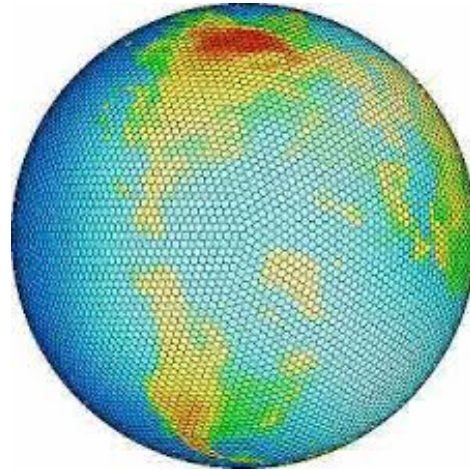


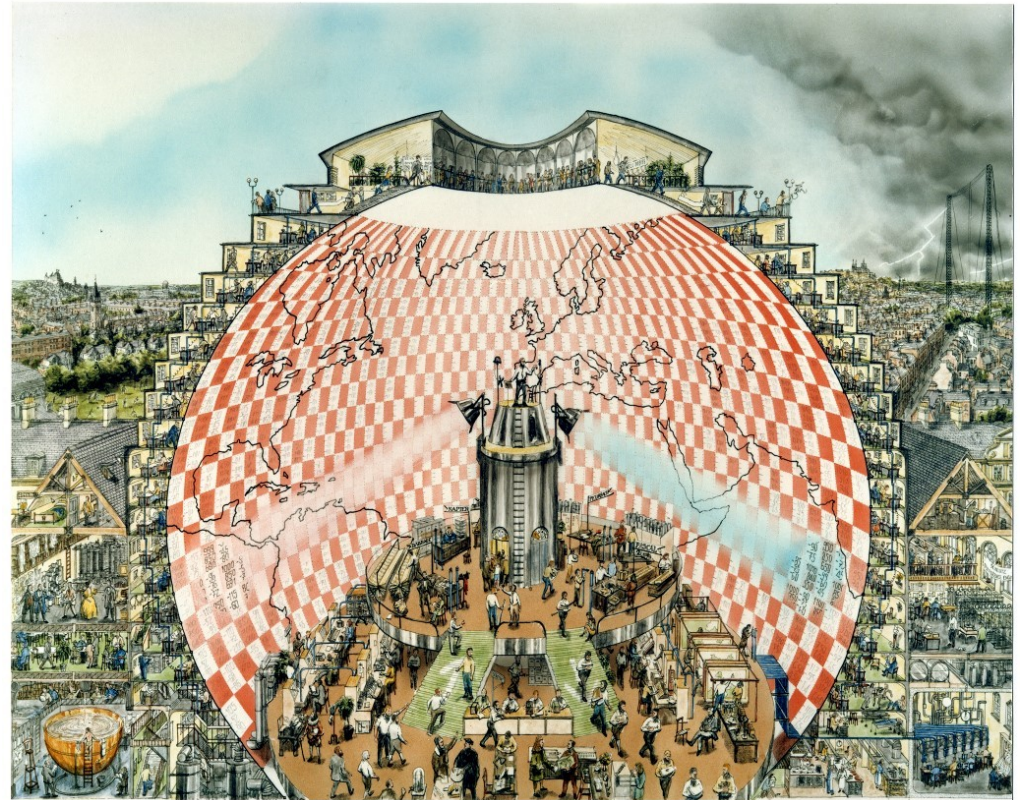


Les Modèles de Circulation Générale de l'Atmosphère : principes et développements



Étienne Vignon et toute l'équipe LMDZ

- 1922 : Lewis Fry Richardson : résolution « à la main » des équations de conservation sur une grille pour prévision du temps... mais c'est long
"Perhaps some day in the dim future it will be possible to advance the calculations faster than the weather advances"



