

# Enseigner le climat avec LMDZ : présentation de l'outil eduearth

**Jean-Baptiste Madeleine**

**l'équipe LMDZ**, en particulier Aymeric Spiga, Laurent Fairhead, Ehouarn Millour, Frédéric Hourdin, Lionel Guez, Martin Turbet, Valentin Wiener ;  
**l'équipe ESPRI**, en particulier Laurent Troussellier, Karim Ramage, Marc-Antoine Drouin,  
**les étudiants**, en particulier Laure Enguehard et Vianney Houard

Mardi 03 octobre 2023

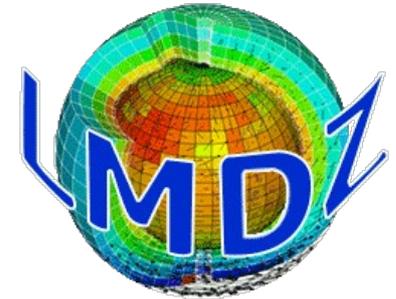


# Eduearth et PCMStudio

(Planetary Climate Modeling Studio)

**PCMStudio** = environnement **bash+python** qui permet de réaliser facilement des simulations légères avec différents modèles :

- LMDZ version générique (eduplanet)
- LMDZ version terrestre (**eduearth**)

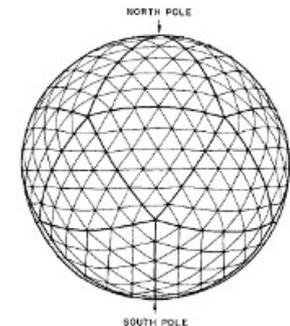


À l'avenir :

- ORCHIDEE ?
- NEMO ?
- INCA ?
- DYNAMICO ?



ORCHIDEE  
LAND SURFACE MODEL



# Planetary Climate Modeling Studio

<https://gitlab.in2p3.fr/ips1/projets/pcmstudio>

 **PCMStudio**   
ID de groupe : 13614 

Sous-groupes et projets   Projets partagés   Projets archivés

Rechercher    Nom  

 **LMDZ**  0 2 1

-  **E** **earth**   
A friendly set of scripts to use the LMDz global climate model easily. ★ 1   il y a une semaine
-  **G** **generic**   
an additional layer which permits a student-friendly use of the LMD generic clim... ★ 0   il y a 3 mois

- Un fonctionnement simple :
  - Un script d'installation **install.sh**
  - Un script de configuration **setup.sh**
  - Un script d'exécution **run.sh**
  - Un atlas des sorties **atlas.ipynb**

# Pour réaliser une simulation

- **PCMStudio** 

<https://gitlab.in2p3.fr/ips1/projets/pcmstudio>

- Dans un terminal :

```
git clone
```

```
https://gitlab.in2p3.fr/ips1/projets/pcmstudio/lmdz/earth.git
```

```
cd earth
```

```
./install.sh
```

```
./setup.sh
```

```
./run.sh
```

- Les résultats peuvent être visualisés dans un notebook :

```
jupyter-nbclassic exp_name/atlas.ipynb
```

- A distance : <https://data.ips1.fr/jupyter>

# Menu principal

The image shows a JupyterLab interface with a terminal window open. The terminal window displays the following menu:

```
Planetary Climate Modeling Studio - generic model - v1.2  
  
A > Idealized  
B > Earth  
C > Mars  
D > Venus  
E > Titan  
F > Exoplanets  
R > Reset all settings  
1 : Edit config files  
2 : Setup tools  
3 : Source code patches  
4 : File operations  
5 : Recap all settings  
0 > Exit  
  
Enter=Select, Navigate via Up/Down/First number/letter
```

The JupyterLab interface includes a file browser on the left showing a directory structure with folders like DOC\_FR, exp\_default, exp\_REF\_VAL, fix, INIT, MODELES, PLUG-INS, RUN, and TOOLS, and files like check\_dependencies.sh, install.sh, install2.log, LICENCE.md, longrun.qsub, and longrun.sh. The terminal window title is 'jbmimd@merlin19-c:/homed:'. The bottom status bar shows '1 \$ 0 Git: idle' and the current path 'jbmimd@merlin19-c:/homedata/jbmimd/DEV/RUNS\_EDU/3ST060/2023-2024/generic'.

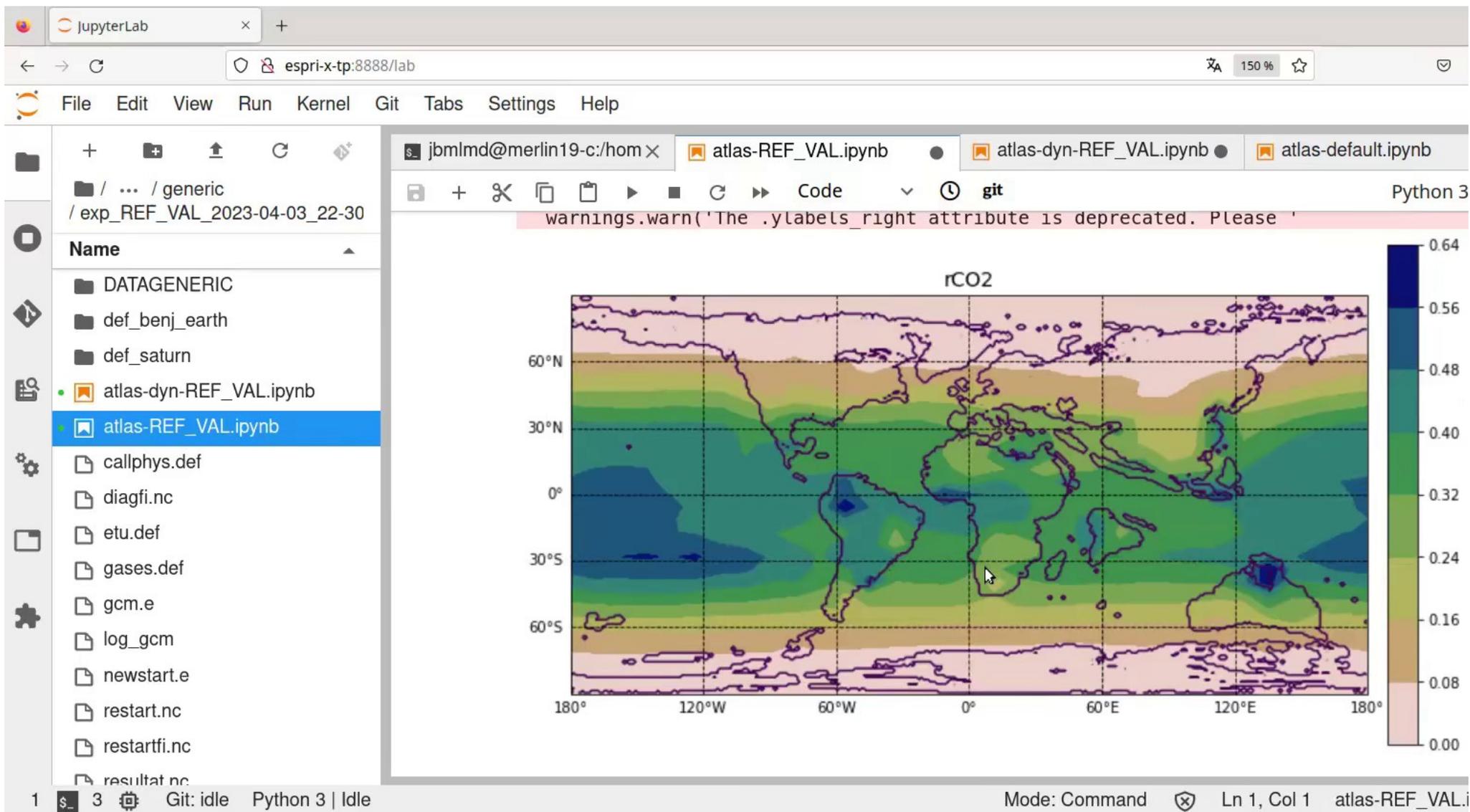
# Diagnostiques classiques (.ipynb)

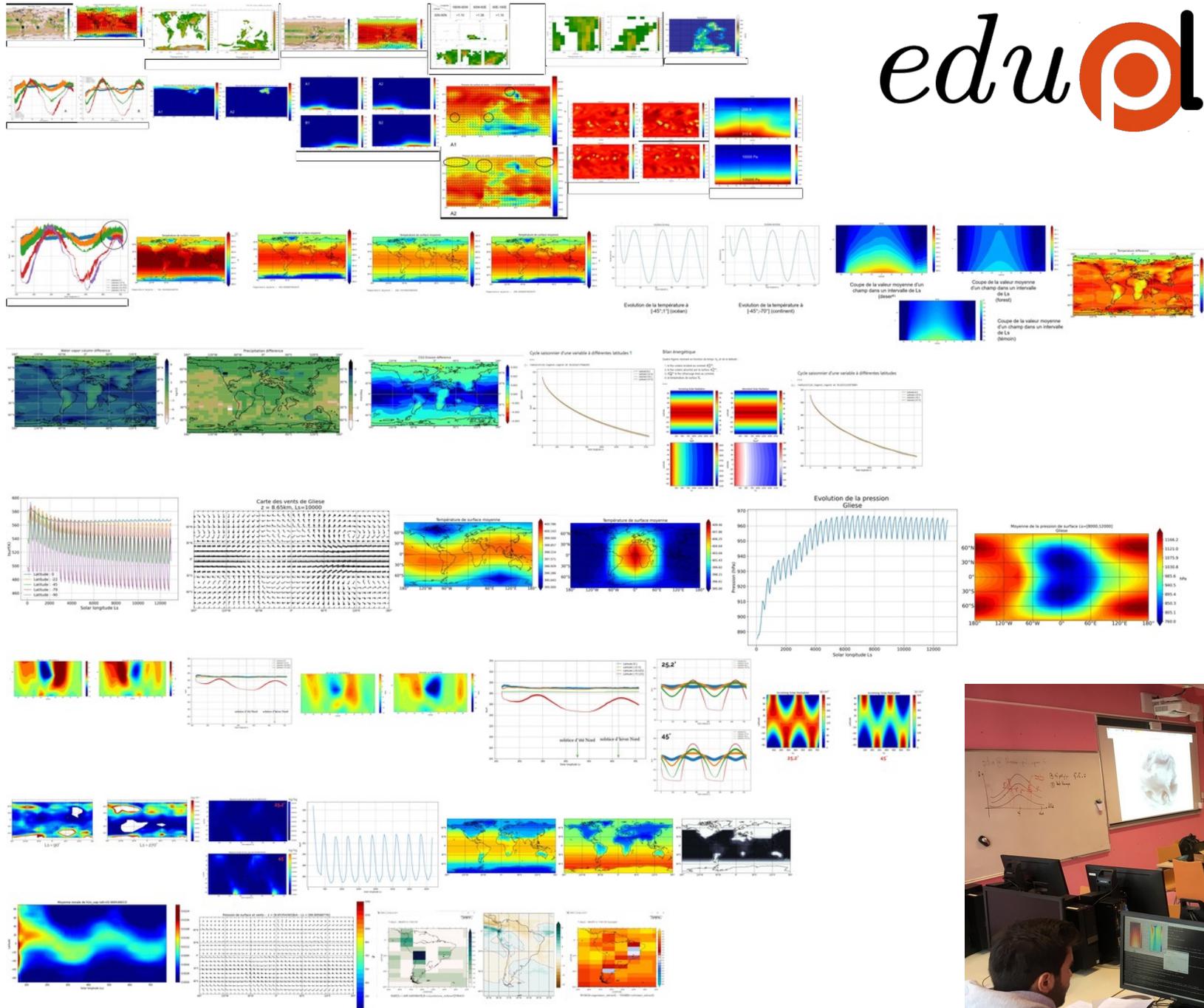
The screenshot displays a JupyterLab environment. On the left is a file browser showing a directory structure with folders like 'DATAGENERIC', 'def\_benj\_earth', and 'def\_saturn', and files such as 'atlas-default.ipynb', 'atlas-dyn-default.ipynb', 'callphys.def', 'diagfi.nc', 'etu.def', 'gases.def', 'gcm.e', 'log\_gcm', 'newstart.e', 'restart.nc', 'restartfi.nc', and 'resultat.nc'. The main area shows the 'atlas-default.ipynb' notebook with four diagnostic plots:

- Top-left: A heatmap of a variable (likely solar constant or similar) over Latitude (80 to -80) and Ls (250 to 1750). The color scale ranges from 0 to 540.
- Top-right: A heatmap of a variable over Latitude and Ls. The color scale ranges from 0 to 360.
- Bottom-left: A heatmap titled 'Outgoing Longwave Radiation (OLR) (W/m<sup>2</sup>)' over Latitude and Ls. The color scale ranges from 285 to 375.
- Bottom-right: A heatmap titled 'Tsurf (°C)' over Latitude and Ls. The color scale ranges from 16 to 32.

The interface includes a top menu bar (File, Edit, View, Run, Kernel, Git, Tabs, Settings, Help), a terminal at the bottom left showing 'Git: idle' and 'Python 3 | Idle', and a status bar at the bottom right showing 'Mode: Command', 'Ln 1, Col 1', and 'atlas-default.ipynb'.

# Atlas des résultats (.ipynb)





# Développement par les étudiants (stage L2)

« Je ne savais pas que mon ordinateur pouvait faire ça... et lui non plus d'ailleurs ! »



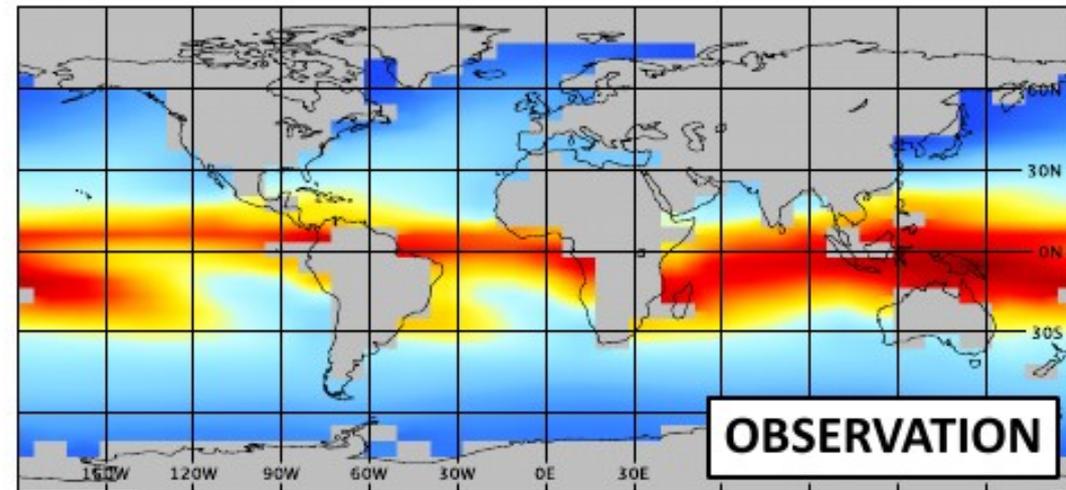
Laure  
Enguehard



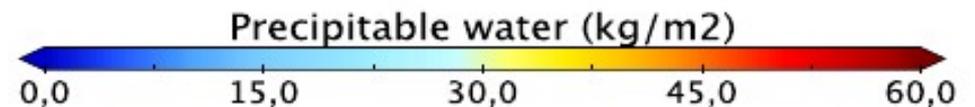
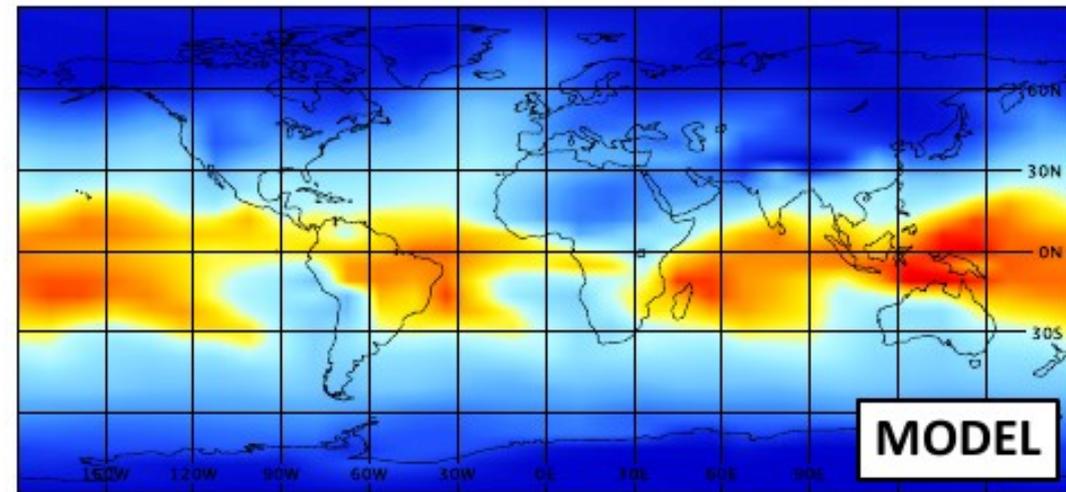
Vianney  
Houard

Simulations zoomées 32x32x39  
sur mac (VirtualBox + LUbuntu)

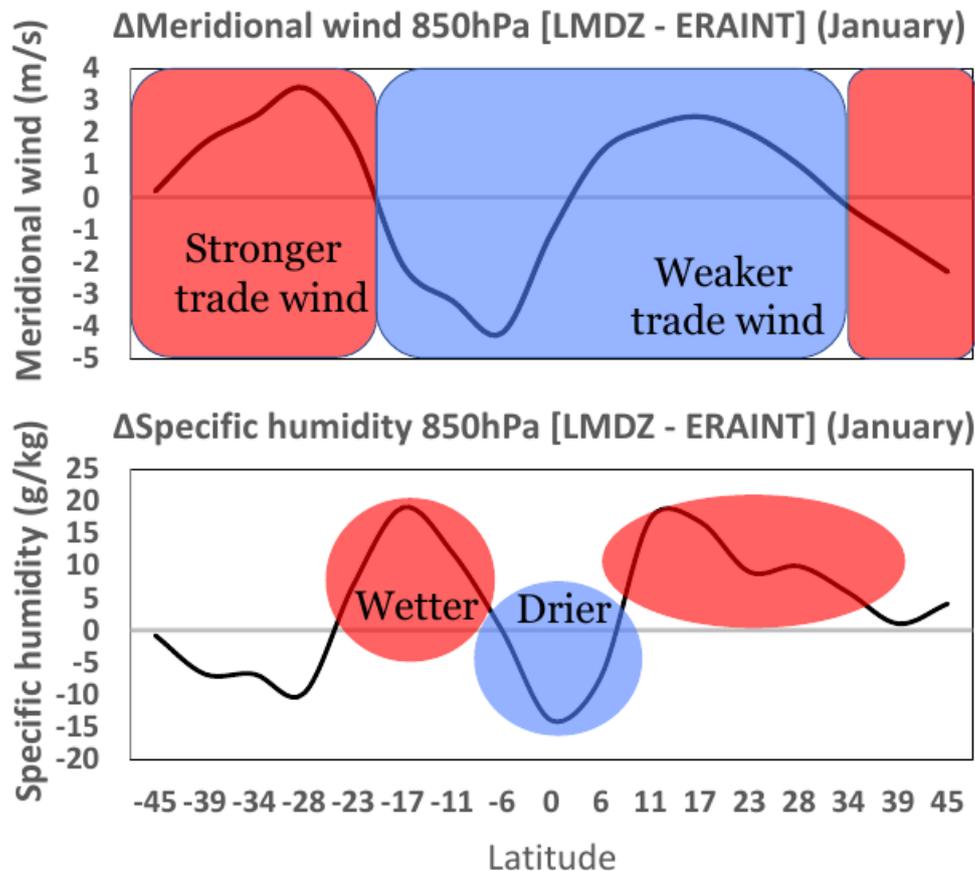
Precipitable water REMSS (January)



Precipitable water LMDZ (January)



# Développement par les étudiants



Update Transport\_méridien.ipynb

Vianney Houard a écrit il y a une semaine

vianney.houard-mas... ▾

earth / atlases

Nom

..

