

# Modélisation climatique en région de montagne

Martin Ménégoz, Janvier 2022

Communauté  
UNIVERSITÉ Grenoble Alpes



# Modélisation climatique en région de montagne

- 
- A large, rugged mountain peak, likely the Matterhorn, partially obscured by low-hanging clouds at sunset. The sky is a clear, pale blue.
- 1/ A grande échelle
  - 2/ A l'échelle d'un massif
  - 3/ Applications

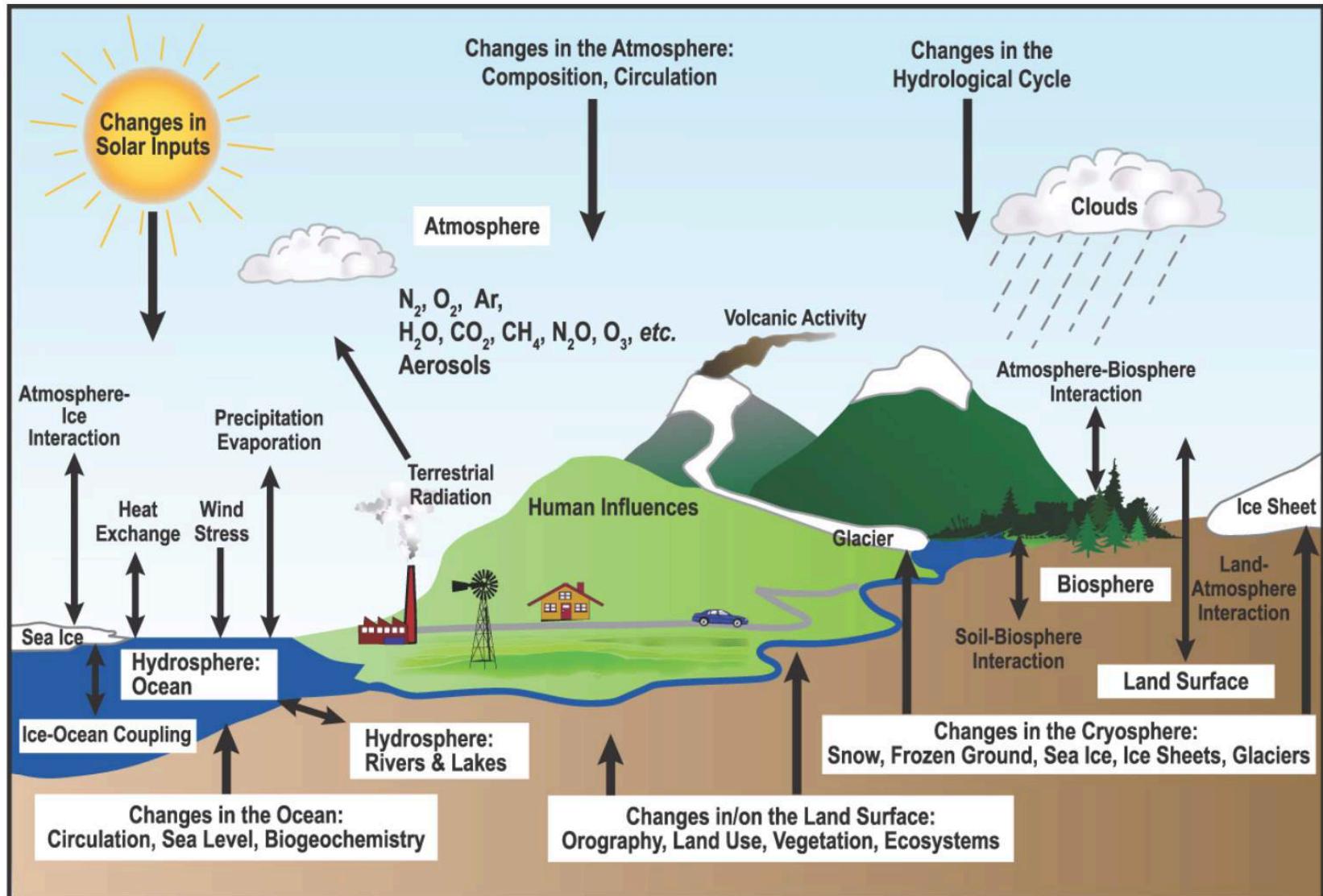
# Modélisation climatique en région de montagne

1/ A grande échelle



# Le système climatique

Océans <-> Atmosphère <-> surfaces continentales <-> autres composantes



Source : IPCC AR4 (2007) FAQ 1.2 Fig. 1.

# Définitions

**Climat = État moyen + variabilité climatique**

**Variabilité climatique = variabilité interne + forçages externes**

**Forçages externes = forçages anthropiques + forçages naturels**

**Variabilité naturelle = forçages naturels + variabilité interne**

# Définitions

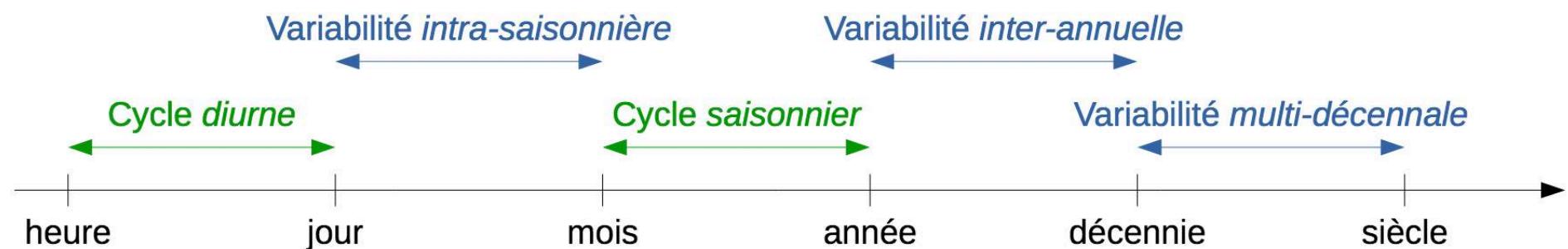
**Climat = État moyen + variabilité climatique**

**Variabilité climatique = variabilité interne + forçages externes**

**Forçages externes = forçages anthropiques + forçages naturels**

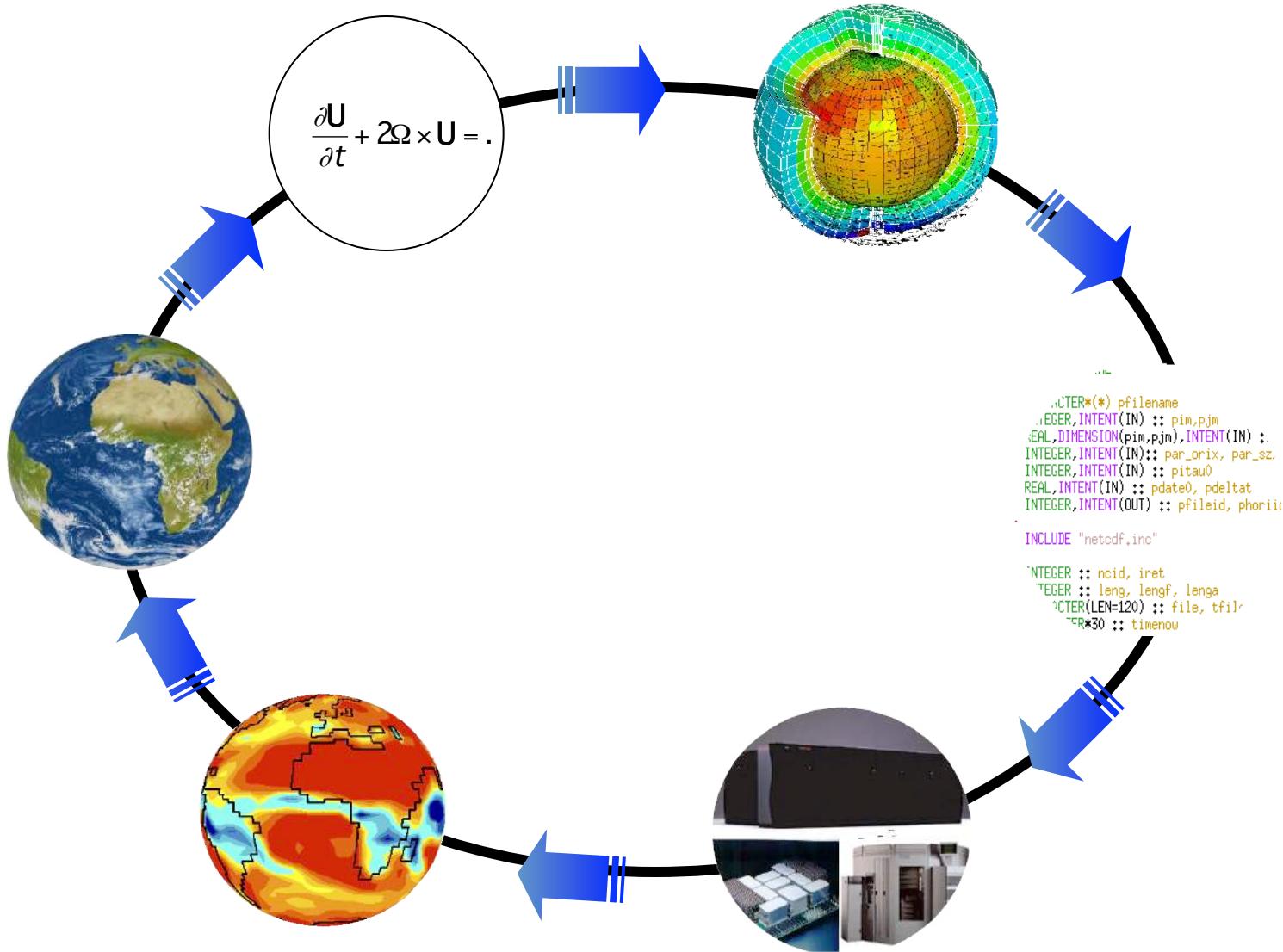
**Variabilité naturelle = forçages naturels + variabilité interne**

**Echelles de temps de la variabilité interne:**



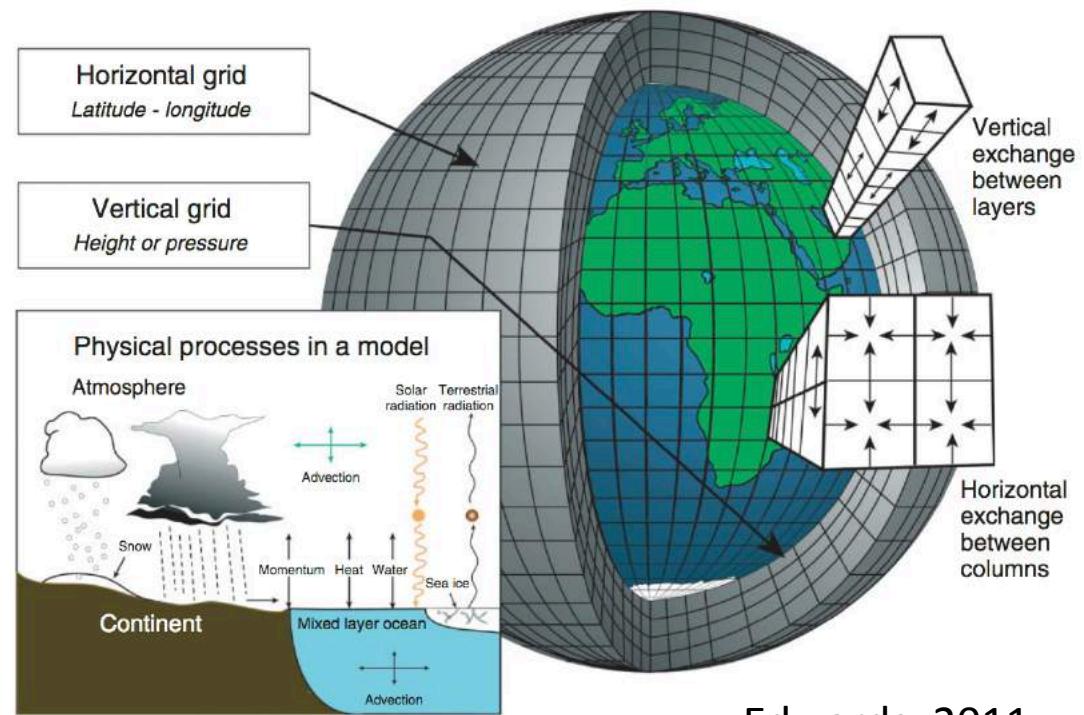
N.B. Les cycles **diurne** et **saisonnier** (variations énergétiques) ne sont pas de la **variabilité interne**.

# Développement des modèles



# Développement des modèles

- Discrétisation de l'espace ( $x,y,z$ ) et du temps ( $t$ )
- Résolution 3D de la dynamique ( $u,v$ , et traceurs)
- Schéma physique 1D : bilan d'énergie de surface, transfert radiatif, conduction thermique dans le sol...
- Paramétrisations des processus sous-maille: fraction du couvert neigeux, convection atmosphérique, etc...

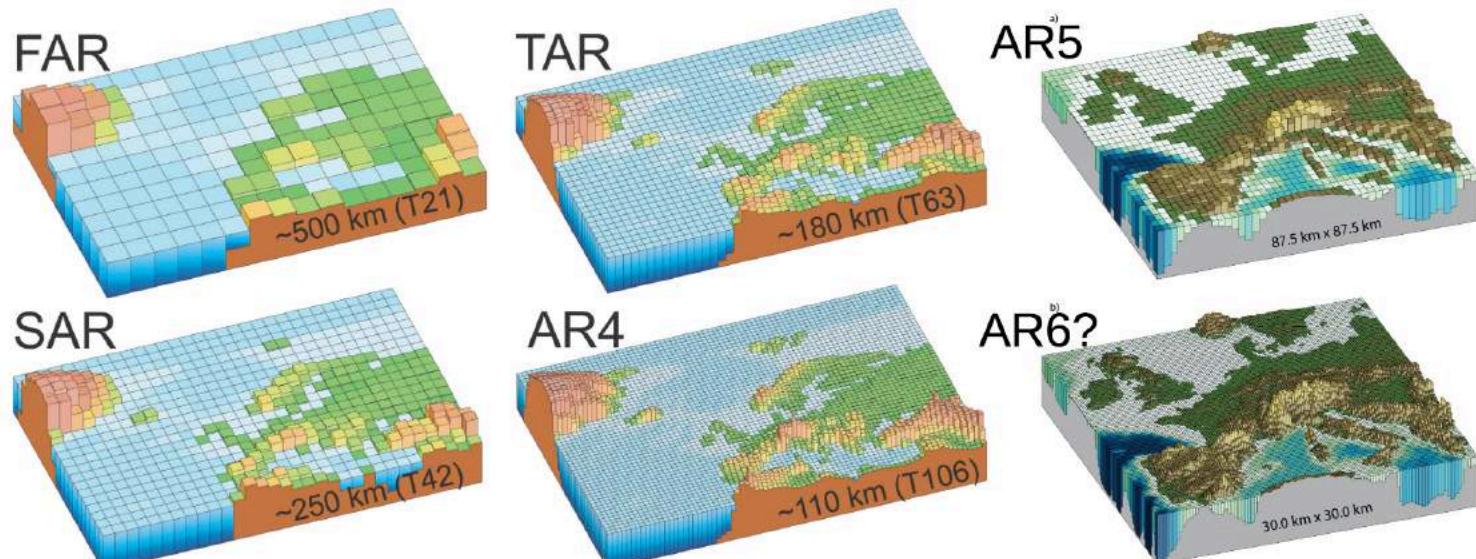


Edwards, 2011

# Développement des modèles

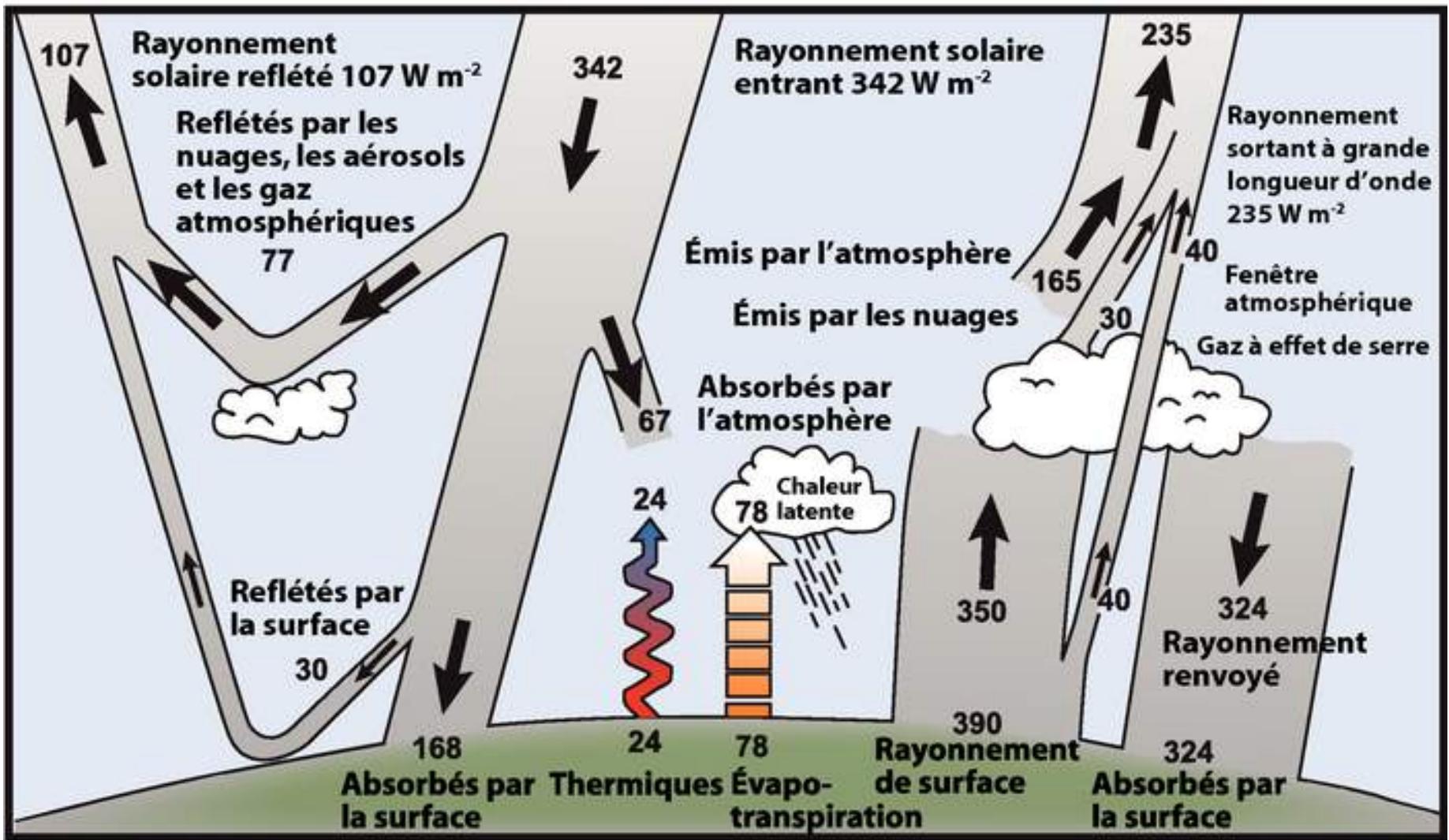
- Discrétisation de l'espace ( $x,y,z$ ) et du temps ( $t$ )
- Résolution 3D de la dynamique ( $u,v$ , et traceurs)
- Schéma physique 1D : bilan d'énergie de surface, transfert radiatif, conduction thermique dans le sol...
- Paramétrisations des processus sous-maille: fraction du couvert neigeux, convection atmosphérique, etc...

