

---

# Des modèles de climat pour la recherche et pour la société

Masa Kageyama – LSCE/IPSL

Séminaire au Collège de France, le 5 décembre 2024



# Plan

---

- Introduction
- Des modèles pour comprendre et anticiper le changement climatique et ses impacts
- Changement de paysage en cours: supercalculateurs, IA et demandes de la société
- Résumé et perspectives



# Introduction



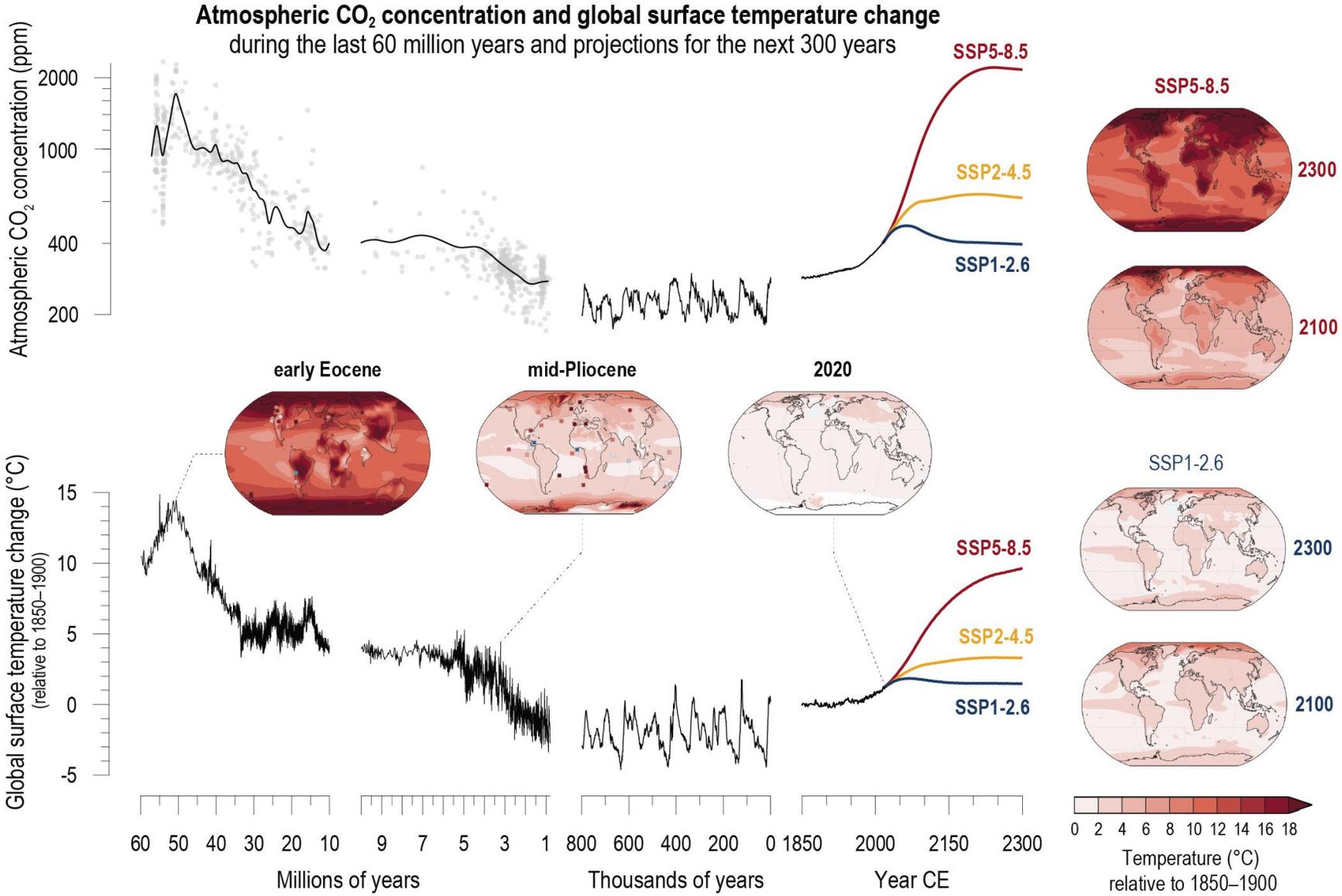
LABORATOIRE DES SCIENCES DU CLIMAT & DE L'ENVIRONNEMENT



# Changement climatique naturel et anthropique

CO<sub>2</sub>

Moyenne globale de température de l'air à la surface de la Terre (différence par rapport à la moyenne 1850-1900)



# Changement climatique naturel et anthropique

CO<sub>2</sub>

## Questionnement scientifique

- Sait-on comprendre ces changements ?
- Sait-on les représenter à l'aide d'outils numériques ?
- Sait-on les représenter à l'aide des outils numériques utilisés pour calculer le climat futur en fonction de scénarios socio-économiques ?

Moyenne globale de température de l'air à la surface de la Terre (différence par rapport à la moyenne 1850-1900)

Globe

-5

60 50 40 30 20 10 9 7 5 3 1 800 600 400 200 0 1850 2000 2150 2300

Millions of years      Thousands of years      Year CE

0 2 4 6 8 10 12 14 16 18

Temperature (°C) relative to 1850-1900

IPCC AR6, TS



# Fondements sur lesquels s'appuyer – lois de la physique

Pour l'atmosphère:

- loi des gaz parfaits
- Lois de conservation: énergie, quantité de mouvement, eau, éléments chimiques...
- attraction terrestre
- atmosphère stratifiée
- ~90% dans la troposphère (les 10-20 km les plus proches de la surface)



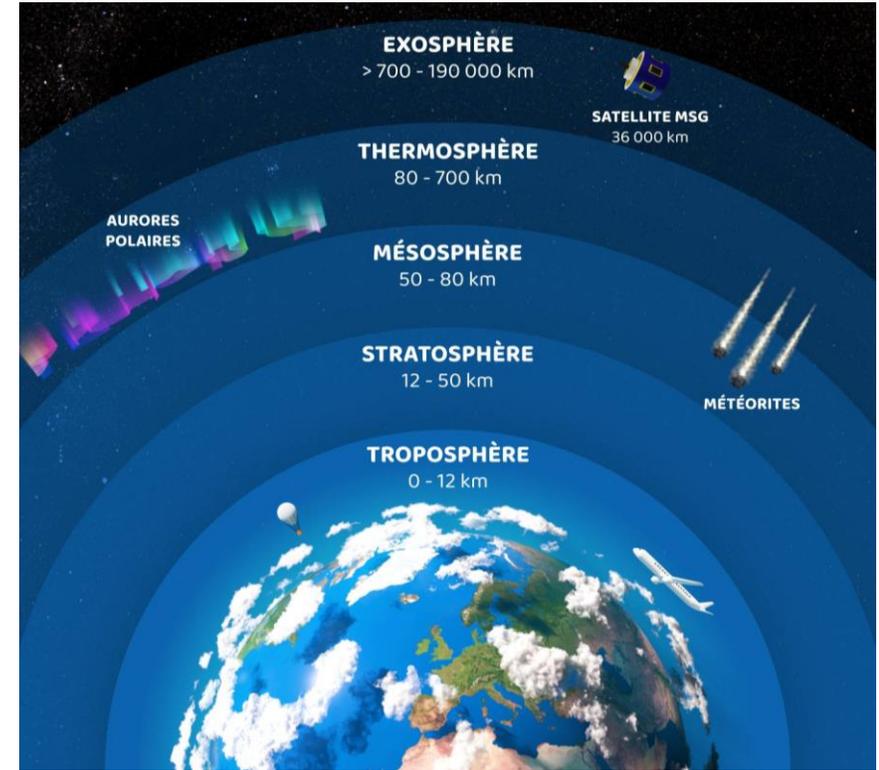
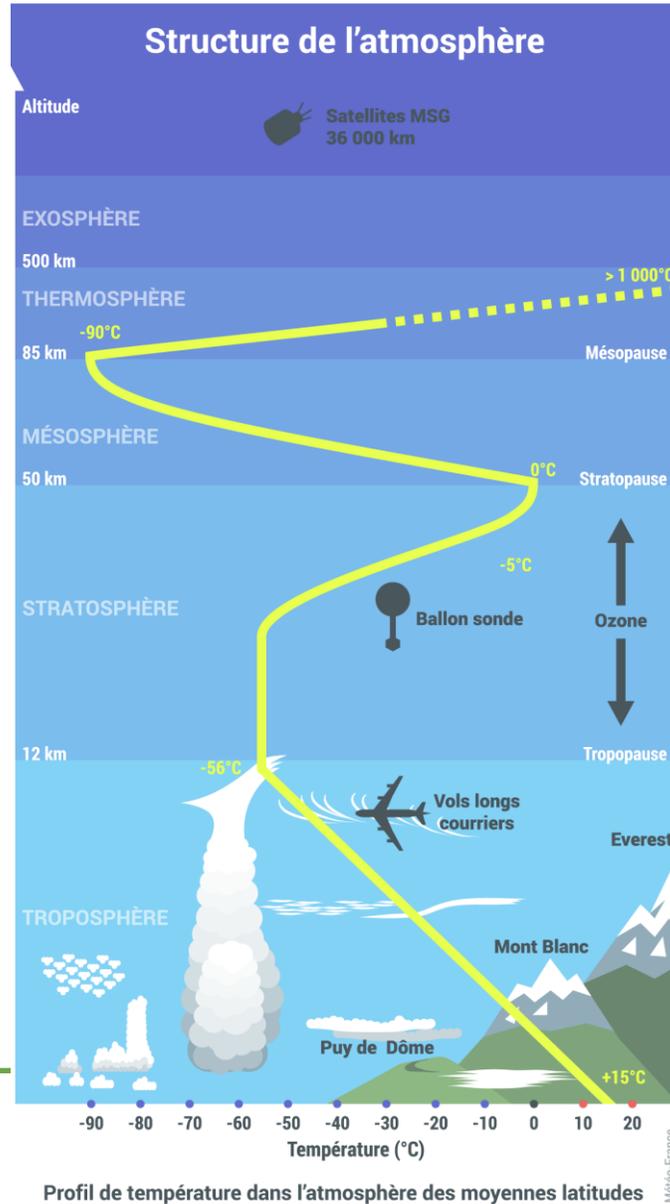
<https://scied.ucar.edu/image/earths-atmosphere-iss>



# Fondements sur lesquels s'appuyer – lois de la physique

Pour l'atmosphère:

- loi des gaz parfaits
- Lois de conservation: énergie, quantité de mouvement, eau, éléments chimiques...
- attraction terrestre
- atmosphère stratifiée
- ~90% dans la troposphère (les 10-20 km les plus proches de la surface)



