

Modélisation climatique en région de montagne

Martin Ménégoz, Janvier 2023

Communauté
UNIVERSITÉ Grenoble Alpes



Modélisation climatique en région de montagne

- 
- 1/ A grande échelle
 - 2/ A l'échelle d'un massif
 - 3/ Applications

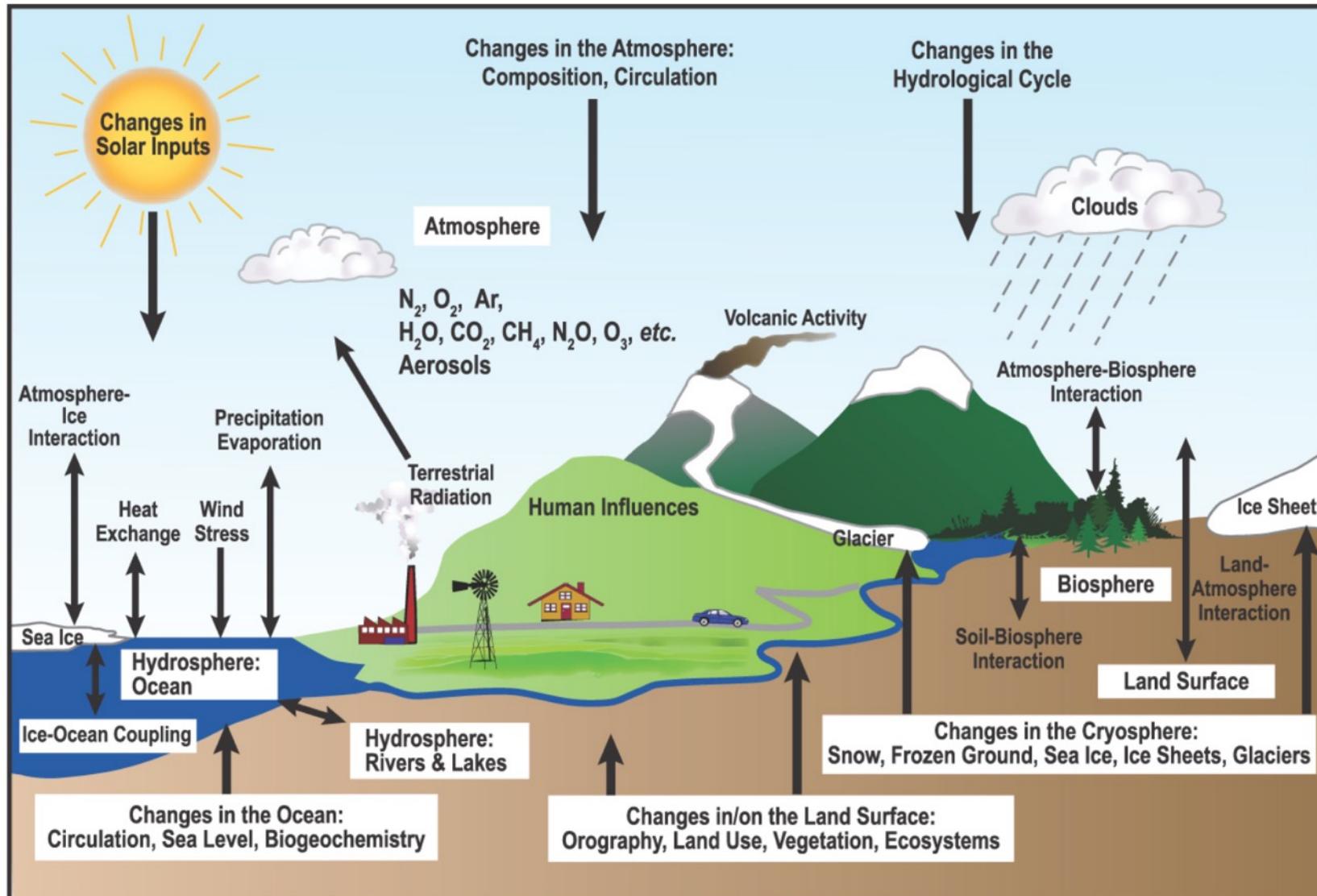
Modélisation climatique en région de montagne

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

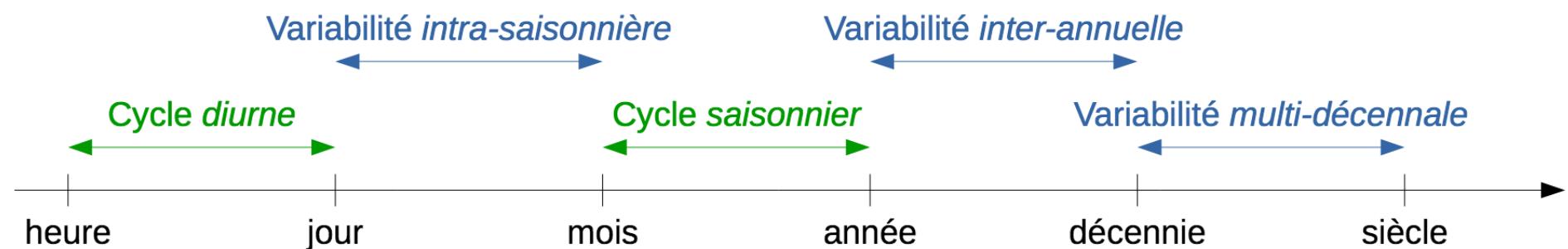
Climat = État moyen + variabilité climatique

Variabilité climatique = variabilité interne + forçages externes

Forçages externes = forçages anthropiques + forçages naturels

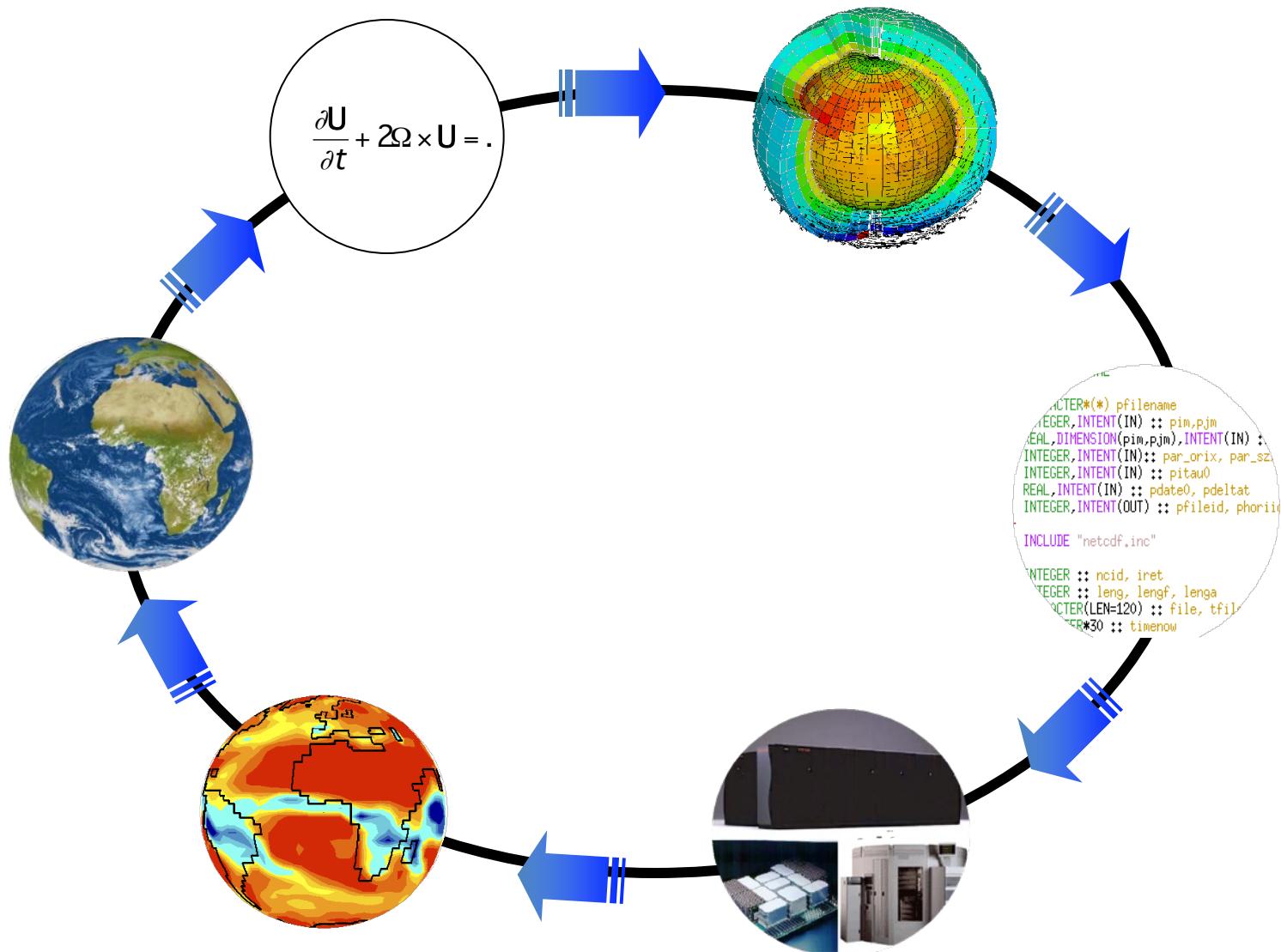
Variabilité naturelle = forçages naturels + variabilité interne

Echelles de temps de la variabilité interne:



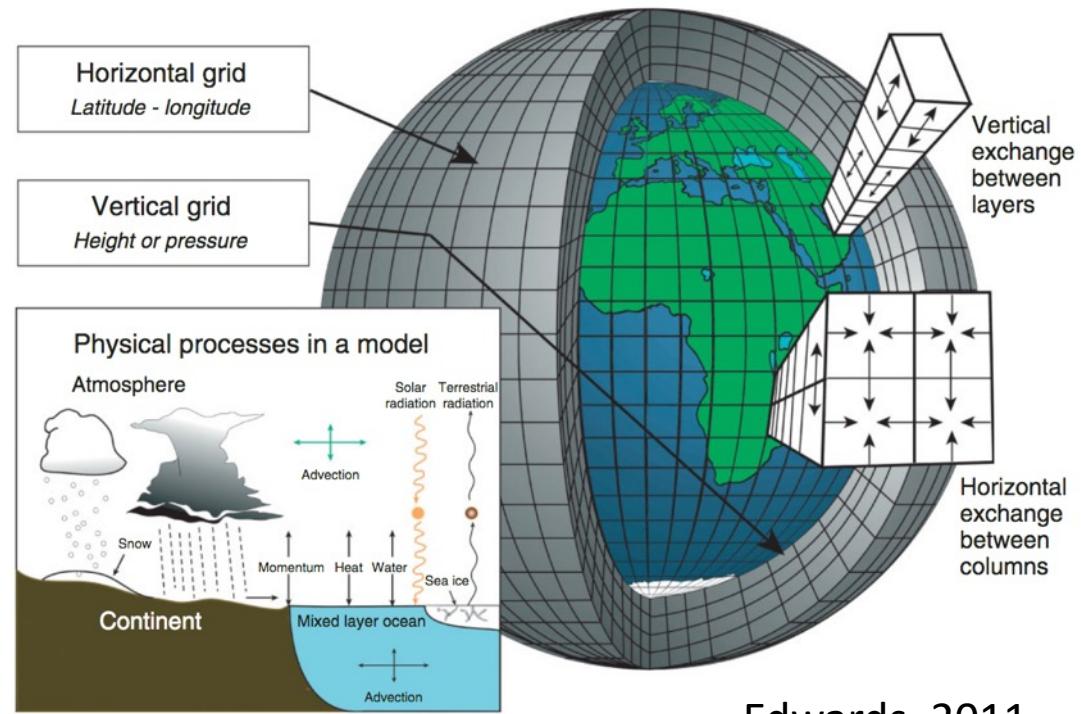
N.B. Les cycles **diurne** et **saisonnier** (variations énergétiques) ne sont pas de la **variabilité interne**.

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...

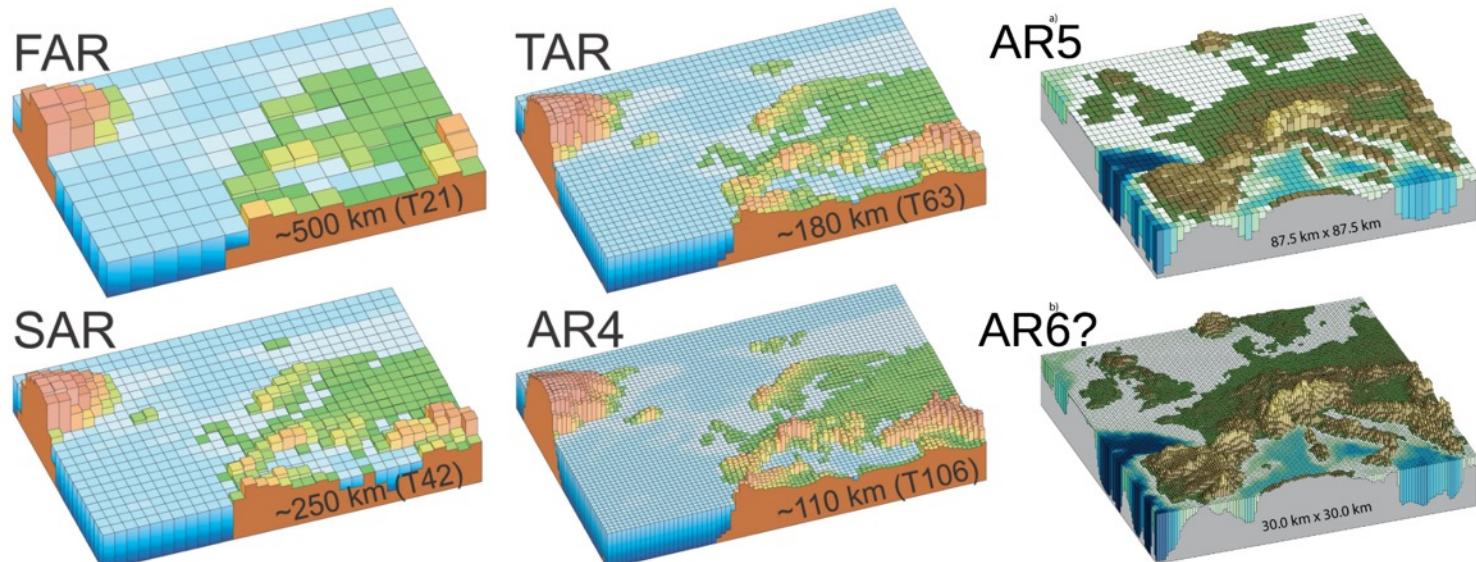


Edwards, 2011

Développement des modèles

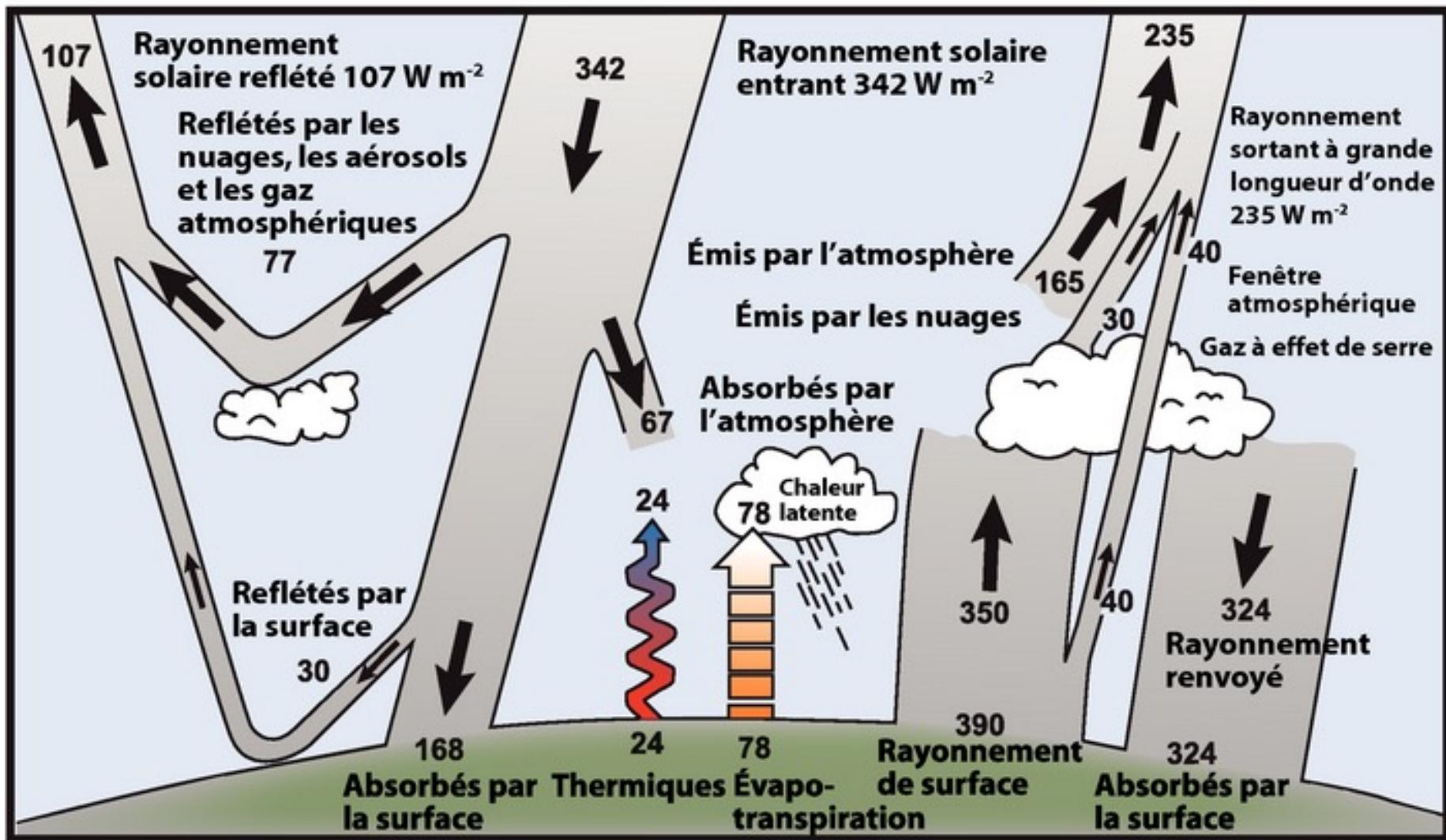
- Discrétisation de l'espace (x,y,z) et du temps (t)
- Résolution 3D de la dynamique (u,v, et traceurs)
- Schéma physique 1D : bilan d'énergie de surface, transfert radiatif, conduction thermique dans le sol...
- Paramétrisations des processus sous-maille: fraction du couvert neigeux, convection atmosphérique,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