Grille typique des modèles lors des rapports successifs du GIEC  
(1991, 1995, 2001, 2007, 2013, 202?)



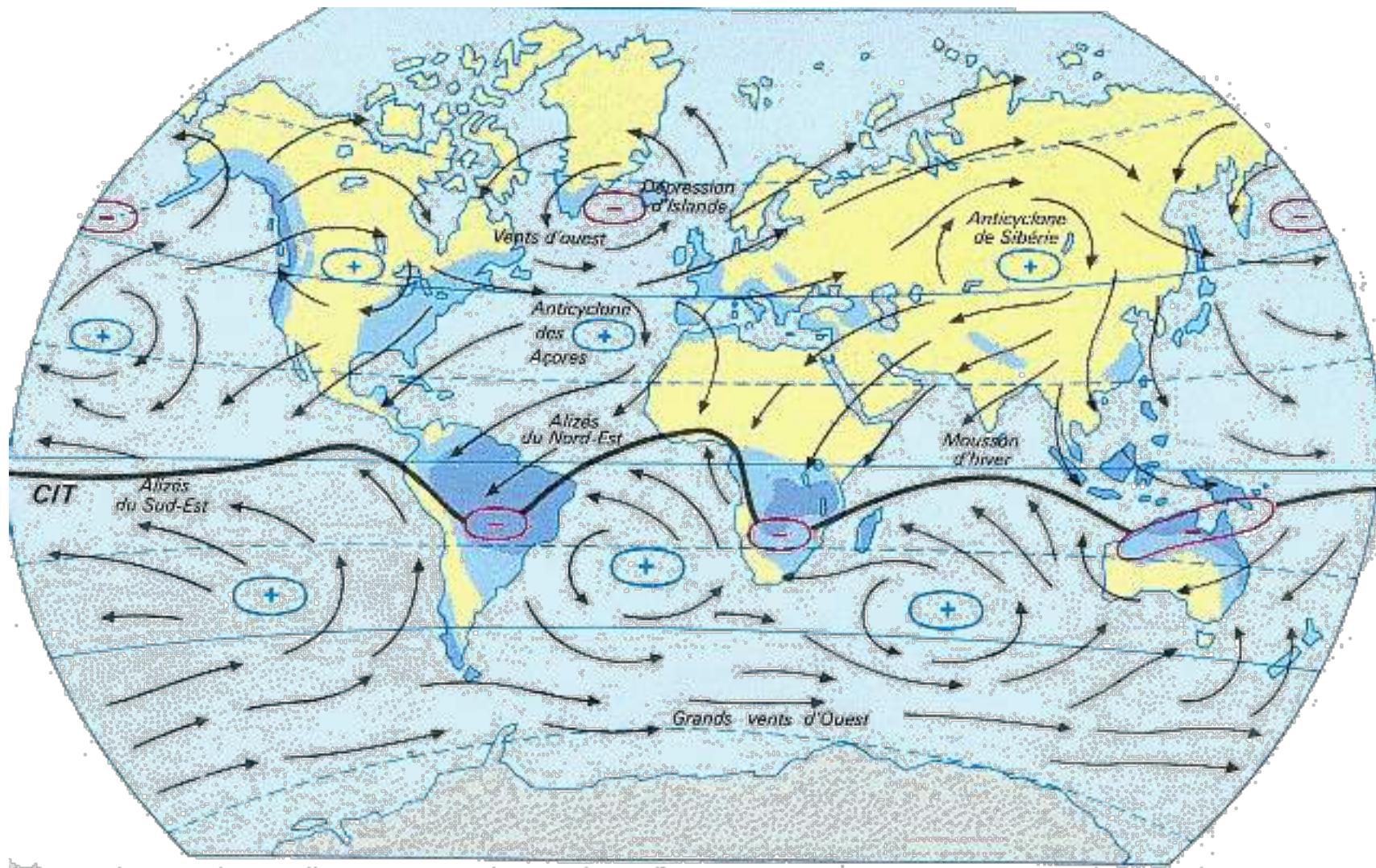
Source : IPCC AR4 (2007) Fig. 1.4 et AR5 (2013) Fig 1.14.

# Bilan d'énergie

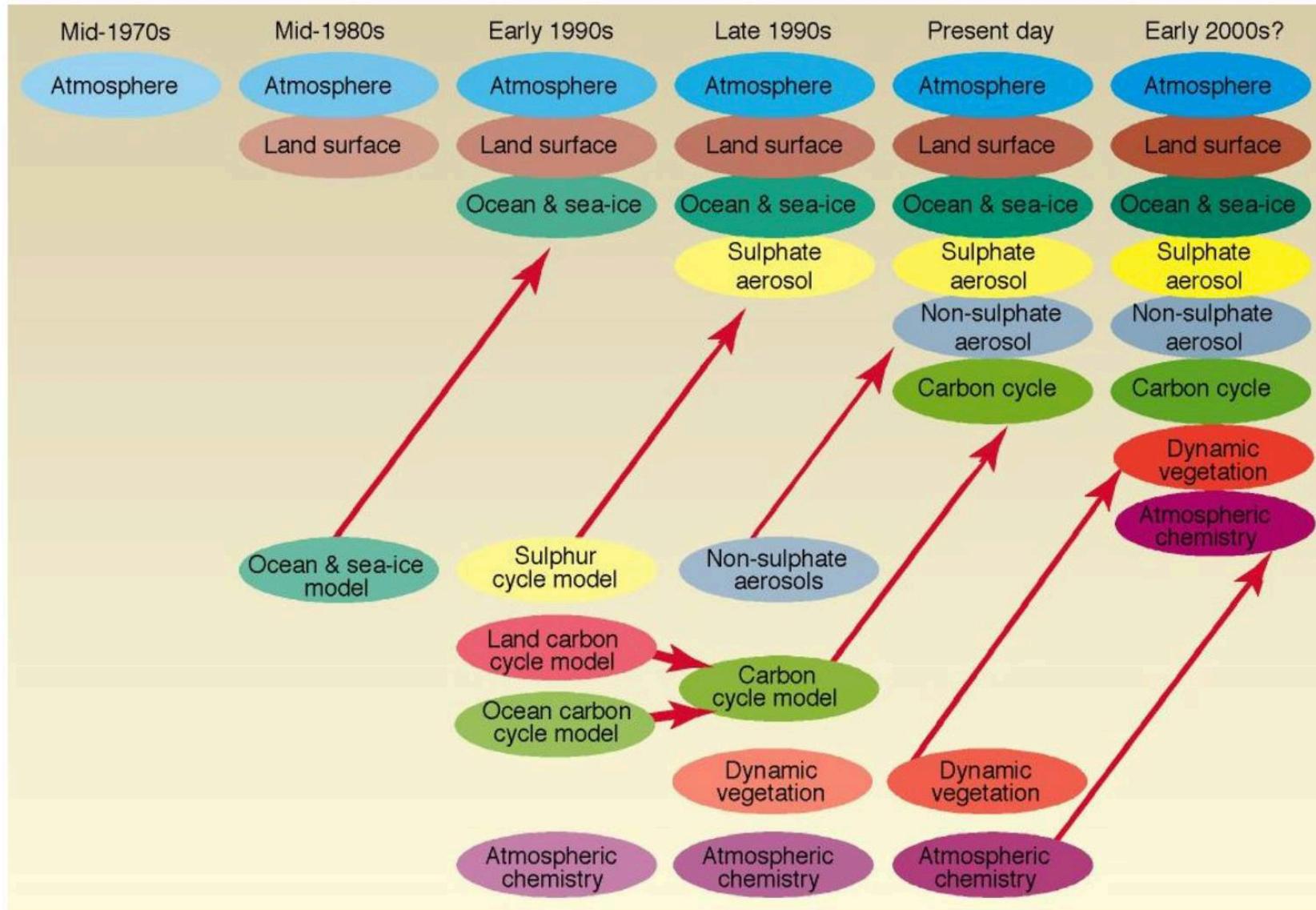


Estimation de la moyenne annuelle et mondiale du bilan d'énergie de l'atmosphère terrestre  
Source : Kiehl et Trenberth (1997)

# Circulation atmosphérique moyenne



# Les AOGCMs deviennent des ESMs..

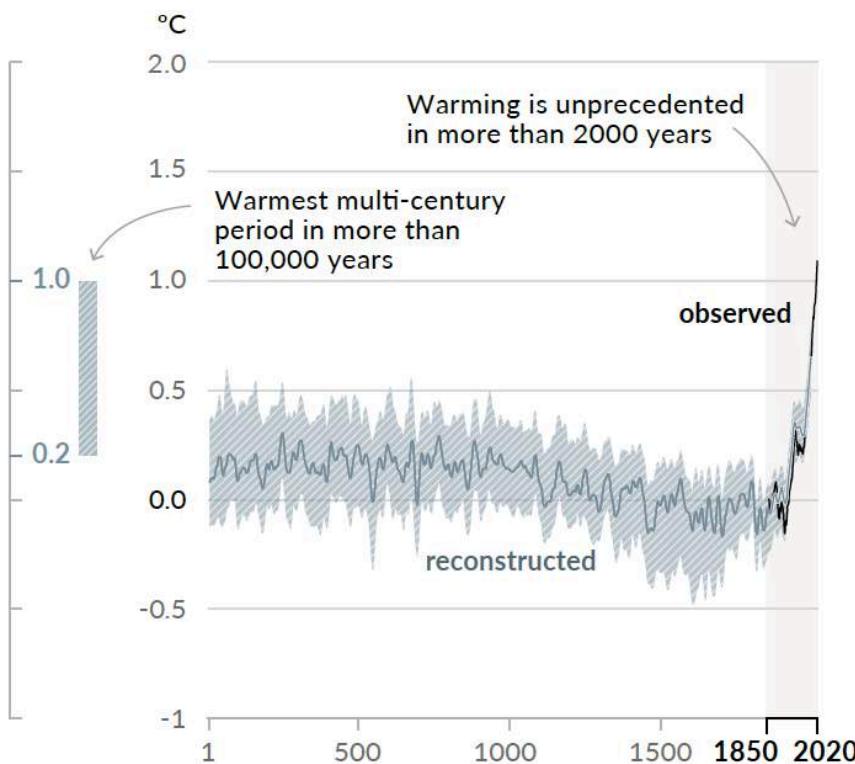


Source : IPCC TAR (2001), Fig. TS Box 3.

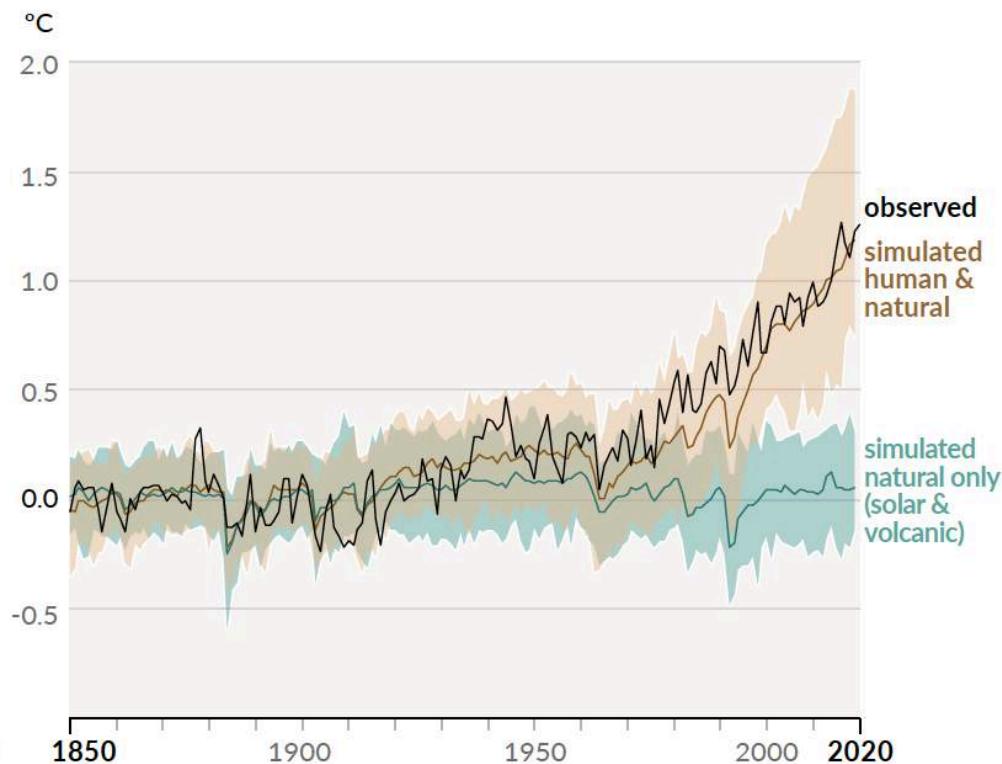
# Les AOGCMs permettent -> d'estimer la réponse du climat aux activités anthropiques

## Changes in global surface temperature relative to 1850-1900

a) Change in global surface temperature (decadal average) as reconstructed (1-2000) and observed (1850-2020)



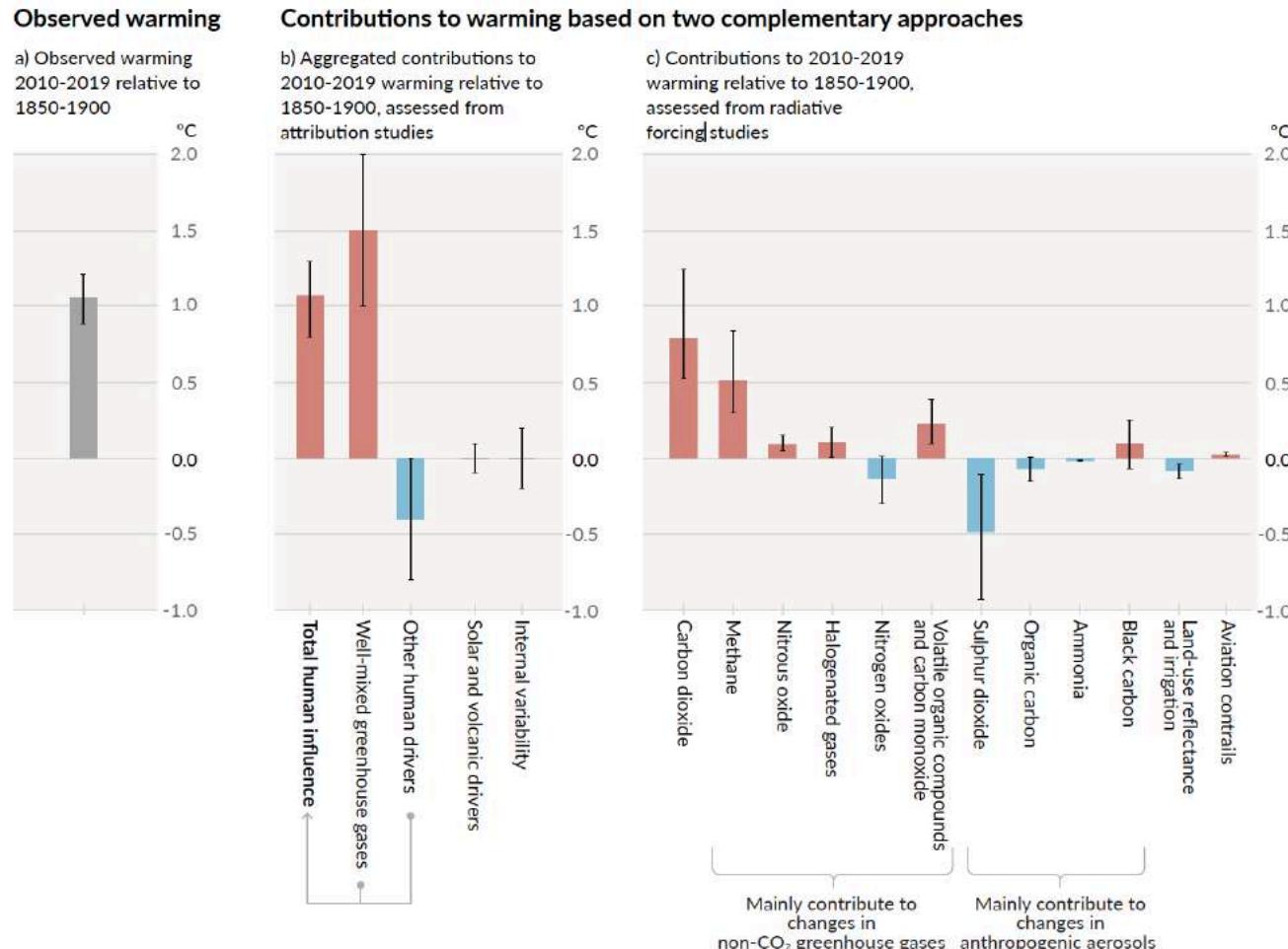
b) Change in global surface temperature (annual average) as observed and simulated using **human & natural** and **only natural** factors (both 1850-2020)



# Les AOGCMs permettent

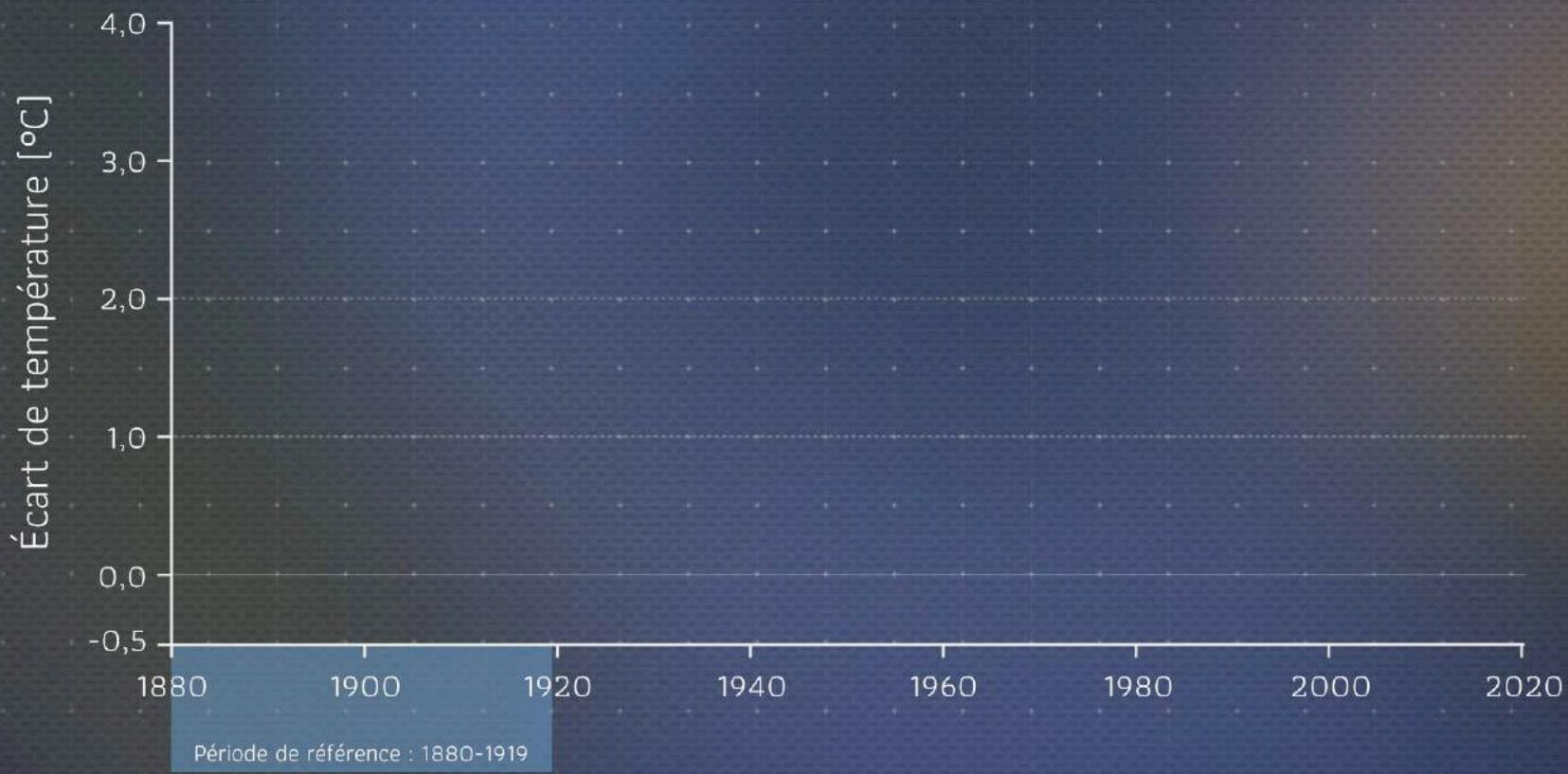
- > d'estimer la réponse du climat aux activités anthropiques
- > en identifiant les contributions des différents forçages