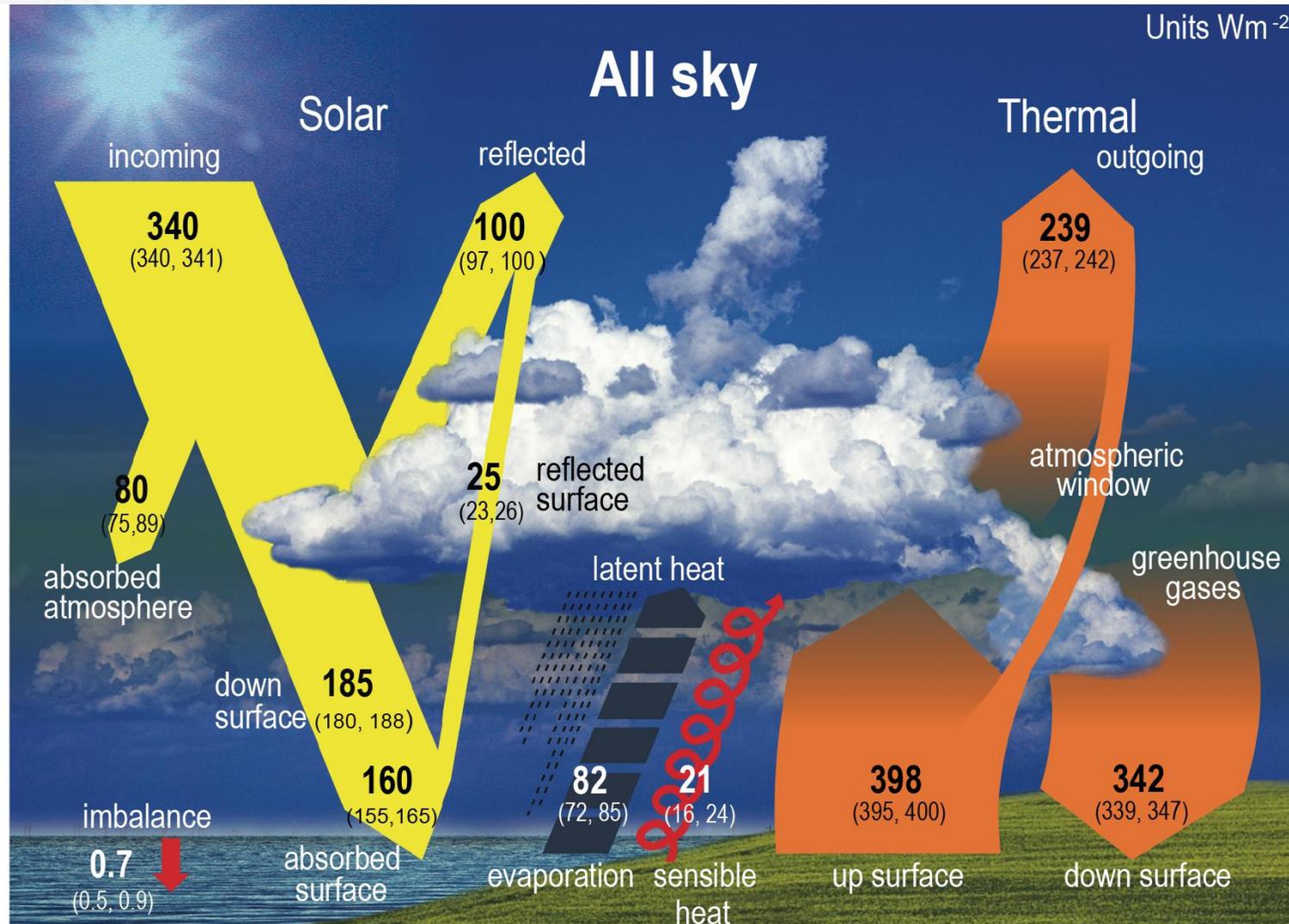
6400 km → 10-20 km

L'atmosphère est une couche mince par rapport au rayon de la Terre

<https://scied.ucar.edu/image/earths-atmosphere-iss>

# Fondements sur lesquels s'appuyer – le rayonnement

Solaire

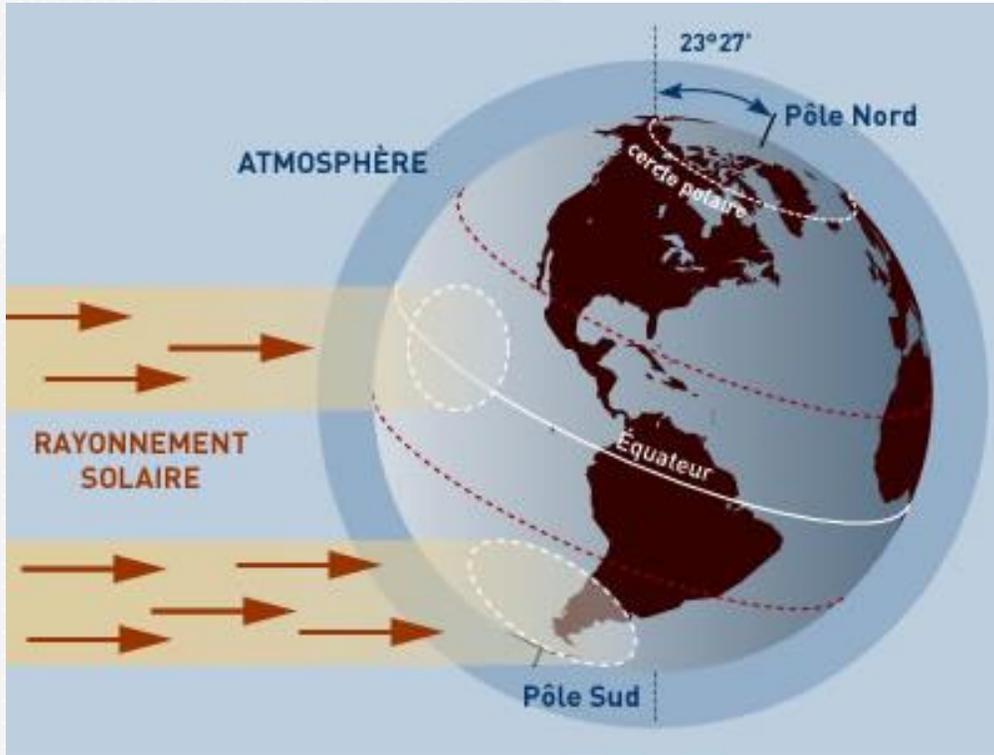


Infrarouge  
Effet de serre

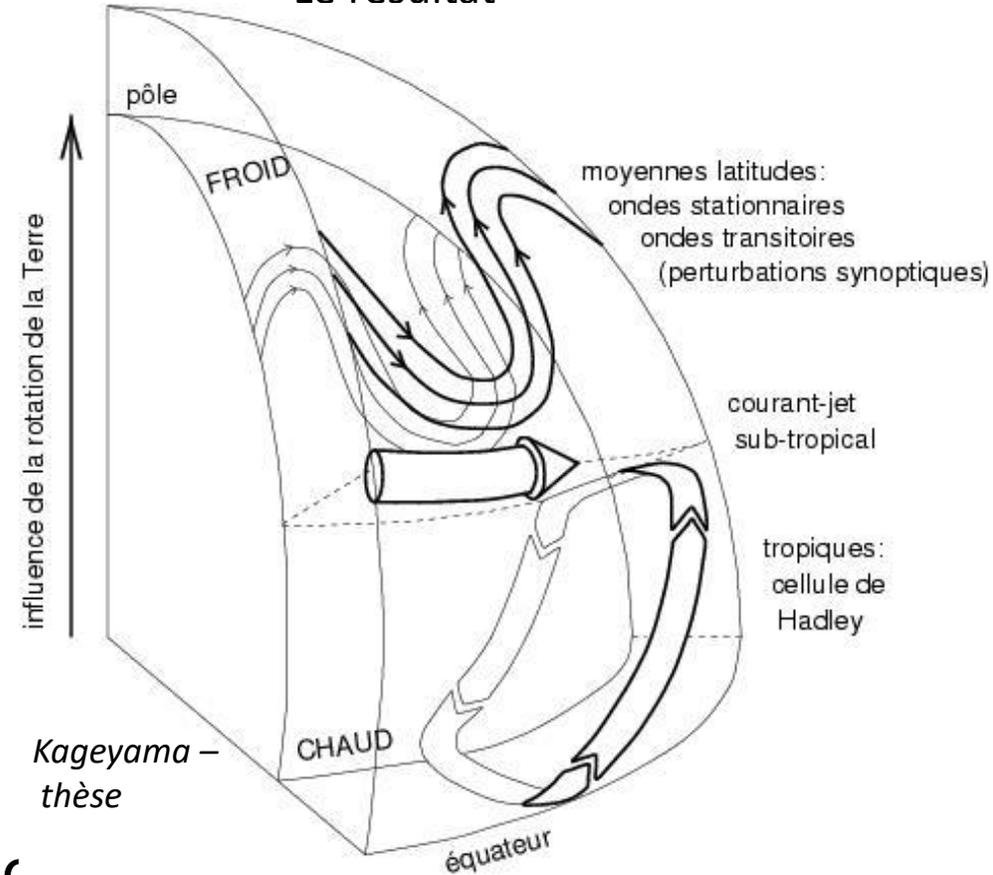
IPCC AR6, Fig 7.2

# Fondements sur lesquels s'appuyer – la dynamique des fluides

Le moteur



Le résultat



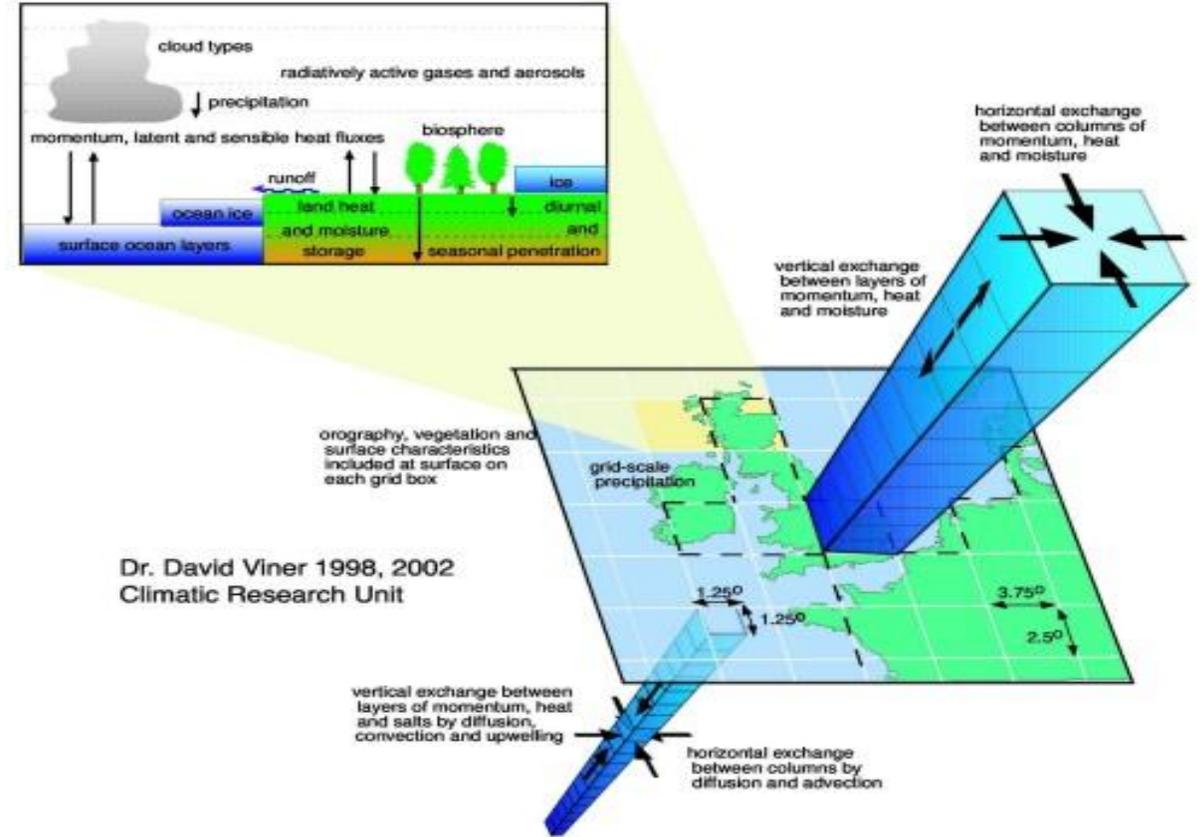
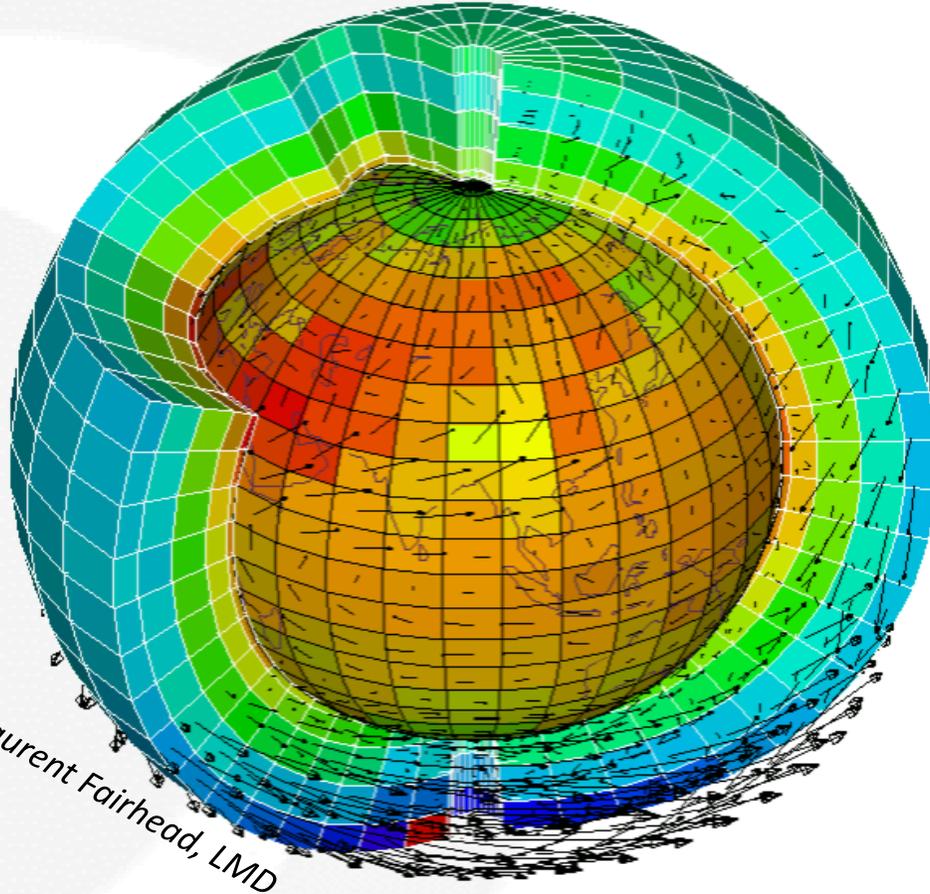
Importance des gradients de pressio...

➔ Pour calculer le vent en un point on doit connaître l'état des points voisins

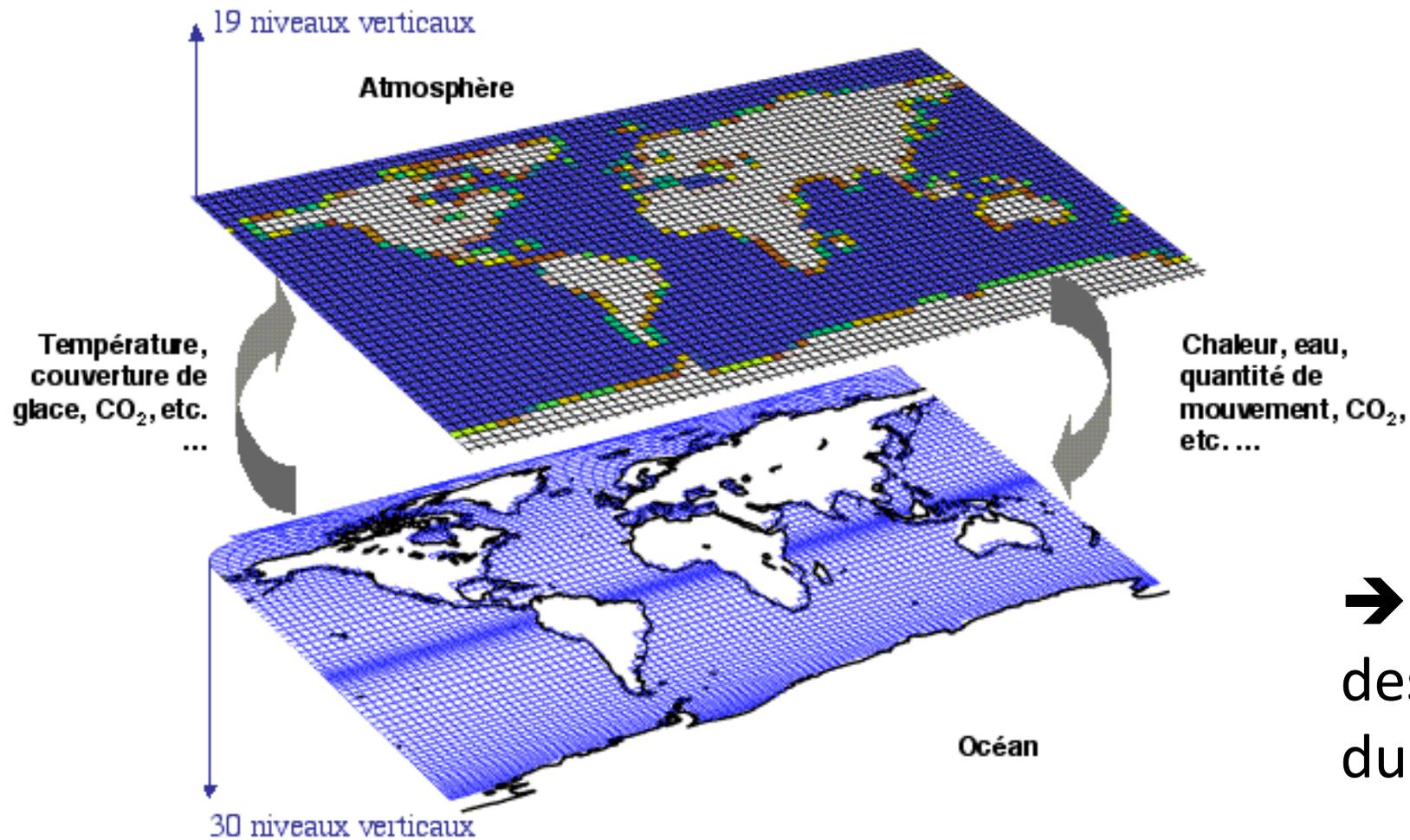
# Développement de modèles de circulation générale atmosphérique

