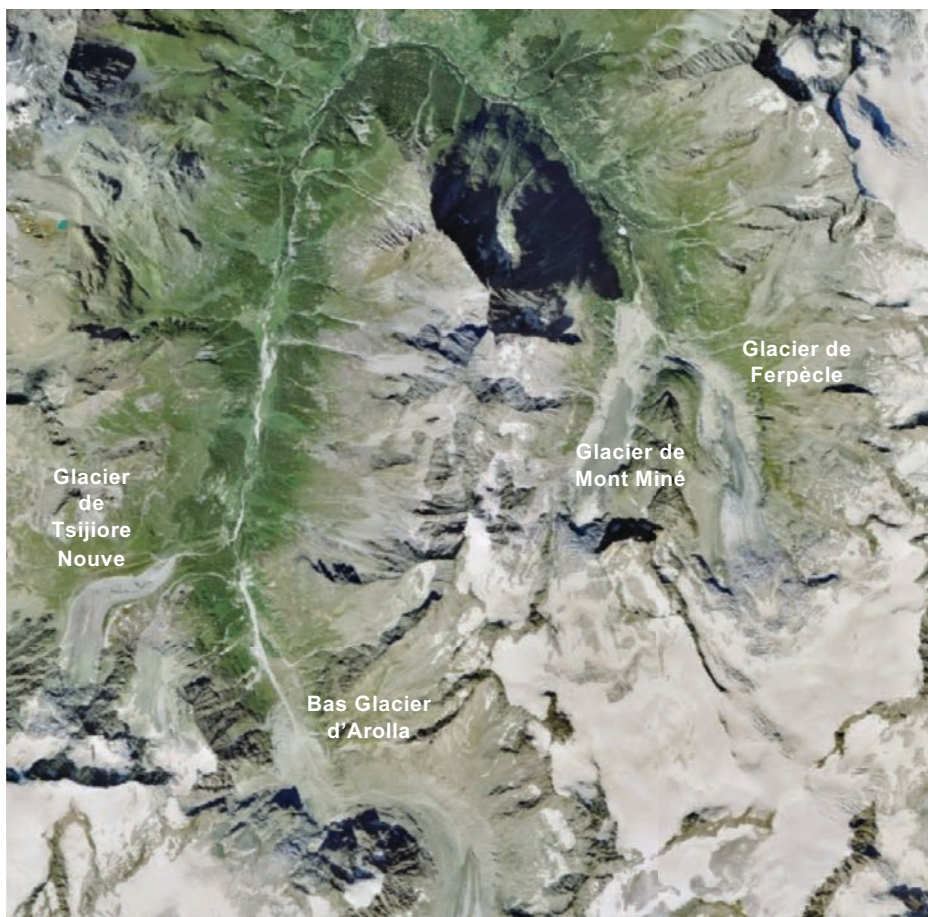
Bas Glacier d'Arolla (Glacier de Mont Collon)



Le recul des glaciers

Nos hypothèses:

1. Glaciers deviennent plus petit
2. Le liens avec le réchauffement
3. Le rendement de l'eau - « peak water »
4. Le rendement des sédiments - « peak sediment »