Multiplot-Interface

.gitkeep

Carte\_des\_vents.ipynb

Coupe\_méridienne.ipynb

Detecteur\_de\_biais.ipynb

Grille\_des\_simulations.ipynb

Régions\_polaires\_incomplètes.ipynb

Transport\_méridien.ipynb

# Pourquoi développer PCMStudio ?

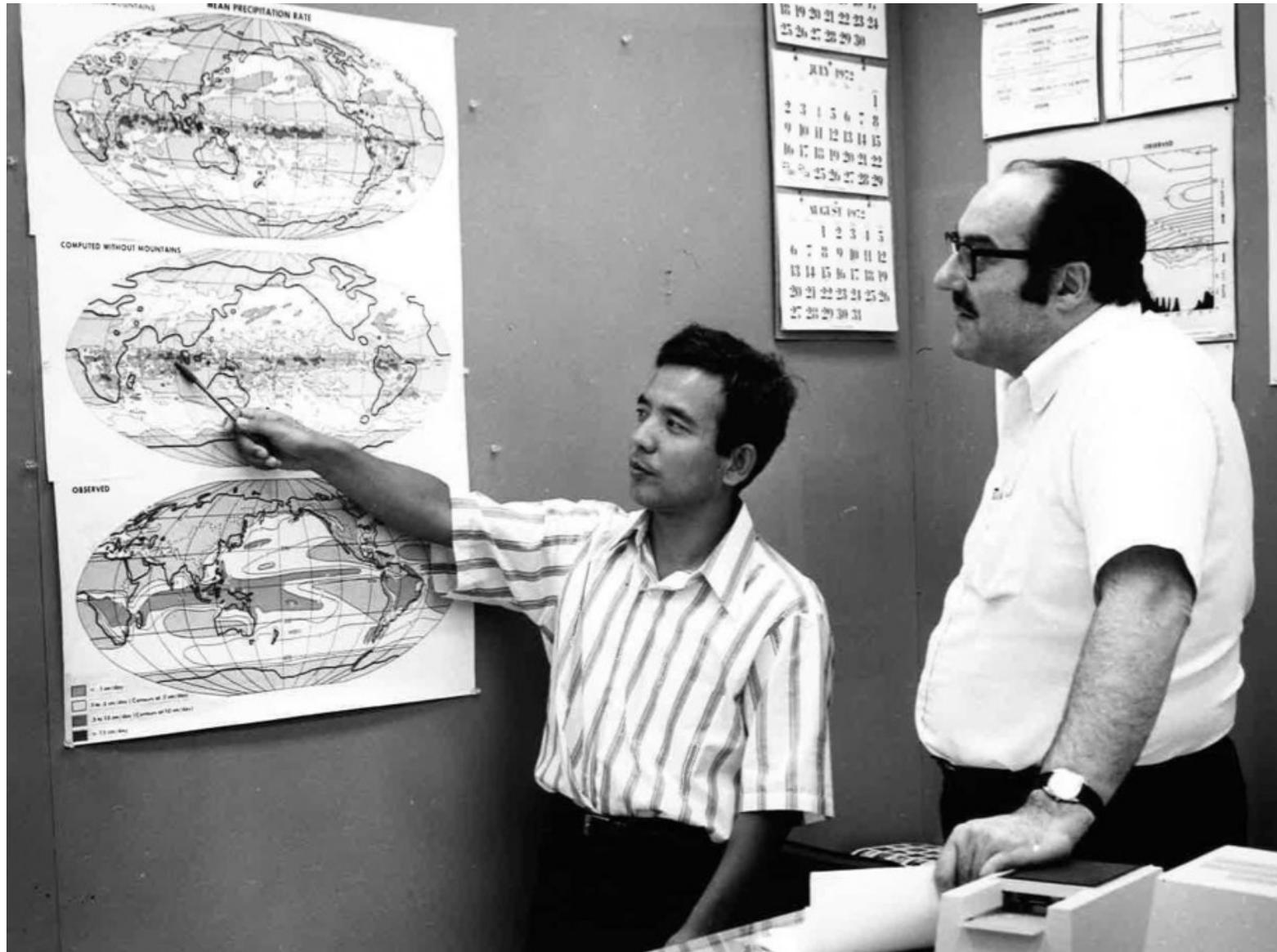
- Pour permettre une **pédagogie active** et des TP numériques de climatologie qui s'appuient sur notre recherche
- Pour pouvoir installer rapidement des configurations légères de nos modèles sur tout PC et **former** les jeunes collègues (doctorants, post-doctorants, stagiaires)
- Pour **développer** facilement de nouvelles paramétrisations avant portage sur les centres de calculs

# Faut savoir jouer ses classiques !!

- Pouvoir réaliser des simulations « collector »
  - Benchmark, contrôle qualité, évaluation de paramétrisation
- Pouvoir facilement composer de nouveaux morceaux
  - Recompilation et ajout de diagnostics facile
- Pouvoir facilement faire un bœuf !
  - Développement collaboratif, jupyterhub



# Les Beethoven et Mozart de la modélisation numérique



## F. COMPUTATIONAL SPACE MESH

The hydrodynamical equations of the general circulation model are solved for a rectangular grid on a stereographic map projection of the Northern Hemisphere, tangent to the earth at the north pole. The positive  $X$ -axis of the Cartesian grid is directed along the Greenwich meridian. The number of points between the north pole and the equator,  $N$ , is all the additional information required to specify the grid uniquely. In the experiment reported on here we have taken  $N=20$  which corresponds to an earth distance between grid points of about 320 km. at the equator, 540 km. at  $45^\circ$ , and 640 km. at the pole.

# MONTHLY WEATHER REVIEW

VOLUME 93, NUMBER 12

DECEMBER 1965

## NUMERICAL RESULTS FROM A NINE-LEVEL GENERAL CIRCULATION MODEL OF THE ATMOSPHERE<sup>1</sup>

JOSEPH SMAGORINSKY, SYUKURO MANABE, and J. LEITH HOLLOWAY, Jr.

Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Environmental Science Services Administration, Washington, D.C.

## SIMULATED CLIMATOLOGY OF A GENERAL CIRCULATION MODEL WITH A HYDROLOGIC CYCLE<sup>1</sup>

SYUKURO MANABE, JOSEPH SMAGORINSKY, AND ROBERT F. STRICKLER

is chosen as the lower boundary. The initial conditions consist of a completely dry and isothermal atmosphere. A state of quasi-equilibrium is obtained as a result of the time integration of 187 days. A preliminary analysis of the result is performed for the 40-day period from 148th day to 187th day.

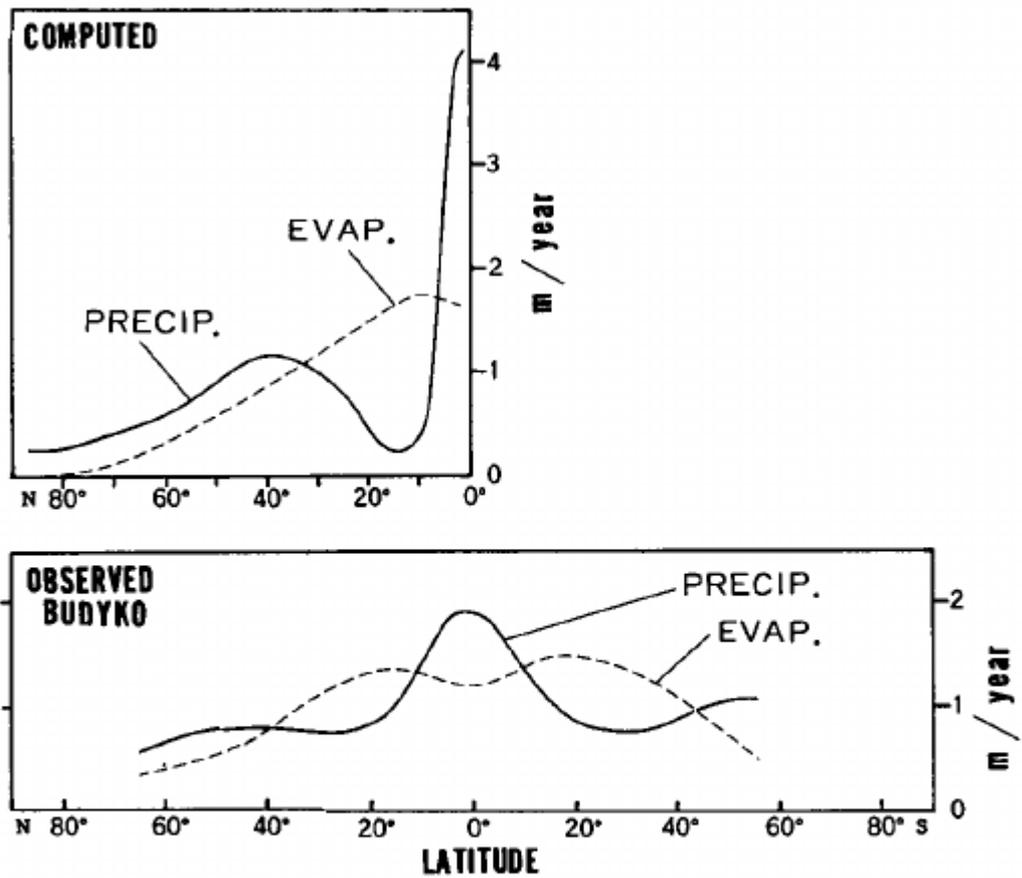


FIGURE 10B1.—In the upper part of the figure, the latitudinal distributions of precipitation and evaporation obtained from the model are shown, and in the lower part of the figure, observed distributions estimated by Budyko [5] are shown.