Observed warming is driven by emissions from human activities, with greenhouse gas warming partly masked by aerosol cooling



# Simulations des changements annuels de température

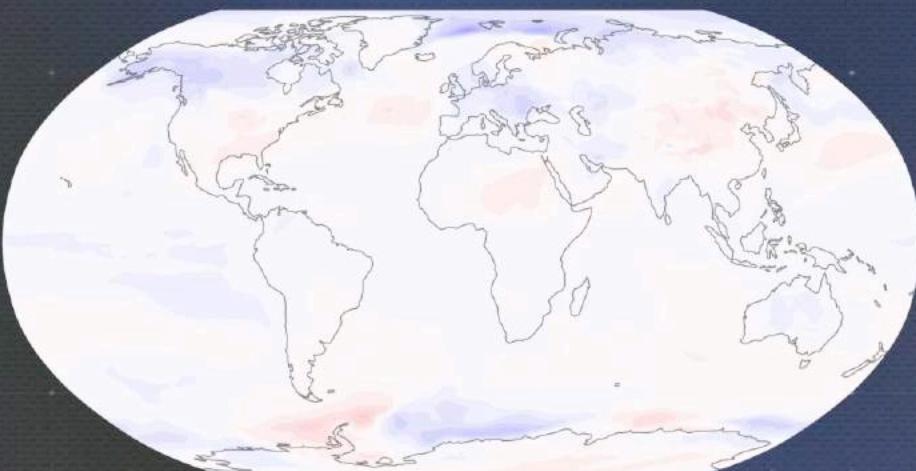
Changement de la température de surface de la Terre



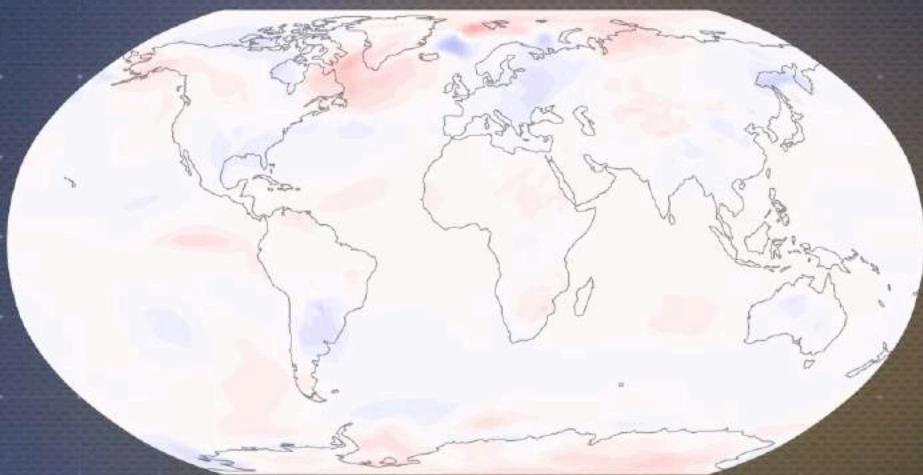
# Simulations des changements annuels de température

Changement de température de surface simulé

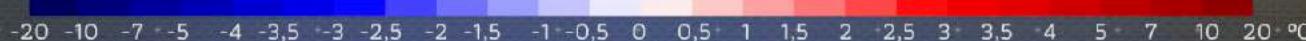
1850



Modèle: IPSL-CM6A-LR



Modèle: CNRM-CM6-1



Écart de température [°C] par rapport à la période de référence 1850-1899

# **Modélisation climatique en région de montagne**

**2 / A l'échelle d'un massif**

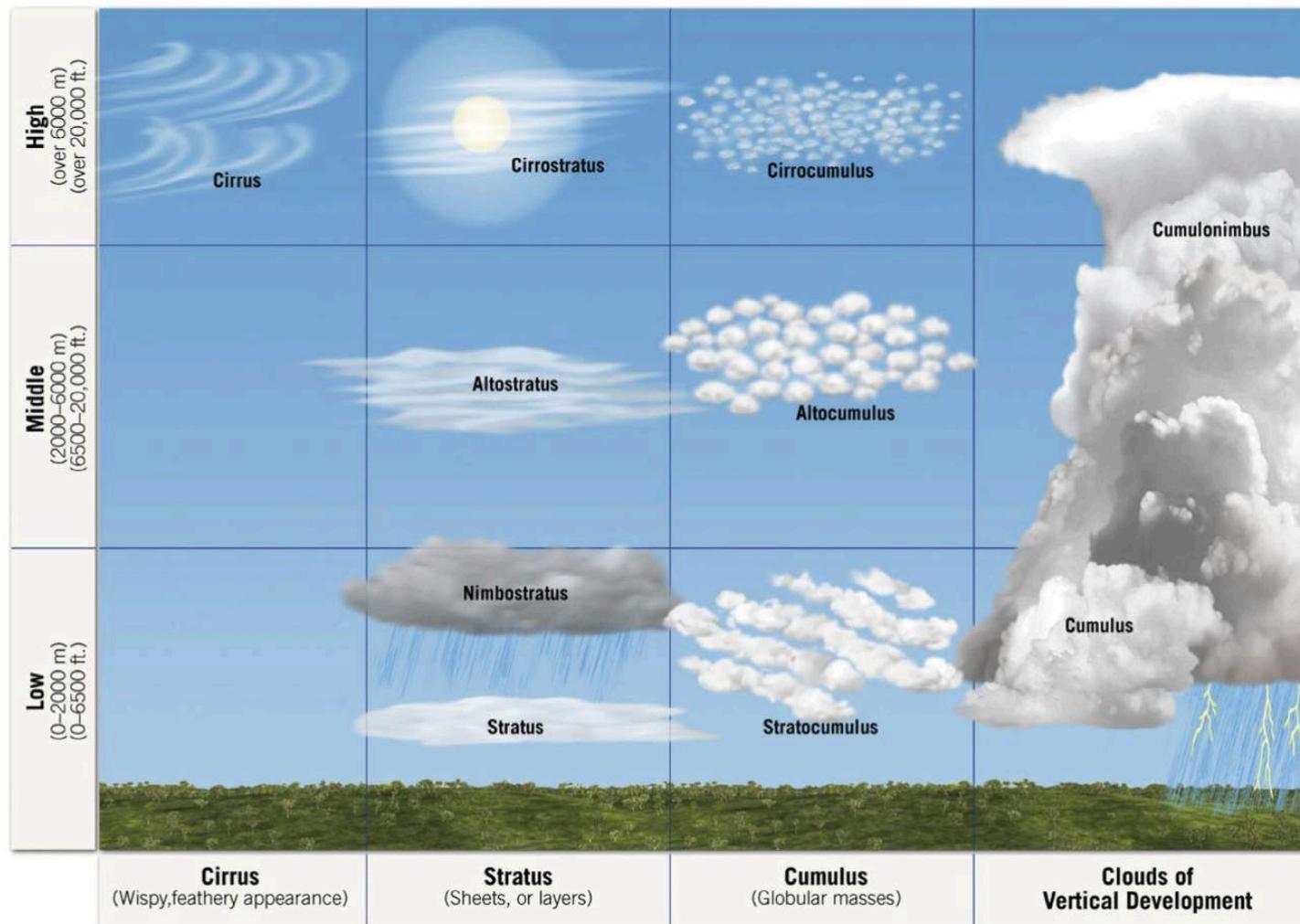


# Modélisation du climat de montagne -> Complexe!



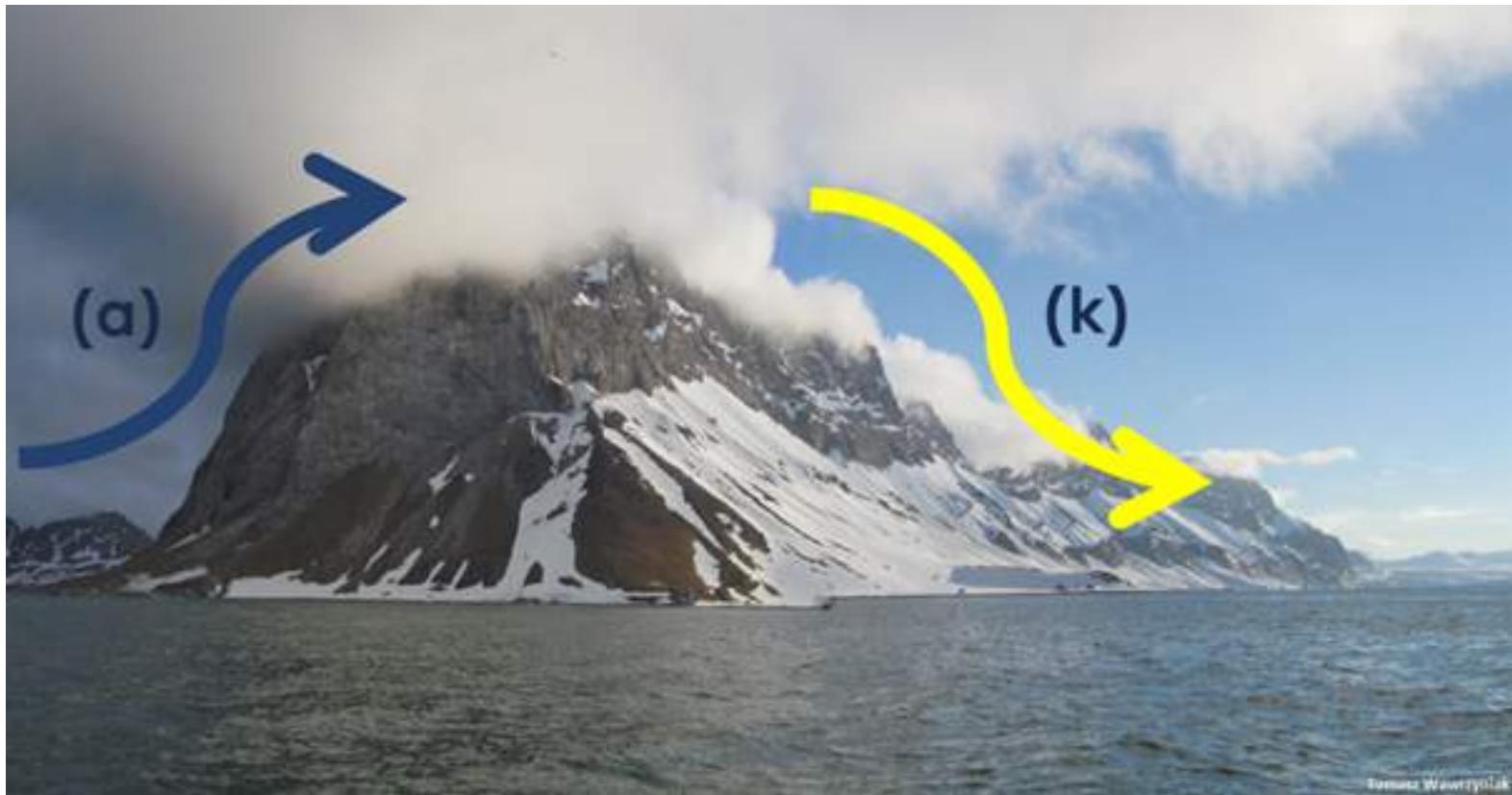
Credits: Anton Balazh/ Shutter Stock

# Les nuages: l'un des trucs compliqués à modéliser



**Figure 1** Ten major cloud types. Reproduced from Lutgens et al., 2016. <http://www.pearsonhighered.com/bookseller/product/Atmosphere-An-Introduction-to-Meteorology-The-Plus-MasteringMeteorology-with-eText-Access-Card-Package/9780321984425.page>

# En montagne, c'est encore plus compliqué!



Nuages orographiques et effet de foehn  
(source: <https://polarpedia.eu>)

# En montagne, c'est encore plus compliqué!



(source: wikipédia)

# En montagne, c'est encore plus compliqué!



(source: wikipédia)

# En montagne, c'est encore plus compliqué!



Photo courtesy (and copyright) Isabelle Prestel, Institute for Atmospheric Physics, Switzerland

# En montagne, c'est encore plus compliqué!

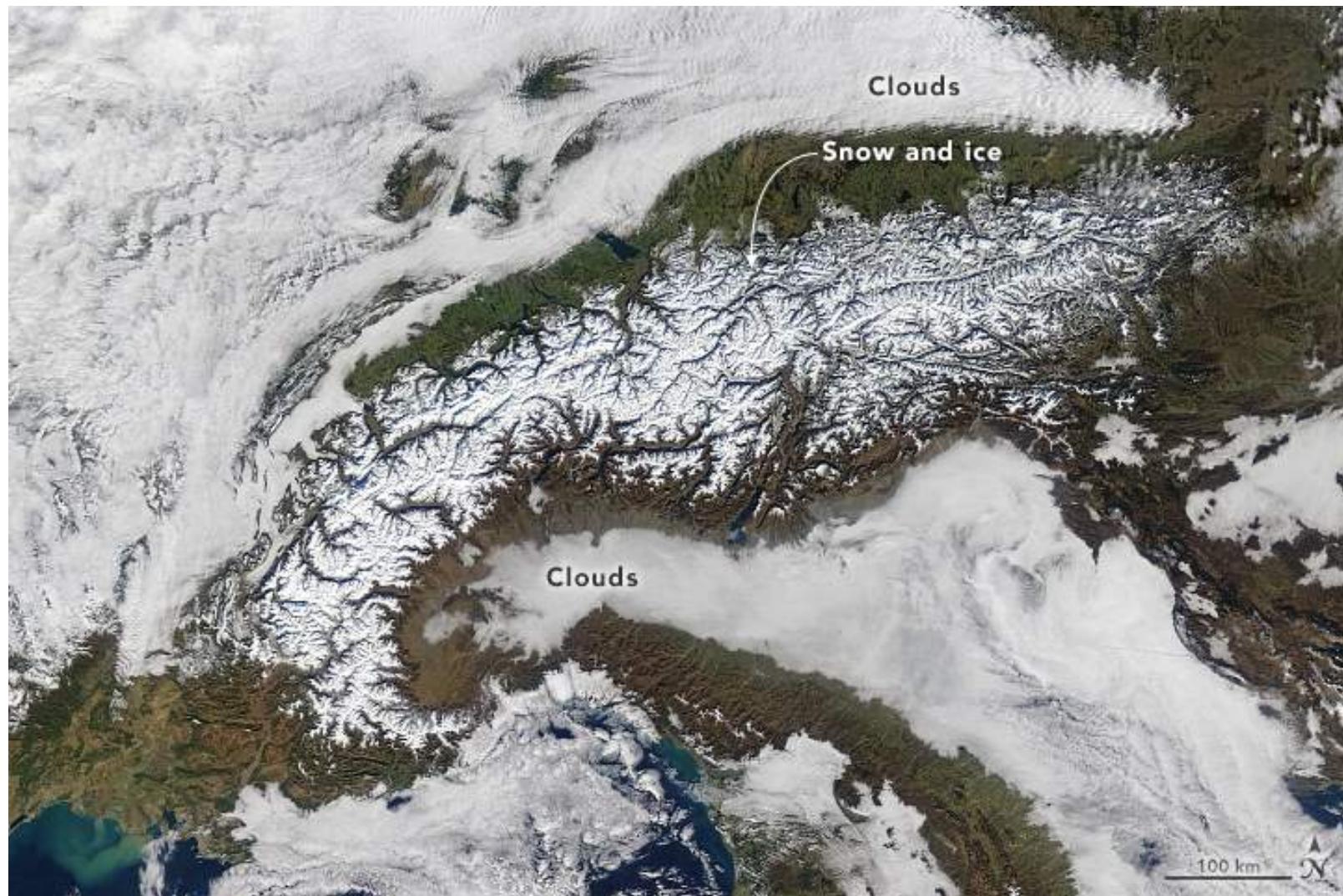


Cumulonimbus estival sur la chartreuse  
Crédit photo : Laurence Martin via twitter  
@meteocentreisere