Circulation atmosphérique

Rayonnement, convection, ...  
Calcul colonne par colonne



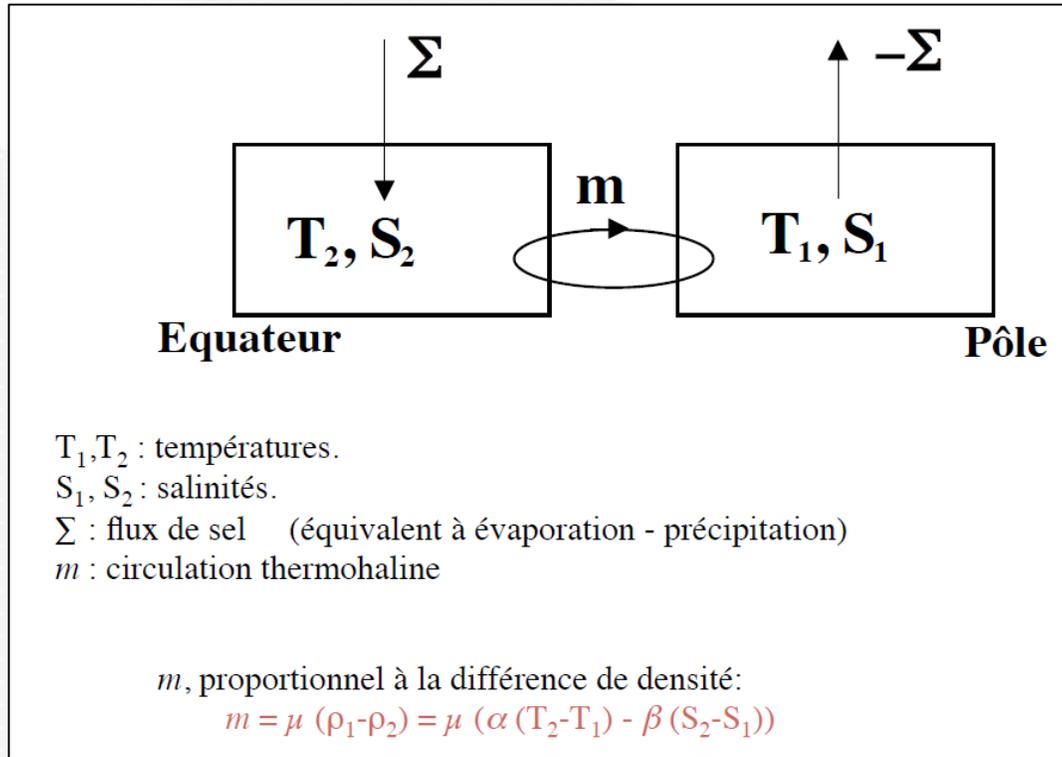
# Couplage avec les autres composantes du système climatique



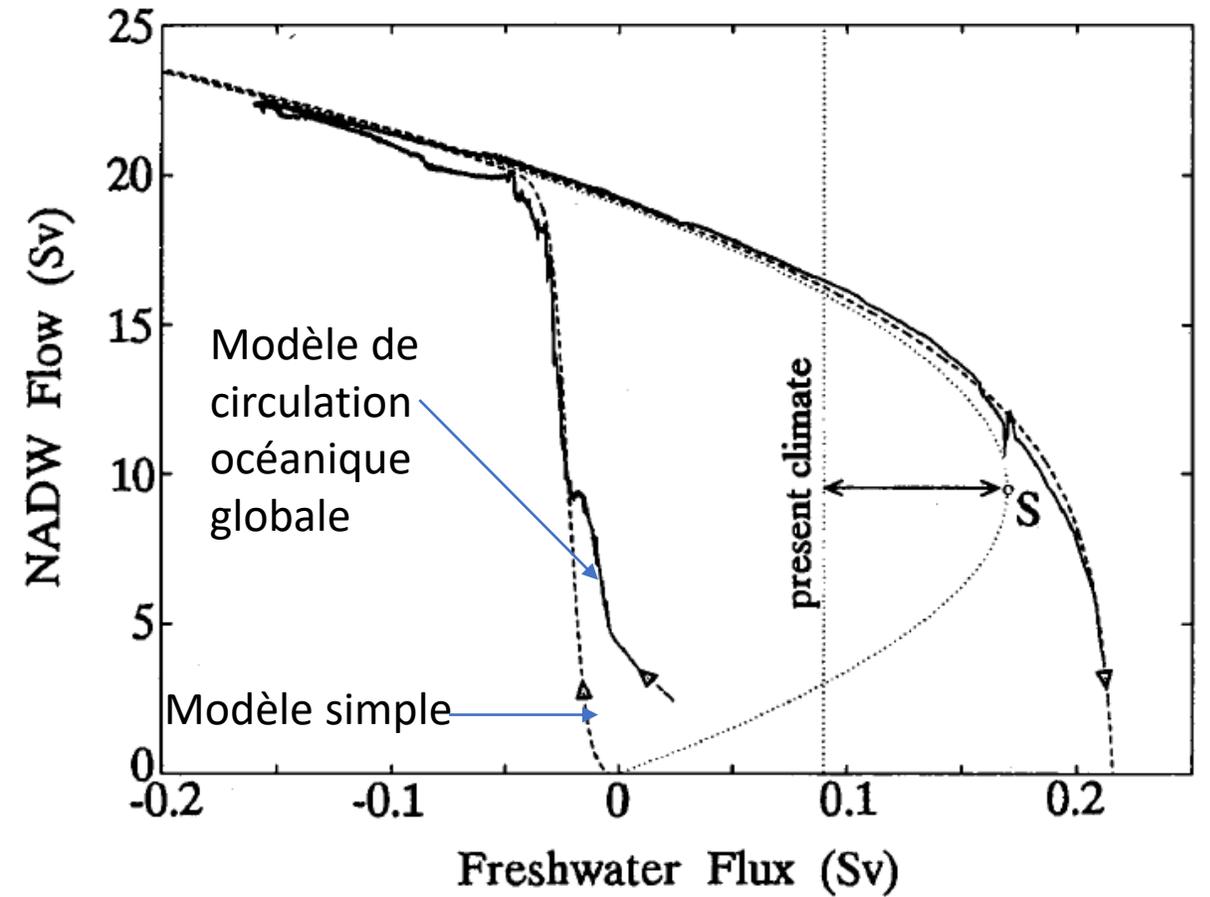
→ représentation des rétroactions au sein du système climatique

# Des modèles conceptuels: exemple pour la circulation océanique

## Stommel 1961



© D. Paillard

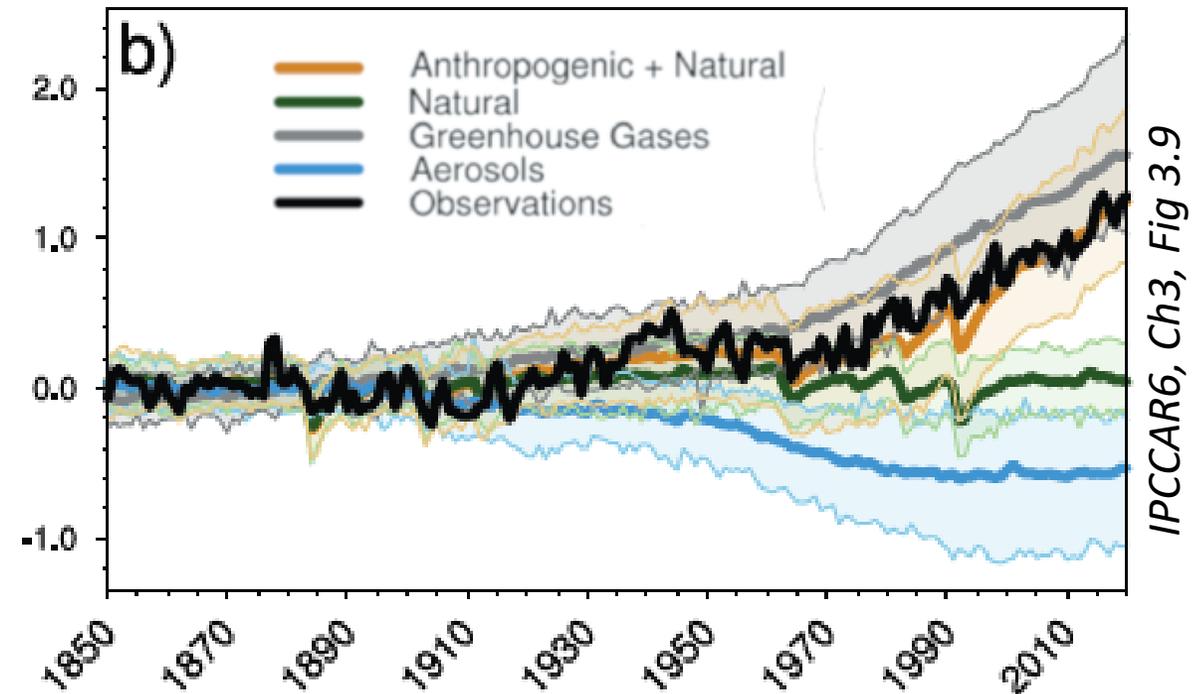


Rahmstorf 1996

# Un exemple d'application : attribution du changement climatique récent

- Modèles capables de représenter l'évolution climatique sur la période historique et d'en analyser les causes
- Modèles convaincants, utilisation pour les projections futures

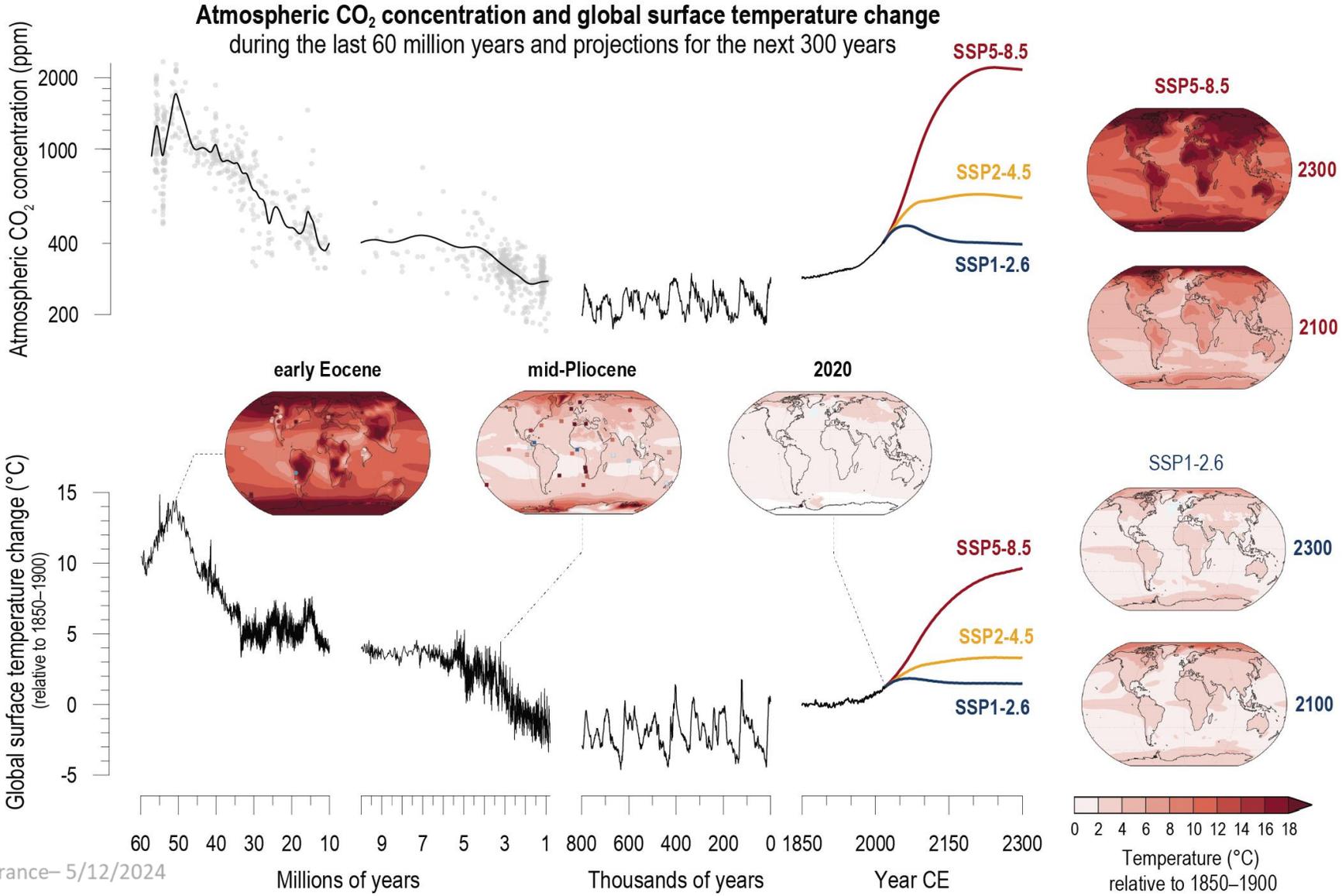
Anomalie de moyenne globale de la température de l'air près de la surface par rapport à la période 1850-1900



# Applications pour toutes les périodes de temps

CO<sub>2</sub>

Moyenne globale de température de l'air à la surface de la Terre (différence par rapport à la moyenne 1850-1900)



# Face au changement climatique, les questions de la société

## Parties-prenantes

Gouvernements, autorités locales, ONGs, Industries, ...

Demandes d'information climatique pour la prise de décision face au changement climatique et à ses impacts.  
Adaptation et atténuation



Santé



Oise 2019, DR

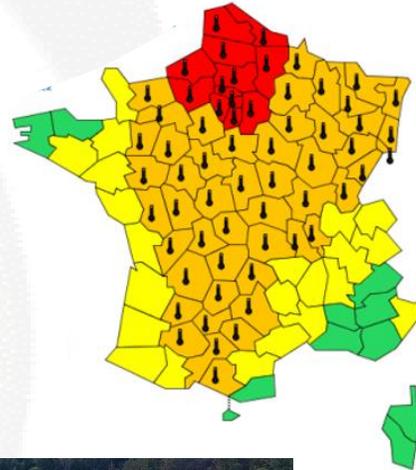


Aménagement du territoire

Puligny-Montrachet, 2021



Agriculture



Energie



Assurances

Alpes Maritimes, Alex, Octobre 2020, DR



Barrage d'Emonson, DR

## Diversité des demandes

- Échelle locale, régionale
- Échelle décennal, centenales...
- Différentes statistiques, scénarios du pire
- Sectorielles, territoriales
- Pas seulement des données, mais surtout de l'expertise et de informations adaptées

# Des demandes sociétales fortes et de diverses natures

- Exemple récent

**CE PLAN REPOSE SUR 5 AXES**

Si l'effort d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre est mondial, l'effort d'adaptation au changement climatique est national et local. Il suppose la mobilisation de tous, entreprises, collectivités, société civile, etc. Face aux impacts du dérèglement climatique déjà visibles sur notre territoire, le Plan national d'adaptation au changement climatique comprend 51 mesures pour apporter des solutions concrètes aux Français, aux collectivités, au monde économique et au monde du vivant.

- 1 Protéger la population
- 2 Assurer la résilience des territoires, des infrastructures et des services essentiels
- 3 Adapter les activités humaines
- 4 Protéger notre patrimoine naturel et culturel
- 5 Mobiliser les forces vives de la nation

**4** groupes de travail mis en place territoires, biodiversité, économie, normes techniques

**2** mois de consultation publique

**51** mesures pour tous les secteurs d'activité

**+200** actions concrètes pour les court, moyen et long termes

[https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/20241025\\_DP\\_PNACC3.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/20241025_DP_PNACC3.pdf)

# Face au changement climatique, les questions de la société

## Parties-prenantes

Gouvernements, autorités locales, ONGs, Industries, ...

