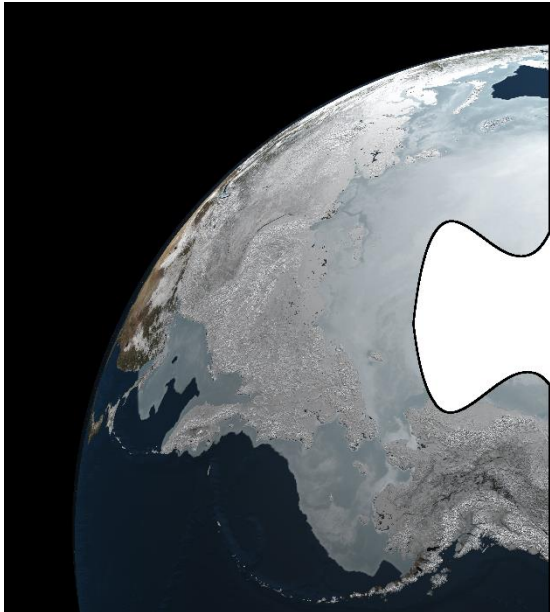
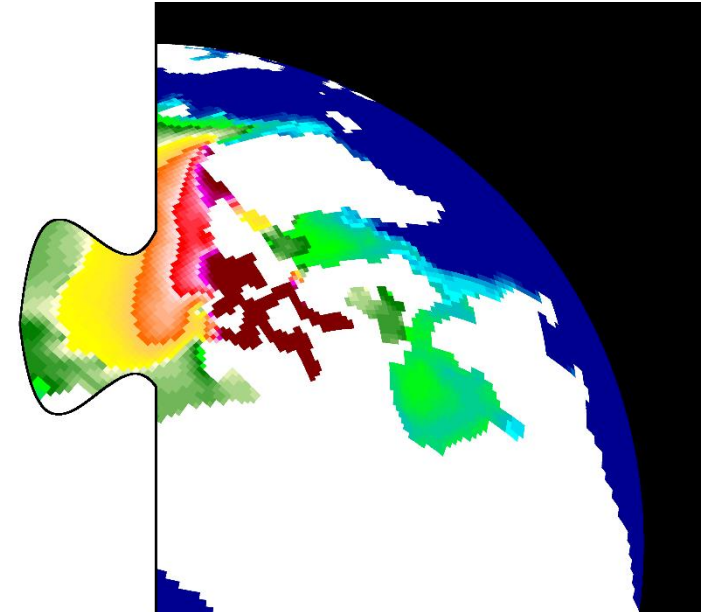


# Evaluation et amélioration des simulations climatiques de la banquise



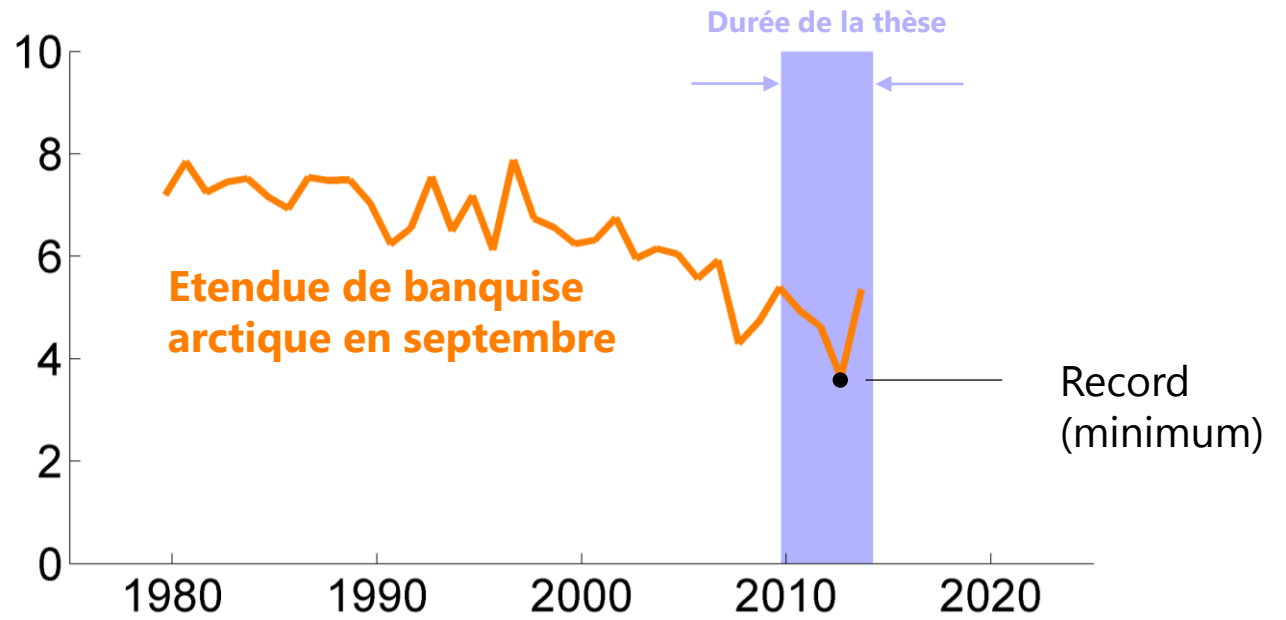
François Massonnet

Thèse de doctorat présentée en  
vue de l'obtention du grade de  
docteur en sciences



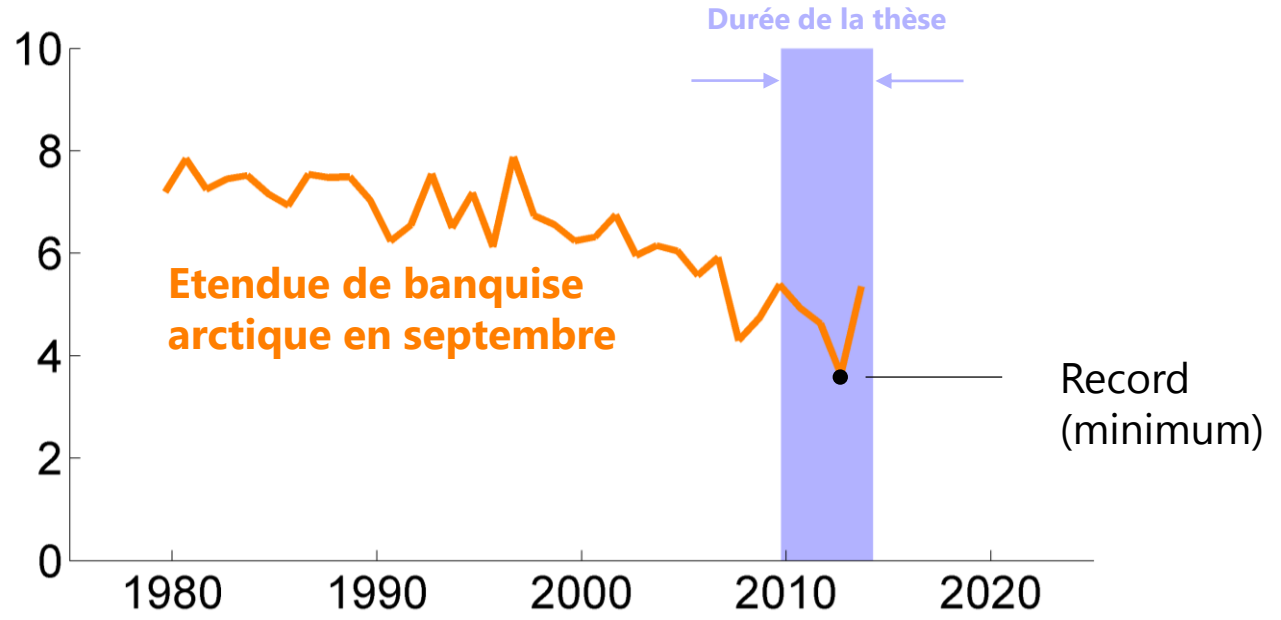


millions  
de km<sup>2</sup>

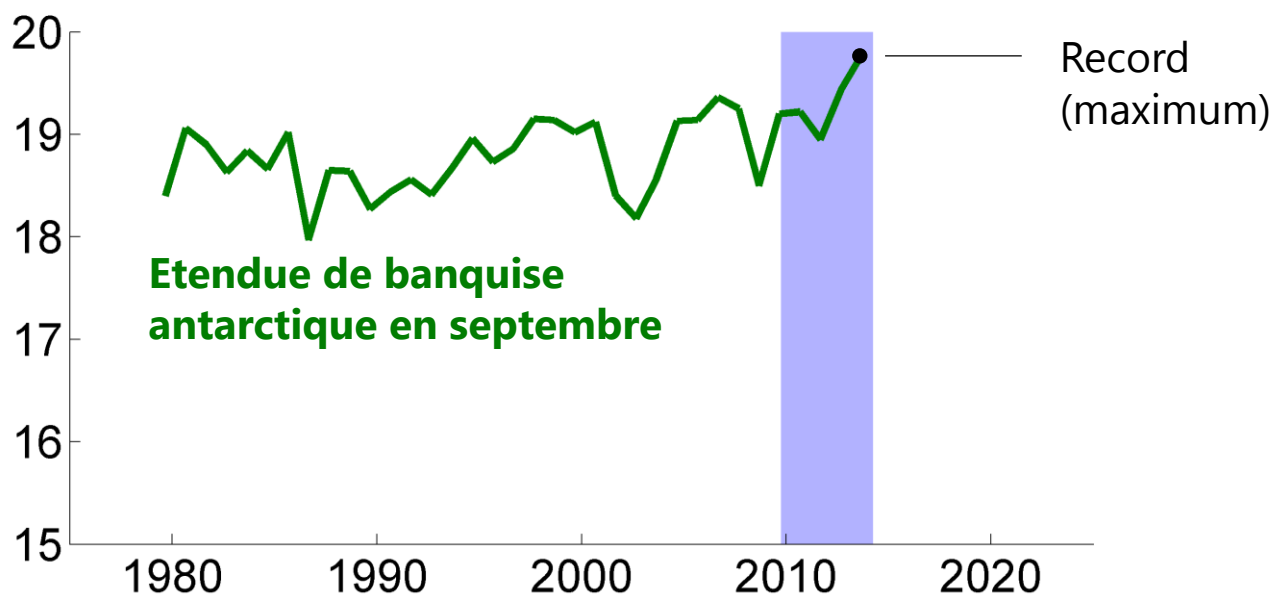




millions de km<sup>2</sup>



millions de km<sup>2</sup>





A. Observations et modèles de la banque

B. Trois exemples d'utilisation constructive

## **A. Observations et modèles de la banquise**

B. Trois exemples d'utilisation constructive



[Photo: Jan Lieser]

La banquise est une mince et vaste  
couche de glace se formant dans l'océan





La banquise est une mince et vaste  
couche de glace se formant dans l'océan



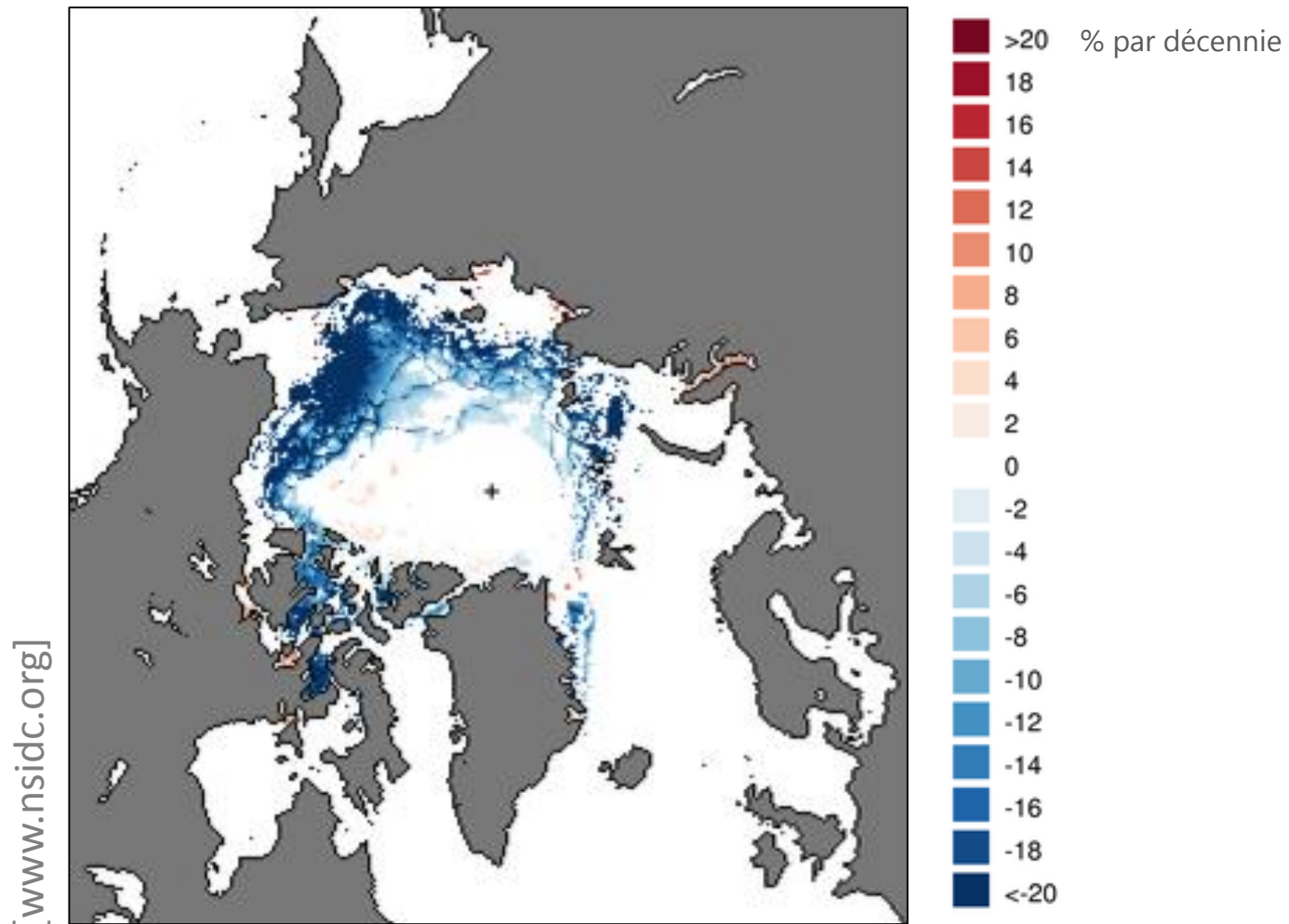
Concentration [0 ... 100 %]

Epaisseur [0 ... 1.5 ... 5 m]

