

**Équipe**

Abdoul Khadre TRAORE, (LMD/IPSL)  
 Joséphine GHATTAS, (IPSL/CNRS)  
 Yann MEURDESOFIF, (LSCE/IPSL/CEA)  
 Frédéric HOURDIN, (LMD/IPSL/CNRS)  
 Thomas DUBOS, (LMD/IPSL/X)

**Ont contribué au projet**

Laurent FAIRHEAD, (LMD/IPSL/CNRS)  
 Ehouarn MILLOUR, (LMD/IPSL/CNRS)  
 Arnaud CAUBEL, (LSCE/IPSL/CEA)  
 Olivier BOUCHER, (IPSL/CNRS)  
 Marie-Alice FOUJOLS, (IPSL/CNRS)  
 Sébastien DENVIL, (IPSL/CNRS)  
 Jérôme SERVONNAT, (LSCE/IPSL/CEA)  
 Olivier MARTI, (LSCE/IPSL/CEA)  
 Sonia LABETOUILLE, (IPSL/CNRS)  
 Venkatramani BALAJI, (LSCE/IPSL/CEA)



# Monter en résolution dans la modélisation globale du climat

16 millions d'heures

## ■ 1. Contexte

La modélisation joue un rôle central dans la science climatique car elle permet de réaliser l'équivalent numérique d'expériences de laboratoires, y compris dans des mondes hypothétiques. Une limitation des simulations climatiques globales à l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) et ailleurs est leur résolution spatiale typique de 100-200km. Augmenter cette résolution doit permettre de mieux simuler certains aspects du système climatique tels que les oscillations EL-Niño, le cycle de l'eau, la couverture neigeuse, et d'acquérir de meilleurs statistiques d'événements extrêmes.

Ce Grand Challenge a permis à l'IPSL de réaliser sa première simulation climatique globale à haute résolution, scientifiquement exploitable. Le modèle à haute résolution produit un climat global comparable, voire sur certains points, meilleur que le modèle à résolution standard, tout en capturant mieux certains extrêmes, notamment les pluies intenses.

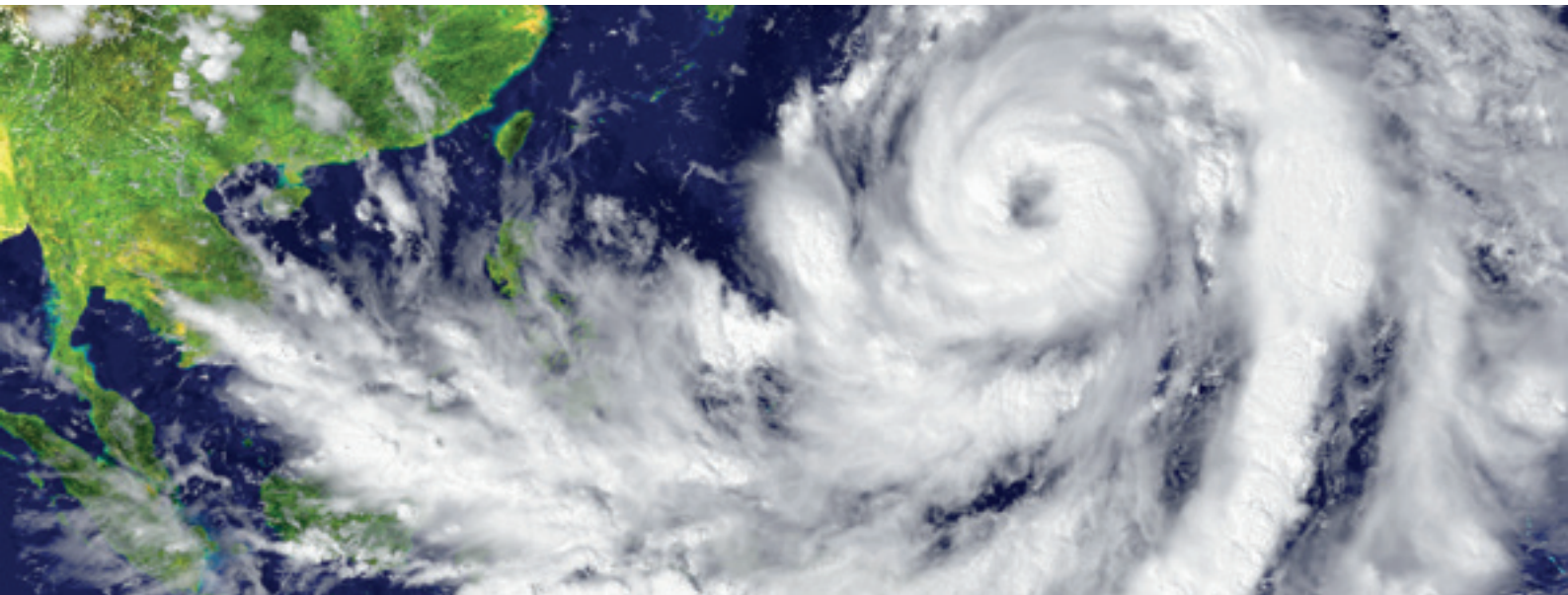
Au-delà de ce jalon hautement symbolique, qui constitue à la fois un exercice de faisabilité de simulations exceptionnelles en termes de volume de calculs et de données, et un travail à visée scientifique, ce Grand Challenge a permis d'avancer significativement vers la mise en production d'un solveur atmosphérique de nouvelle génération permettant un meilleur temps de retour de ces simulations et de simulations à encore plus haute résolution.