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



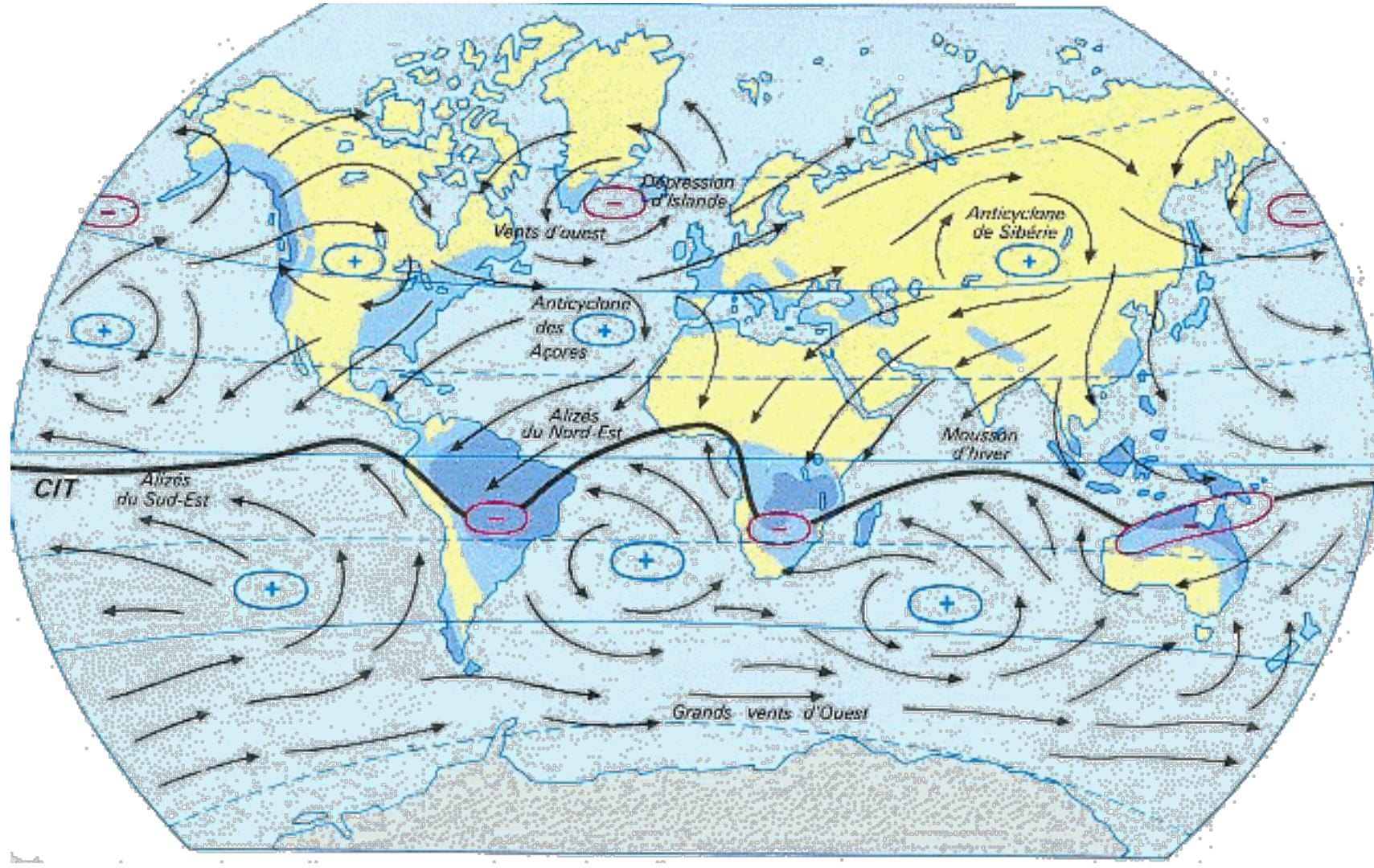
Source : IPCC AR4 ([2007](#)) Fig. 1.4 et AR5 ([2013](#)) Fig 1.14.

Bilan d'énergie

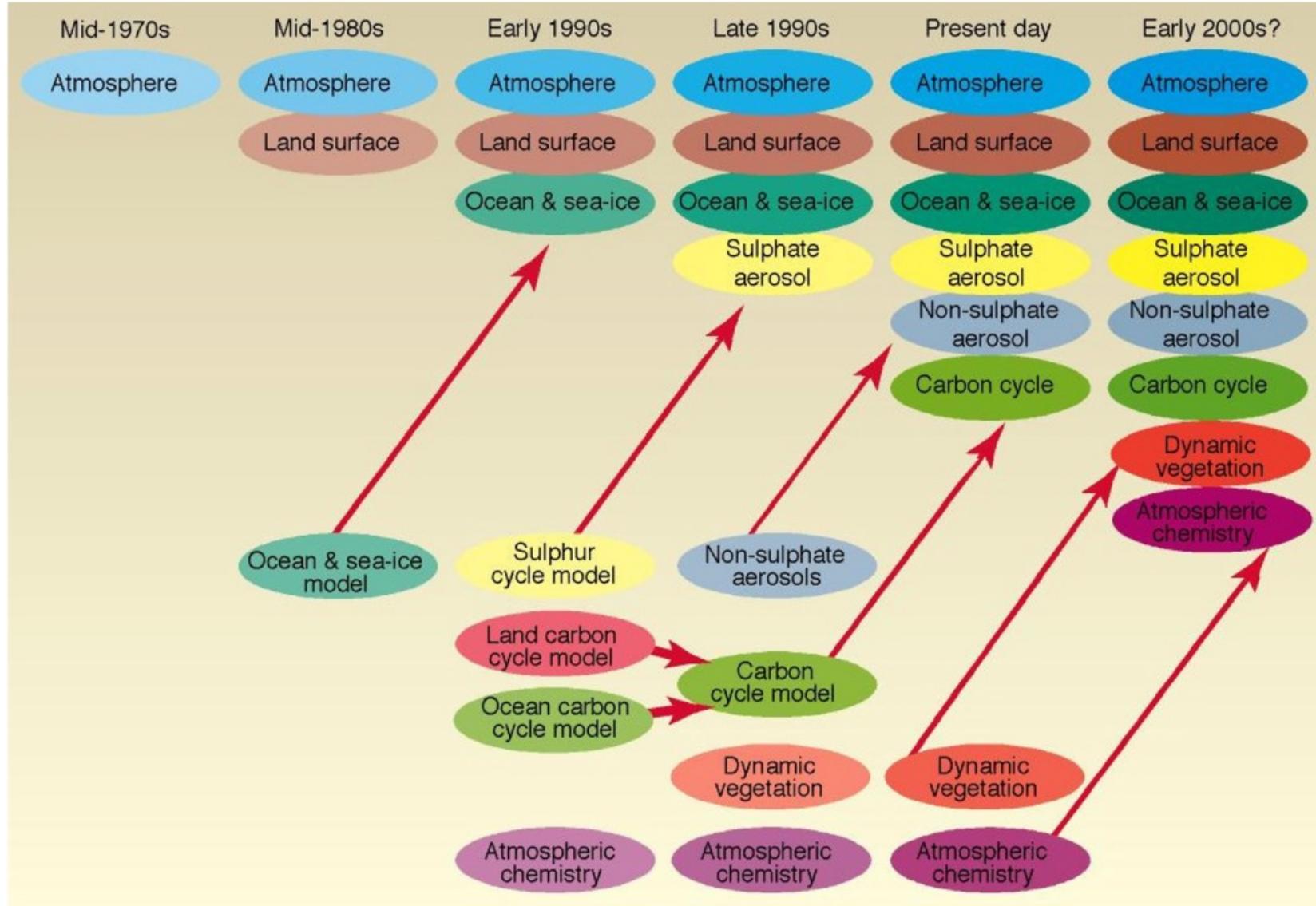


Estimation de la moyenne annuelle et mondiale du bilan d'énergie de l'atmosphère terrestre
Source : Kiehl et Trenberth (1997)

Circulation atmosphérique moyenne



Les AOGCMs deviennent des ESMs..



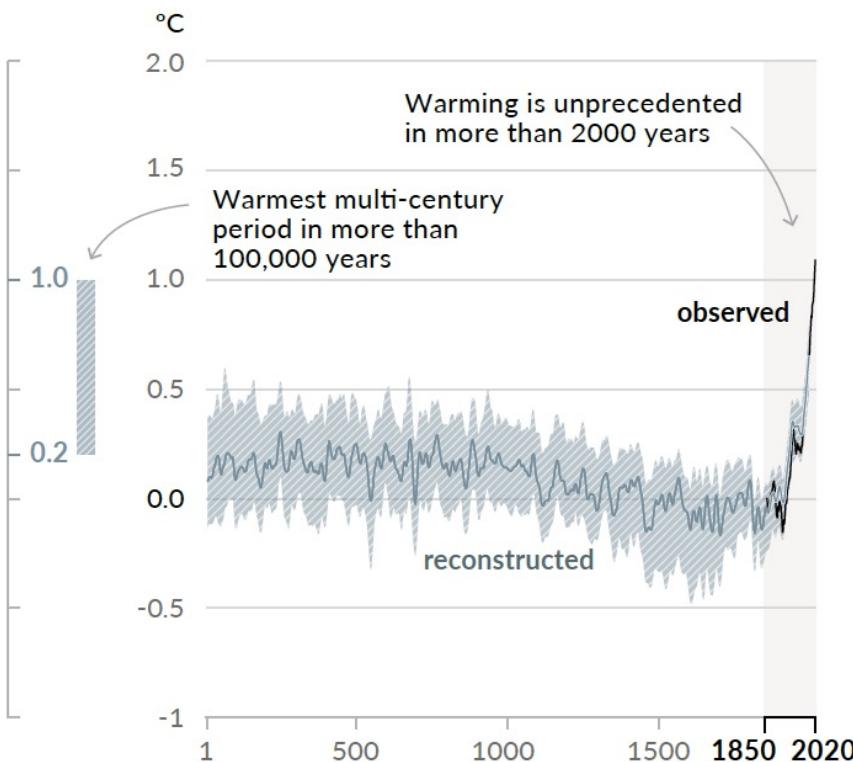
Source : IPCC TAR (2001), Fig. TS Box 3.

Les AOGCMs permettent

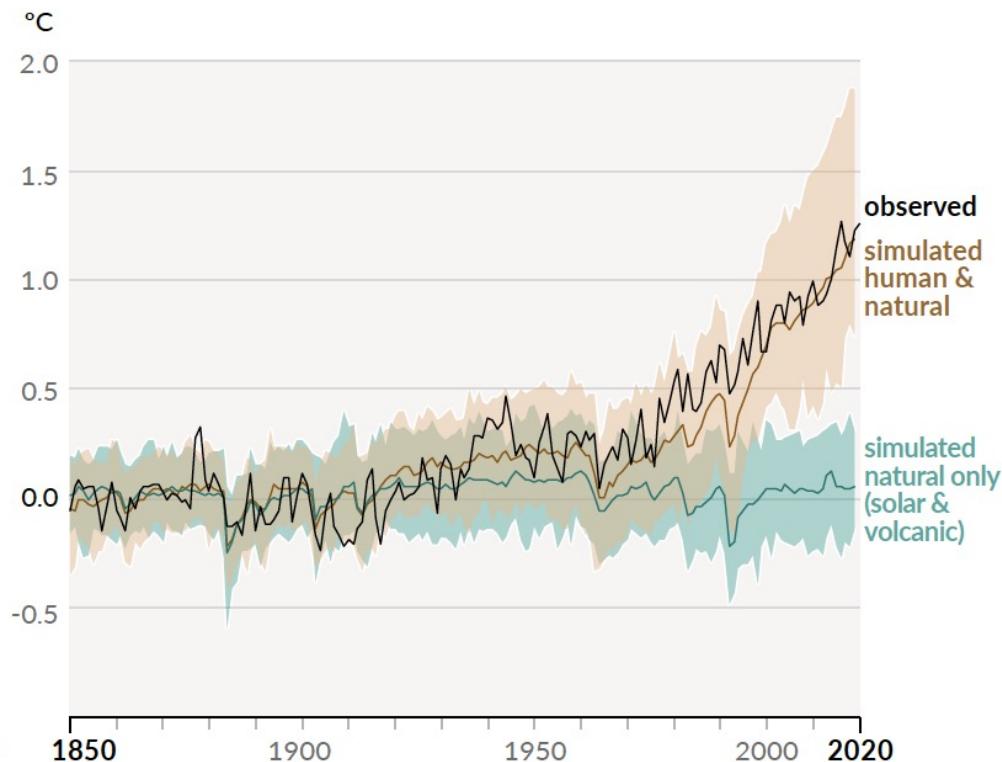
-> d'estimer la réponse du climat aux activités anthropiques

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)



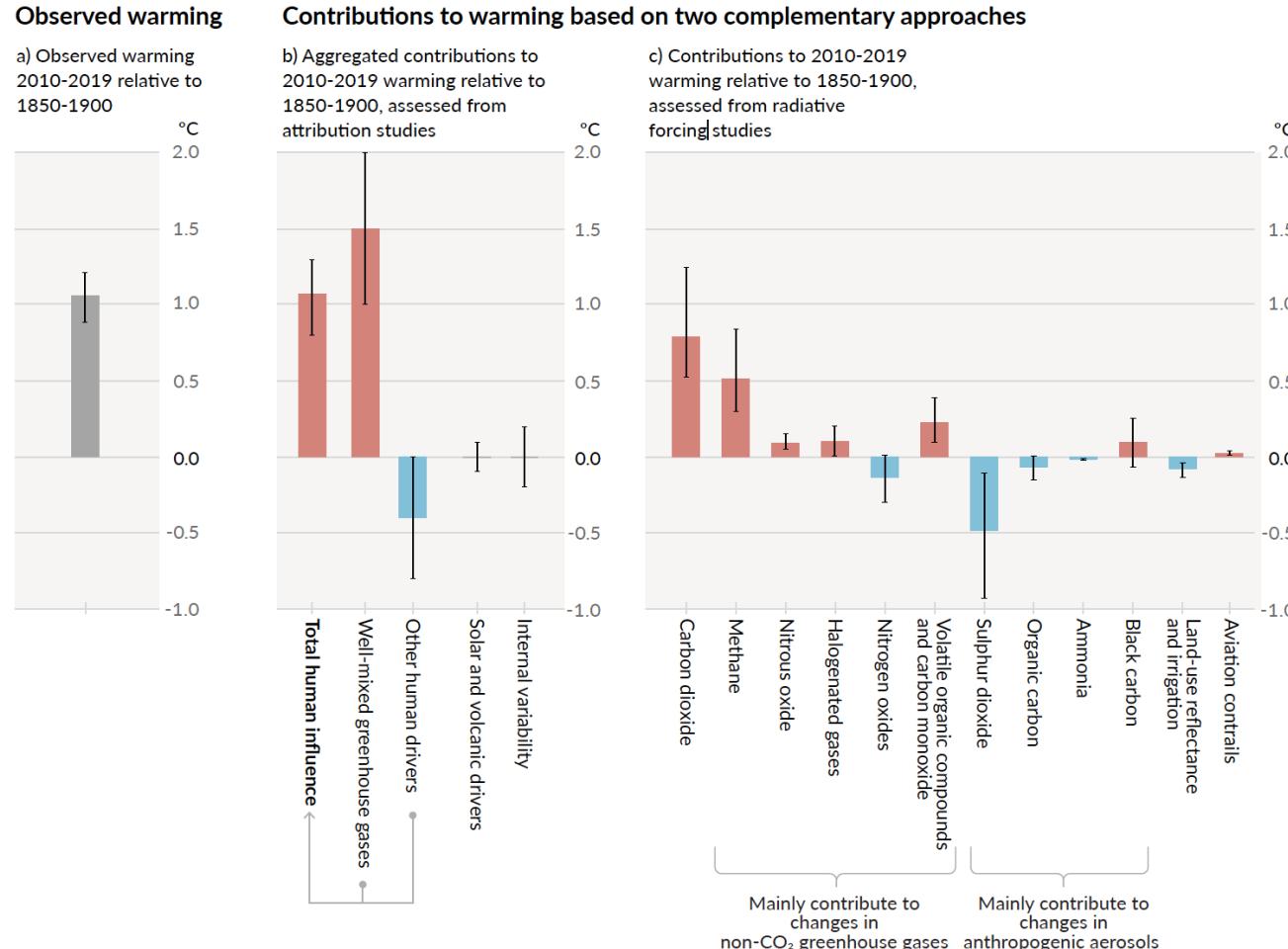
b) Change in global surface temperature (annual average) as observed and simulated using **human & natural** and **only natural** factors (both 1850-2020)



