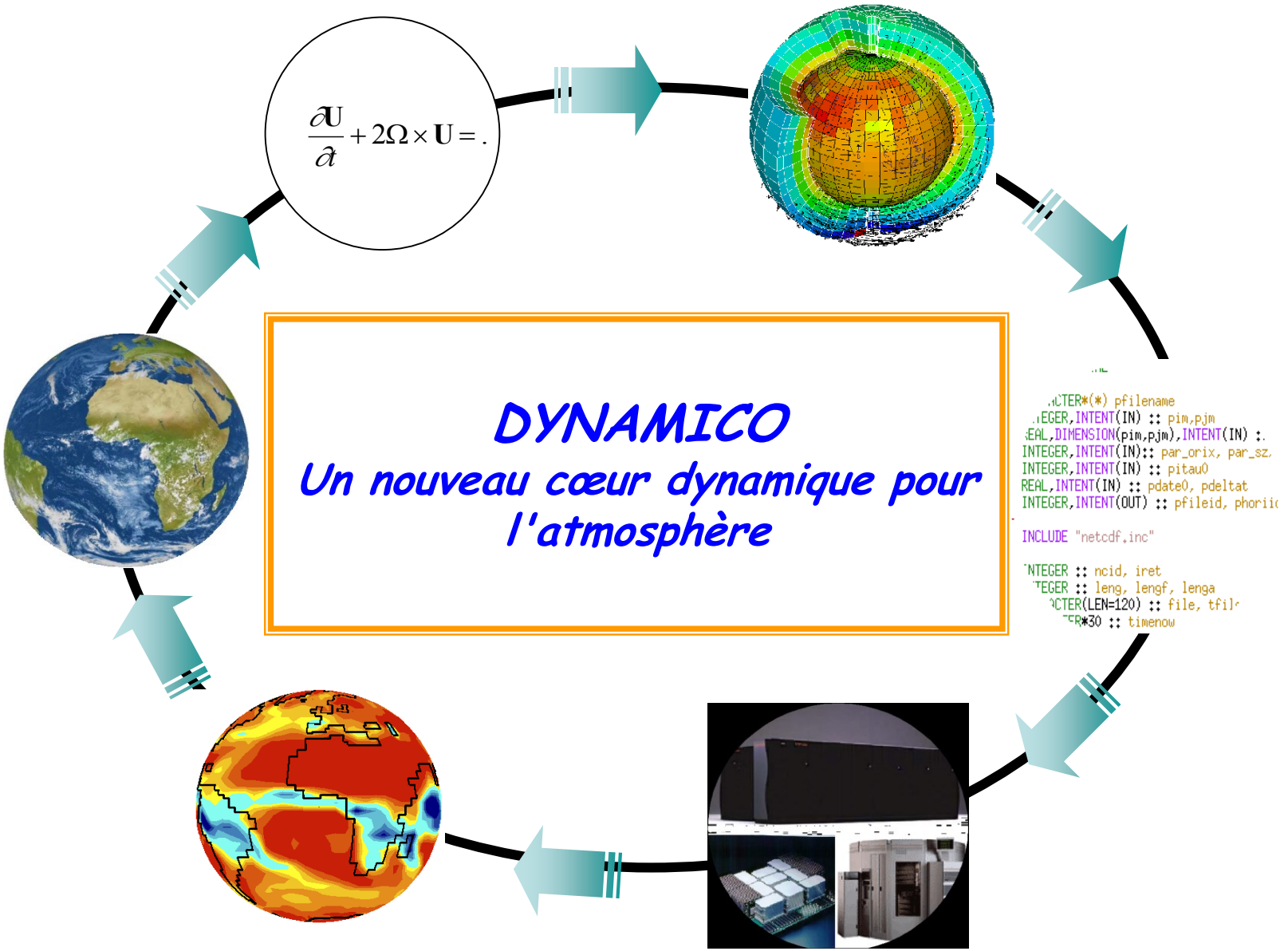
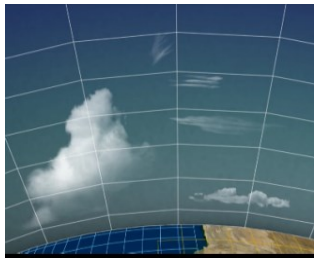
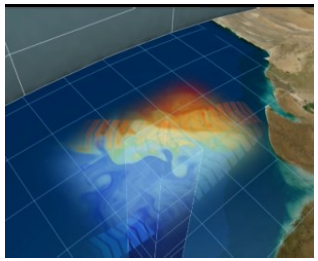
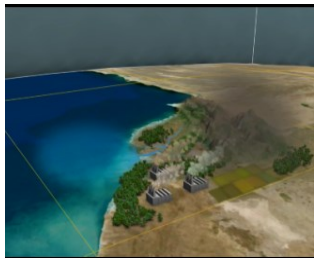
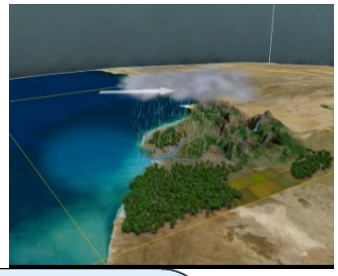

$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + 2\Omega \times \mathbf{U} = .$
DYNAMICO
Un nouveau cœur dynamique pour l'atmosphère
INCLUDE "netcdf.inc"

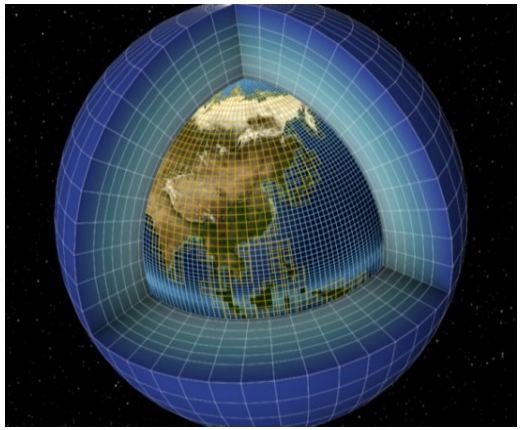
Le modèle couplé "Système-Terre" de l'IPSL

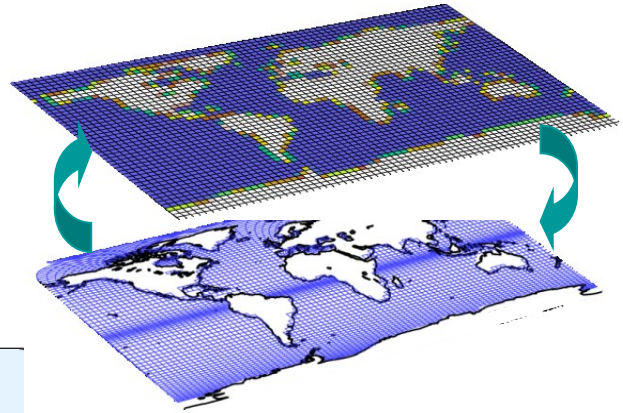
(LSCE/LATMOS) **INCA / REPROBUS** (chimie atmosphérique) (aérosol)

(LMD) **LMDZ** (atmosphère)

ORCHIDEE (surfaces continentales) (végétation) (LSCE/LMD)



(CERFACS) **OASIS** (coupleur)



OPA (océan) **LIM** (glace de mer)

PISCES (biogéochimie marine)

NEMO (LOCEAN)

Un exemple d'étude climatique : les exercices CMIP

Quantifier l'effet de la hausse des émissions de gaz à effet de serre sur le réchauffement climatique global.