### 1.1 La modélisation globale du climat

La modélisation numérique du climat s'est développée à partir des années 60, à la suite de l'avènement de la prévision numérique du temps. La modélisation joue un rôle central dans la science climatique. Son but n'est pas seulement de reproduire ou d'anticiper des événements

du monde réel : **la modélisation permet de réaliser l'équivalent numérique d'expériences de laboratoires, y compris dans des mondes hypothétiques.** C'est en répétant ces expériences et en variant leurs conditions (composition atmosphérique, géographie, paramètres solaires et orbitaux), qu'on peut identifier des causalités,





apporter des explications aux phénomènes, évaluer les conséquences futures de nos actions et leur incertitude.

Dans son principe cette modélisation est simple : l'océan, l'atmosphère, sont des fluides mis en mouvement par la gravité, la rotation de la planète et des différences de densité, celles-ci résultant du chauffage dû au rayonnement solaire et terrestre (infrarouge). Mais elle est intrinsèquement complexe dans sa mise en oeuvre, d'une part en raison du grand nombre de processus physiques actifs (rayonnement, turbulence, changements de phase de l'eau, nucléation et coalescence de gouttes ...), d'autre part en raison de la gamme considérable d'échelles spatiales et temporelles mises en jeu. Aussi un modèle de climat doit faire de nombreux compromis dans les processus physiques pris en compte et dans la gamme d'échelles couvertes [2]. Ce dernier compromis est fortement contraint par les ressources de calcul mobilisables.

Le nombre d'études potentielles à réaliser sur des sorties de simulations climatiques fait qu'on privilégie la génération de très grands volumes de données pouvant être réinterprétés par la suite non seulement par les personnes ayant réalisé les simulations mais aussi par des équipes

complètement extérieures utilisant les sorties de différents modèles pour leurs recherches. Aussi **les résultats des simulations doivent être produits selon des protocoles standardisés très exigeants**, permettant leur mise à disposition internationale. Ces dernières années, l'IPSL a joué un rôle majeur sur ces aspects en développant le logiciel **XIOS**, partagé à présent pour les deux modèles de climat français (celui de l'IPSL et celui de Météo-France) et en s'investissant dans la distribution des données via les portails ESGF (*Earth System Grid Federation*). Un défi considérable de ce projet est de s'astreindre à ces protocoles pour des volumes de données multipliés par 10 voire 100.

## 1.2 Limites de la modélisation globale du climat

Pour le modèle climatique de l'IPSL la résolution courante du modèle atmosphérique est d'environ 200 km en moyenne sur le globe. Bien qu'une augmentation de la résolution ne se traduise pas automatiquement par une amélioration de la climatologie produite, **un certain nombre de phénomènes climatiques sont mieux simulés lorsque la résolution spatiale augmente** :



**oscillations du phénomène El-Niño, ondes de gravité tropicales, cycle de l'eau et couverture neiguse, zone de convergence intertropicale.**

Par ailleurs l'étude d'événements extrêmes et potentiellement dévastateurs tels que les **cyclones ou les précipitations intenses, de la possible modification de leur fréquence et de leur intensité** en réponse au réchauffement global, nécessite des simulations avec des résolutions spatiales de quelques dizaines de km et suffisamment longues (plusieurs centaines d'années) pour accumuler des statistiques fiables. Compte tenu du coût numérique très élevé, il n'existe à ce jour que peu d'équipes de recherche qui ont eu l'opportunité de mener des simulations climatiques globales très longues et à des résolutions spatiales inférieures à 50 km.

### 1.3 Modélisation globale du climat à l'IPSL –

Le modèle de climat de l'institut Pierre-Simon Laplace dont les composantes atmosphérique (LMDZ) et surface (ORCHIDEE) sont développées conjointement au Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) et au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) est l'un des modèles les plus avancés d'Europe pour étudier les phénomènes climatiques. Il est largement utilisé dans les laboratoires de l'IPSL et au-delà pour des études de processus sur les climats passés, actuel et futur. Il contribue également fortement aux projets CMIP d'intercomparaison des modèles globaux servant en partie de base aux rapports du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) sur le changement climatique.

**La composante atmosphérique LMDZ du modèle, comme tous les modèles de circulation générale, intègre et résout explicitement les équations de la mécanique des fluides sur la grille du modèle.**

D'autres phénomènes ne relèvent pas de la mécanique des fluides (rayonnement) ou sont d'échelle plus petite que celle de la maille (nuages, orages, etc.). Ces phénomènes sont représentés au travers de "paramétrisations physiques". La frontière entre solveur dynamique et paramétrisations peut changer en fonction de la résolution. Ce n'est pas le cas entre 500km et environ 10km, mais en-dessous d'une dizaine de km on entre dans ce qu'on appelle la « zone grise » de la convection orageuse (au sens où elle peut être en partie paramétrée mais aussi en partie résolue explicitement).

