

Activité avalancheuse et changement climatique dans les Alpes, enjeux pour la mécanique

T. Faug et al.

Unité de Recherche Erosion Torrentielle Neige & Avalanches
Irstea - Univ. Grenoble Alpes



Partie I – **Activité avalancheuse et (changement) climat(ique)**

- Passé
- Evolutions futures ?

Partie II – **Enjeux pour la mécanique**

I- Climat & avalanches

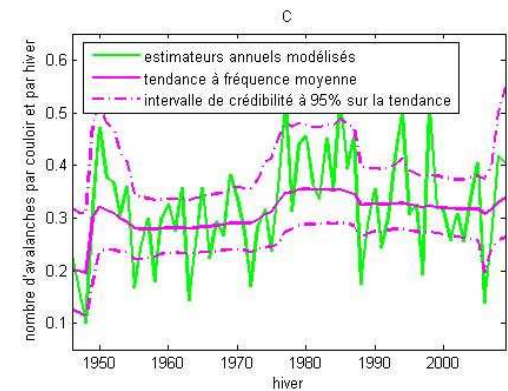
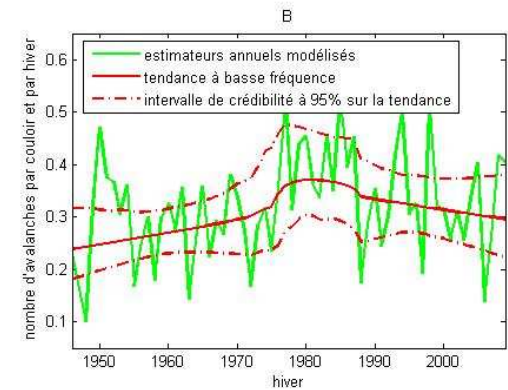
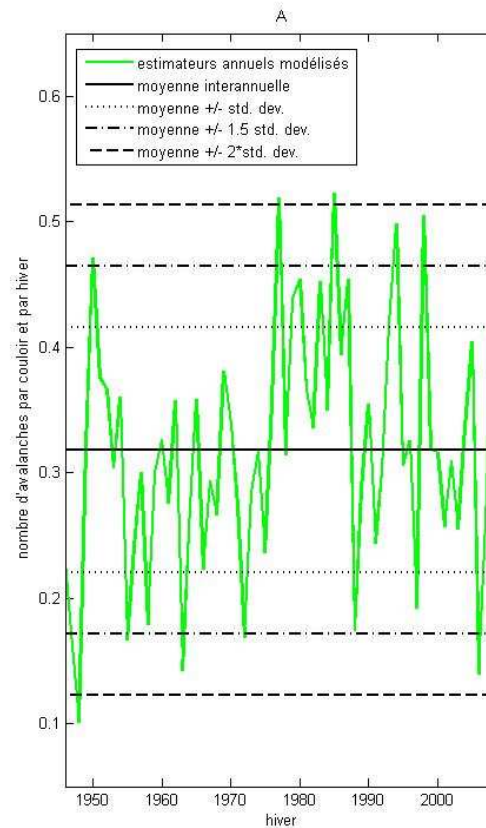
Passé

Enquête permanente sur les avalanches (EPA): chronique des événements avalancheux (depuis 1899 en Savoie)

Nombre d'avalanches par couloir et par hiver sur la période 1946-2008 (Alpes françaises)

Tendance: **apparition d'un maximum** (bien que peu marqué) autour des années 80

Forte **variabilité annuelle** (hiver)



Eckert, rapport DGPR (2011)

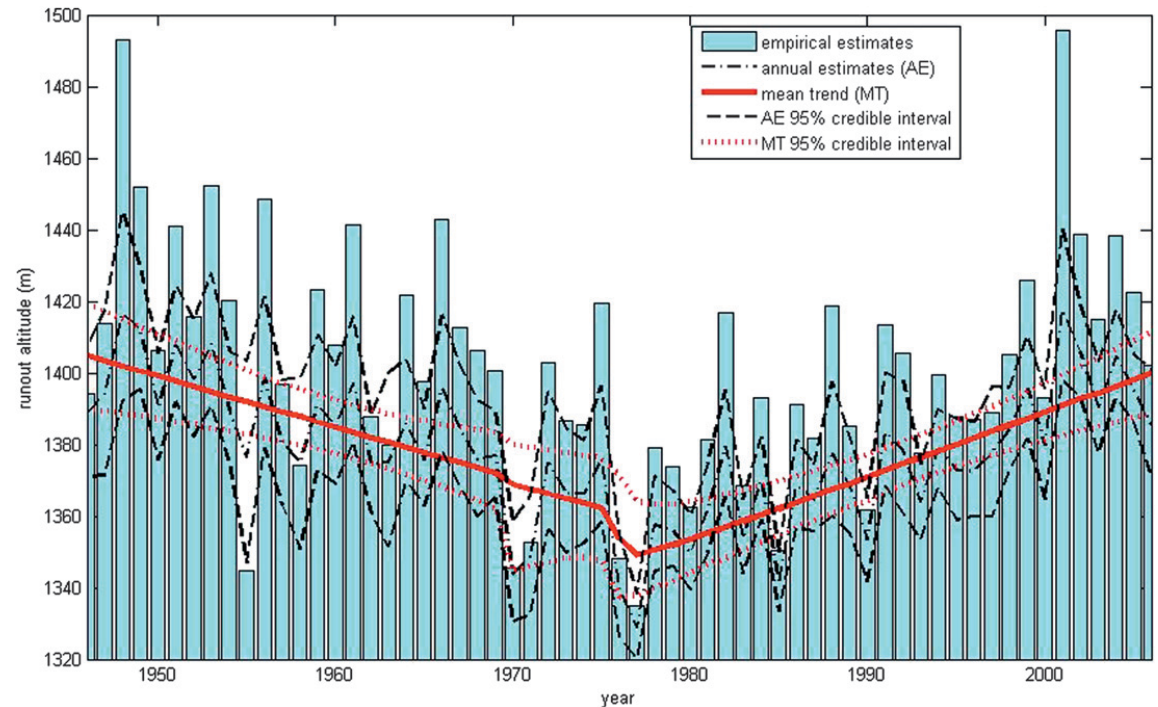
I- Climat & avalanches

Passé

Enquête permanente sur les avalanches (EPA)