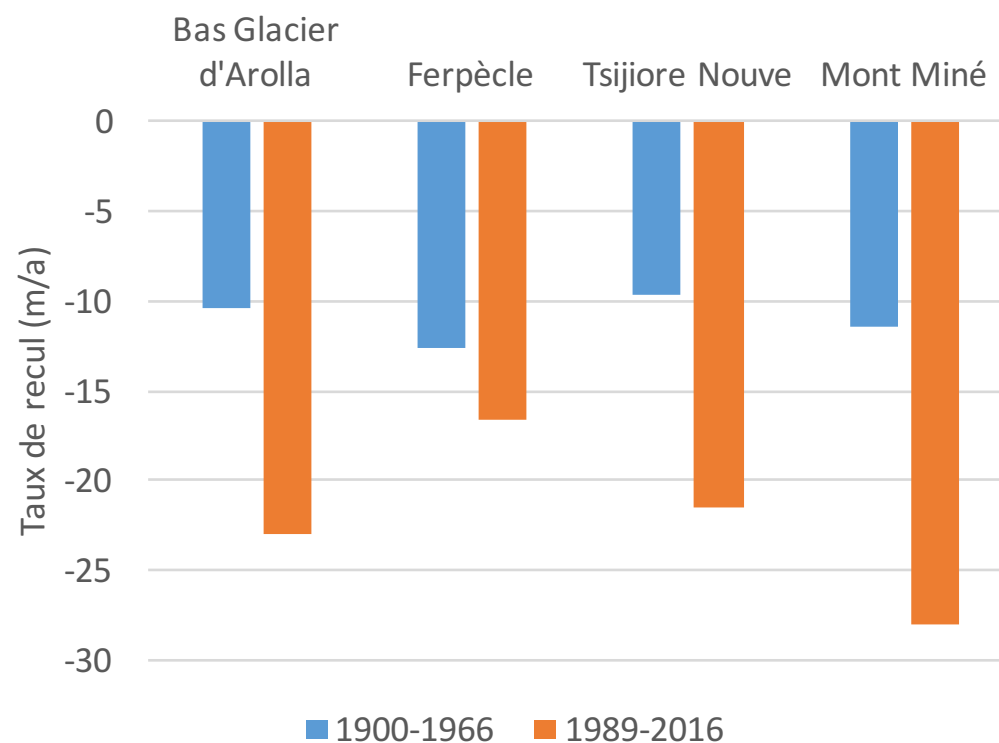
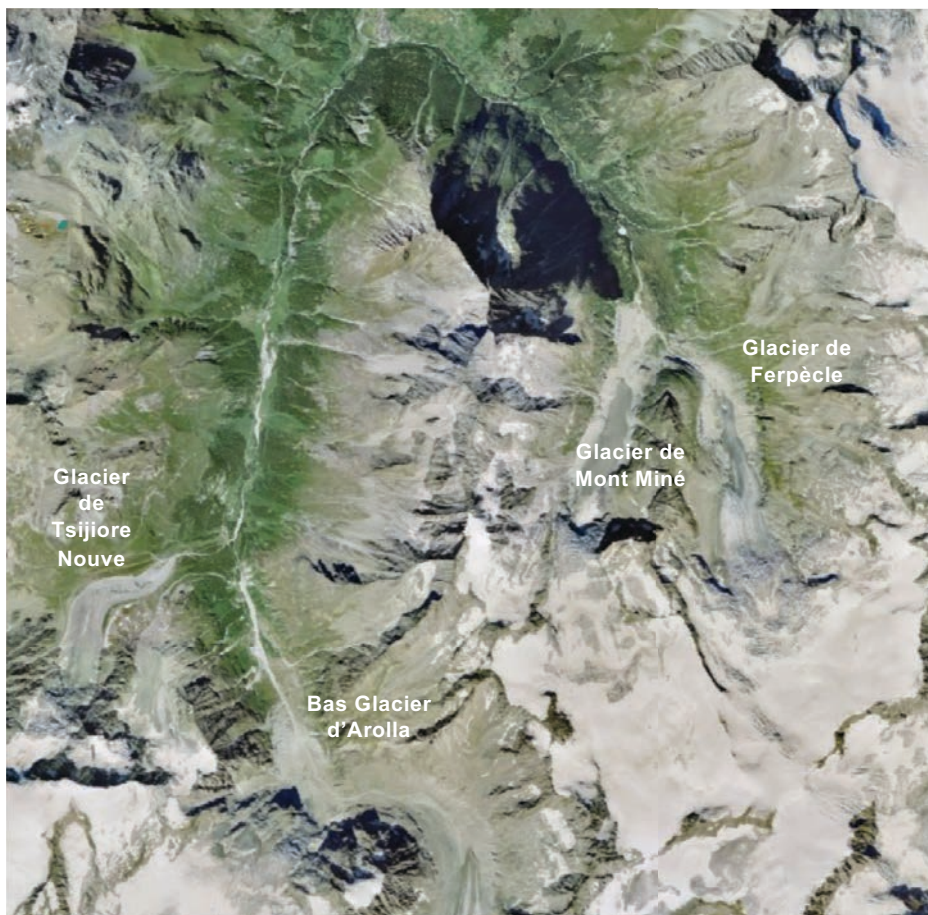
© SwissTopo

données tirées du réseau de relevés glaciologiques (GLAMOS) ETHZ/ScNAT

Le recul des glaciers

Nos hypothèses:

1. Glaciers deviennent plus petit
2. Le liens avec le réchauffement
3. Le rendement de l'eau – « peak water »
4. Le rendement des sédiments – « peak sediment »



© SwissTopo

données tirées du réseau de relevés glaciologiques (GLAMOS) ETHZ/ScNAT

Les liens avec le réchauffement

Nos hypothèses:

1. Glaciers deviennent plus petit
2. Le liens avec le réchauffement
3. Le rendement de l'eau – « peak water »
4. Le rendement des sédiments – « peak sediment »

Accumulation

précipitations solides
la neige qui reste > 1 année = firn
glace

Ablation

processus de fonte
fonctionne de la température
mais ... aussi de la neige



Les liens avec le réchauffement

Nos hypothèses:

1. Glaciers deviennent plus petit
2. Le liens avec le réchauffement
3. Le rendement de l'eau – « peak water »
4. Le rendement des sédiments – « peak sediment »