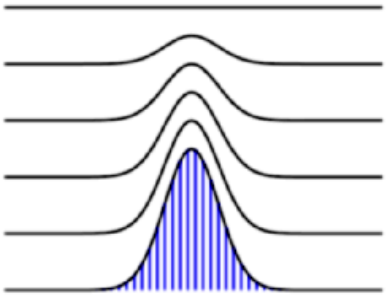
- CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Projet phase 5 - 2013) IPCC AR5 (Intergovernmental Panel Climate Change, Assesment Report 5)
  - Simulations "centennales" passées et futures
    - 20 et 21ème siècle, dernier millénaire, paléoclimat
    - 167 expériences, 25000 ans simulés, 2 Po de données dont 0.5 Po distribuées
    - 3 ans calculateurs vectoriel SX9 (mercure 48 procs) éq. 2 millions d'heures Curie
    - Fichiers à fréquence mensuel, journalière et haute fréquence (6h).
      - 800+ variables par fichiers + métadonnées associées
      - **5 Millions de fichier générés, 2 Po de données stockées et distribuées.**

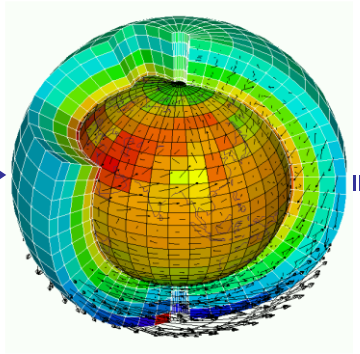
- CMIP 6 : 2017~ 2019
  - => x 7 sur volume données générées
    - **14 Po de données**
    - **300 Millions d'heures sur Curie** (TGCC)

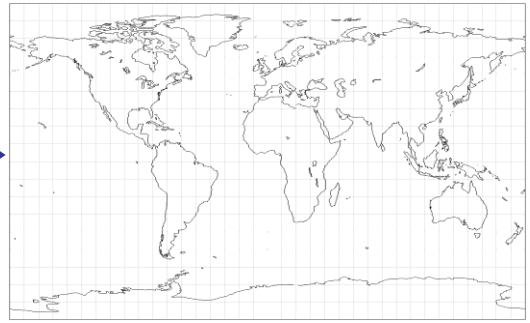
Modèle de circulation atmosphérique : LMDZ

80% - 90% du temps de calcul

- Cœur dynamique : résolution des équations de Navier-Stocke sur la sphère en milieu tournant (Coriolis) + qq hypothèses (couche mince, approximation hydrostatique) => équations primitives
- Partie physique : interactions au sein d'une même colonne d'atmosphère : rayonnement, convection, nuages, précipitations, couche limite...

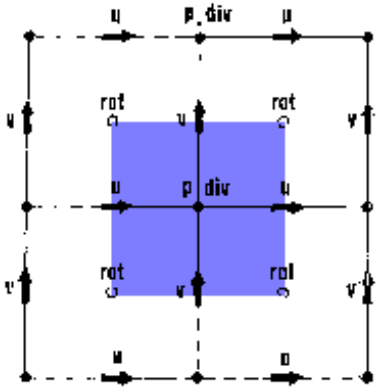






Coordonnée verticale hybride σ-pression

Grille régulière longitude-latitude



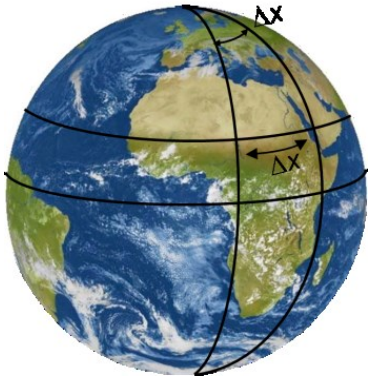
Grille alternée (Grille C)

Schéma conservatif d'ordre 2 (Sadourny 75)

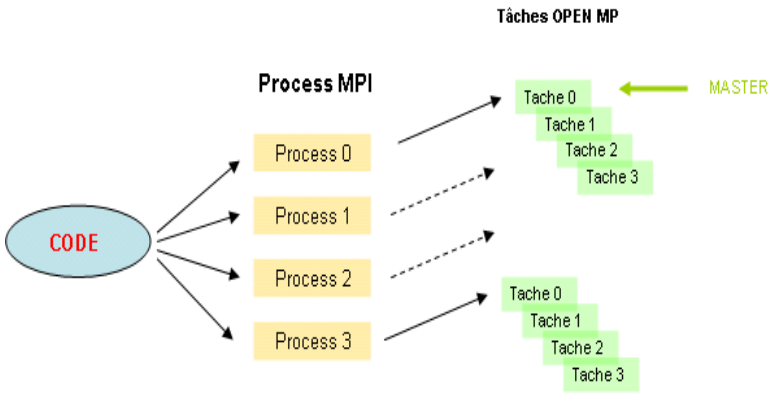
Conservation de la masse et de l'énergie/enstrophie

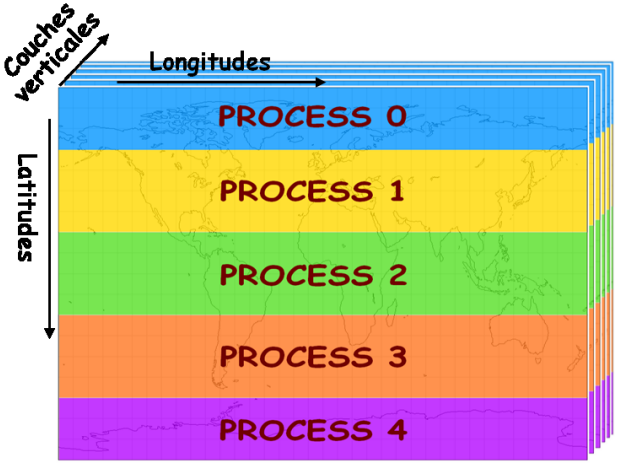
Le problèmes des pôles…

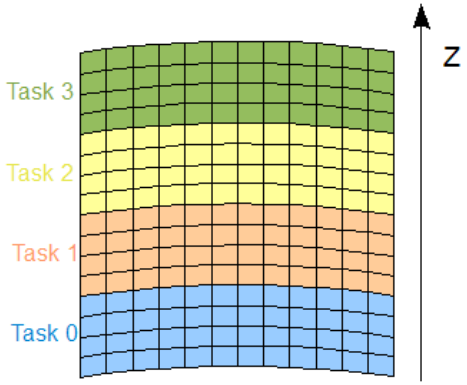
- 2 points singuliers aux pôles
  - Violation des critères de stabilité CFL
  - Filtrage des courtes longueurs d'ondes près des pôles



- Parallélisme hybride MPI-OpenMP
  - Découpage MPI sur la latitude
  - Tâches OpenMP sur la verticale



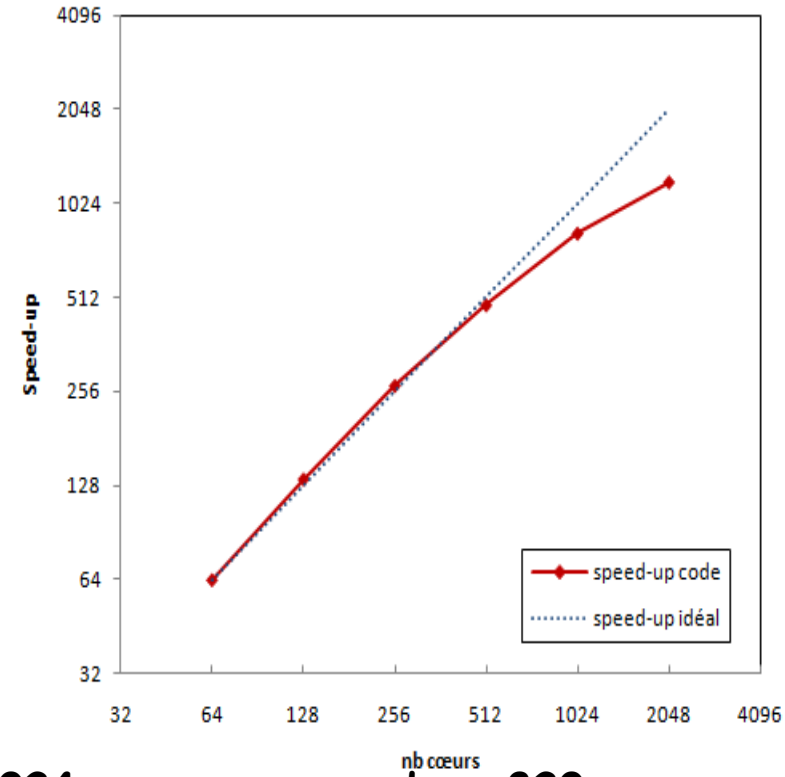


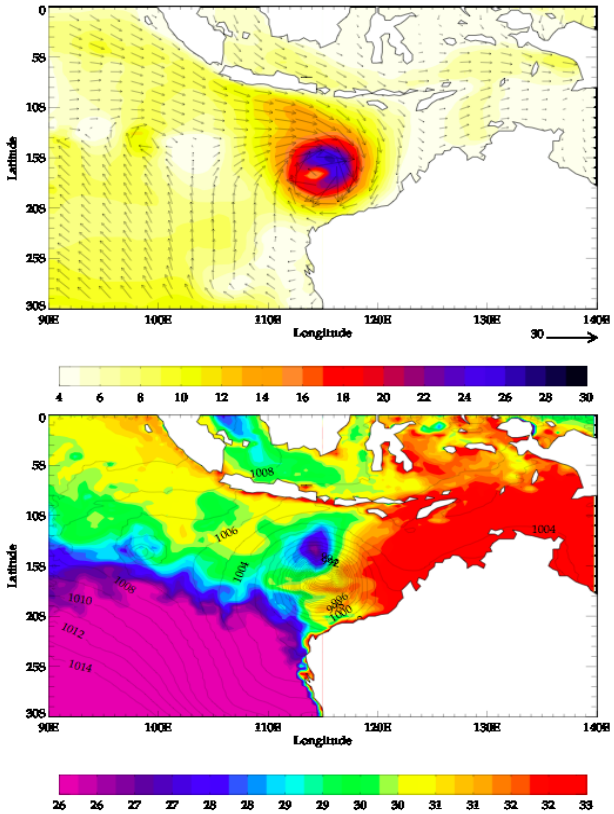


- Impact des points singuliers aux pôles sur le parallélisme
  - Découpage 1D sur l'horizontale
  - Déséquilibrage de charge
  - Traitements spécifiques aux pôles, couteux en temps CPU