Les AOGCMs permettent

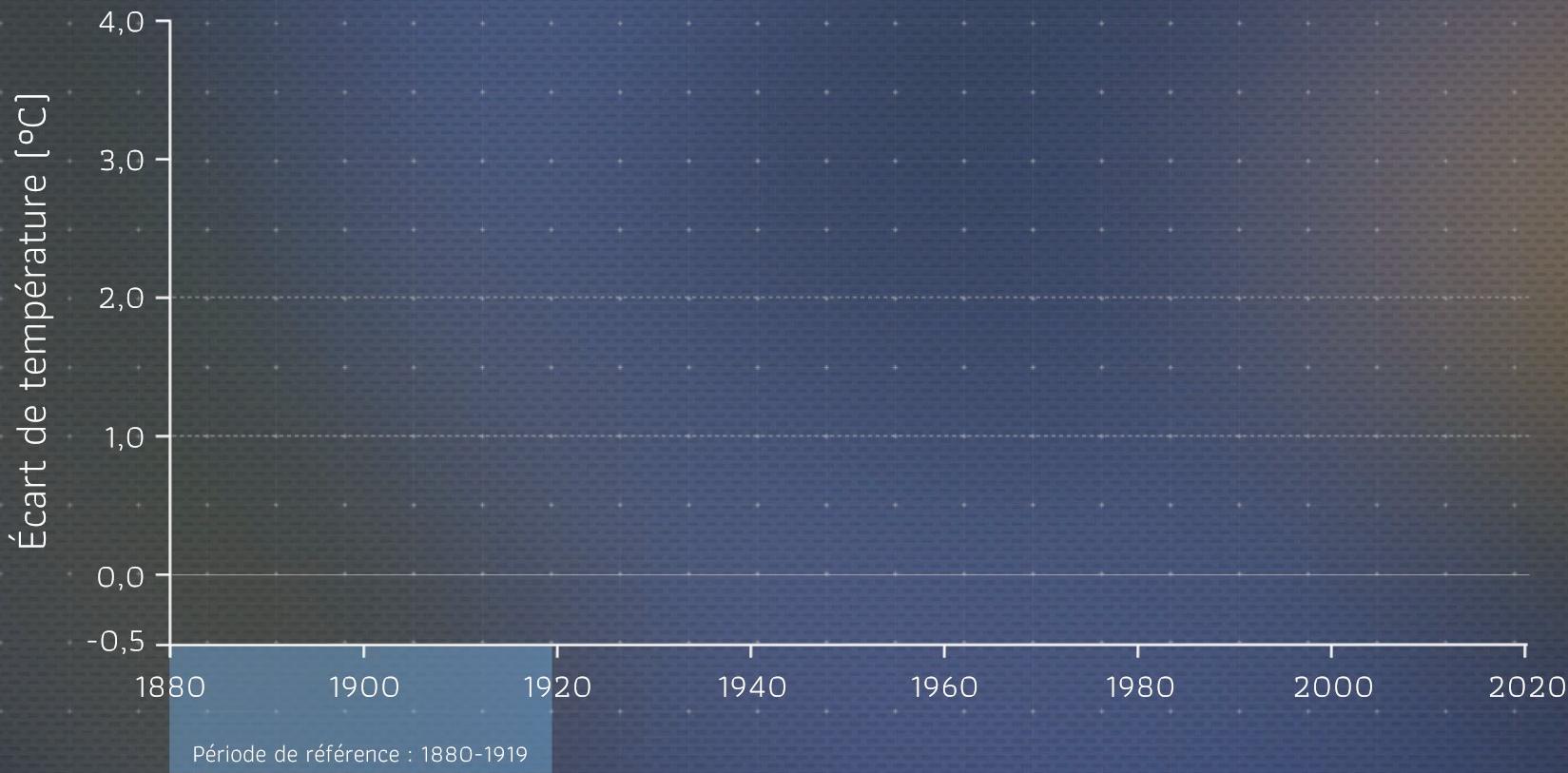
- > d'estimer la réponse du climat aux activités anthropiques
- > en identifiant les contributions des différents forçages

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



Simulations des changements annuels de température

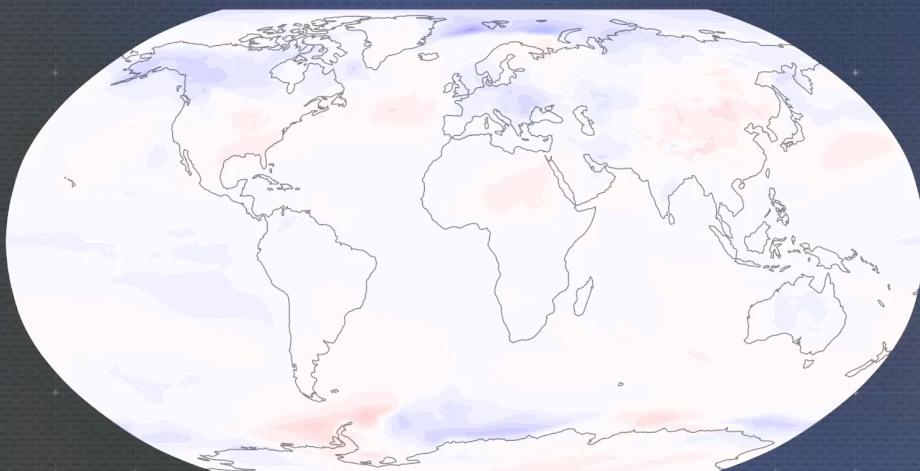
Changement de la température de surface de la Terre



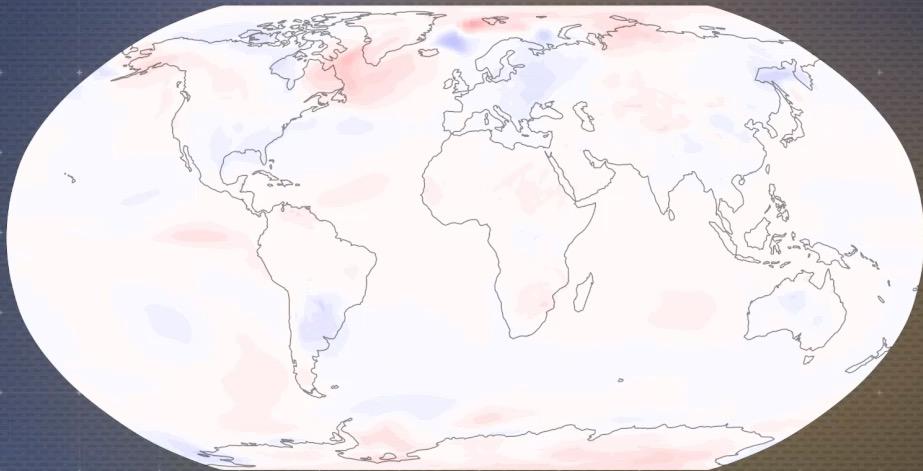
Simulations des changements annuels de température

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

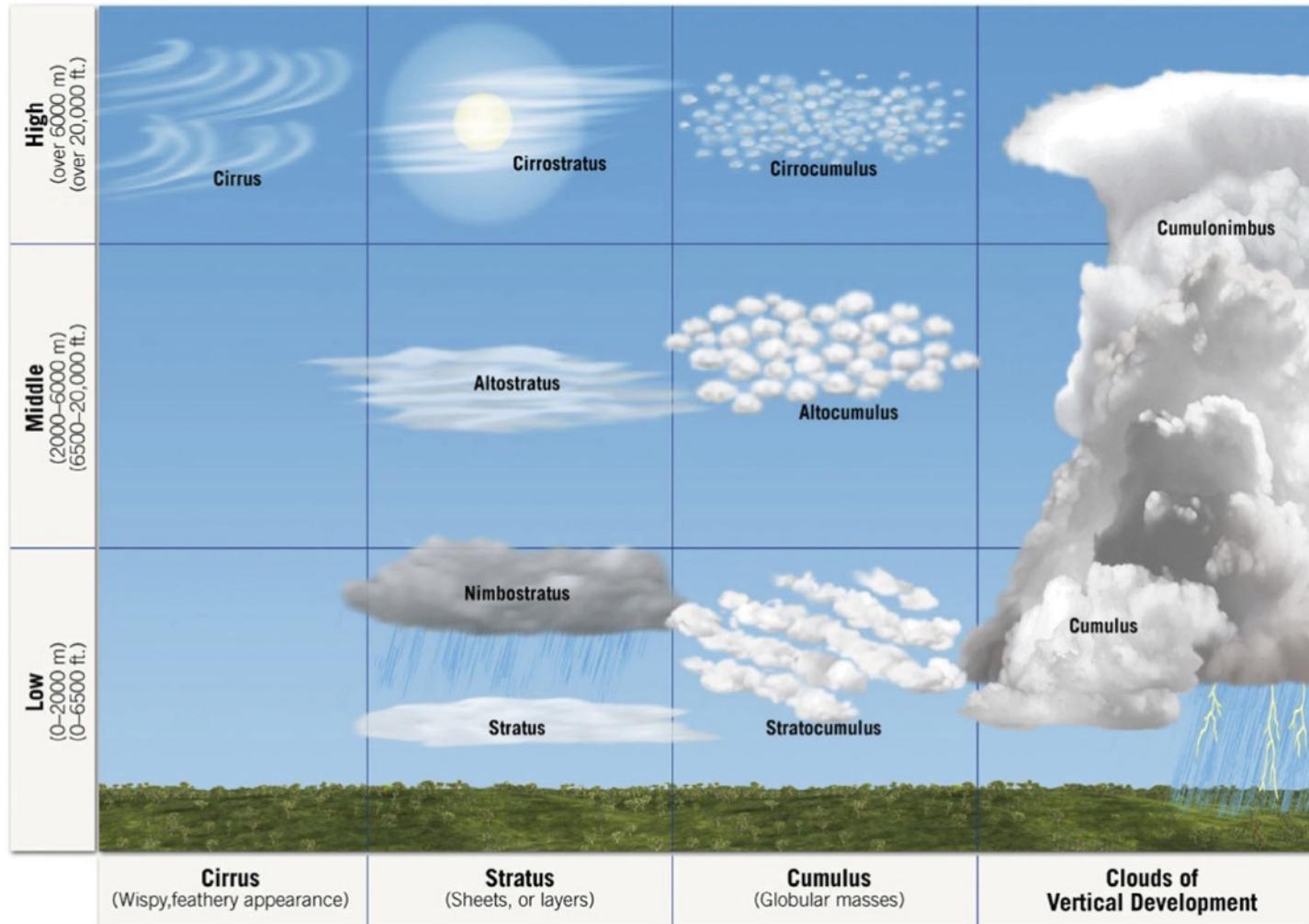
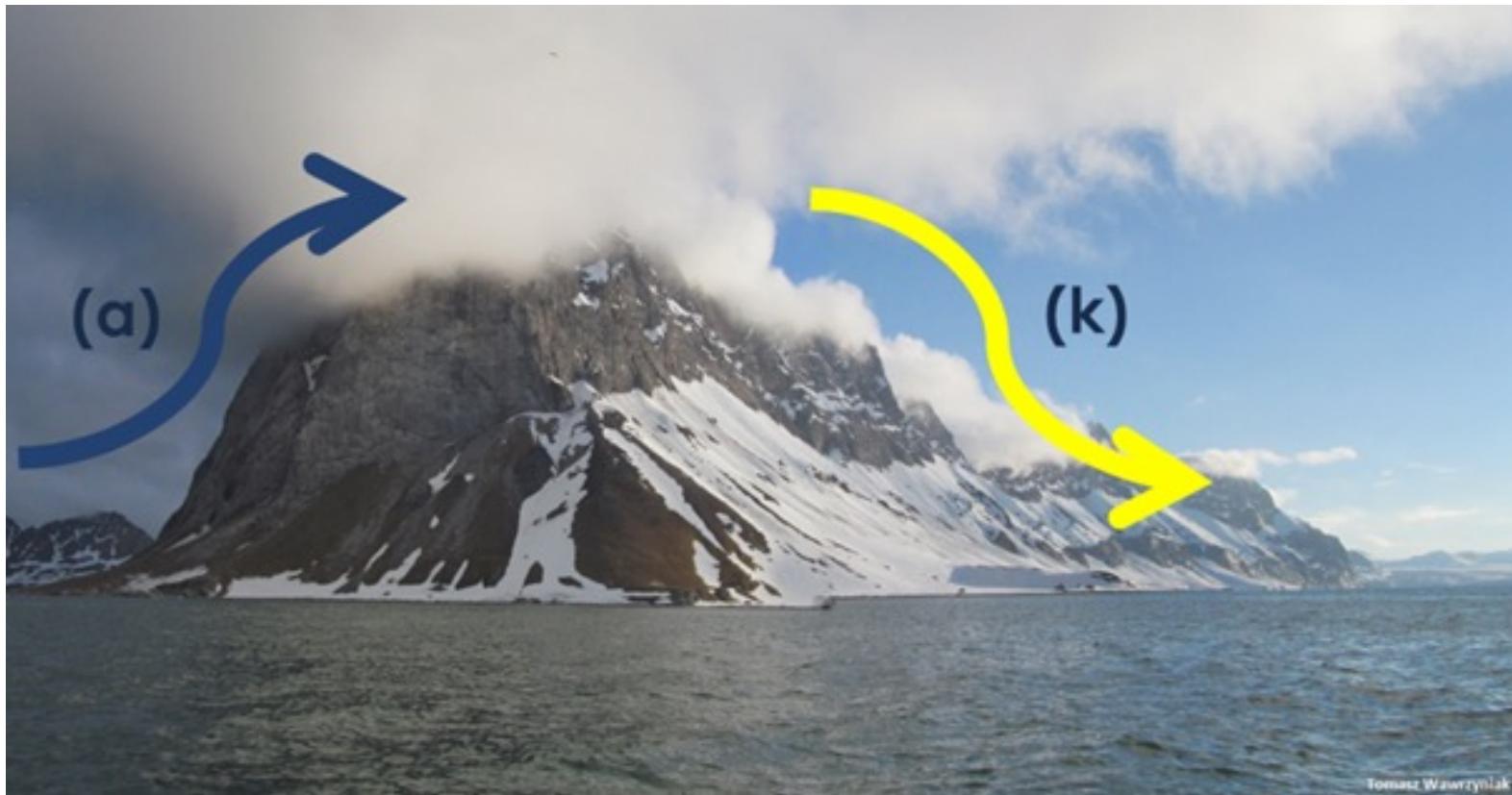


Figure 1 Ten major cloud types. Reproduced from Lutgens et al., 2016. <http://www.pearsonhighered.com/bookseller/product/Atmosphere-An-Introduction-to-Meteorology-The-Plus-MasteringMeteorology-with-eText-Access-Card-Package/9780321984425.page>

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!

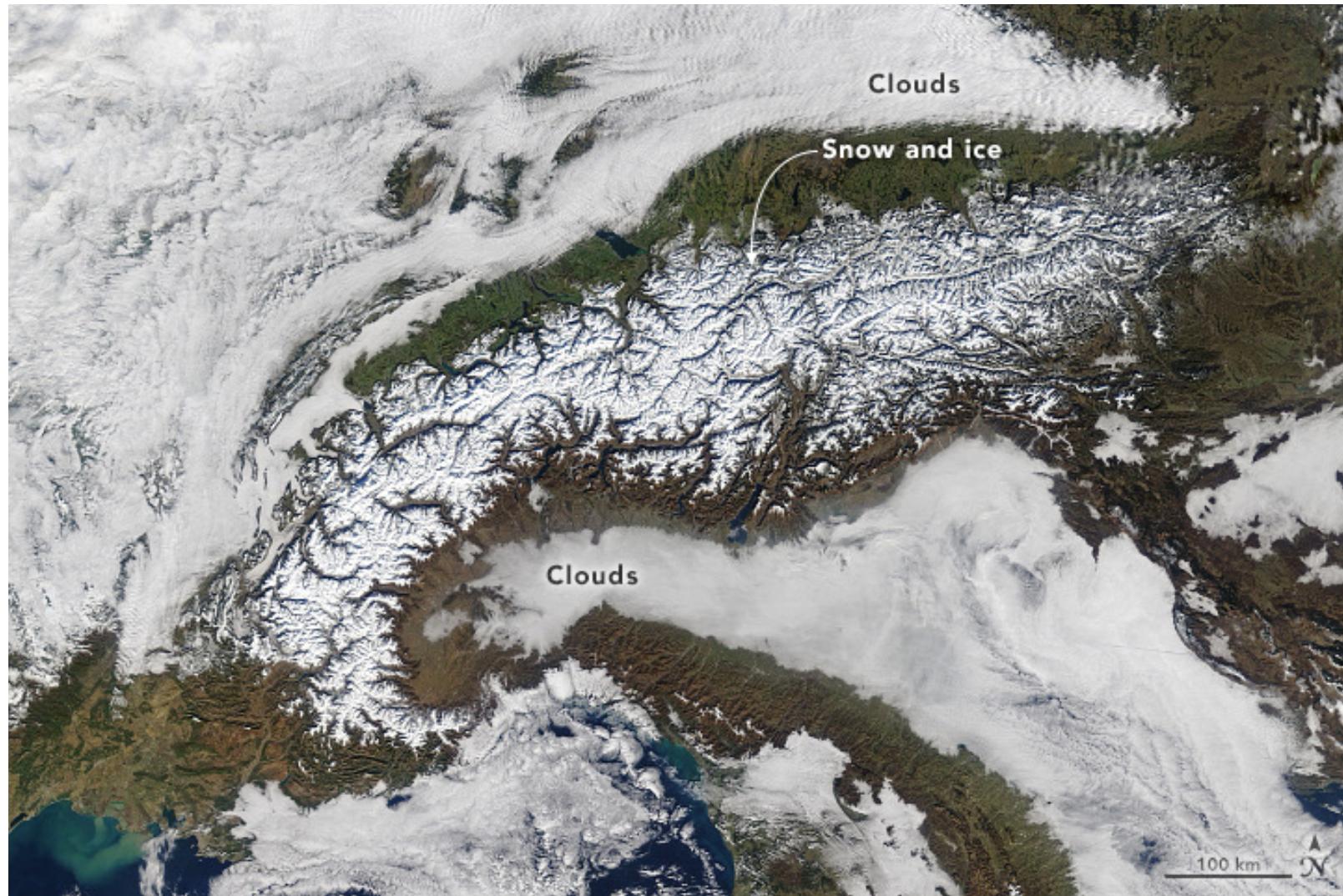


Cumulonimbus estival sur la chartreuse
Crédit photo : Laurence Martin via twitter
@meteocentreisere



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?