Accumulation

précipitations solides

la neige qui reste > 1 année = firn
glace

Ablation

processus de fonte
fonctionne de la température
mais ... aussi de la neige

Ablation > Accumulation

=

Bilan de mass -ve

=

recul



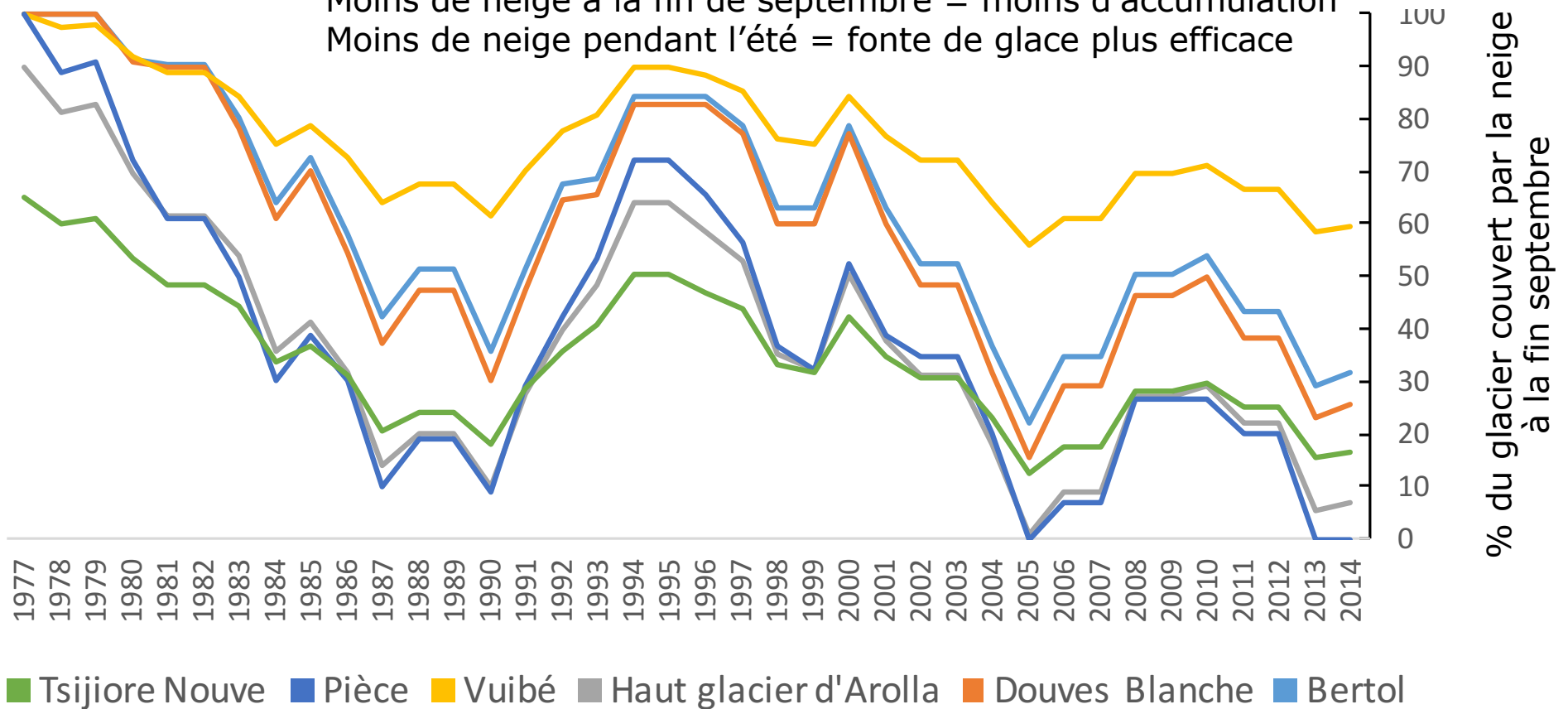
Les liens avec le réchauffement

Nos hypothèses:

1. Glaciers deviennent plus petit
2. Le liens avec le réchauffement
3. Le rendement de l'eau – « peak water »
4. Le rendement des sédiments – « peak sediment »

Un double effet

Moins de neige à la fin de septembre = moins d'accumulation
Moins de neige pendant l'été = fonte de glace plus efficace



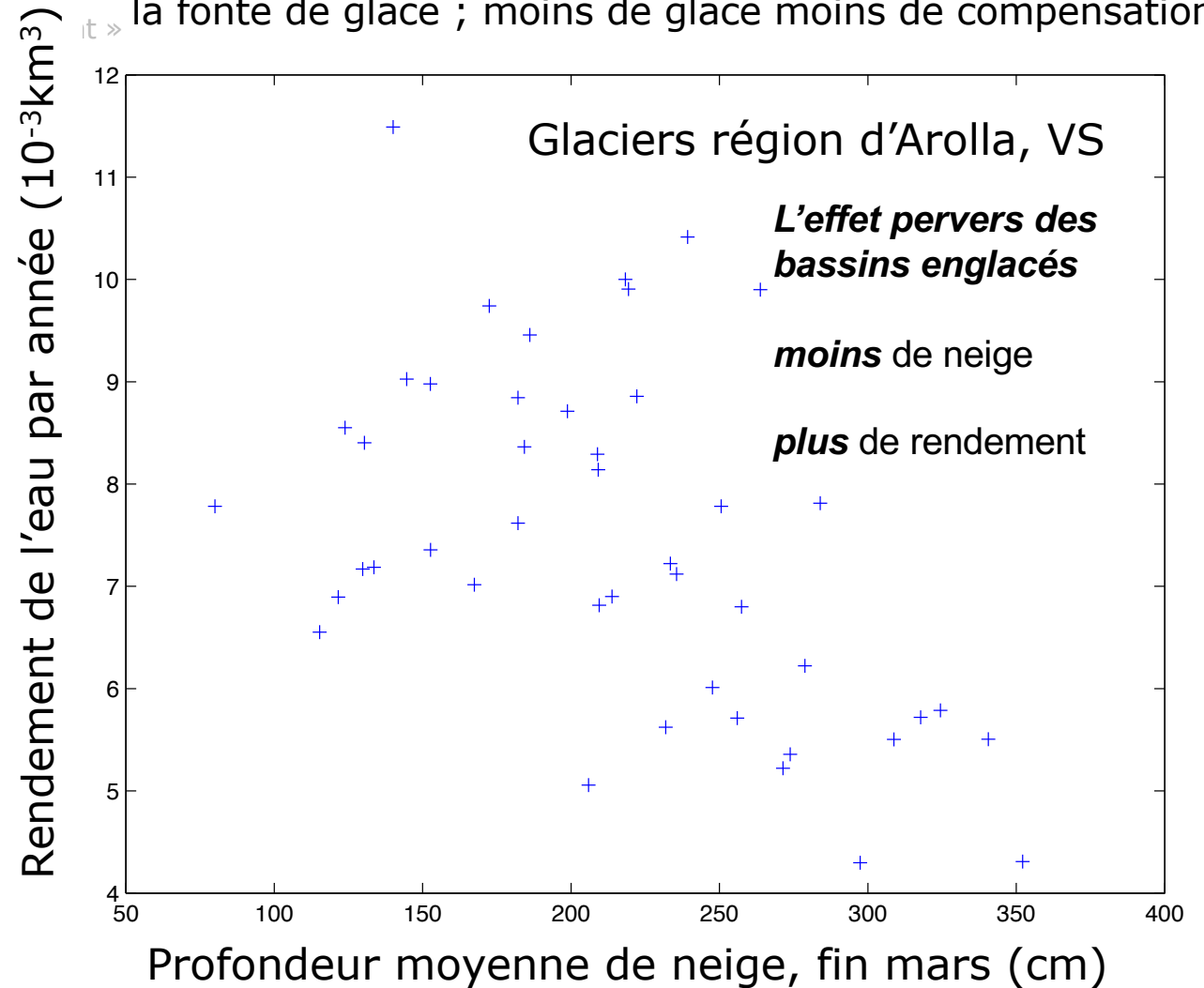
Le rendement de l'eau – « peak water »

Nos hypothèses:

1. Glaciers deviennent plus petit
2. Le liens avec le réchauffement
3. Le rendement de l'eau – « peak water »
4. Le rendement des sédiments – « peak s...