Le grand Défi du CINES (2010)

- 30 ans de modèle couplé à haute résolution
  - 25 km océan ($\frac{1}{4}°$), 30 km atmosphère (1/3°) : grille 768x767x39
  - 2200 cœurs de calcul (2048 atmosphère, 128 océans





- **1024 cœurs: ~ speed-up 820**
- **2048 cœurs : ~ speed-up 1200**
- **Difficile de dépasser les 10 000 cœurs…**

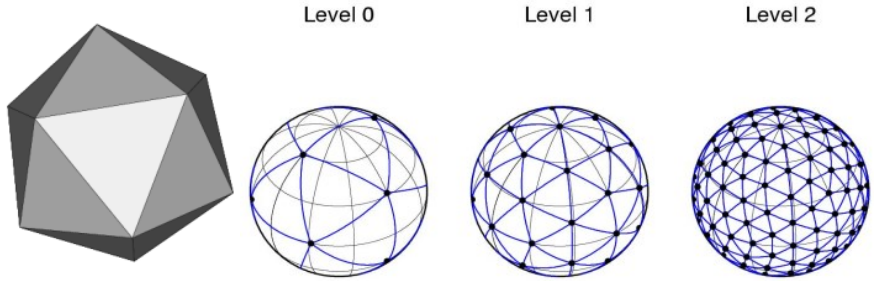
Le projet DYNAMICO

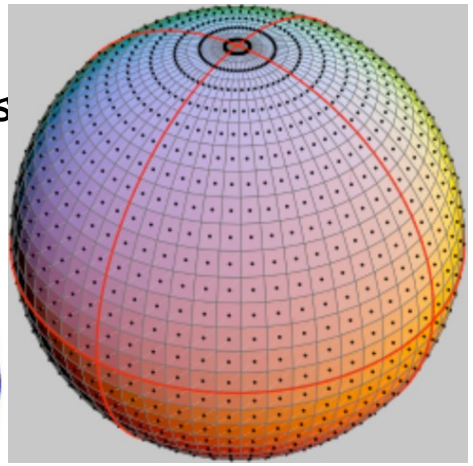
Principaux objectifs

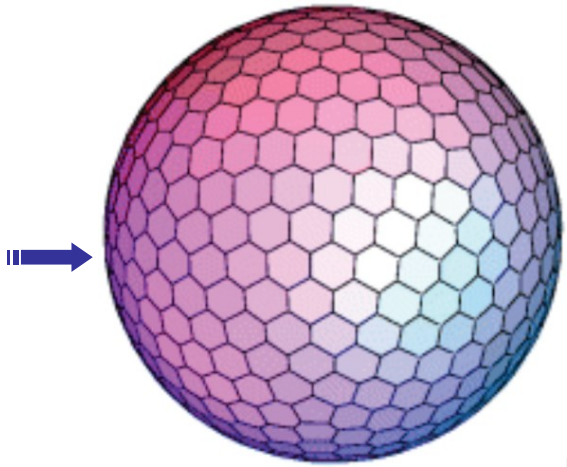
- Ouvrir la voie vers l'exascale et supprimer les goulets d'étranglement dus aux points singuliers du maillage
  - Basculer LMDZ vers une grille quasi-uniforme
- Se préparer aux architectures de supercalcul du futur
  - GPU, many cores, vectorisation, I/O…
- Préserver les caractéristiques actuelles du dycore de LMDZ (conservations…)
- Développer une version non-hydrostatique pour la très haute résolution (<10km)

Migrer vers une grille icosaédrique à mailles hexagonales

- Obtenue par raffinement successif de l'icosaèdre
  - Discrétisation sur le maillage dual
  - Hexagones et de 12 pentagones
- Supression de la singularité aux pôles
  - Maillage quasi-uniforme







Revisiter nos schémas numériques sur la sphere

- Coeur hydrostatique (pour le moment) sur grille C

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \frac{\partial W}{\partial \eta} + \nabla_\eta \cdot (\overline{m}^h u) \qquad m = -\frac{1}{g}\frac{\partial p}{\partial \eta}$$

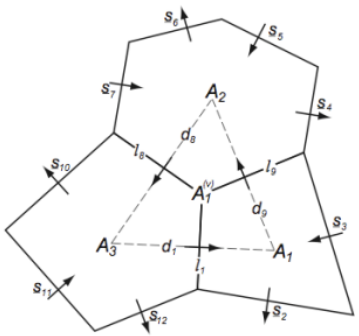
$$\frac{\partial mq}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \eta}(W\overline{q}^v) + \nabla_\eta \cdot (U\overline{q}^h) = S_q$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \eta} + g\frac{m}{\overline{\rho}^v} = 0$$

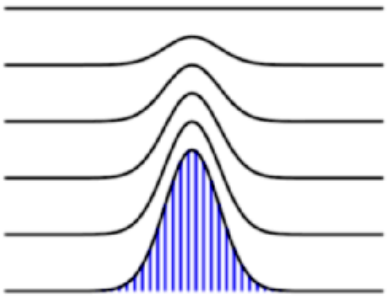
$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\overline{\frac{\partial u}{\partial \eta}}^v \overline{W}^{vh}}{\overline{m}^h} + \overline{(f + \nabla_\eta \times u) \times u}^{TRiSK} + \nabla_\eta \left(\frac{\overline{u^2}^h}{2} + \Phi \right) + \overline{\theta}^h \nabla_\eta \pi = S_u$$

Schéma TRISK
Thuburn at al.(2010)
Ringler et al. (2010)

Grille alternée
(type C Arakawa)