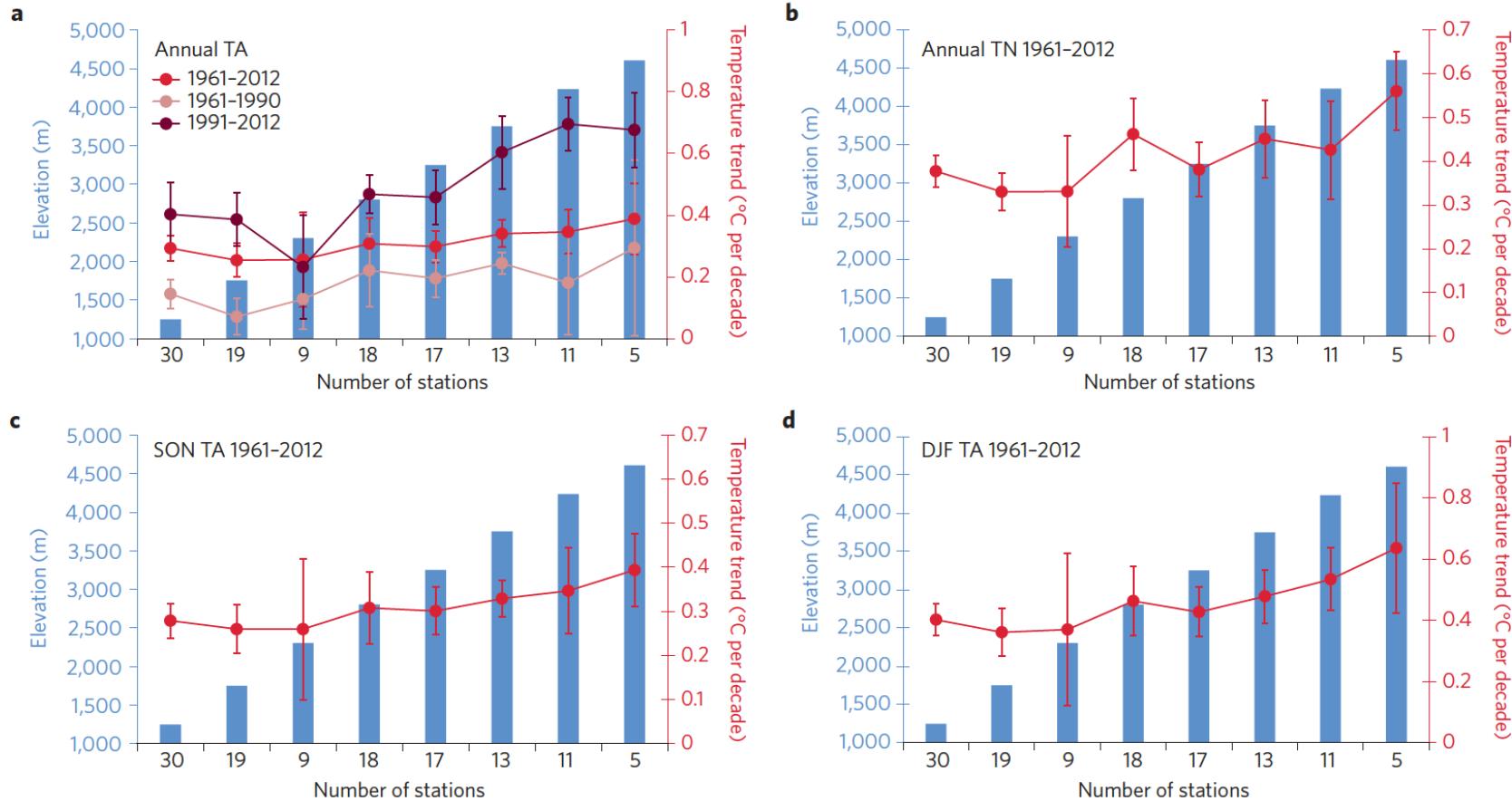


Figure 1 | Elevation-dependent warming over and around the Tibetan Plateau. **a**, Annual mean surface air temperature (TA) over 3 time periods. **b**, Annual mean minimum temperature (TN) from 1961–2012. **c**, Mean autumn (September–November, SON) surface temperature from 1961–2012. **d**, Mean winter (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?

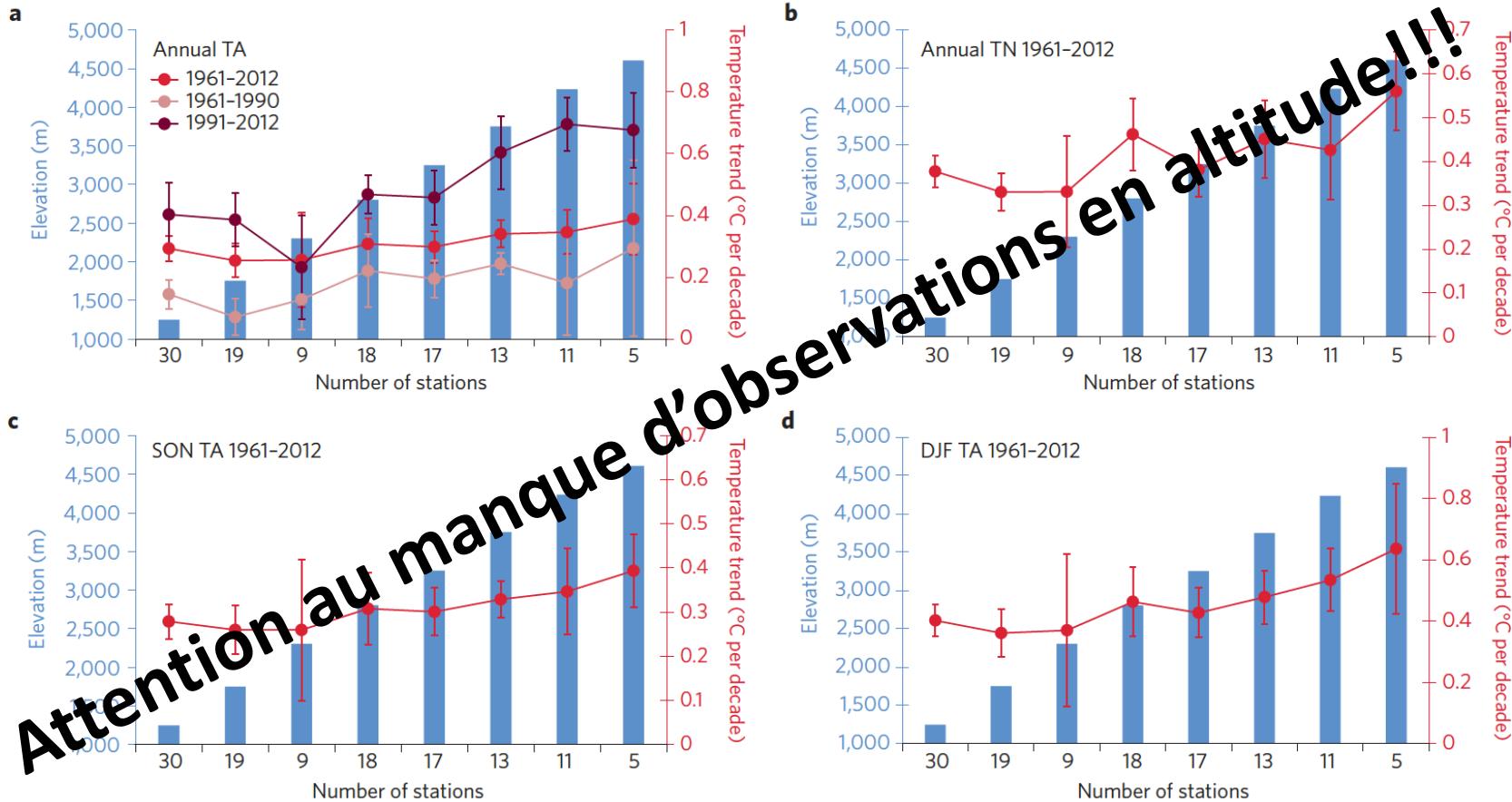


Figure 1 | Elevation-dependent warming over and around the Tibetan Plateau. **a**, Annual mean surface air temperature (TA) over 3 time periods. **b**, Annual mean minimum temperature (TN) from 1961-2012. **c**, Mean autumn (September-November, SON) surface temperature from 1961-2012. **d**, Mean winter (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?

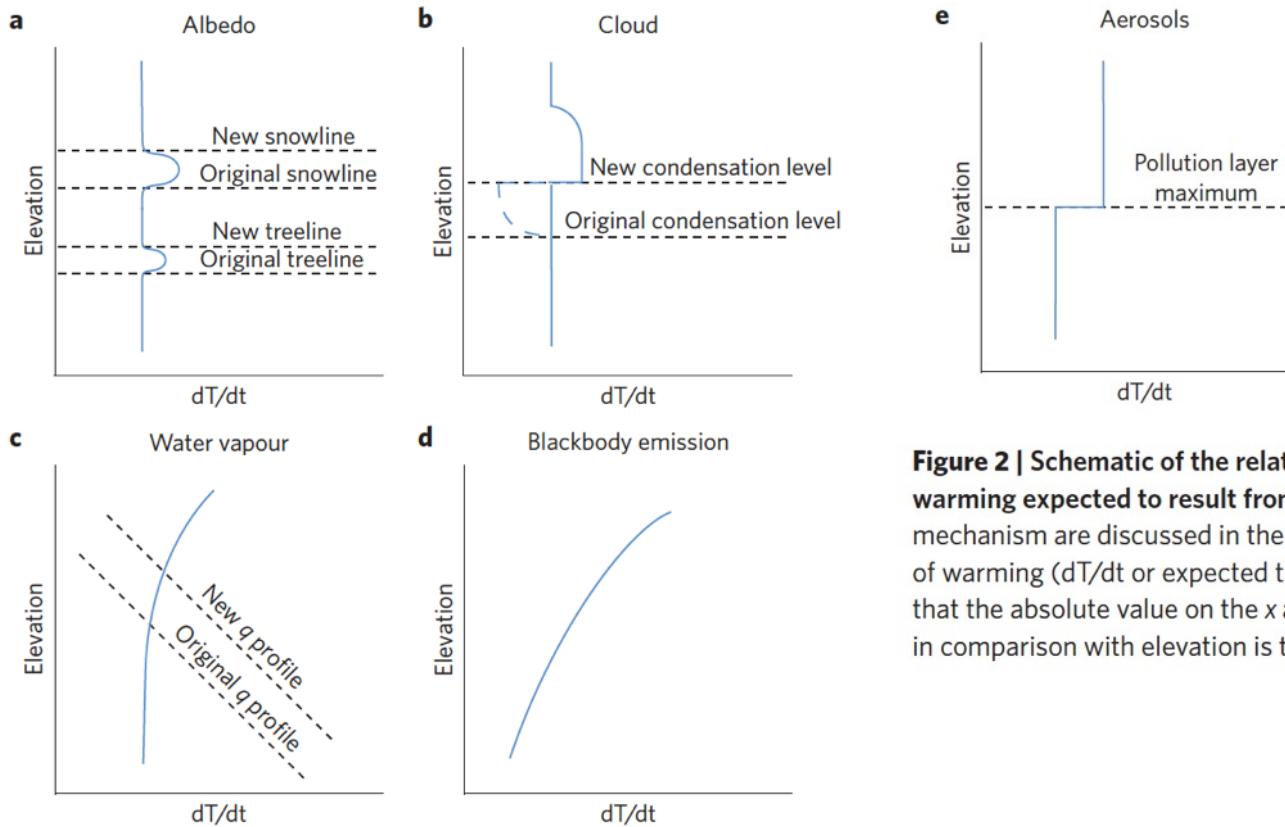


Figure 2 | Schematic of the relative vertical profile in atmospheric warming expected to result from various mechanisms. The details of each mechanism are discussed in the main text. The x axis represents the rate of warming (dT/dt or expected trend magnitude). The curves are relative in that the absolute 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

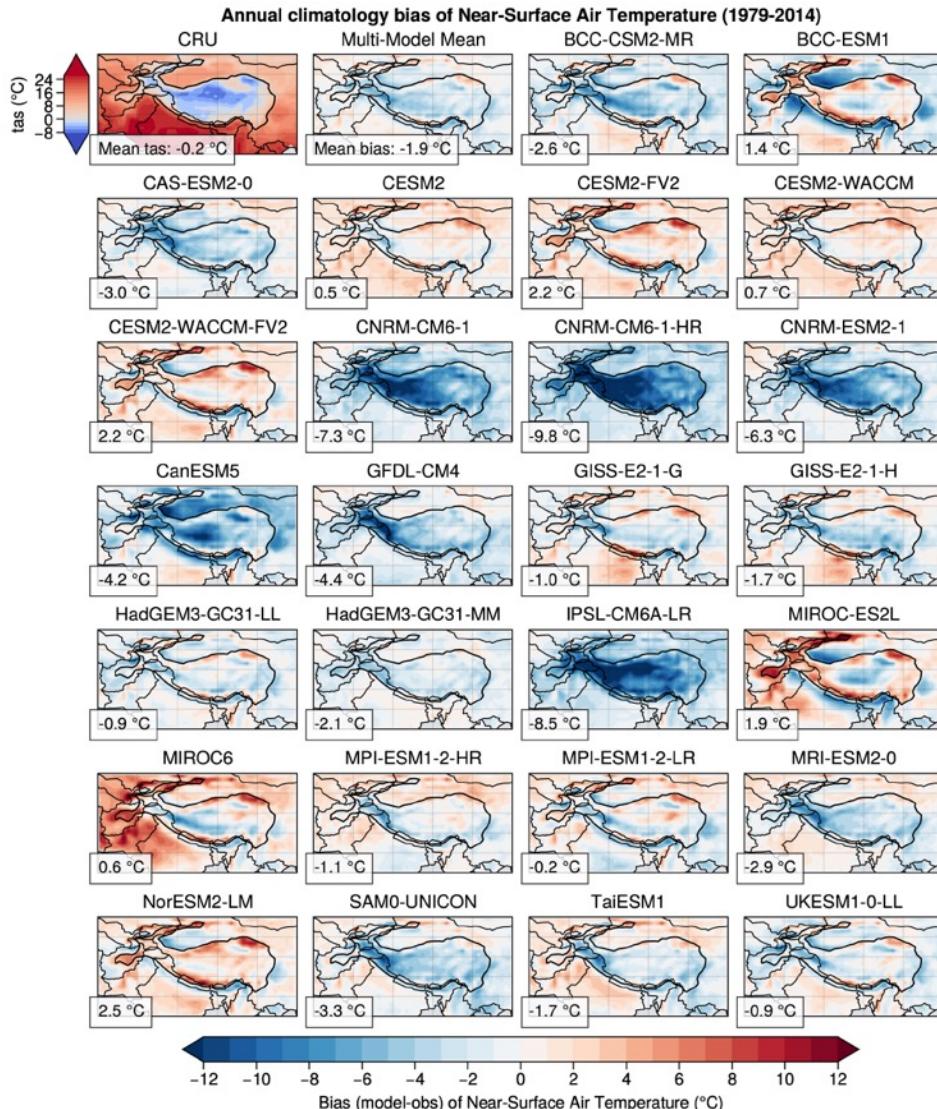


Figure 3. Annual bias (model minus observation) computed over 1979–2014 for temperature, except the top left panel that shows the climatology estimated from the CRU observation, used as the reference for the bias computation. The panel located at the right side of the CRU observation shows the bias of 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

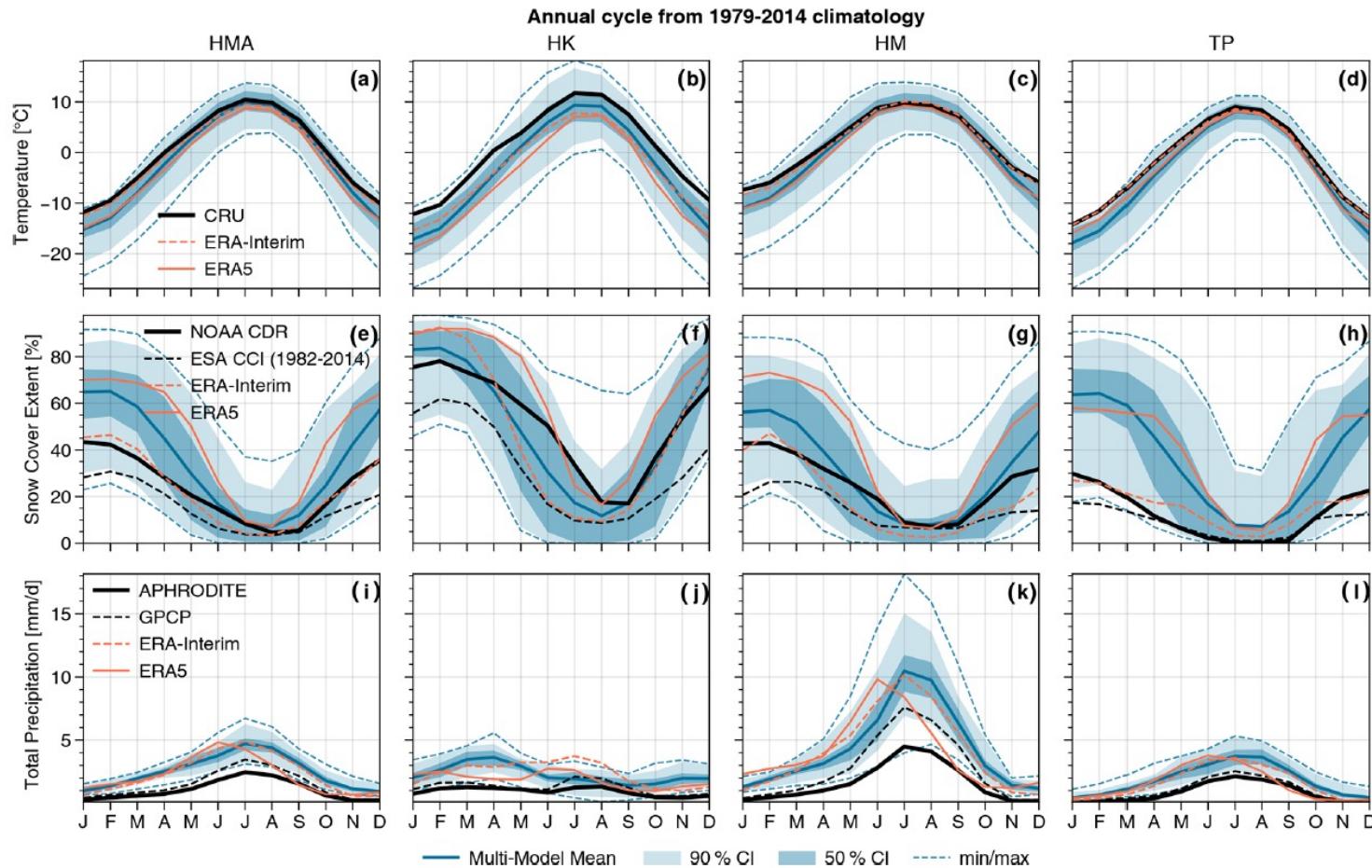


Figure 2. 1979–2014 climatology of the annual cycle of temperature (a–d), snow cover (e–h) and precipitation (i–l) averaged over HMA (a, e, i) HK (b, f, j) HM (c, g, k) and TP (d, h, l), excluding the surface area located below 2500 m a.s.l. (red contours in Fig. 1). The multimodel mean (dark blue line) 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