Demandes d'information climatique pour la prise de décision face au changement climatique et à ses impacts.  
Adaptation et atténuation



Santé



Oise 2019, DR

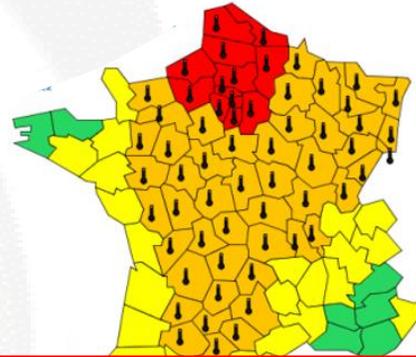


Aménagement du territoire

Puligny-Montrachet, 2021



Agriculture



## Diversité des demandes

- Échelle locale, régionale
- Échelle décennal, centenales...
- Différentes statistiques, scénarios du pire
- Sectorielles, territoriales
- Pas seulement des données, mais surtout de l'expertise et de informations adaptées

## Quels modèles pour répondre à ces demandes ?

Assurances



Barrage d'Emonson, DR

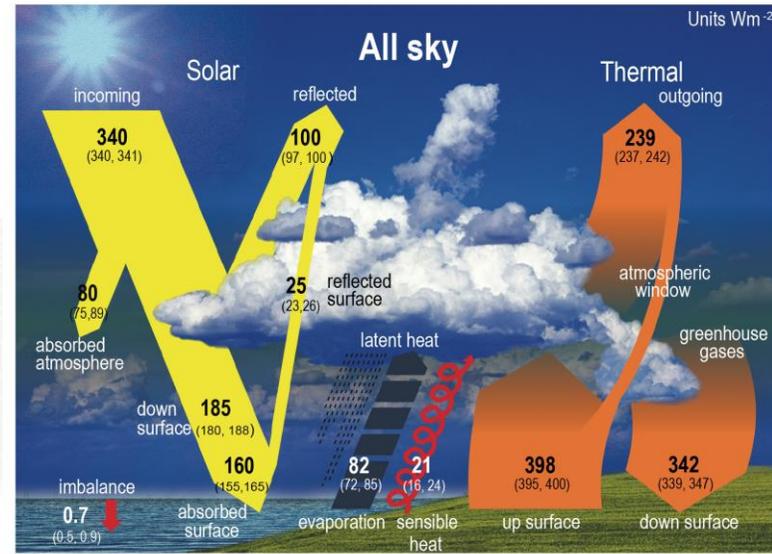
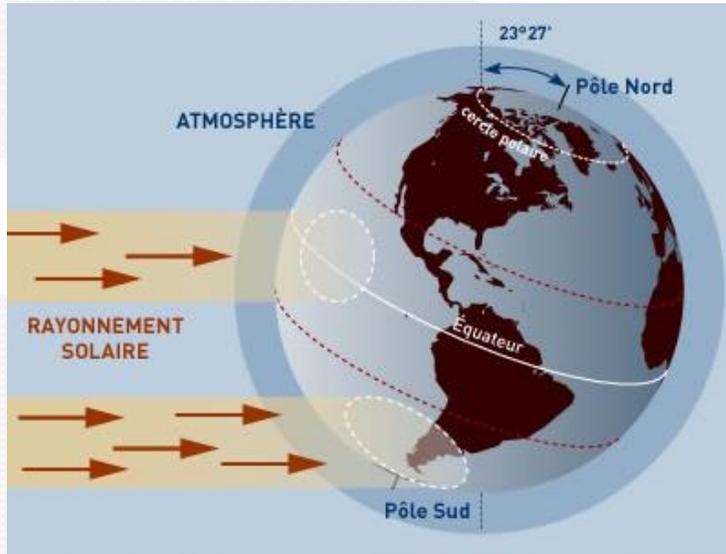


---

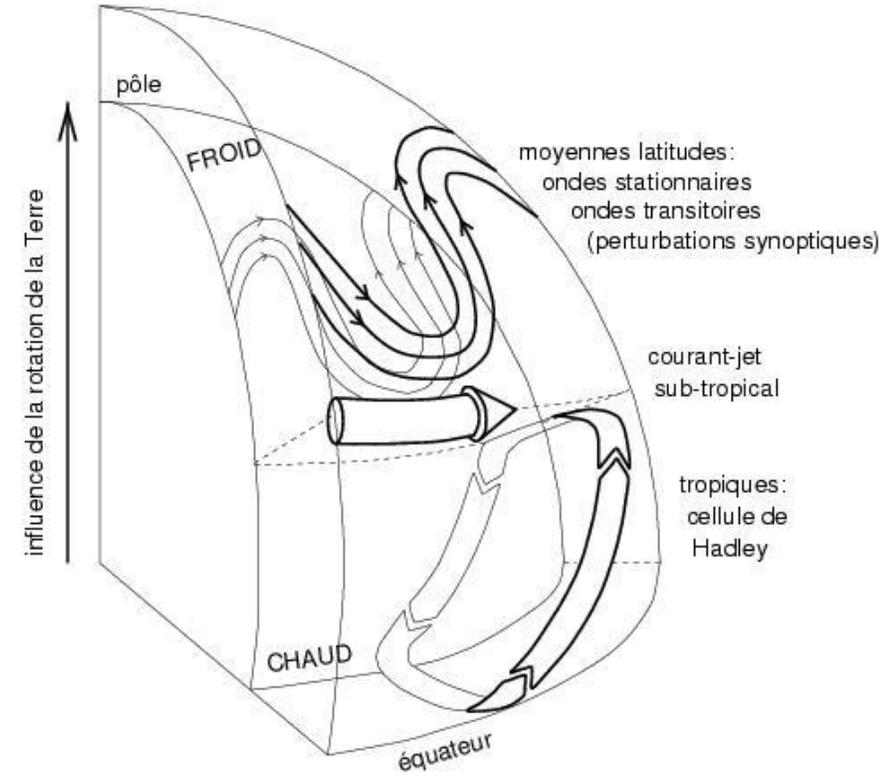
# Des modèles pour comprendre et anticiper le changement climatique et ses impacts



# Des bases physiques pour comprendre le changement climatique



IPCCAR6, Fig 7.2



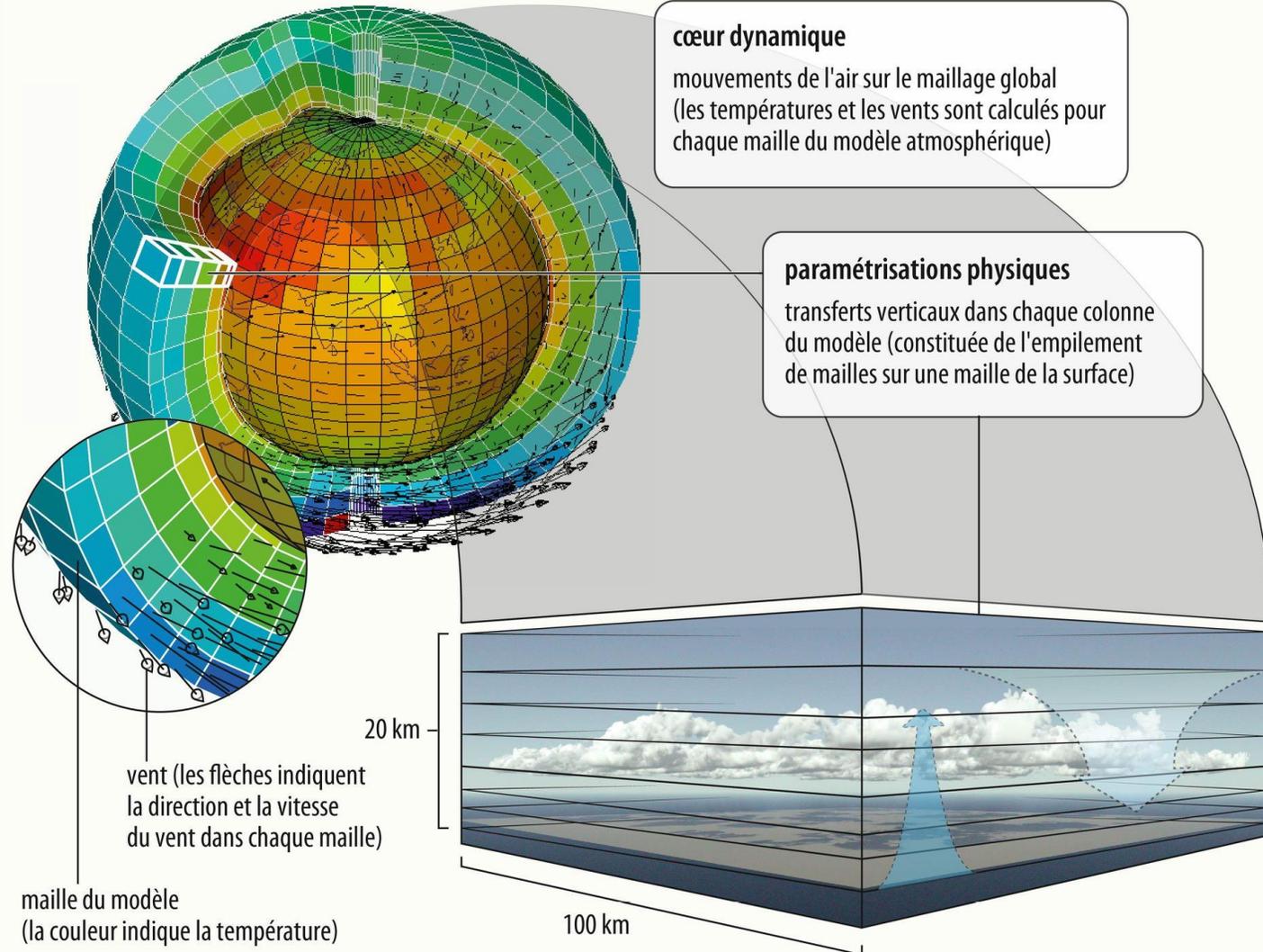
## Lois de la physique:

- rayonnement (Stefan-Boltzmann)
- mécanique des fluides (Navier-Stokes)
- loi des gaz parfaits, expression de la densité de l'eau en fonction de sa température et de sa salinité
- conservation de la masse (pour l'air, pour l'eau, pour les traceurs conservatifs)

+ connaissance des cycles biogéochimiques



# Représentation explicite et paramétrisations

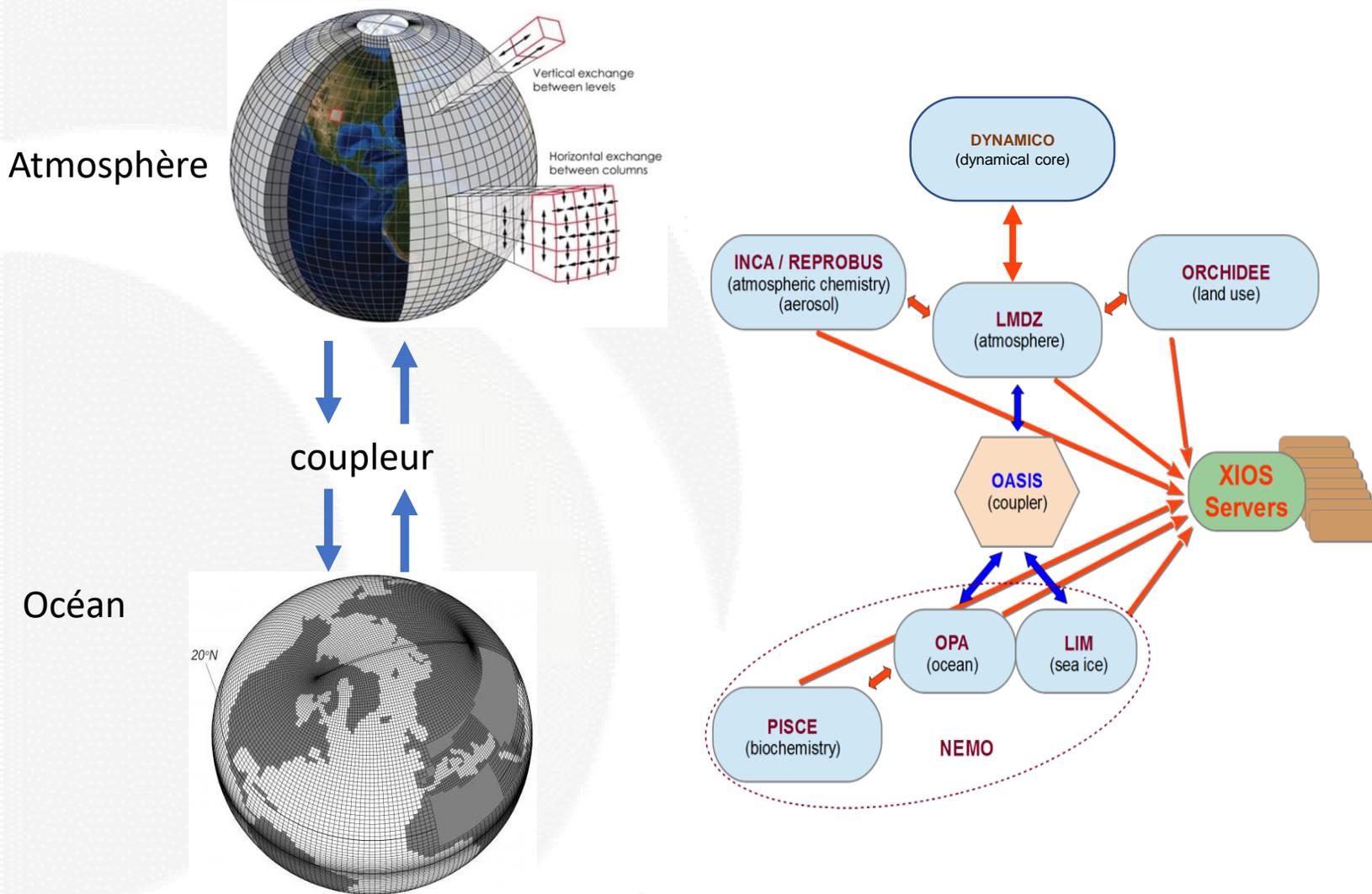


Des choix doivent être faits:

- Quels phénomènes représenter explicitement, quels phénomènes doivent être paramétrés
- Résolution spatiale, temporelle

Les paramétrisations peuvent elles-mêmes être basées sur des modèles à très fine échelle