### 1.4 Objectifs scientifiques

Les objectifs scientifiques du projet s'étagent en fonction des paliers envisagés dans la montée en résolution. Ces objectifs ne seront pleinement réalisés qu'à moyen terme. En effet contrairement peut-être à d'autres projets de ce grand défi, la modélisation du climat n'obéit pas à une logique "one-shot" où une simulation exceptionnelle permettrait de répondre à une question brûlante. Les simulations exceptionnelles de ce grand défi ont vocation à préfigurer les simulations standard de demain, si elles tiennent leurs promesses en termes scientifiques, ce qui prendra du temps et nécessitera de répéter ces simulations ou des variantes.

Le premier objectif correspond à une montée en résolution de la configuration standard du modèle jusqu'à une résolution de 50 km. Cette augmentation implique un facteur 16 sur le volume de données produites. Ce défi technique doit être relevé pour démontrer la faisabilité des simulations en "conditions réelles" et assurer leur exploitation scientifique ultérieure. Les simulations permettront premièrement d'évaluer si une montée résolution spatiale suffit à éliminer certains défauts systématiques dans la climatologie moyenne du modèle de l'IPSL. Au-delà des moyennes, cette résolution pourrait améliorer la capacité du modèle à représenter certains événements extrêmes : pluies intenses, tempêtes et peut-être cyclones tropicaux.

Le second objectif correspond à une montée en résolution supplémentaire d'un facteur 2 horizontalement (25 km) avec également éventuellement 30 % de points supplémentaires sur la verticale. Le **supplément de résolution verticale pourrait améliorer la représentation des nuages ; le supplément de résolution horizontale doit améliorer le réalisme des tempêtes**, et permettre à des cyclones tropicaux statistiquement corrects de se former.

Enfin le dernier objectif correspond à une transition vers le nouveau solveur dynamique DYNAMICO interfacé à la physique terrestre LMDZ, à des résolutions équivalentes à des fins de comparaison, et idéalement à des résolutions inaccessibles à LMDZ (12 et 8 km). Ces dernières simulations très coûteuses, peuvent être réalisées sur des durées de quelques années seulement. À résolution équivalente à celle de LMDZ, ces simulations permettront d'évaluer la capacité éventuelle du nouveau cœur dynamique à mieux représenter la circulation atmosphérique grâce à la meilleure isotropie de son maillage et à l'absence de filtrage longitudinal dans les



hautes latitudes. On s'attachera en particulier aux régions polaires où des oscillations numériques apparaissent dans des configurations récentes du modèle longitude-latitude, après avoir amélioré (mais en même temps rendu moins diffusive) la paramétrisation des couches limites très fortement stratifiées en température.

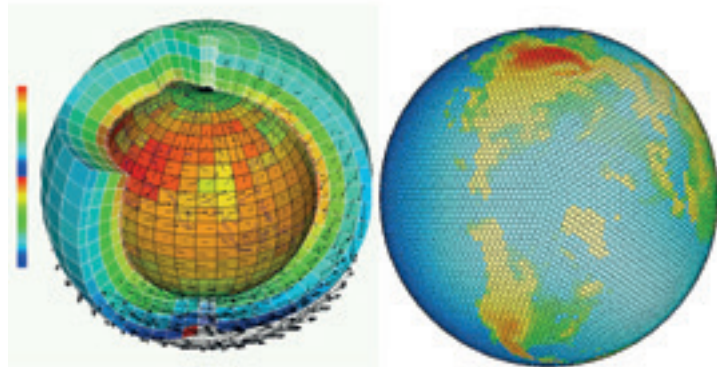
## 2. Code, moyens de calcul, simulation / méthode numérique

### 2.1 Scalabilité : limites et progrès

À coût total donné, dépendant fondamentalement des éléments physiques pris en compte par le modèle, un élément-clé de la faisabilité de simulations à haute résolution est le parallélisme massif, qui permet d'obtenir un temps de retour de plusieurs années simulées par jour écoulé (SYPD).

Dans sa version actuelle, le modèle LMDZ utilise pour son solveur dynamique un maillage régulier longitude-latitude qui présente des avantages numériques mais nécessite près des pôles des opérations de filtrage globales dans une direction du maillage, ce qui limite la capacité de parallélisation par découpage de domaines. En exploitant au maximum cette capacité par une parallélisation hybride MPI/OpenMP, il est néanmoins possible depuis peu d'effectuer des simulations à 50 km de résolution sur plusieurs milliers de cœurs à quelques SYPD.

Pour dépasser cette limite de scalabilité (extensibilité des performances), un nouveau solveur hydrodynamique appelé DYNAMICO a été développé conjointement par le LMD et le LSCE. Afin de contourner les limitations intrinsèques des grilles longitude-latitude, DYNAMICO est formulé sur un maillage sphérique icosaédrique-hexagonal. Une fois résolues les questions numériques posées par ce maillage géométriquement irrégulier, il permet une scalabilité bien meilleure par découpage en de nombreux domaines locaux topologiquement réguliers. Le jeu de paramétrisations physiques de LMDZ a été récemment interfacé avec ce nouveau cœur dynamique afin de répondre à des questions inaccessibles avec le maillage longitude-latitude de LMDZ et de viser à long terme des résolutions globales kilométriques. La scalabilité n'est plus



*Gauche* : grille latitude-longitude du solveur hydrodynamique de LMD-Z

*Droite* : maillage icosaédrique-hexagonal du solveur DYNAMICO

limitée que par la nécessité de confier à chaque cœur une quantité minimale de travail utile à accomplir. La limite de scalabilité est atteinte lorsque chaque cœur calcule sur quelques dizaines de colonnes atmosphériques, soit quelques milliers de points de la grille tridimensionnelle.