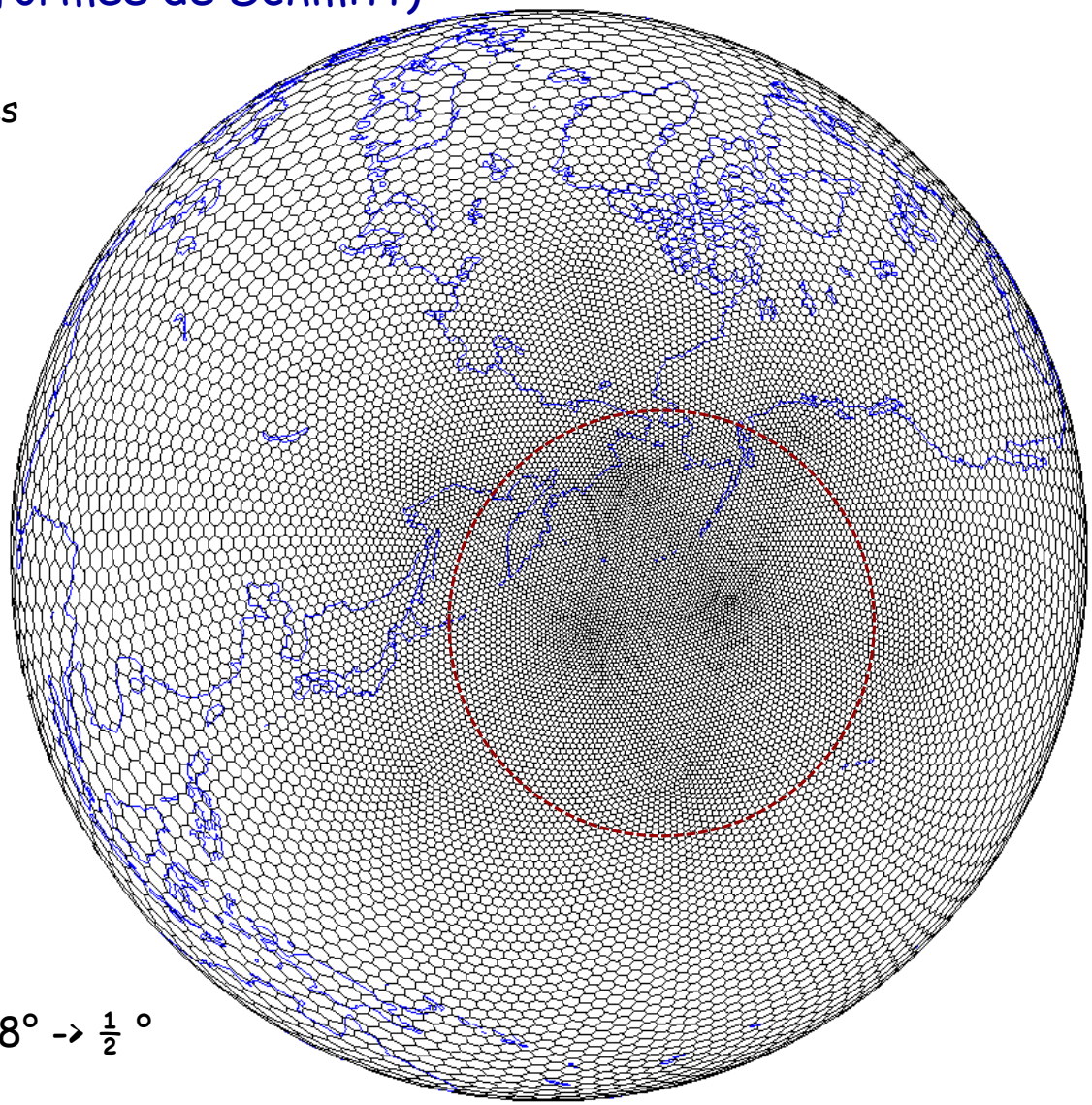


- Nouveaux schémas numériques "TRISK"
  - Généralisation des schémas type "Sadourny" aux maillages non structurés
  - 2nd ordre, conservation de la masse et de l'énergie
- Transport 2nd ordre défini positif, volume fini à limiteur de pente)
- Discrétisation vertical similaire à LMDZ (hybride σ-pression)
- Dissipation (viscosité) explicite 4ème ord (bi-laplacien)
- Schéma d'intégration temporelle explicite (RK4, ARK 2.5)



Zoom sur région d'intérêt

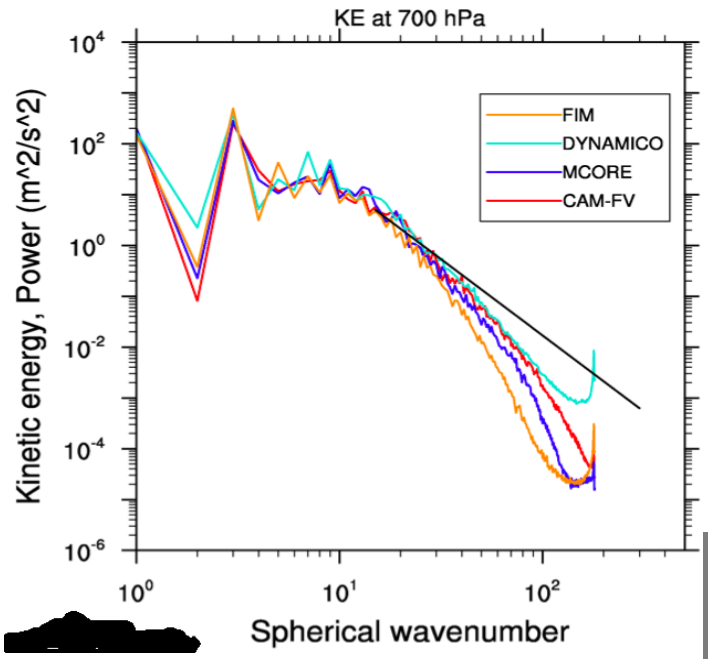
- Etirement de la grille (transformée de Schmitt)
  - Transformation conforme
    - Ajustement des termes métriques



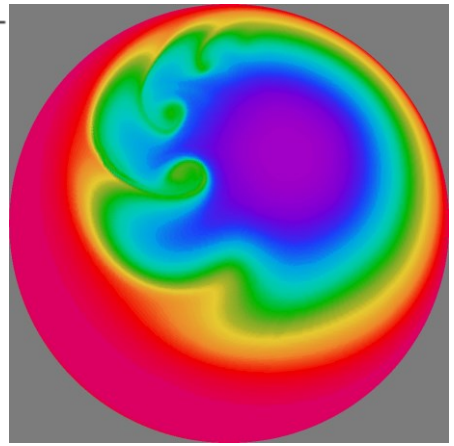
- Exemple : résolution 8° -> $\frac{1}{2}$ °

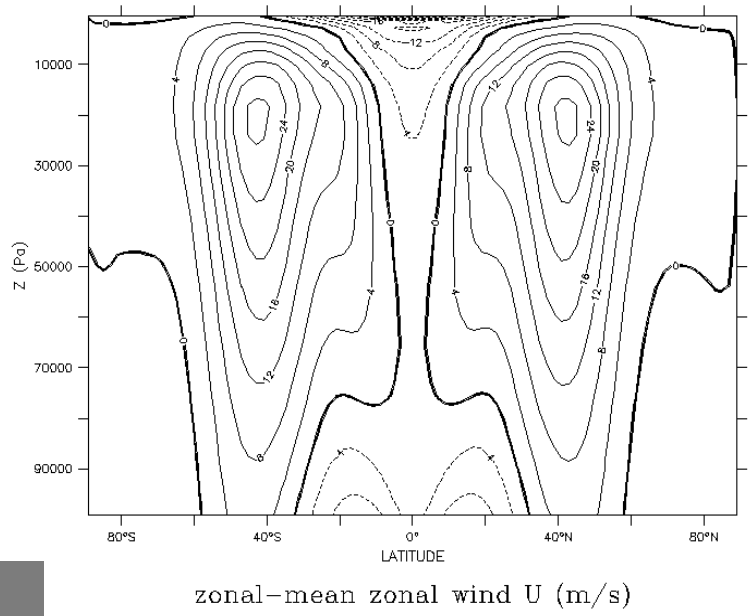
Cas tests académiques

- Exercices DCMIP : Dynamical Core Model Intercomparaison Project
  - Participation à DCMIP 2012 et DCMIP 2016 (Boulder)



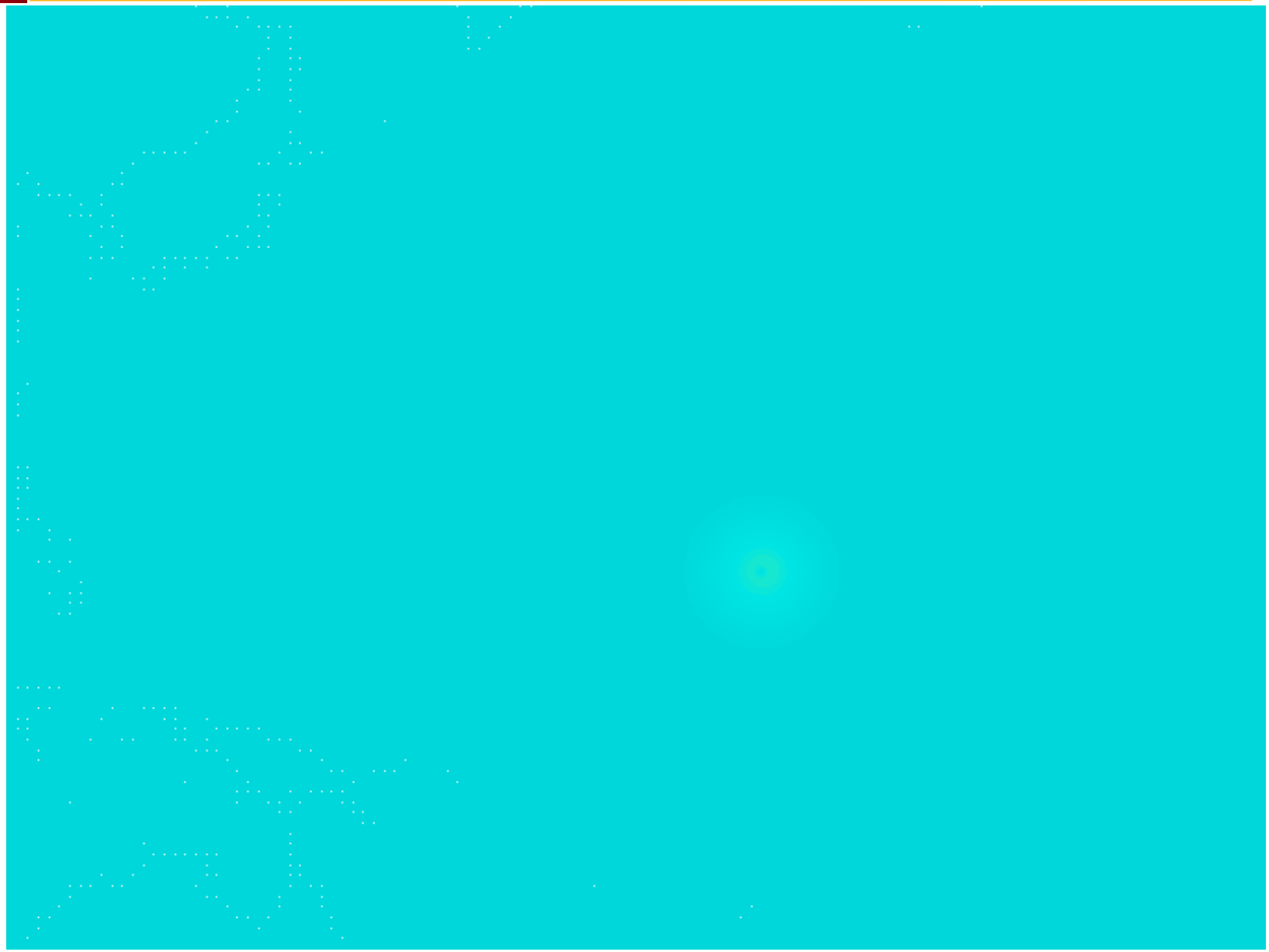
Short term test case (30 days)
Baroclinic instability (C. Jablonowski)
Kinetic energy spectra