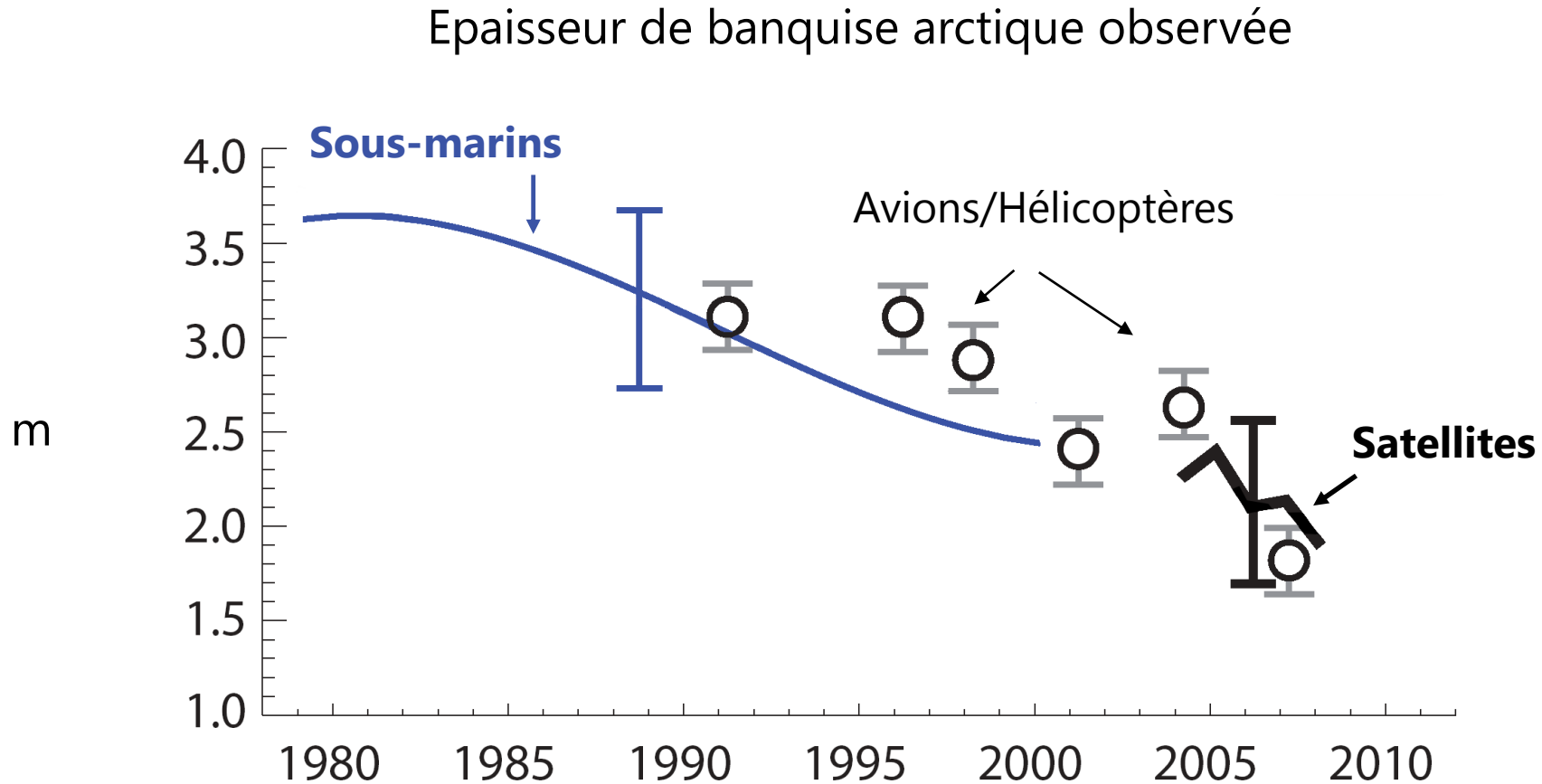
Vitesse de dérive [0 ... 20 km/jour]

# En Arctique, la banquise présente des signaux forts

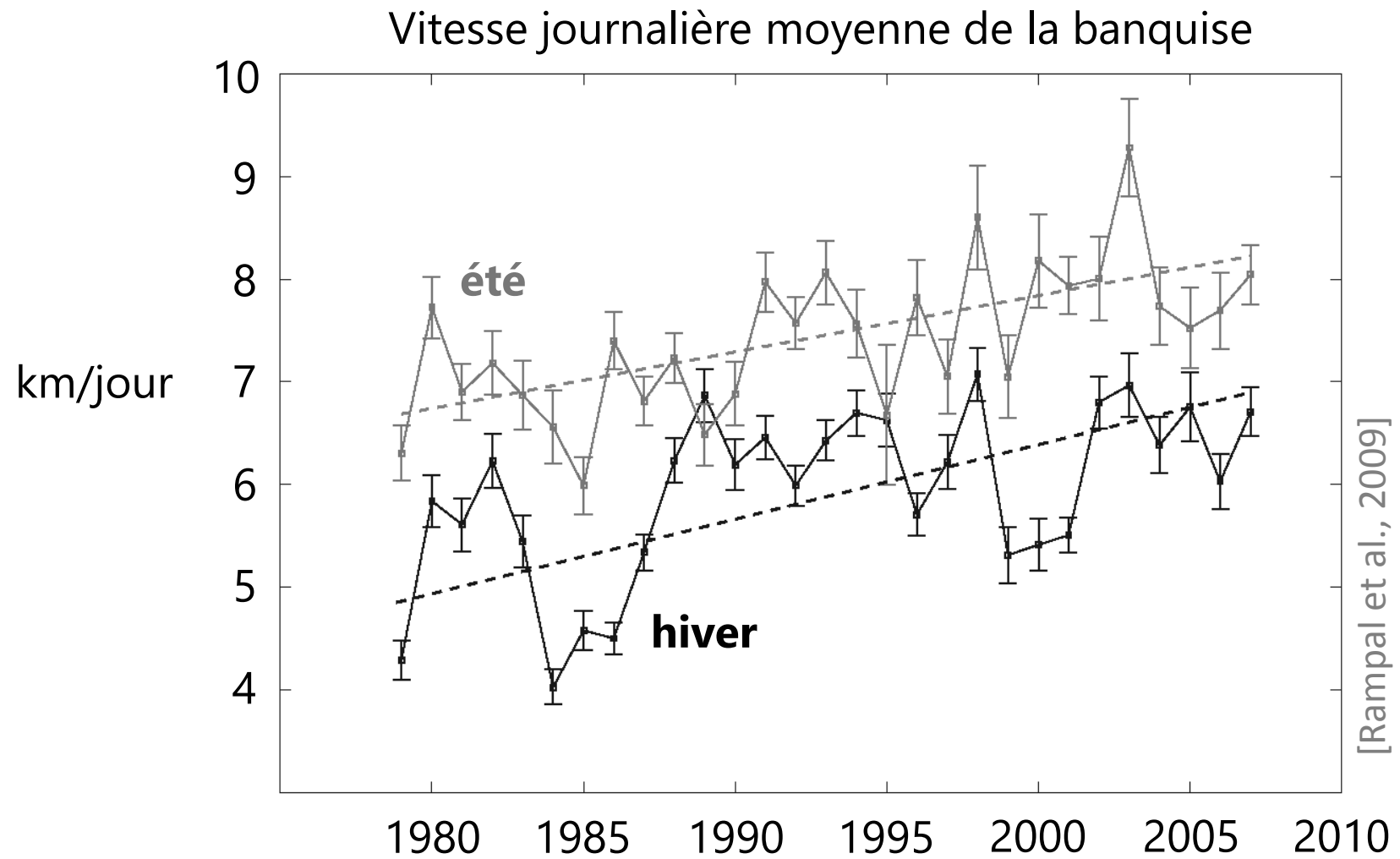
Changements observés (1979-2013) de concentration de banquise en septembre