Enfin, avec ou sans DYNAMICO, un point-clé de la scalabilité du modèle est la gestion parallèle et asynchrone des entrées-sorties via XIOS, qui permet en théorie d'éliminer la perte de performance liée aux lectures/écritures sur disque.

### 2.2 LMDZ-ORCHIDEE

Le code LMDZ se décompose en 2 parties distinctes : (1) le cœur dynamique chargé de résoudre explicitement les équations de Navier-Stokes sur la sphère en milieu tournant et (2) les équations spécifiques de « la physique » qui résolvent les phénomènes et processus physiques au sein d'une même colonne atmosphérique. Dans la partie « physique », aucun échange n'est nécessaire entre les différentes colonnes d'atmosphère, ce qui rend cette partie parfaitement scalable MPI/OpenMP. Cette partie est commune à toutes les configurations mises en oeuvre dans le projet et reprend les choix effectués pour les simulations CMIP6 de référence du modèle de Système Terre IPSL-CM.

Les communications entre processus MPI sont concentrées dans la partie dynamique. Malgré les limites de parallélisation du maillage régulier longitude-latitude dû au filtrage en longitude aux pôles, de grands efforts ont été consentis pour améliorer l'efficacité du code afin de





pouvoir tourner sur des milliers de processeurs à haute résolution, notamment en exploitant le parallélisme OpenMP qui permet de distribuer la dimension verticale sur plusieurs threads.

Le passage d'une résolution de 200km à une résolution 50 km permet de quadrupler le nombre de processus MPI, et le passage à 25 km permettra un doublement supplémentaire. Le passage à une résolution verticale plus élevée permet d'exploiter pleinement des threads OpenMP disponibles.

### 2.3 DYNAMICO

Le développement récent du nouveau cœur dynamique « DYNAMICO » améliore significativement l'efficacité du parallélisme du modèle [3]. En effet le passage de 200km à 50km permet maintenant de multiplier par 16 le nombre de processus MPI (au lieu de 4 pour LMDZ) et le passage de 50km à 25km permet

un quadruplement supplémentaire (au lieu d'un doublement). À coût total de calcul inchangé, cette augmentation du parallélisme permet d'obtenir un gain en temps de restitution d'un facteur 20 à 40 à haute résolution. Ce gain ne se fait pas au détriment de l'efficacité sur chaque cœur. En effet les données sont organisées de façon semi-structurée en accolant 2 à 2 les triangles principaux de l'icosaèdre. Les tuiles ainsi formées sont

topologiquement cartésiennes ce qui favorise la vectorisation : sur machine vectorielle NEC SX8, DYNAMICO est vectorisé à 99.67%, permettant d'atteindre 60% de la puissance crête. Ceci garantit une exploitation des unités arithmétiques vectorielles des générations de processeurs scalaires actuels et futurs. Sur ces architectures, la principale limitation résulte de la faible intensité arithmétique inhérente au code, qui sollicite intensément l'accès à la mémoire.

### 2.4 XIOS

Pour les tâches d'entrées/sorties, des processus MPI (les serveurs) sont exclusivement dédiés et les données sont envoyées de manière asynchrone des clients vers les serveurs,

permettant ainsi de recouvrir les transferts et les écritures par du calcul. En utilisant les buffers adéquats, XIOS permet de lisser les pics I/O et d'envoyer un flux de données constant au système de fichier tout au long de la simulation, sans impacter les performances du modèle « client ». En outre, XIOS utilise les I/O parallèles qui permettent, d'une part d'agréger la bande passante I/O et d'autre part d'obtenir des fichiers d'une seule pièce ne nécessitant pas de reconstruction en post-traitement. Le format de sortie est NETCDF4, s'appuyant sur HDF5.

XIOS a démontré sur le code océanique NEMO tournant à 16 000 cœurs de calcul sa capacité à soutenir en continu 3.6 Go/s. Sur une simulation restant un mois en machine, une telle bande passante génère 10 Po de données. XIOS un élément-clé de la chaîne de performance de DYNAMICO-LMDZ-ORCHIDEE, et ce d'autant plus à haute résolution.