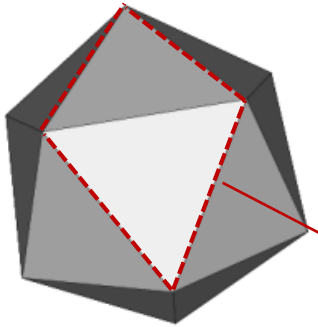
Long term climatic test case (1000 days)
Held-Suarez test case

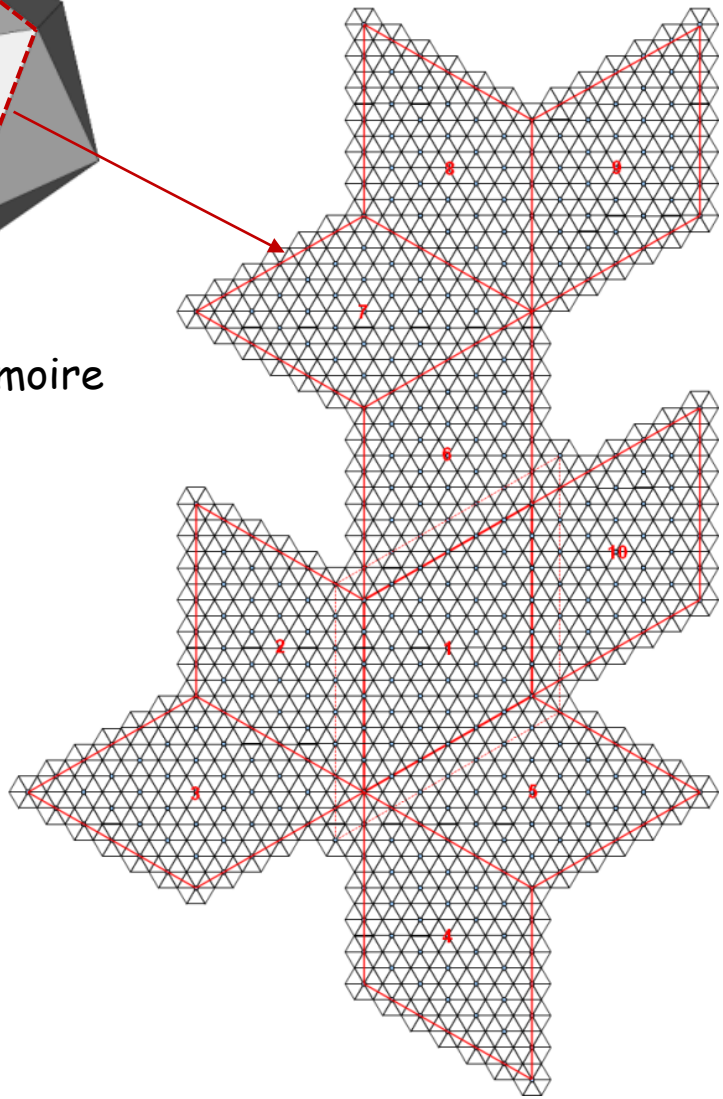
DCMIP 2016 : cas test CYCLONE



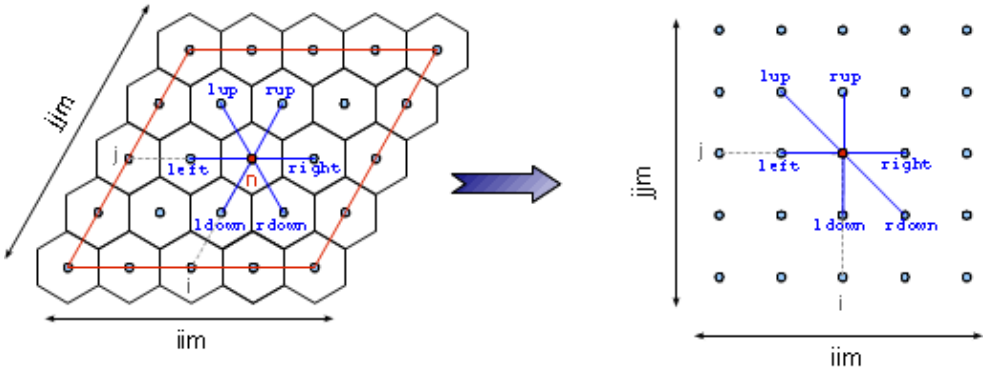
Structure des données en mémoire

- Maillage semi-structuré
  - Triangles principaux appariés 2 à 2
  - 10 tuiles-losanges pavé d'hexagones
  - Mappées sur des tableaux 2D réguliers





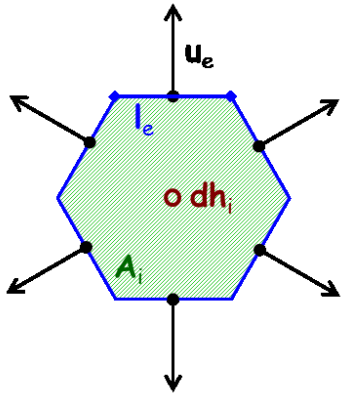
- Préserve la localité des données
  - Accès aux voisins avec un offset constant en mémoire quelque soit la maille
  - Accès contigu à la mémoire
  - Optimisation des accès mémoires et du cache
  - Vectorisation (Xéon Φ & GPU)



Exemple de stencil : opérateur divergence

```
      DO l=1,llm     ! loops on vertical levels
        DO ij=ij_begin,ij_end    ! Loops on horizontal layer
          dhi(ij,l)=-1./Ai(ij)*(   ue(ij+u_right,l) * le(ij+u_right)    &
                                 - ue(ij+u_rup,l)    * le(ij+u_rup)      &
                                 + ue(ij+u_lup,l)    * le(ij+u_lup)      &
                                 - ue(ij+u_left,l)   * le(ij+u_left)     &
                                 + ue(ij+u_ldown,l)  * le(ij+u_ldown)    &
                                 - ue(ij+u_rdown,l)  * le(ij+u_rdown))

        ENDDO
      ENDDO
```



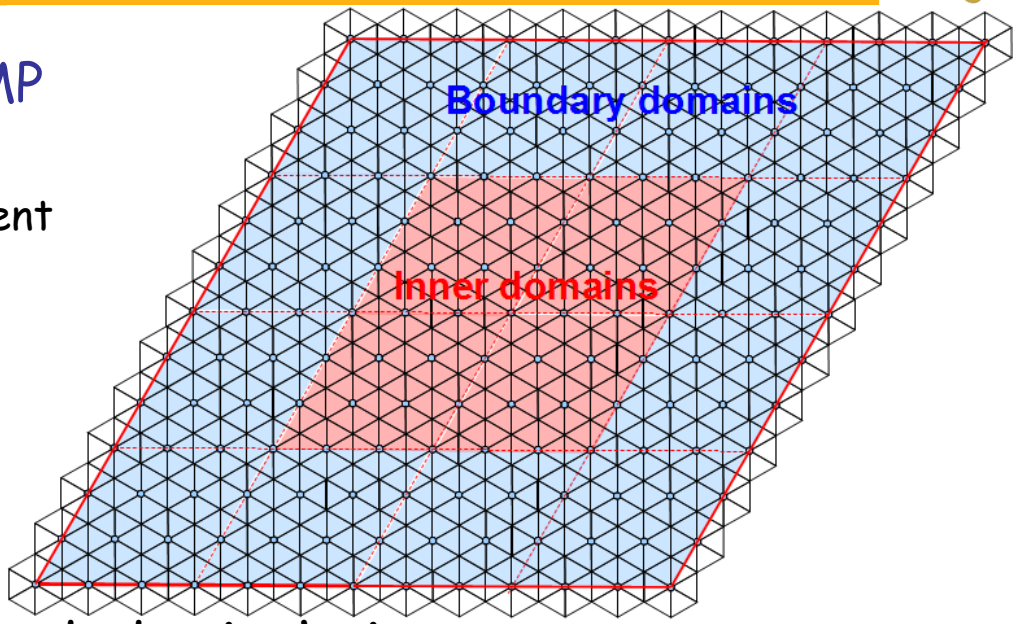
- Boucles 100% vectorielles
- Pas de traitement particulier pour les pentagones
  - Ajustement des termes métriques : ex : ***le = 0*** pour un des coté de l'hexagone
- Déroulement de la boucle horizontale sur une seule dimension => longs vecteurs