# En Arctique, la banquise présente des signaux forts



# En Arctique, la banquise présente des signaux forts



# En Arctique, la priorité est d'anticiper les changements futurs et leurs impacts

## Echelle saisonnière

Ouverture du pack, réponse atmosphérique

## Echelle décennale

Adaptation, écosystèmes, planification

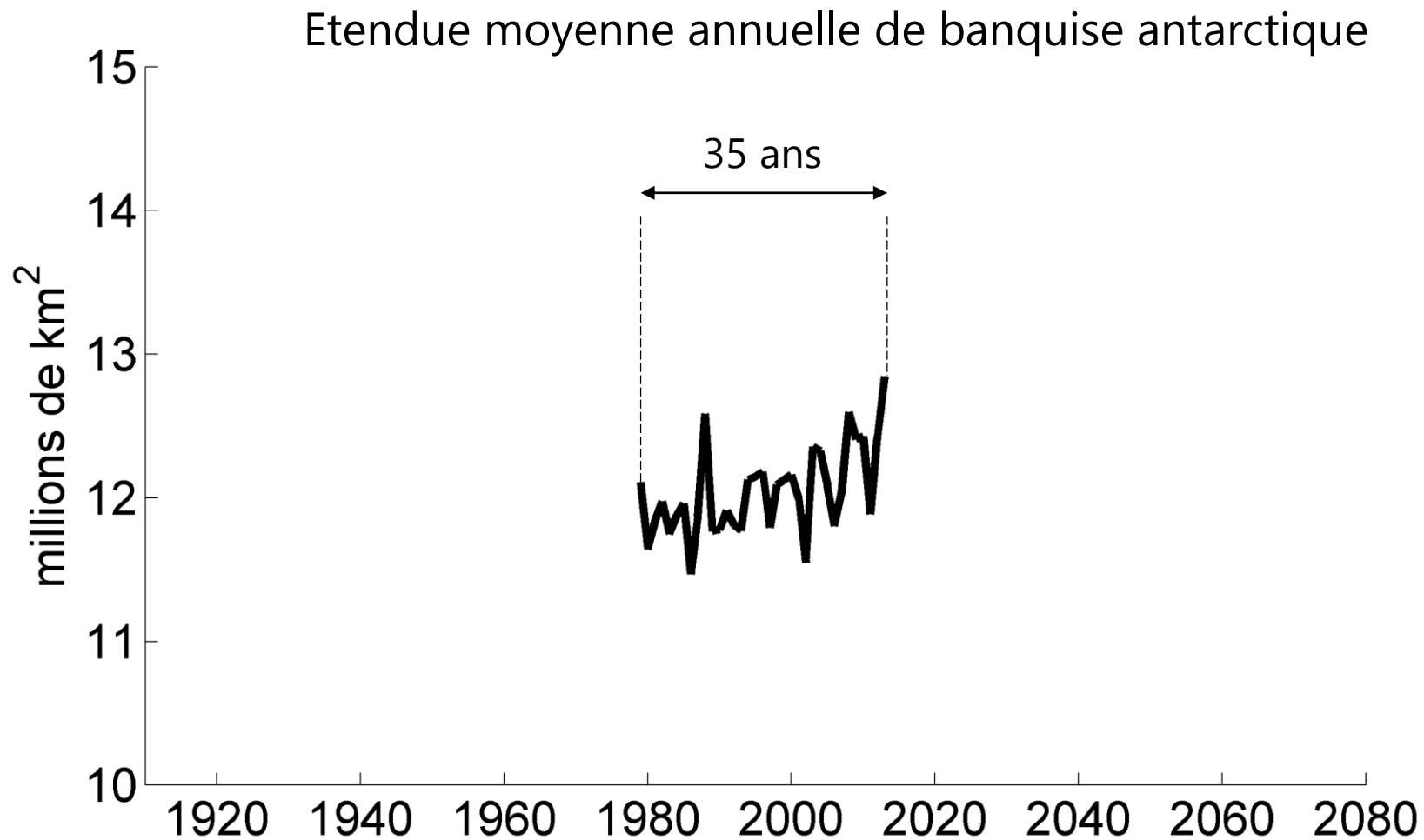
## Echelle du siècle

Réponse climatique

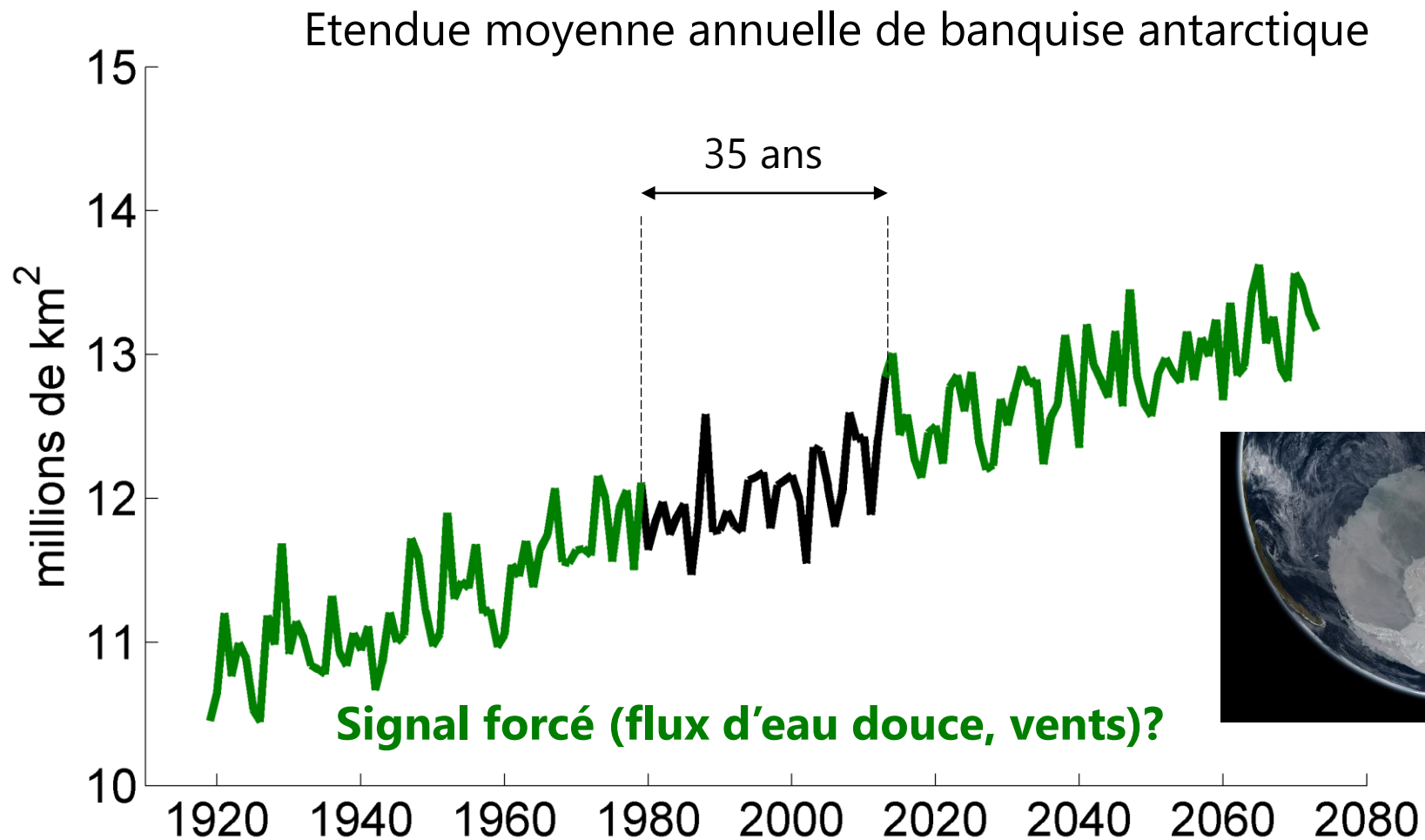




# 35 ans d'observations: trop peu pour comprendre l'augmentation de l'étendue de banquise antarctique

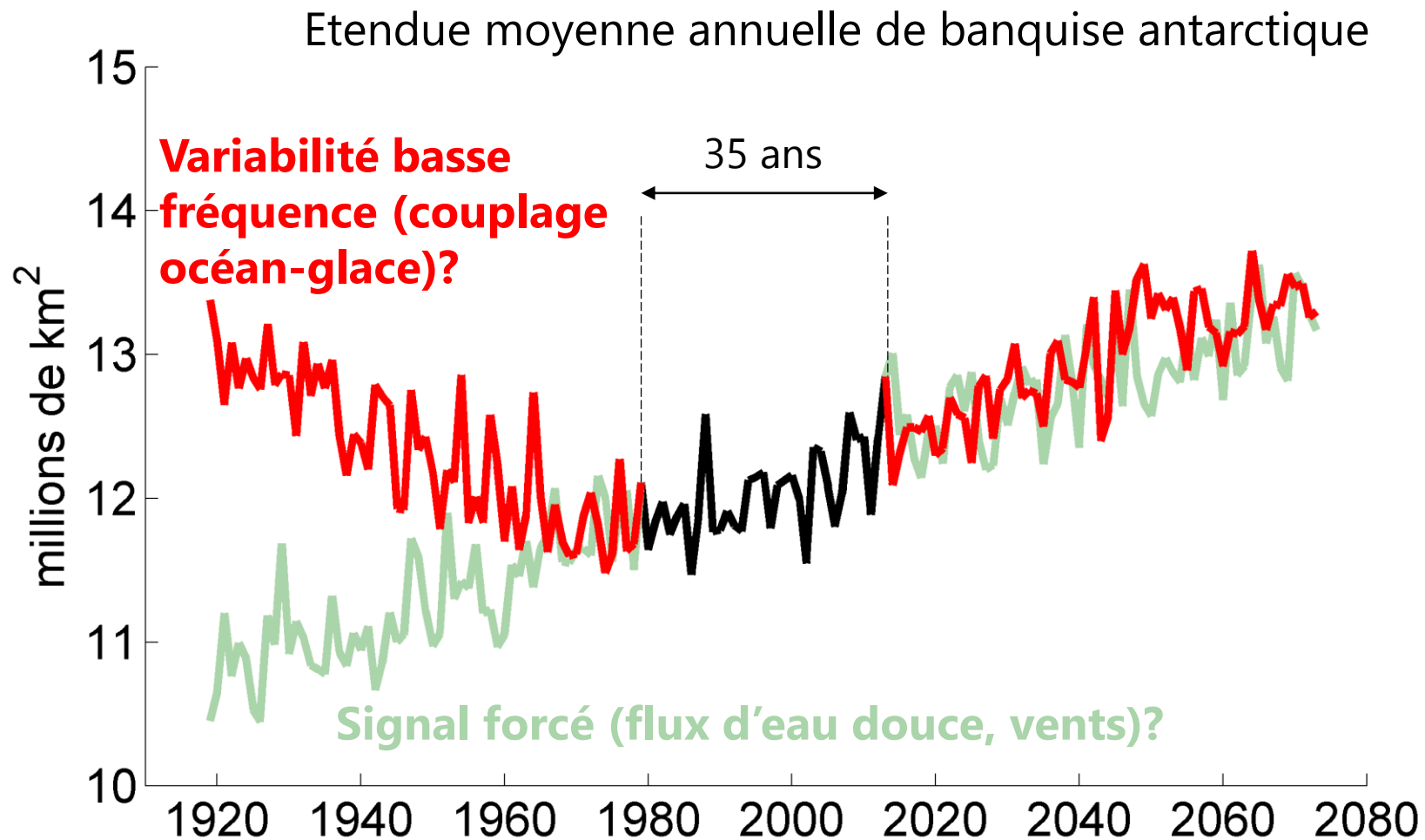


# 35 ans d'observations: trop peu pour comprendre l'augmentation de l'étendue de banquise antarctique

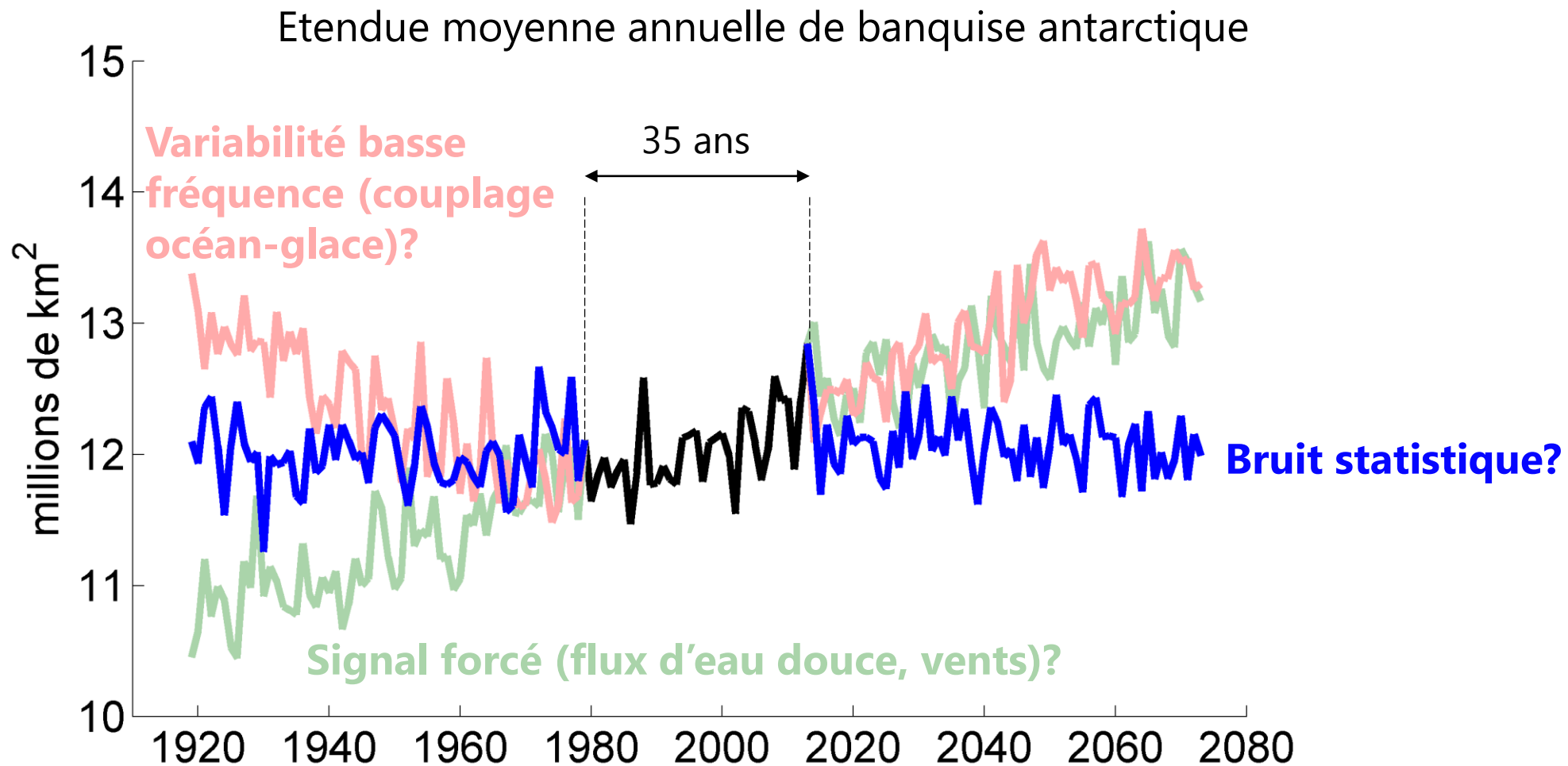




# 35 ans d'observations: trop peu pour comprendre l'augmentation de l'étendue de banquise antarctique

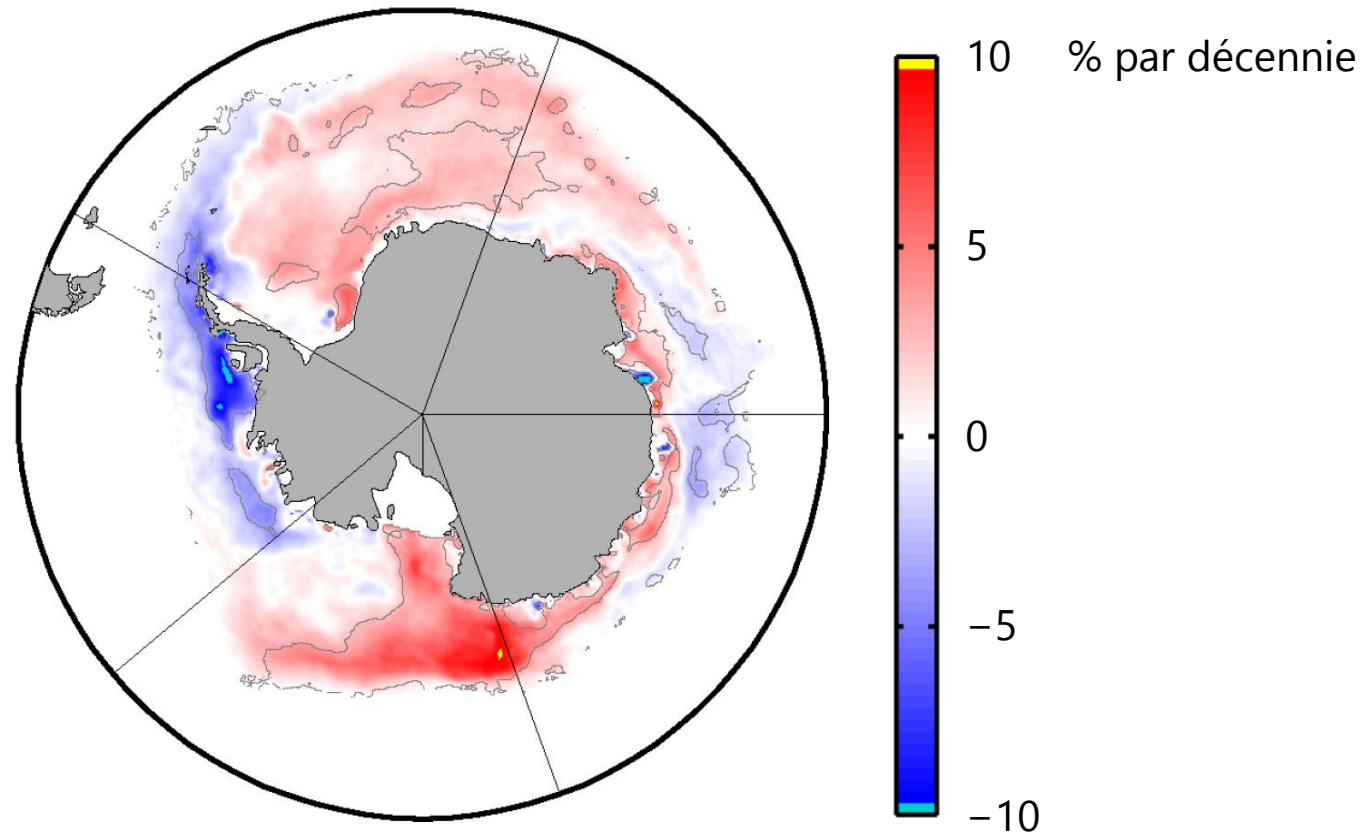


# 35 ans d'observations: trop peu pour comprendre l'augmentation de l'étendue de banquise antarctique



# En Antarctique, la priorité est de comprendre l'origine de signaux fort régionalisés

Changements observés (1980-2008)  
de concentration de banquise



## Conclusion 1

Les observations de banquise soulèvent beaucoup de questions, mais sont insuffisantes pour y répondre

### **Observations**

---

**Proches de la réalité**

**Peu/pas de valeur prédictive**

**Couverture incomplète**

**Incertitudes**

A. Observations et **modèles de la banque**

B. Trois exemples d'utilisation constructive

Un modèle est constitué

d'équations physiques...

$$\frac{\partial g}{\partial t} = -\nabla \cdot (vg) - \frac{\partial}{\partial h} (fg) + \psi$$

⋮

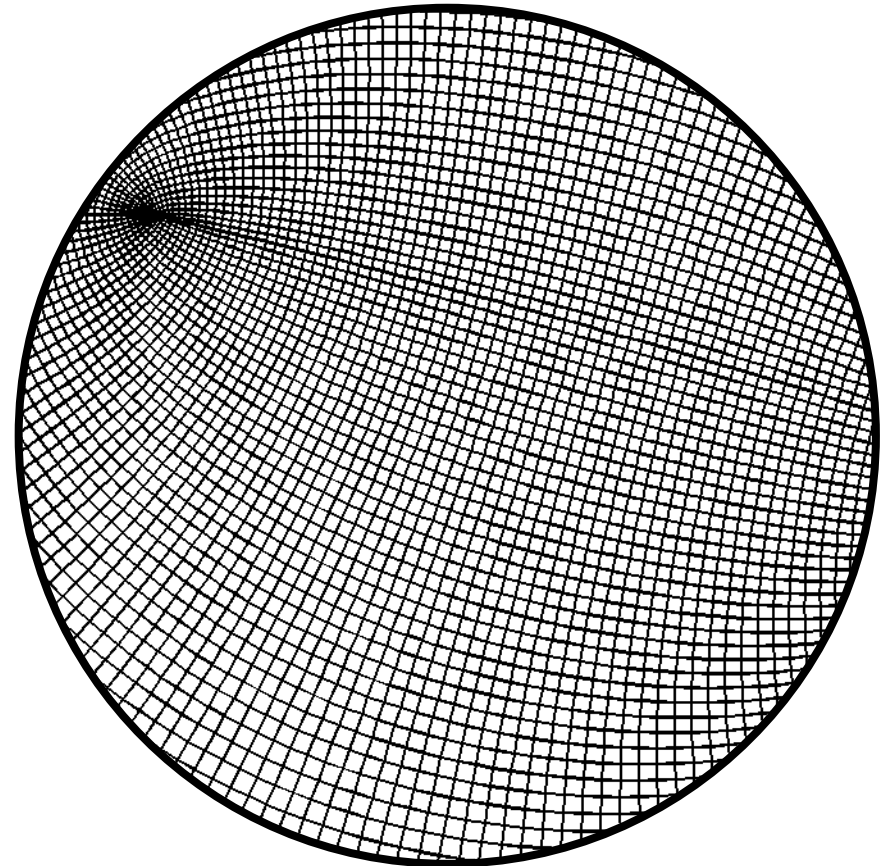
$$\frac{\partial g}{\partial t} = -\nabla \cdot (vg) - \frac{\partial}{\partial h} (fg) + \psi$$

⋮

Un modèle est constitué

d'équations physiques...

... discrétisées dans  
l'espace et le temps ...



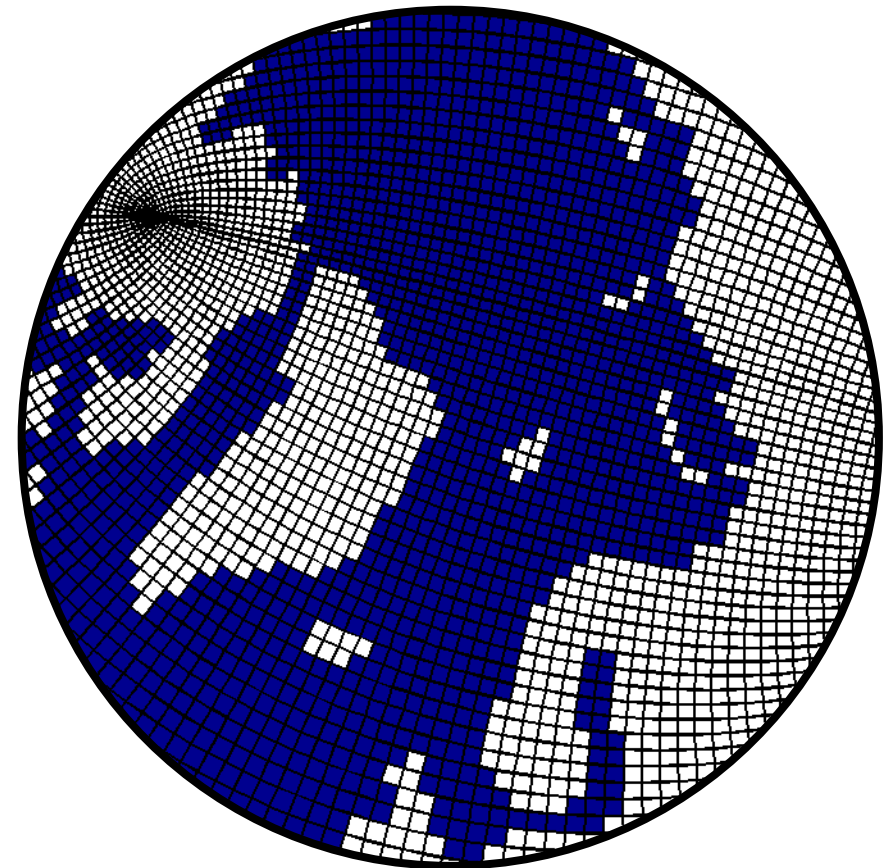
Un modèle est constitué

d'équations physiques...

... discrétisées dans  
l'espace et le temps ...