### 2.5 Configurations

Sur maillage latitude-longitude, le nombre de processus MPI est limité à la moitié du nombre de points de grille dans la direction méridienne. Une résolution de 50km correspond à ½ degré de latitude, donc à 180 processus MPI (360 MPI à 25km). Le nombre de threads OpenMP est limité par le nombre de points de grille dans la direction verticale : en-dessous d'une dizaine de couches par thread l'efficacité baisse et il est inutile d'aller en-dessous de 3-4 couches par processeur. Avec 79 niveaux verticaux on peut donc utiliser 8-12 threads efficacement sur Joliot-Curie, dont chaque processeur possède 24 cœurs. Un léger gain en temps de retour est possible en poussant à 24 threads, au prix cependant d'un coût total plus élevé. Les ordres de grandeur sont donc :

- 50 km : 180 MPI x 8-24 OpenMP = 1440 à 4320 cœurs
- 25 km : 360 MPI x 8-24 OpenMP = 2880 à 8640 cœurs

Sur maillage icosaédrique-hexagonal, le nombre de processus MPI est limité par un équilibre à trouver entre calcul utile et opérations 'inutiles' (communication de halo, calculs supplémentaires sur les halos). Un bon compromis est d'environ 400 colonnes d'atmosphère (20x20) entourées d'un halo de 80 colonnes (20%), voire 256 colonnes d'atmosphère (16x16) entourées d'un halo de 64 colonnes (25%). Le nombre de threads OpenMP est limité comme précédemment. Une résolution de 50km correspond à environ 256 000 colonnes

**À coût total de calcul inchangé, cette augmentation du parallélisme permet d'obtenir un gain en temps de restitution d'un facteur 20 à 40 à haute résolution.**



d'atmosphère organisées en 10 tuiles de 160x160. Les ordres de grandeur sont donc :

- 50 km : 640-1000 MPI x 8-24 OpenMP = 5000 à 24 000 coeurs
- 25 km : 2560-4000 MPI x 8-24 OpenMP = 10000 à 96 000 coeurs
- 12 km : 10240 MPI x 8 OpenMP = 80 000 coeurs

Afin de limiter le nombre de processus MPI, un niveau de parallélisme OpenMP sur l'horizontale peut être exploité, réduisant le nombre de processus MPI et augmentant d'autant le nombre de threads par processus.

## 2.6 Moyens de calcul et simulation

Durant le Grand Challenge proprement dit (avril-juillet), nos efforts se sont concentrés sur la configuration à 50km du modèle "standard" LMDZ-OR formulé en longitude-latitude, avec l'objectif de réaliser une simulation exploitable scientifiquement, et donc strictement conforme au protocole CMIP6, particulièrement exigeant en termes de volume de données à produire. Nous avons pu ainsi réaliser une simulation dite "historique" répondant aux forçages (températures océaniques, teneur en CO<sub>2</sub> et aérosols, éruptions volcaniques...) effectivement survenus pendant les années 1950 à 2014.

En parallèle, nous avons mené des études de faisabilité sur des configurations icosaédriques à diverses résolutions (jusqu'à 8km) et divers nombres de coeurs (jusqu'à 23 000). Ces simulations étaient très courtes et allégées en termes de sorties et/ou de contenu du modèle.

## 2.7 Performance

D'un point de vue scientifique, **la performance se mesure de façon absolue en termes d'années simulée par jour (SYPD), quelques SYPD étant le minimum vital** pour la modélisation de quelques décennies du climat moderne. Cette performance doit être mesurée sur une configuration complète pour faire sens. En utilisant 12 threads pour chacun des 180 processus MPI, ainsi que 44 processus MPI pour XIOS, LMDZ-OR à la résolution de 50km a simulé **3,5 années par jour**. C'est un résultat très satisfaisant, mais qui démontre également que LMDZ-OR ne peut pas atteindre une performance exploitable au-delà de cette résolution. En effet à une résolution de 25km, il ne serait possible d'utiliser que 360 processus MPI pour une taille de grille quadruplée et un pas de temps

divisé par deux ; la performance tomberait alors en-dessous de 1 SYPD.

D'un point de vue informatique, il était aussi important de comparer la performance réalisée sur Joliot-Curie à celle obtenue sur son prédécesseur Curie, dans la mesure du possible. Pour les configurations qui ont pu être exécutées à l'identique sur les deux machines, le ratio de performance observé était très variable, de 1 à 2, avec en général **un gain d'environ 30% en faveur de Joliot-Curie**. Ce chiffre peut paraître décevant dans la mesure où l'architecture de calcul de Joliot-Curie permet en principe un doublement des performances. Cependant, il ne constitue pas entièrement une surprise car la structure intrinsèque des calculs réalisés par les **modèles** de climat nécessite à la fois un bon débit arithmétique et une bonne bande passante mémoire, celle-ci ne suivant pas nécessairement l'augmentation de celui-là. Un travail spécifique d'optimisation de nos applications en lien avec les équipes du TGCC, d'ATOS et d'Intel a été lancé en ce sens.

## 2.8 Environnement technique

L'environnement de compilation, de calcul et de stockage était d'emblée très similaire à celui, familier, du calculateur Curie, ce qui a permis une entrée en matière rapide.

Un certain nombre de problèmes ont été rapidement résolus après signalement (accès aux dépôts externes de codes source ...) tandis que d'autres ont perduré plus longtemps. Citons notamment, ce qui n'était pas en soi inattendu sur une machine à peine ouverte et dans un contexte de Grands Challenges (visant aussi à stabiliser la machine avant sa mise en production), une certaine instabilité dans l'exécution : noeuds parfois défectueux, blocages difficiles à reproduire à grand nombre de coeurs de calculs. Ces problèmes ont progressivement disparu, soit suite à nos échanges avec l'assistance, soit "spontanément", suite probablement à des mises à jour du système tout au long de la période du Grands Challenges.