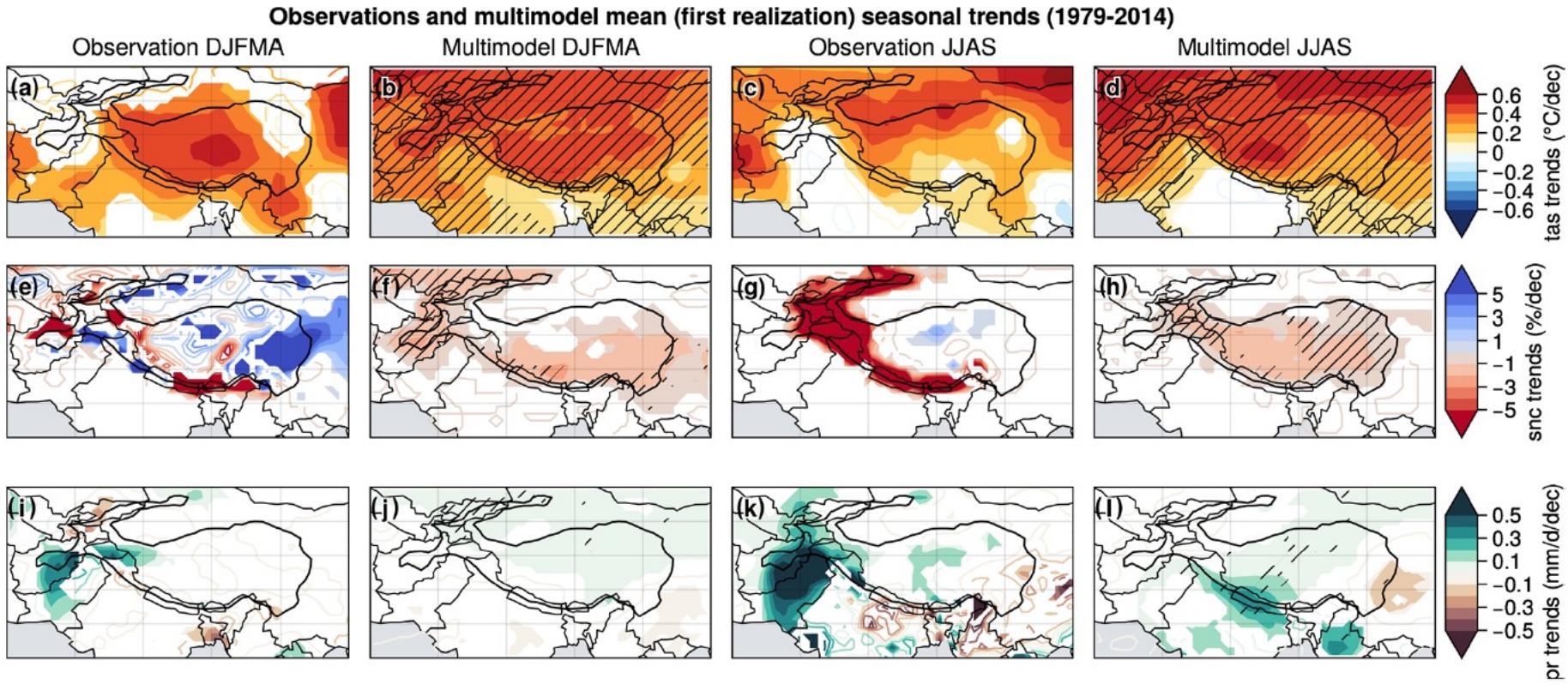


Figure 7. DJFMA (left) and JJAS (right) trends computed over 1979–2014 for temperature (a–d), snow cover (e–h) and precipitation (i–l). CRU temperature, NOAA CDR snow cover and APHRODITE precipitation observation trends (DJFMA: a, e, i and JJAS: c, g, k) are compared to the multimodel mean computed with 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

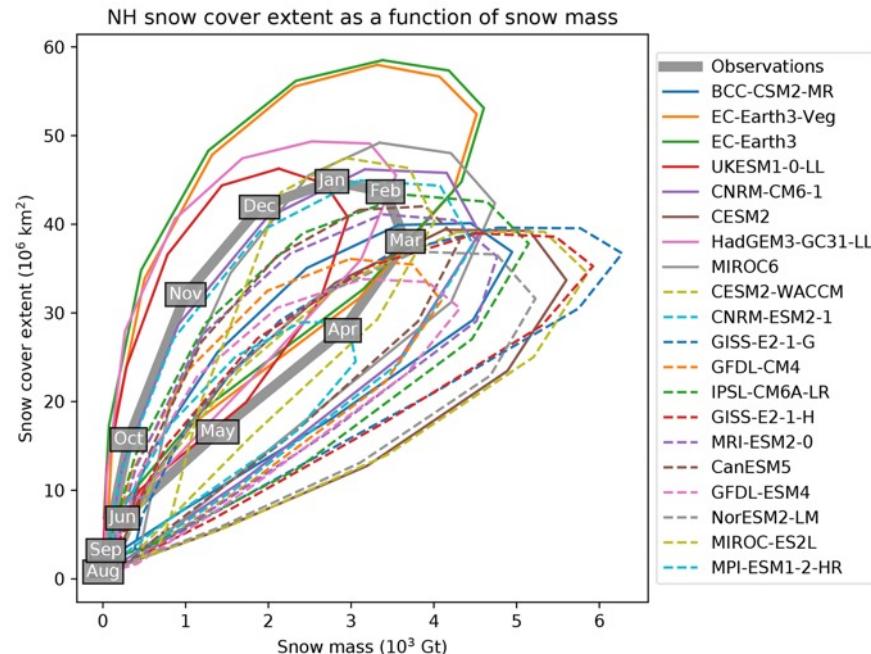
3 / Applications

3.1 Améliorer les GCMs



Améliorer les GCMs:

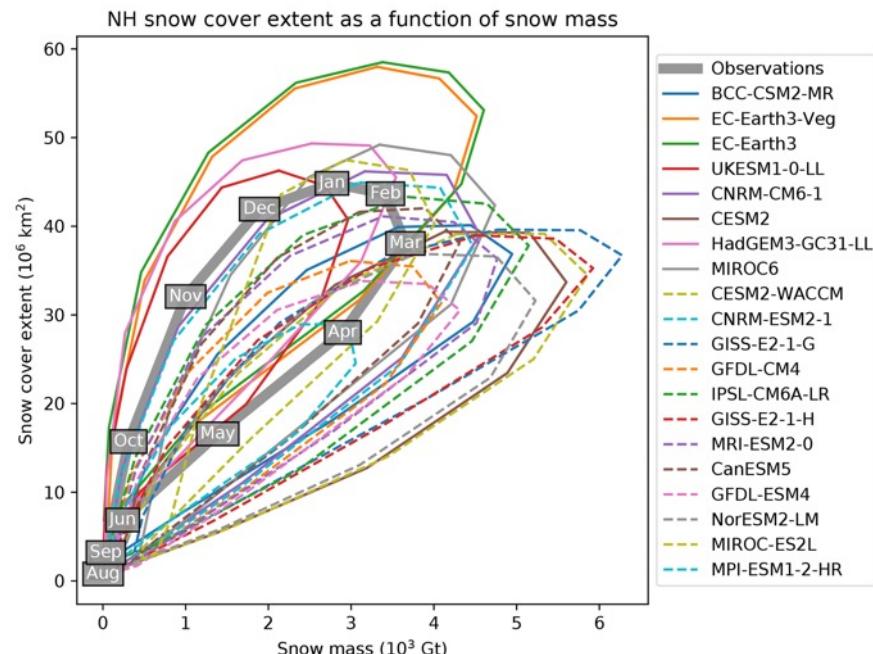
Exemple: représentation de la fraction sous-maille du couvert neigeux



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

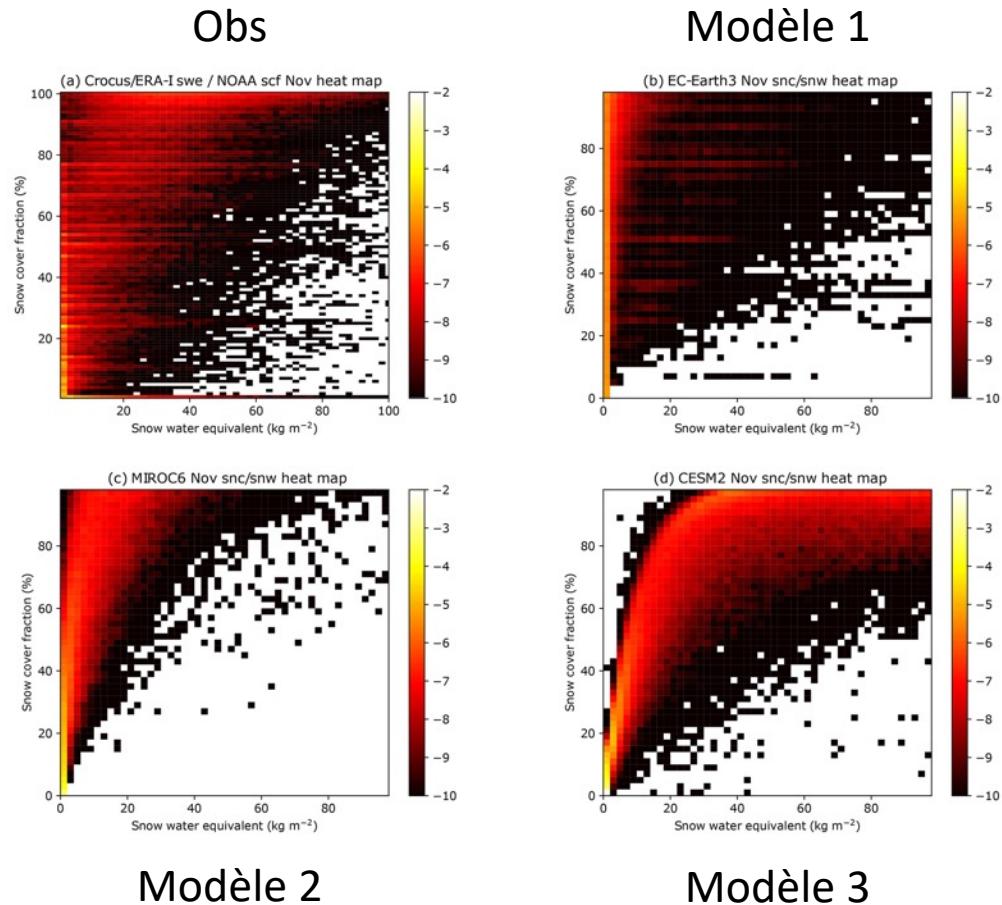
Améliorer les GCMs:

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

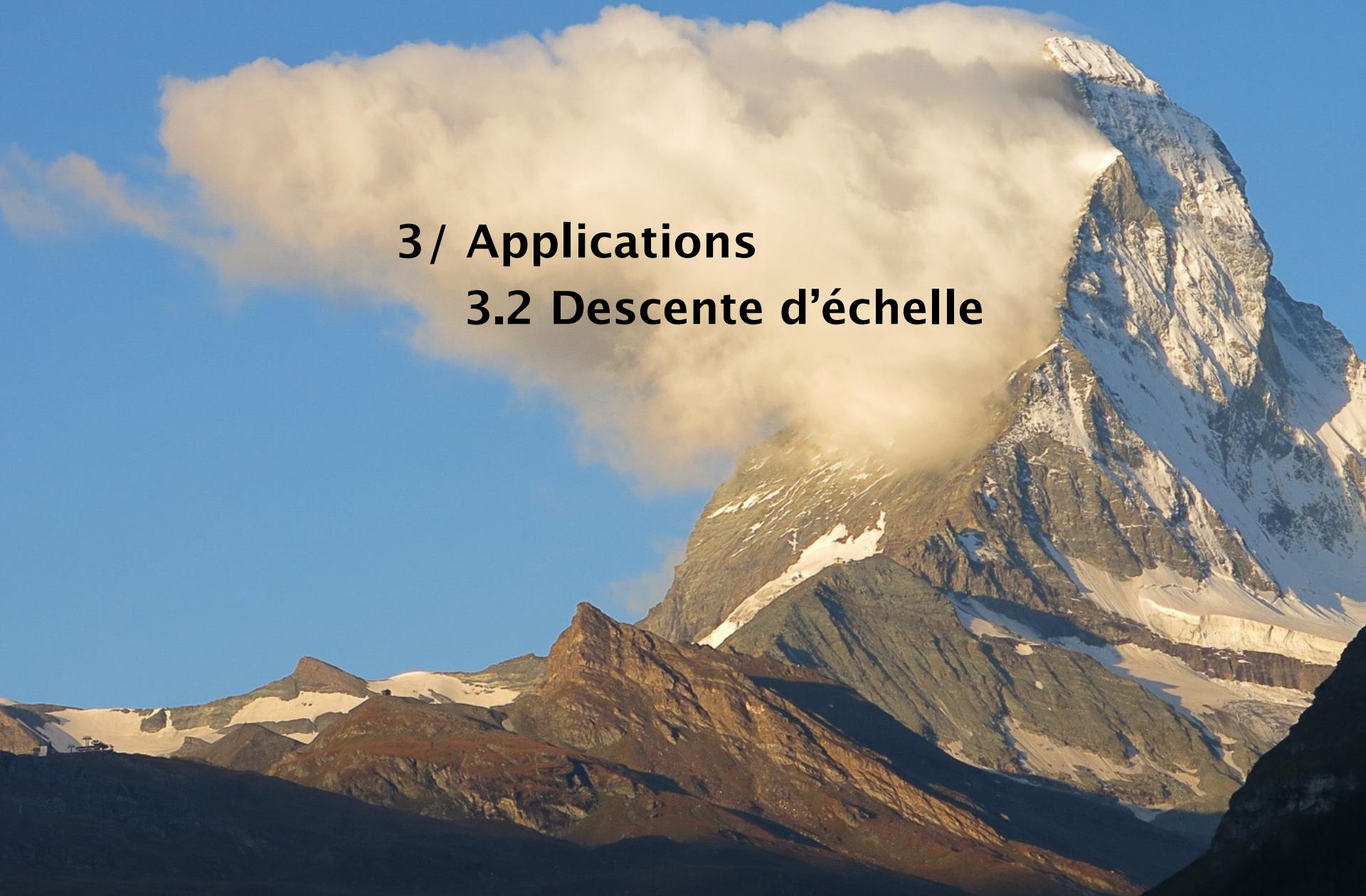
-> censé dépendre de la topographie (développements en cours à l'IGE)



Modélisation climatique en région de montagne

3 / Applications

3.2 Descente d'échelle

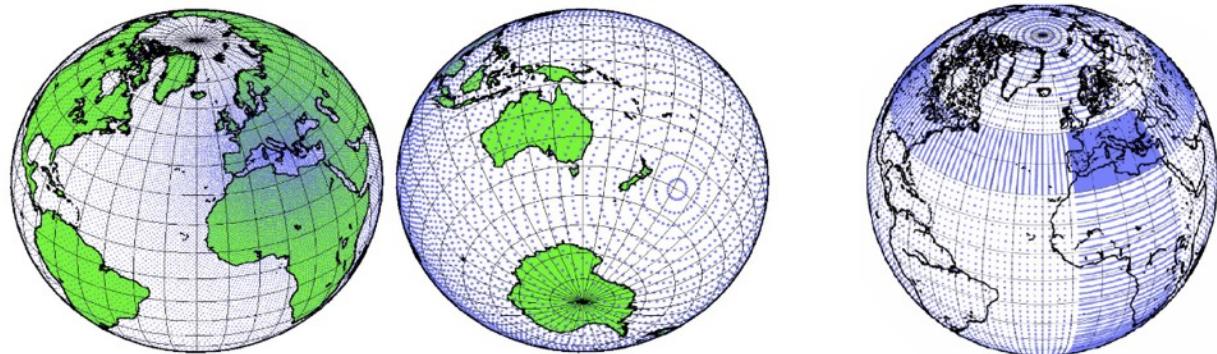


Descente d'échelle dynamique

- Une première méthode consiste à [affiner localement la grille du GCM](#).