# A quoi ressemblent les modèles de climat actuels ?



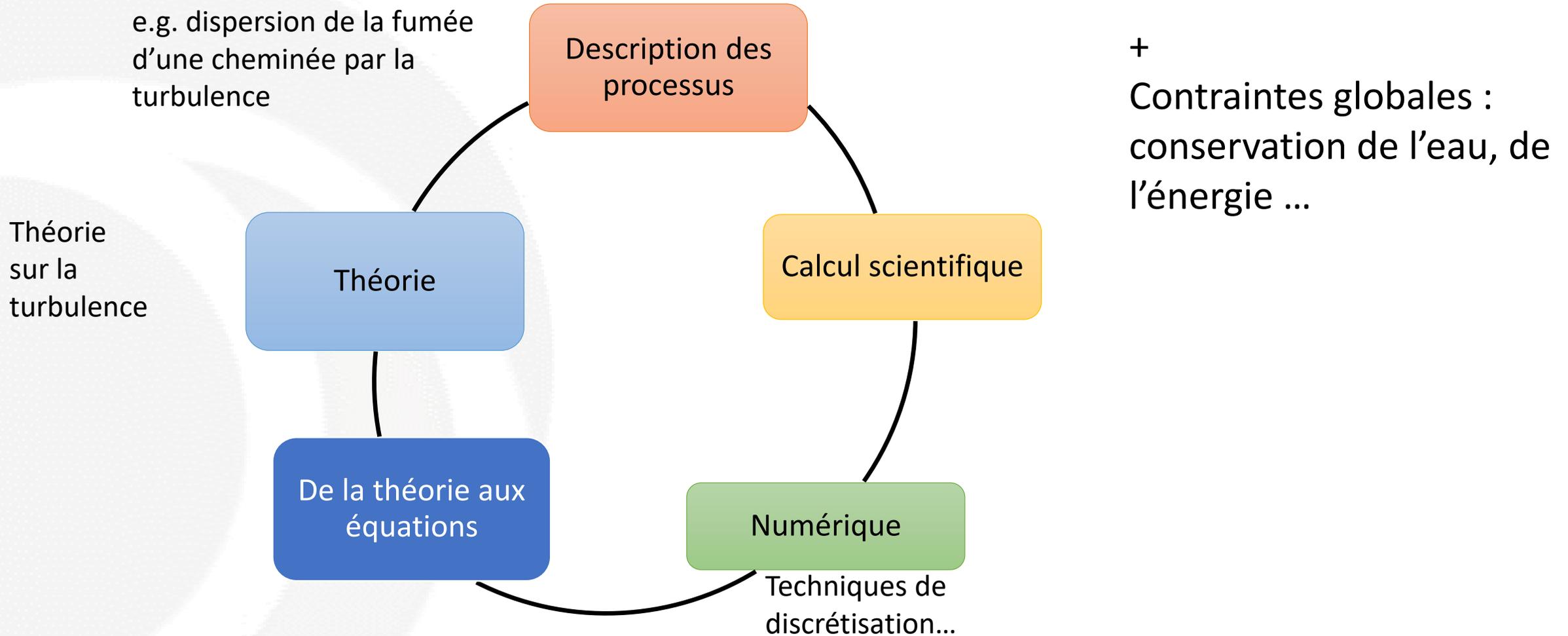
Chaque code + serveur entrées/sorties = plusieurs centaines de milliers de lignes

=> Calcul haute performance, sur supercalculateurs (pour le modèle de l'IPSL, ressources partagées avec d'autres communautés)

Aujourd'hui, supercalculateurs assemblant des (dizaines de milliers de CPU)

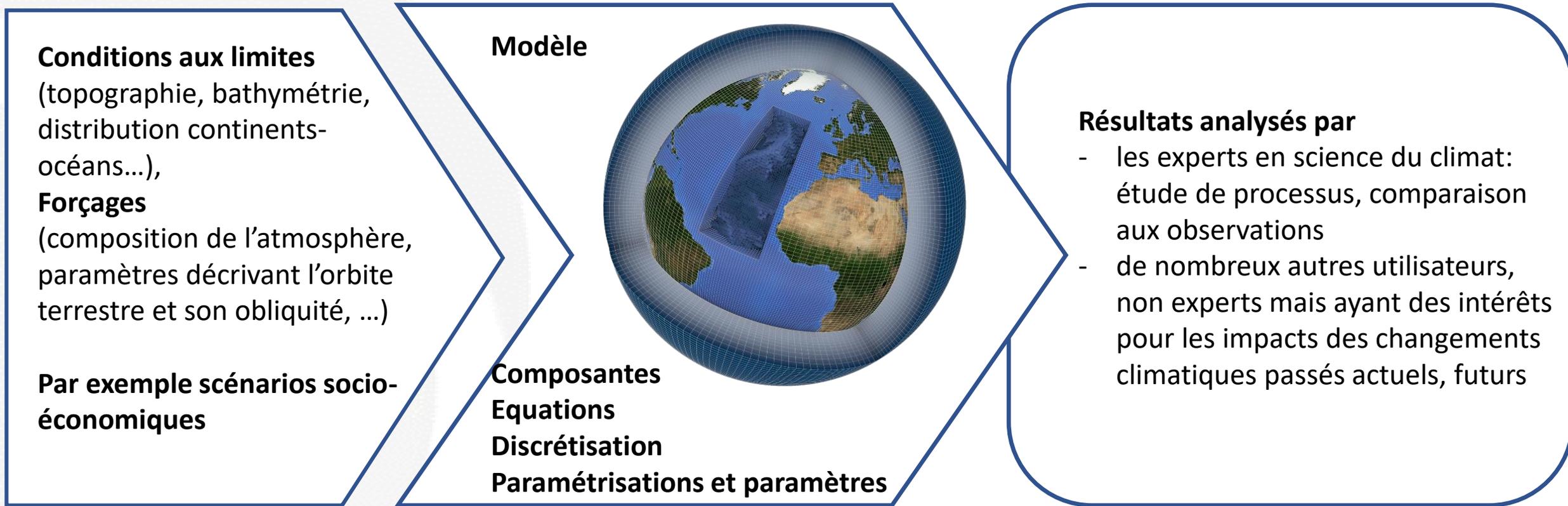


# Les différents métiers de la modélisation du climat



After Hourdin et Guillemot, Encyclopedia Universalis, 2021

# Développement et utilisation d'un modèle de climat



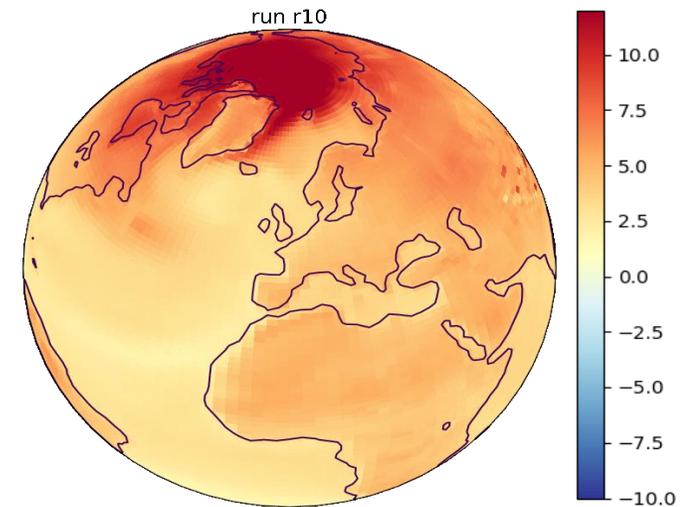
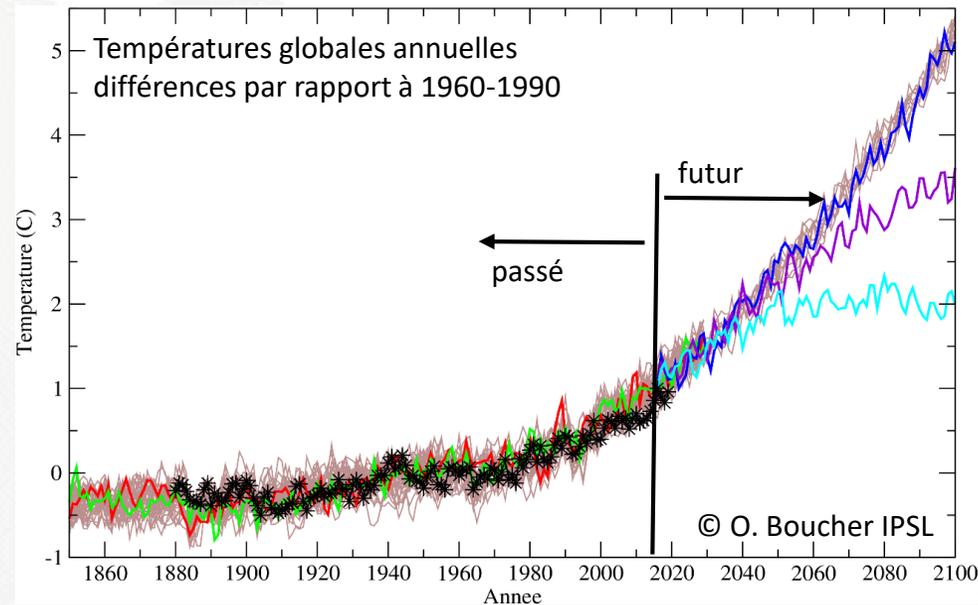
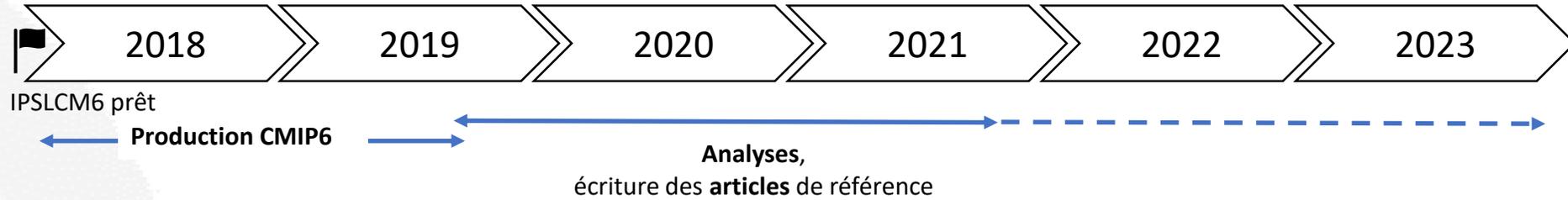
# A titre d'exemple, exercice CMIP6 (en vue du dernier rapport du GIEC)

## Expériences

### internationales CMIP6

### Modèle de l'IPSL

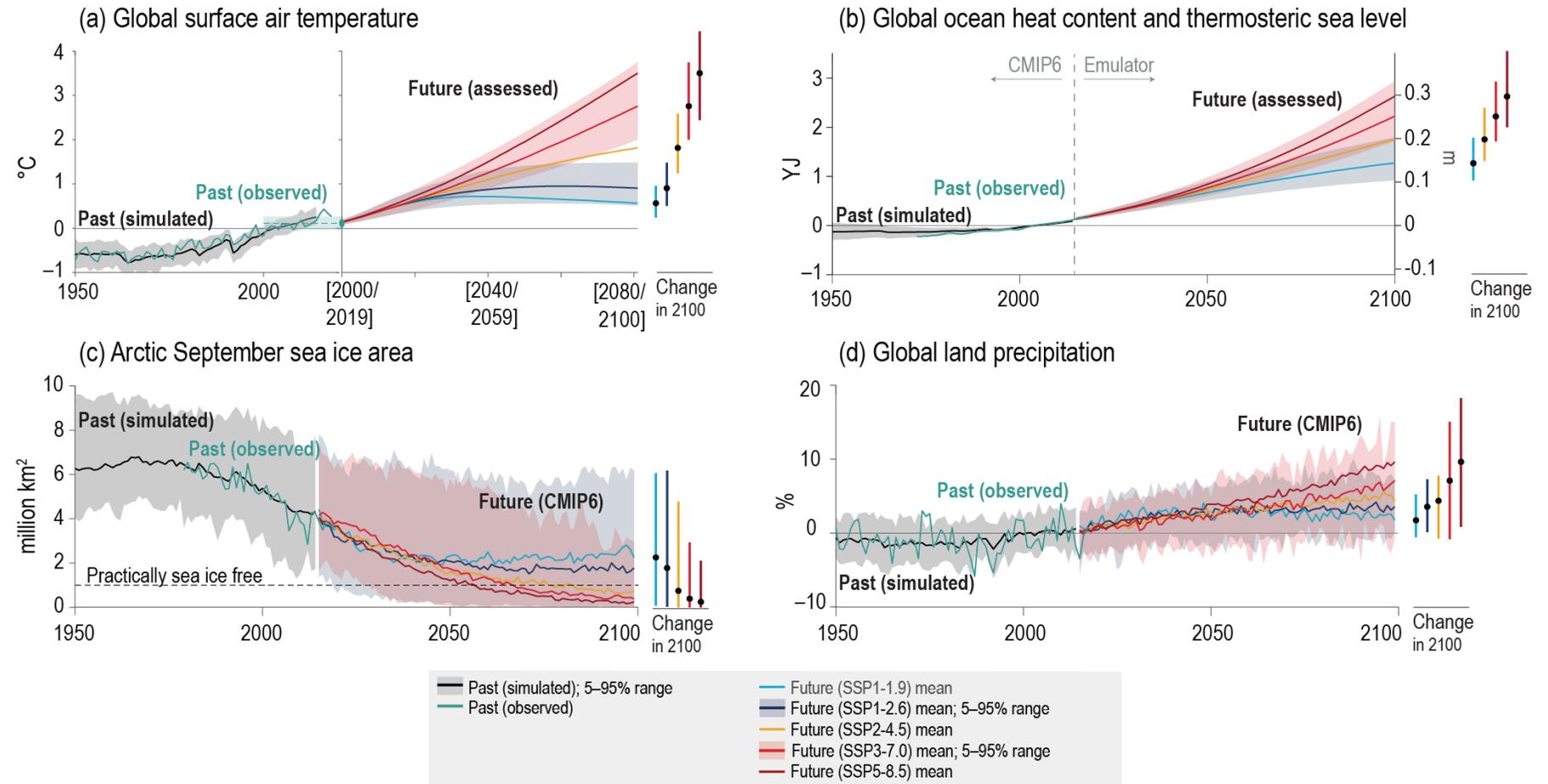
300 millions d'heures de calcul  
14 Po de stockage dédié  
Base de données ESGF/tous modèles : 20 000 utilisateurs