### 3. Observations et résultats scientifiques

Les simulations présentées ici suivent le protocole HighResmip de CMIP6 [4]. Il s'agit de simulations de la période actuelle avec le modèle atmosphérique LMDZ-OR. Afin de discuter l'apport de la haute résolution (HR), il est utile de les comparer à des simulations effectuées à basse résolution (LR). Dans le cadre de CMIP6 ont notamment été réalisées des simulations LR selon un protocole similaire à HighResMIP, dit AMIP. Ces deux protocoles diffèrent néanmoins sur quelques points (températures océaniques, glace de mer, végétation, ...). De ce fait, on ne peut pas comparer directement les simulations AMIP-LR et HighResmip-HR, et il faut donc effectuer une simulation complémentaire avec le protocole HighResmip mais la grille LR. Il y aurait beaucoup à dire de ces comparaisons. Ici, nous nous contentons de discuter l'apport de la haute résolution sur la climatologie moyenne d'une part, et sur la répartition des pluies d'autre part.

Sur la figure 2 on compare en moyenne annuelle et pour la décennie 1989-1990 les deux simulations, HighResmip-LR à gauche et HighResmip-HR à droite. La comparaison des deux colonnes montre une amélioration significative de la climatologie du modèle avec la montée en résolution entre les configurations LR et HR. On observe notamment, dans la troposphère (entre la surface et 21 km, axe de droite), une diminution systématique des biais de vent zonal (en haut). Le dipôle entre des biais négatifs dans les moyennes latitudes (verts) et positifs entre les tropiques (jaunes) visible en configuration LR correspondent à un positionnement des jets d'Ouest (contours positifs) trop proche de l'équateur. La diminution de ces biais correspond à un déplacement de ces jets vers les pôles, en meilleur accord avec l'observation.

À ce déplacement des jets est associée une diminution des biais froids (ligne du milieu) et humide (ligne du bas) des moyennes latitudes dans la troposphère. La réduction du biais froid est particulièrement marquée à la tropopause dans les hautes latitudes, où elle est sans doute liée à une diminution de la diffusion numérique qui a tendance à amener trop de vapeur d'eau dans cette région en configuration LR, aboutissant à des biais froids plus forts que -6 K au-dessus de l'Antarctique. Cette interprétation est corroborée par le léger biais positif en humidité dans la version LR dans ces hautes altitudes vers 60S et

60 à 90N qui se transforme en biais positif dans la simulation HR.

On analyse à présent les changements de distribution de précipitations. La figure 3 (voir page 14) compare les sorties des simulations LR et HR à des observations obtenues sur un pluviomètre sur un site d'observation intensive du réseau AMMA-Catch, situé au Mali. On voit sur l'évolution des humidité spécifiques (traits fins) l'alternance entre un hiver très sec, correspondant à l'advection d'air depuis le Sahara par l'Harmattan, et une saison humide (de mai à octobre) au cours de laquelle se réalise l'intégralité des précipitations (barres).