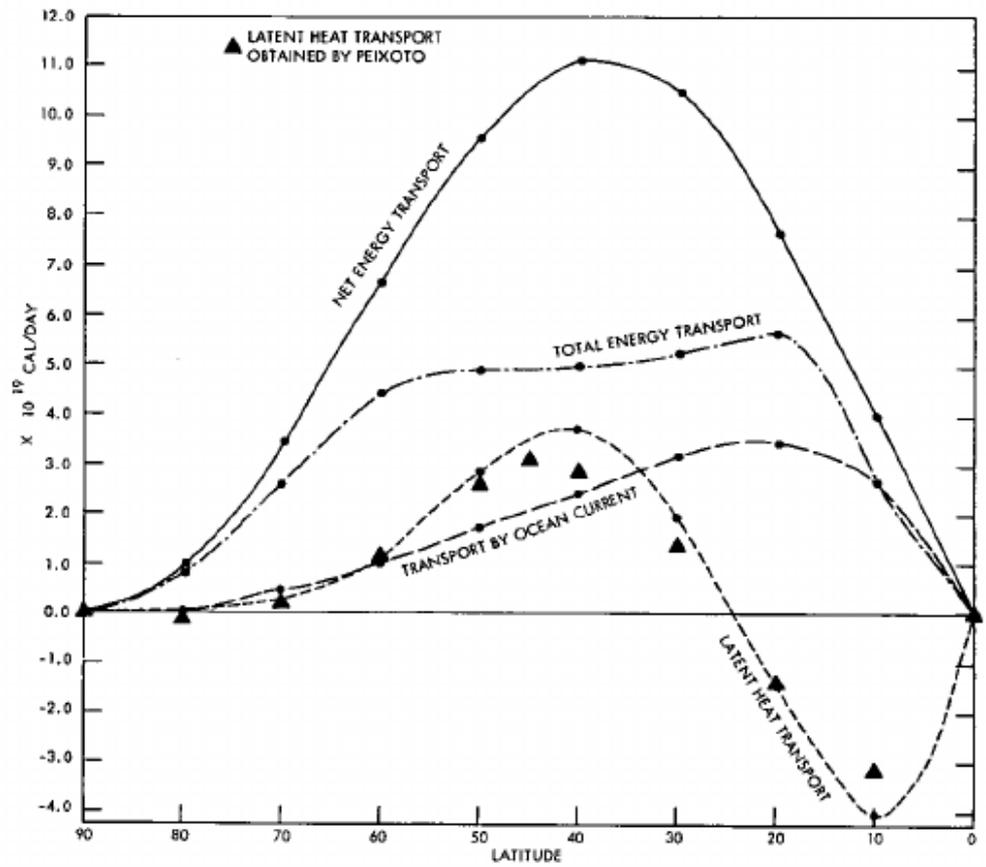
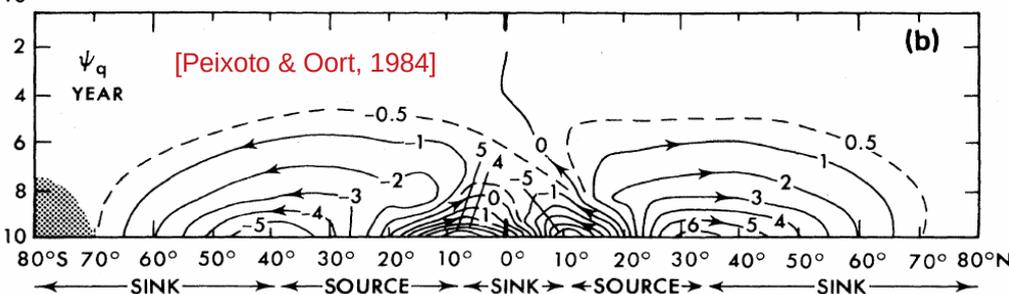
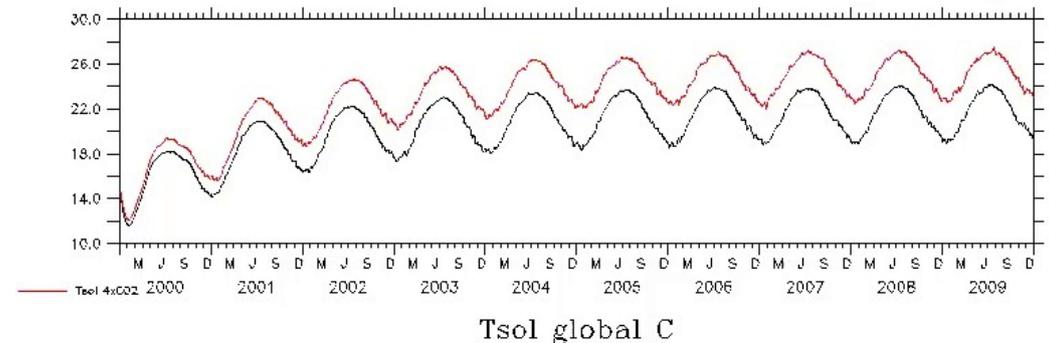
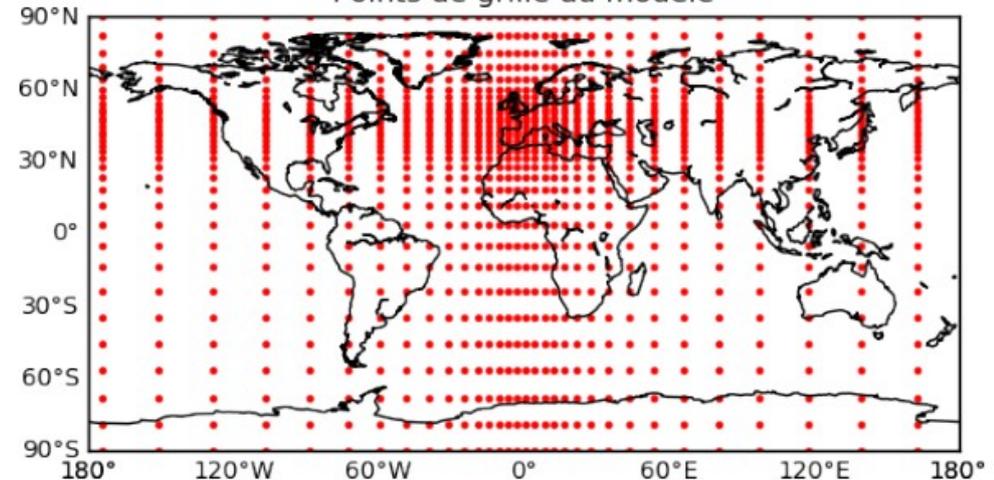


FIGURE 12B3.—The latitudinal distribution of poleward net energy transport of the earth-atmosphere system, which is expected from the radiative imbalance, is shown together with the transport of total energy ( $c_p T + \phi + K$ ) and that of latent energy in the atmosphere, and the transport of energy by ocean currents. The estimate of these transports was made by use of the data obtained by Budyko [5], [6] (average of values for both hemispheres) and Houghton [9]. The meridional transport of latent energy obtained by Peixoto [27] is plotted for comparison.

<https://gitlab.in2p3.fr/ips1/projets/pcmstudio/lmdz/earth>

- Configs ultra-basse résolution ciblées 32x32x39 Arctique, Tropicque et Antarctique
- Configs basse résolution pour :
  - 48x36x39 forcé (~4 ans de climat / jour de calcul, 1 CPU)
  - 48x36x39 zoomé-guidé pour applications météo
  - 32x24x39 couplé avec slab ocean (flux et transport d'Ekman)

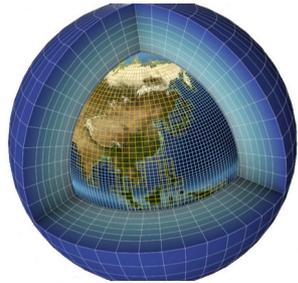
Points de grille du modèle



- Ajout de diagnostics « académiques » disparus (dynamique, cycles, conservation)
- Ajout d'obs légères pour comparaison
- Ajout d'une sélection de séries longues sur site



# Pourquoi enseigner avec nos modèles ?



Thèse

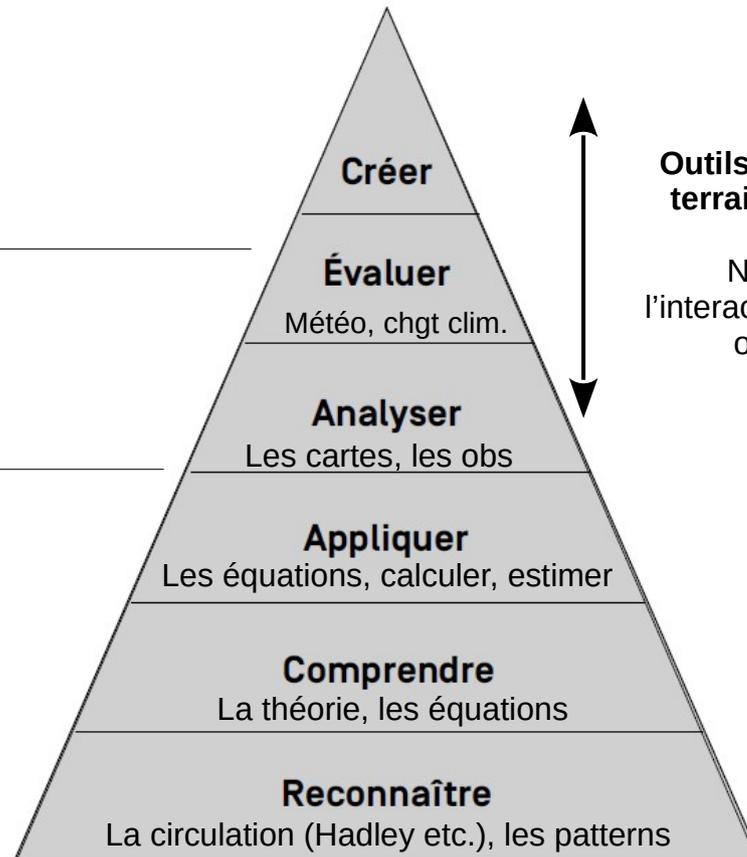
Master

Licence



« *What I cannot create,  
I do not understand.* »

R. Feynman



Outils de recherche, données satellite ou terrain, réalité dans toute sa complexité

Nécessite la présence d'un expert, l'interaction avec un outil, la manipulation d'un objet, l'apprentissage d'un métier, l'expérience

Théorie bien connue, exercices « classiques », applications simples

Thermodynamique, équilibre hydrostatique et stabilité, rayonnement et nuages, dynamique et mécanique des fluides

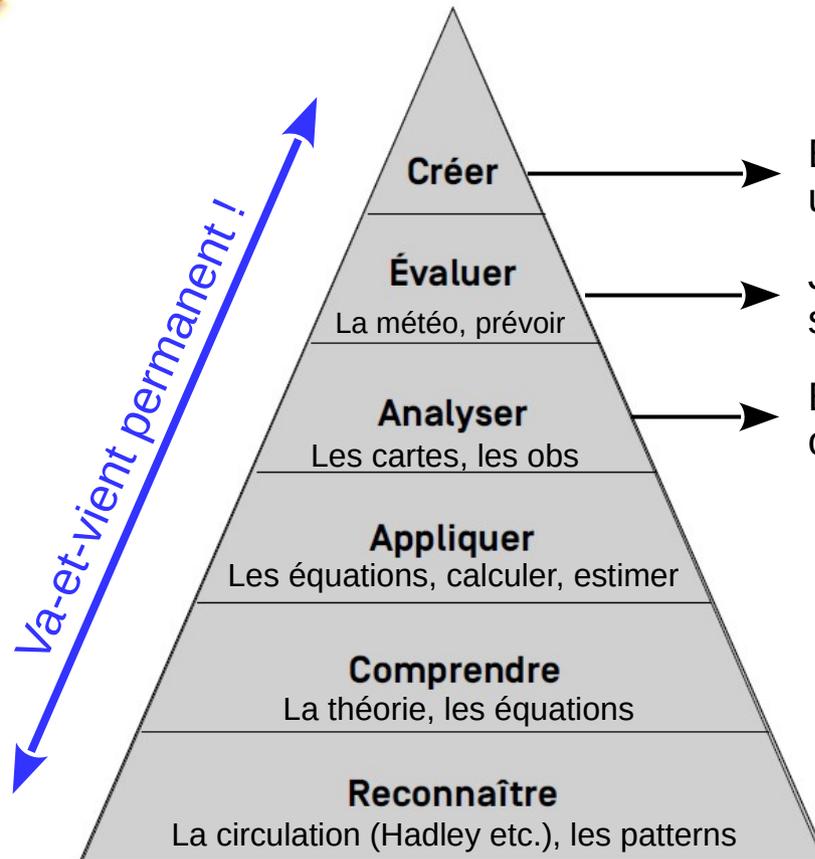
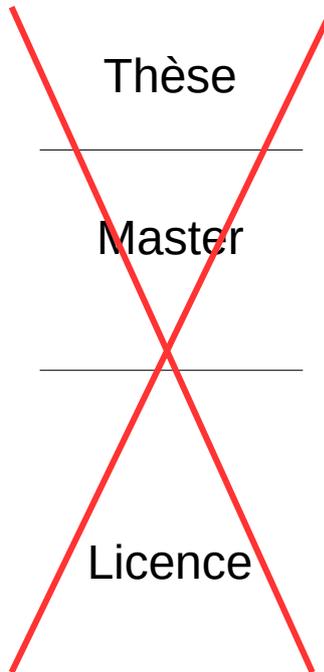
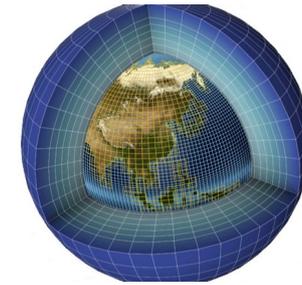
Pyramide de Bloom, avec annotations appliquées à notre domaine  
(Marcel Lebrun et Julie Lecoq, *La classe inversée*, Canopé, 2015)