# Synthèse des résultats de tous les modèles dans le rapport du GIEC

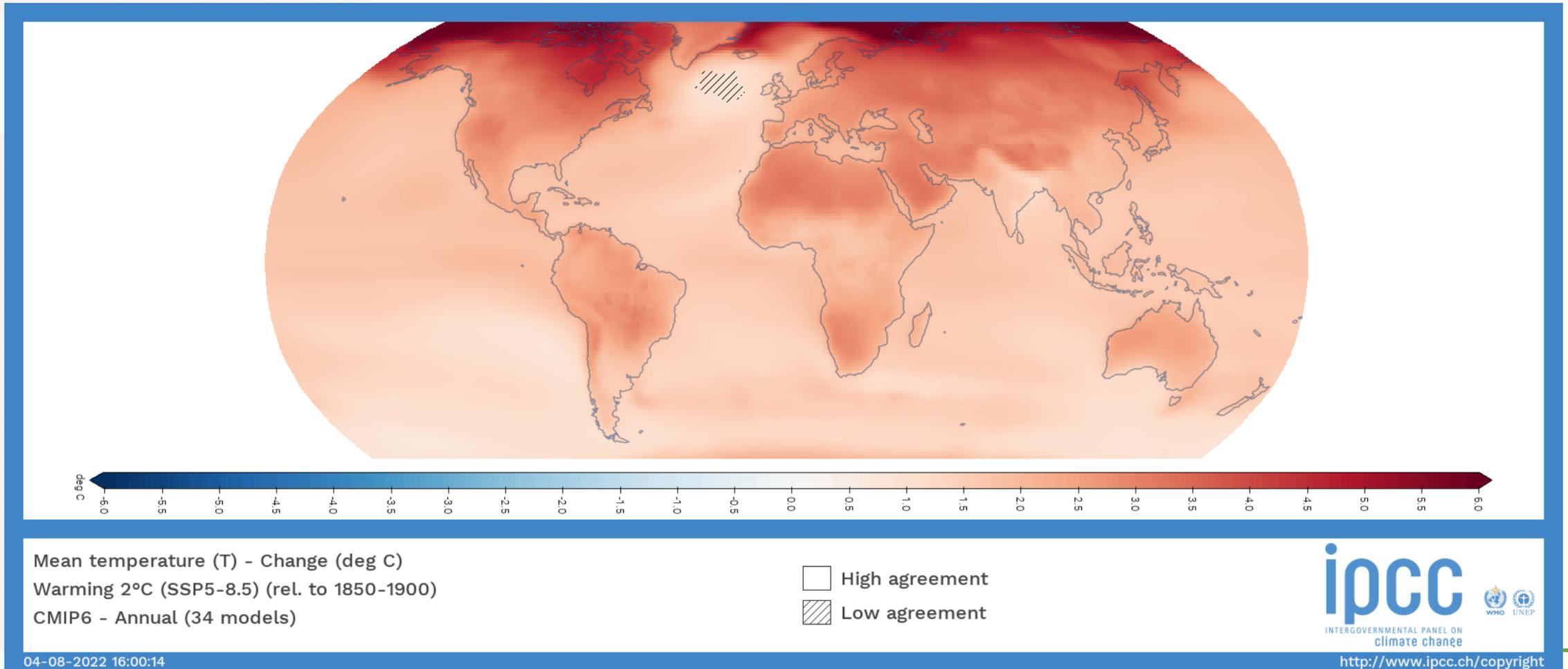
## Recent and future change of four key indicators of the climate system

Atmospheric temperature, ocean heat content, Arctic summer sea ice, and land precipitation



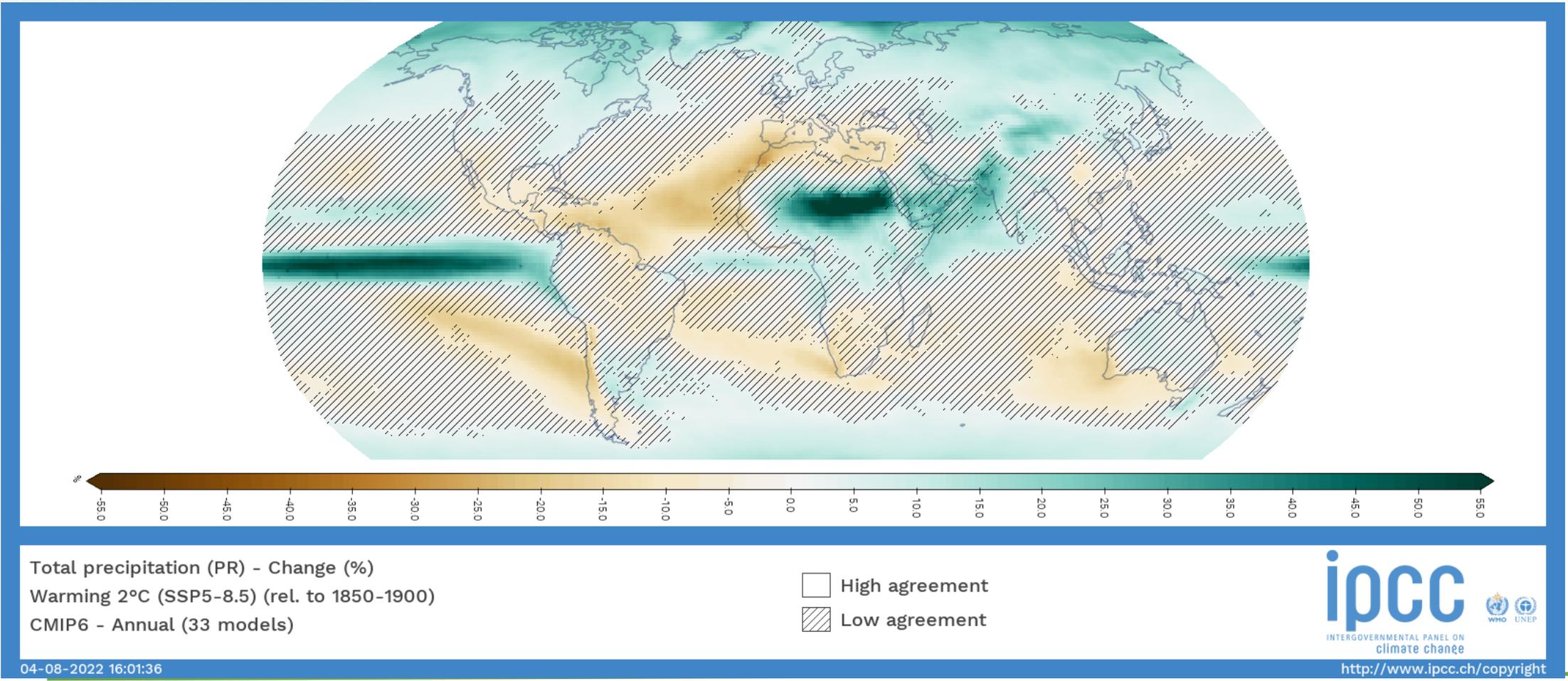
# Atlas du 6<sup>e</sup> rapport du GIEC

➔ <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>



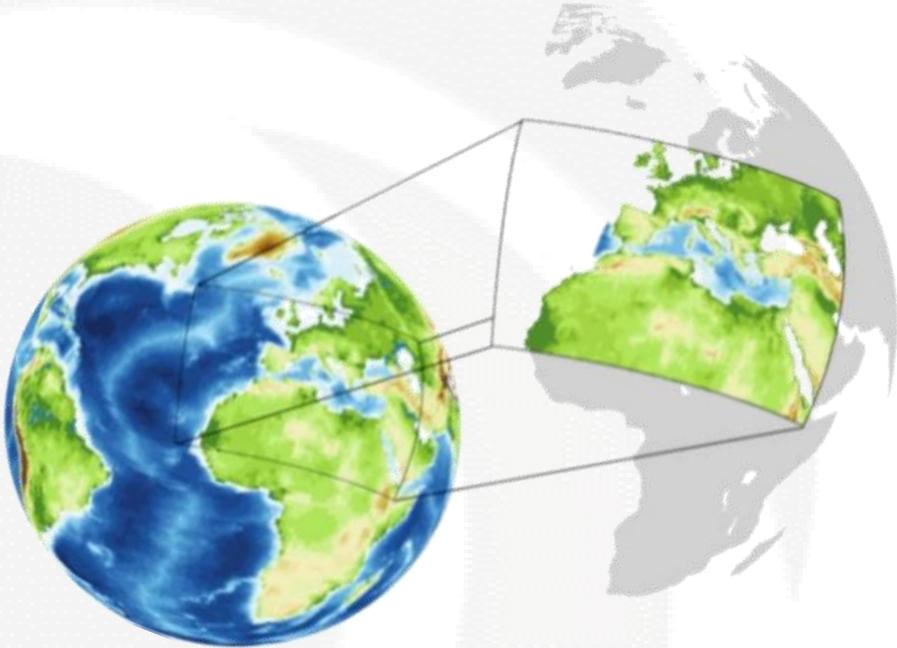
# Atlas du 6<sup>e</sup> rapport du GIEC

➔ <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>



# Régionalisation – modèles dynamiques

---

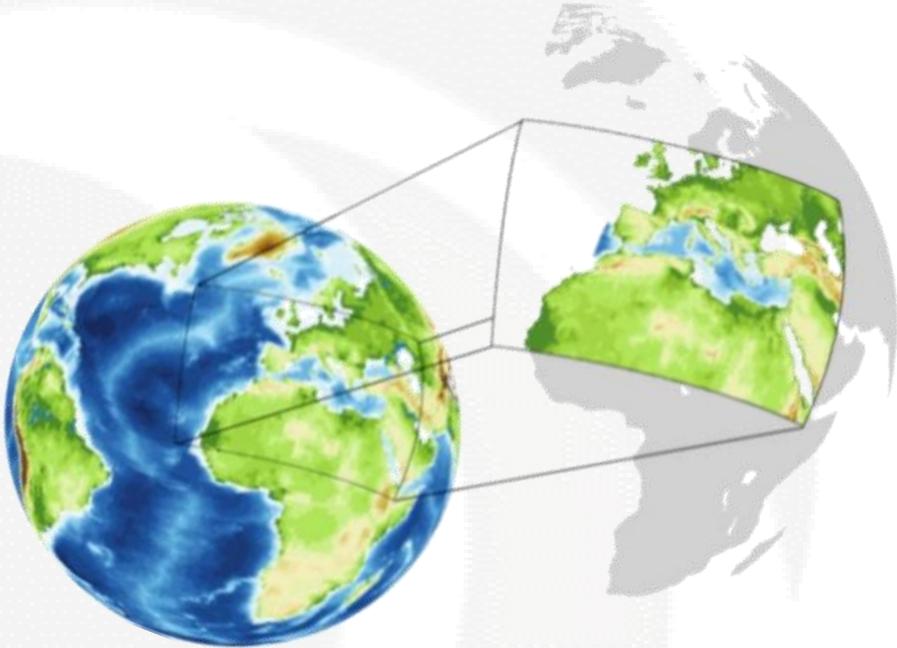


© CNRM

- Modèle régional imbriqué
  - Possibilité d'introduction de processus spécifiques aux échelles plus fines modélisées
  - Forcé aux bords par les résultats d'un modèle grande échelle (possibilité de corriger les « biais » des modèles grande échelle à ce niveau-là)
- ➔ Exercice CORDEX, décliné sur différentes régions

# Régionalisation – modèles dynamiques

---



© CNRM

- Apprentissage des liens grande échelle – fine échelle par méthodes statistiques
- Application des méthodes de machine learning/intelligence artificielle
- Méthodes de descente d'échelle pouvant être associées à des méthodes de correction de biais

# Les modèles de climat et leur environnement

## Modèles basés sur la physique

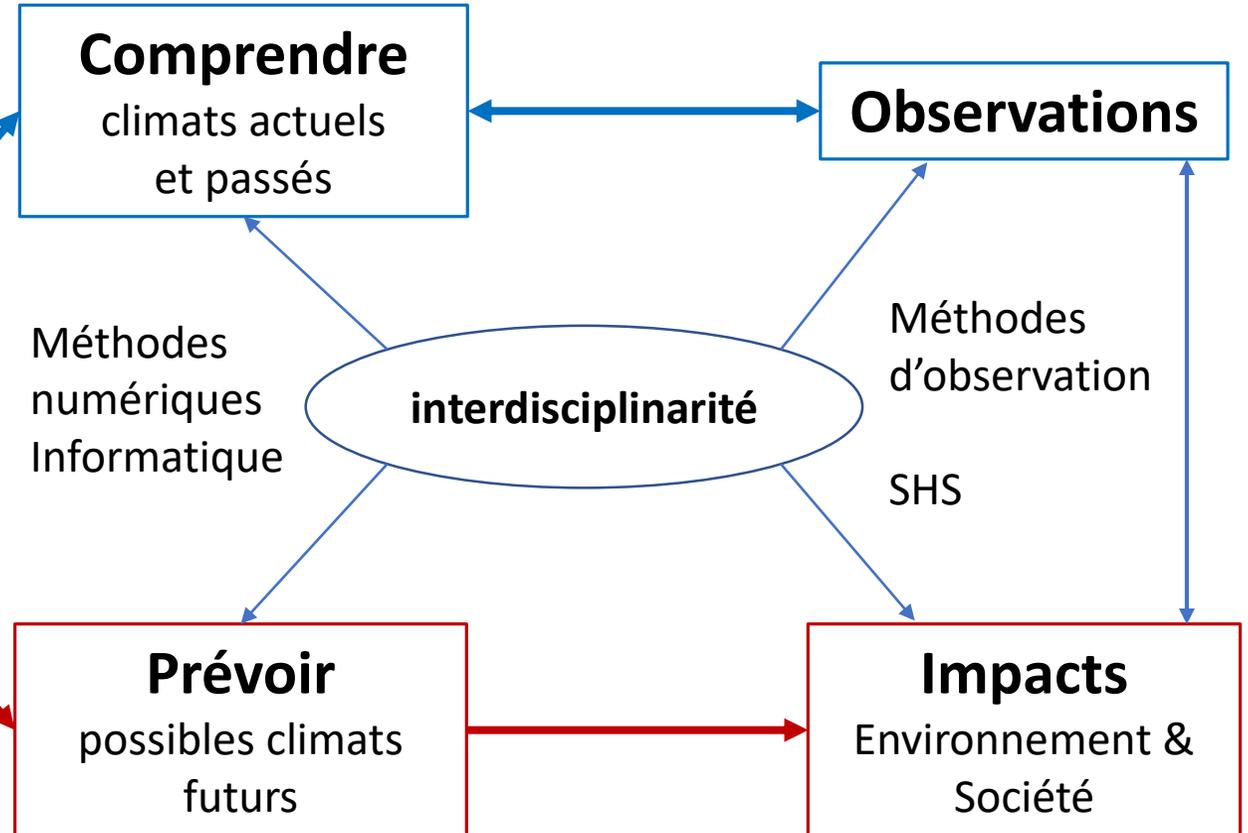
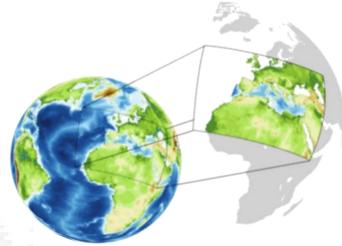
rayonnement,  
mécanique des fluides,  
Lois de conservation

...