[Exemples :](#)

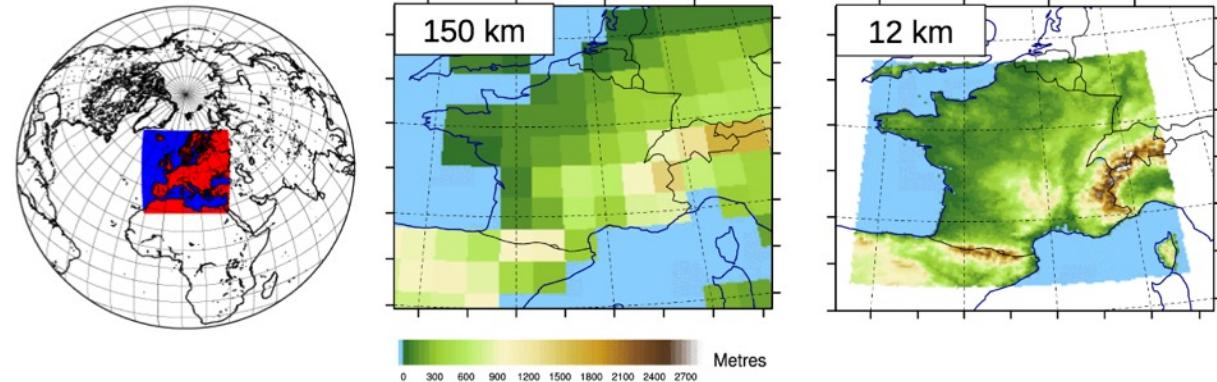
- ARPEGE basculé-étiré
- LMDz zoomé



- Autre solution : [domaine limité \(RCM\) + conditions au bord \(GCM\)](#).

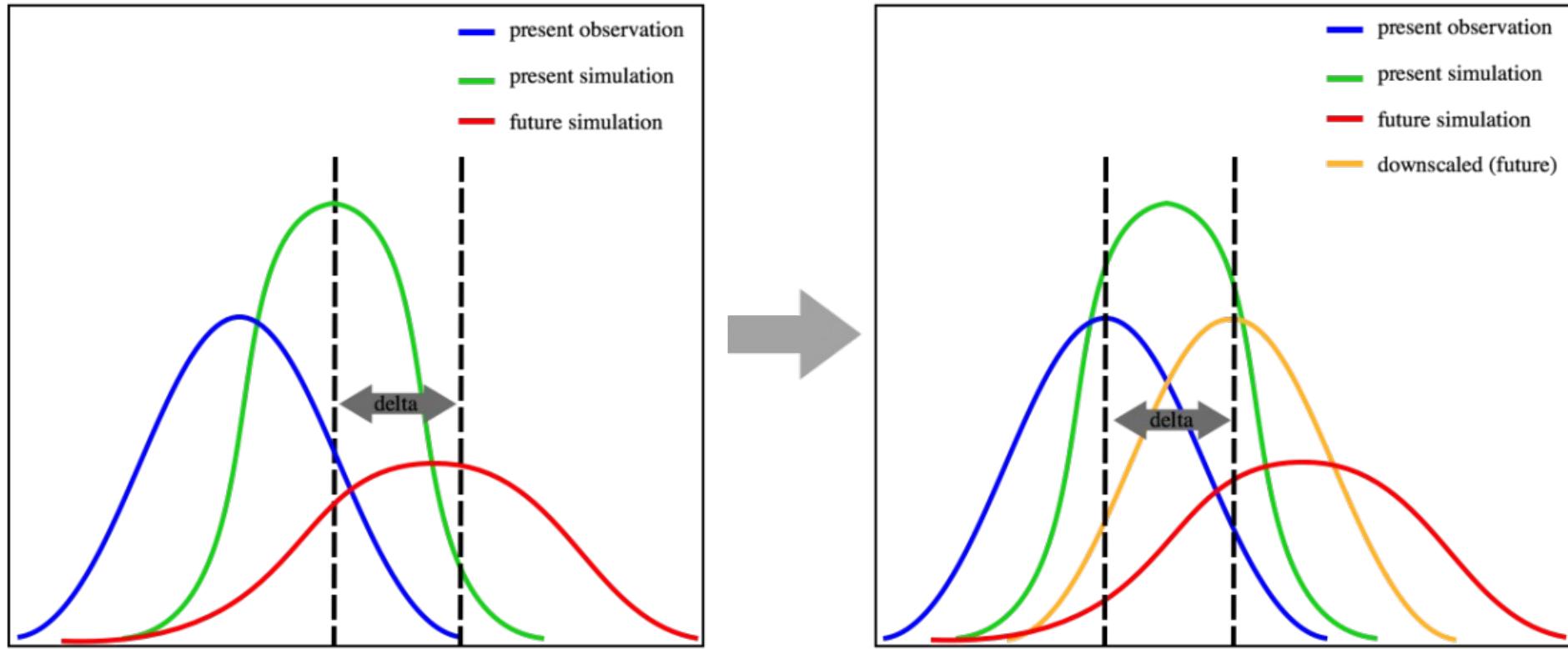
[Exemple :](#)

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

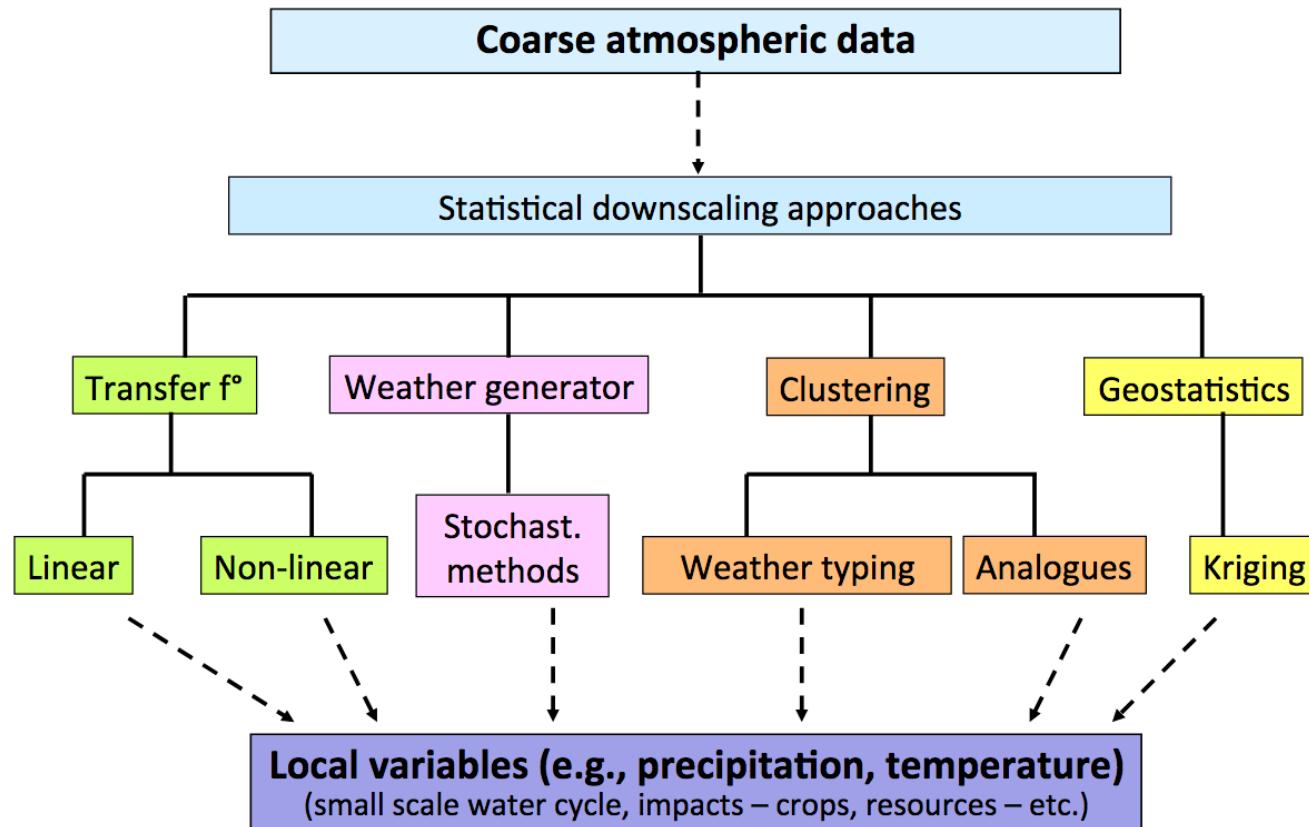


FIGURE 3.2: Les principales grandes familles de méthodologies de downscaling statistique.

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



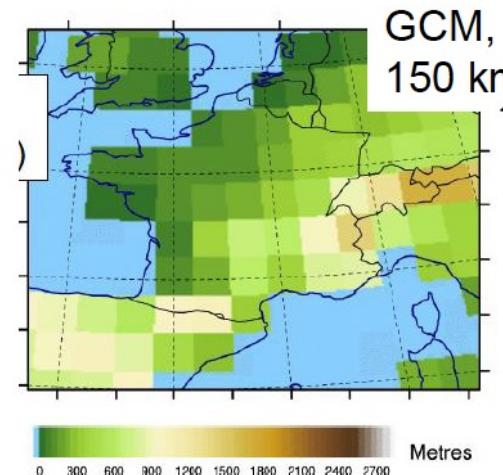
Projections futures avec une méthode hybride: ADAMONT)



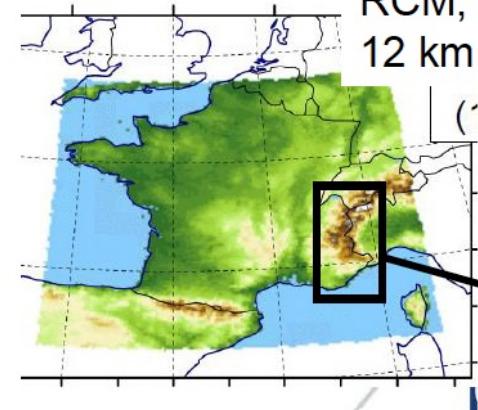
Trajectories
Univ. Grenoble Alpes



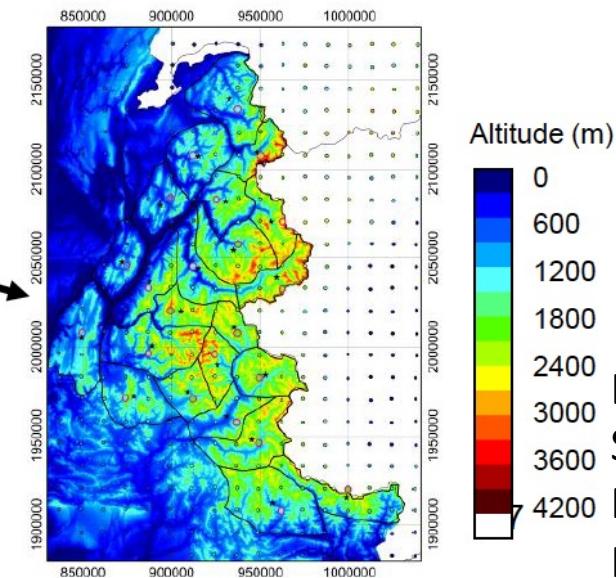
- Cascade de modèles et ajustements pour exploiter les projections climatiques à échelle mondiale et les appliquer aux territoires de montagne



EUROCORDEX
RCM,
12 km

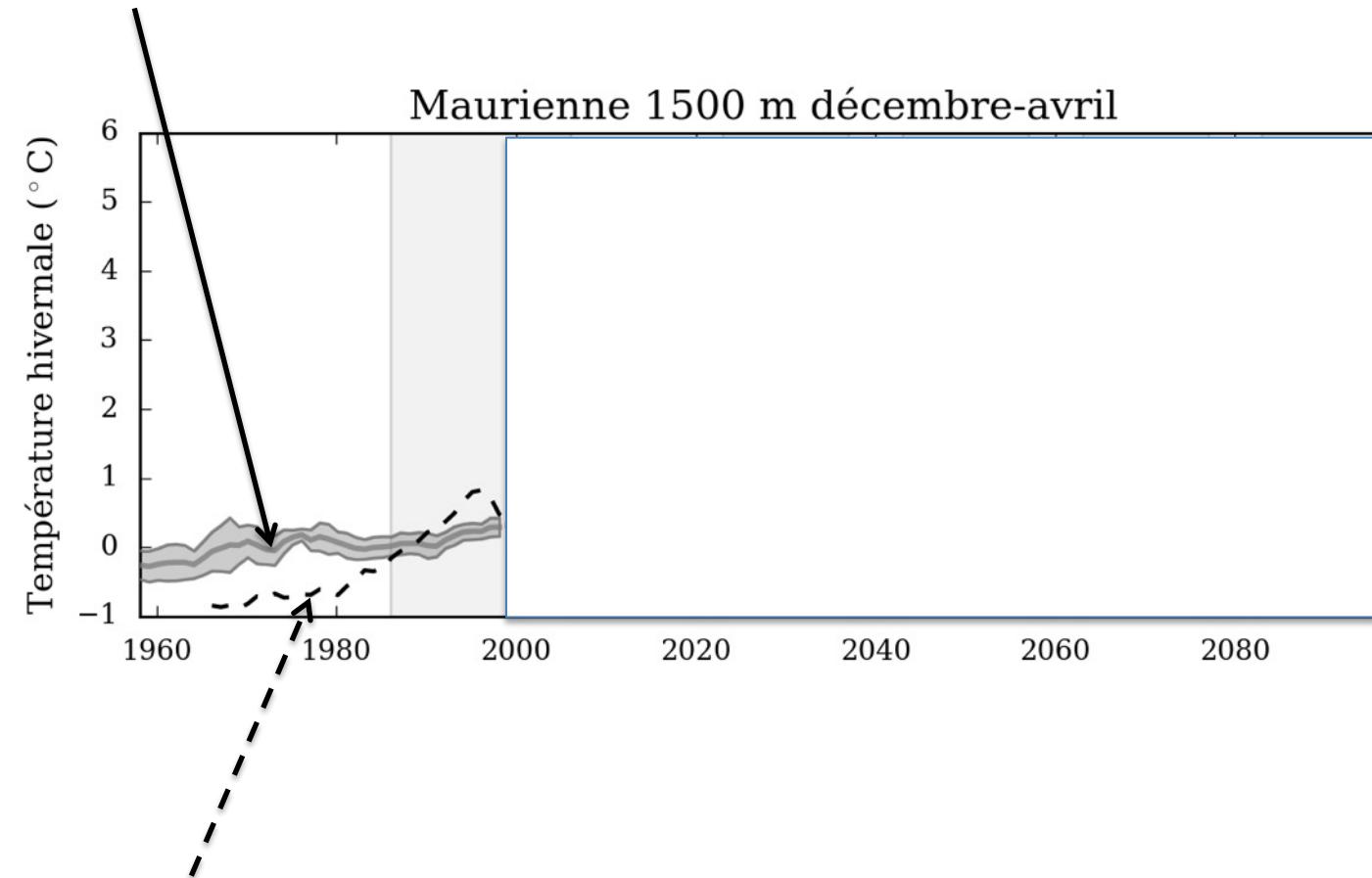


Ajustements statistiques, ADAMONT



Température observée et simulée à 1500 mètres

Modèle

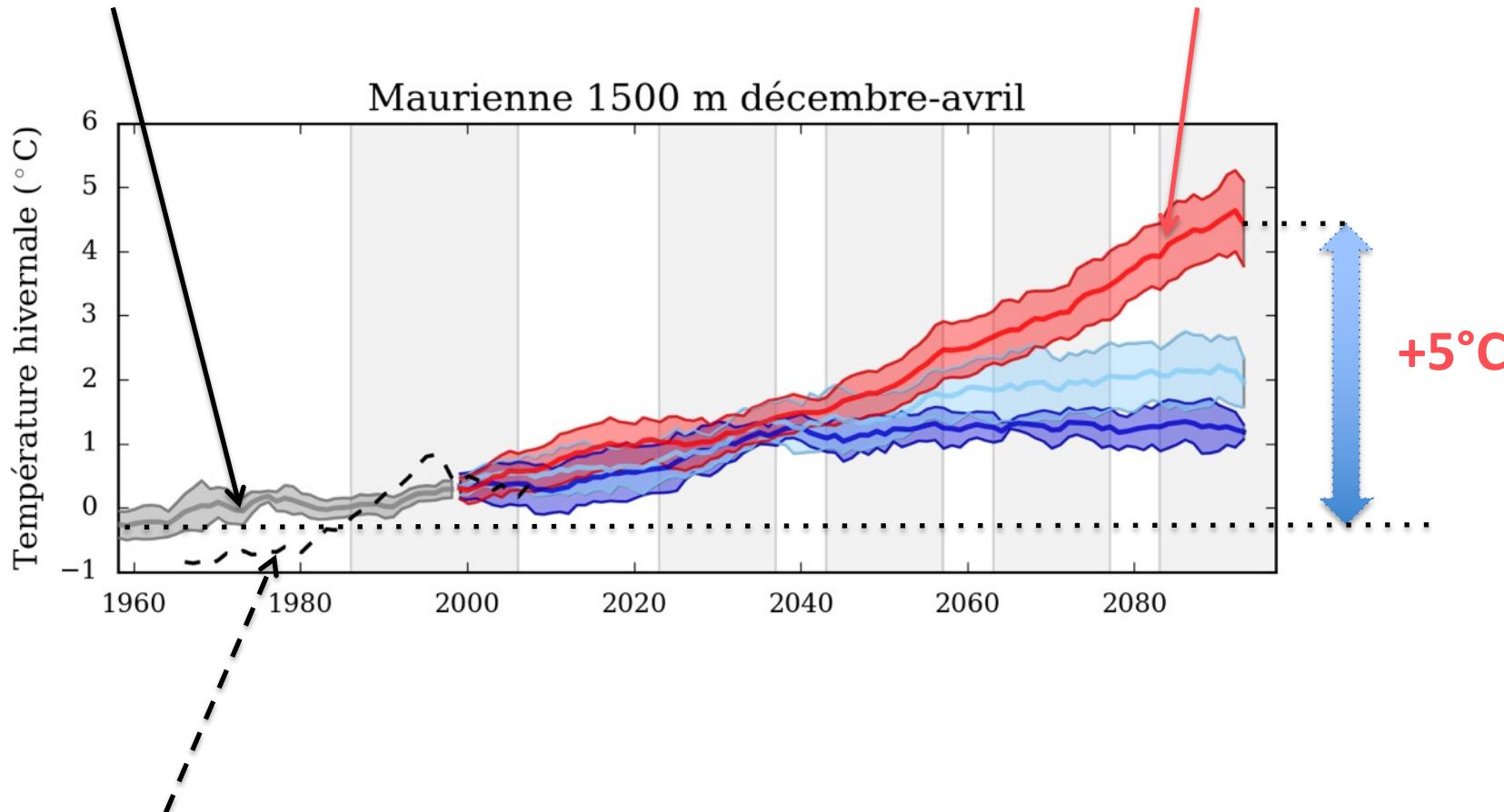


Référence
(observation)