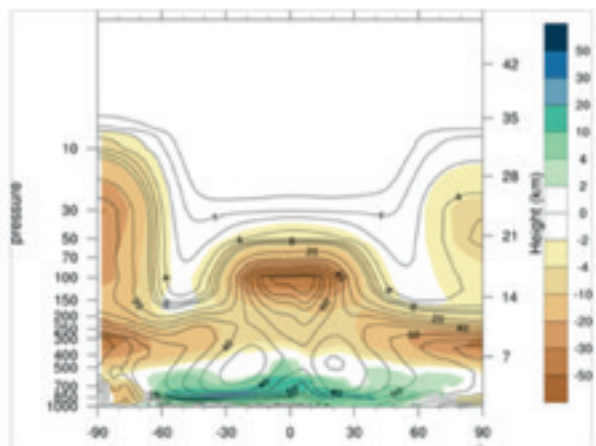
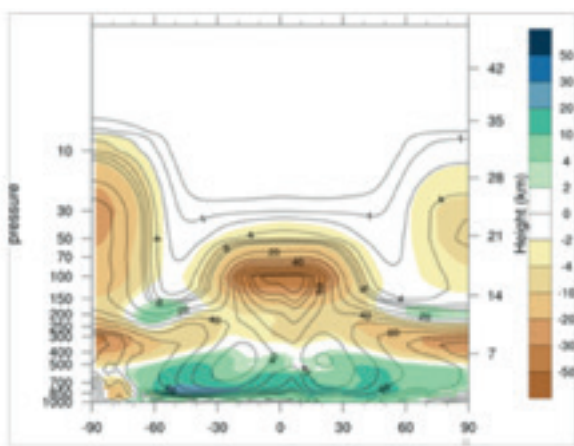
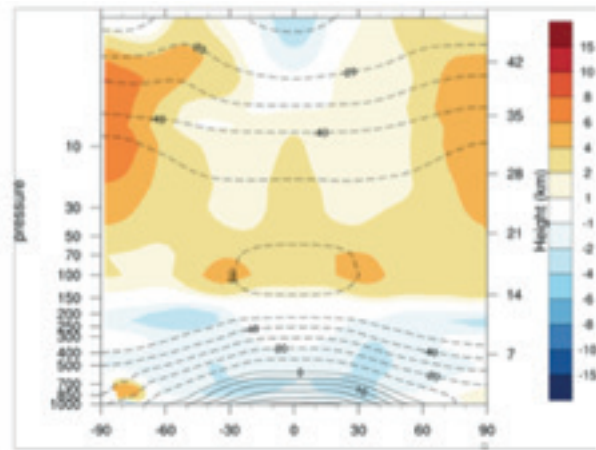
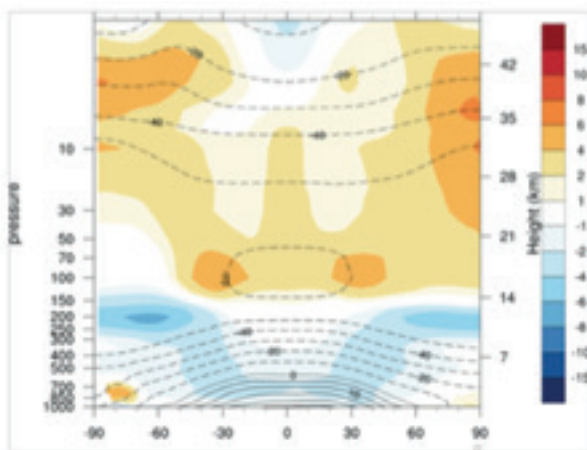
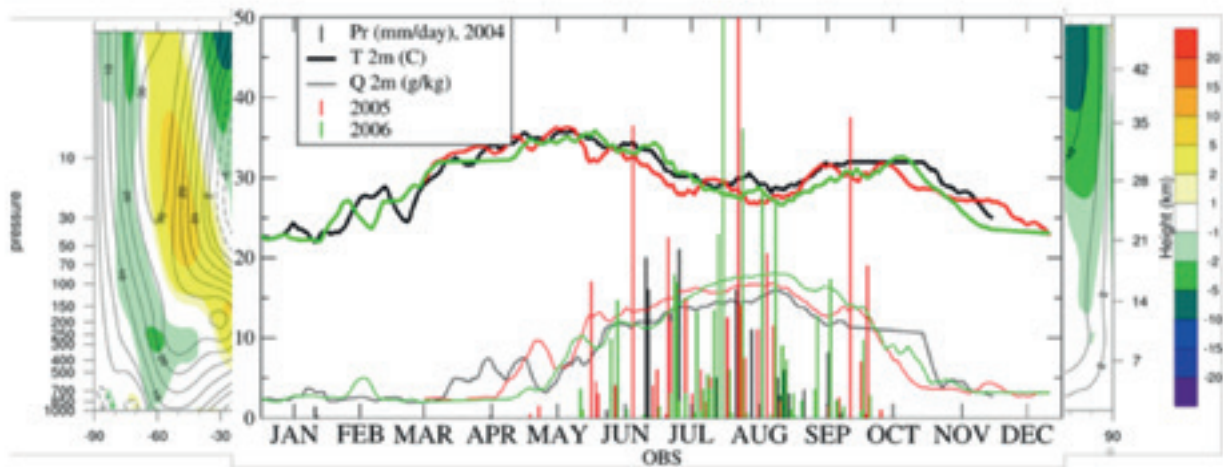
Les deux simulations parviennent à reproduire dans les grandes lignes cette saisonnalité. Elles ont des défauts en commun comme une sous-estimation des maxima de températures (courbes épaisses) en mai, qui fait que la décroissance des températures observée pendant la saison des pluies est moins marquée. **Un point saillant est la meilleure capacité de la simulation HR à reproduire des valeurs élevées de précipitations et à concentrer l'essentiel des précipitations sur la période juin-septembre.**

### 4. Perspectives

D'ores et déjà, il semble acquis que les simulations à haute résolution présentent une climatologie satisfaisante. Les analyses présentées ici sont très préliminaires et superficielles, et plusieurs mois seront nécessaires pour évaluer en profondeur les améliorations - et les défauts - des simulations à haute résolution par rapport aux simulations à résolution « standard ».

L'essentiel des résultats scientifiques obtenus durant le Grand Challenge l'ont été avec la formulation longitude-latitude de LMDZ. Notre projet initial incluait également la réalisation de simulations avec la formulation icosaédrique, plus scalable mais moins mûre techniquement. Sur ce point, nous en sommes restés à des essais techniques, non exploitables scientifiquement, mais qui confirment la meilleure scalabilité de DYNAMICO par rapport à LMDZ, sa relativement bonne adéquation à l'architecture de calcul de Joliot-Curie, et sa capacité à atteindre des résolutions encore plus élevées dans des conditions permettant une exploitation scientifique.





**Figure 2 :** Moyenne zonale et annuelle de la température (K, en haut), du vent zonal (m/s, au milieu) et de l'humidité relative (% en bas) dans des simulations HighResmip-LR (à gauche) et HighResmip-HR (à droite). Sur chaque graphe, l'axe des ordonnées montre à gauche la pression en hPa et à droite l'altitude correspondante. Les contours correspondent aux champs bruts et les aplats de couleurs à la différences par rapport aux observations (réanalyses ERA Interim).