... résolues numériquement  
sur un domaine virtuel...

$$\begin{array}{c} \vdots \\ \frac{\partial g}{\partial t} = -\nabla \cdot (vg) - \frac{\partial}{\partial h} (fg) + \psi \\ \vdots \end{array}$$





⋮

$$\frac{\partial g}{\partial t} = -\nabla \cdot (vg) - \frac{\partial}{\partial h} (fg) + \psi$$

⋮

## Un modèle est constitué

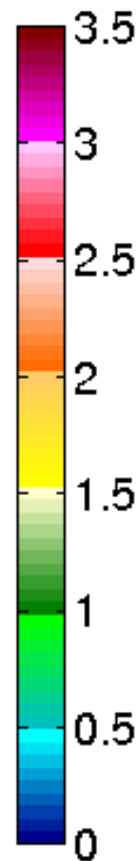
d'équations physiques...

... discrétisées dans  
l'espace et le temps ...

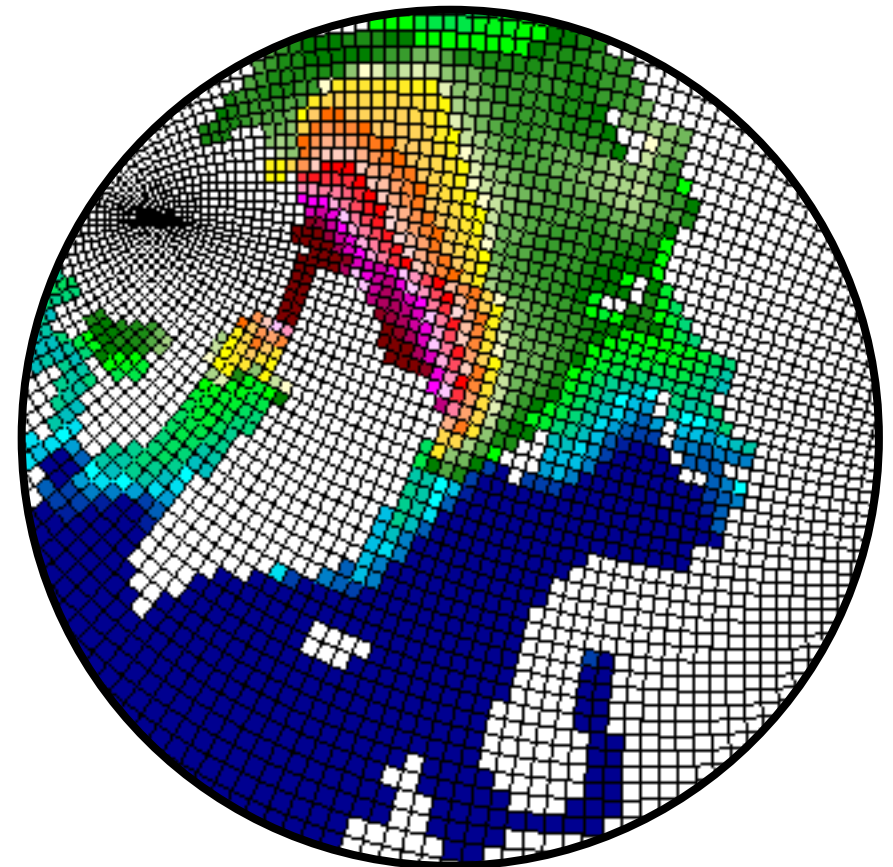
... résolues numériquement  
sur un domaine virtuel...

... partout...

m



Epaisseur simulée de banquise



⋮

$$\frac{\partial g}{\partial t} = -\nabla \cdot (vg) - \frac{\partial}{\partial h} (fg) + \psi$$

⋮

## Un modèle est constitué

d'équations physiques...

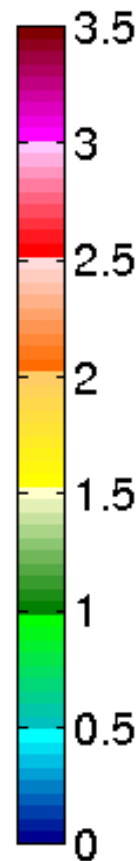
... discrétisées dans  
l'espace et le temps ...

... résolues numériquement  
sur un domaine virtuel...

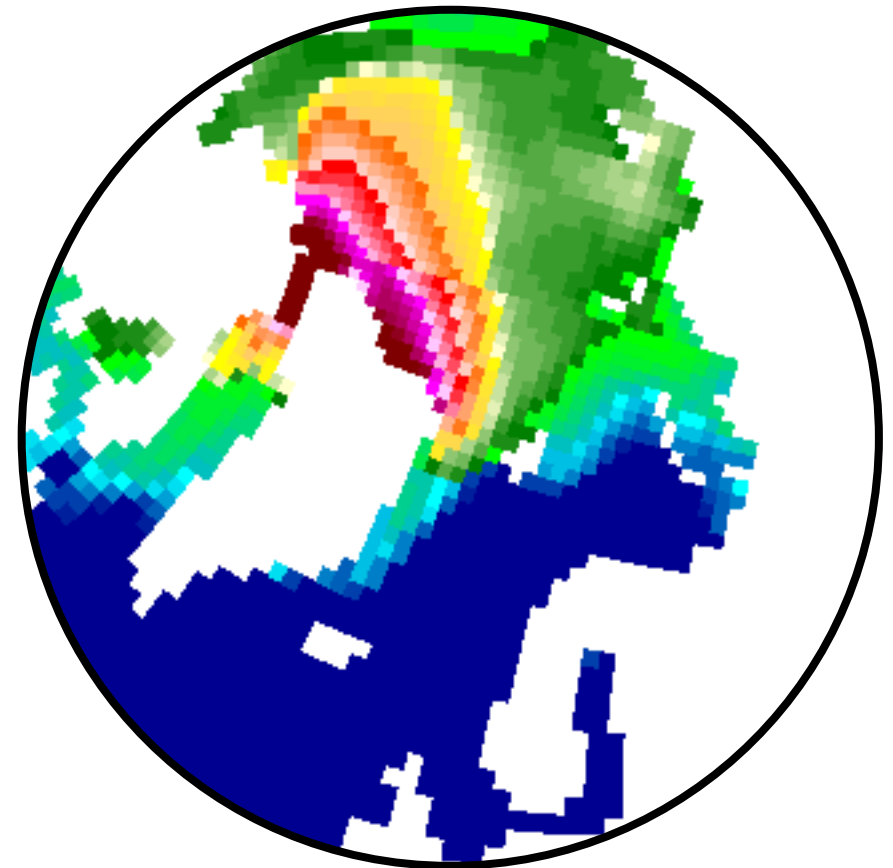
... partout...

... tout le temps.

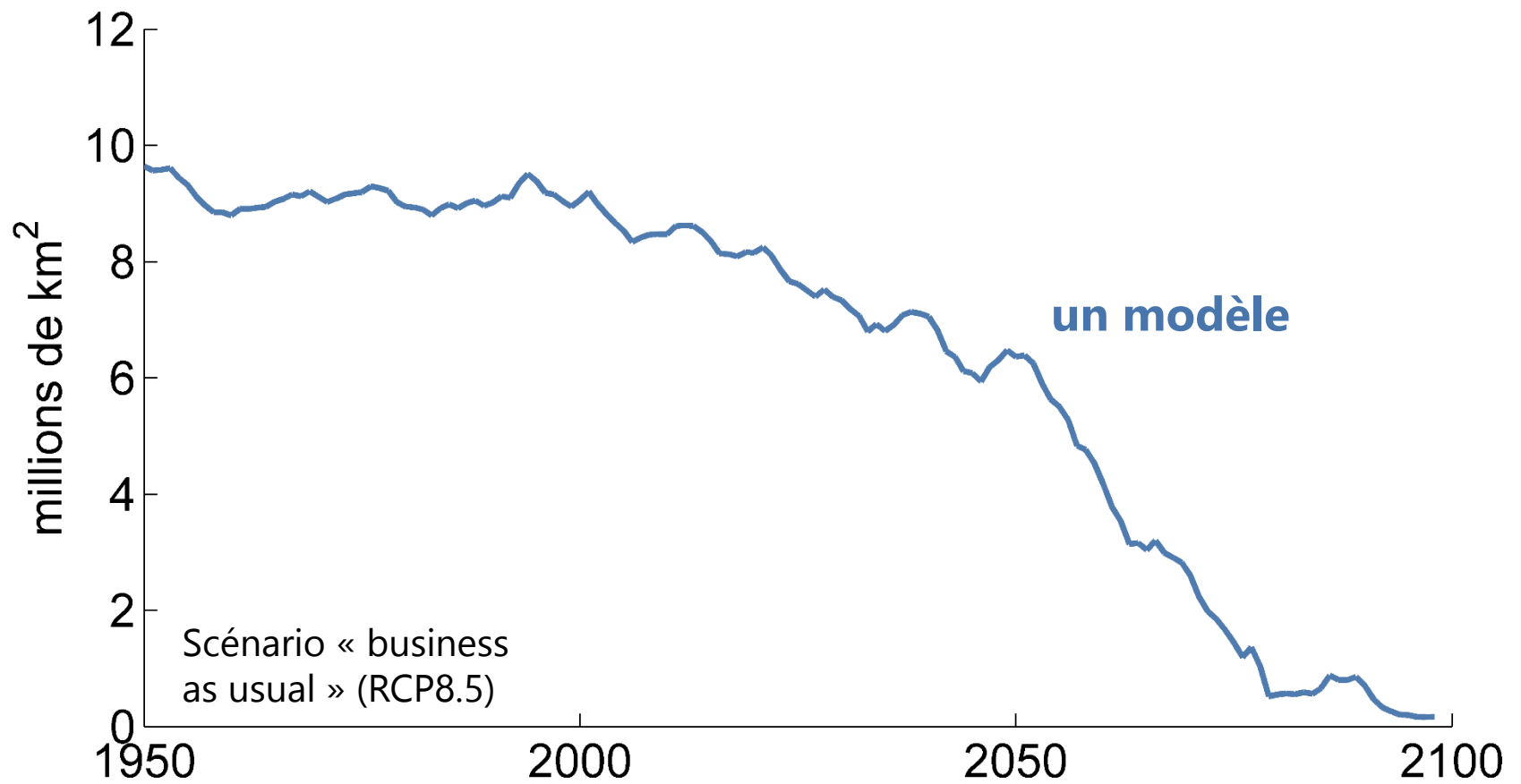
m



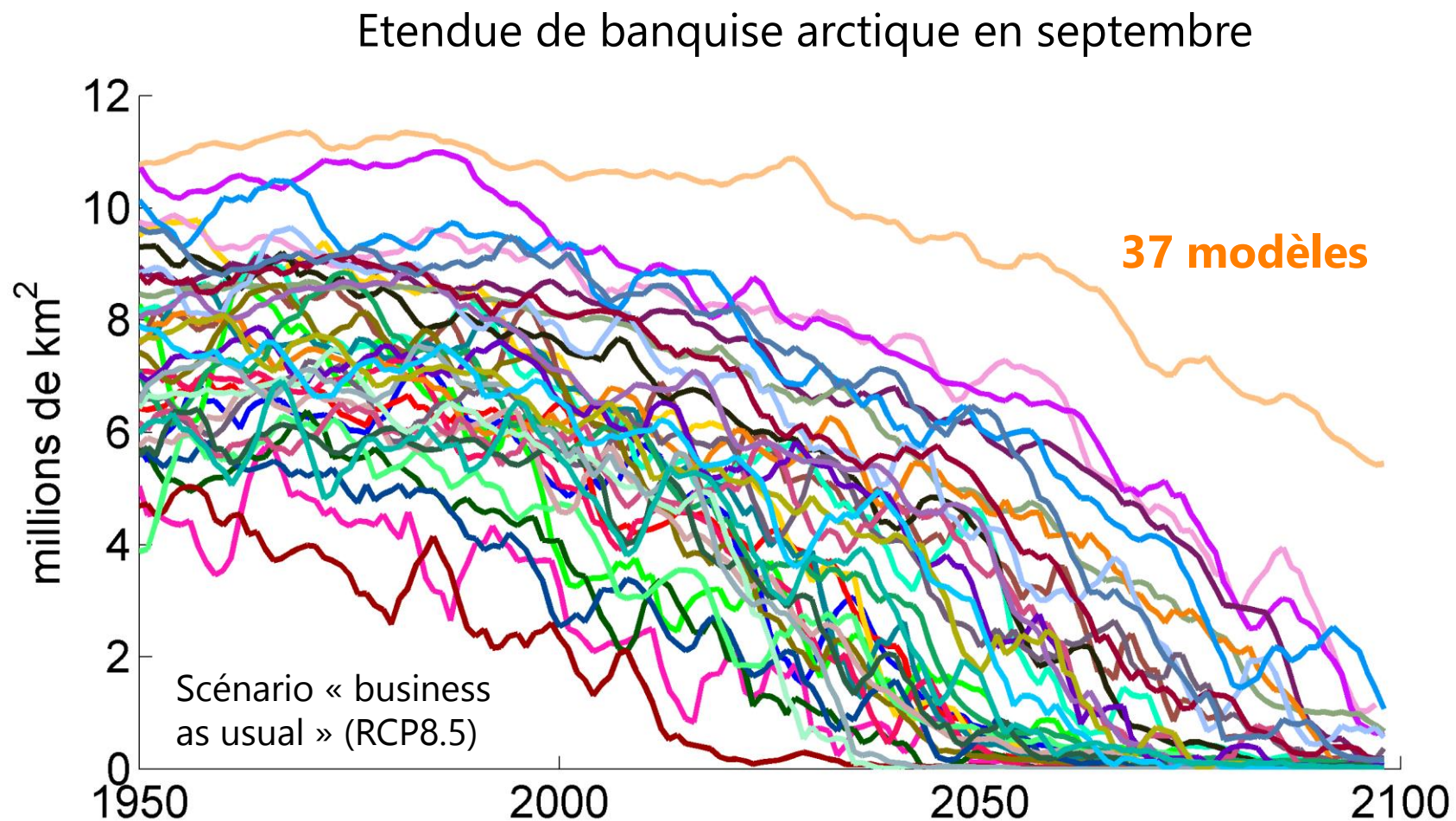
Epaisseur simulée de banquise



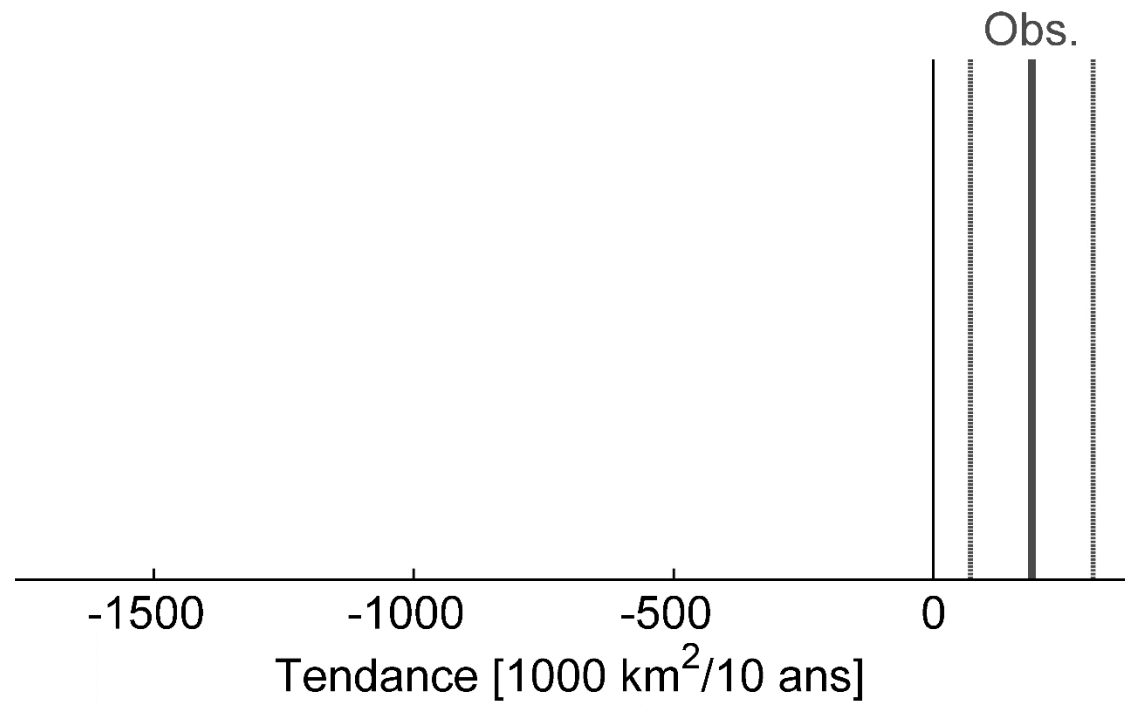
# Etendue de banquise arctique en septembre