« **Compensation** » dans les bassins englacés années avec moins des précipitations sont compensés par la fonte de glace ; moins de glace moins de compensation



Le rendement de l'eau – « peak water »

Nos hypothèses:

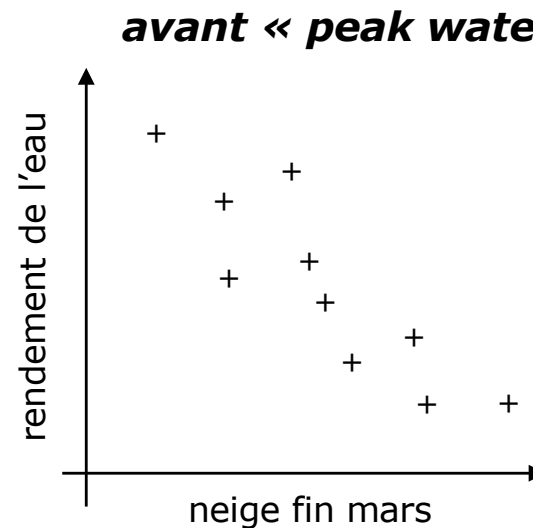
1. Glaciers deviennent plus petit
2. Le liens avec le réchauffement
3. Le rendement de l'eau – « peak water »
4. Le rendement des sédiments – « peak sediment »

Compensation :

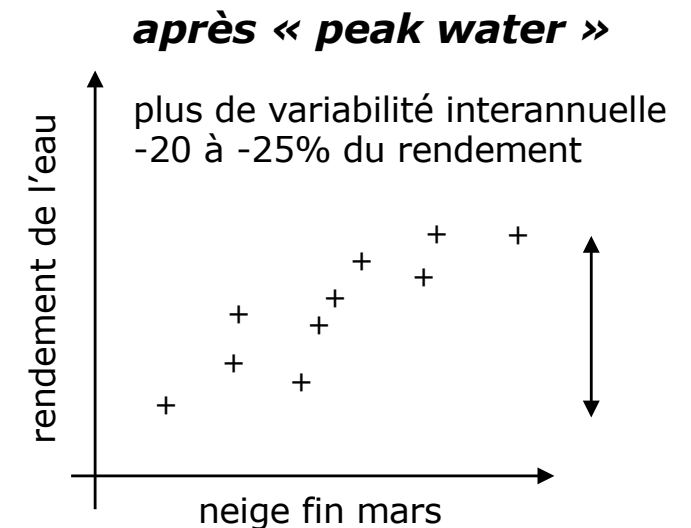
années avec moins des précipitations sont compensés par la fonte de glace

Peak water :

quand un glacier devient très petit, la fonte de glace n'est plus suffisante à compenser une pénurie des précipitations



moins de neige :
compensation par la
fonte de glace



moins de glace:
rendement une fonctionne
d'accumulation de neige

Le rendement de l'eau – « peak water »

Nos hypothèses:

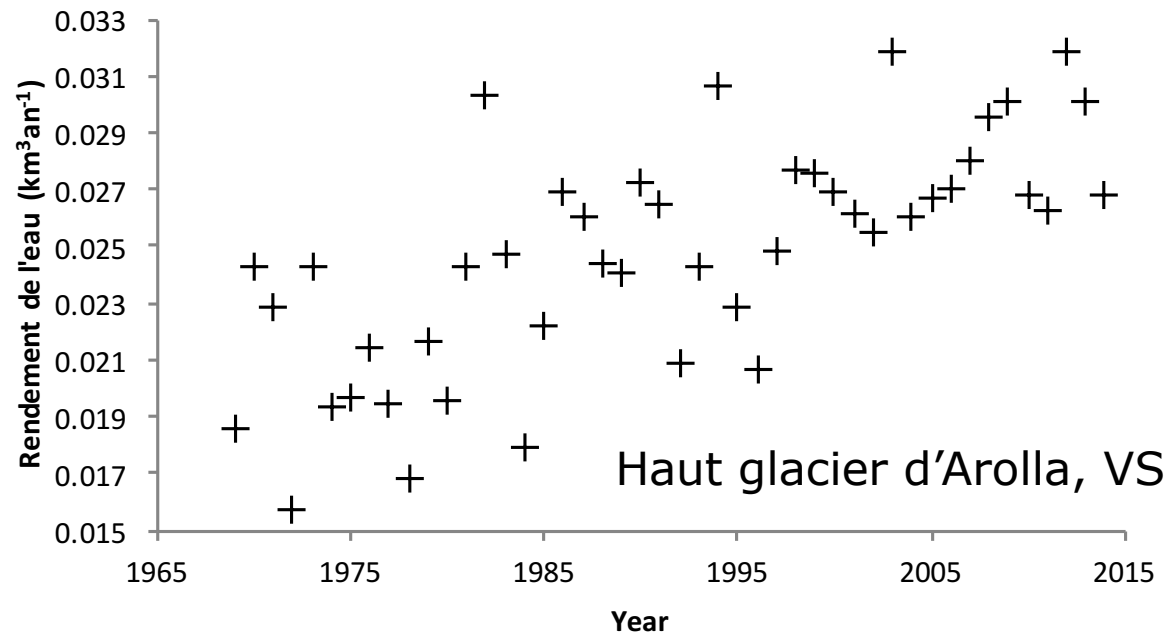
1. Glaciers deviennent plus petit
2. Le liens avec le réchauffement
3. Le rendement de l'eau – « peak water »
4. Le rendement des sédiments – « peak sediment »