Mer de nuage hivernale à Chamonix  
Crédit photo : Daniel Simpson

# Comment simuler le couvert neigeux avec une résolution grossière?



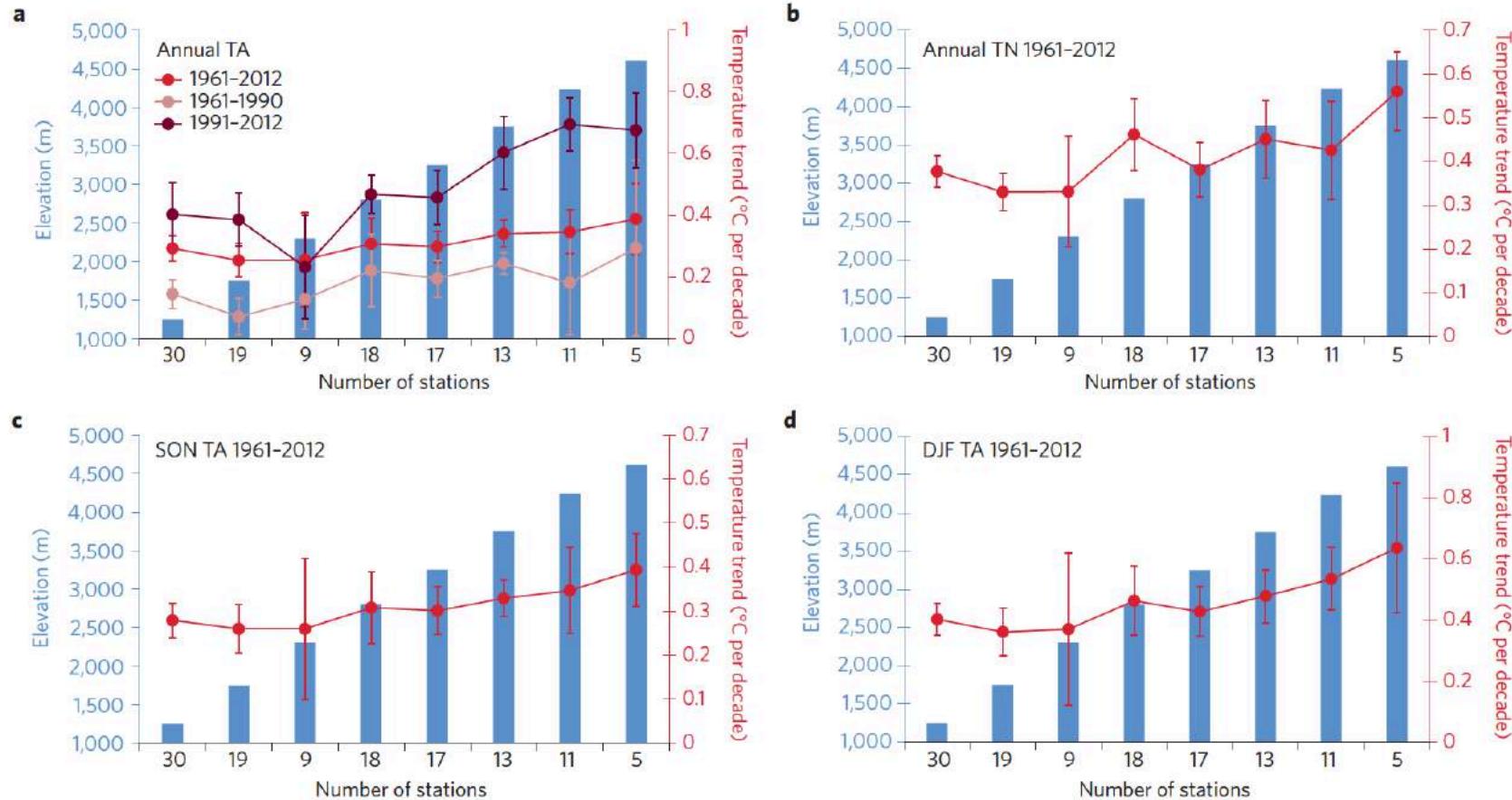
Credits: Nasa

# Comment simuler la pollution qui reste bloquée dans la vallée?



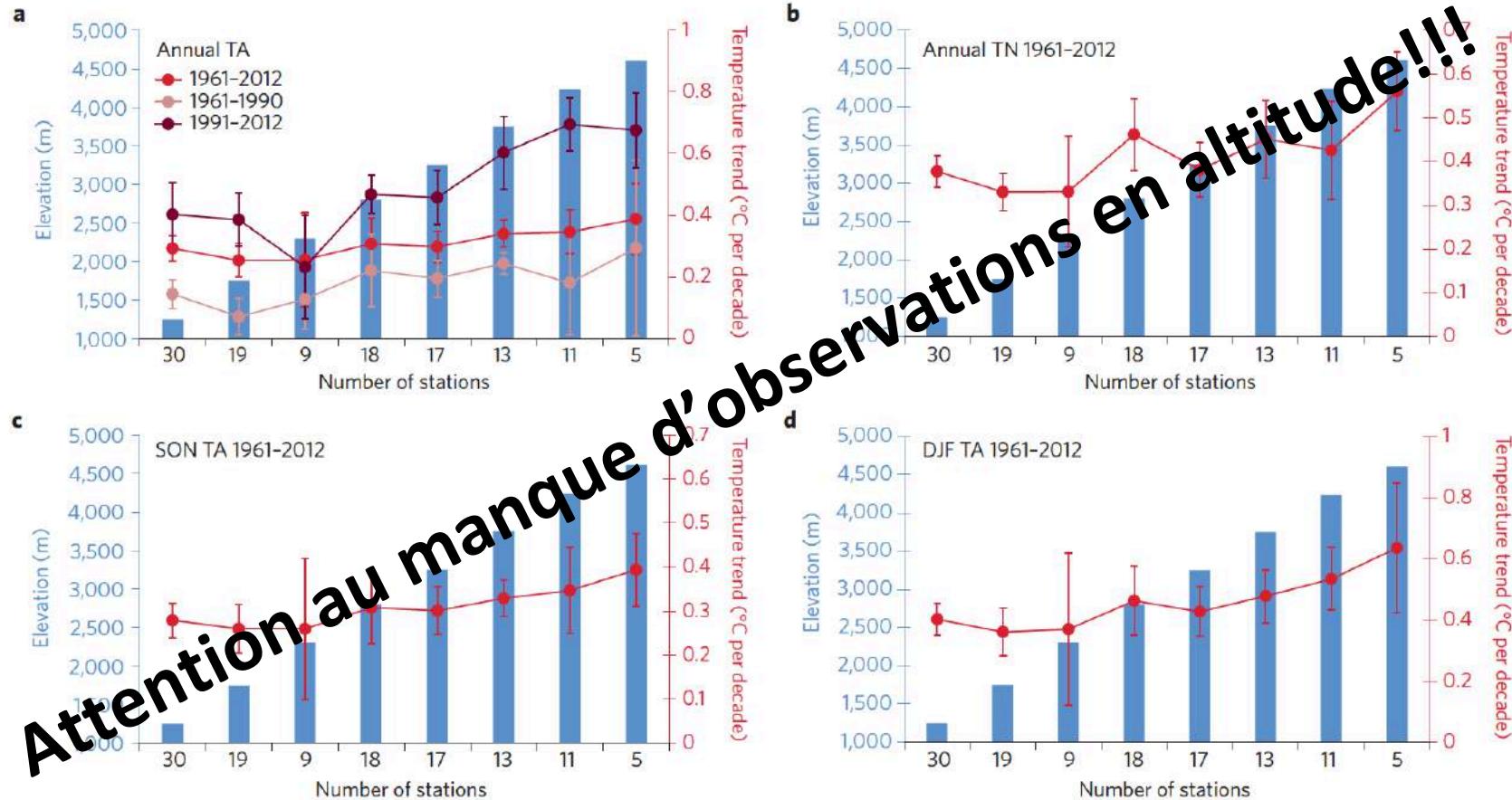
Pollution hivernale dans les Alpes

# Modulation du réchauffement avec l'altitude?



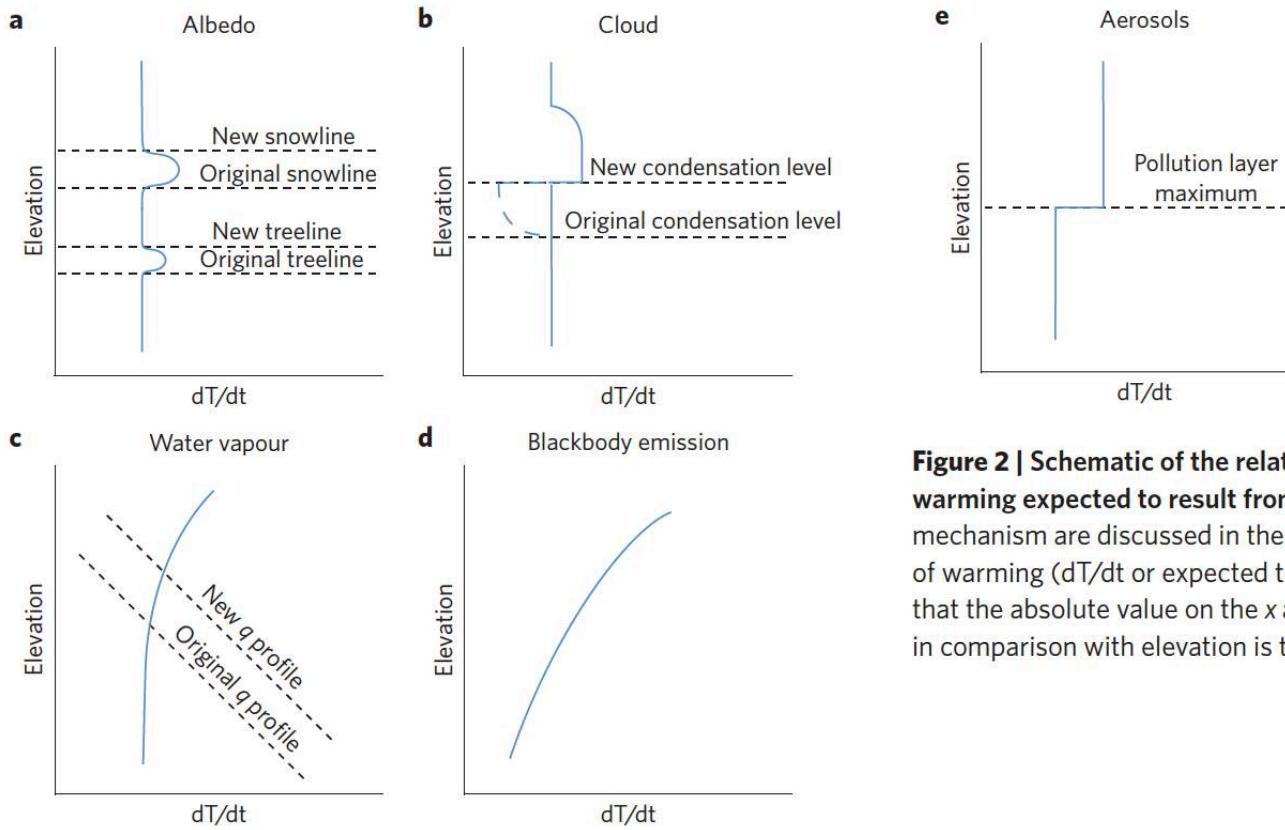
**Figure 1 | Elevation-dependent warming over and around the Tibetan Plateau.** **a**, Annual mean surface air temperature (TA) over 3 time periods. **b**, Annual mean minimum temperature (TN) from 1961–2012. **c**, Mean autumn (September–November, SON) surface temperature from 1961–2012. **d**, Mean winter (December–February, DJF) surface temperature from 1961–2012. Bars represent elevation and trend magnitude is plotted on the y axis according to the 8 elevation ranks of 122 stations. The presentation format is similar to ref. 76 for ease of comparison. Error bars are based on 95% confidence intervals around the mean. The vertical scale for winter warming rate (**d**) and annual warming rate (**a**) have been adjusted to reflect the more rapid warming.

# Modulation du réchauffement avec l'altitude?



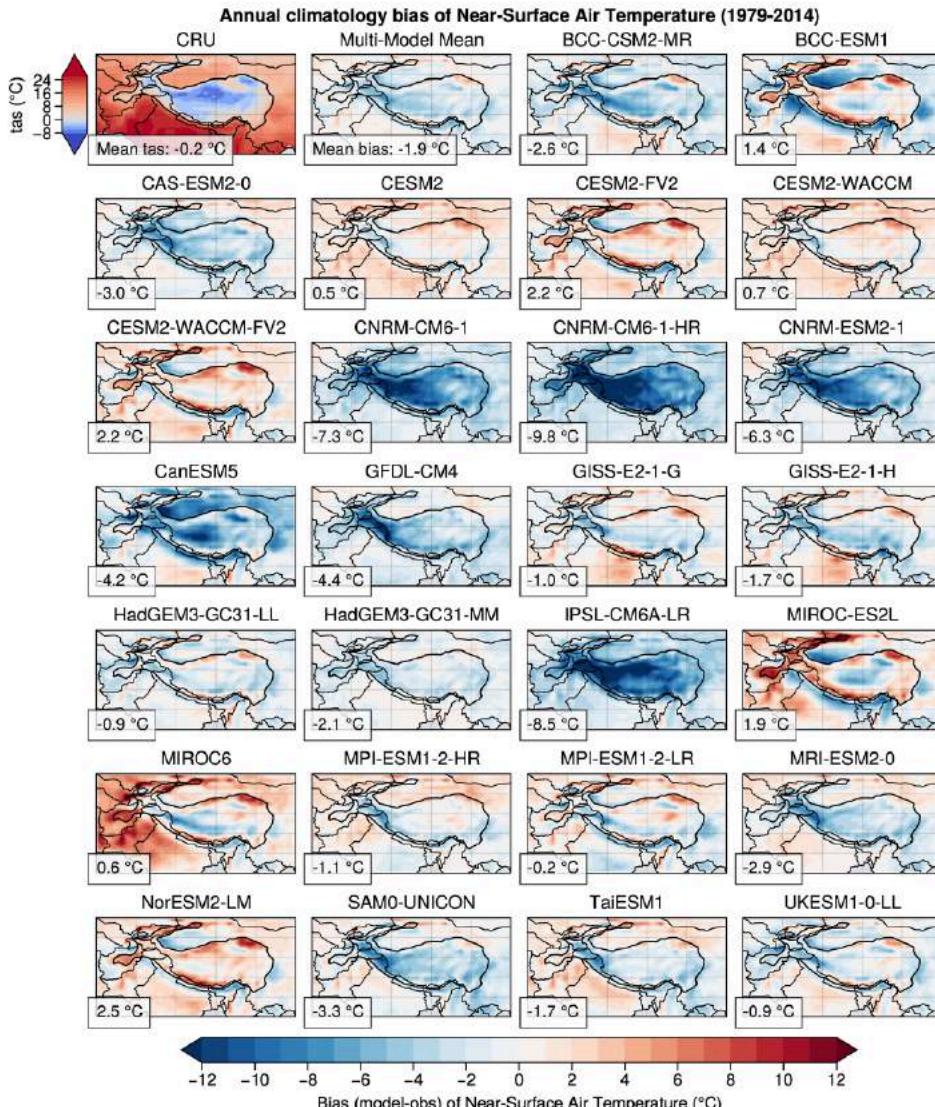
**Figure 1 | Elevation-dependent warming over and around the Tibetan Plateau.** **a**, Annual mean surface air temperature (TA) over 3 time periods. **b**, Annual mean minimum temperature (TN) from 1961–2012. **c**, Mean autumn (September–November, SON) surface temperature from 1961–2012. **d**, Mean winter (December–February, DJF) surface temperature from 1961–2012. Bars represent elevation and trend magnitude is plotted on the y axis according to the 8 elevation ranks of 122 stations. The presentation format is similar to ref. 76 for ease of comparison. Error bars are based on 95% confidence intervals around the mean. The vertical scale for winter warming rate (**d**) and annual warming rate (**a**) have been adjusted to reflect the more rapid warming.

# Modulation du réchauffement avec l'altitude? Quels mécanismes?



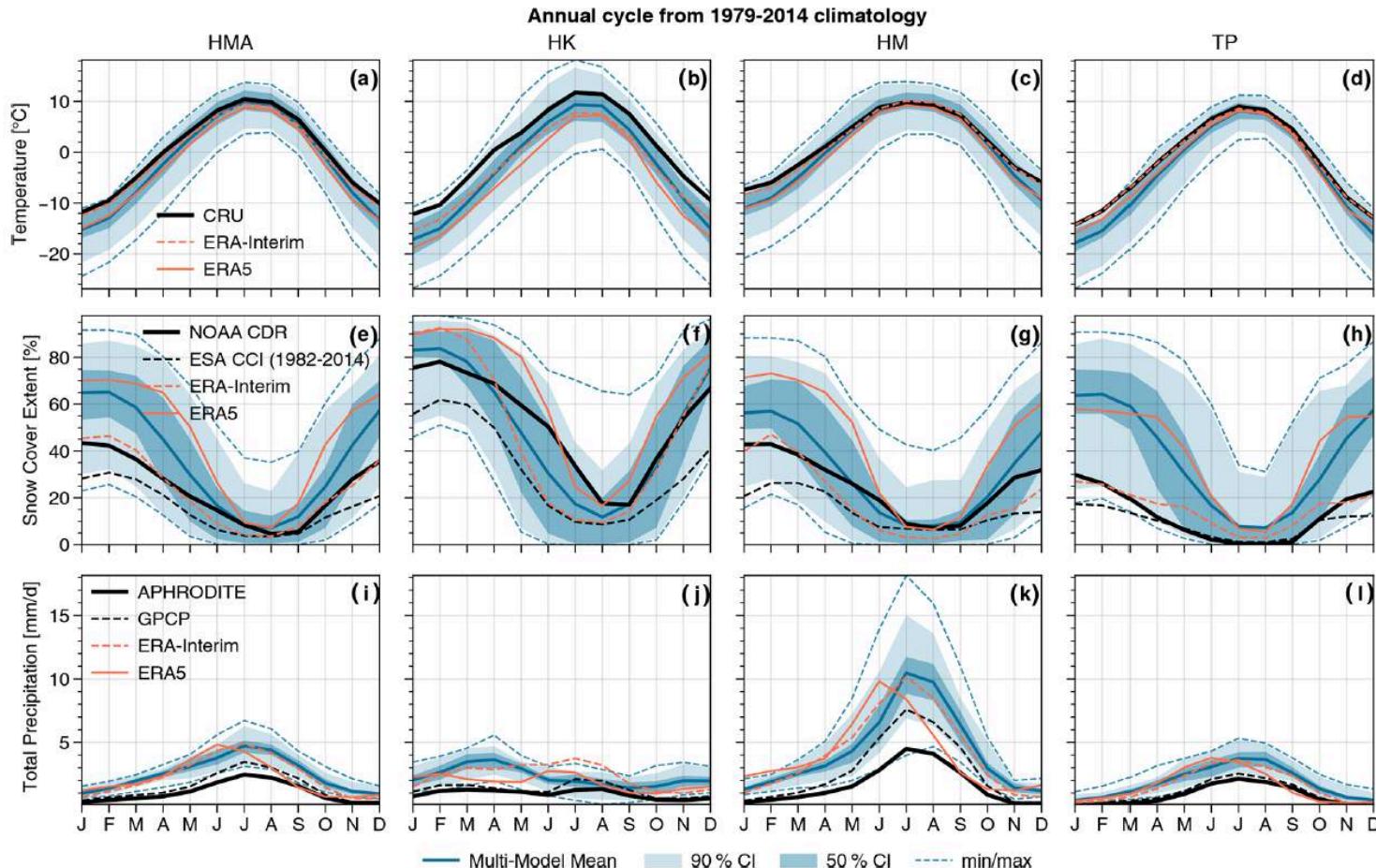
**Figure 2 | Schematic of the relative vertical profile in atmospheric warming expected to result from various mechanisms.** The details of each mechanism are discussed in the main text. The x axis represents the rate of warming ( $dT/dt$  or expected trend magnitude). The curves are relative in that the absolute value on the x axis is unimportant; the shape of the signal in comparison with elevation is the principal focus.

# Biais des GCMs en Himalaya: des différences entre les modèles



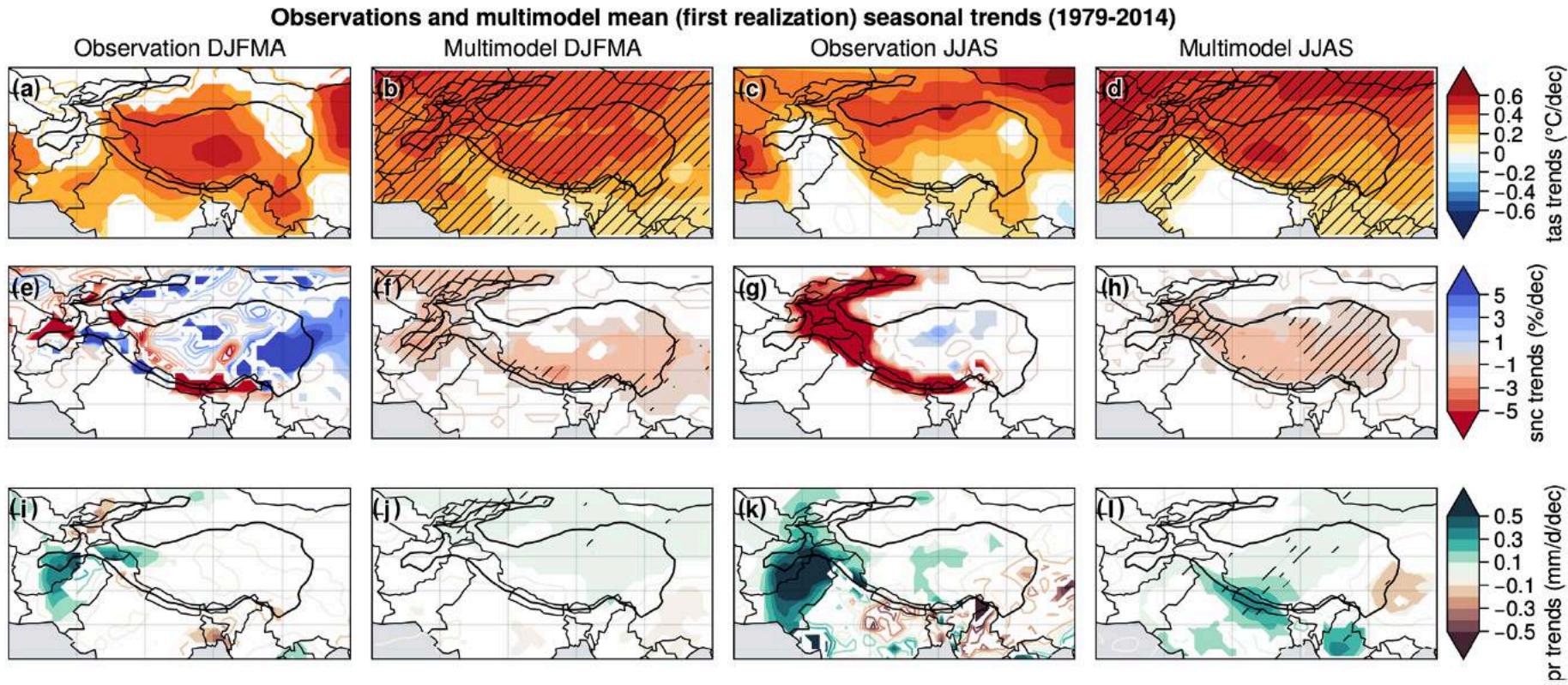
**Figure 3.** Annual bias (model minus observation) computed over 1979–2014 for temperature, except the top left panel that shows the climatology estimated from the CRU observation, used as the reference for the bias computation. The panel located at the right side of the CRU observation shows the bias of the multimodel mean based on the 26 models shown in the figure. The black contour shows the political frontiers and the bold black line the HMA domain located above 2500 m.a.s.l., for which the spatial average of the bias is given in the bottom left of each panel.