# Arctique: réponse cohérente des modèles au forçage, timing incertain

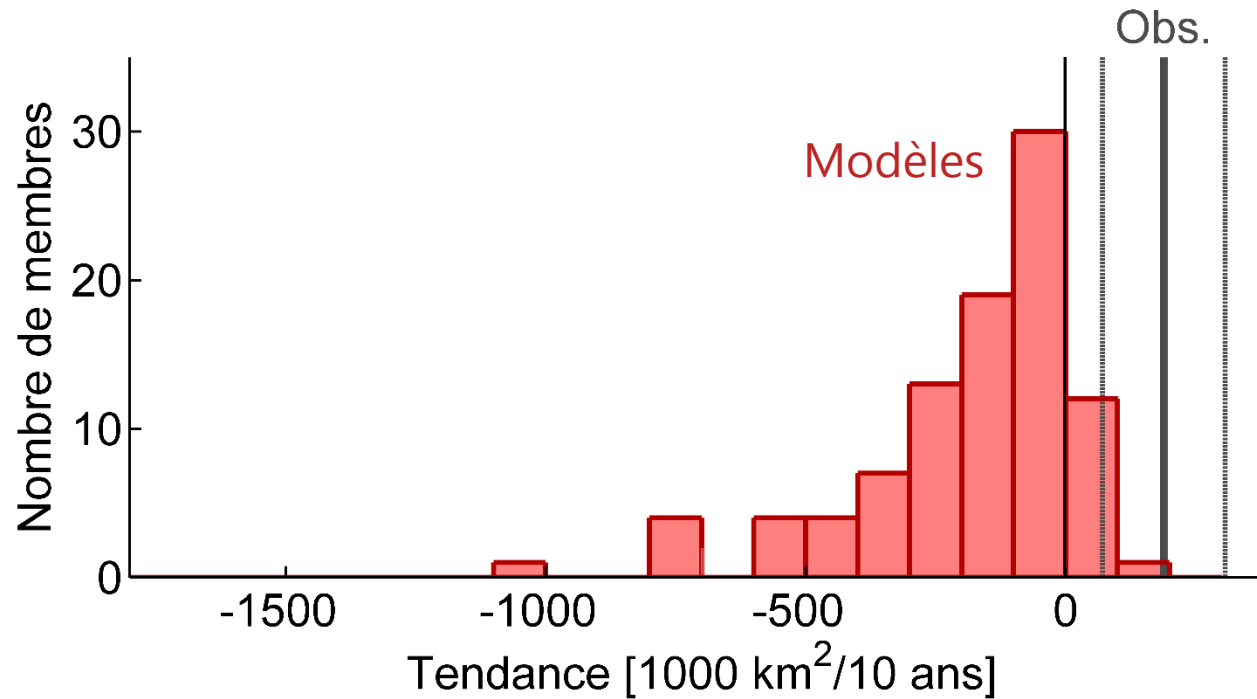


Tendance (1979-2012) d'étendue de  
banquise antarctique en septembre



# Antarctique: présence de biais systématiques dans les modèles

Tendance (1979-2012) d'étendue de banquise antarctique en septembre



## Conclusion 2

Les modèles de banque sont pratiques mais souffrent d'incertitudes et de biais

### **Modèles**

---

**Approximations de la réalité**

**Valeur prédictive**

**Couverture complète**

**Incertainces, biais systématiques**

# Observations et modèles présentent des caractéristiques complémentaires

## Observations

**Proches de la réalité**

**Peu/pas de valeur prédictive**

**Couverture incomplète**

**Incertitudes**

## Modèles

**Approximations de la réalité**

**Valeur prédictive**

**Couverture complète**

**Incertitudes, biais systématiques**



A. Observations et modèles de la banque  
présentent des caractéristiques complémentaires

**B. Trois exemples d'utilisation constructive**

# Trois exemples d'utilisation constructive des observations et des modèles

1. Contraindre des projections climatiques
2. Estimer l'état d'un système
3. Calibrer les paramètres d'un modèle

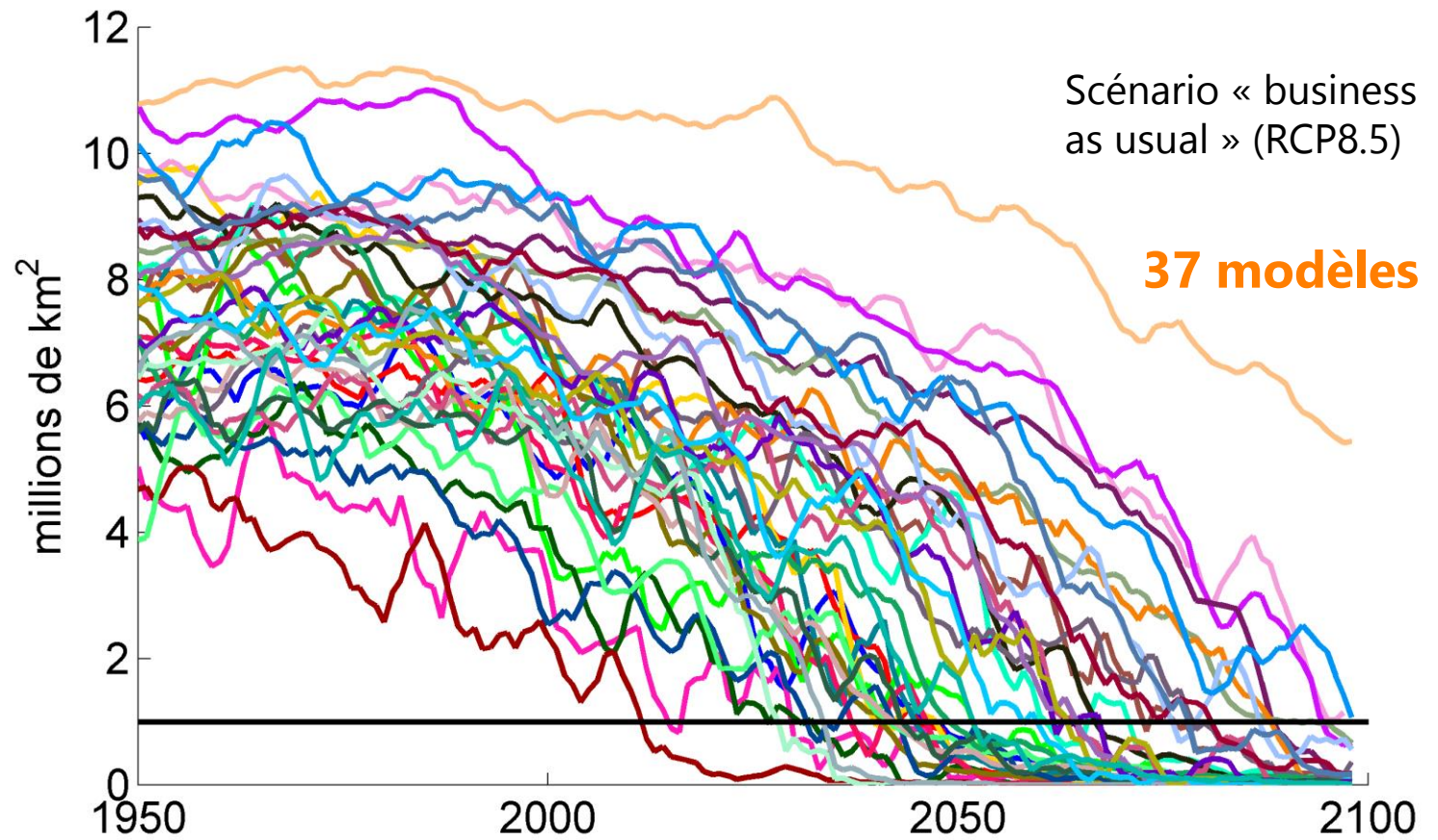
# Trois exemples d'utilisation constructive des observations et des modèles

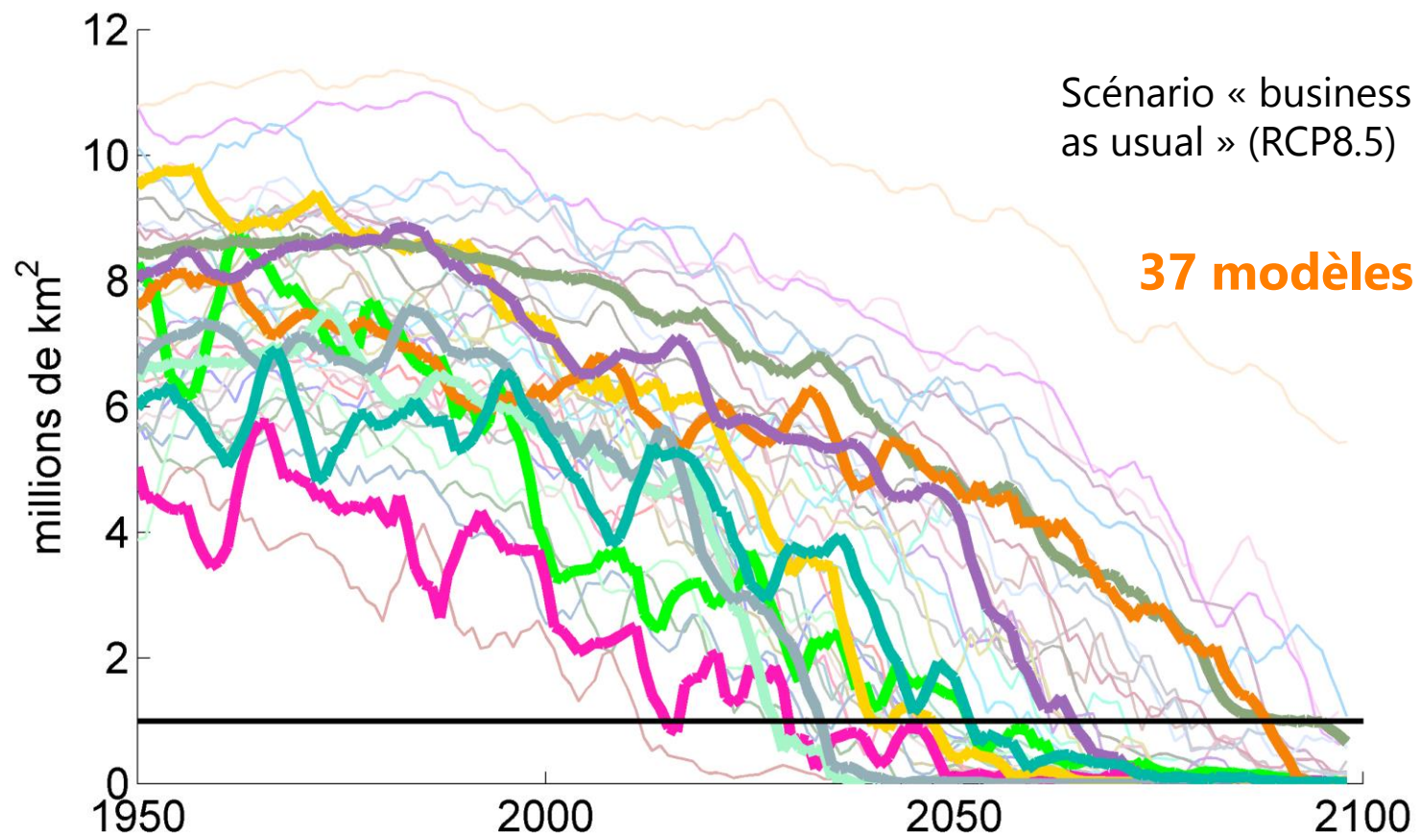
## **1. Contraindre des projections climatiques**