## + paramétrisations

Phénomènes sous-maille  
Phénomènes connus de manière  
empirique



---

# Changement de paysage en cours

Nouveaux supercalculateurs

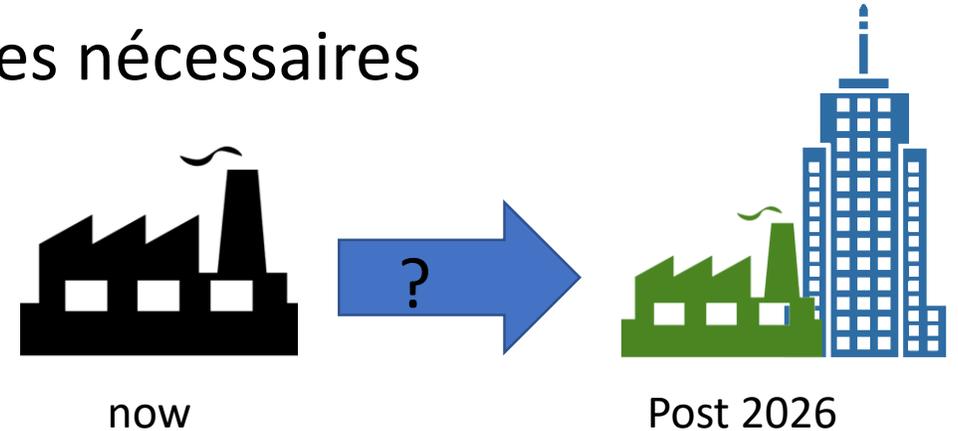
Les opportunités liées aux méthodes d'intelligence artificielle

Les demandes sociétales



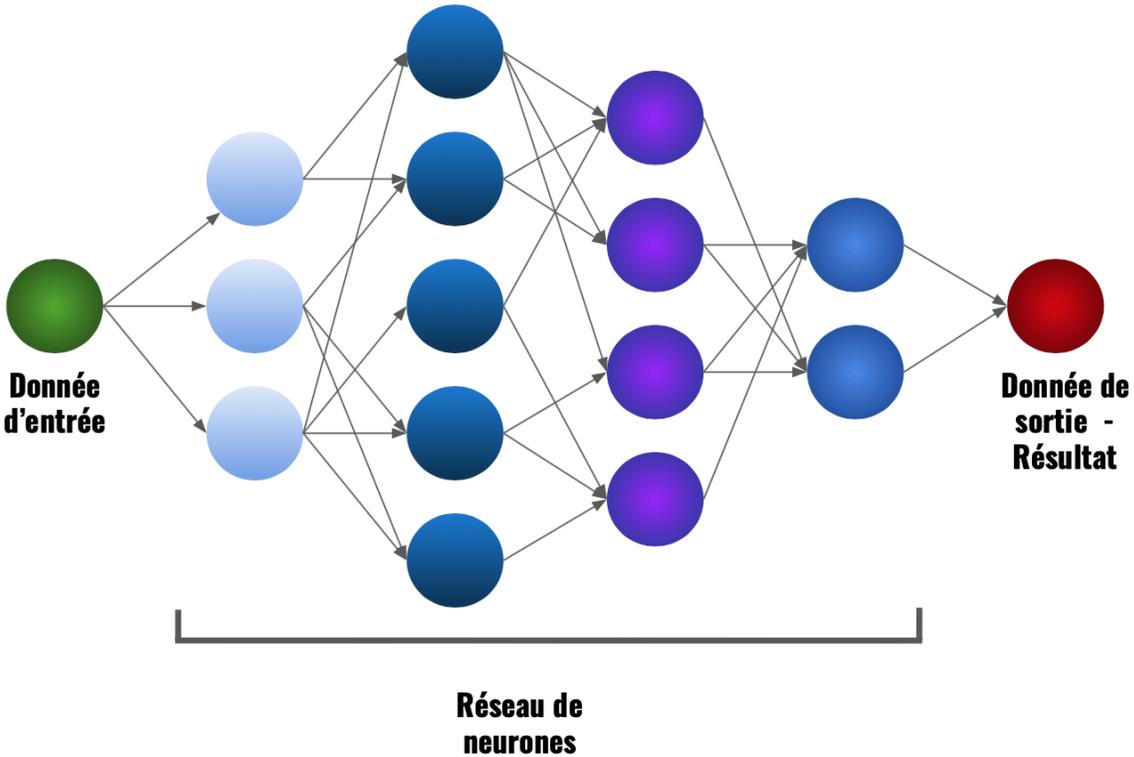
# Nouveaux supercalculateurs

- Actuellement, le modèle de climat tourne sur des supercalculateurs utilisant des CPUs (Central Processing Units)
  - La prochaine génération de calculateurs inclura aussi des GPUs (Graphics Processing Units), en plus des CPU. Augmentation de la puissance des supercalculateurs principalement grâce aux GPUs
  - GPU adapté au calcul massivement parallèle et aux algorithmes d'IA
- ➔ Adaptation de nos codes et de nos usages nécessaires



# Intelligence Artificielle/Apprentissage Machine en très très bref

Connaissances  
préalables  
Observations  
Résultats de modèles  
de climat



Variables d'intérêt



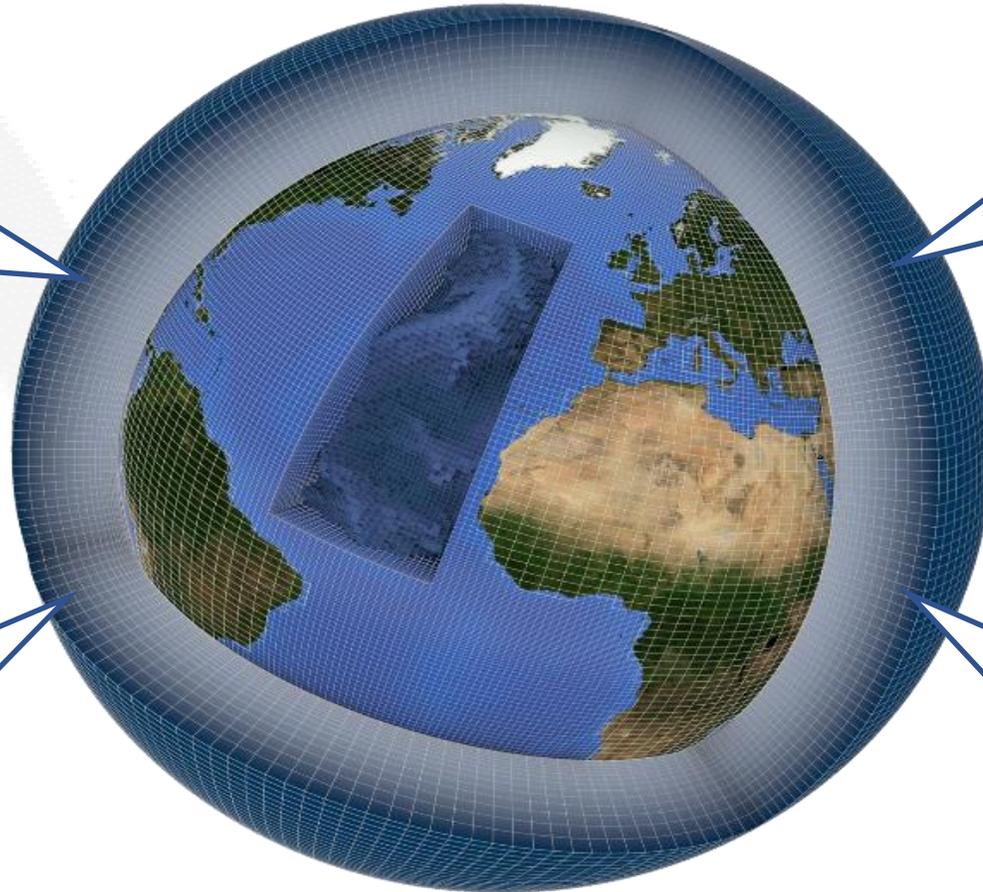
# Des opportunités d'intégrer davantage d'IA dans nos modèles

Pour représenter un processus couteux en temps de calcul

Pour équilibrer les modèles plus rapidement

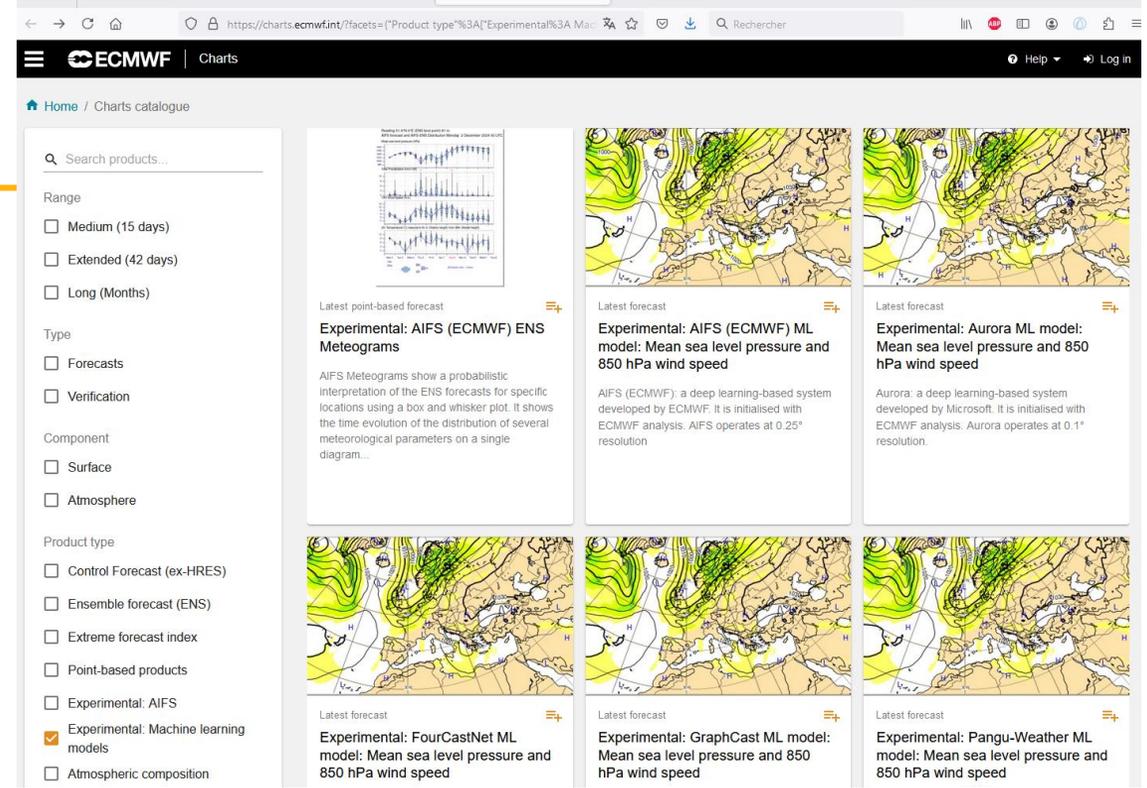
Pour atteindre la fine échelle par descente d'échelle statistique

Pour calculer de grands ensembles de simulations



# Où en sommes-nous ?

- Prévisions météorologiques (basées sur réanalyses du Centre Européen de Météorologie à Moyen Terme)
- Grande échelle => fine échelle. Emulation d'un modèle régional satisfaisante (sur qq variables)
- Travail en cours sur accélération des modèles



The screenshot shows the ECMWF Charts catalogue interface. On the left is a filter sidebar with sections: Range (Medium (15 days), Extended (42 days), Long (Months)), Type (Forecasts, Verification), Component (Surface, Atmosphere), and Product type (Control Forecast (ex-HRES), Ensemble forecast (ENS), Extreme forecast index, Point-based products, Experimental: AIFS, Experimental: Machine learning models, Atmospheric composition). The main content area displays a grid of product cards. The top-left card is 'Experimental: AIFS (ECMWF) ENS Meteograms'. The top-middle and top-right cards are 'Experimental: AIFS (ECMWF) ML model: Mean sea level pressure and 850 hPa wind speed' and 'Experimental: Aurora ML model: Mean sea level pressure and 850 hPa wind speed' respectively. The bottom row contains three cards: 'Experimental: FourCastNet ML model: Mean sea level pressure and 850 hPa wind speed', 'Experimental: GraphCast ML model: Mean sea level pressure and 850 hPa wind speed', and 'Experimental: Pangu-Weather ML model: Mean sea level pressure and 850 hPa wind speed'. Each card includes a thumbnail image representing the forecast data.

## Défis

- Passage aux simulations climatiques / méthodes d'évaluation des résultats, en particulier pour des climats très différents de l'actuel
- Bases de données pour l'apprentissage machine à construire. Crucial



# Besoins et défis

1/ définir les informations climatiques exploitables par les parties prenantes et que les experts sur le climat peuvent fournir  
=> co-construction

**Parties prenantes**

**Compréhension du changement climatique**

**Information climatique adéquate**

**Impacts, vulnérabilité, adaptation**

2/ Améliorer les connaissances et les outils sur les processus, les impacts et les risques du changement climatique, de l'échelle mondiale à locale

pour fournir les meilleures informations climatiques possibles pour la prise de décision.

3/ Former la prochaine génération de professionnels en sciences du climat, du développement des modèles aux services climatiques

pour assurer la durabilité de cet écosystème élargi de la science du climat.

pour répondre aux besoins des utilisateurs, des décideurs politiques aux industries, aux services et au grand public.



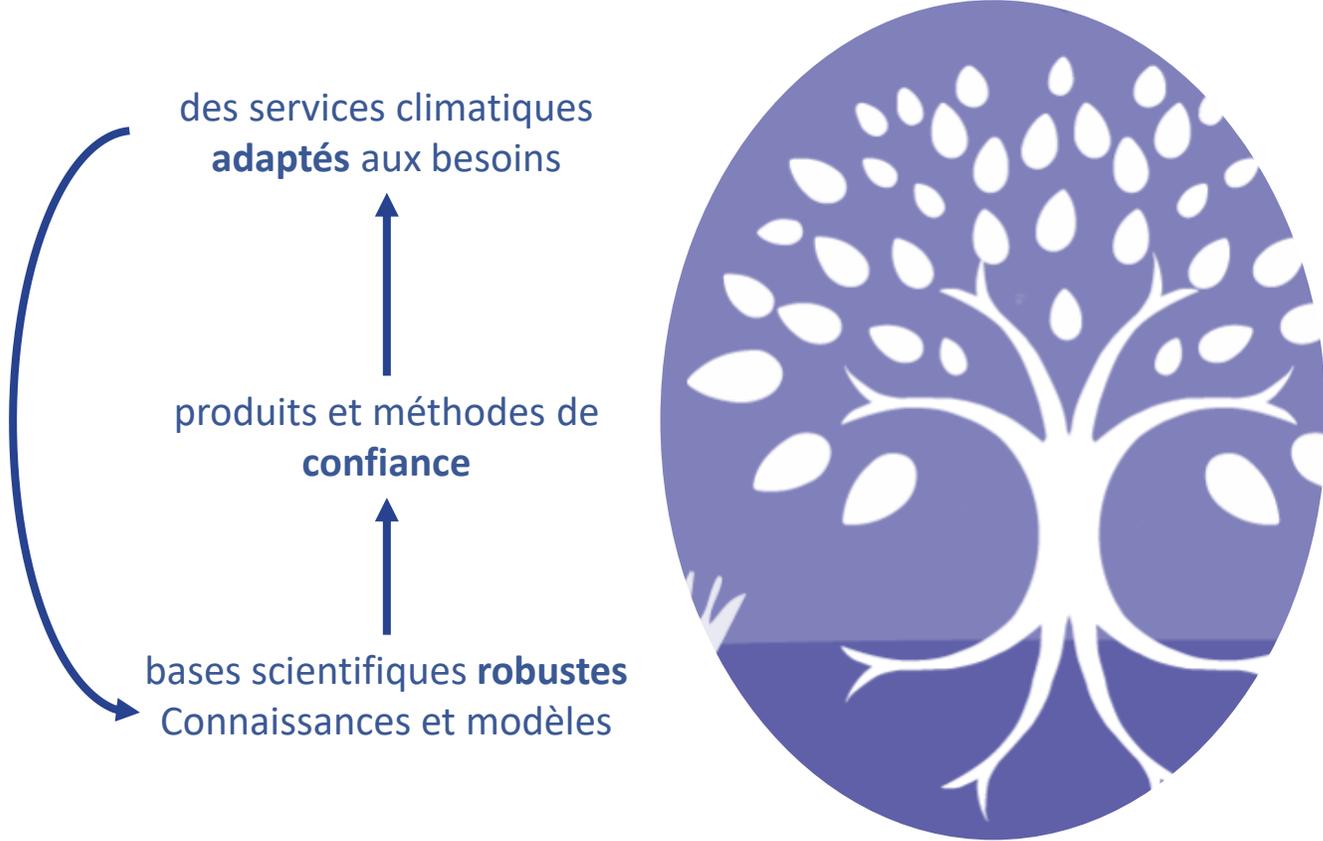
# Programme et Equipement Prioritaires de Recherches TRACCS



## TRAnsformer la modélisation du Climat pour les services ClimatiqueS



# Le programme TRACCS en bref



TRACCS est

- **Un programme de 8 ans, budget total de 51 M€** dont 10 M€ d'appels à projets,
- **Un effort sans précédent** dans le domaine de la recherche en sciences du climat. Regroupement de forces et vision stratégique pour la modélisation du climat et le développement de services climatiques,
- **Un PEPR connecté aux Infrastructures de Recherche (CLIMERI-FR, DataTerra)** et à d'autres PEPR (OneWater, FAIRCarbon, IRIMA, NumPEX, Solu-BioD, Agroécologie numérique, etc.),
- Une opportunité pour élargir la communauté scientifique et préparer son renouvellement.