Richardson's fantastic forecast factory, EMS

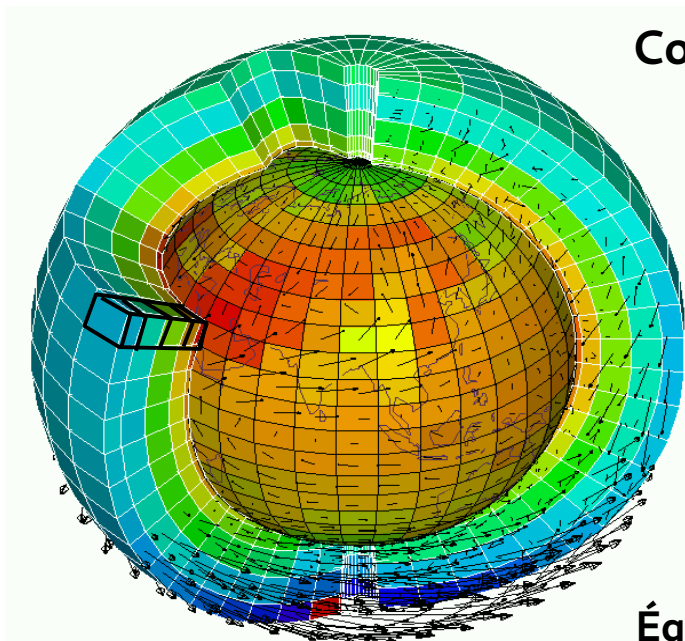
- 1922 : Lewis Fry Richardson : résolution « à la main » des équations de conservation sur une grille pour prévision du temps... mais c'est long
"Perhaps some day in the dim future it will be possible to advance the calculations faster than the weather advances"
- 1945 : Princeton University, John Von Neumann simulations d'explosion nucléaire avec des « ordinateurs digitaux» → parallèle avec la prévision du temps (dynamique des fluides)
- 1950 : première simulation 2D de prévision du temps par Jules Charney
"the calculation time for a 24-hour forecast was about 24 hours, that is, we were just able to keep pace with the weather."
- 1955 : premier modèle de circulation général par Norman Philipps (cylindre 17x16, 2 couches)



- 1922 : Lewis Fry Richardson : résolution « à la main » des équations de conservation sur une grille pour prévision du temps... mais c'est long
"Perhaps some day in the dim future it will be possible to advance the calculations faster than the weather advances"
- 1945 : Princeton University, John Von Neumann simulations d'explosion nucléaire avec des « ordinateurs digitaux » → parallèle avec la prévision du temps (dynamique des fluides)
- 1950 : première simulation 2D de prévision du temps par Jules Charney
"the calculation time for a 24-hour forecast was about 24 hours, that is, we were just able to keep pace with the weather."
- 1955 : premier modèle de circulation général par Norman Philipps (cylindre 17x16, 2 couches)
- 1960 : Groupe de Smagorinsky et Syukuro Manabe : développement d'un GCM à partir d'équations primitives (GFDL)
- 1965 : premier GCM avec processus physiques (rayonnement)
- 1961 : Parallèlement à UCLA, Akio Arakawa travaille sur numérique et sur les premières « paramétrisations » de nuages
- 1965-1975 : effet du doublement du CO₂ sur la température (Manabe et Wetherald) → 3.5 K
- 1979 : Rapport Charney
- 1990 : premier rapport du GIEC
- 2022 : 6ème rapport du GIEC : ~ 60 General Circulation Models (GCM)



Syukuro Manabe, prix Nobel de physique 2022



Coeur DYNAMIQUE: équations primitives sur la sphère

- Mass conservation
 $D\rho/Dt + \rho \operatorname{div}\underline{U} = 0$
- Potential temperature conservation
 $D\theta / Dt = 0$
- Momentum conservation
 $D\underline{U}/Dt + (1/\rho) \operatorname{grad}p - g + 2 \underline{\Omega} \wedge \underline{U} = 0$
- Secondary components conservation
 $Dq/Dt = 0$

Équations primitives de la dynamique des fluides

→ Approximation "atmosphère mince"

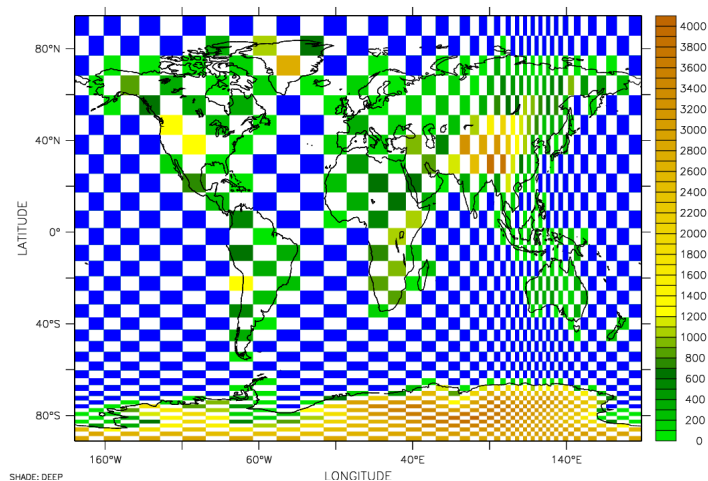
→ Approximation hydrostatique pour la plupart (**valide jusqu'à 10-20 km**)