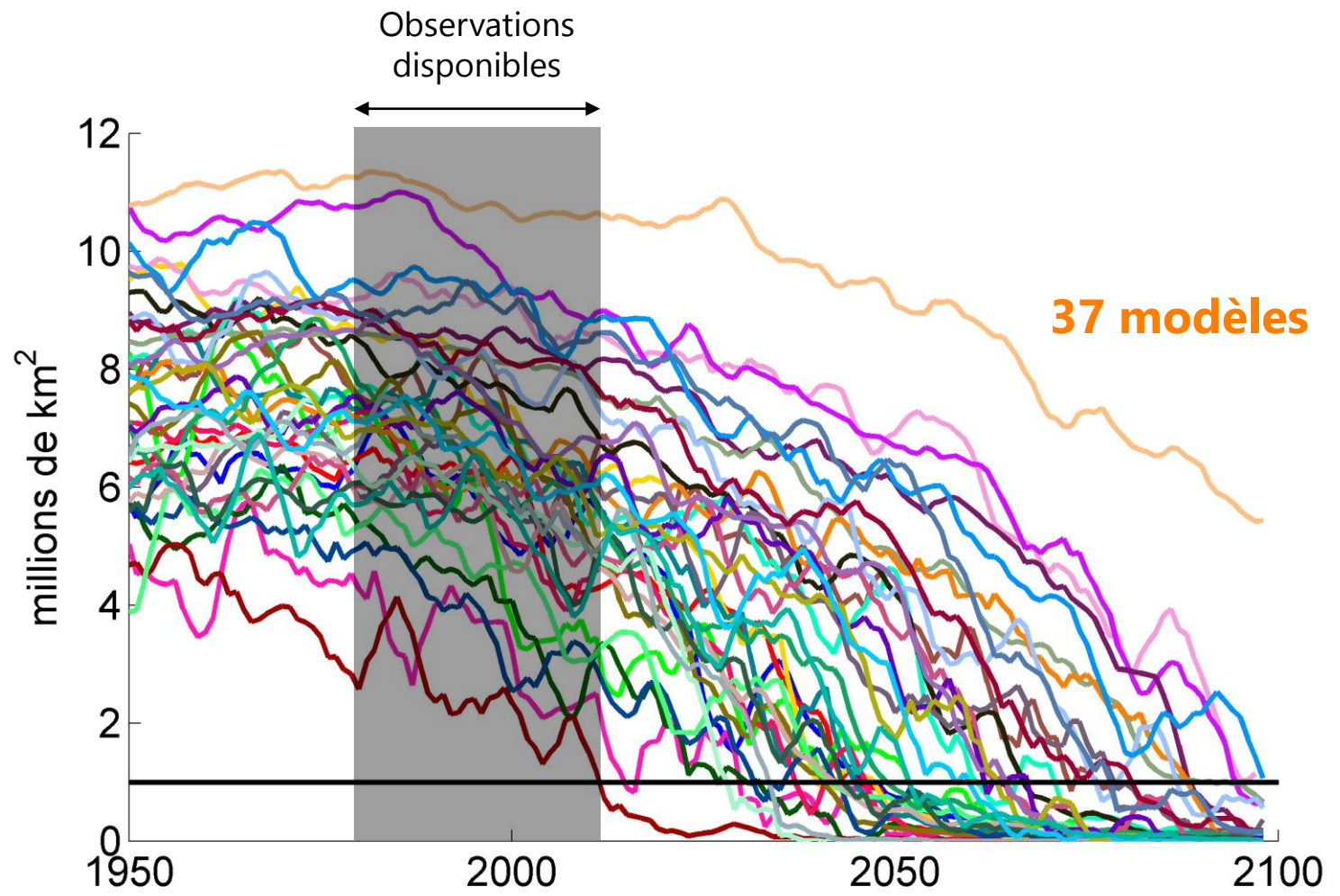
2. Estimer l'état d'un système

3. Calibrer les paramètres d'un modèle

## Etendue de banquise arctique en septembre

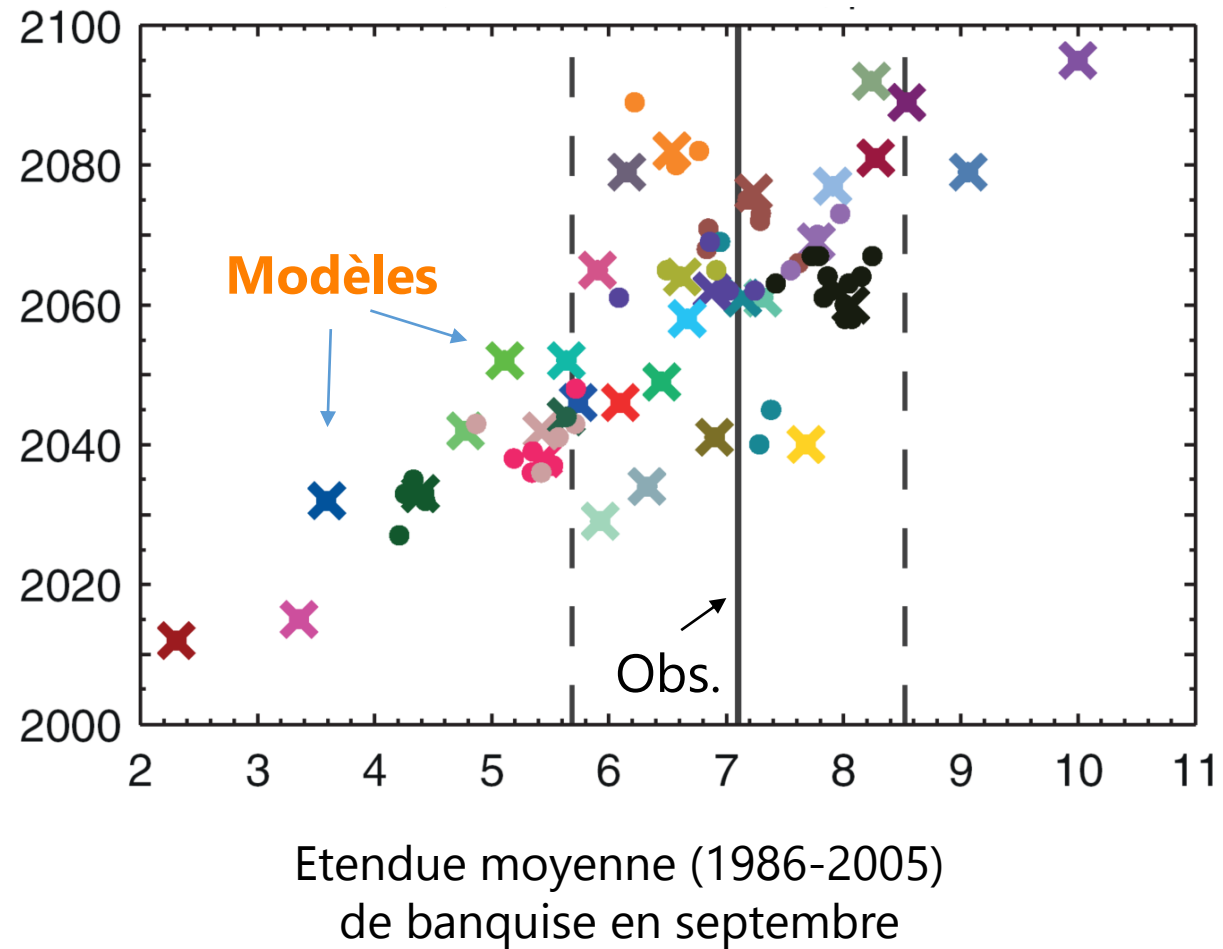




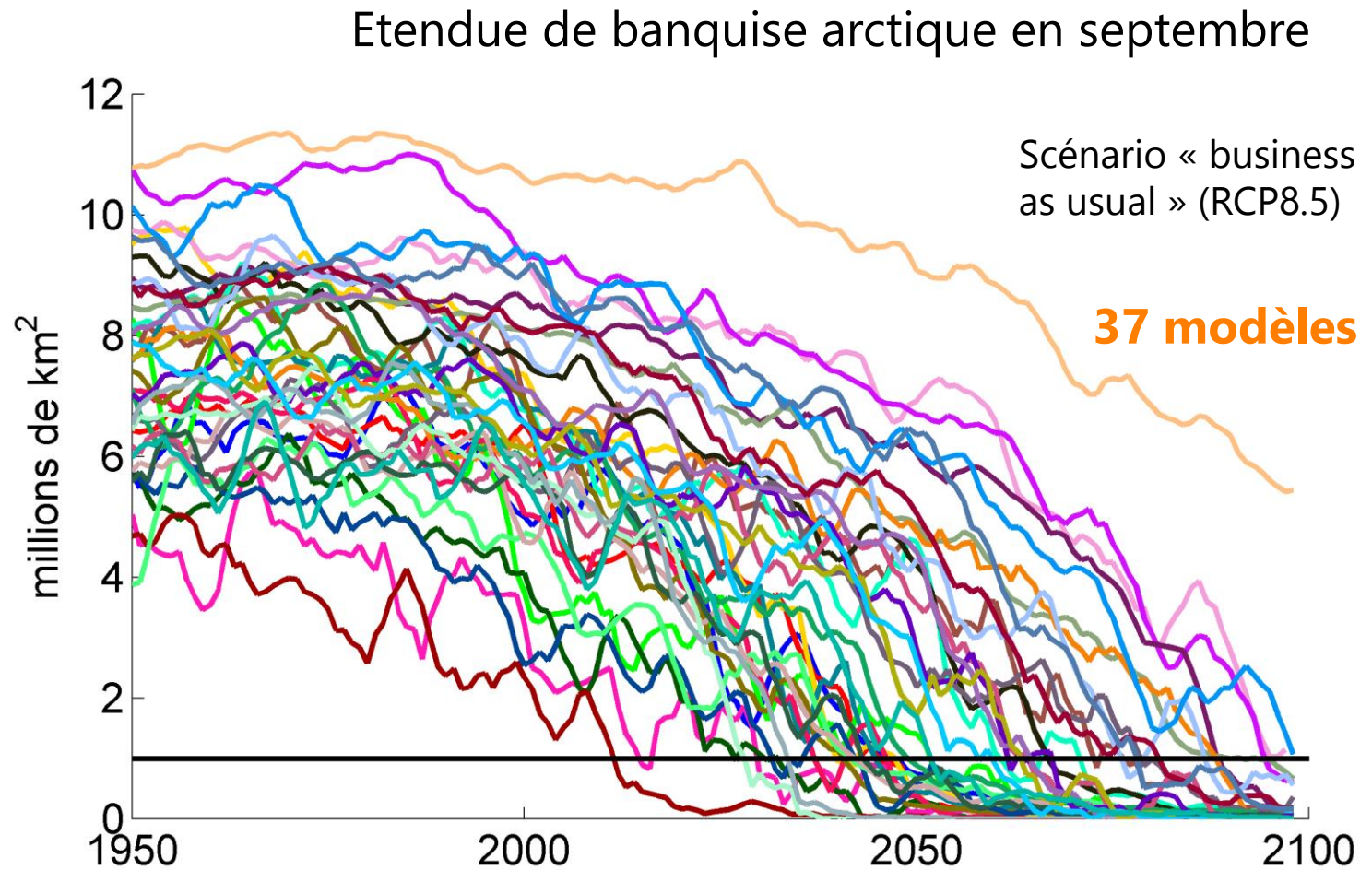


# L'état passé peut servir de contrainte pour les projections de banquise arctique en été

Première année de disparition de la banquise arctique en septembre

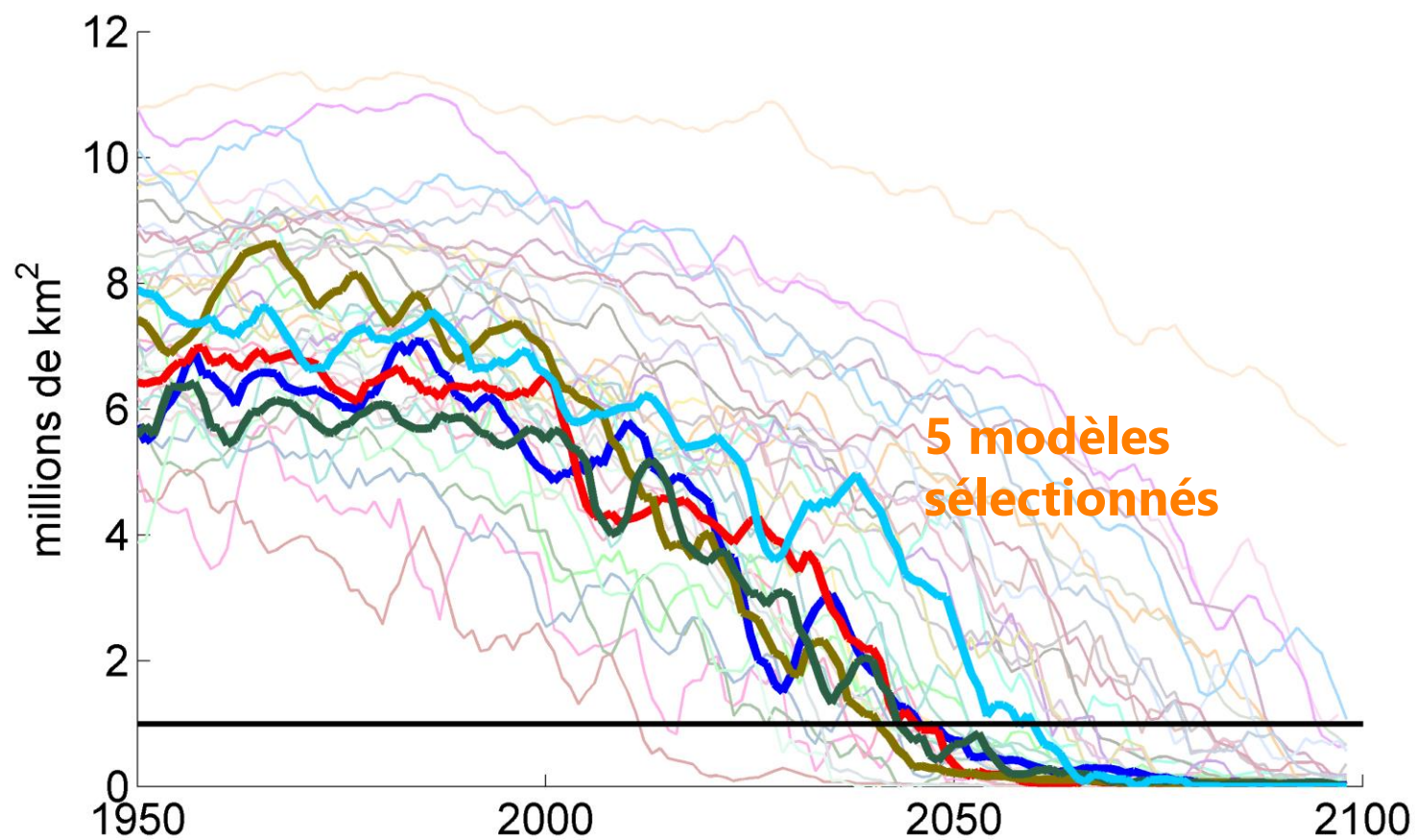


# L'état passé peut servir de contrainte pour les projections de banquise arctique en été





L'état passé peut servir de contrainte pour les projections de banquise arctique en été



# Trois exemples d'utilisation constructive des observations et des modèles

1. Contraindre des projections climatiques

**2. Estimer l'état d'un système**

3. Calibrer les paramètres d'un modèle

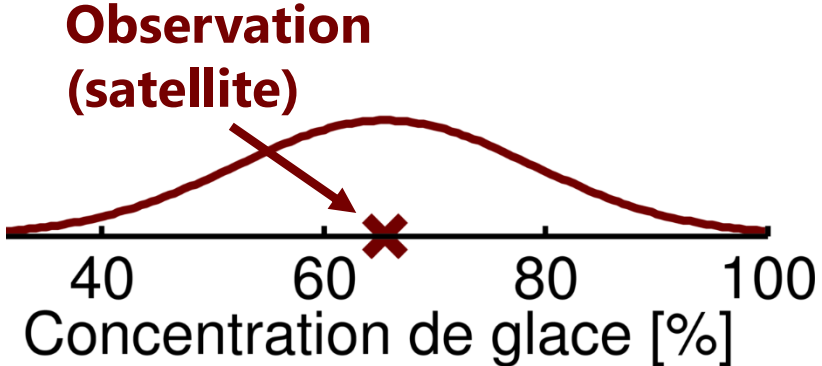
[www.damocles-eu.org]



7 septembre 2000

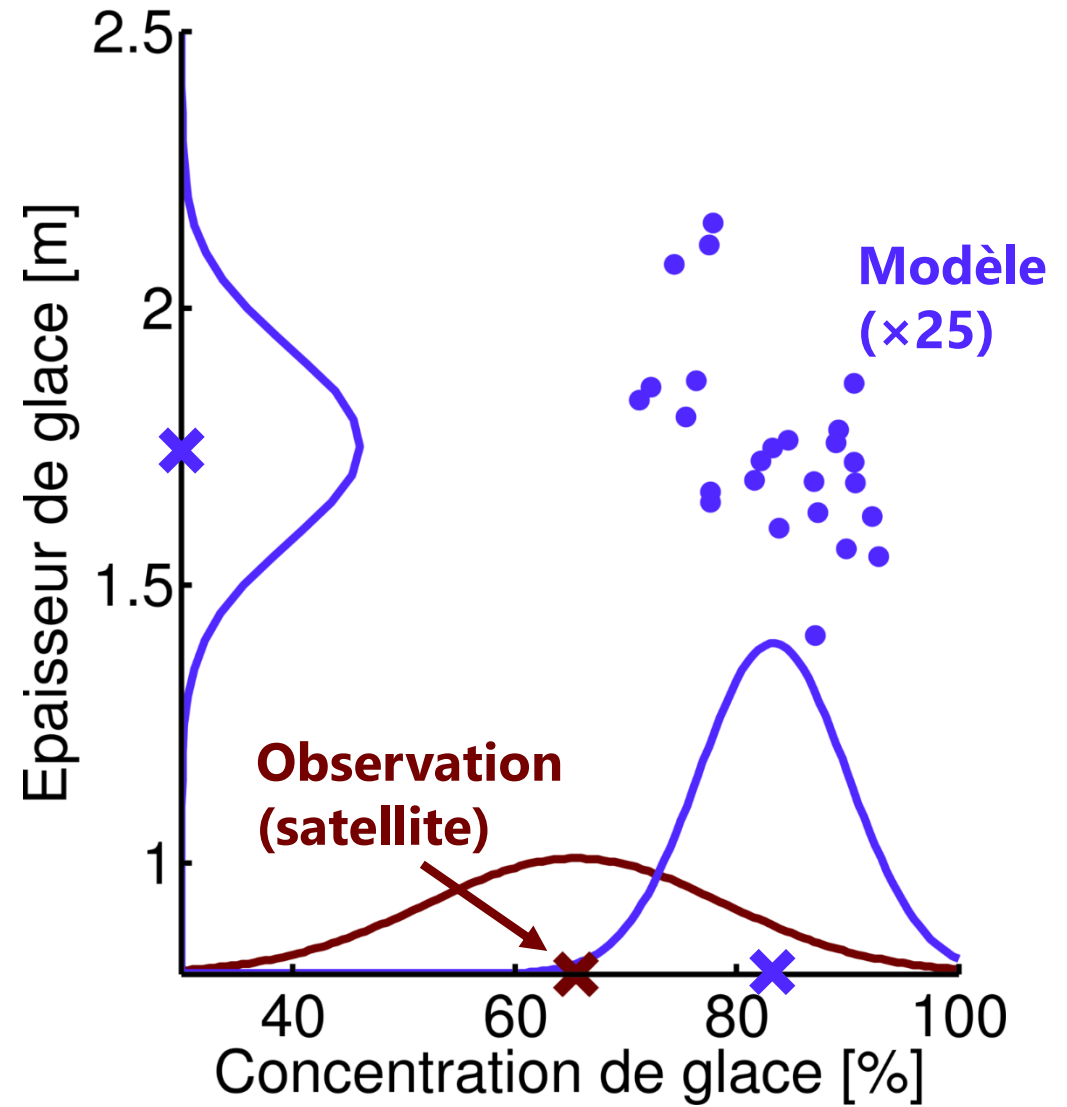


[www.damocles-eu.org]