# Biais des GCMs en Himalaya: des contrastes saisonniers



**Figure 2.** 1979–2014 climatology of the annual cycle of temperature (a–d), snow cover (e–h) and precipitation (i–l) averaged over HMA (a, e, i), HK (b, f, j), HM (c, g, k) and TP (d, h, l), excluding the surface area located below 2500 m a.s.l. (red contours in Fig. 1). The multimodel mean (dark blue line) is shown with the 50 % confidence interval (CI, dark blue shading), the 90 % CI (light blue shading) and the minimum and maximum (dashed blue lines) of the ensemble. The black curves correspond to the observational datasets: CRU, NOAA CDR and APHRODITE, respectively, for temperature, snow cover and precipitation. The ERA-Interim and ERA5 reanalyses are shown, respectively, with the dashed and solid orange curves. GPCP and ESA CCI datasets are also shown for snow cover and precipitation respectively (dashed black line). The ESA CCI covers only the 1982–2014 period.

# Tendances observées et simulées en Himalaya



**Figure 7.** DJFMA (left) and JJAS (right) trends computed over 1979–2014 for temperature (a–d), snow cover (e–h) and precipitation (i–l). CRU temperature, NOAA CDR snow cover and APHRODITE precipitation observation trends (DJFMA: a, e, i and JJAS: c, g, k) are compared to the multimodel mean computed with the first realization for each model (DJFMA: b, f, j and JJAS: d, h, l). Contours are used for non-significant trends, shading for significant trends ( $p$  value  $> 0.05$ ) and hatching for points where  $> 80\%$  of the models agree on the sign of the trend.

# Modélisation climatique en région de montagne

## 3 / Applications



# **Modélisation climatique en région de montagne**

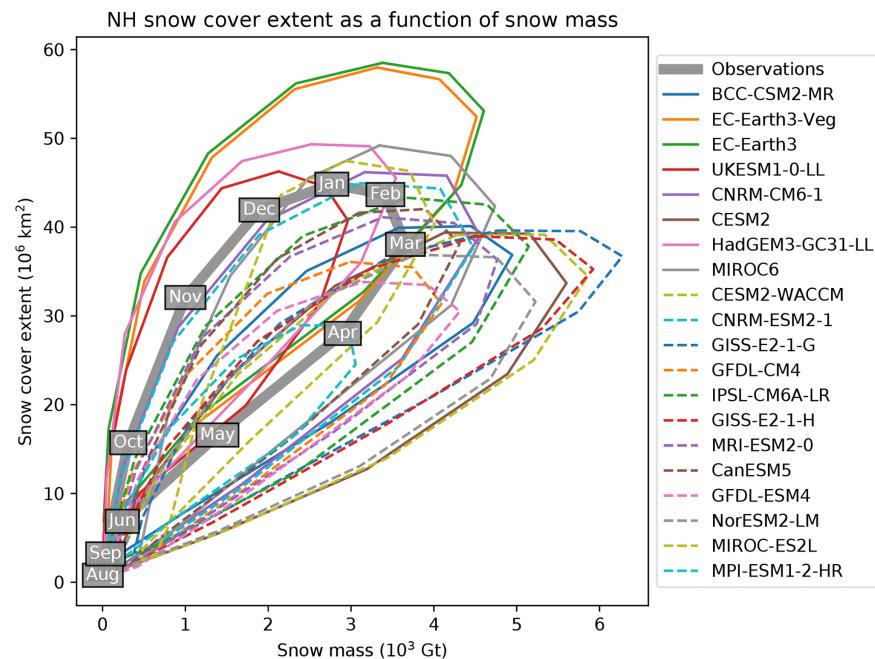
## **3 / Applications**

### **3.1 Améliorer les GCMs**



# Améliorer les GCMs:

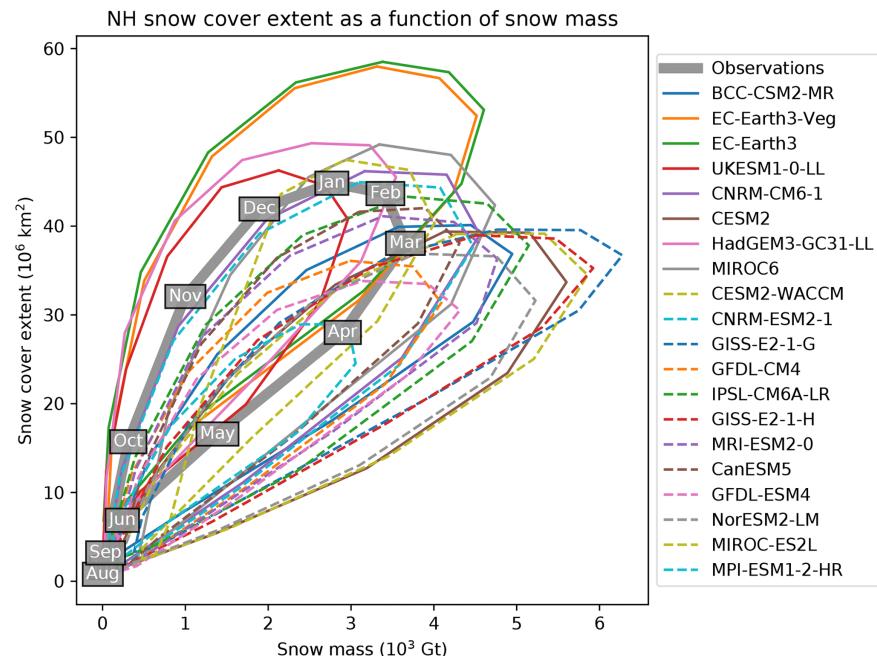
## Exemple: représentation de la fraction sous-maille du couvert neigeux



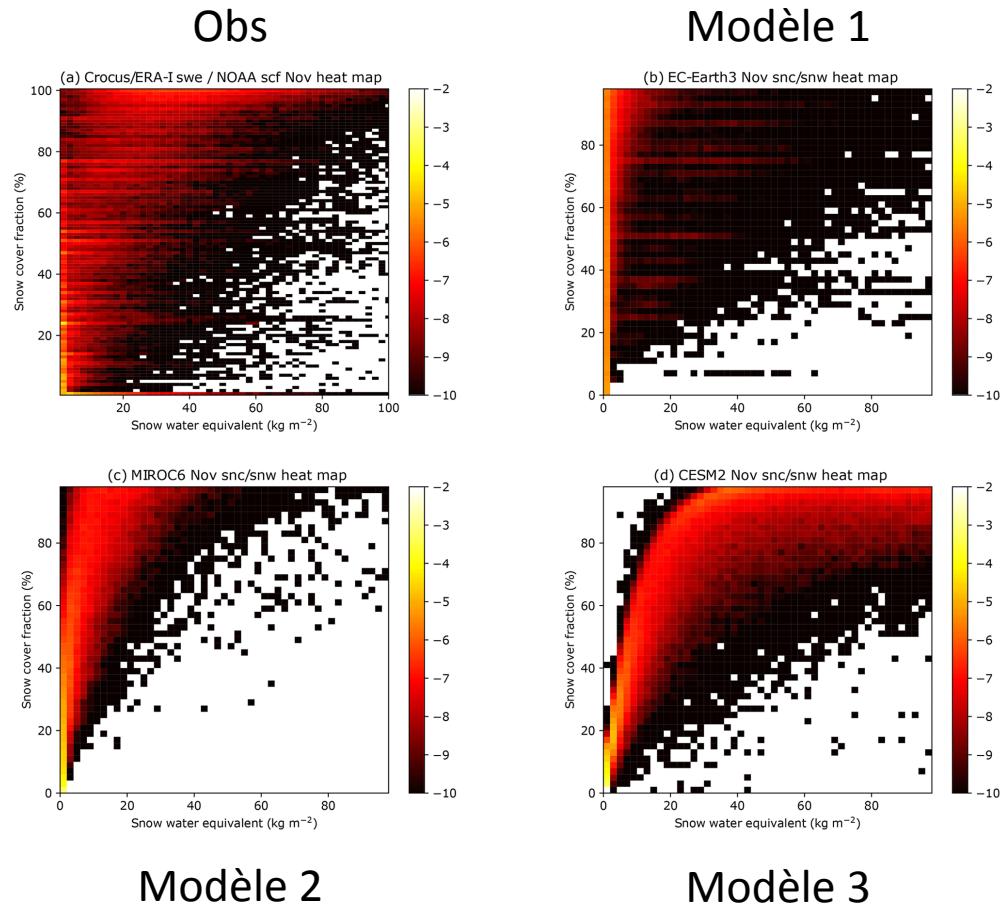
Calcul de la fraction du couvert neigeux  
en fonction de la masse du couvert  
neigeux

# Améliorer les GCMs:

## Exemple: représentation de la fraction sous-maille du couvert neigeux



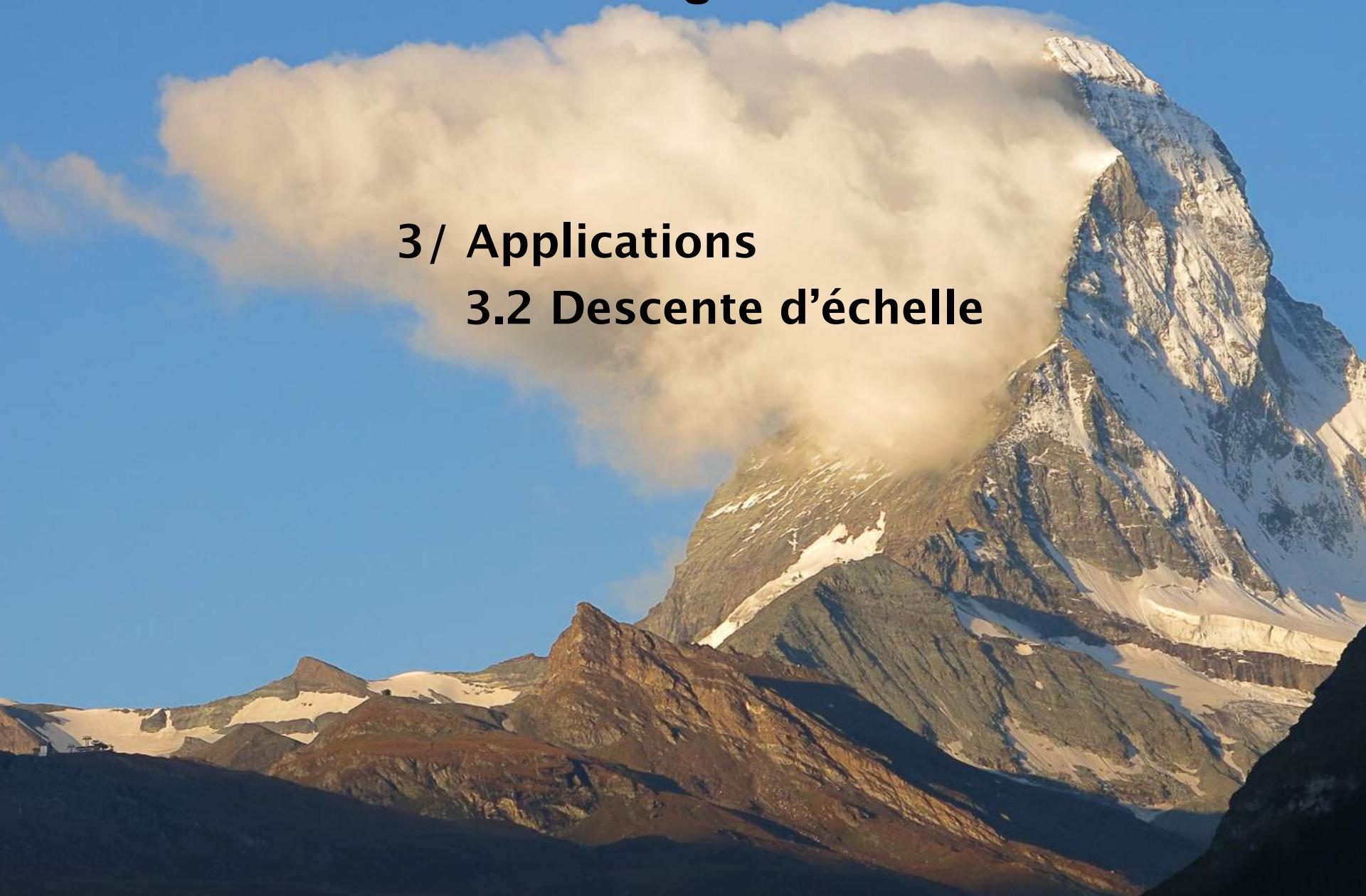
Calcul de la fraction du couvert neigeux en fonction de la masse du couvert neigeux  
-> censé dépendre de la topographie (développements en cours à l'IGE)



# **Modélisation climatique en région de montagne**

## **3 / Applications**

### **3.2 Descente d'échelle**

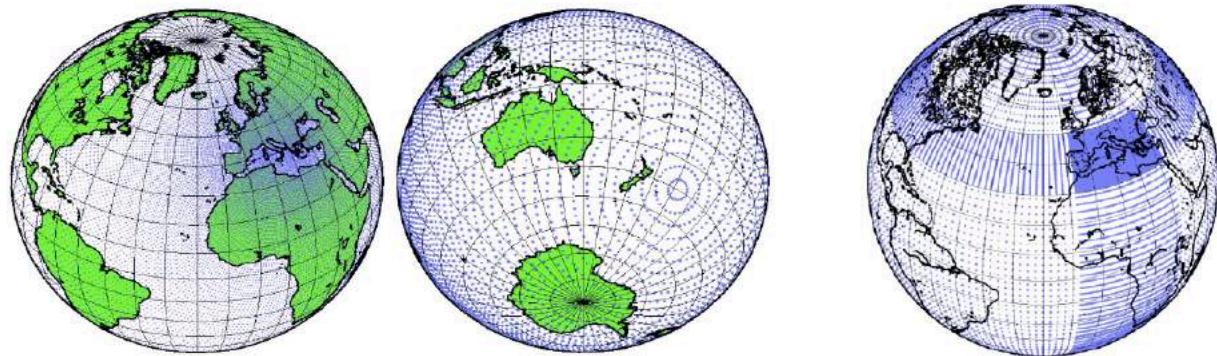


# Descente d'échelle dynamique

- Une première méthode consiste à **affiner localement la grille du GCM**.

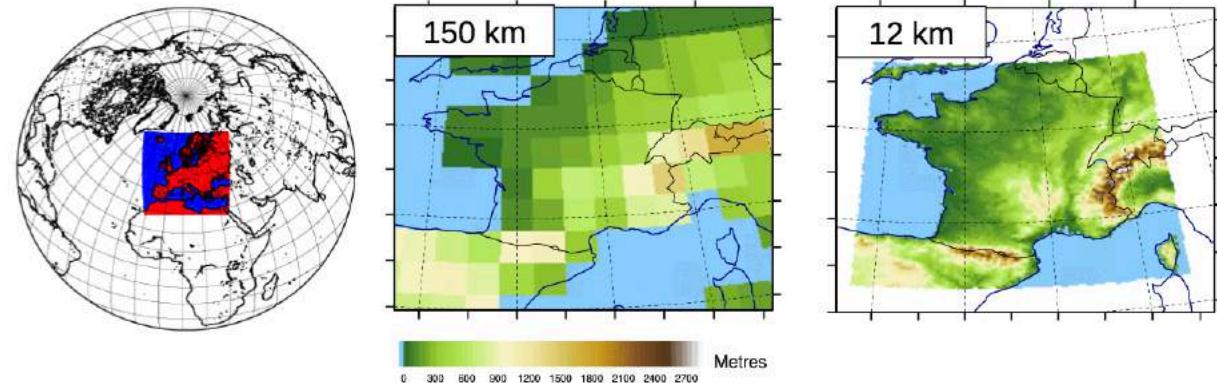
Exemples :

- ARPEGE basculé-étiré
- LMDz zoomé



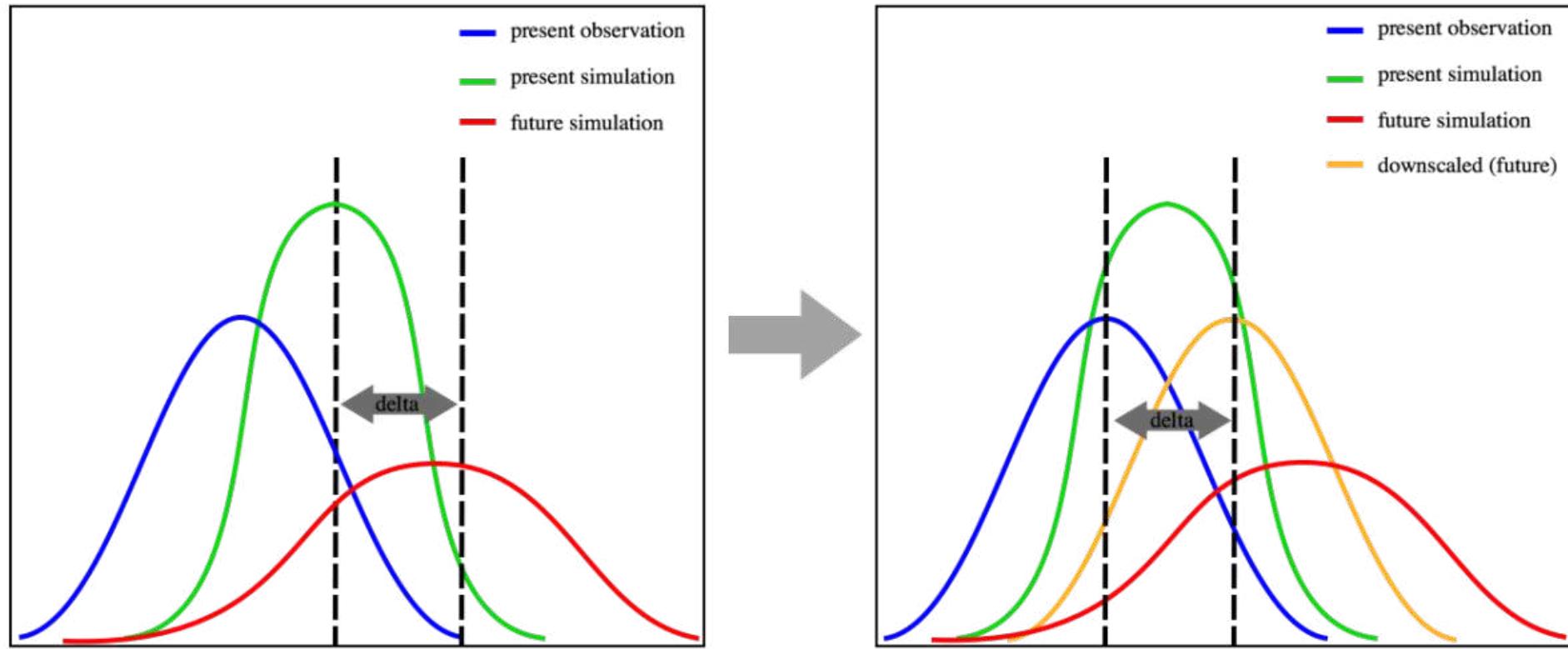
- Autre solution : **domaine limité (RCM) + conditions au bord (GCM)**.