Température observée et simulée à 1500 mètres

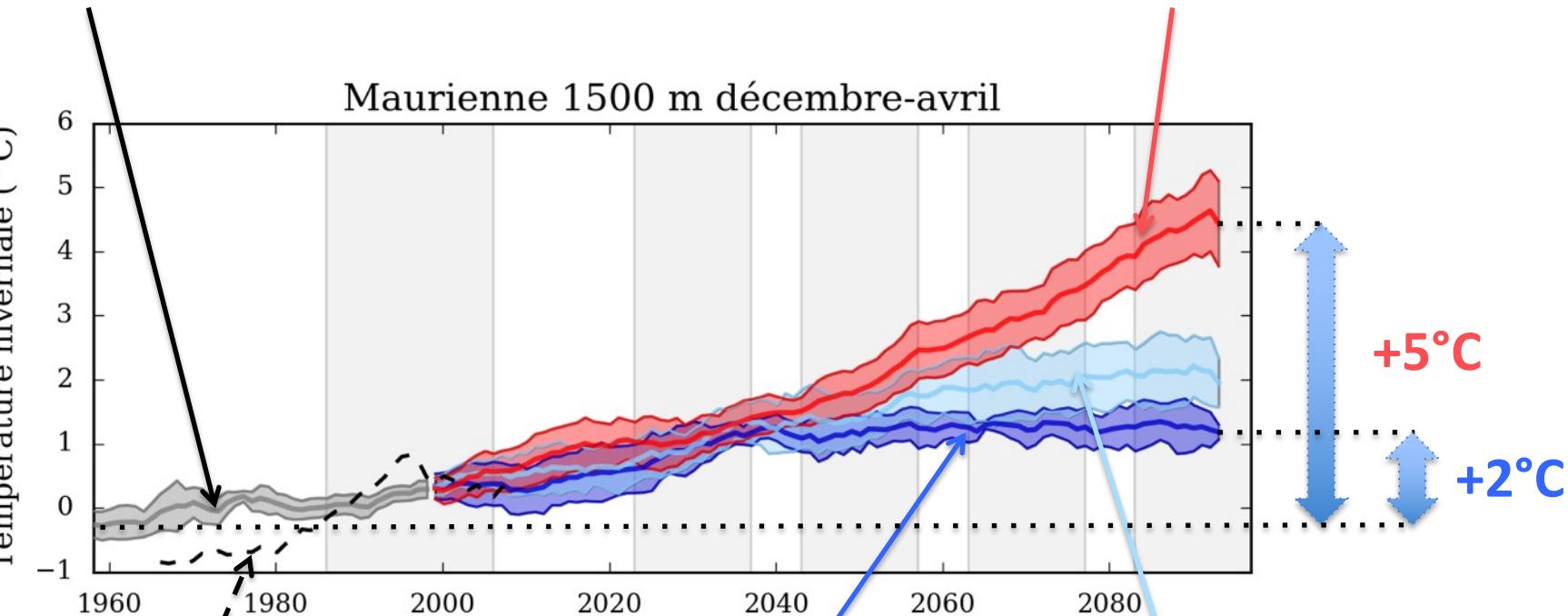
Modèle

Scénario « chaud »



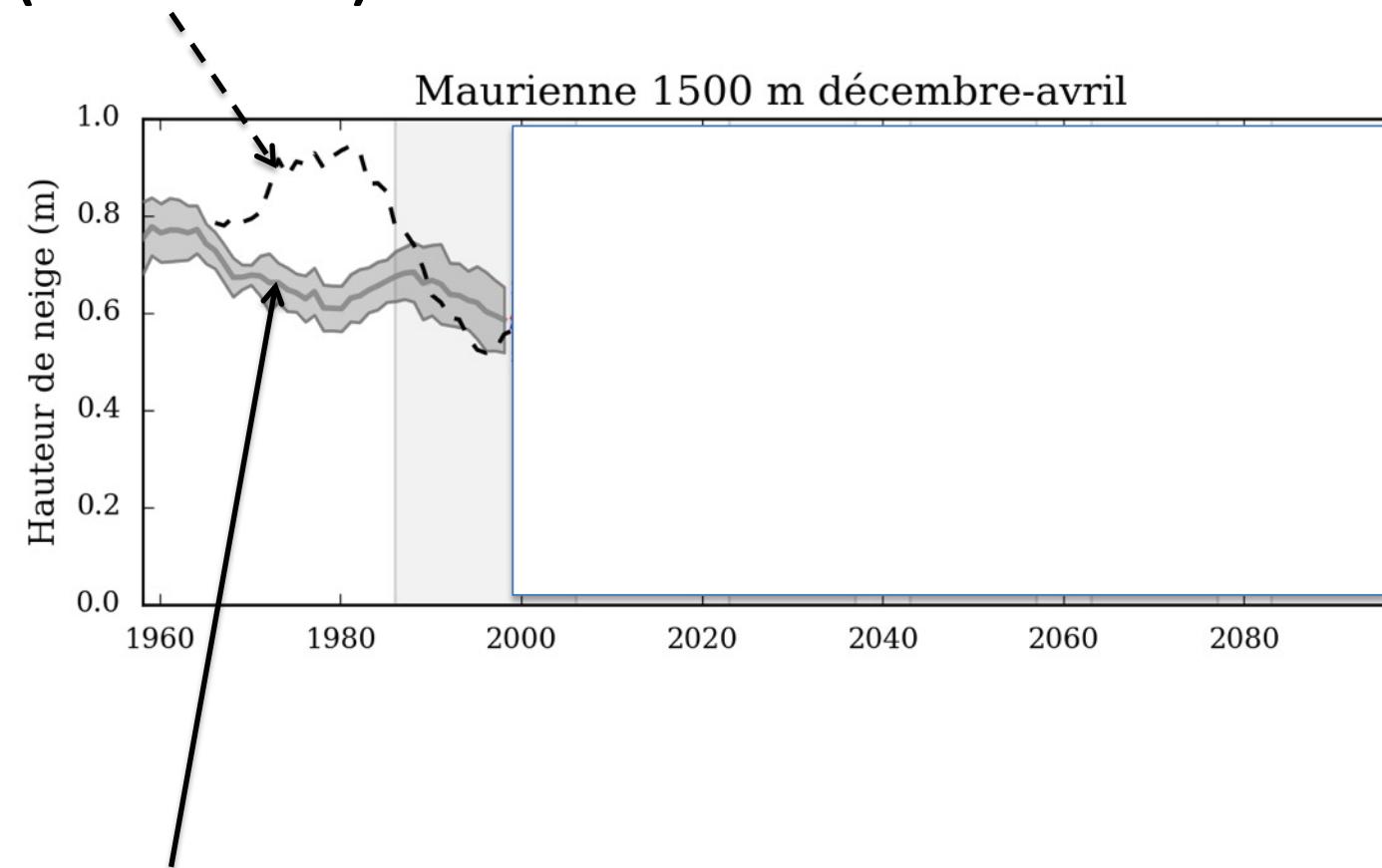
Température observée et simulée à 1500 mètres

Modèle



Neige observée et simulée à 1500 mètres

Référence
(observation)

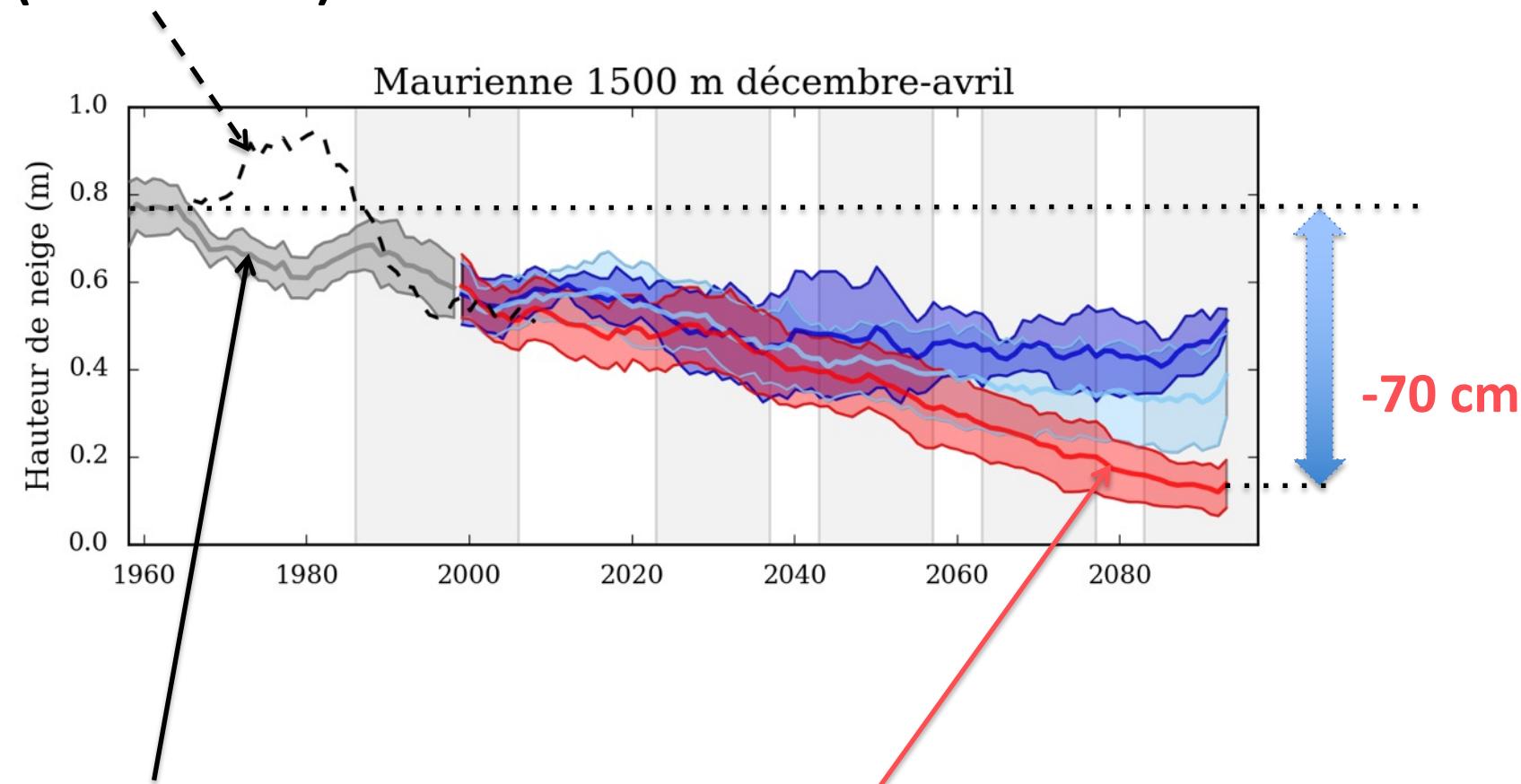


Modèle

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

Neige observée et simulée à 1500 mètres

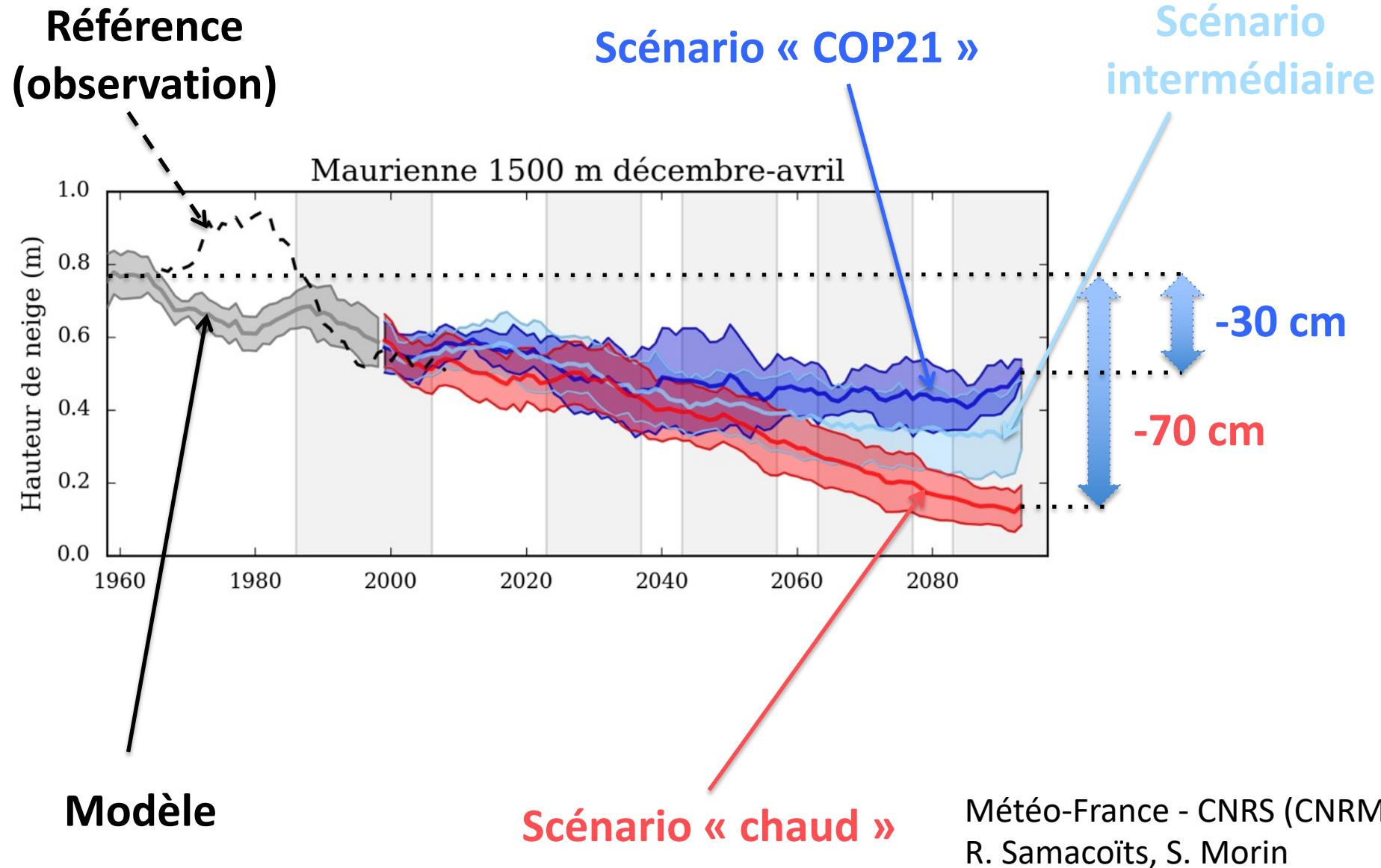
Référence
(observation)

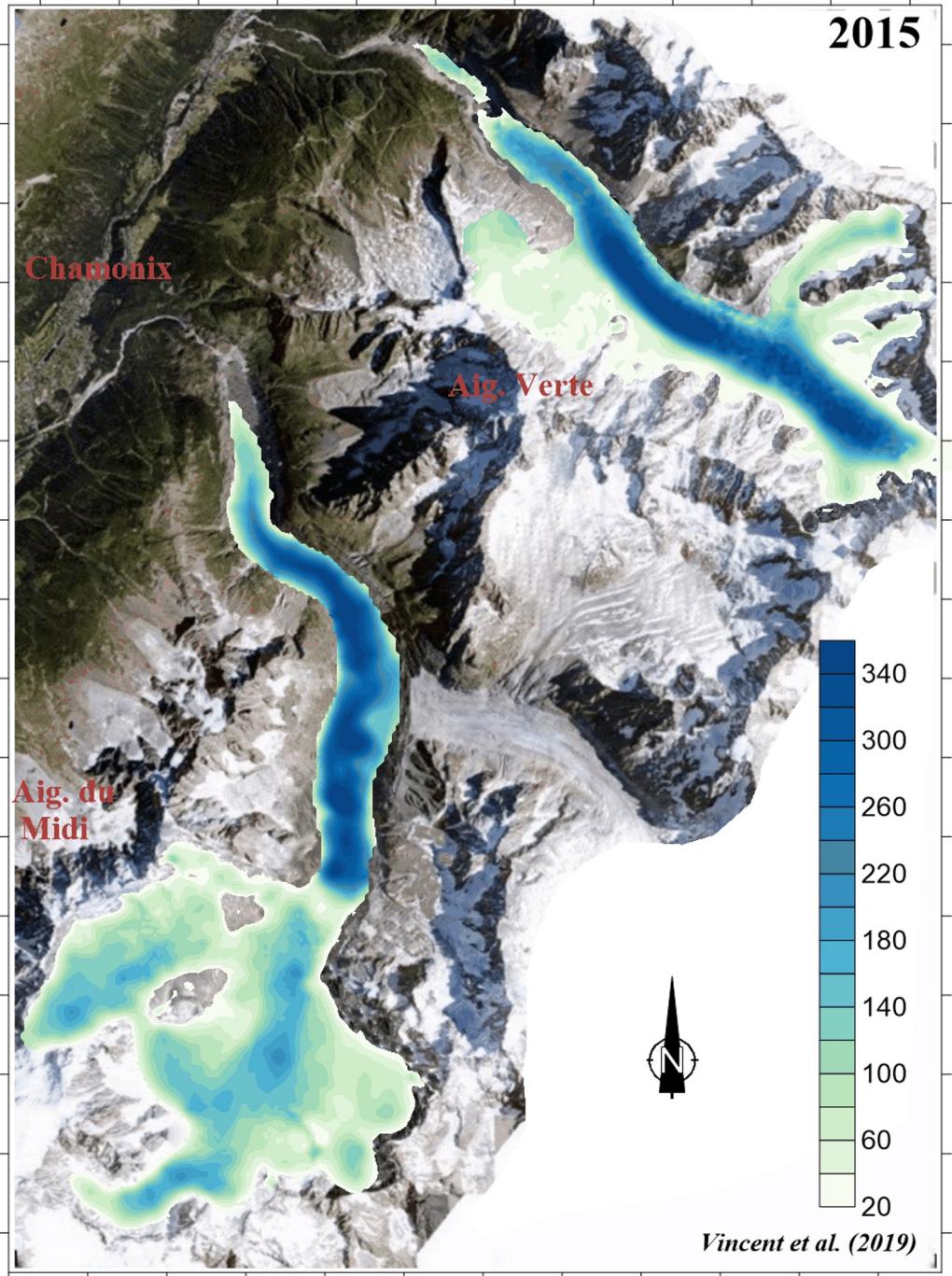


Scénario « chaud »