7 septembre 2000

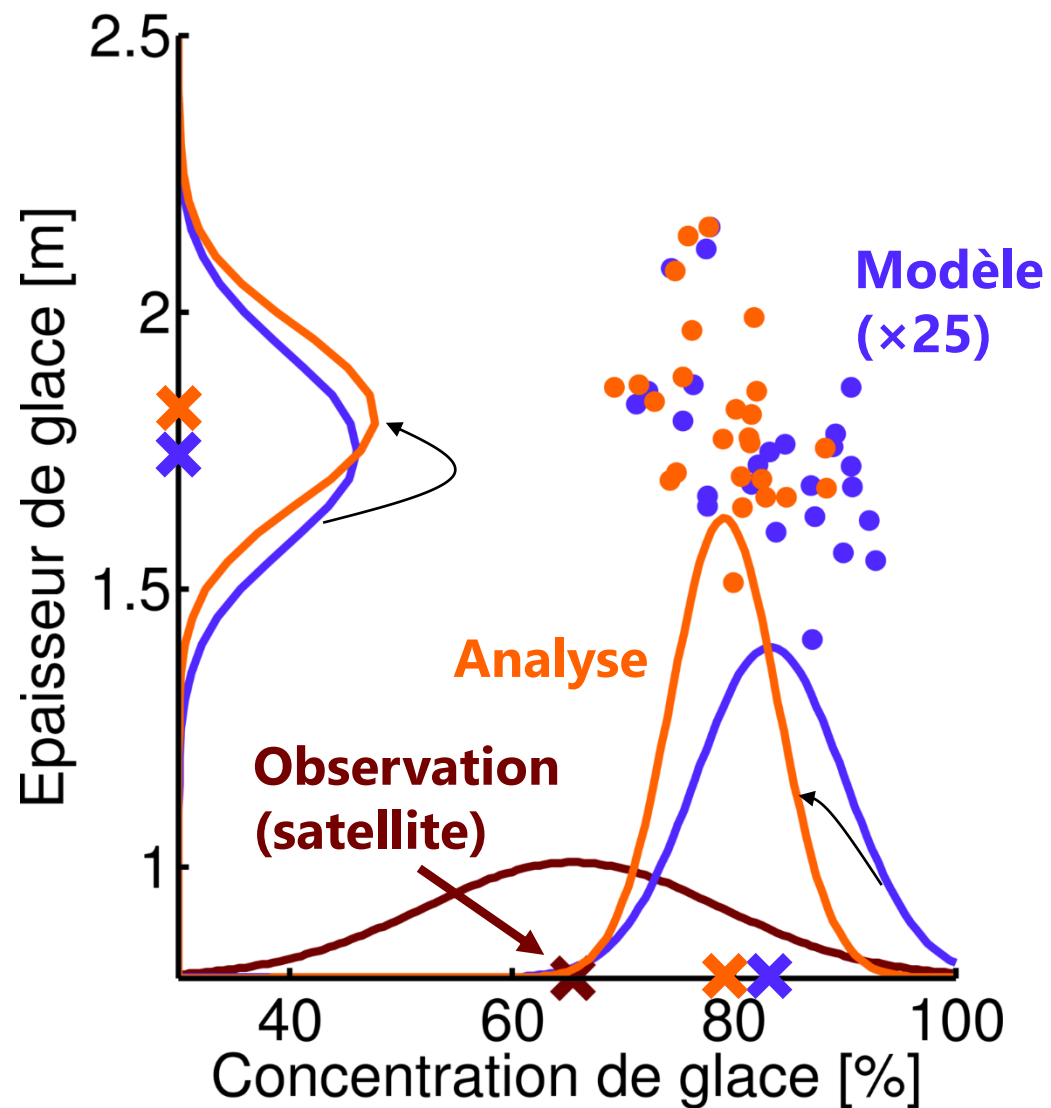


# L'assimilation de données permet d'estimer des variables non-observées

7 septembre 2000

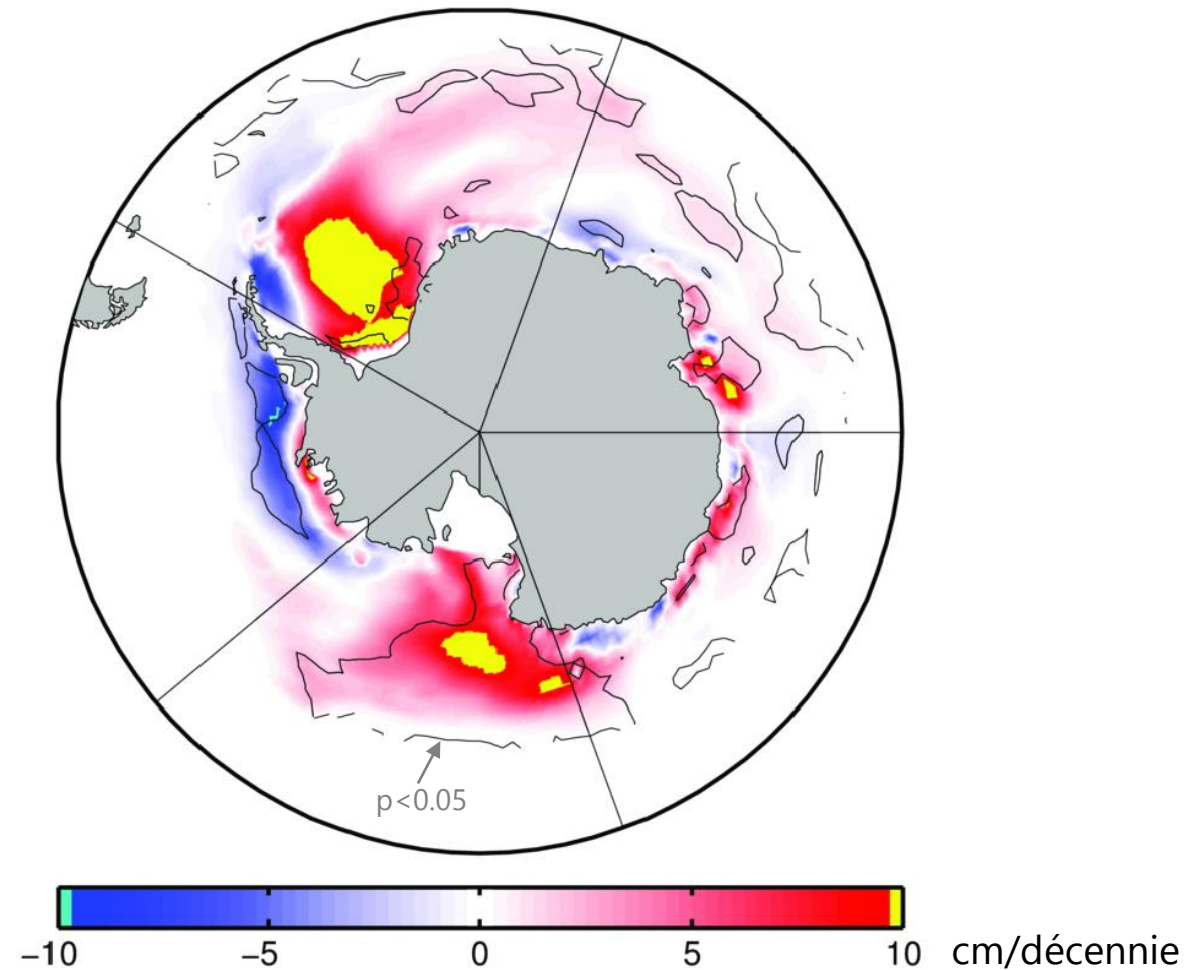


[www.damocles-eu.org]



# Reconstruction des changements d'épaisseur de banquise antarctique

Tendances d'épaisseur de la banquise  
(reconstruction, 1980-2008)



# Trois exemples d'utilisation constructive des observations et des modèles

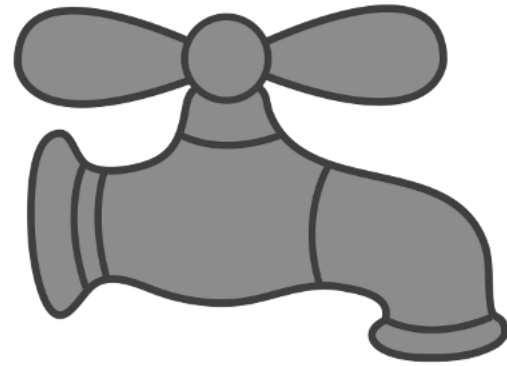
1. Contraindre des projections climatiques

2. Estimer l'état d'un système

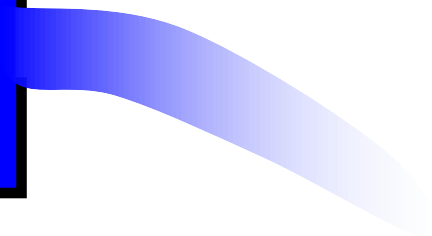
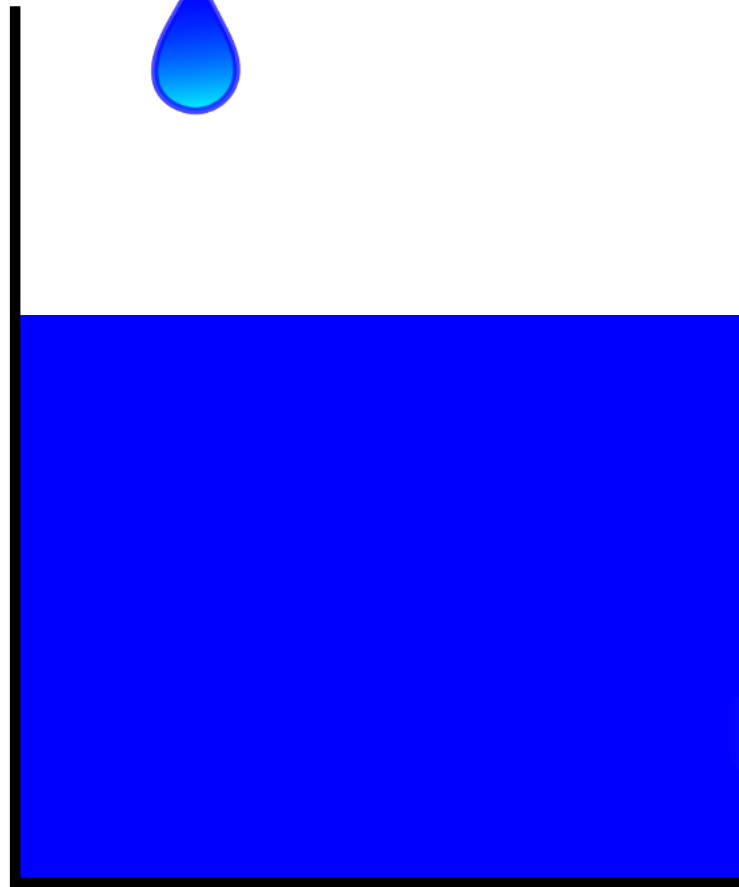
**3. Calibrer les paramètres d'un modèle**



Commande



$h_0$



```

clc; clear all; close all

g=9.81; % accélération de la gravité
h0=0.34; % hauteur initiale du niveau d'eau
dt=0.1; % pas de temps
tf=30; % durée de la simulation

h=zeros(length(0:dt:tf),1) % h(t), à trouver

...

alpha=1.34 % Coefficient de
            % bidouillage

...

for t=1:dt:tf
    [a,b,c]=compute_gain(h(t-1))
    ...

```

```
clc; clear all; close all
```

```
g=9.81;
```

```
% accélération de la  
gravité
```

```
h0=0.34;
```

```
% hauteur initiale du  
niveau d'eau
```

```
dt=0.1;
```

```
% pas de temps
```

```
tf=30;
```

```
% durée de la  
simulation
```

```
h=zeros(length(0:dt:tf),1)
```

```
% h(t), à trouver
```

```
...
```

```
alpha=1.34
```

```
% Coefficient de  
% bidouillage
```

```
...
```

```
for t=1:dt:tf
```

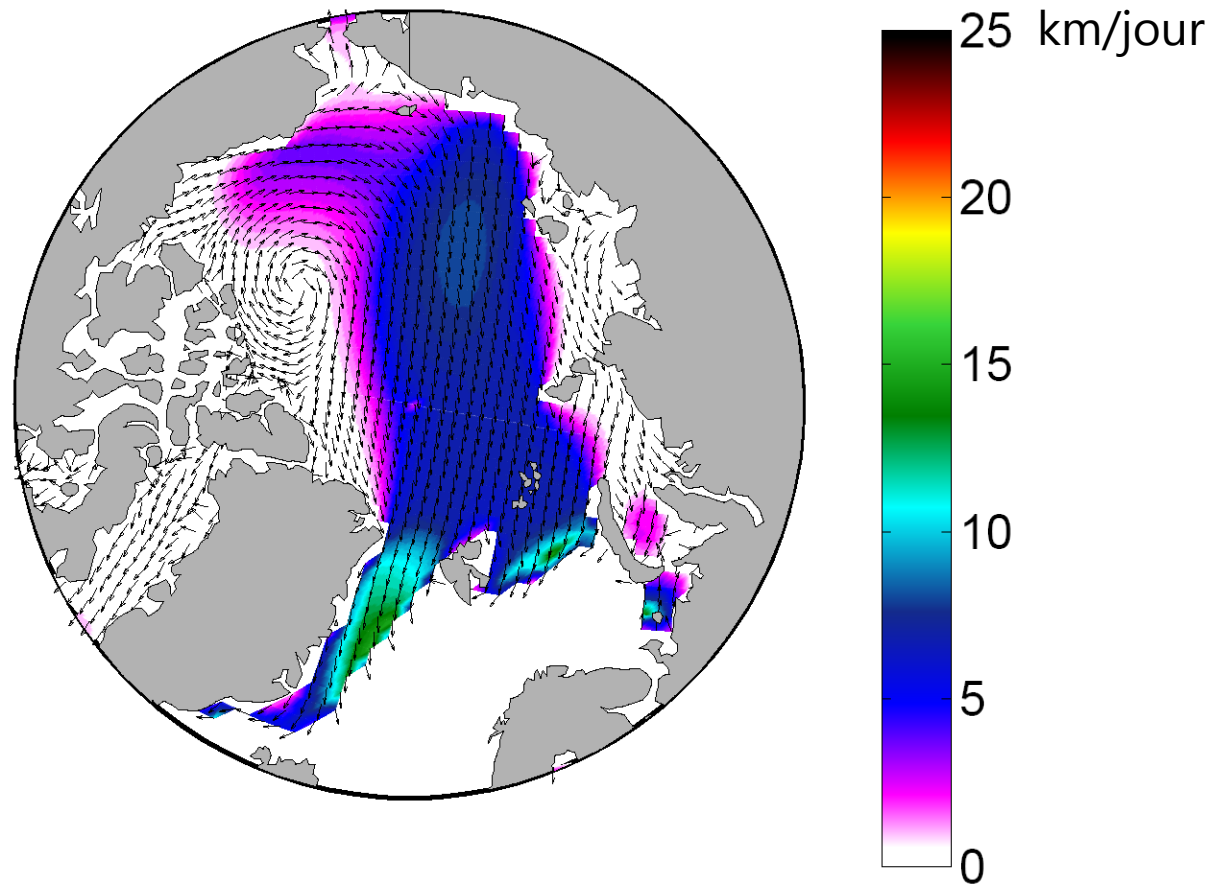
```
    [a,b,c]=compute_gain(h(t-1))
```

```
    ...
```

$$\vec{F}_{air/glac\grave{e}} + \vec{F}_{ocean/glac\grave{e}} + \vec{F}_{glac\grave{e}/glac\grave{e}} \approx 0$$