Exemple :  
ARPEGE vs. ALADIN.



Figures empruntées à B. Pohl (CRC, voir [son cours](#)), C. Cassou (CERFACS) et S. Somot (CNRM).

# Descente d'échelle statistique



# Descente d'échelle statistique: différents groupes de méthodes

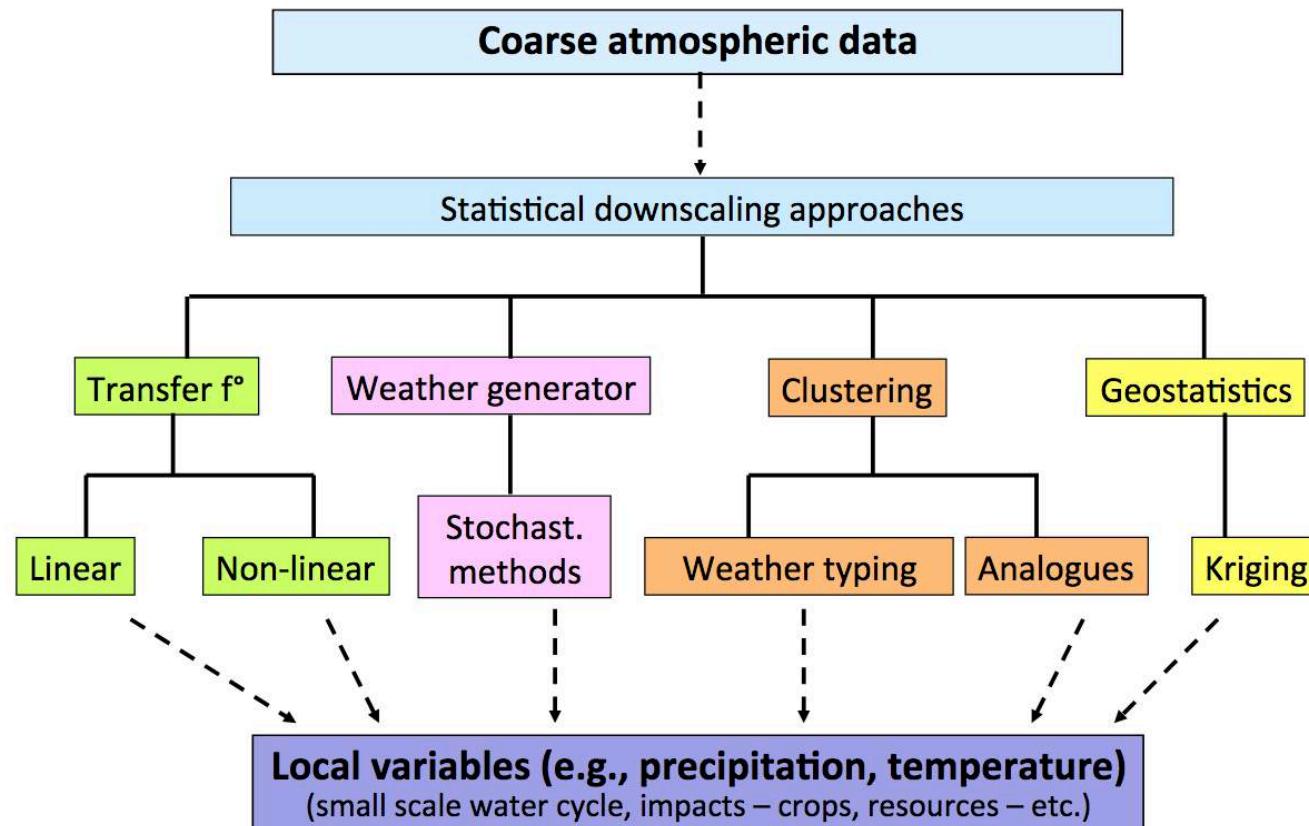


FIGURE 3.2: Les principales grandes familles de méthodologies de downscaling statistique.

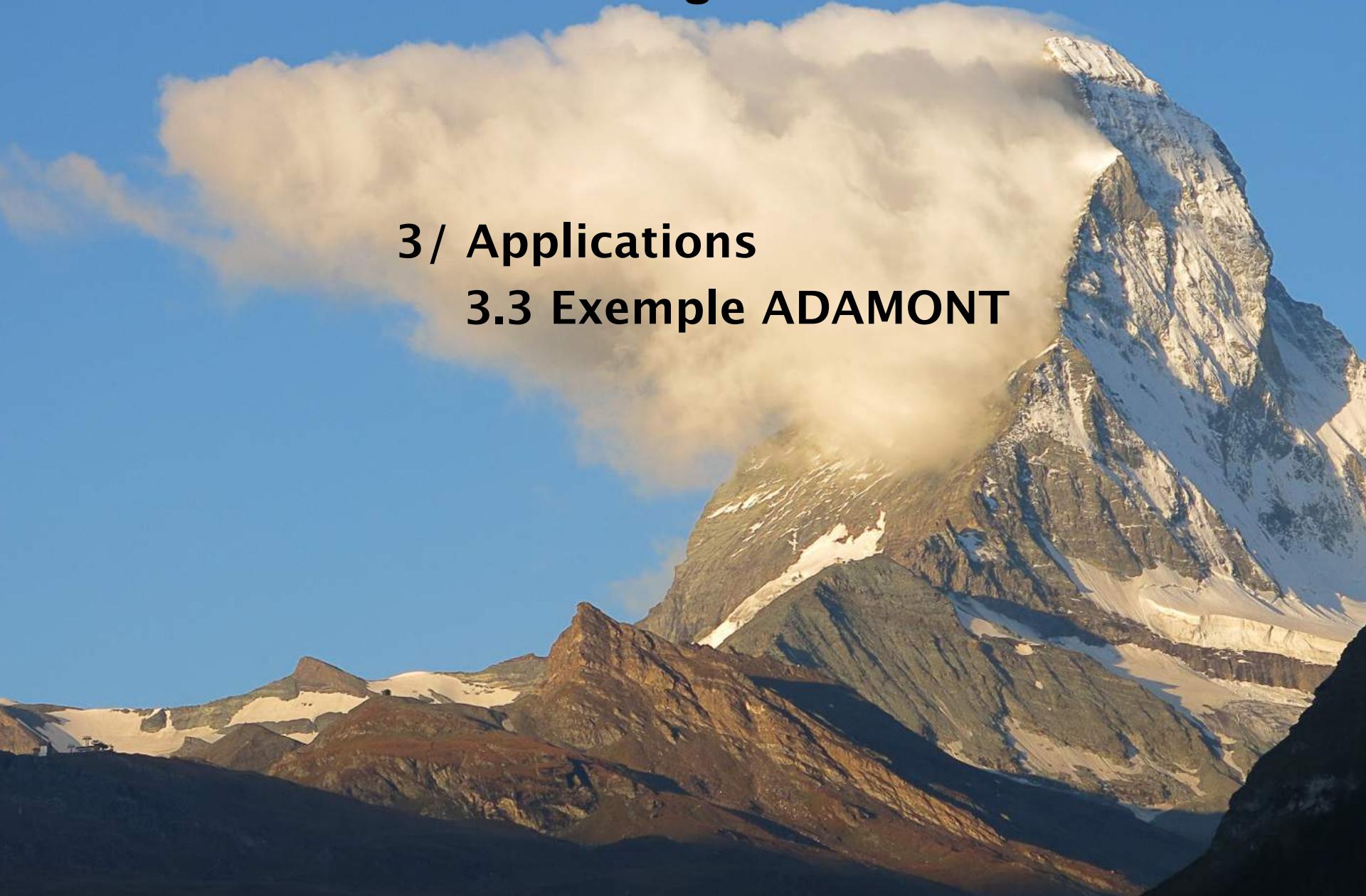
# Avantages et inconvénients

Descente d'échelle dynamique	Descente d'échelle statistique
Réalisme physique pour l'échelle spatiale considérée, notamment pour les rétroactions	Faible coût numérique: Faciliter de générer des ensembles pour évaluer les incertitudes
Coût numérique exorbitant: Jeux de données lourds à produire et à manipuler	Possibilité de produire des données à l'échelle locale facilement utilisable pour des études d'impact
Les RCMs héritent en partie des biais des GCMs utilisés aux conditions aux limites	Hypothèse de stationnarité des biais et des liens entre grande échelle/petite échelle discutable
Résolution toujours limitée pour certains processus (e.g. montagnes)	Imperfection physique, ne permet pas de décrire les rétroactions locales

# **Modélisation climatique en région de montagne**

## **3 / Applications**

### **3.3 Exemple ADAMONT**



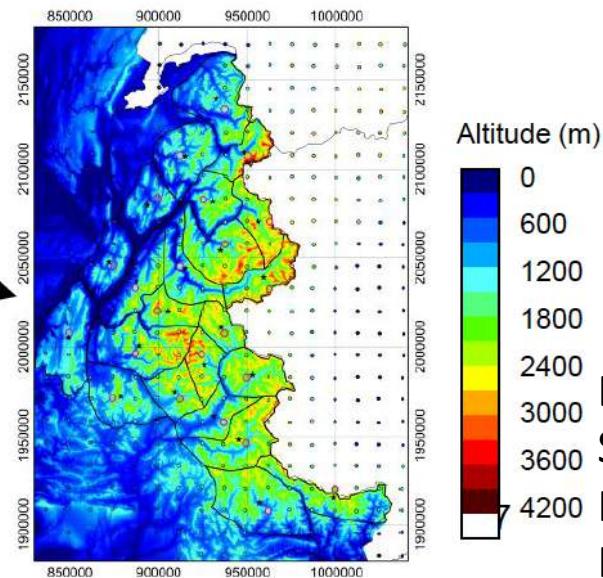
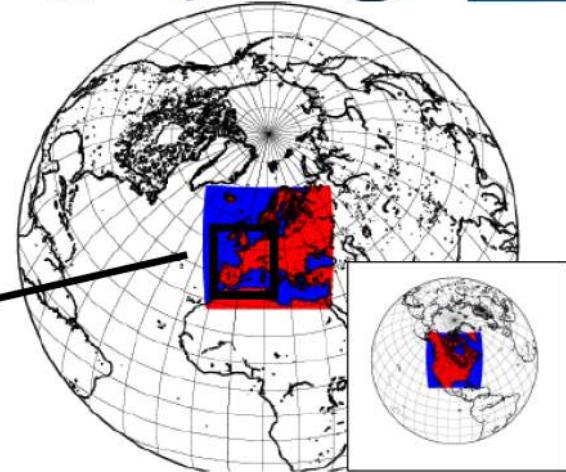
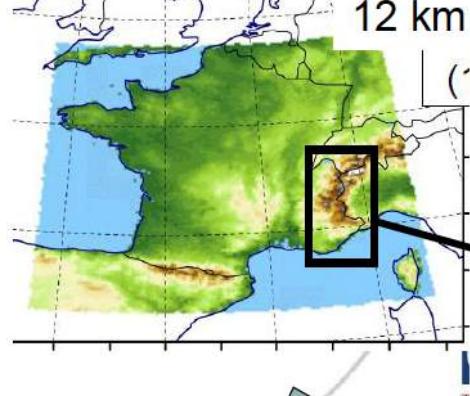
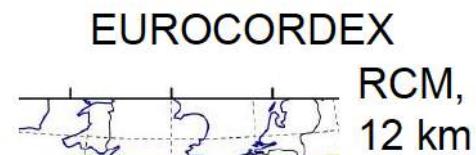
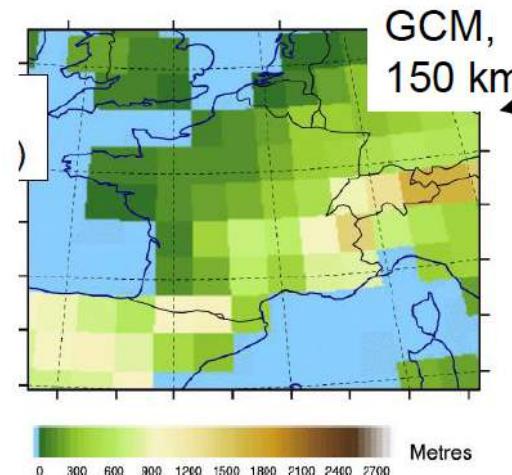
# Projections futures avec une méthode hybride: ADAMONT)



Trajectories  
Univ. Grenoble Alpes

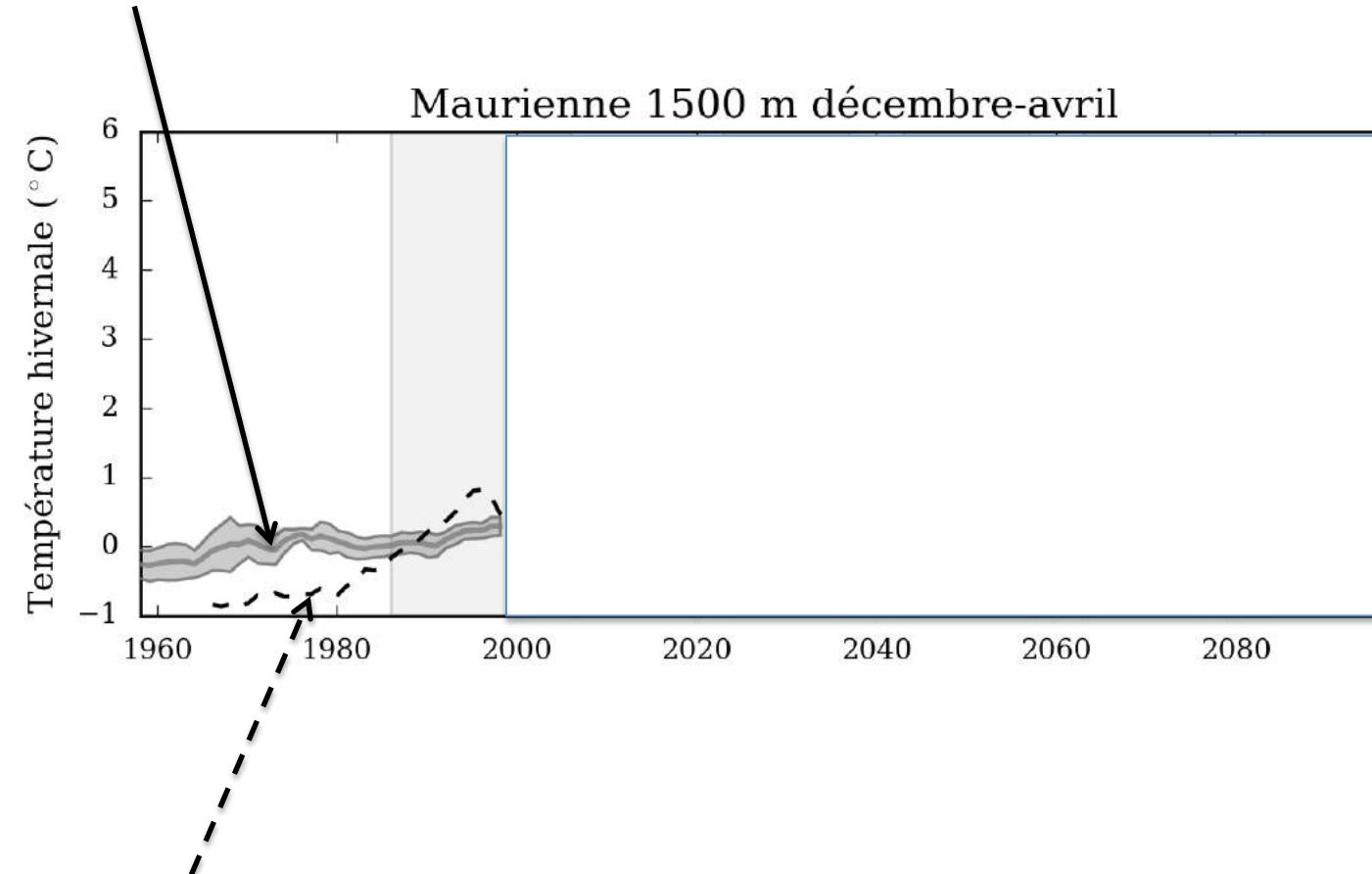


- Cascade de modèles et ajustements pour exploiter les projections climatiques à échelle mondiale et les appliquer aux territoires de montagne



# Température observée et simulée à 1500 mètres

Modèle

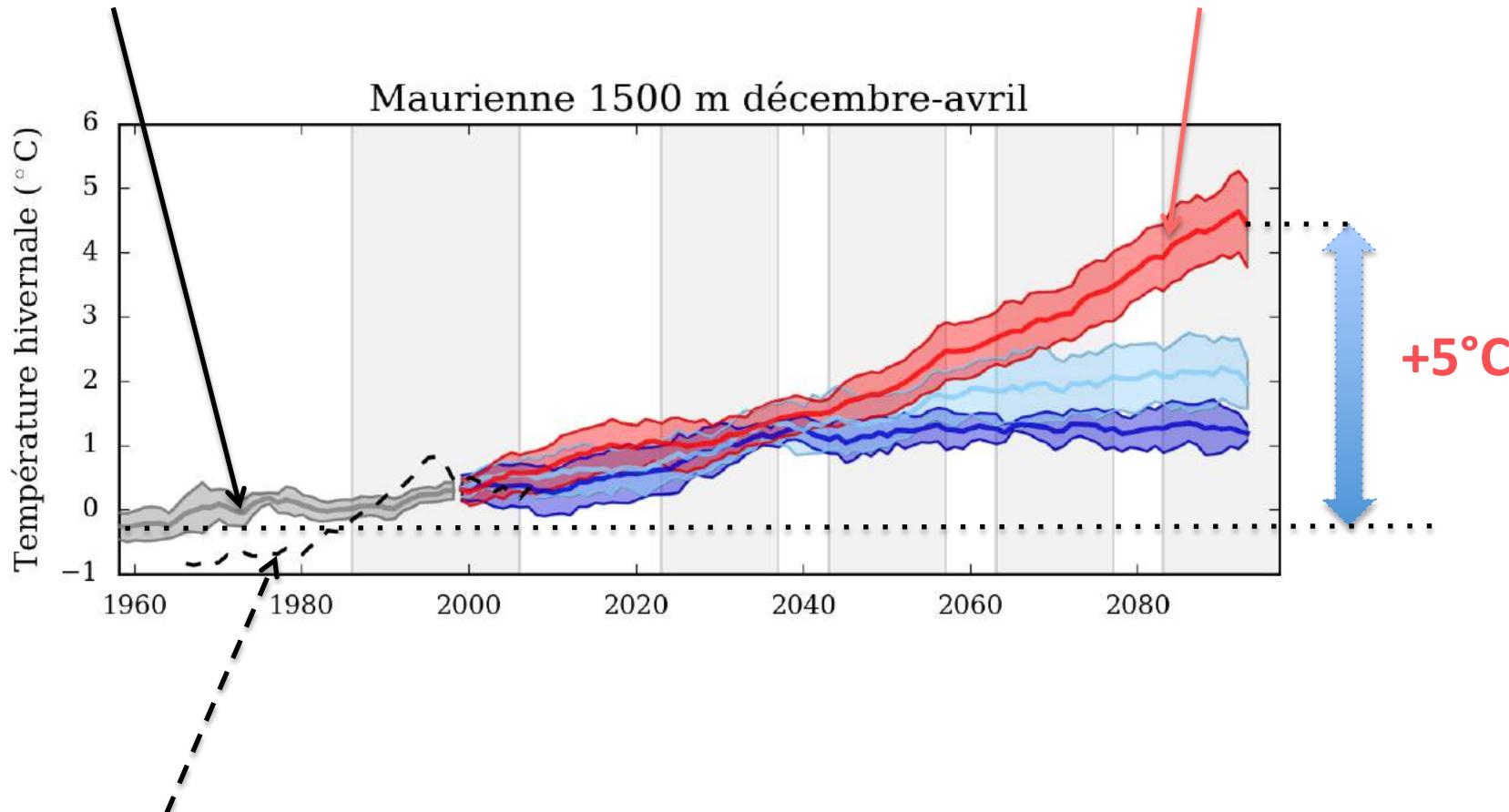


Référence  
(observation)