# Pourquoi enseigner avec nos modèles ?



**Classe inversée : « partir du complexe pour contextualiser le simple »**

M. Lebrun



Expérimenter, construire, formuler un raisonnement scientifique

Justifier, prendre du recul, argumenter, s'approprier les questions

Explorer les résultats, relier, organiser, déduire



Pyramide de Bloom, avec annotations appliquées à notre domaine  
(Marcel Lebrun et Julie Lecoq, *La classe inversée*, Canopé, 2015)

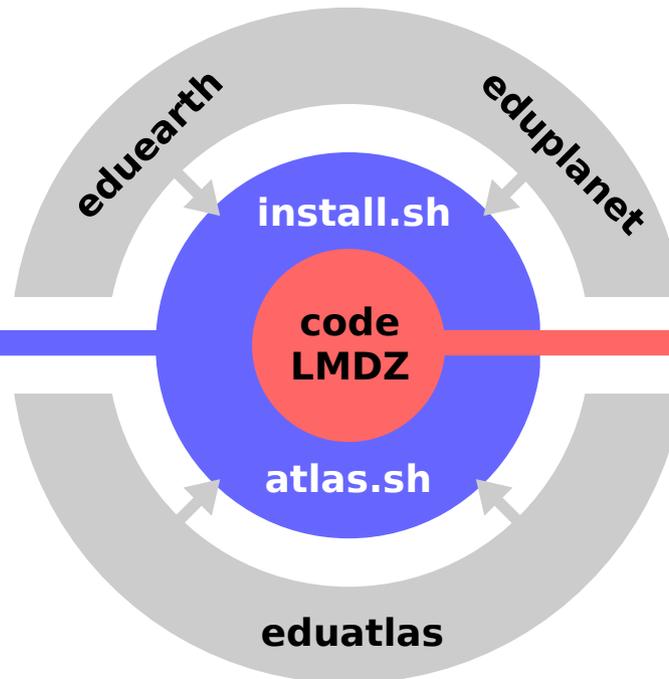
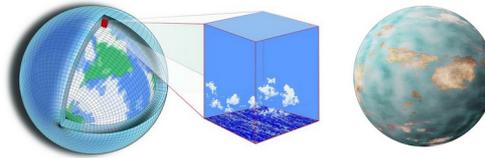
# Stratégie de développement pour LMDZ

## Une surcouche simplifiée pour installer et exécuter le modèle

- Configurations prédéfinies
- Fichiers .def allégés, zoom
- Outputs légers et mis en forme (*réinterpolation verticale, flux, fonctions de courant*)
- *Guidage automatique en indiquant une période donnée*

## Des scripts d'installation et d'analyse des résultats communs à la recherche et invisibles aux étudiants (la plupart du temps!)

- Maintenir des configurations multiples (séquentiel comme parallèle, basse résolution comme haute résolution, atmosphère seule comme multicomposante)
- Avoir un ensemble de diagnostics (pour la validation comme pour la compréhension)



## Même code source pour la recherche et l'enseignement

- Les étudiants sont motivés à l'idée d'utiliser un modèle de recherche (savoir « vif »)
- Nous sommes motivés à l'idée de partager notre modèle en cours ! (science participative)
- La recherche enrichit les cours, et inversement

## Une surcouche simplifiée pour comparer aux observations

- *Comparer sa simulation aux obs (1an / DJF MAM JJA SON)*
- *Comparer sa simulation à d'autres simulations (CMIP)*
- *Exploration simple des obs (fichiers légers réinterpolés)*

# Paysage et infrastructure

edu**e**arth  
edu**o**lanet

**Développement de l'outil**  
(J-B Madeleine, L. Fairhead, A. Spiga,  
E. Millour, F. Hourdin)



**Financements** : 24h d'allègement de cours par projet  
CluEdO EUR-IPSL en 2019-2020, congé pour projet  
pédagogique (CPP) SorbonneU en 2022-2023



 **CAPSULE**  
SCIENCES SORBONNE UNIVERSITÉ

**Déploiement en salles  
informatiques de  
Sorbonne Université**

  
**MÉS●CENTRE ESPRI**

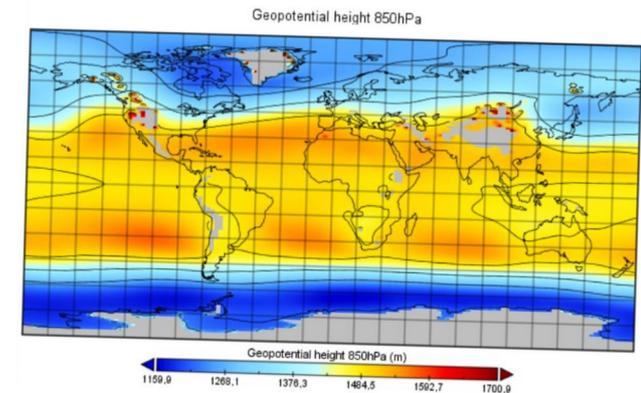
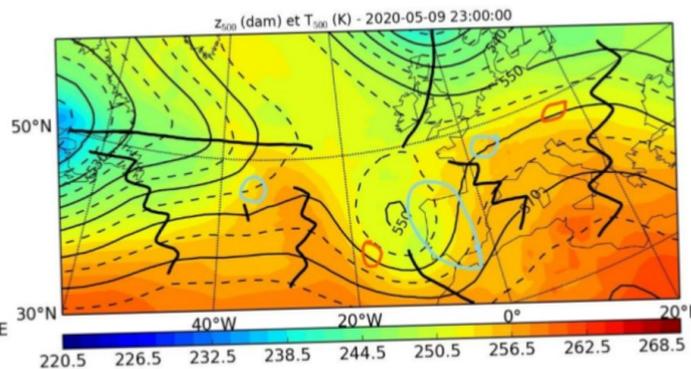
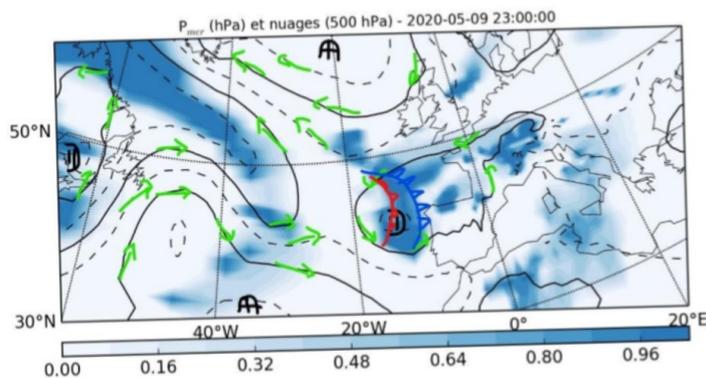
**Simulations, stockage,  
Jupyter Hub**



# Liste des cours

Formation météorologie	8h, 40 étudiants / an	Licence SU (L2), offre transverse à 5 licences
Formation Climats, paléo climats	30h, 25 étudiants / an	Licence SU (L3), offre transverse à 5 licences
Formation Océan, Atm., énergies renouvelables	8h, 25 étudiants / an	Llicence physique SU (L3)
Formation à la modélisation du climat	20h, 15 étudiants / an	Master (M2)

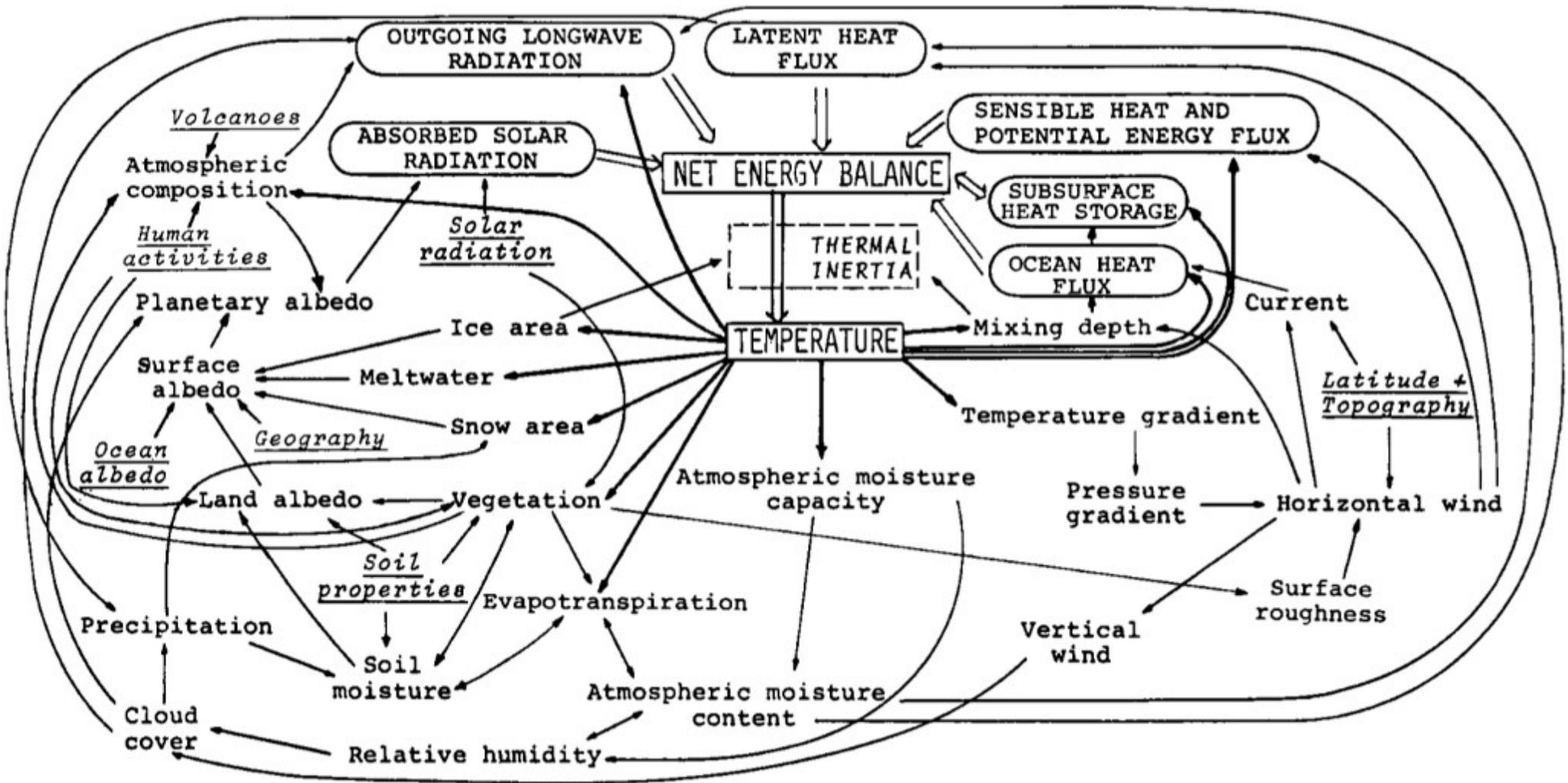
Je ne savais pas que mon ordinateur pouvait faire ça... et lui non plus d'ailleurs ! Vianney, L2