Fluctuation annuelle de l'altitude d'arrêt des avalanches dans un couloir moyen sur la période 1946-2008 (Alpes françaises + Pyrénées)

Tendance: apparition d'un **minimum significatif**, en 1980

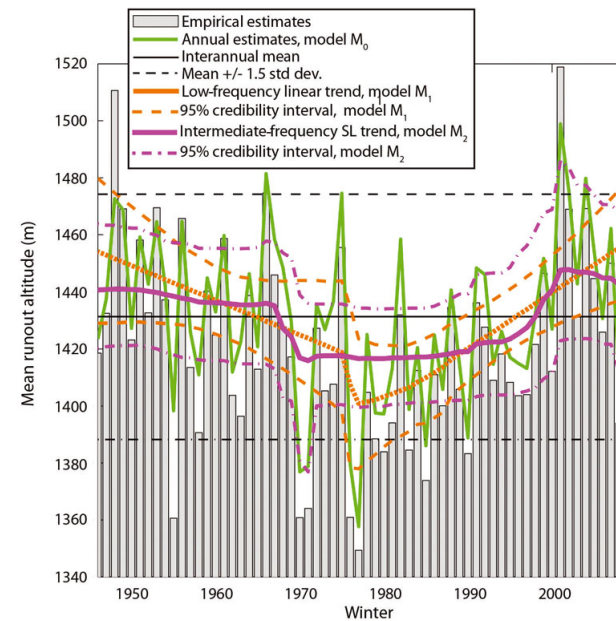
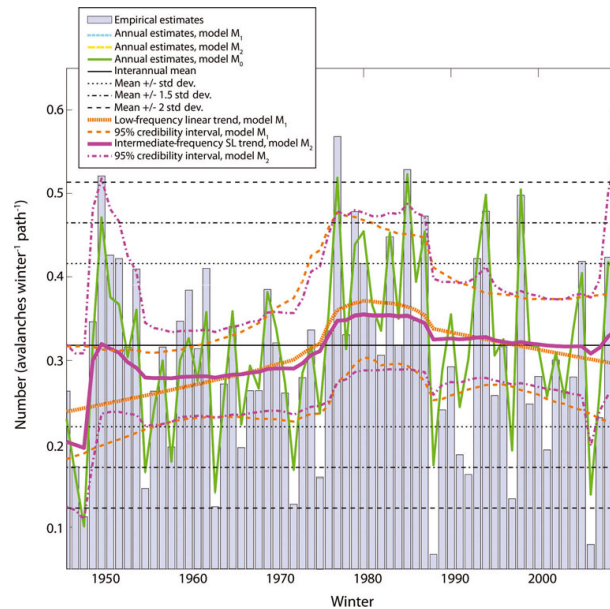


Eckert et al., *Journal of Climate* (2010)
Eckert, rapport DGPR (2011)

I- Climat & avalanches

Passé

- Ce sont des tendances “globales”,
 - Confirmées, à l'échelle des **Alpes françaises**, par [Eckert et al., Journal of Glaciology \(2013\)](#)



- Et affinées: Effet de la latitude (Alpes du nord versus Alpes du sud) ? Effet de l'altitude ? Avalanche rares ? Qualité de la neige / types d'écoulement ?