**Pertinent pour plusieurs enjeux nationaux**

(Stratégie nationale bas carbone SNBC, Plans d'adaptation au changement climatique PNACC)  
et institutions (HCC, ONERC, ministères, organismes)

**Forte dimension internationale**

---

# Merci de votre attention !

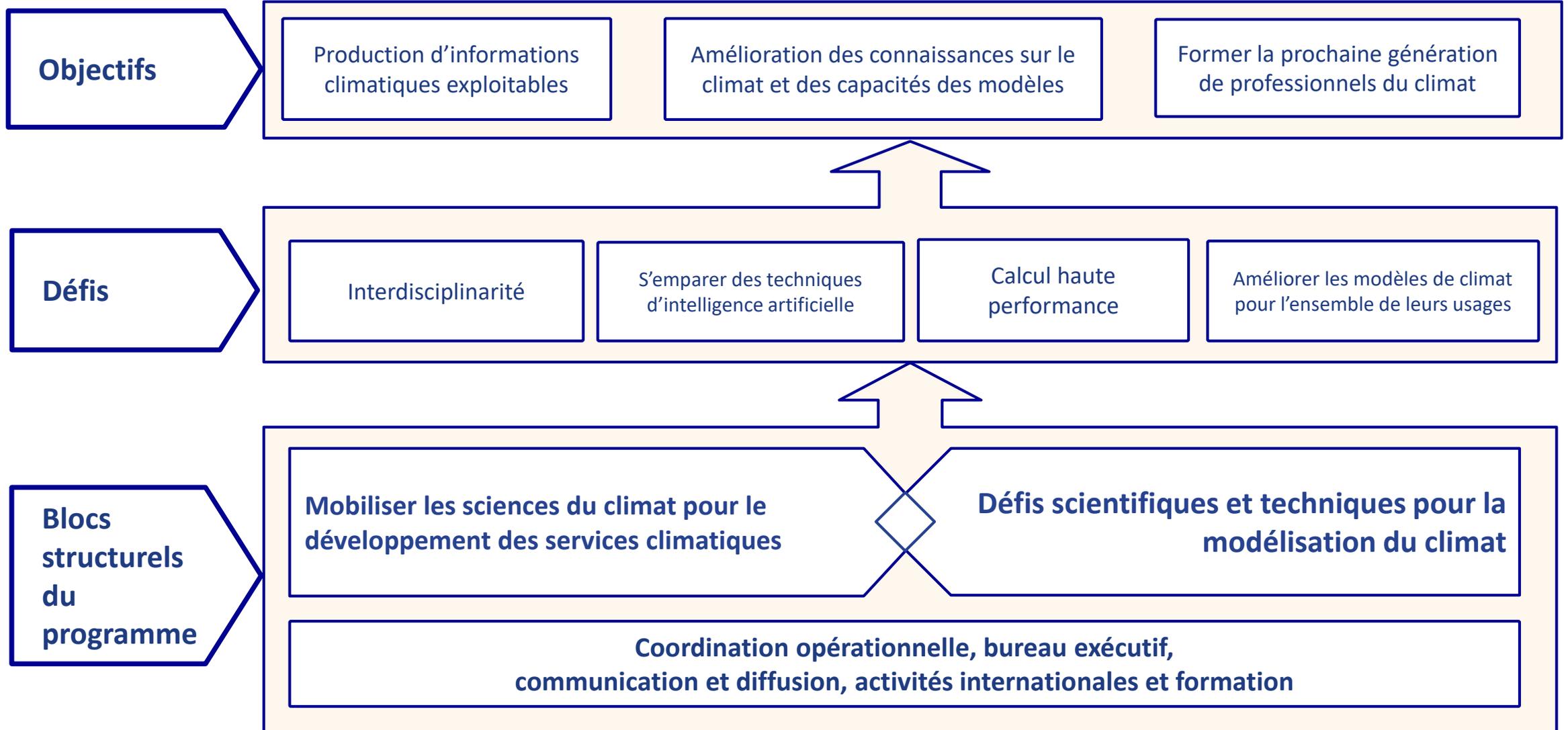


---

# Diapos supplémentaires



# TRACCS : structuration et organisation



# Mobiliser les sciences du climat pour le développement des services climatiques

PC1. co-construction avec les parties-prenantes



PC3. Démonstrateurs et information à l'échelle territoriale



PC2. Distribution des données et des méthodes



PC4. Événements extrêmes



Risques climatiques en France et ailleurs

# Défis scientifiques et techniques pour la modélisation du climat

PC5.  
Nouveaux  
paradigmes de  
calcul

PC6.  
Calibration &  
incertitude

PC7.  
Processus  
physiques

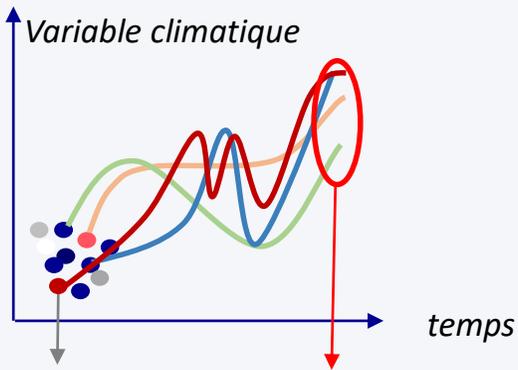
PC8.  
Biogéochimie

PC9.  
Calottes  
polaires

PC10.  
Information  
climatique  
kilométrique

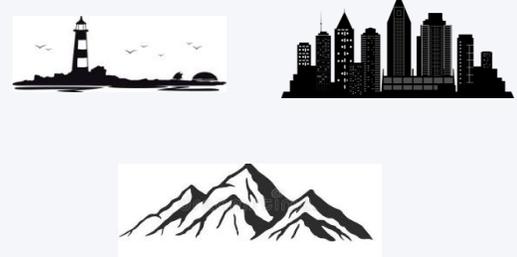
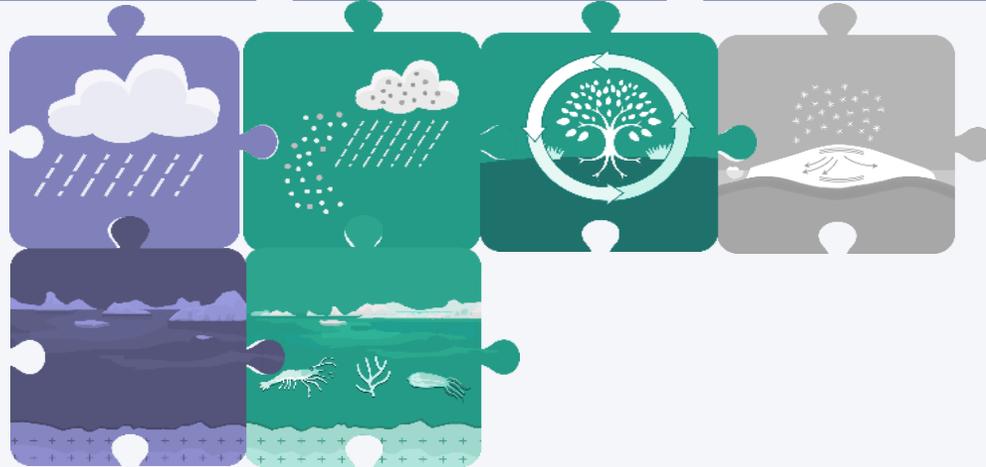
Avancées transformatrices dans la conception des modèles

- usage accru de l'IA
- nouvelles architectures de calcul
- quantification des incertitudes



Calibration,  
Sélection de  
paramètres

Distribution de  
valeurs, y compris  
extrêmes



TRACCS développera et produira des modèles de climat améliorés et cohérents

- applicables à toutes échelles d'espace (1 à 100 km) et de temps
- permettant des simulations longues et de grands ensembles

Bases robustes pour les  
sciences du climat  
et les services climatiques

## Coordination opérationnelle, bureau exécutif, communication et diffusion Activités internationales et formation

### Mobiliser les sciences du climat pour le développement des services climatiques

PC1 Co-construction / parties prenantes

PC2 Données et méthodes

PC3 Démonstrateurs services climatiques

PC4 Événements extrêmes

### Défis scientifiques et techniques pour la modélisation du climat

PC5 Nouveaux paradigmes de calcul

PC6 Calibrations et incertitudes

PC7 Modélisation des processus physiques

PC8 Modélisation biogéochimique

PC9 Modélisation des calottes polaires

PC10 Information climatique à échelle kilométrique

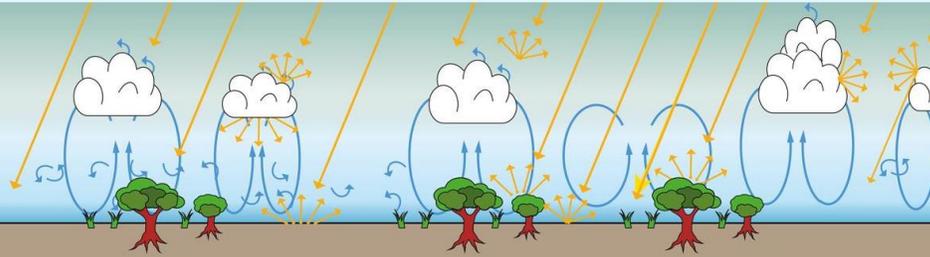
#### Appels à projets ouverts sur les thèmes :

- Approches interdisciplinaires pour les impacts du changement climatique, l'adaptation et les services climatiques
- Evaluation des interventions climatiques
- IA pour les sciences du climat
- Evaluation des modèles (liens observations/modélisation)

# Développement de paramétrisations

Exemple: dans l'atmosphère

a - idéalisation de certains processus à l'œuvre dans une colonne d'un modèle de climat



petits mouvements turbulents

cellules convectives

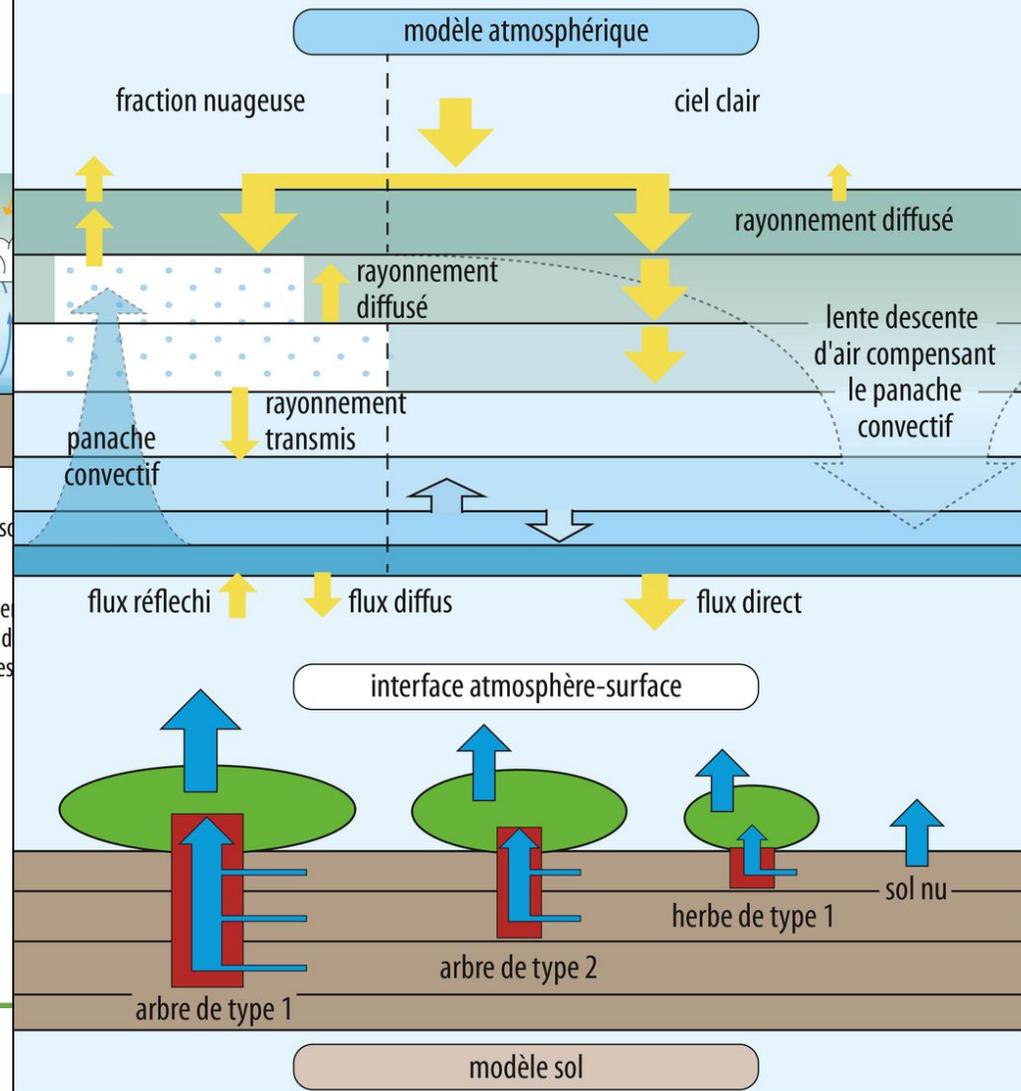
cumulus

La vapeur d'eau évaporée par le sol nu ou la végétation est transportée verticalement par la turbulence et la convection.

La vapeur d'eau transportée vers le haut par les panaches convectifs condense pour donner naissance aux cumulus.

Le rayonnement et diffusé d par l'air, les

b - transferts verticaux dans la colonne du modèle



flux d'énergie solaire

On distingue souvent le rayonnement dans la partie nuageuse et dans la partie sans nuages (ciel clair) de la maille.

transferts de vapeur d'eau

par mélange turbulent de couche en couche

par un panache convectif à travers plusieurs couches

nuages

Dans chaque couche on calcule la fraction occupée par des nuages.

évaporation de l'eau du sol

surface foliaire système racinaire

On attribue à chaque maille un pourcentage de type de plantes. Par exemple, on distingue des herbacées et des arbres qui diffèrent par l'albédo de leurs feuilles ou la profondeur à laquelle ils vont puiser l'eau dans le sol (discretisé en couches) avec leurs racines.