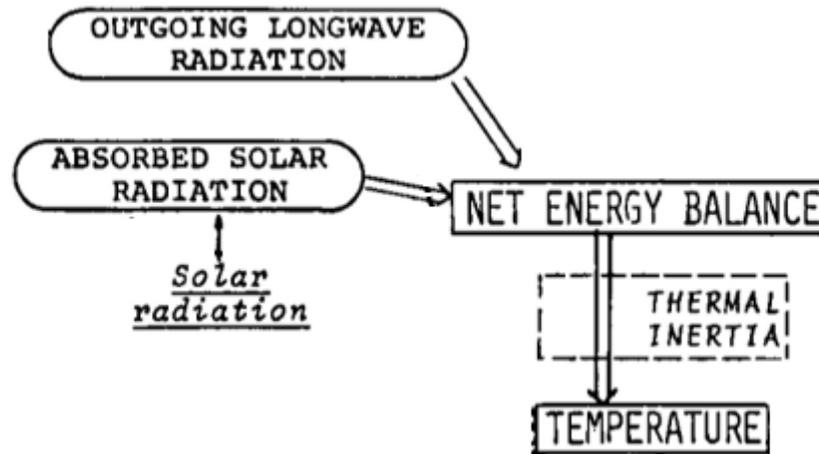
« (...) l'étude de la météorologie est une **discipline complexe**, soumise à de nombreux phénomènes très différents. Il est **difficile** d'en faire une prévision exacte. Cependant, le modèle s'est révélé assez précis quant à l'évolution globale de la météo (...) Faire ce travail d'analyse (...) était très intéressant, et nous a permis de **comprendre un peu plus** ce qu'il se passe au-dessus de nos têtes. » *Rapport de TP, Gwenaël et Charlie, L2*

« c'est trop beau !!! » tchat Moodle, L3

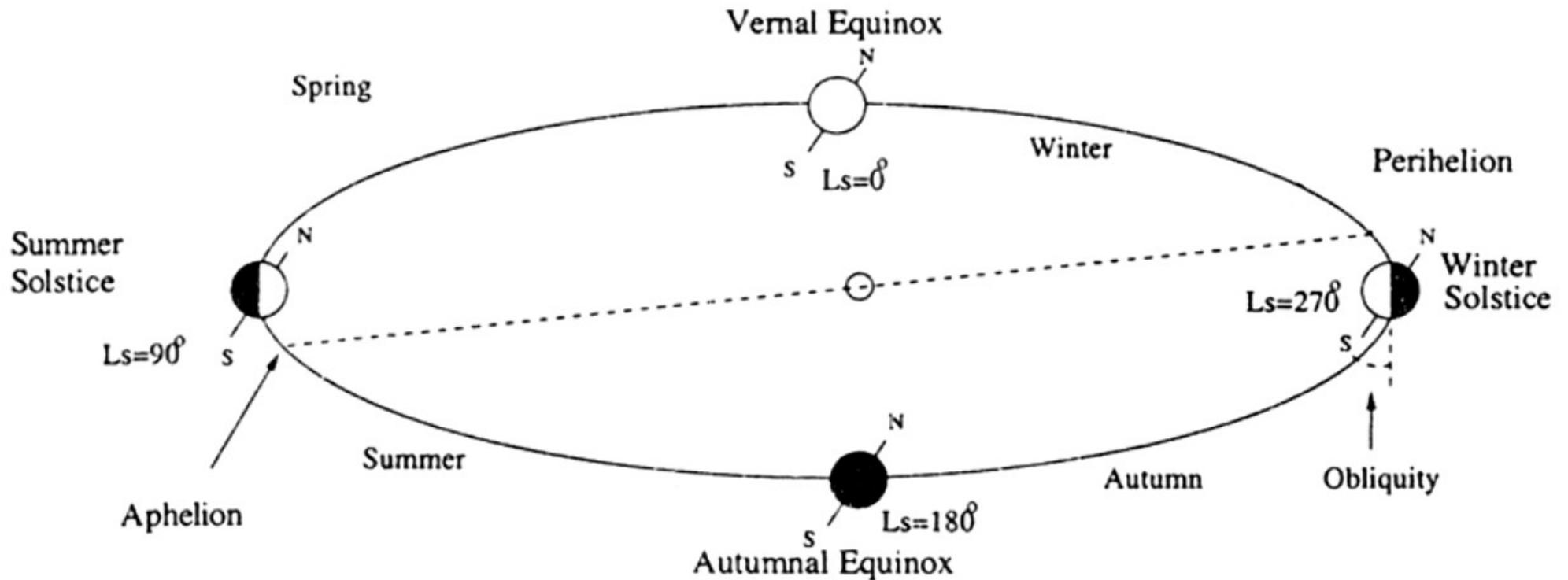
# Notion de système climatique



# Approche « inductive » : on reconstruit le système de zéro



# On allume le Soleil, et on regarde...



# Mise en équation

$$\epsilon \sigma T_s^4$$

OUTGOING LONGWAVE RADIATION

ABSORBED SOLAR RADIATION

NET ENERGY BALANCE

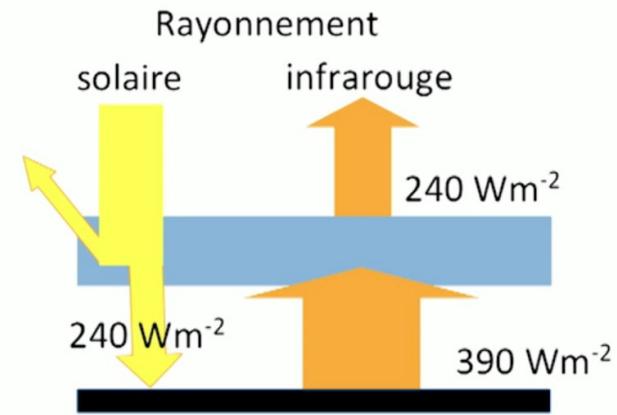
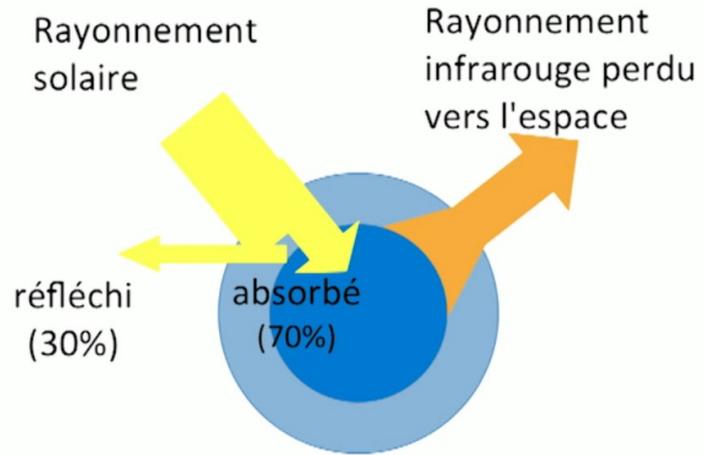
$$\rho_s e C \frac{dT_s}{dt} = (1 - A_b) E' \left(1 + \frac{\tau_s}{2}\right) - \epsilon \sigma T_s^4$$