I- Climat & avalanches

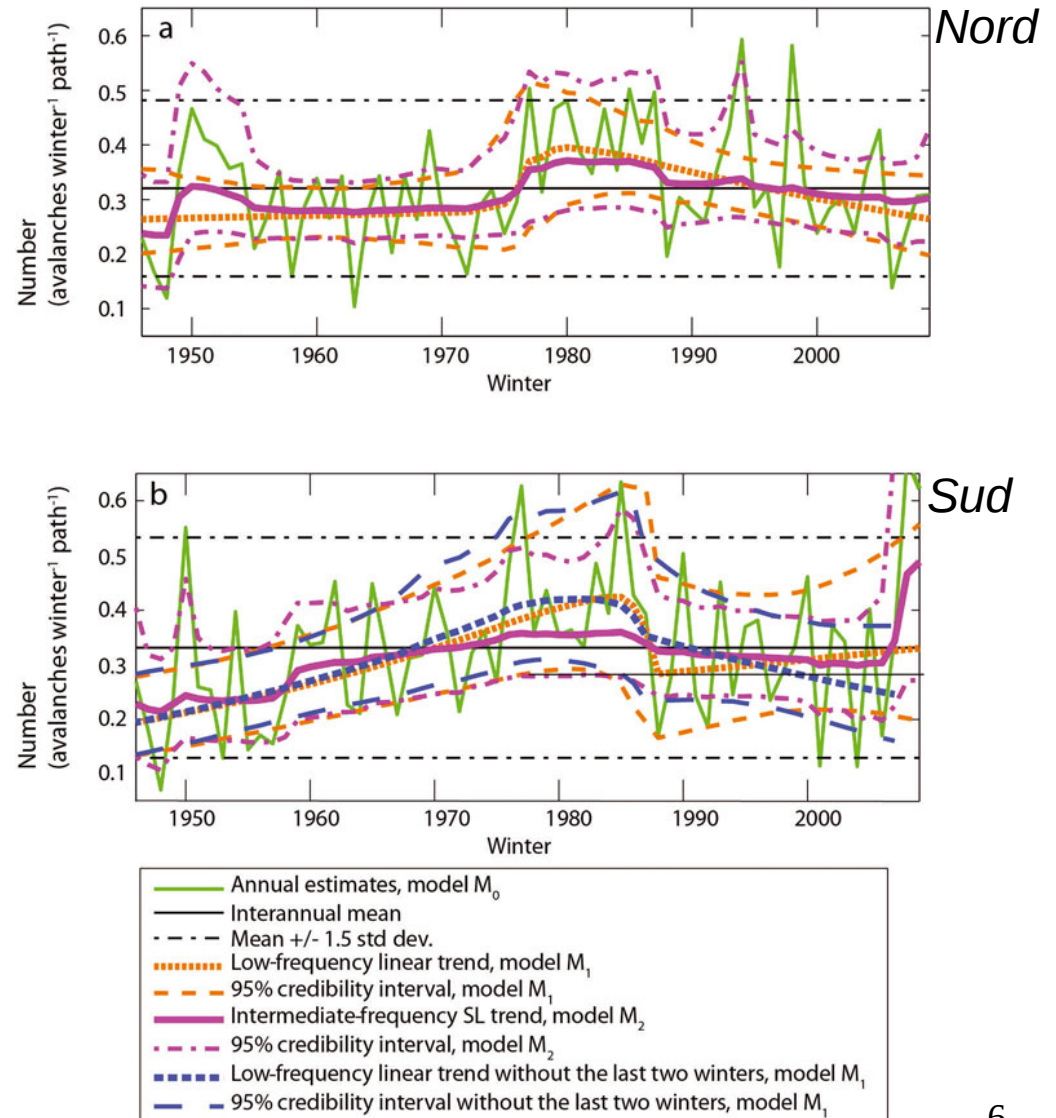
Passé

Nombre d'avalanches sur la période 1946-2010 (Alpes françaises), par année/hiver sur un couloir moyen

Alpes du Nord versus Alpes du Sud : couplage partiel

Pour les Alpes du Sud: avec et sans les hivers 2008-2009 et 2009-2010

Eckert et al., *Journal of Glaciology* (2013)

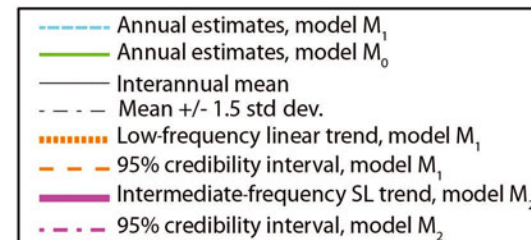
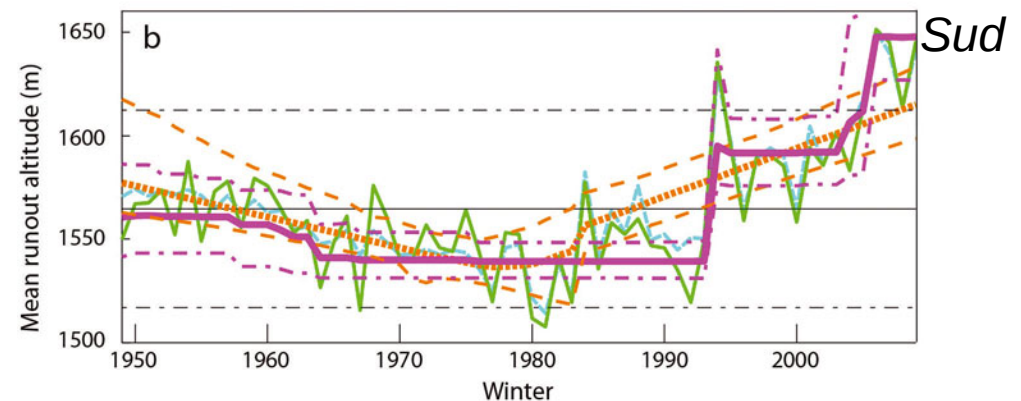
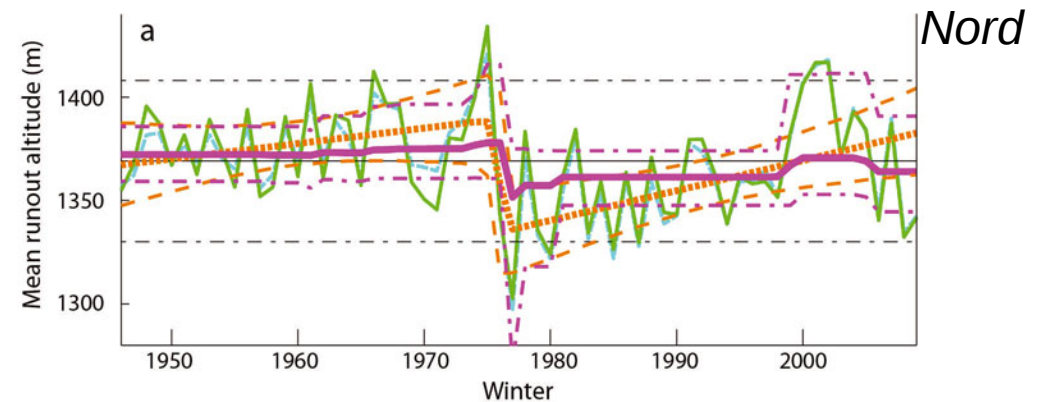


I- Climat & avalanches

Passé

Altitude d'arrêt moyenne sur la période 1946-2010 (Alpes françaises), par année/hiver sur un couloir moyen

Alpes du Nord et Alpes du Sud: découplage

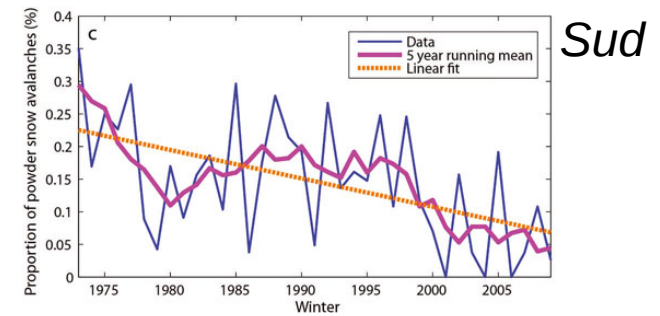
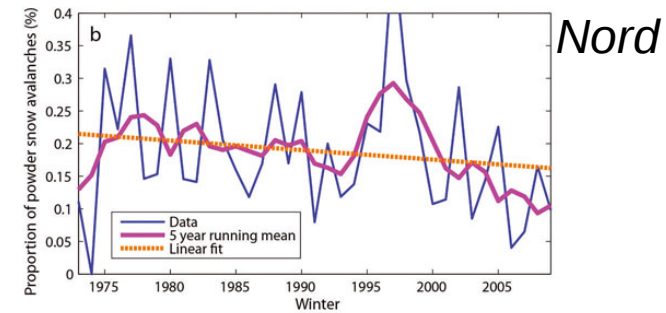
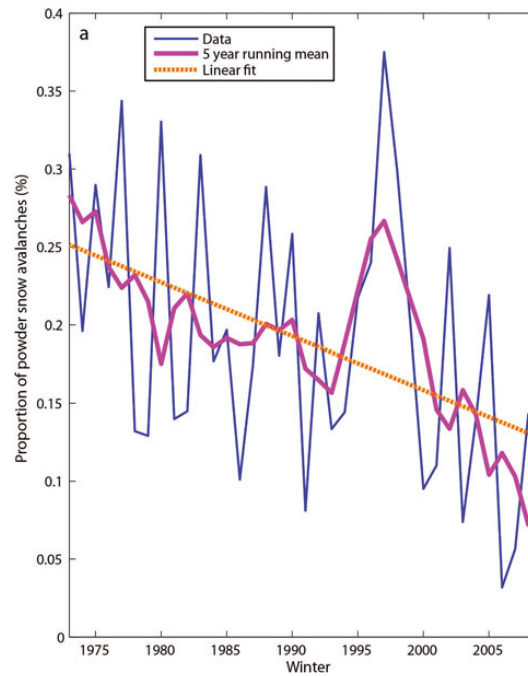