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

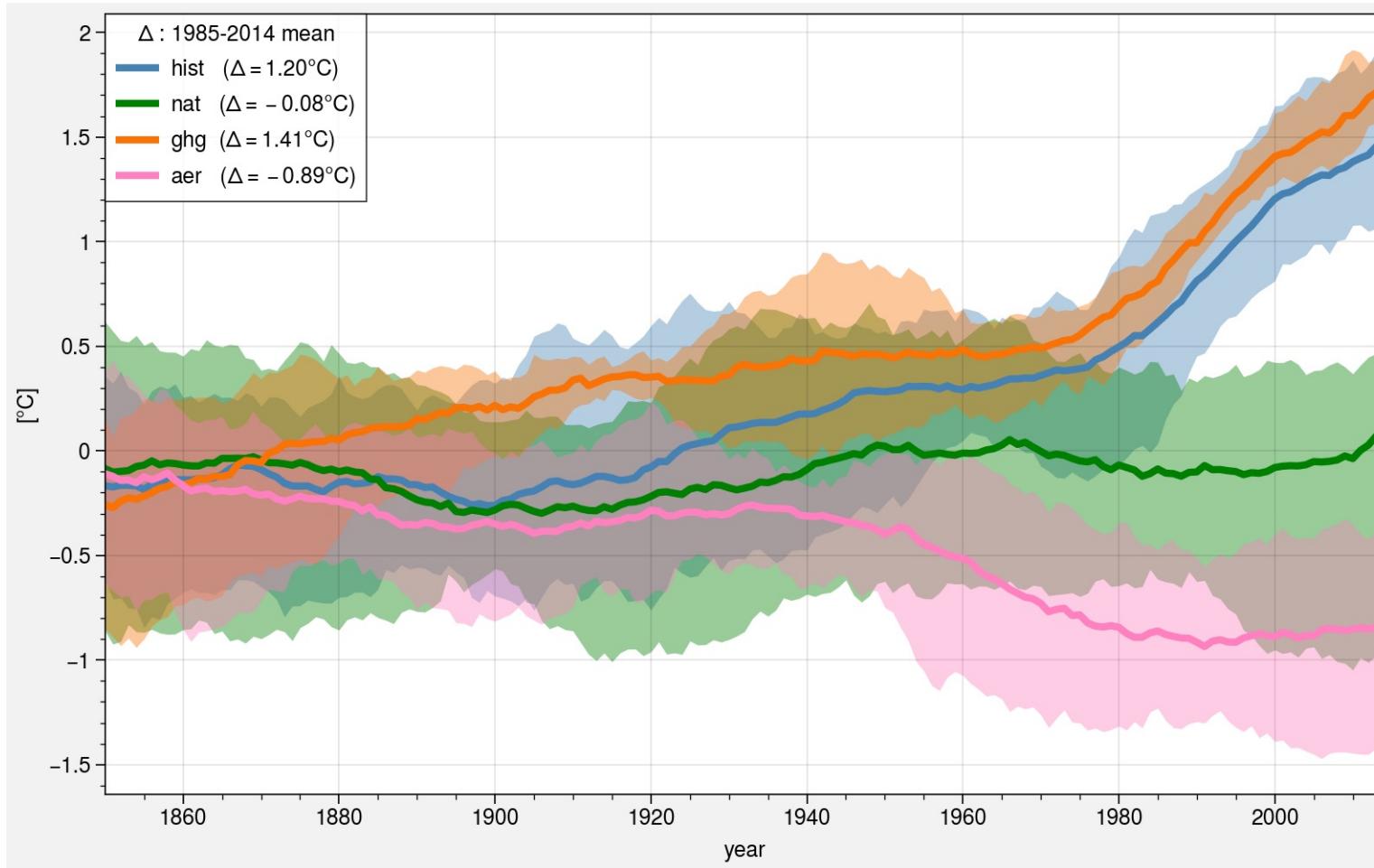
Modélisation climatique en région de montagne

3 / Applications

3.3 Effets contrastés des aérosols



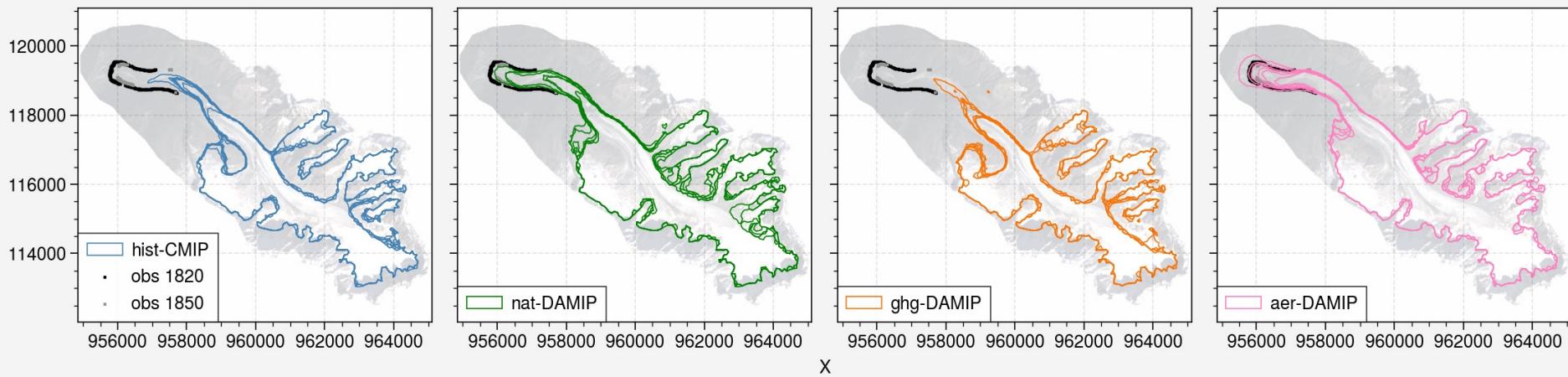
Les aérosols atmosphériques refroidissent le climat...



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

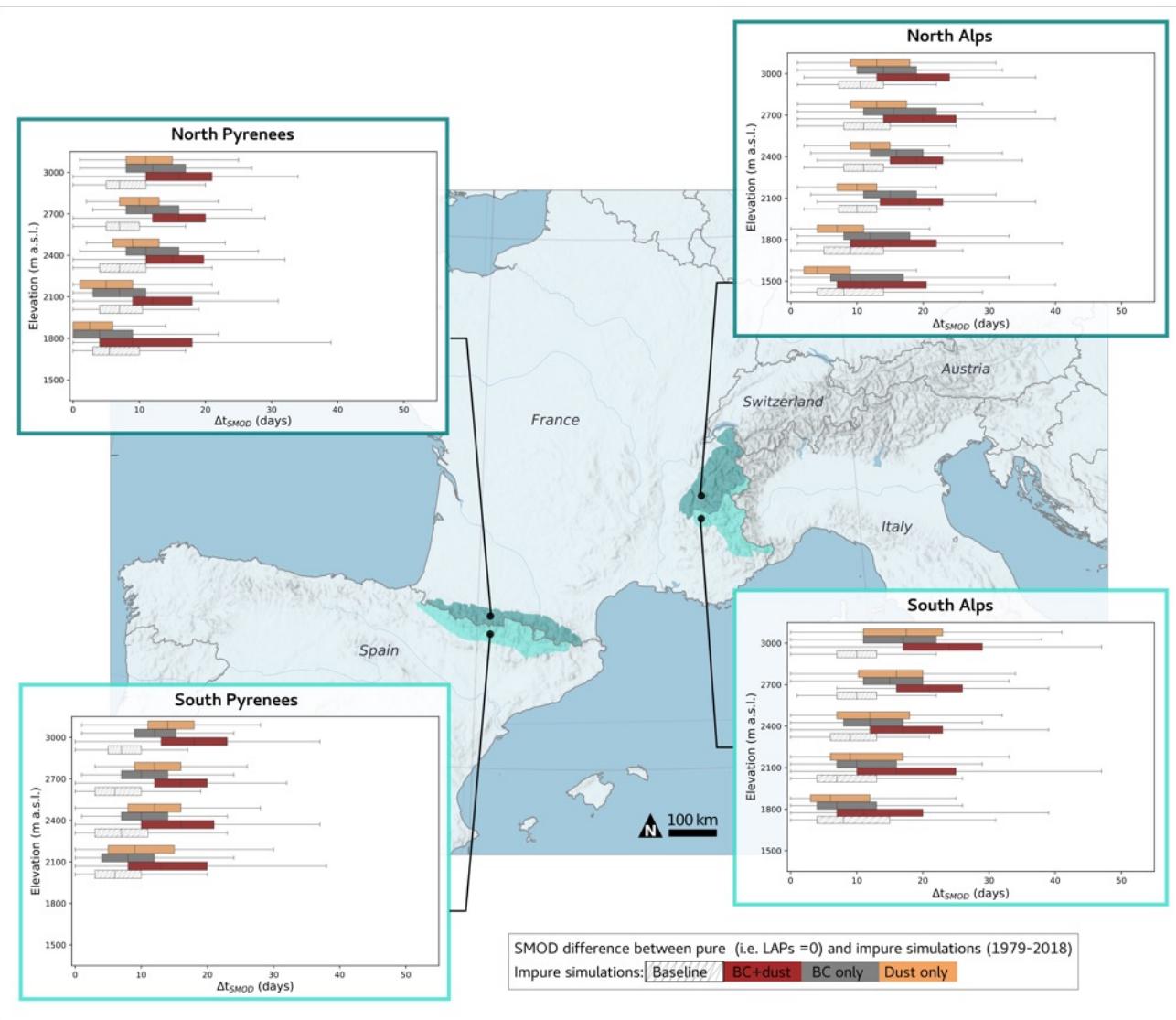
Les aérosols atmosphériques refroidissent le climat...

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)

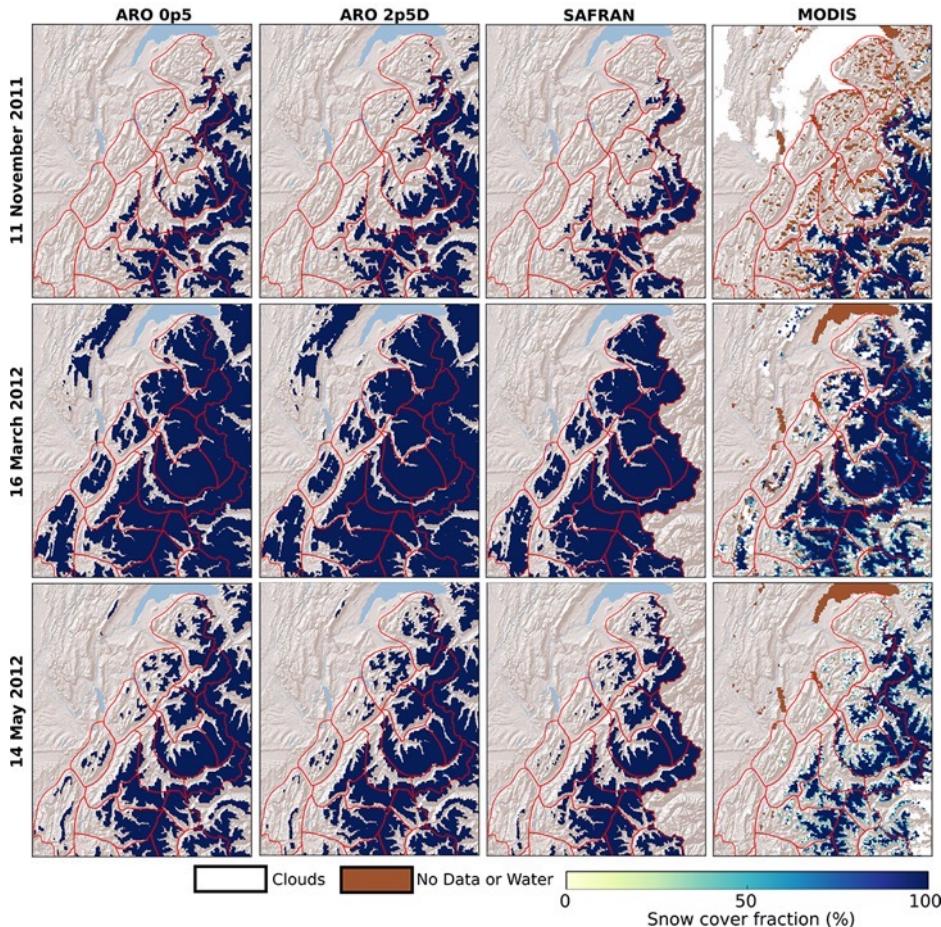
Modélisation climatique en région de montagne

3 / Applications

3.4 Haute résolution



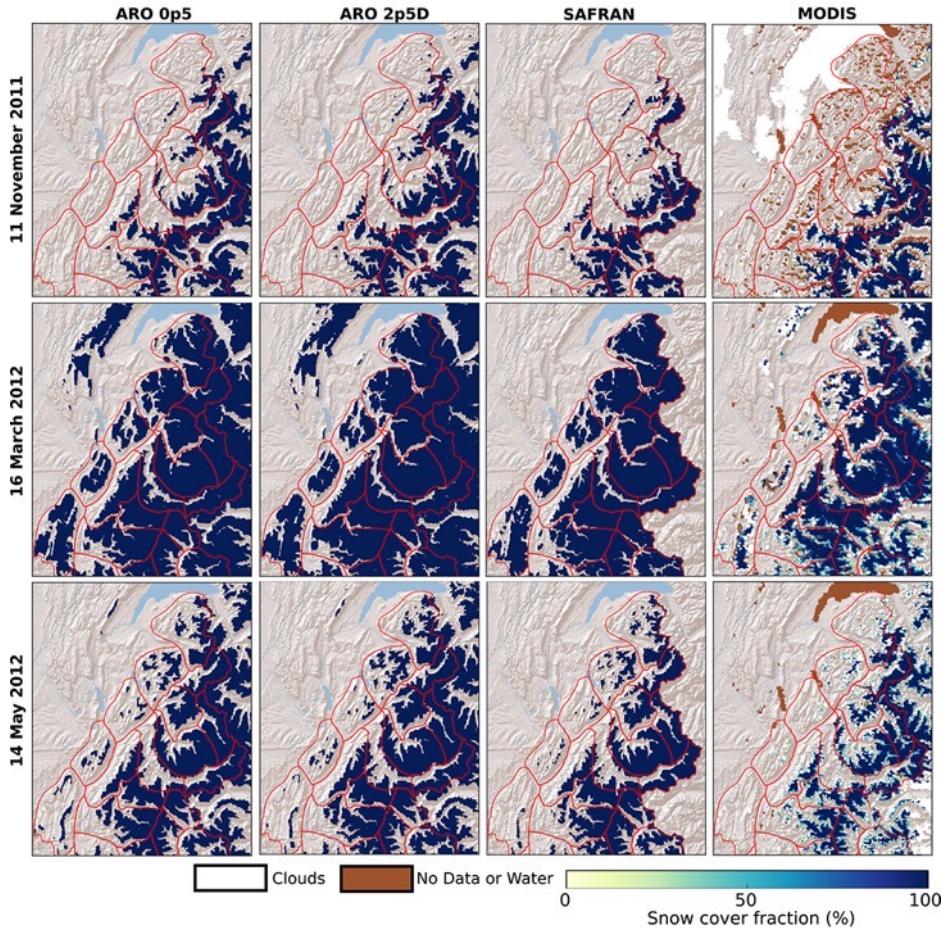
AROME haute résolution forçant un modèle de neige versus MODIS



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 Tendances en Himalaya



Simulations et observations des tendances en Himalaya

Earth Syst. Dynam., 12, 1061–1098, 2021

<https://doi.org/10.5194/esd-12-1061-2021>

© Author(s) 2021. This work is distributed under
the Creative Commons Attribution 4.0 License.



Article

Assets

Peer review

Metrics

Related articles

Research article

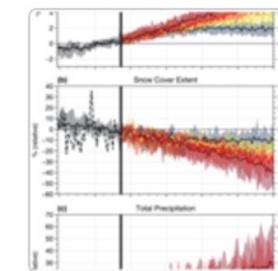
02 Nov 2021

Climate change in the High Mountain Asia in CMIP6

Mickaël Lalande^{ID}¹, Martin Ménégoz^{ID}¹, Gerhard Krinner^{ID}¹, Kathrin Naegeli^{ID}²,
and Stefan Wunderle²

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, IRD, G-INP, IGE, 38000 Grenoble, France

²Institute of Geography and Oeschger Center for Climate Change Research, University of Bern, 3012 Bern, Switzerland



Références aux articles, accès aux données (actualisées) et mise en place de scripts accessible à: https://github.com/mmenegoz/climate_HMA_course.

Pour le prochain cour:

-> Lecture de l'article

-> Calcul des tendances saisonnières de température sur des périodes de quelques décennies à un siècle, avec la significativité et la dépendance à l'altitude.

Merci!!!