THERMAL INERTIA  $C, e, \rho_s$

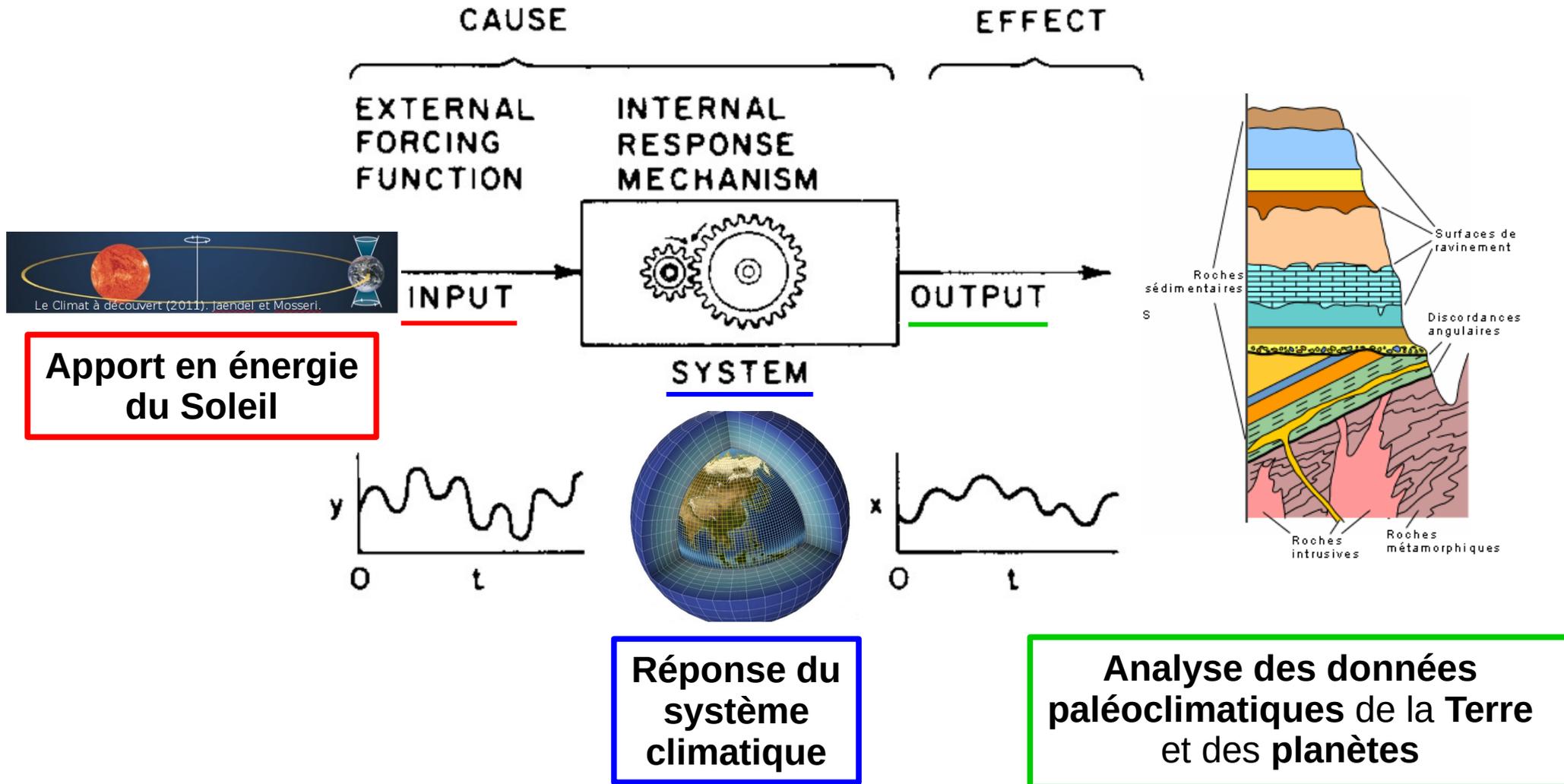
TEMPERATURE

$$T_s$$

$$(1 - A_b) E' \left(1 + \frac{\tau_s}{2}\right) \frac{\text{Solar radiation}}{E'}$$



# Applications paléoclimatiques



# Exemple : Trapps du Deccan

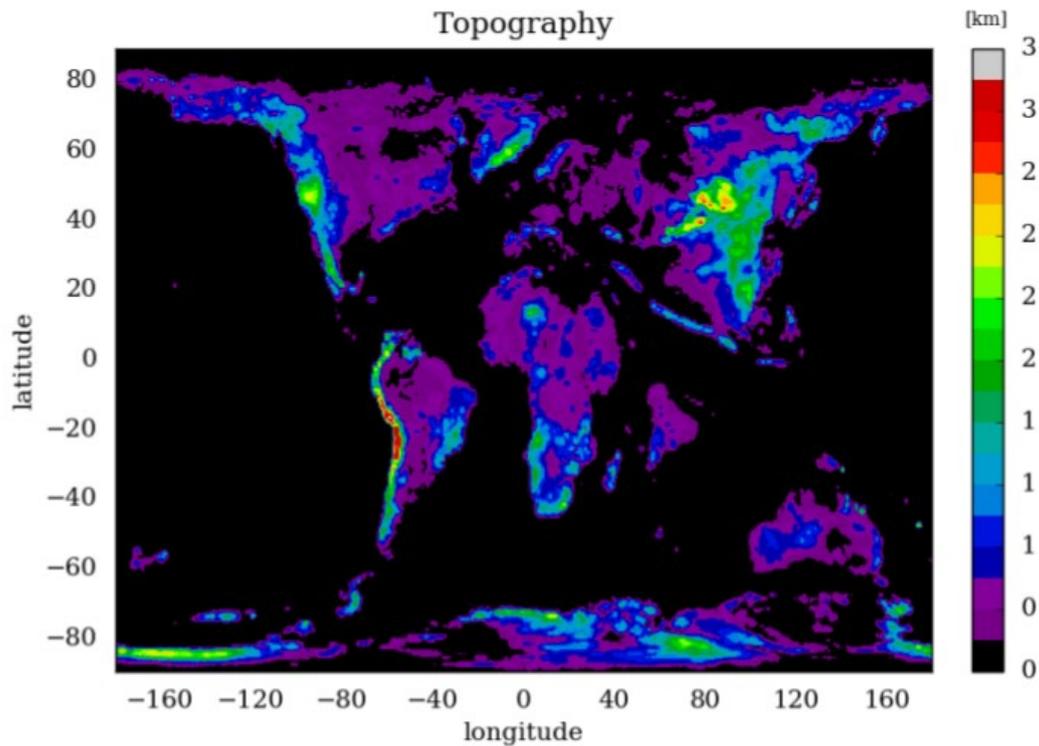


Fig 2. Topographie et répartition des continents sur Terre au Crétacé supérieur

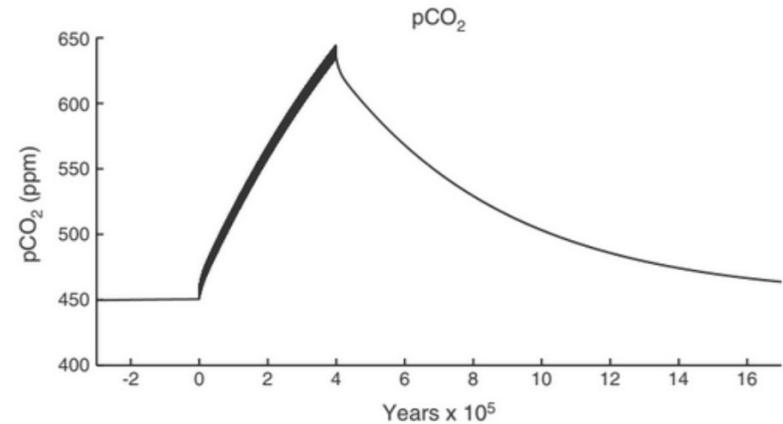
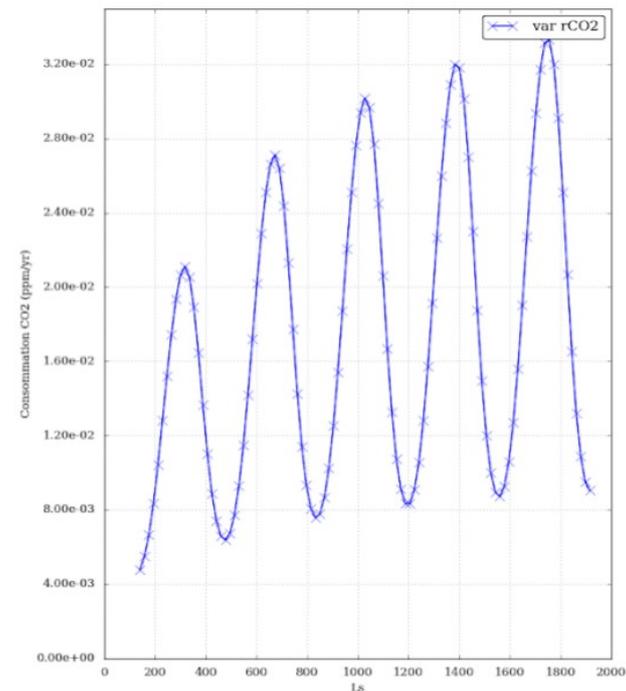
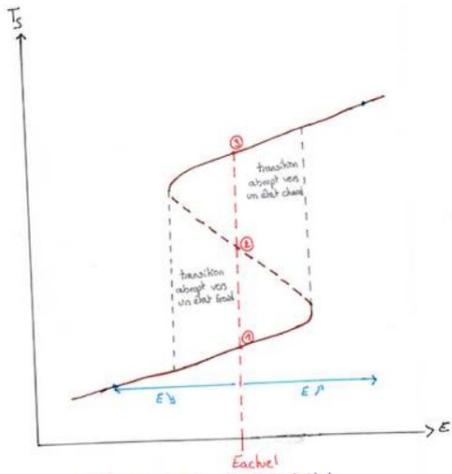


Fig.3 Evolution de la pCO<sub>2</sub> pendant la limite Crétacé-Paléogène en fonction du temps