Eckert et al., *Journal of Glaciology* (2013)

I- Climat & avalanches

Passé

Proportion d'**avalanches aérosol** (avalanche de neige poudreuse), en **nette diminution** !



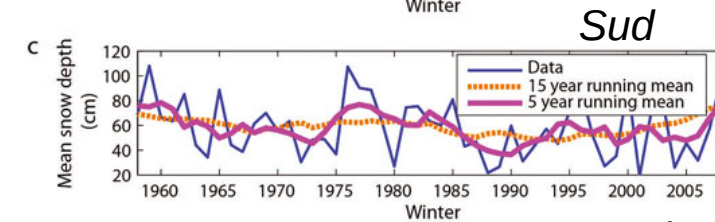
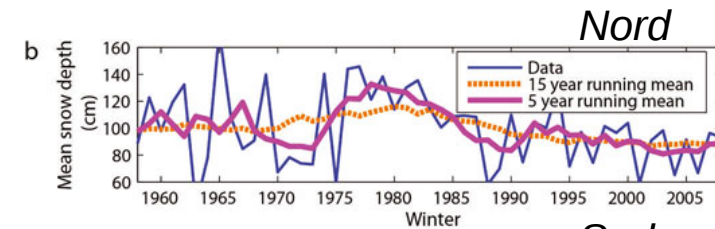
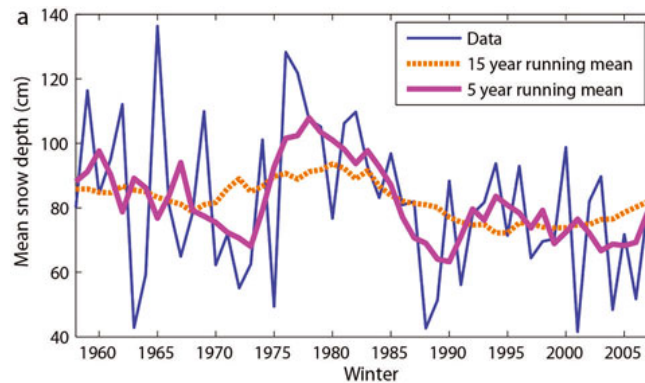
Eckert et al., *Journal of Glaciology* (2013)

I- Climat & avalanches

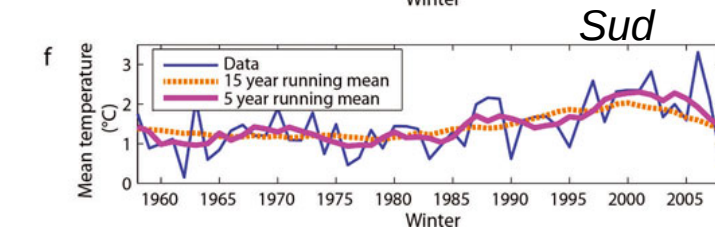
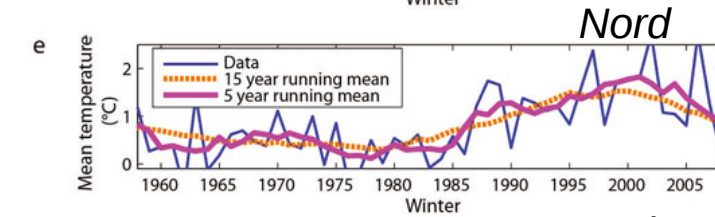
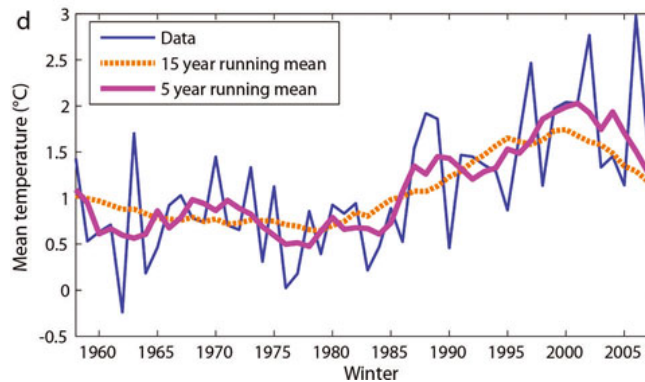
Passé

Corrélations avec les covariables climatiques

Contrôle par la **hauteur moyenne de manteau neigeux** à 2400m (surtout Alpes du nord)



Contrôle par la **température moyenne** à 2400 m (surtout Alpes du sud)



Eckert et al., *Journal of Glaciology* (2013)

Durand et al., *Journal of Applied Meteorology and Climatology* (2009)

I- Climat & avalanches

Passé

Conclusions claires

- Point de changement marqué autour de 1980:

- .maximum d'activité avalancheuse (nombre)
- .minimum d'altitude moyenne d'arrêt
- .retrait net des avalanches rares
- .retrait net des aérosols
- .augmentation de la proportion d'avalanches de neige humide

Eckert et al., *Journal of Glaciology* (2013)

Naaim et al., *La Houille Blanche* (2016)

- **Cohérent avec l'évolution du manteau neigeux et le climat:** (i) hivers rigoureux sur la période 1960-1980 (avancées des glaciers), puis (ii) période de réchauffement marqué (avec quelques hivers rigoureux plus récemment)

Durand et al., *Journal of Applied Meteorology and Climatology* (2009)

Et **limites** de ces travaux **à avoir en tête...**

I- Climat & avalanches

Projections futures

- Evolutions à venir dans les **Alpes françaises** pour le milieu et la fin du 21^{ème} siècle, en contexte de changement climatique:
 - Variables associées au manteau neigeux ?
 - Activité avalancheuse ?