Compensation :

années avec moins des précipitations sont compensés par la fonte de glace

Peak water :

quand un glacier devient très petit, la fonte de glace n'est plus suffisante à compenser une pénurie des précipitations



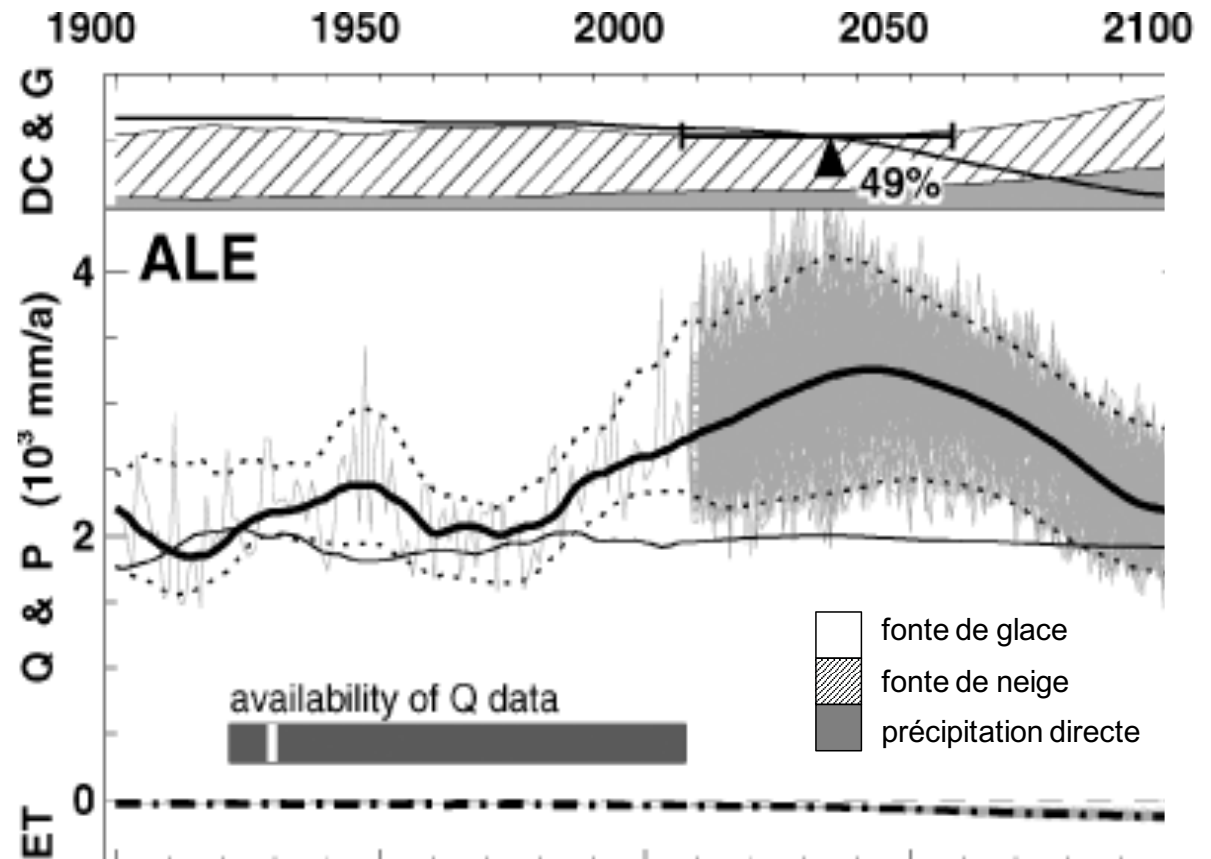
Le rendement de l'eau – « peak water »

Nos hypothèses:

1. Glaciers deviennent plus petit
2. Le liens avec le réchauffement
3. Le rendement de l'eau – « peak water »
4. Le rendement des sédiments – « peak sediment »

Peak water :

quand un glacier devient très petit, la fonte de glace n'est plus suffisante à compenser une pénurie des précipitations



Farinotti, D., Usselman, S., Huss, M., Bauder, A. and Funk, M., 2012. Runoff evolution in the Swiss Alps: projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios. *Hydrol. Process.*, 26: 1909–24