DYNAMICO vectoriel à 99.7 %

- **~ 60% de la performance crête sur calculateur vectoriel NEC SX8**

Approche hybride MPI/OpenMP

- Un losange se décompose trivialement en sous-losange



3 Niveaux de parallélisme

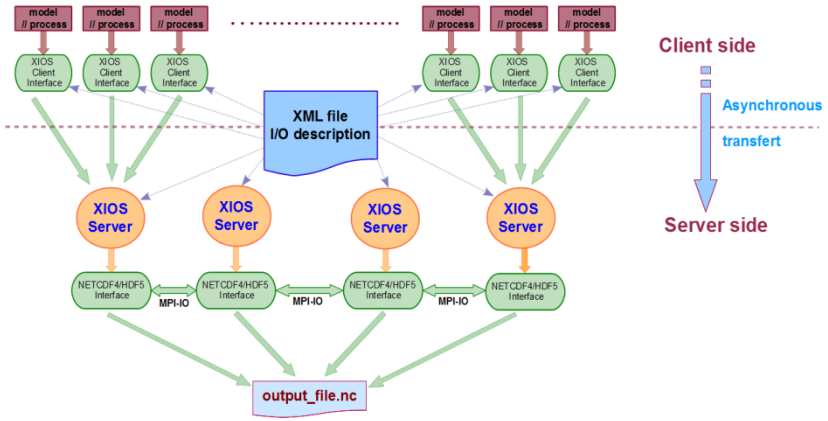
- **Parallélisme MPI par décomposition de domaine horizontaux**
  - Transfert des halos de recouvrement par communication MPI
- **Parallélisme OpenMP par distribution de domaines horizontaux**
  - Chaque tâche (thread) reçoit un domaine
  - Transfert des halos par mémoire partagée
- **Parallélisme OpenMP sur la verticale (mémoire partagée)**
  - Ajout de directives OpenMP sur les boucles verticales

Plusieurs centaines de threads par processus MPI

- => futures architectures many-cores (ex: Xeon Φ)

I/O : XIOS

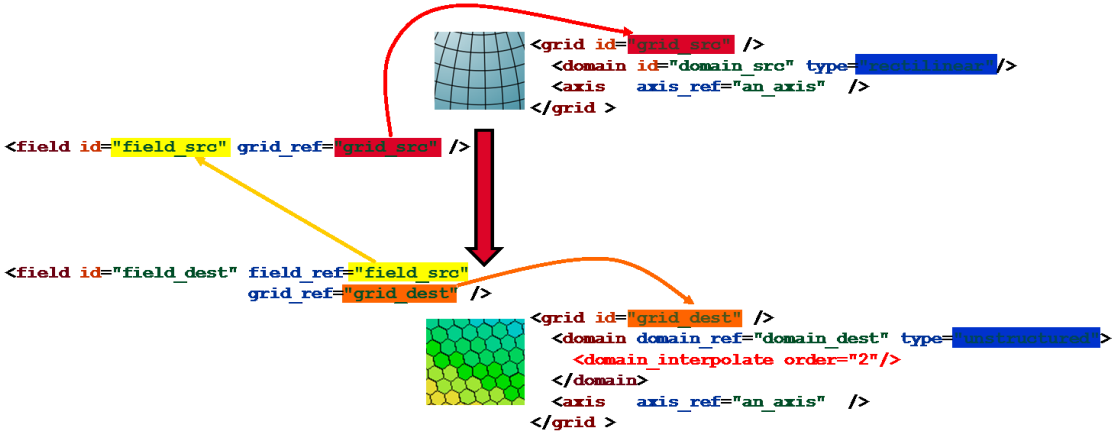
I/O serveur parallèle et post-traitement "In Situ"

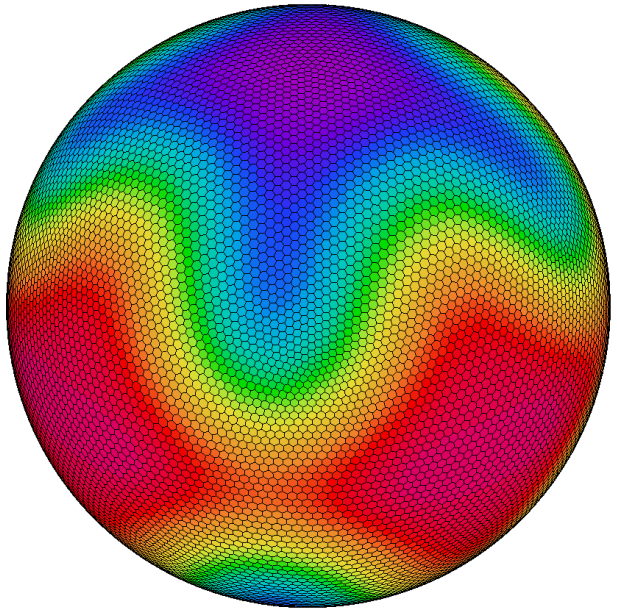


- Description du workflow par un fichier XML externe
- Serveurs I/O asynchrones dédiés aux lectures/écritures
- Lectures / écritures parallèles
- Gestion des grilles non-structurées
- Bonne scalabilité sur des milliers de cœurs de calcul

- Interpolation à la volée :

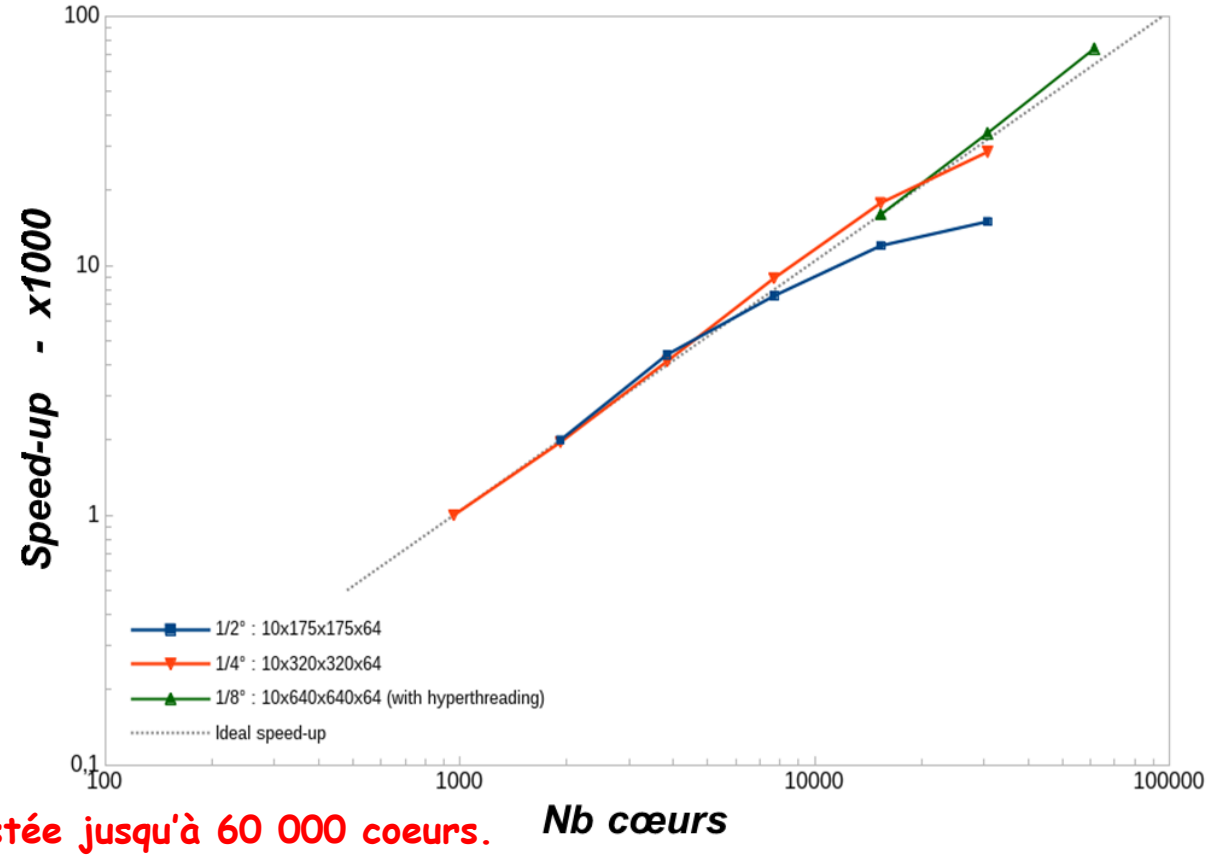
grille non structurée / grille régulière