Castebrunet et al., *The Cryosphere* (2014)

I- Climat & avalanches

Projections futures

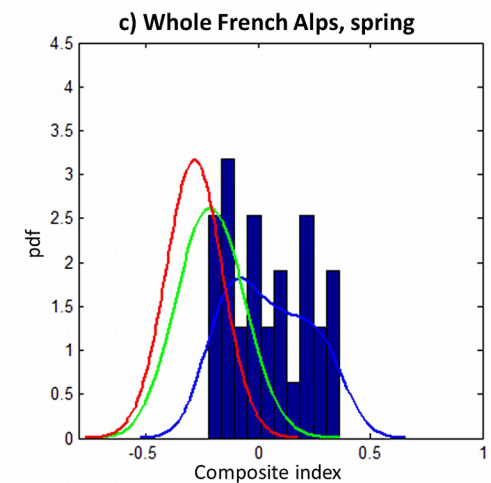
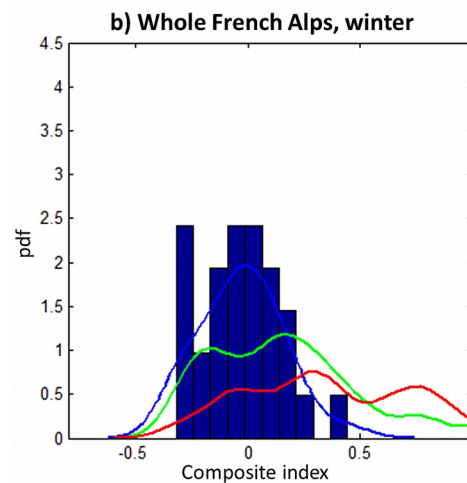
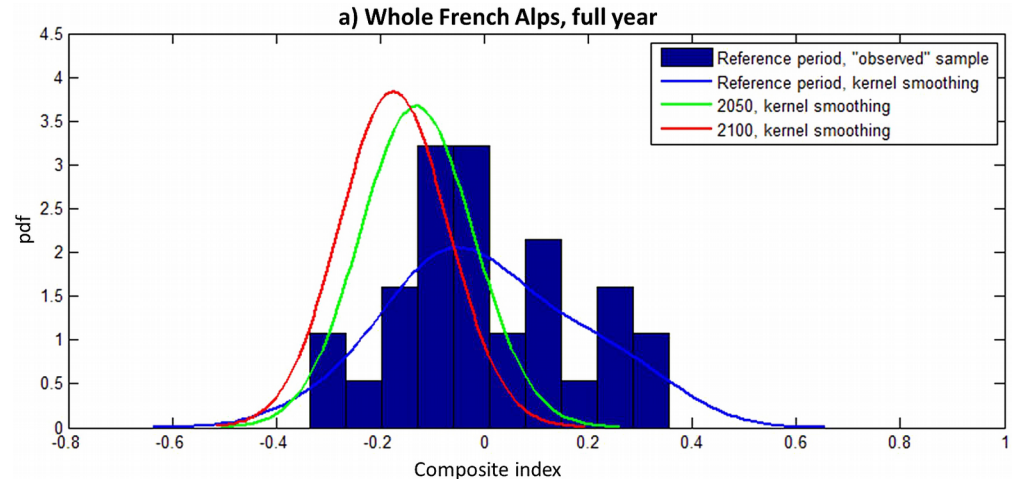
Index composé (MEPRA-manteau neigeux/climat & EPA-activité avalancheuse)

Période de référence (bleu)

Projections 2050 (vert) et 2100 (rouge)

Diminution globale

Différence entre hiver (augmentation) et printemps (diminution)



Castebrunet et al., *The Cryosphere* (2014)

12

I- Climat & avalanches

Projections futures

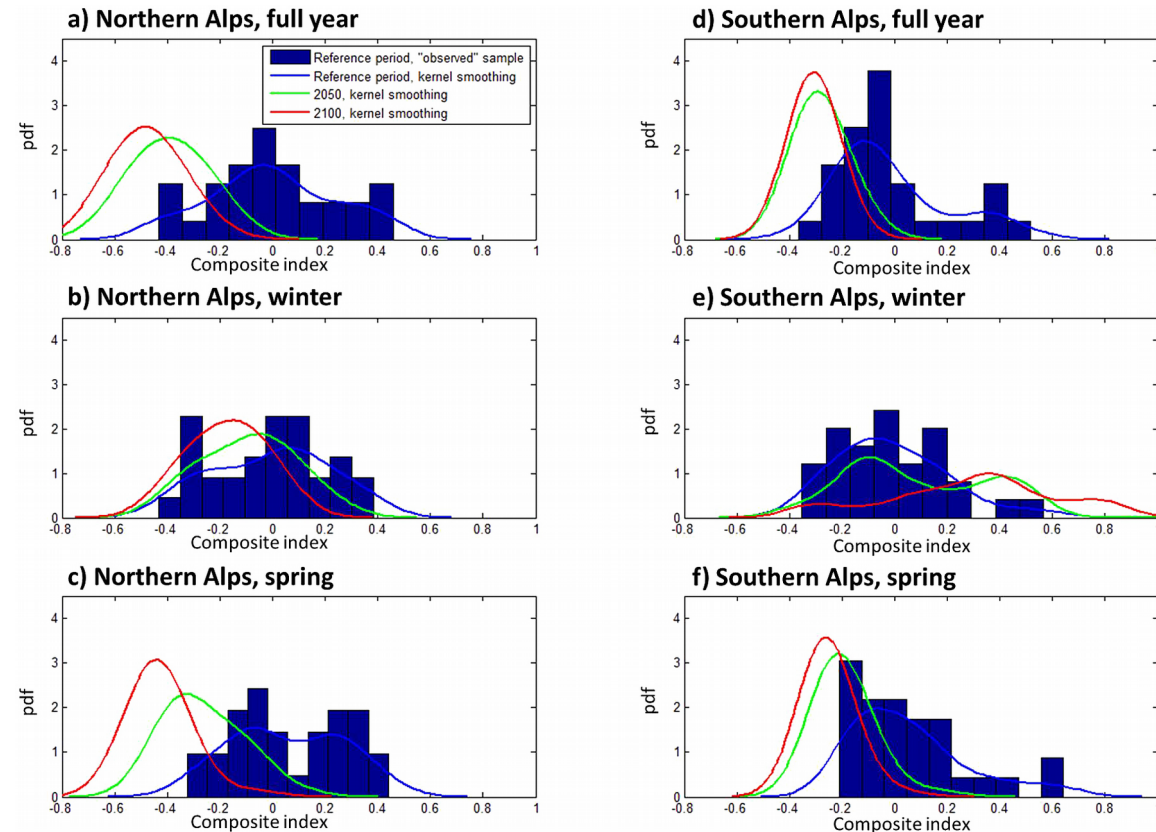
Index composé (MEPRA: manteau neigeux/climat & EPA: activité avalancheuse)