# Température observée et simulée à 1500 mètres

Modèle

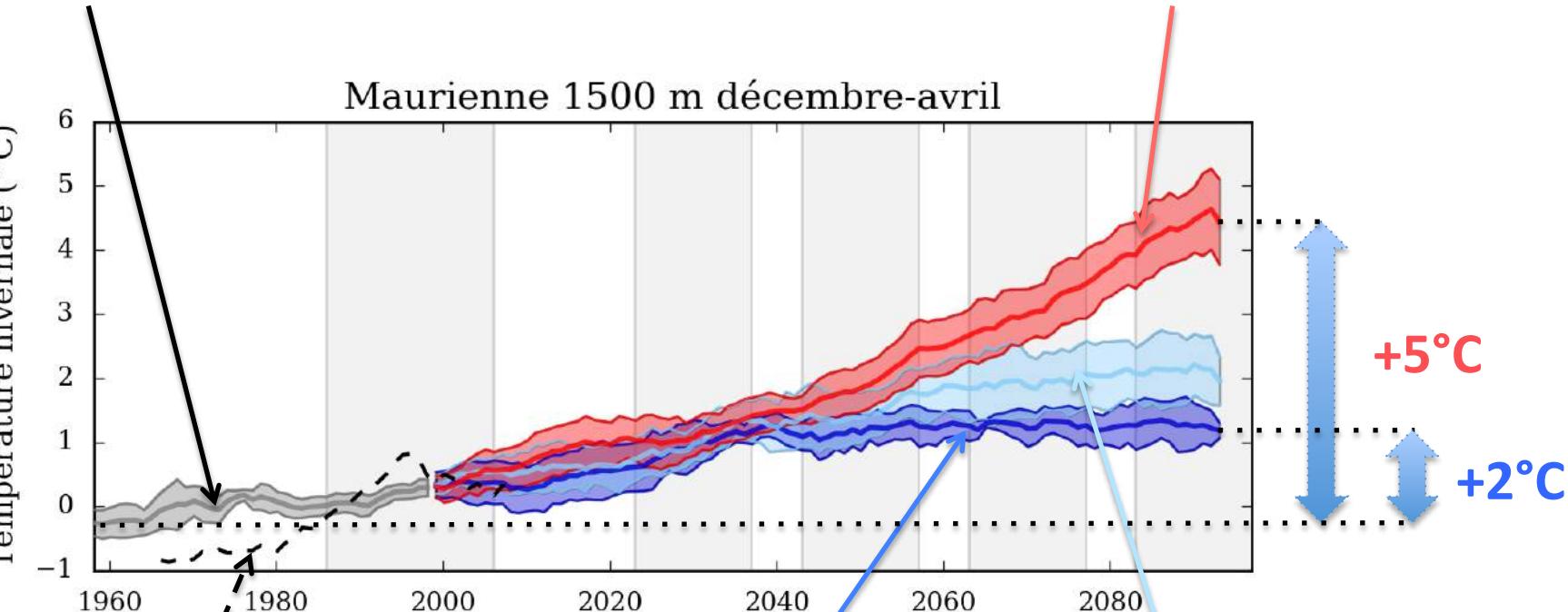
Scénario « chaud »



Référence  
(observation)

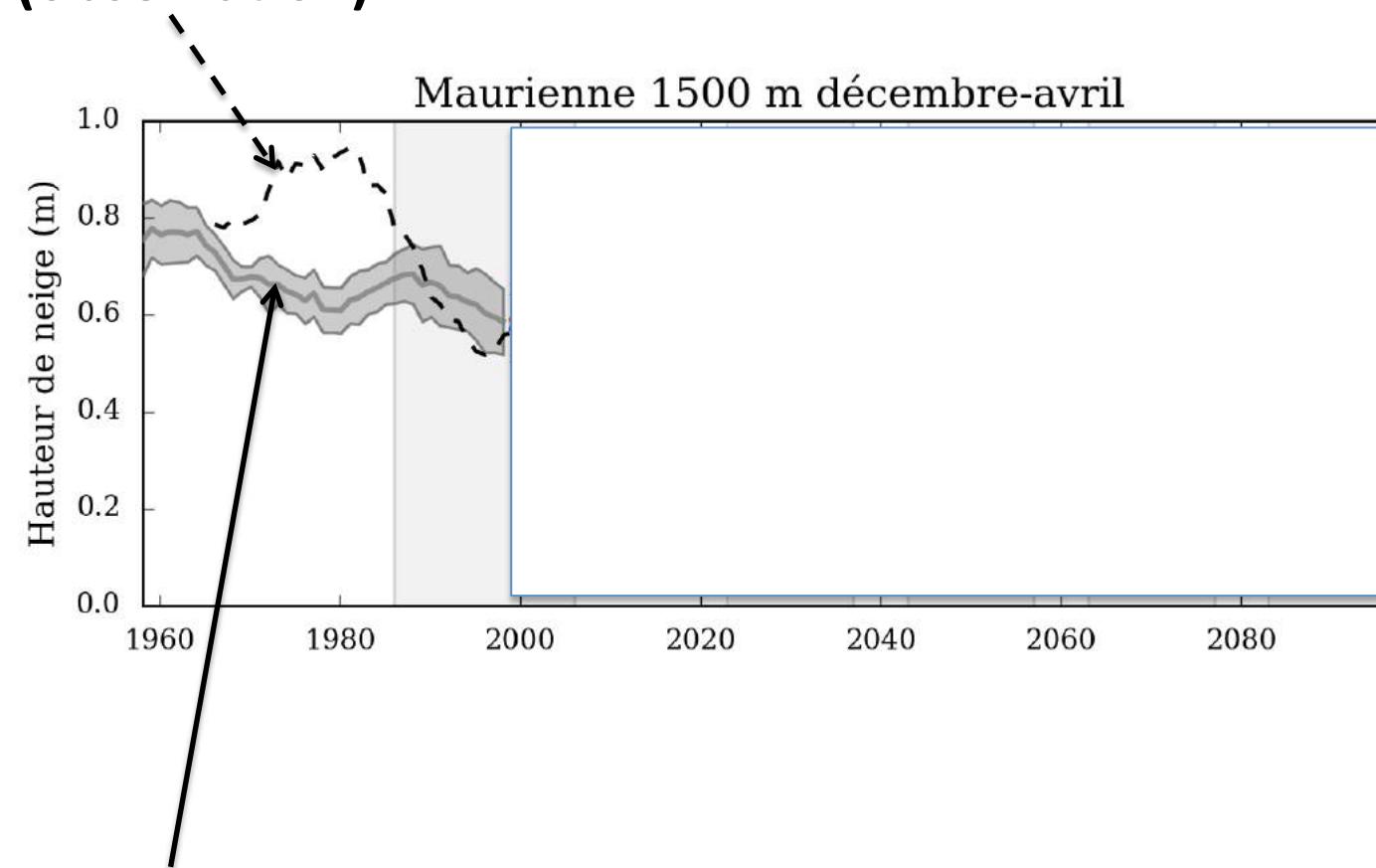
# Température observée et simulée à 1500 mètres

Modèle



# Neige observée et simulée à 1500 mètres

Référence  
(observation)

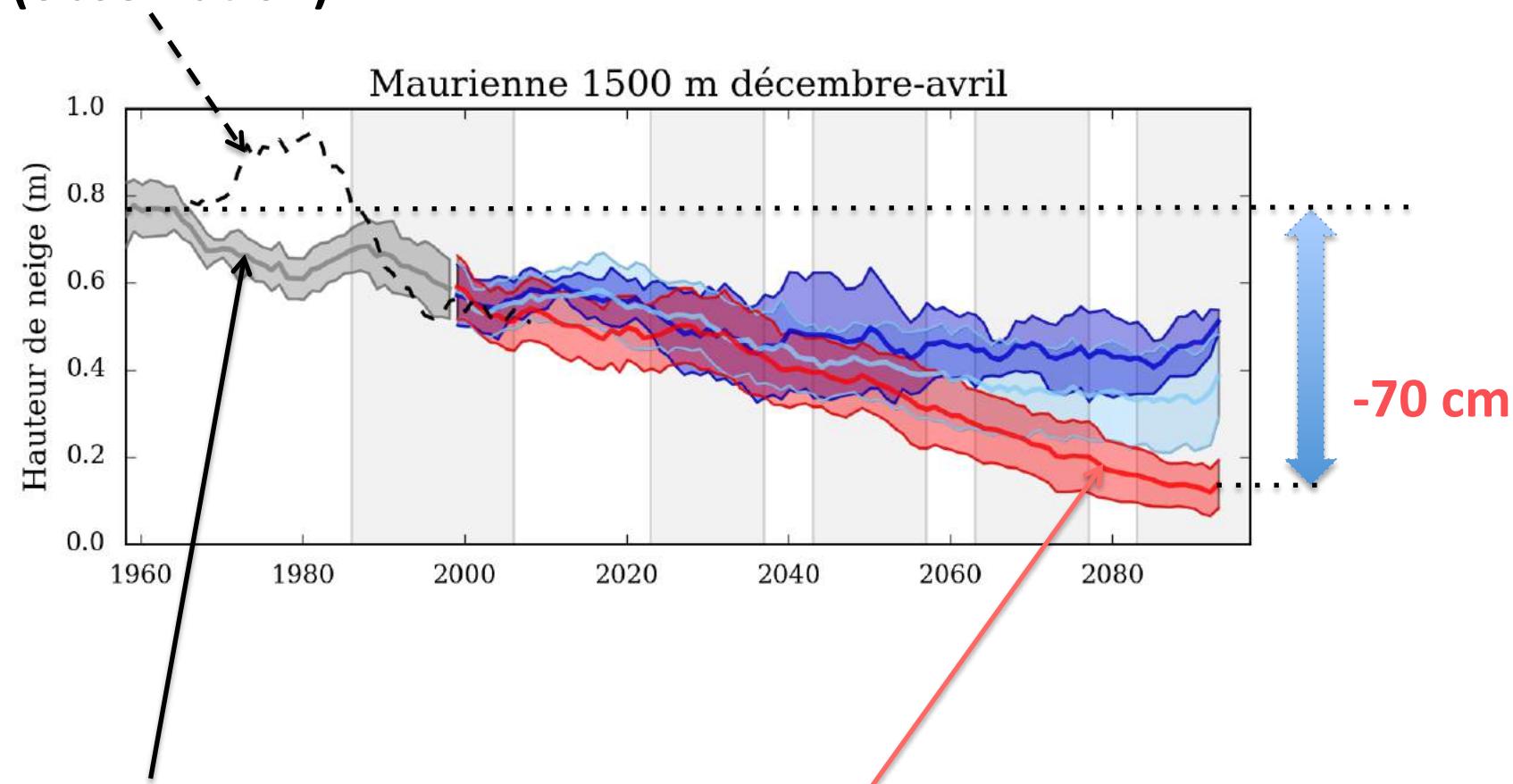


Modèle

Météo-France - CNRS (CNRM),  
R. Samacoïts, S. Morin

# Neige observée et simulée à 1500 mètres

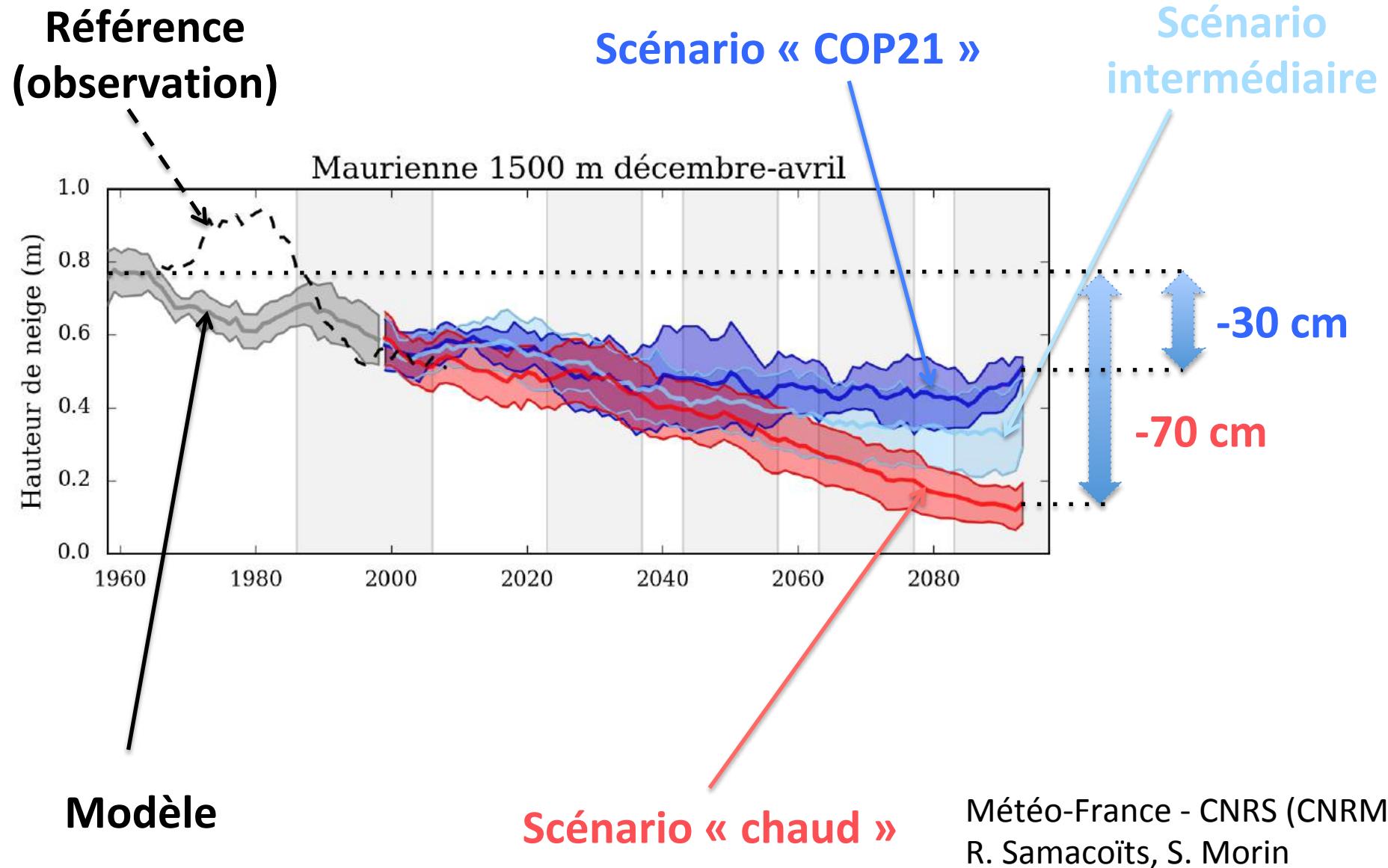
Référence  
(observation)

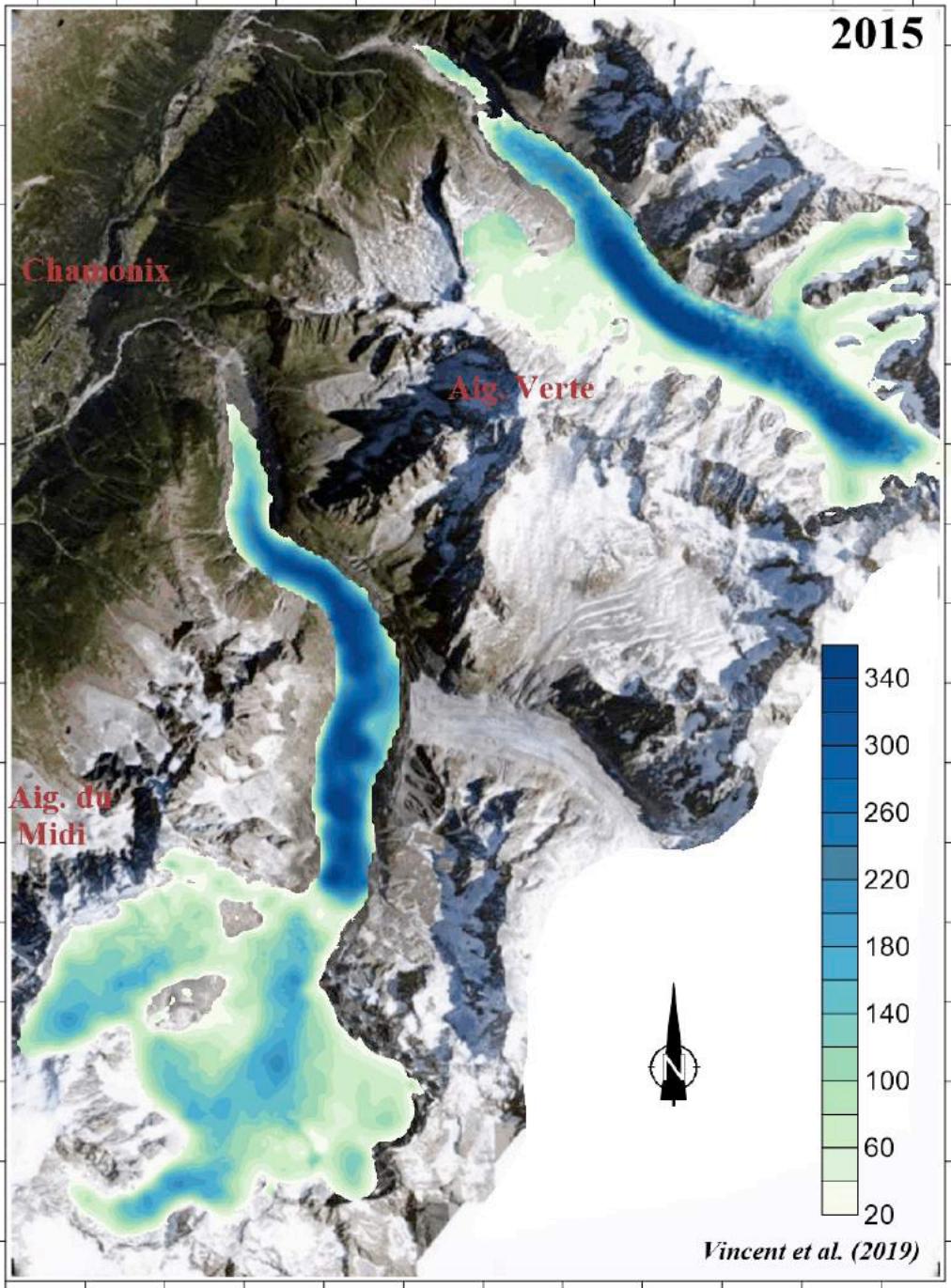


Scénario « chaud »