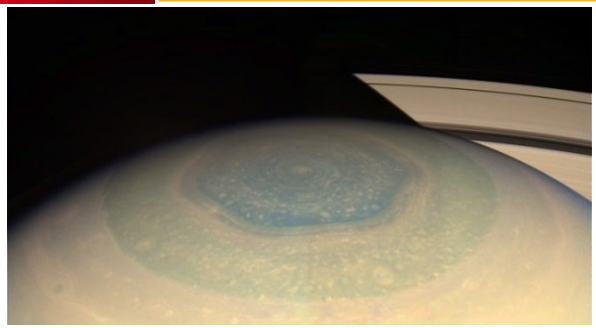
Etudes atmosphériques de géantes gazeuses (A. Spiga et al., LMD)

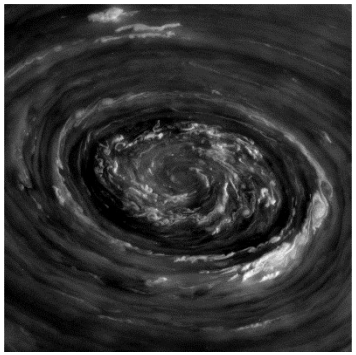
- Grand défi du CINES 2015 : Simulation à très haute résolution de l'atmosphère de Saturne
  - 11 Millions d'heures consommées sur 2 mois, 12 000 cœurs, 80 To de données générées.
    - Très hautes résolutions : $\frac{1}{2}°$, $\frac{1}{4}°$ et 1/8° (12 km éq. terrestre : 4 096 000 x 64 mailles)

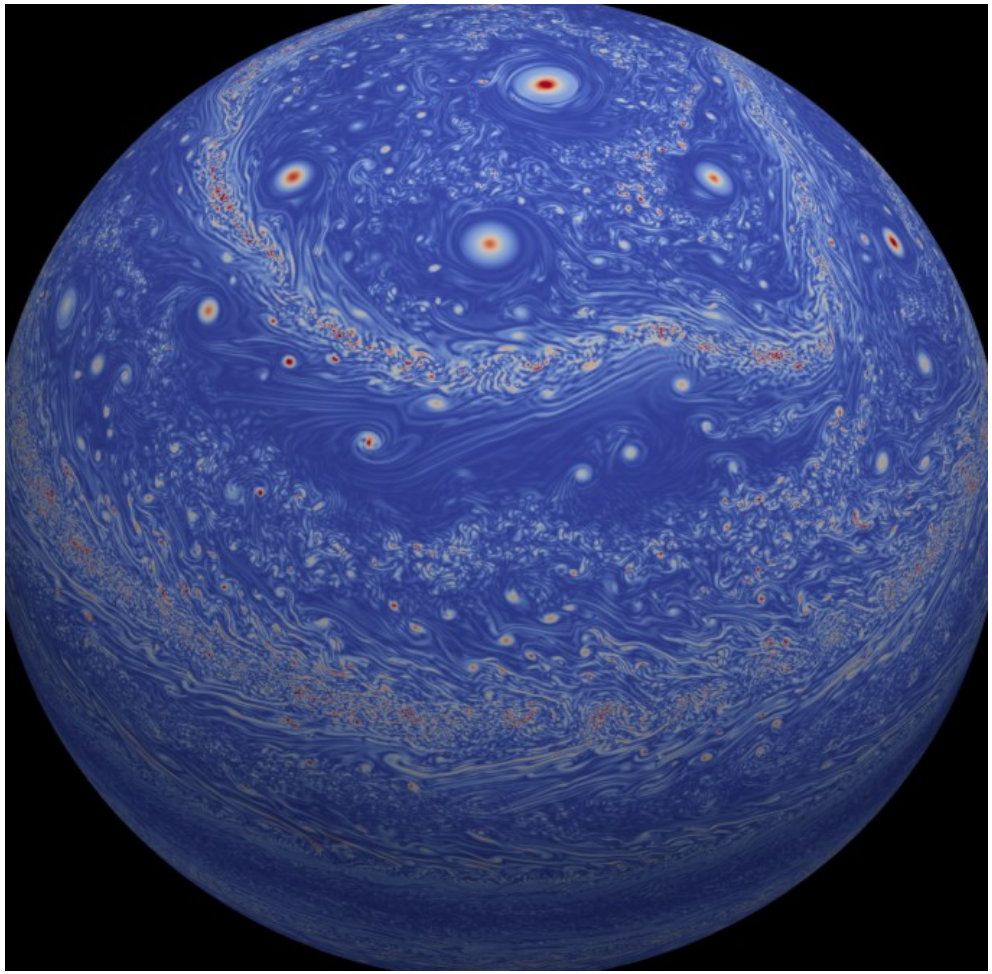


- **Scalabilité testée jusqu'à 60 000 coeurs.**

Saturne

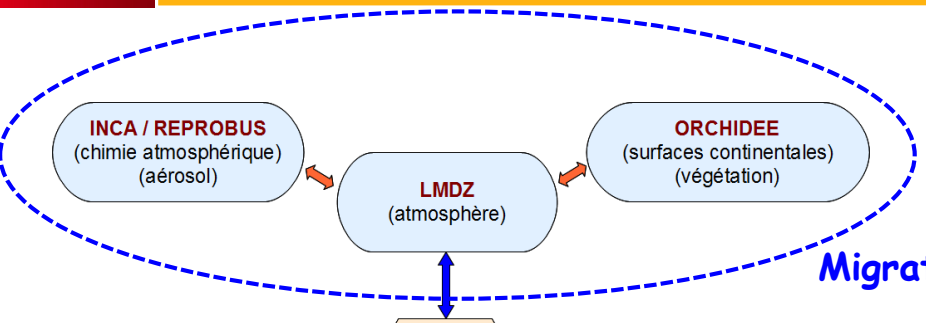


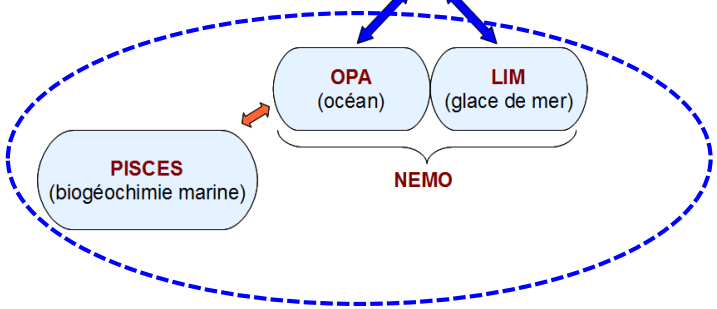




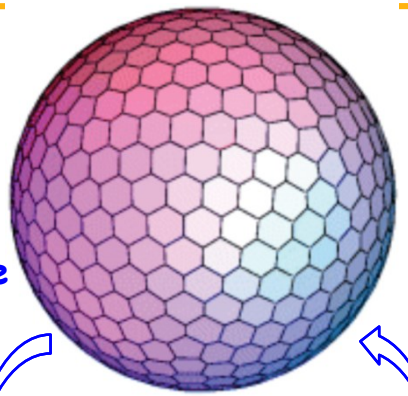
- Futures Etudes
  - Jupiter (A. Spiga)
  - Exoplanètes "Jupiter chaud" (S. Fromang, P. Tremblain)
  - ….