$\downarrow$                        $\downarrow$                        $\downarrow$   
 $C_a$                        $C_w$                        $\rho^*$

Vitesse de dérive  
(modèle)



$$\vec{F}_{air/glace} + \vec{F}_{ocean/glace} + \vec{F}_{glace/glace} \approx 0$$

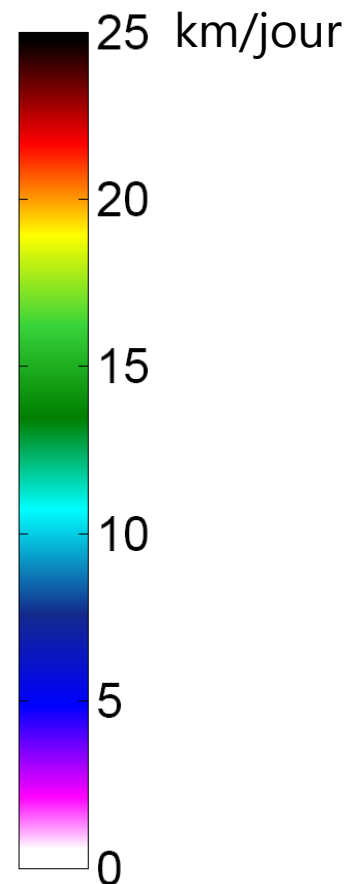
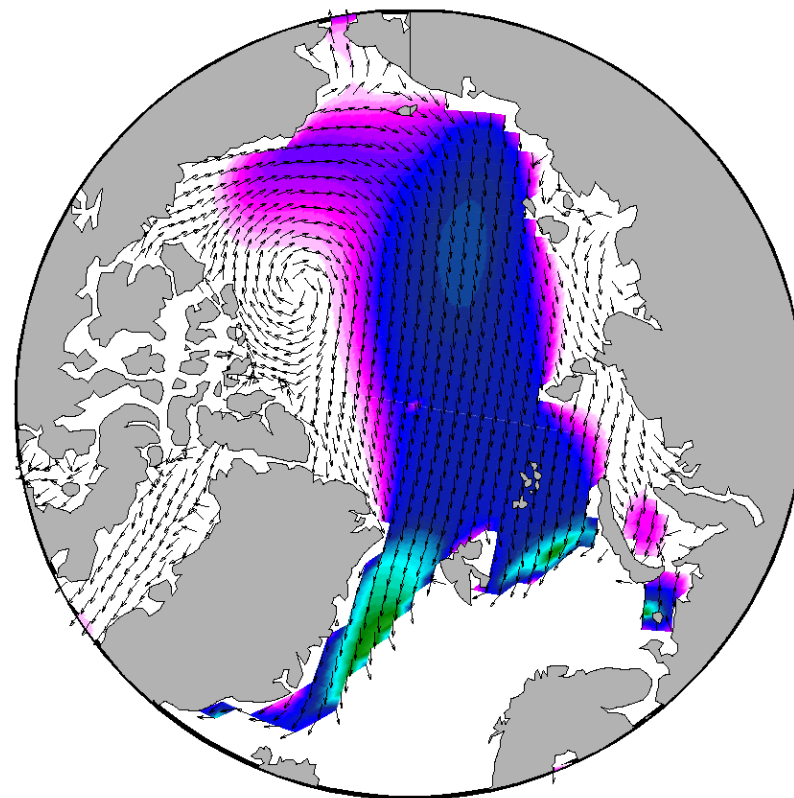
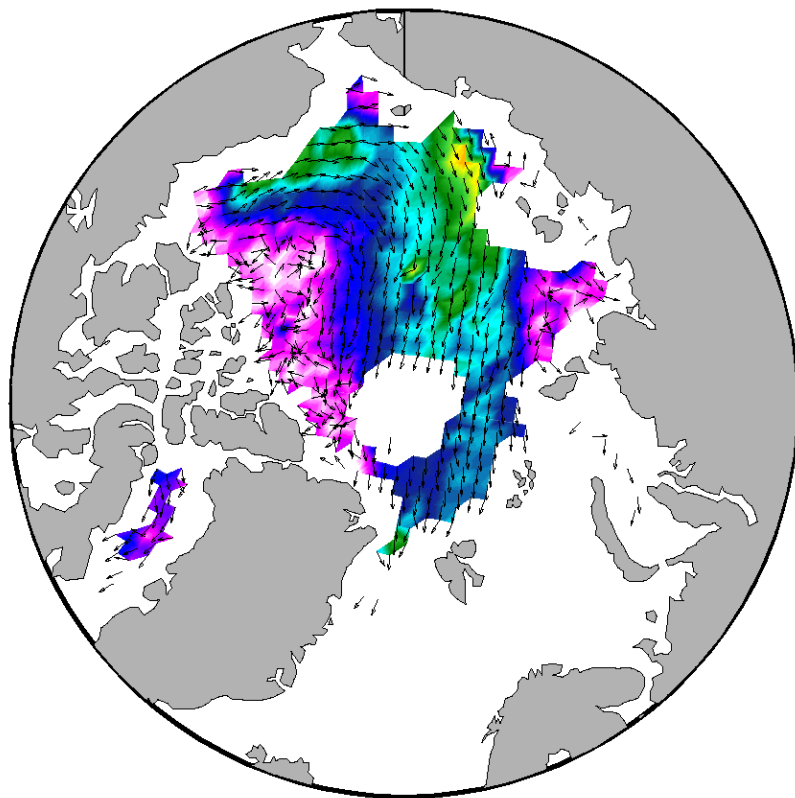
$C_a$

$C_w$

$\rho^*$

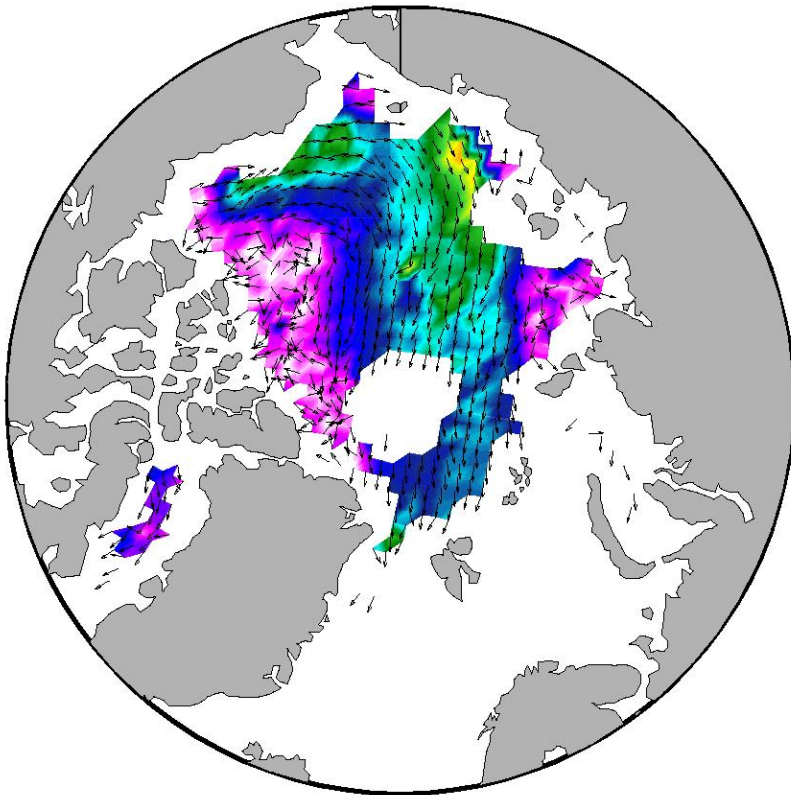
Vitesse de dérive  
(observations)

Vitesse de dérive  
(modèle)

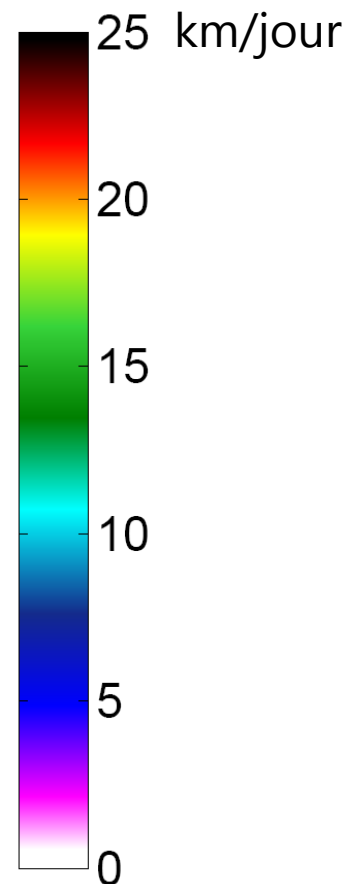
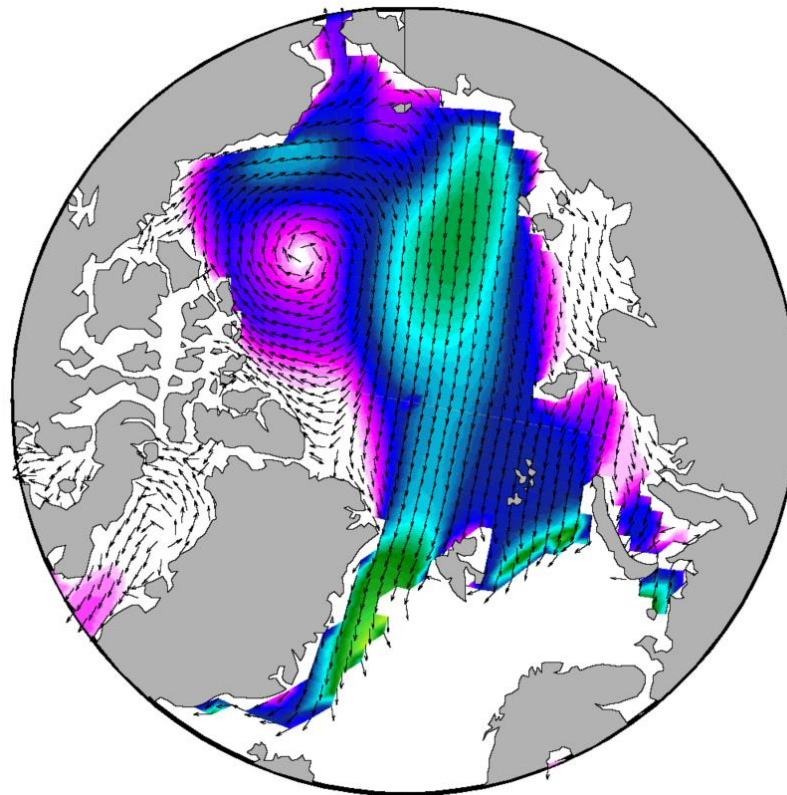


# L'assimilation de données permet de calibrer les paramètres d'un modèle

Vitesse de dérive  
(observations)



Vitesse de dérive  
(modèle, paramètres calibrés)



# Trois exemples d'utilisation constructive des observations et des modèles

1. Contraindre des projections climatiques
2. Estimer l'état d'un système
3. Calibrer les paramètres d'un modèle

**What Is a Good Forecast?**  
**An Essay on the Nature of Goodness in Weather Forecasting**

ALLAN H. MURPHY

*College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Oregon State University, Corvallis, Oregon*

(Manuscript received 11 August 1992, in final form 20 January 1993)

Une « bonne » prévision est

- cohérente  
par rapport à *l'a priori* du prévisionniste
- de qualité  
par rapport aux observations
- utile  
pour les bénéficiaires



**What Is a Good Forecast?**  
**An Essay on the Nature of Goodness in Weather Forecasting**

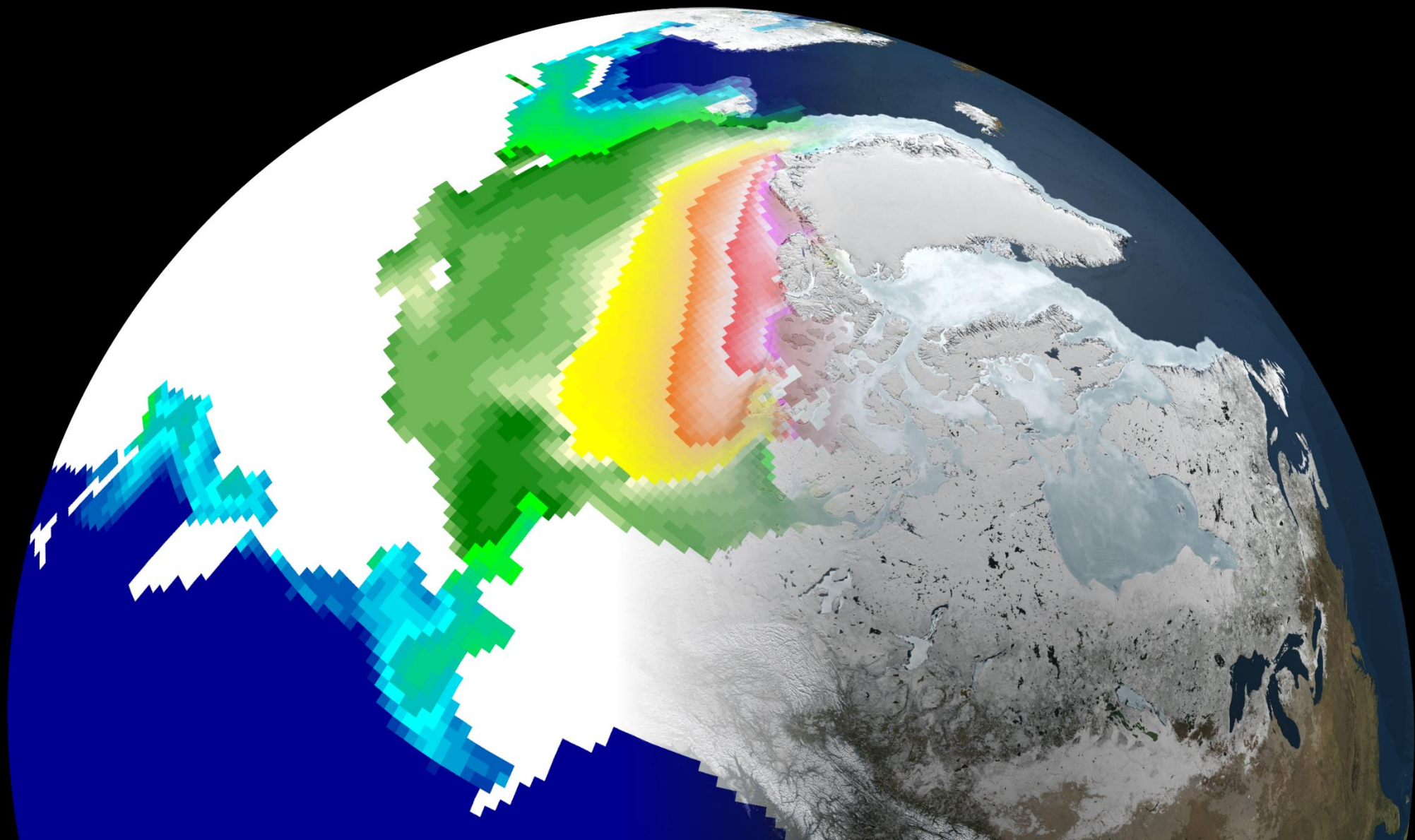
ALLAN H. MURPHY

*College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Oregon State University, Corvallis, Oregon*

(Manuscript received 11 August 1992, in final form 20 January 1993)

Une « bonne » ~~prévision est~~ **simulation climatique de la banquise**

- cohérente  
par rapport à l'*a priori* du ~~prévisionniste~~ **modélisateur**
- de qualité  
par rapport aux observations
- utile  
pour les bénéficiaires



Merci pour votre attention!