Période de référence (bleu)

Projections 2050 (vert) et 2100 (rouge)

Différences:

- hiver / printemps
- Alpes du nord / Alpes du sud



Castebret et al., *The Cryosphere* (2014)

I- Climat & avalanches

Projections futures

IPCC Special Report 2019 – The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate

Section spécifique sur les avalanches de neige

Résumé:

*In summary, there is medium evidence and high agreement that observed changes in avalanches in mountain regions will be exacerbated in the future, with generally a **decrease in hazard at lower elevation**, and **mixed changes at higher elevation** (increase in avalanches involving wet snow, no clear direction of trend for overall avalanche activity).*

II- Enjeux pour la mécanique

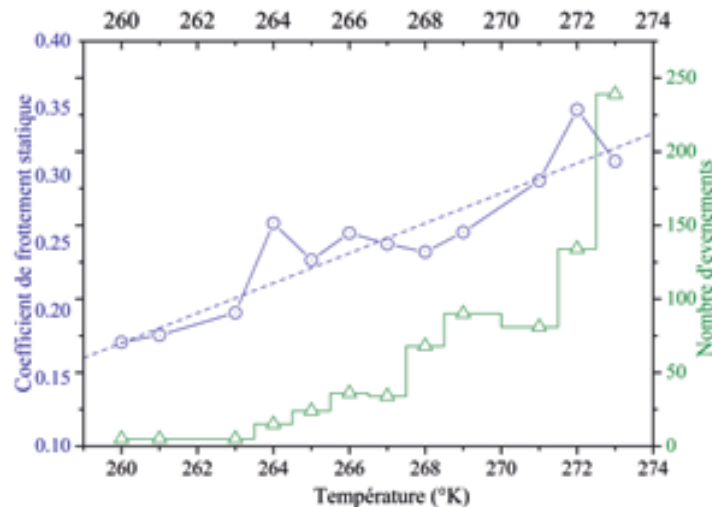
- Mise en évidence de **corrélations** entre:
 - (d'un côté) activité avalancheuse (nombre, altitude d'arrêt) qui dépend du temps/espace
 - Et (de l'autre côté) analyses nivo-météorologiques, covariables climatiques (température, épaisseur de manteau neigeux) qui dépendent du temps/espace

MAIS pas de lien de causalité...

- **La mécanique** (et la thermodynamique) **doit aider à établir ce lien !**

II- Enjeux pour la mécanique

- Un exemple récent: **lien entre altitude d'arrêt des avalanches et température mis en évidence de manière plus explicite** par [Naaim et al., Journal of Glaciology \(2013\)](#)
 - Rétro-analyses de 730 avalanches sur 26 couloirs (période 1958-2009) dans la haute vallée de l'Arve (données EPA) par simulations numériques basées sur un modèle St Venant avec rhéologie de Voellmy + réanalyses nivo-météorologiques de [Durand et al. \(2009\)](#)



Relation quasi-linéaire entre coefficient de frottement (à vitesse nulle) et température

Cohérent avec les données de rhéométrie de la neige

$$\mu = \mu_0 + \frac{g}{\xi} Fr^2$$

II- Enjeux pour la mécanique

- **Nouveaux modèles de propagation des avalanches: s'attaquer au cas complexe de la neige humide**



Aérosol



Dense sec (froid)



Dense humide (chaud)



$d \sim 1\text{mm}$

Effet du changement climatique



$d_{agg} \sim 100d$
Granulaire sec



$10^3 d$
Granulaire humide



Granulaire + Viscoplastique

II- Enjeux pour la mécanique

- Quelques exemples de questions traitées/à traiter:
 - Question qui n'est pas nouvelle mais dont l'enjeu est aujourd'hui renforcé: **granulation de la neige** [Steinkogler et al., Journal of Geophysical Research \(2015\)](#)