Traitement numérique des équations:

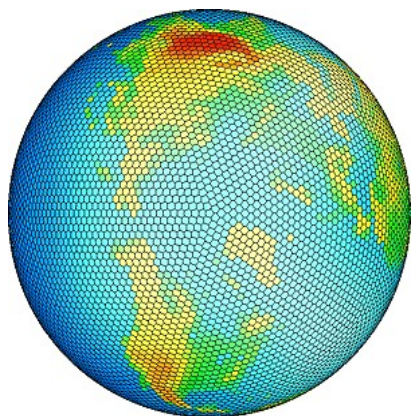
→ Discrétisation en points de grille ou approches spectrales

→ Garantir la **conservation** de certaines quantités cruciales (masse, eau, entropie ou énergie...)

Coeur DYNAMIQUE: équations primitives sur la sphère



- Mass conservation
 $D\rho/Dt + \rho \operatorname{div}\underline{U} = 0$
- Potential temperature conservation
 $D\theta / Dt = 0$
- Momentum conservation
 $D\underline{U}/Dt + (1/\rho) \operatorname{grad}p - g + 2 \underline{\Omega} \wedge \underline{U} = 0$
- Secondary components conservation
 $Dq/Dt = 0$



Équations primitives de la dynamique des fluides

→ Approximation "atmosphère mince"

→ Approximation hydrostatique pour la plupart (**valide jusqu'à 10-20 km**)

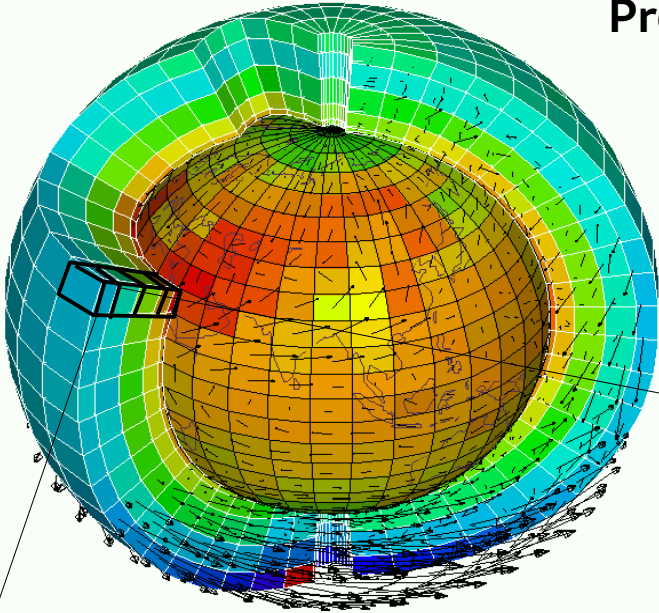
Traitement numérique des équations:

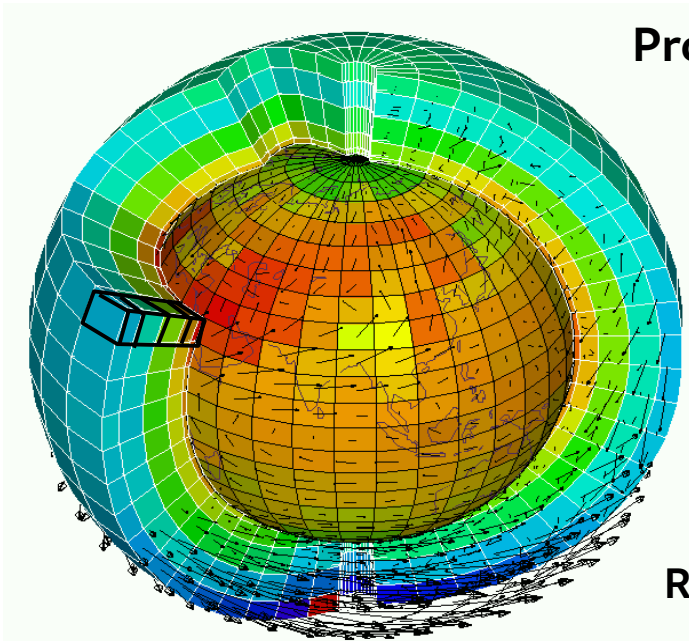
→ Discrétisation en points de grille ou approches spectrales

→ Garantir la **conservation** de certaines quantités cruciales (masse, eau, entropie ou énergie...)