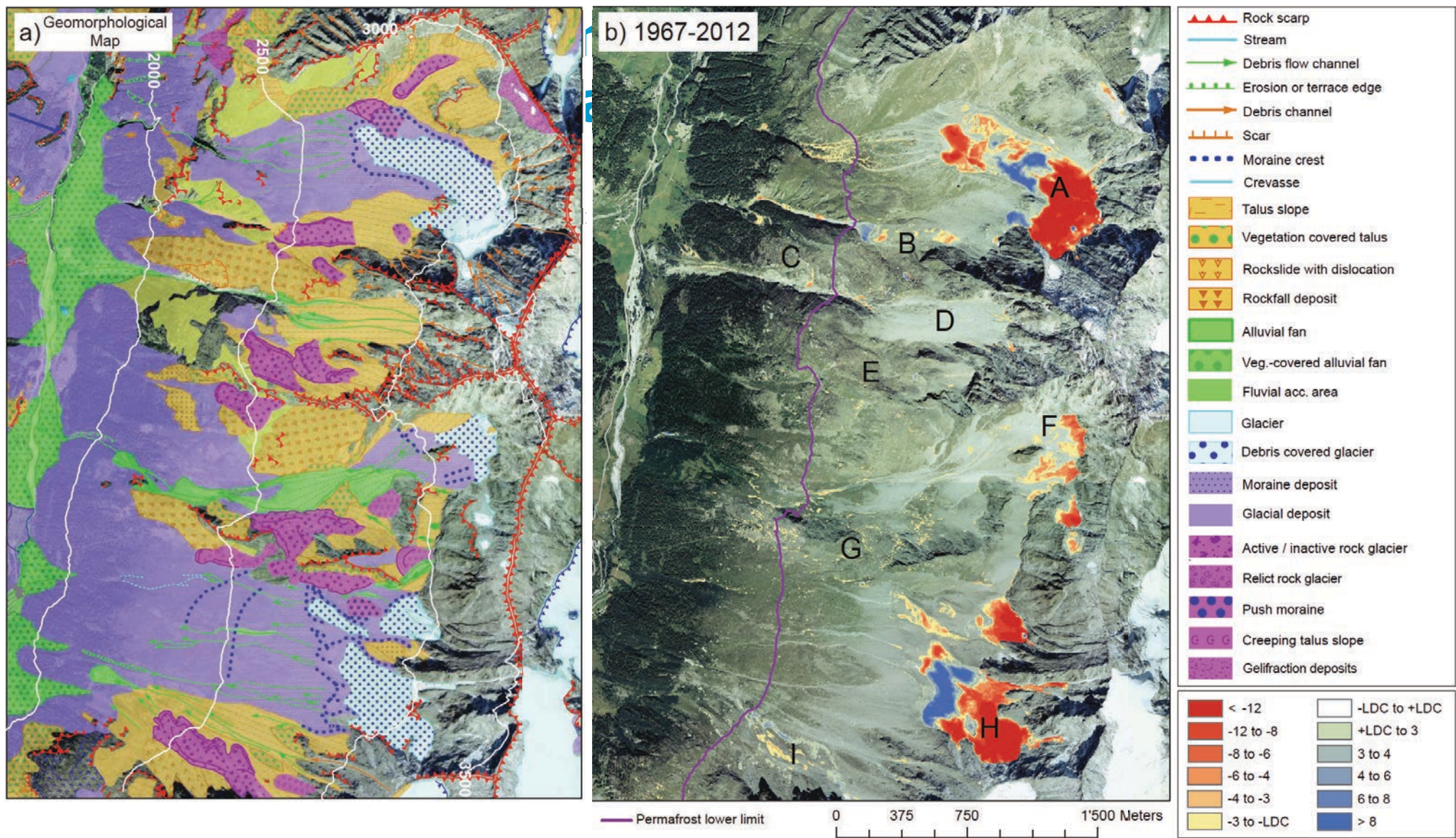
Le rendement des sédiments

« peak sediment »

Nos hypothèses:

1. Glaciers deviennent plus petit
2. Le liens avec le réchauffement
3. Le rendement de l'eau – « peak water »
4. Le rendement des sédiments – « peak sediment »





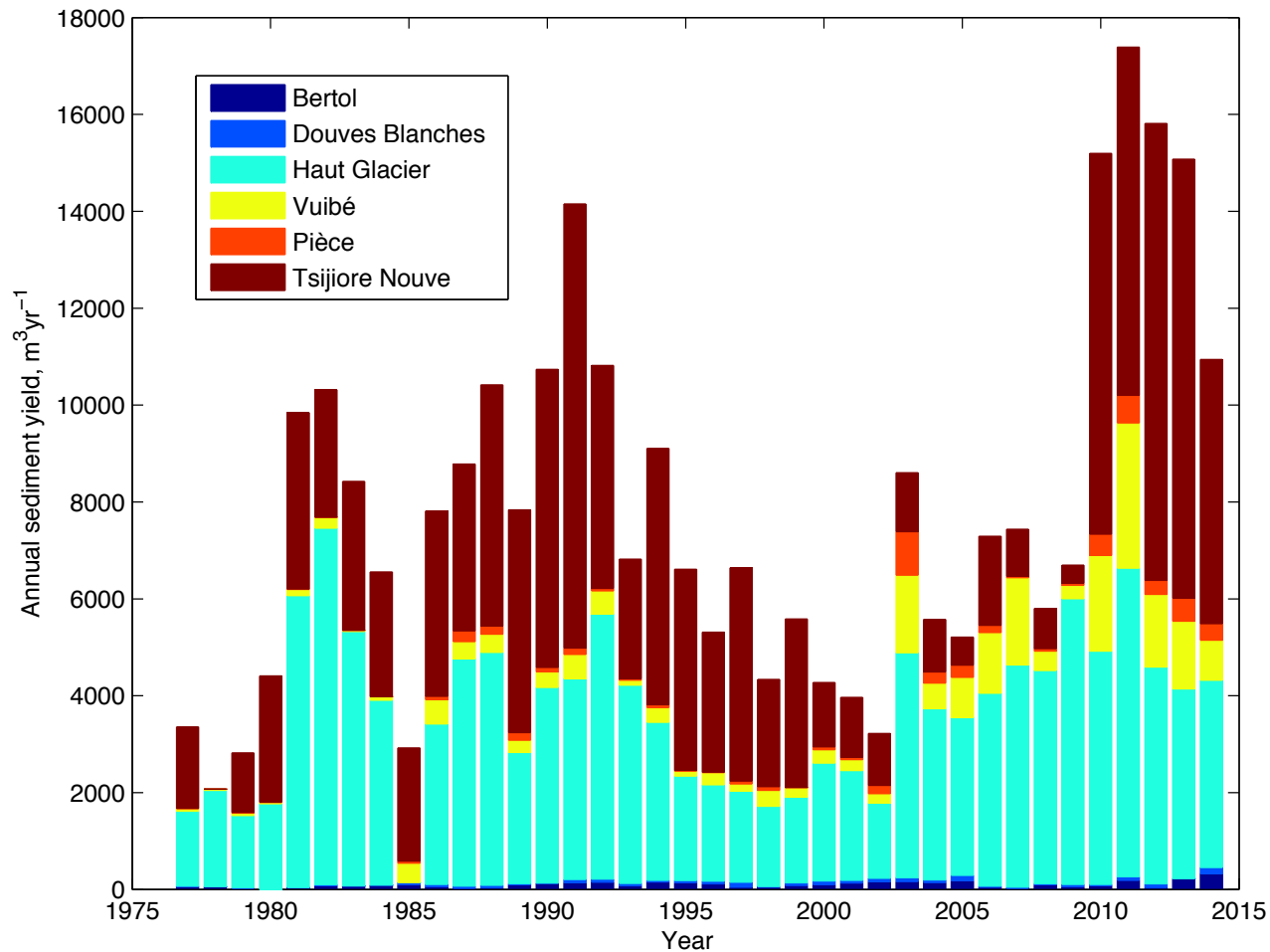
Micheletti, N., Lambiel, C. and Lane, S.N. 2015. *Journal of Geophysical Research - Earth Surface*