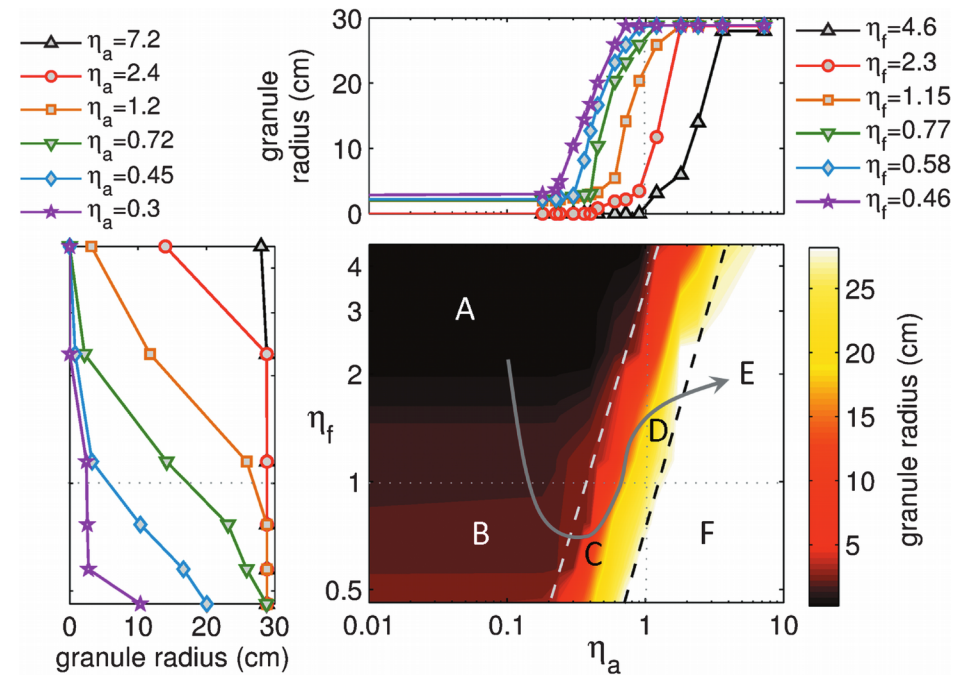
Tests avec de la neige



Fragmentation:
$$\eta_f = \frac{\sqrt{m_p k_n} \langle v \rangle}{F_f^t}$$

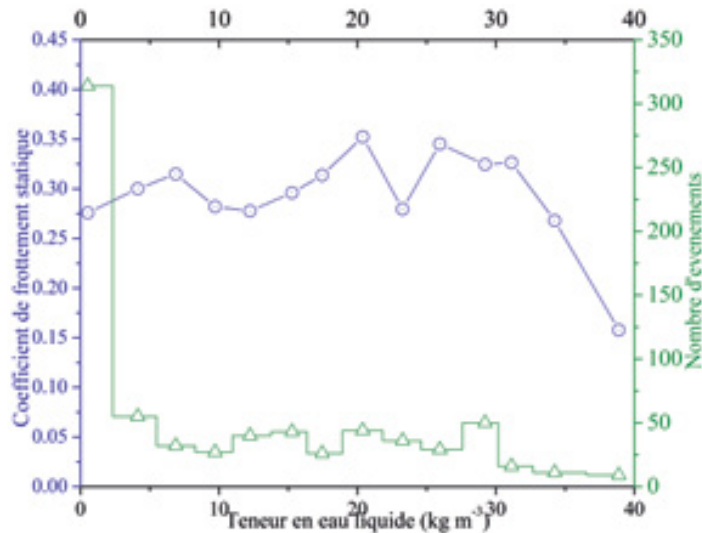
Agrégation:
$$\eta_a = \frac{P d^2}{F_a}$$

Simulations DEM

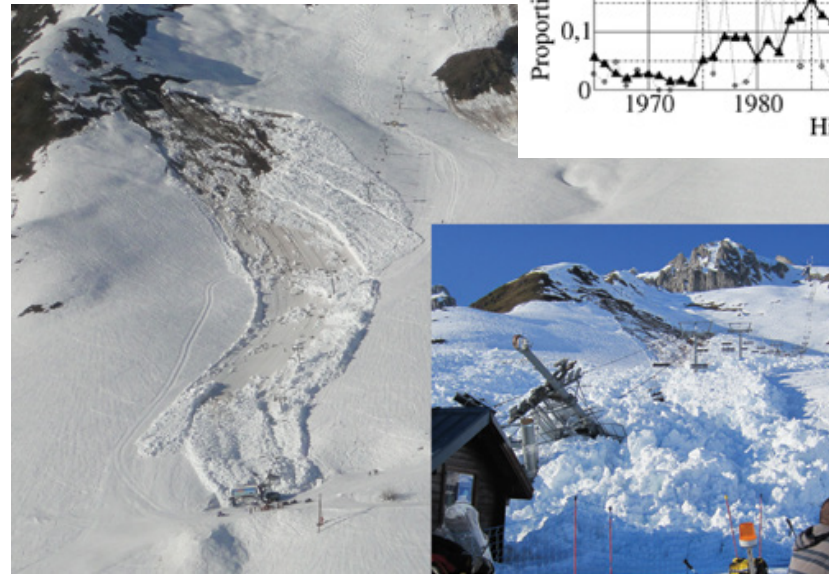


II- Enjeux pour la mécanique

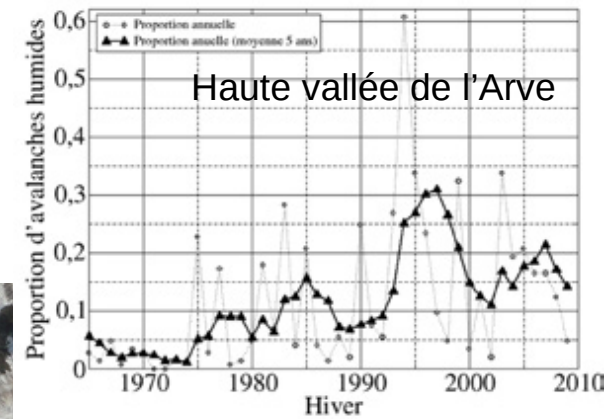
- Quelques exemples de questions traitées/à traiter:
 - Enjeu important: **grande mobilité des avalanches de neige très humide**
Naaim et al., *Journal of Glaciology* (2013)