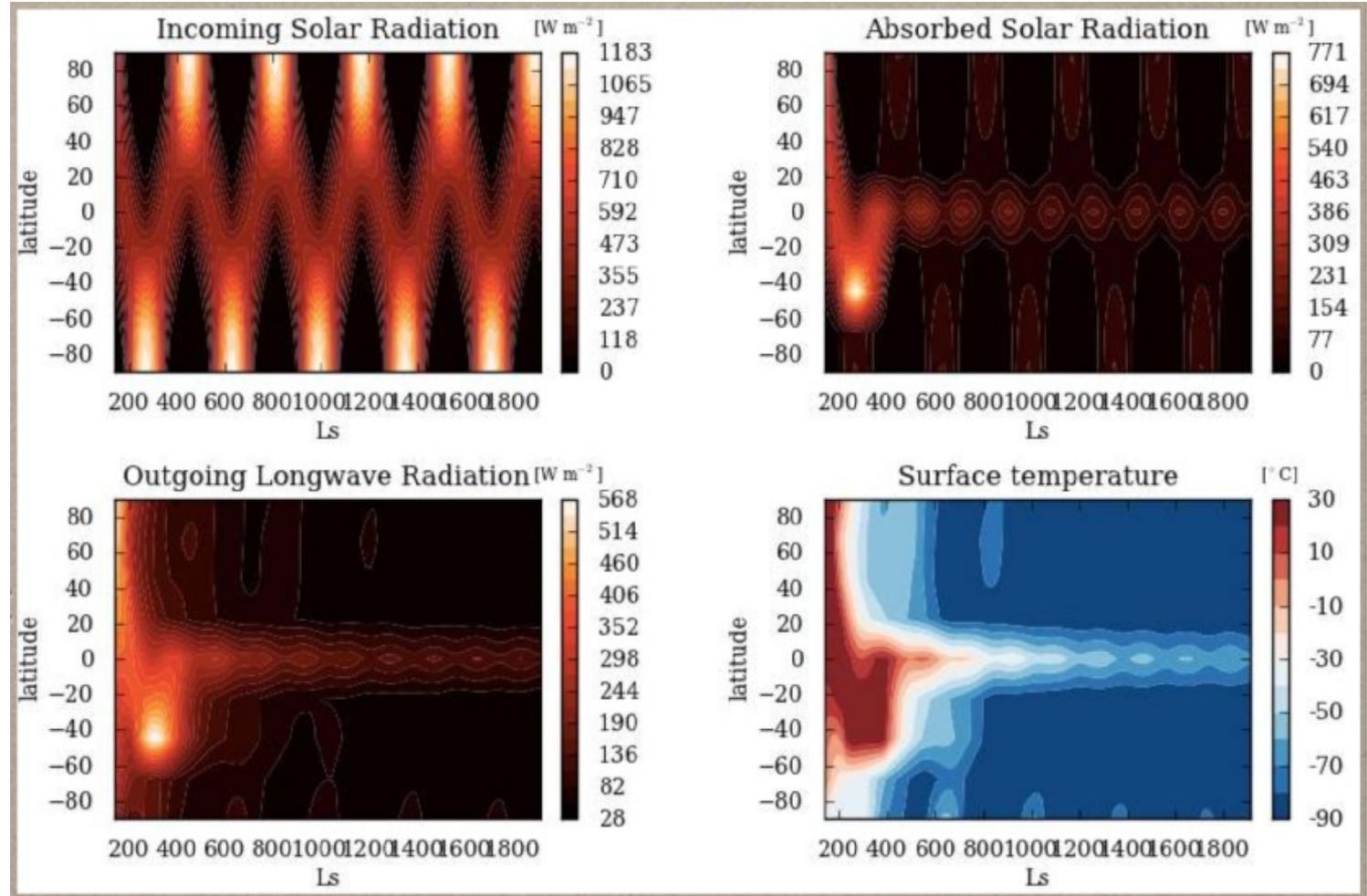


# Exemple : La Terre « boule de neige »

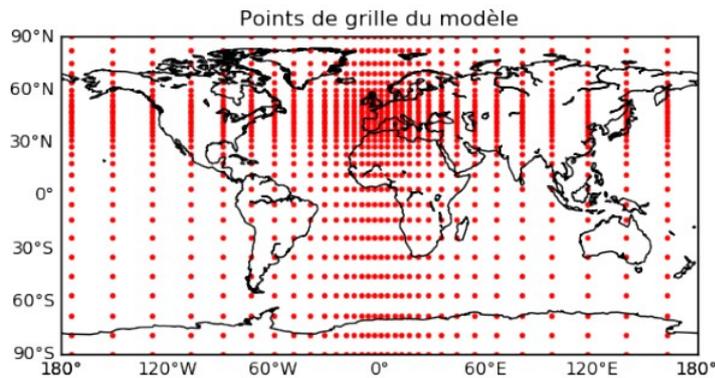


Albedo = 0.9  
 $p(\text{CO}_2) = 70 \text{ ppm}$   
 Obliquité =  $60^\circ$

« Terre englacée  
 peu vraisemblable »

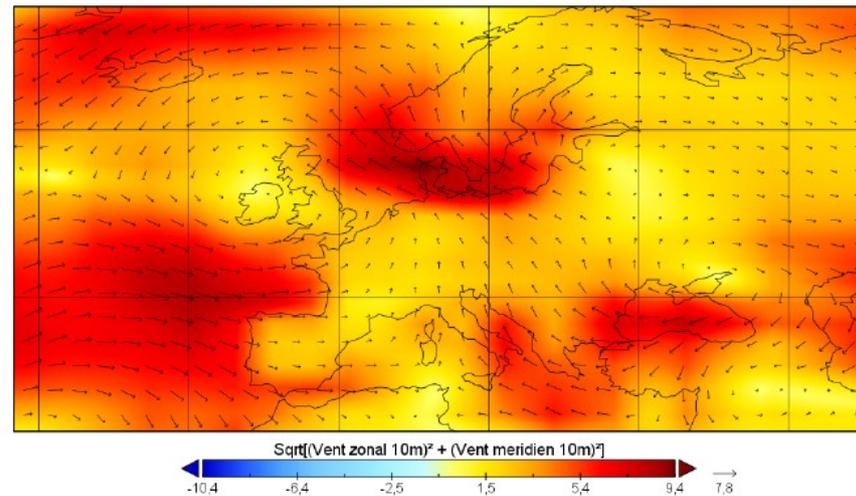


# Impacts climatiques et énergies

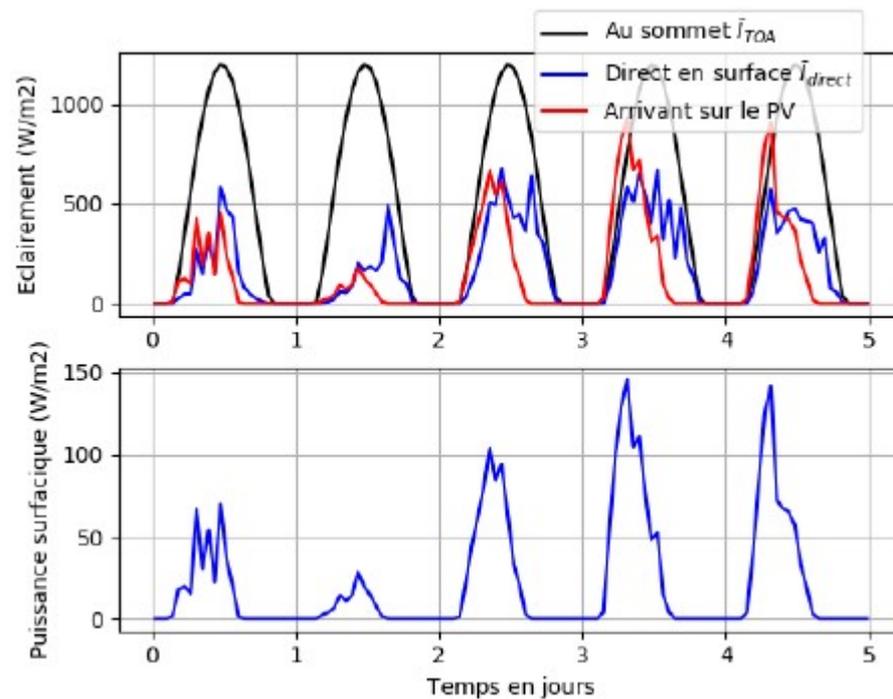
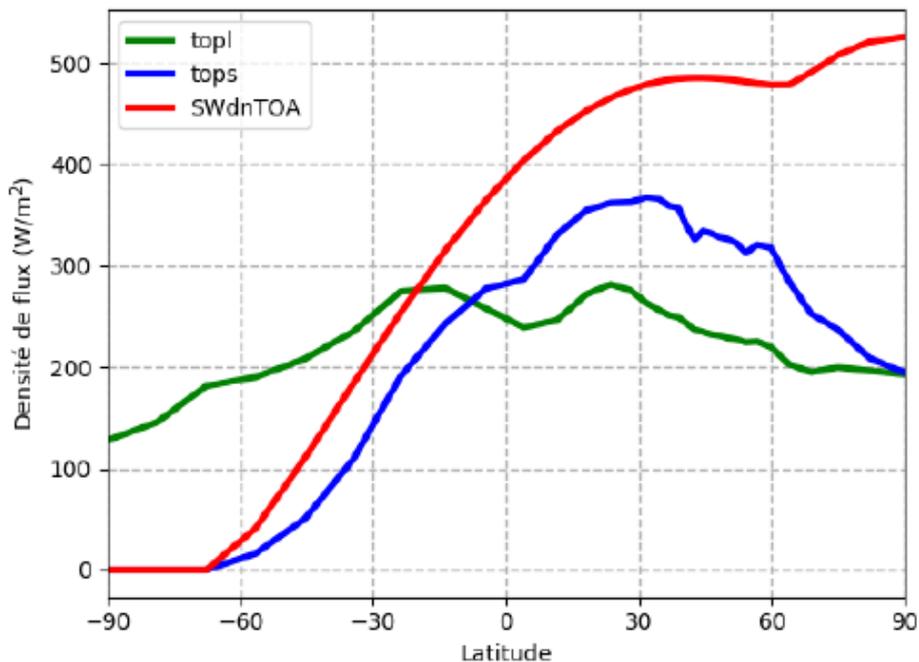


edu<sup>e</sup>earth

Vent zonal 10m



Bilan radiatif





<https://gitlab.in2p3.fr/ipsl/projets/pcmstudio/lmdz/generic>



<https://gitlab.in2p3.fr/ipsl/projets/pcmstudio/lmdz/earth>

```
Planetary Climate Modeling Studio - generic model - v1.2
```

```
A > Idealized  
B > Earth  
C > Mars  
D > Venus  
E > Titan  
F > Exoplanets  
R > Reset all settings  
1 : Edit config files  
2 : Setup tools  
3 : Source code patches  
4 : File operations  
5 : Recap all settings  
0 > Exit
```

Réalisation des simulations par un menu bash simple

```
Enter=Select, Navigate via Up/Down/First number/letter
```

# Environnement JupyterLab

The screenshot displays the JupyterLab environment. On the left is a file browser showing the directory structure: / ... / eduplanet / expnum\_deglaciation1000. The main area contains a terminal window with the prompt `tp20@merlin13` and a code editor displaying a meteorological plot. The plot is titled "Pression au niveau de la mer et vents à 10 m - 2020-12-11 00:00:00" and shows a global map with a color scale for pressure (hPa) ranging from 980.0 to 1025.0. The plot includes wind vectors and a color gradient representing pressure. Three arrows labeled a), b), and c) point to the file browser, the terminal, and the code editor respectively.

Visualisation des résultats par un ensemble de calepins Jupyter thématiques prêts à l'emploi

5. Regarder également `s1p` en moyenne zonale. Quel est le mois où la différence de pression au niveau de la mer est-elle la plus

# Sondage auprès des étudiants

- Sur 18 étudiants, 50 % trouvent l'interface « Facile d'utilisation, j'ai travaillé en quasi-autonomie » et 50 % « Adapté, mais je devais être aidé(e) par quelqu'un », personne ne trouve l'interface trop difficile à utiliser
- Note de 16/20 attribuée par les étudiants à l'outil
- Extraits de commentaires : « permet de relier directement nos **connaissances** avec la **pratique** », « le travail d'**exploration** était sympa et très formateur à mon sens »

# On aime



- « What I cannot create, I do not understand. »  
(R. Feynman)
- Flexibilité (1D, 3D, idéalisé, aquaplanet, terraplanet, slab ocean, Terre, planéto)
- Tout est prêt à l'emploi sur les mésocentres (mêmes outils que nos outils de recherche)
- On développe le matériel pédagogique ensemble (partage des sujets, des outils), on accède à tout le travail des étudiants
- Facile de travailler à distance, y compris pour les étudiants étrangers (il suffit d'un web browser)
- Les outils sont libres et utiles aux étudiants qui s'investissent volontiers (Linux, shell, Python...)
- Une plate-forme idéale pour le développement de paramétrisations (avant validation à plus haute résolution sur centre de calcul) ;

# Notre cœur de métier

- La culture des grands cycles climatiques, des processus physiques, des couplages
- La théorie de la modélisation (histoire de la modélisation, sciences numériques, paramétrisations et développement par « images physiques » et observation du monde réel)
- La pratique de la modélisation (porter un développement, débbugger)
- Le raisonnement intégré sur un système complexe
- Le réglage des modèles et l'apprentissage machine
- Le recul sur les implications (descente d'échelle, applications régionales, services climatiques)