Micheletti, N. and Lane, S.N. 2016. Water yield and sediment export in small, partially glaciated Alpine watersheds in a warming climate. *Water Resources Research*

Le rendement des sédiments « peak sediment »

Nos hypothèses:

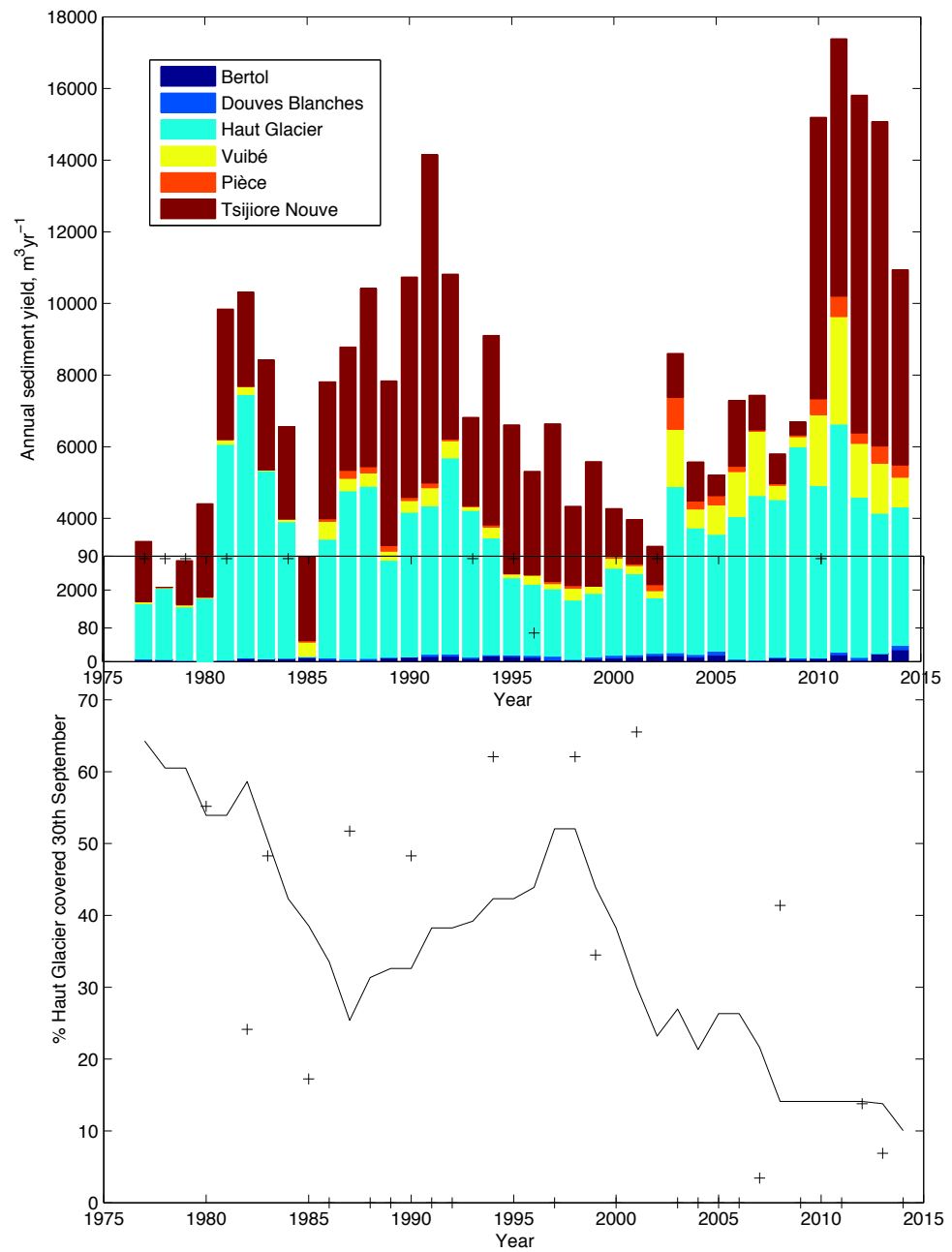
1. Glaciers deviennent plus petit
2. Le liens avec le réchauffement
3. Le rendement de l'eau - « peak water »
4. Le rendement des sédiments - « peak sediment »