Météo-France - CNRS (CNRM),  
R. Samacoïts, S. Morin

# Neige observée et simulée à 1500 mètres





# Glaciers d'Argentière et Mer de Glace dans le scénario RCP4.5

## **Avantages et inconvénients de ADAMONT:**

- > Ensembles permettant d'estimer les incertitudes
- > Description par massif et par tranche d'altitudes des variables atmosphérique et du manteau neigeux.
- > pas de rétroactions physiques locales
- > forçage local des aérosols dans l'atmosphère et sur la neige mal représenté

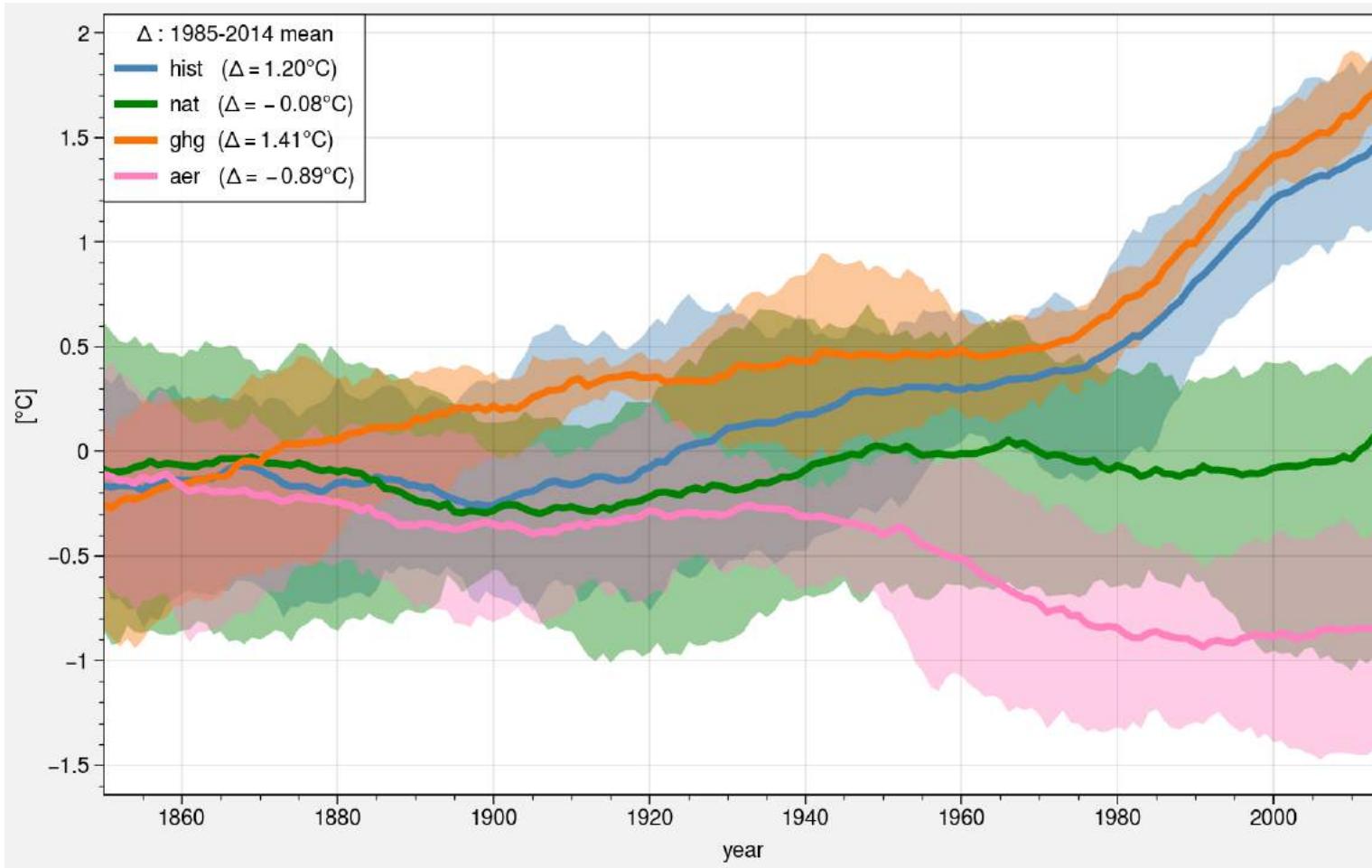
# **Modélisation climatique en région de montagne**

## **3 / Applications**

### **3.3 Effets contrastés des aérosols**



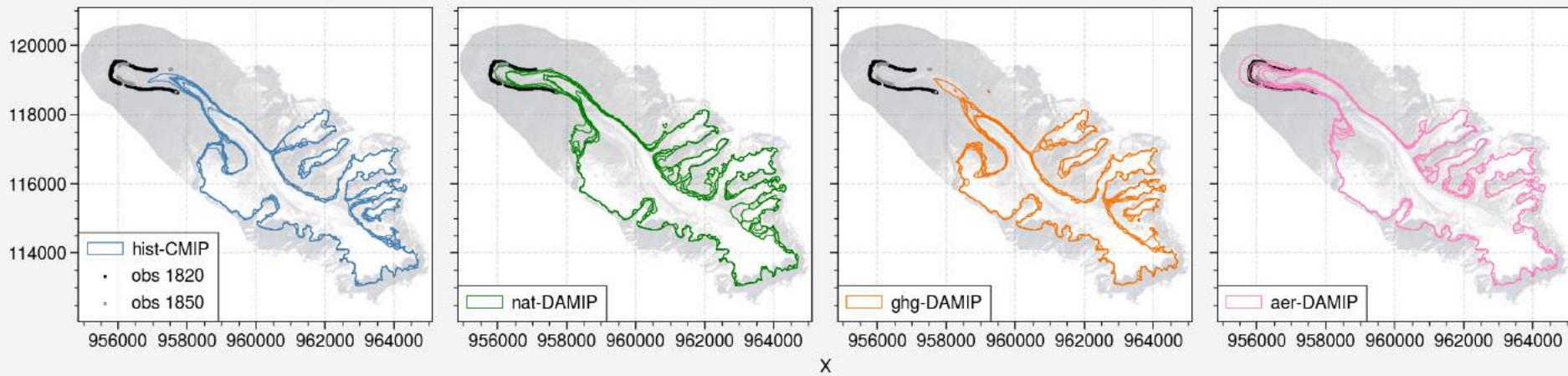
# Les aérosols atmosphériques refroidissent le climat...



Température débiaisée à Chamonix estimée à partir d'expériences de GCMs historiques, incluant uniquement les forçages naturels (nat), uniquement les gaz à effet de serre (Ghgs), uniquement les aérosols (aer). Clauzel et al., en prép

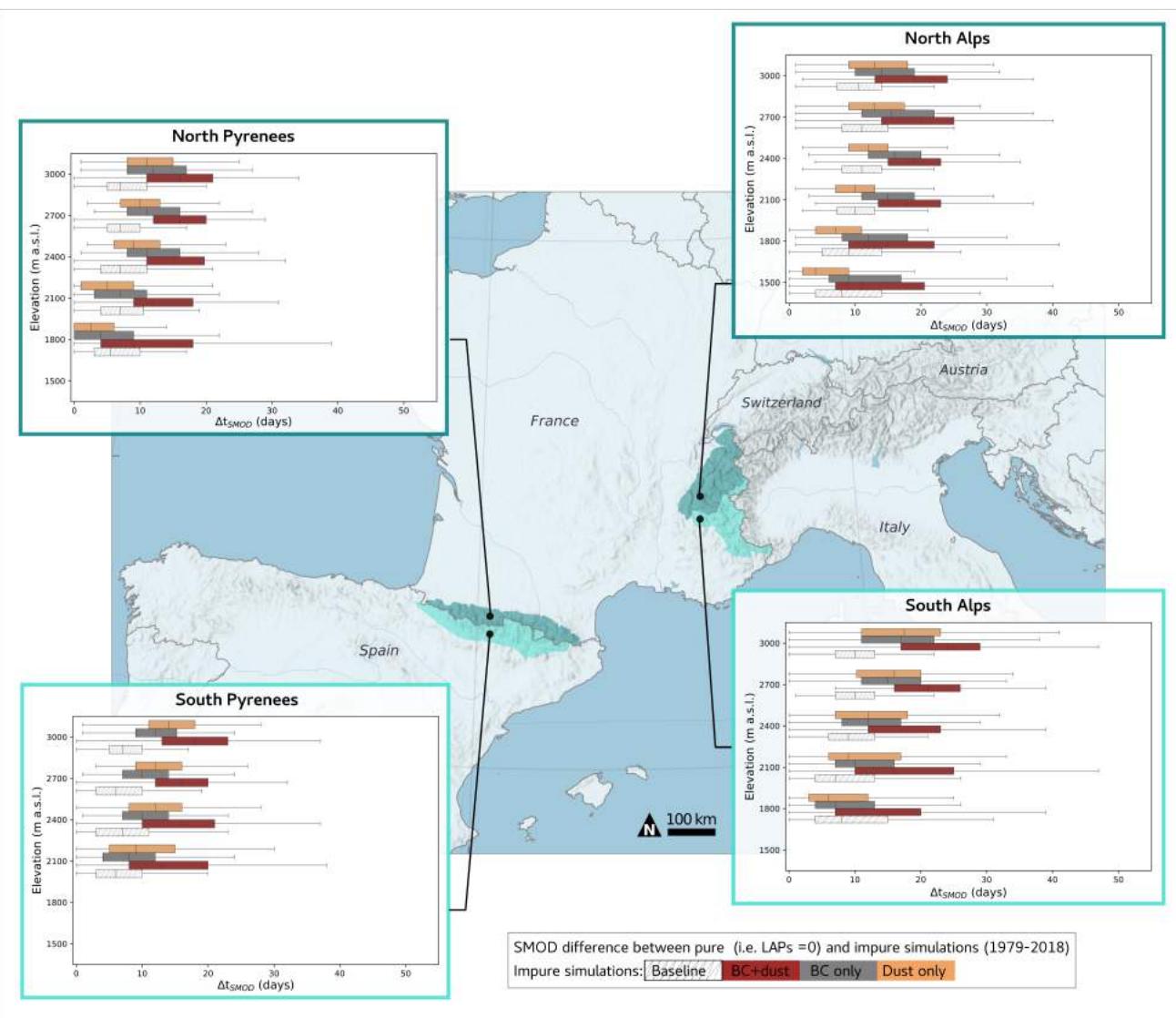
# Les aérosols atmosphériques refroidissent le climat...

Etendue du glacier en 2014



Surface du glacier d'Argentière simulée avec ELMER-ICE, forcé par des expériences de GCMs historiques, incluant uniquement les forçages naturels (nat), uniquement les gaz à effet de serre (Ghgs), uniquement les aérosols (aer). Clauzel et al., en prép

# Les aérosols déposés sur la neige accentuent la fonte...



Diminution de la durée d'enneigement du sol (jours) induite par le dépôt de particules (Reveillet et al., soumis)

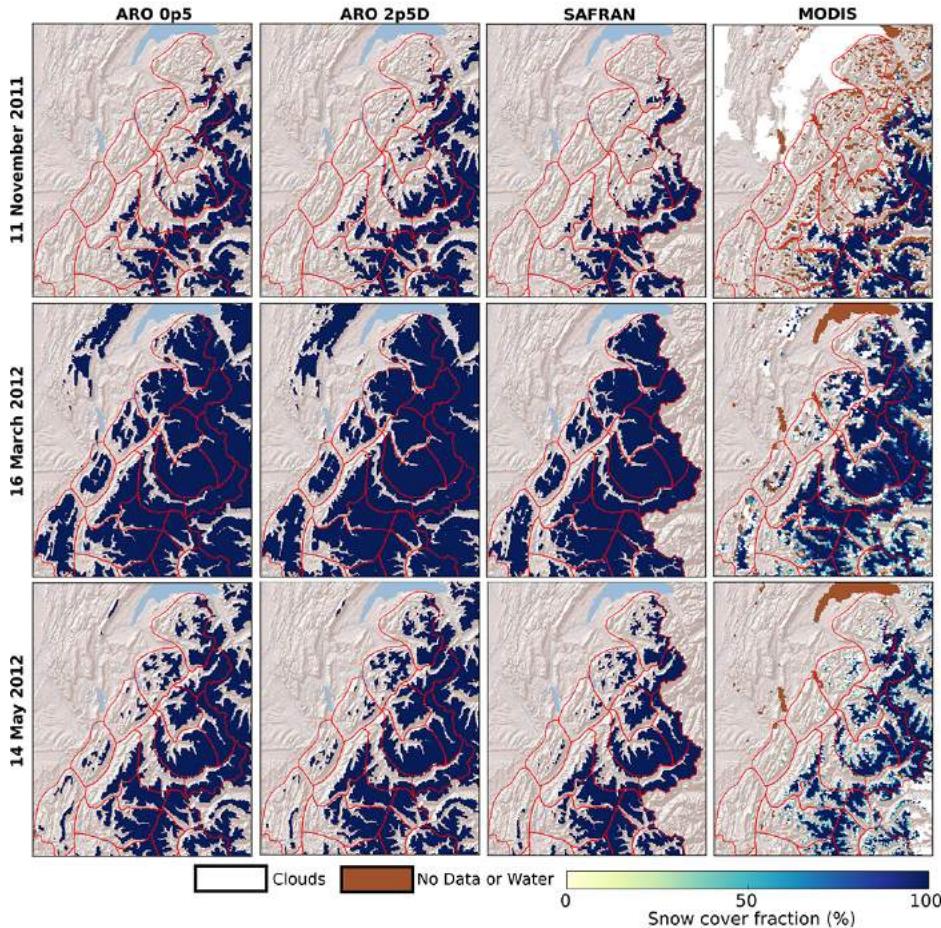
# **Modélisation climatique en région de montagne**

## **3 / Applications**

### **3.4 Haute résolution**



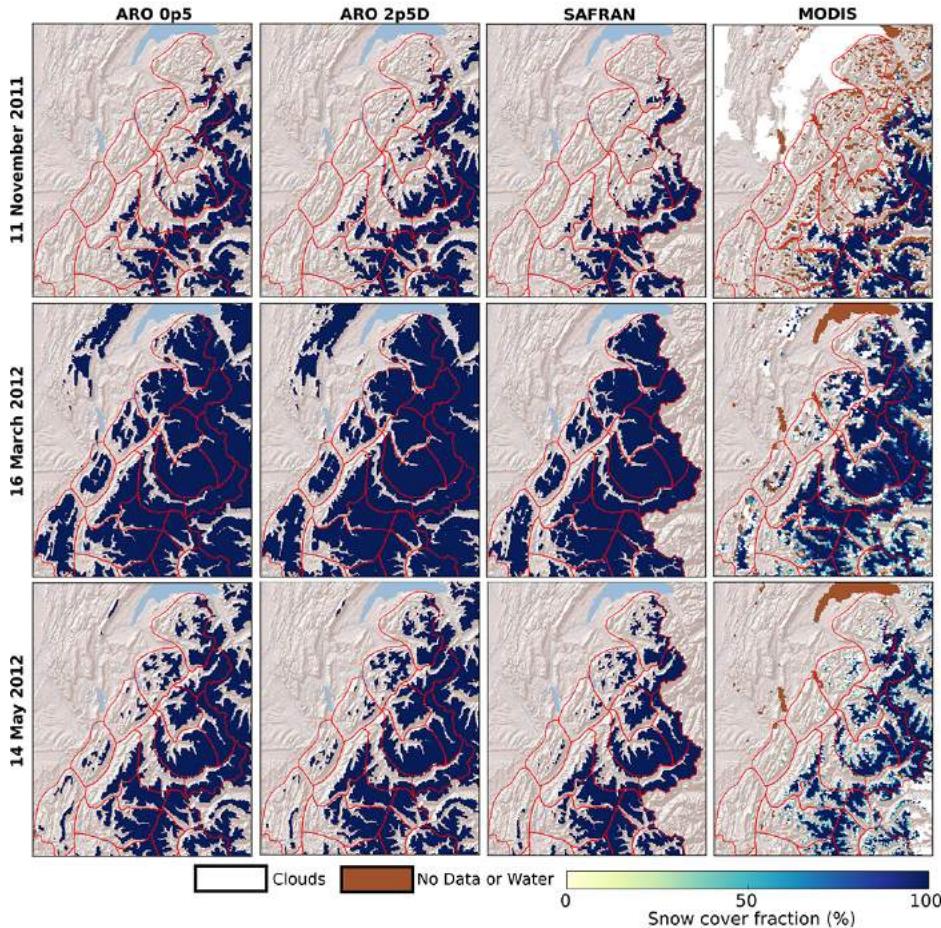
# AROME haute résolution forçant un modèle de neige versus MODIS



**Les modèles à haute résolution permettent de représenter de manière fine le manteau neigeux en montagne**

Vionnet et al., 2019, Météo-France

# La haute résolution, c'est bien, mais ça ne permet pas tout...



Vionnet et al., 2019

**Les modèles à haute résolution:**

- > héritent des biais des modèles utilisés en conditions aux limites
- > doivent être complétés en termes de processus physiques (e.g. aérosols).
- > Sont trop coûteux pour réaliser des simulations longues et sur des régions étendues

# **Modélisation climatique en région de montagne**

## **3 / Applications**

### **3.5 Utilisation du modèle MAR**



# Précipitation et température dans les Alpes au XXème siècle



Article

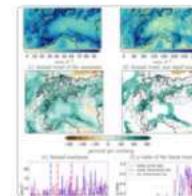
Assets

Peer review

Metrics

Related articles

16 Nov 2020



## Contrasting seasonal changes in total and intense precipitation in the European Alps from 1903 to 2010

Martin Ménégoz<sup>1</sup>, Evgenia Valla<sup>1</sup>, Nicolas C. Jourdain<sup>1</sup>, Juliette Blanchet<sup>1</sup>, Julien Beaumet<sup>1</sup>, Bruno Wilhelm<sup>1</sup>, Hubert Gallée<sup>1</sup>, Xavier Fettweis<sup>2</sup>, Samuel Morin<sup>3</sup>, and Sandrine Anquetin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univ. Grenoble Alpes, CNRS, IRD, G-INP, IGE, 38000 Grenoble, France

<sup>2</sup>F. R. S. – FNRS, Laboratory of Climatology, Department of Geography, University of Liège, 4000 Liège, Belgium

<sup>3</sup>Univ. Grenoble Alpes, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, CNRM, Centre d'Études de la Neige, 38000 Grenoble, France

Correspondence: Martin Ménégoz (martin.menegoz@univ-grenoble-alpes.fr)

Original Article | [Open Access](#) | Published: 29 October 2021

## Twentieth century temperature and snow cover changes in the French Alps

[Julien Beaumet](#) [Martin Ménégoz](#), [Samuel Morin](#), [Hubert Gallée](#), [Xavier Fettweis](#), [Delphine Six](#), [Christian Vincent](#), [Bruno Wilhelm](#) & [Sandrine Anquetin](#)

[Regional Environmental Change](#) 21, Article number: 114 (2021) | [Cite this article](#)

714 Accesses | 12 Altmetric | [Metrics](#)

Références aux articles, accès aux données (actualisées) et mise en place de scripts accessibles à: [https://github.com/mmenegoz/M2\\_climat\\_MAR](https://github.com/mmenegoz/M2_climat_MAR). Pour le prochain cours:  
-> Lecture de un ou deux de ces articles.  
-> Calcul des tendances saisonnières de précipitation et température sur des périodes de quelques décennies à un siècle, avec la significativité (selon votre disponibilité).

**Merci!!!**