Processus PHYSIQUES non résolus par la DYNAMIQUE

- Mass conservation
 $D\rho/Dt + \rho \operatorname{div}\underline{U} = 0$
- Potential temperature conservation
 $D\theta / Dt = Q / C_p (p_0/p)^\kappa$
- Momentum conservation
 $D\underline{U}/Dt + (1/\rho) \operatorname{grad}p - g + 2 \underline{\Omega} \wedge \underline{U} = \underline{F}$
- Secondary components conservation
 $Dq/Dt = Sq$





Processus PHYSIQUES non résolus par la DYNAMIQUE

- Mass conservation
 $D\rho/Dt + \rho \operatorname{div}\underline{U} = 0$
- Potential temperature conservation
 $D\theta / Dt = Q / C_p (p_0/p)^\kappa$
- Momentum conservation
 $D\underline{U}/Dt + (1/\rho) \operatorname{grad}p - g + 2 \underline{\Omega} \wedge \underline{U} = \underline{F}$
- Secondary components conservation
 $Dq/Dt = S_q$

Rôle des PARAMÉTRISATIONS SOUS-MAILLE :

Termes source/puit dans les équations

- Q : chauffage par condensation, évaporation, turbulence sous-maille
- \underline{F} : freinage/accélération par mouvements turbulents sous-maille
- S_q : condensation/sublimation, réactions chimiques, microphysique nuageuse, turbulence

Modèles: identiques ou quasi-identiques (développement commun)

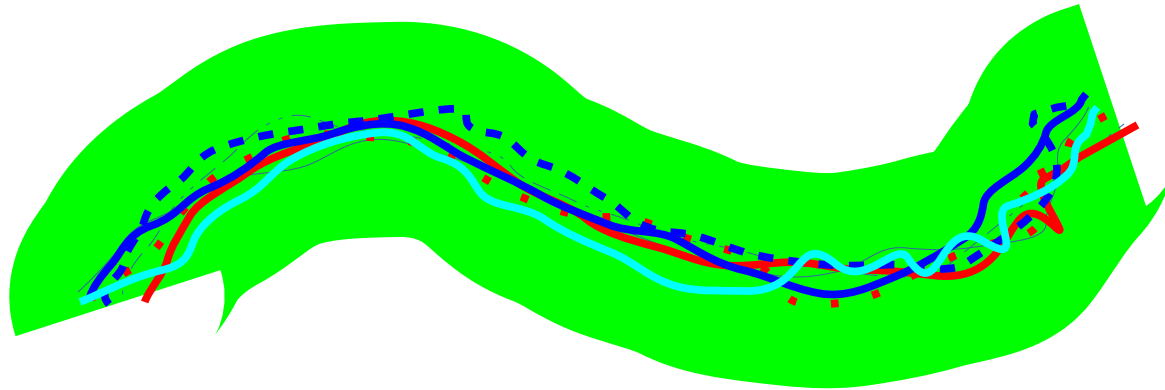
Résolutions et certaines paramétrisations (nuages) différentes

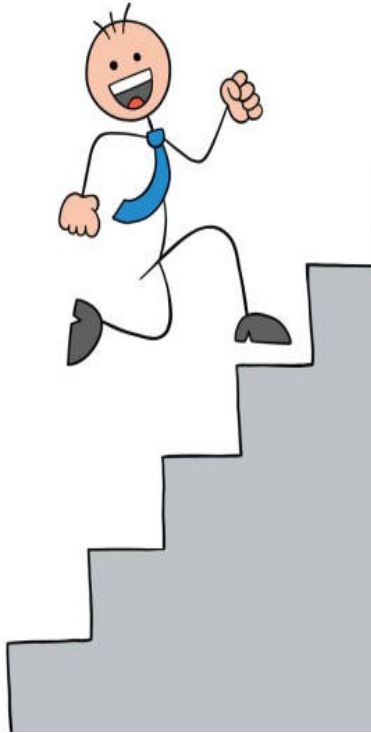
Conditions initiales vs conditions aux limites :

→ Assimilations pour modèles de PNT

→ Étude de l'attracteur (le climat) par l'analyse de statistiques sur plusieurs années et effet des forçages

Métriques (objectifs) différentes lors du développement (scores vs conservations)





Monde des apparences:

Météorologie, climat, composition chimique

Théories :

Mécanique des fluide, thermodynamique, chimie, interactions gaz-rayonnement

Mathématiques

Équations primitives, lois thermodynamiques, lois de transfert radiatif ...

Numerique

Discrétisation, différences/volumes/éléments finis, méthodes spectrales
conservation/précision/dispersion

Informatique

Fortran/Linux, HPC (cpu, gpu...), post-processing

Avant de toucher un ordinateur