Nos hypothèses:

1. Glaciers deviennent plus petit
2. Le liens avec le réchauffement
3. Le rendement de l'eau - « peak water »
4. Le rendement des sédiments - « peak sediment »

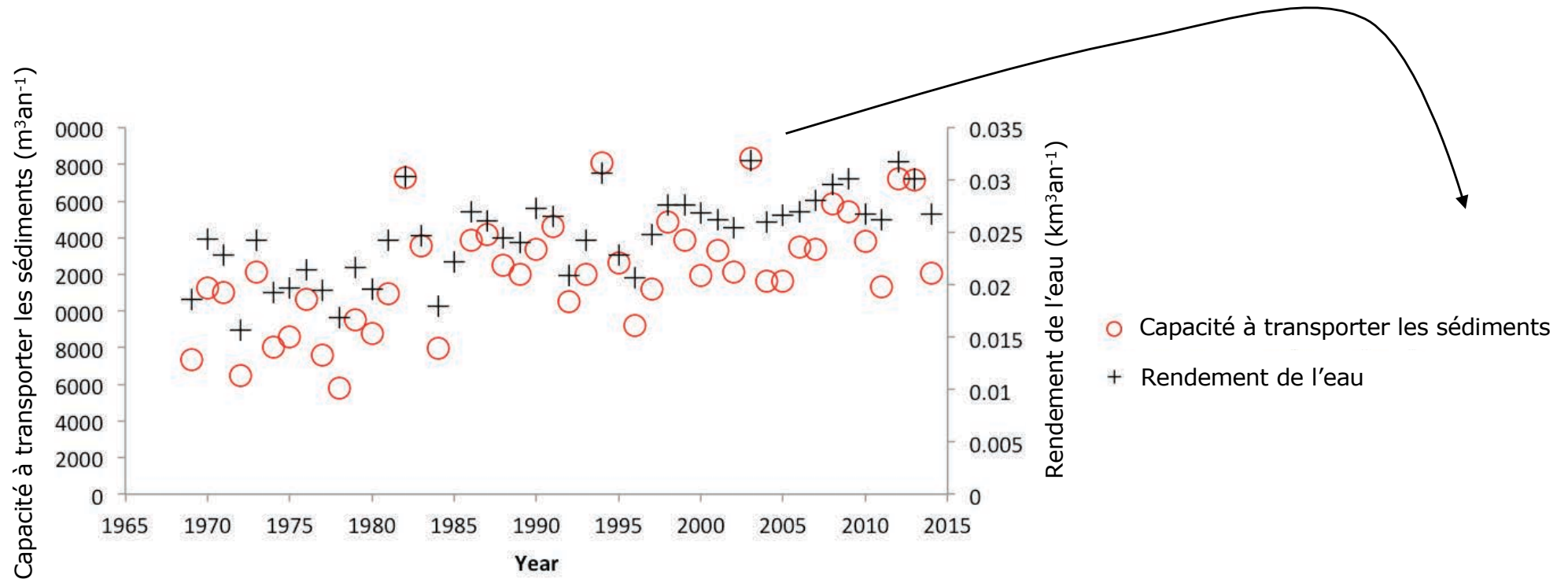
% Couverture neigeuse du Haut Glacier d'Arolla à la fin septembre



Le rendement des sédiments « peak sediment »

Nos hypothèses:

1. Glaciers deviennent plus petit
2. Le liens avec le réchauffement
3. Le rendement de l'eau - « peak water »
4. Le rendement des sédiments - « peak sediment »



Les messages clés

1. A nos jours, nos glaciers sont dans un état de décrue, avec un taux de recul plus élevé depuis les années 80s
2. Deux explications
 1. Moins d'accumulation à cause d'une fonte de neige plus élevée pendant l'été
 2. Une augmentation dans la fonte de glacé à cause de la fonte de neige plus rapide et une diminution dans l'albédo
3. Le rendement de l'eau des bassins englacés est élevé dans les années moins neigeuses à cause de l'effet albédo
4. Avec moins de glace, cette relation va changer et on dépasse « Peak Water »
 1. le rendement va diminuer
 2. le rendement va devenir plus variable
5. Le livraison des sédiments par les bassins englacés va suivre « Peak Water » et on peut parler de « Peak Sediment »

... nos remerciements ...

1. Aux membres de l'équipe qui ont aidé avec ce projet: surtout
 1. en thèse: Maarten Bakker, Chrystelle Gabbud, Natan Micheletti, Gilles Antoniazza
 2. en master: Marie Boillat, Pascal Perolo, Benoît Regamey, Lisa Ruëger, Sébastien Ruttiman, Jean-Noël Saugy, Amélie Savioz, Réanne Meylan
2. Aux collègues Lausannois, surtout Christian Kaiser, Christophe Lambiel et Emmanuel Reynard
3. Aux collègues des projets SEDFATE et HYDROENV (Paolo Burlando, Stéphanie Giradrclos, Jean-Luc Loizeau, Peter Molnar, Paolo Perona, Christopher Robinson, Fritz Schlunegger et doctorants)
4. Au soutien du Fonds National Suisse, des états de Vaud et du Valais et la commune d'Evolène
5. À la Grande Dixence SA, Alpiq SA et HYDRO Exploitation SA pour l'autorisation d'utiliser leurs données (et surtout Michel Follonier, Christian Constantin, Damien Courtine, Michael Imboden, Eric Zimmerli)
6. Aux résidents et propriétaires du Val d'Arolla et surtout Joan Pralong et Jean-Paul et Ghislaine Bornatici (Hôtel de la Tsa)
7. La société de la Murithienne