$$\mu = \mu_0 + \frac{g}{\xi} Fr^2$$

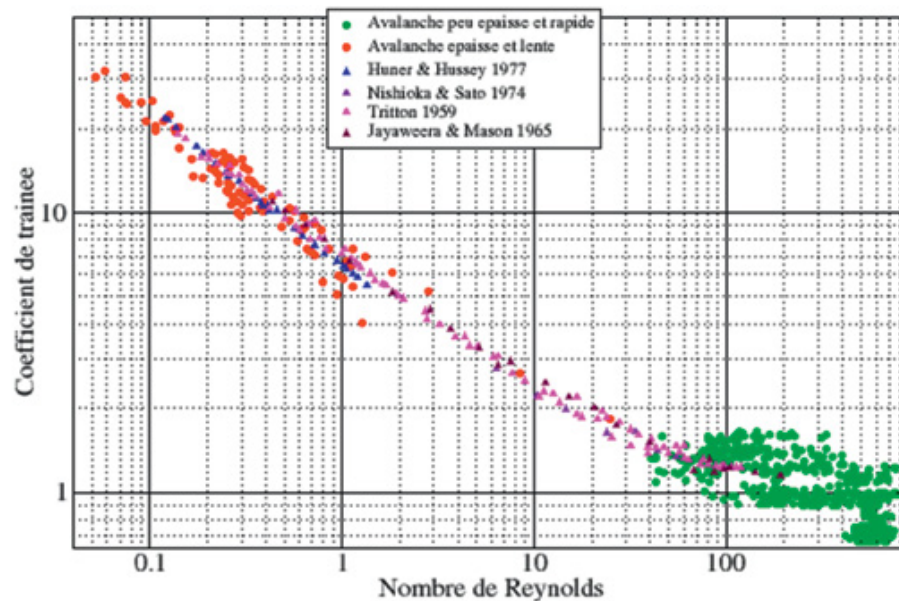


Avalanche à St François Longchamp, 2 mars 2012
Naaim et al., *La Houille Blanche* (2016)



II- Enjeux pour la mécanique

- Quelques exemples de questions traitées/à traiter:
 - **Force d'impact des avalanches de neige humide** sur les structures [Sovilla et al., Journal of Glaciology \(2010\)](#), [Ancy & Bain, Reviews of Geophysics \(2015\)](#), [Sovilla et al., CRST \(2016\)](#), [Naaim et al., La Houille Blanche \(2016\)](#), etc.



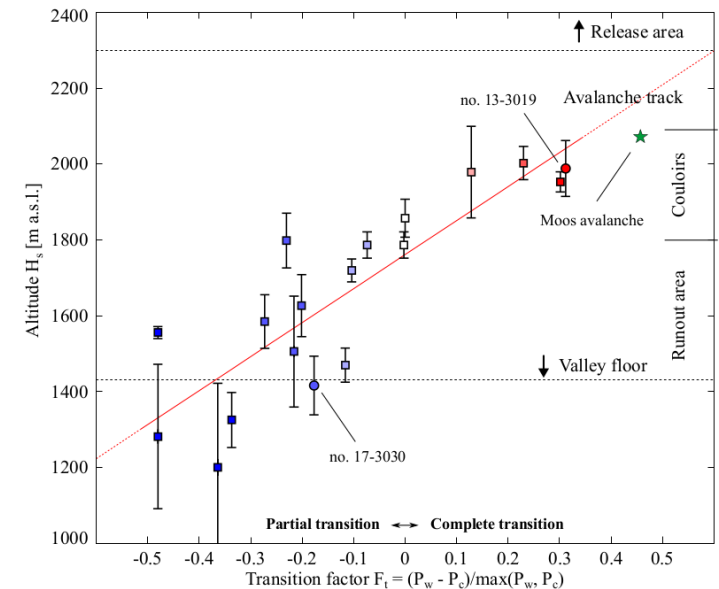
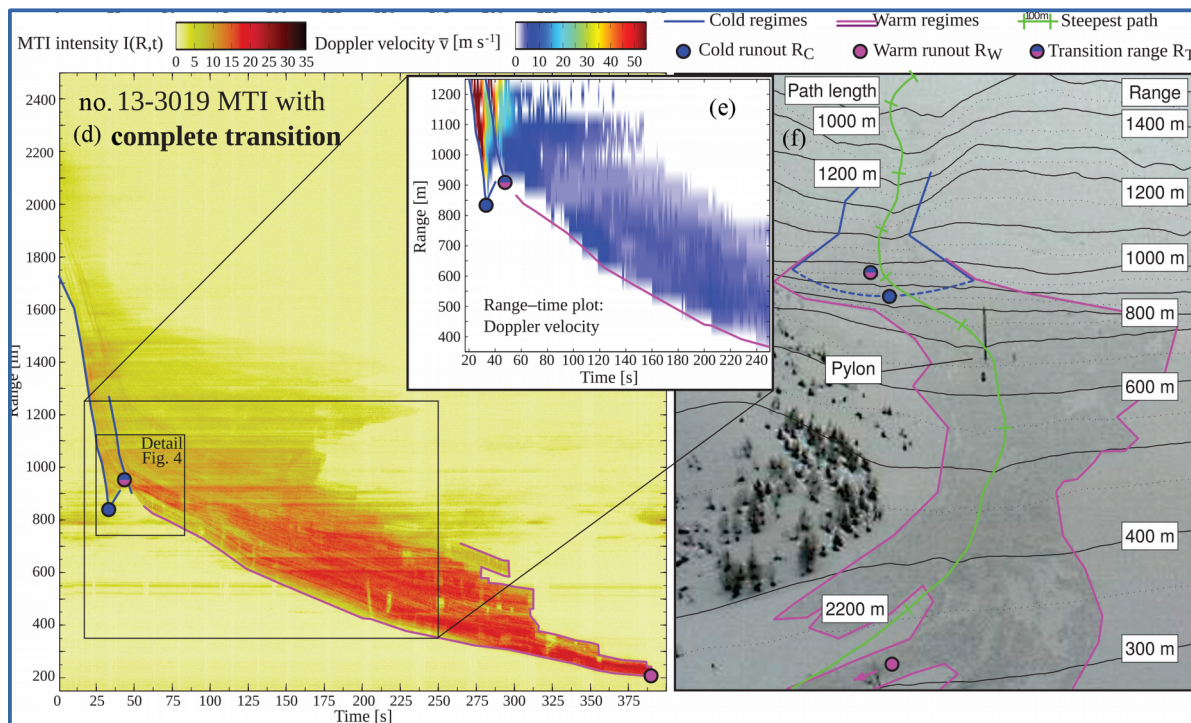
Nombre de Reynolds équivalent
et coefficient de traînée

Analogie entre avalanches de
neige humide (lente et épaisse) et
écoulements rampants de fluides
visqueux

[Naaim et al., La Houille Blanche \(2016\)](#)

II- Enjeux pour la mécanique

- Quelques exemples de questions traitées/à traiter:
 - **Transition écoulement “froid” / “chaud”** au cours d'un même événement: départ à haute altitude (neige froide/sèche), propagation à des altitudes plus basses (neige chaude/humide) Köhler et al., *The Cryosphere* (2018)



Merci pour votre attention !