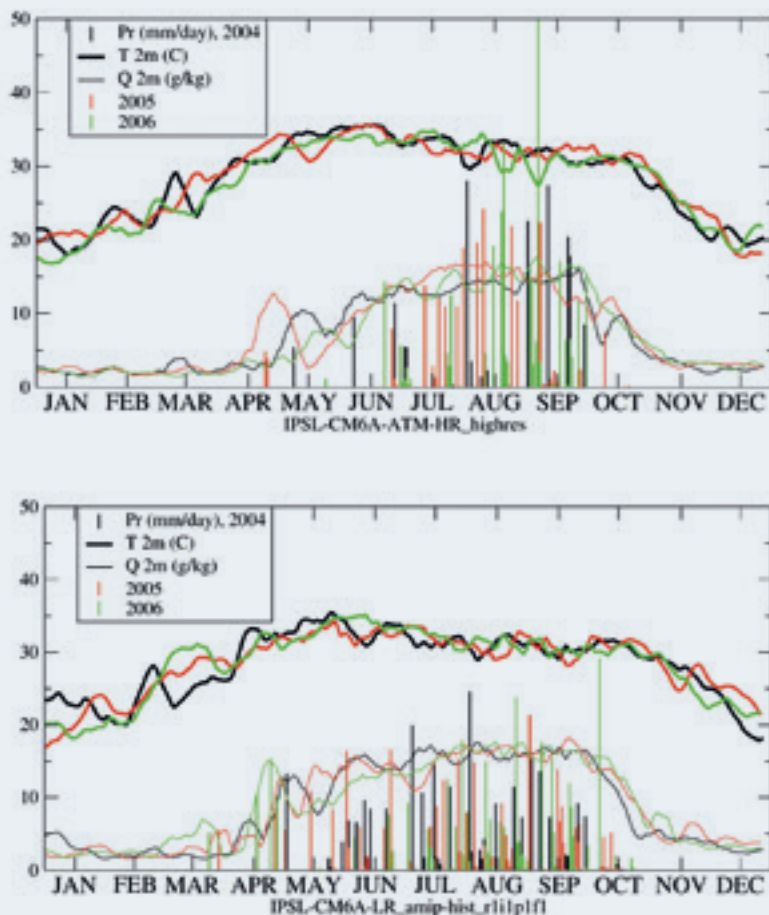


Figure 3 : Evolution sur 3 années consécutives (2004, noir, 2005, rouge, 2006, vert) des températures de l'air à 2m (courbes épaisses), de l'humidité spécifique (courbes fines) et de la précipitations (barres verticales) à la station d'Agoufou au Mali, pour les observations (en haut), la simulation LR (au milieu) et la simulation HR (en bas)

Nous avons poursuivi ce travail après le Grand Challenge, dans le cadre standard de l'ouverture de Joliot-Curie aux projets scientifiques. Des simulations de plusieurs années à basse résolution ont été réalisées et analysées à des fins de validation de DYNAMICO-LMDZ, ainsi que des simulations courtes à 50 km et 25 km de résolution. Ces dernières montrent en particulier l'émergence de tempêtes de moyennes latitudes intenses et de cyclones tropicaux, comme attendu. D'ici à l'été 2019, nous devrions avoir répété le protocole HighResMIP, cette fois-ci avec DYNAMICO et à des résolutions de 50km et 25km. Il nous tarde de pouvoir analyser ces simulations.

## 5. Conclusions

La simulation du climat à haute résolution, en raison de son coût et de sa lourdeur, a vocation à compléter plutôt qu'à remplacer la simulation à « basse » résolution. Sur certains aspects spécifiques du climat, notamment les événements extrêmes, les simulations à haute résolution sont potentiellement à haute valeur ajoutée, voire incontournables.

Ce Grand Challenge a permis à l'IPSL de réaliser sa première simulation climatique globale à haute résolution, scientifiquement exploitable. Au-delà de ce jalon hautement symbolique, il a permis d'avancer significativement vers la mise en production du modèle DYNAMICO-LMDZ, qui permet un meilleur temps de retour de ces simulations et de simulations à encore plus haute résolution.



## ■ 6. Remerciements

*Nous remercions le projet ANR Convergence et le projet ANR HEAT qui ont préparé et soutenu l'effort nécessaire pour mener à bien ce Grand Challenge. Nous tenons à remercier l'assistance du TGCC pour son écoute et sa réactivité durant le Grand Challenge, et pour les améliorations significatives apportées à l'environnement Joliot-Curie.*

## ■ 7. Bibliographie

[1] IPCC (2013), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

[2] F. Hourdin et al. *The Art and Science of Climate Model Tuning*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98:589-602, March 2017

[3] T. Dubos et al. *DYNAMICO-1.0, an icosahedral hydrostatic dynamical core designed for consistency and versatility*. *Geoscientific Model Development*, 8:3131-3150, October 2015.

[4] R. J. Haarsma et al. *High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP v1.0) for CMIP6* *Geosci. Model Dev.*, 9, 4185-4208, 2016