Le modèle "Système-Terre" de prochaine génération



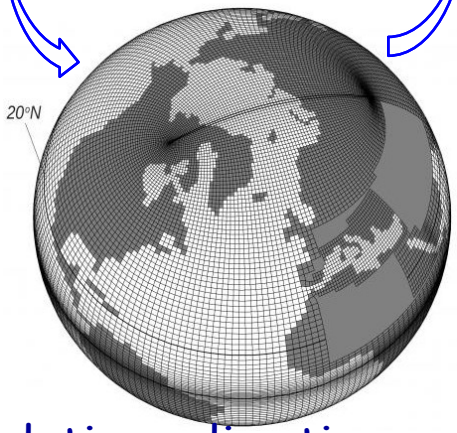


Migration grille icosaédrique



Non-structurée

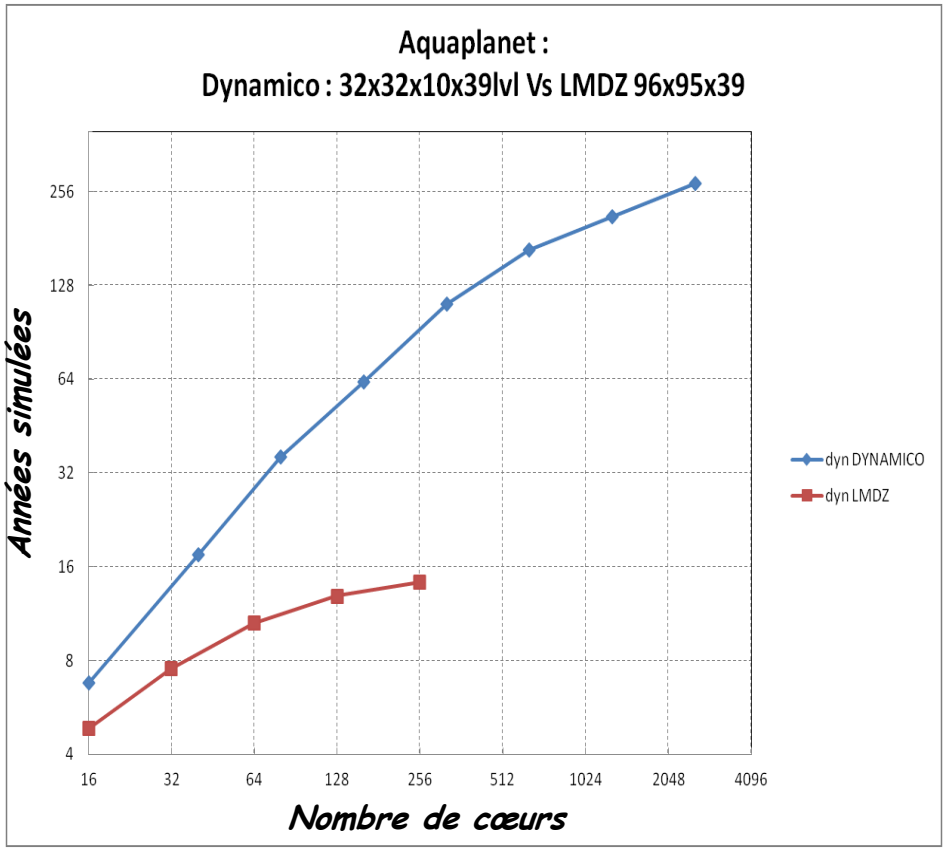
Couplage curvilinéaire



- Objectifs : accélérer le temps de restitution des simulations climatiques
  - Simulation globale à très haute résolution (25km).
  - Simulation paléo-climatique : faible résolution mais 20 000 ans d'intégration.

DYNAMICO : meilleure scalabilité

- Cas idéalisé aqua-planète
  - LMDZ Vs DYNAMICO : résolution ~300km



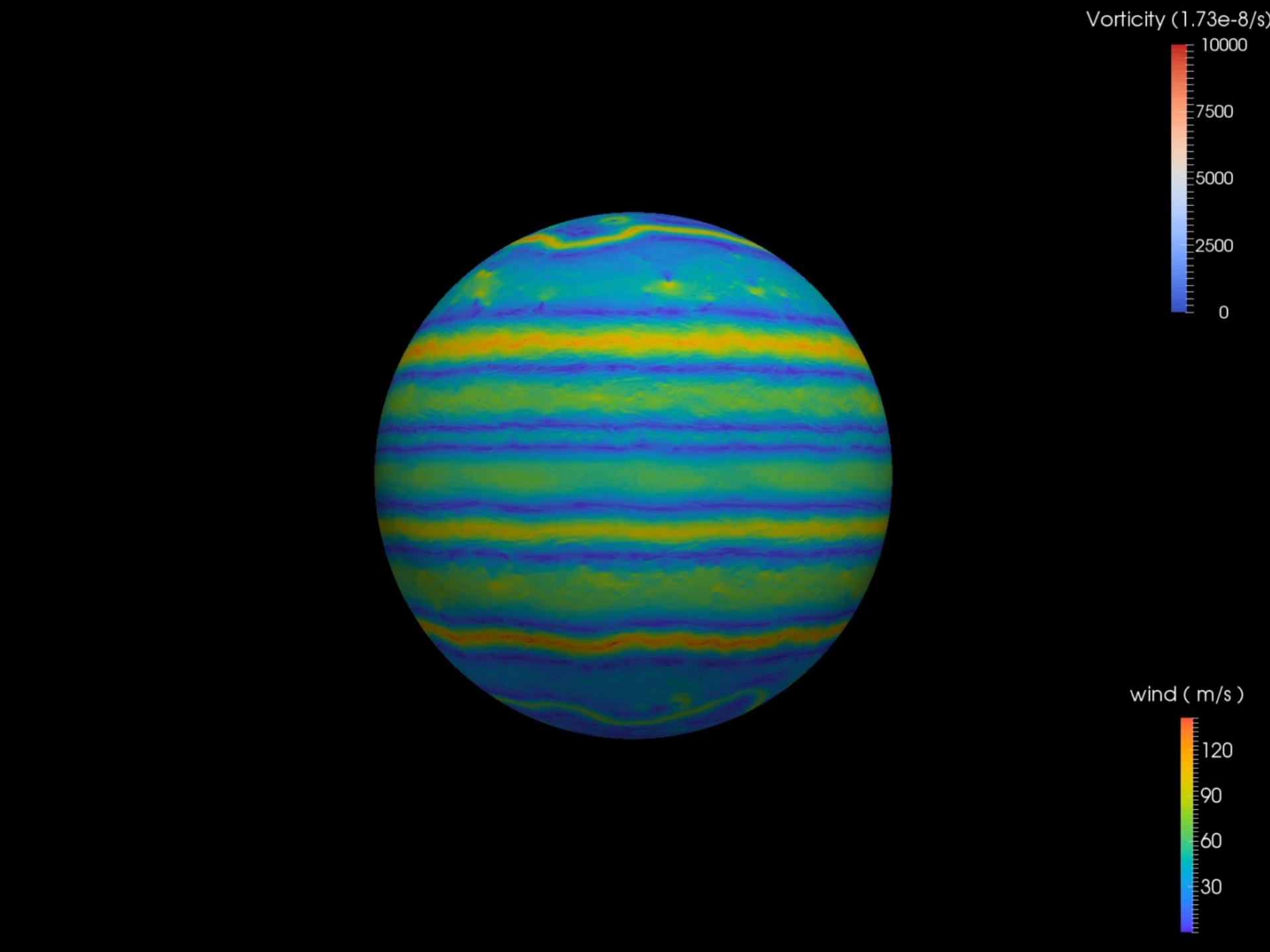
Résolution (degrés ~ km)	Nombre de coeurs	Années / jours
3° ~ 300 km	2 560	272
1° ~ 100 km	20 480	85
1/2° ~ 50 km	82 000	42
1/3° ~ 33 km	184 000	28
1/4 ° ~ 25 km	328 000	21
1/8° ~ 12 km	1 300 000	10

- **Faibles résolutions (~ 300-100 km) : x20**
- **Hautes résolutions (~ 50-10 km) : x40**

Chantier en cours : les différentes étapes…

Objectif : participer à HighRes MIP ¼° global, horizon 2018

- Dynamico – physique LMDZ : aquaplanète ✓
  - Simulations idéalisées : planète océan
- Dynamico – physique LMDZ : bucket ✓
  - Relief, climatologie de l'ozone, aérosol…
- Dynamico - physique LMDZ – ORCHIDEE ✓
  - Ajout des surfaces continentales et de la végétation
  - Ajout du routage de l'eau (rivières) ✗
- Couplage DYNAMICO-LMDZOR-NEMO ✗
  - Ajout du couplage avec le modèle océanique
- Premier runs globaux fin-2017… ✗


Vorticity (1.73e-8/s)
10000
7500
5000
2500
0
wind (m/s)
120
90
60
30