

## Comparaison du climat préindustriel du modèle IPSL-CM5A-LR sur différents calculateurs utilisés à l'IPSL

Jérôme Servonnat - Marie-Alice Foujols

Frédéric Hourdin - Arnaud Caubel

Pascal Terray - Olivier Marti

*Jerome.Servonnat@lsce.ipsl.fr*

Le 15 décembre 2012, mercure, le NEC SX-9 dédié aux simulations climatiques de l'IPSL depuis sa mise en route en avril 2009, a été définitivement arrêté. Une grande partie des simulations imposées dans le cadre du protocole CMIP5, destinées notamment à la science qui sera présentée dans le cinquième rapport du Groupe Intergouvernemental d'Experts du Climat (GIEC) a été réalisée sur ce calculateur. Leur valorisation dans le cadre des recherches en cours et à venir constitue un enjeu majeur.

Le calculateur NEC SX-9 ayant été arrêté, les modélisateurs du climat font tourner le modèle de climat de l'IPSL sur les autres calculateurs disponibles : Titane au CCRT, Vargas puis Ada à l'IDRIS, Curie au TGCC. Mais pouvons-nous changer de calculateur au milieu d'une étude ? Est-ce que le climat simulé par le modèle est le même lorsqu'il tourne sur ces différents calculateurs ?

Afin de nous convaincre que nous pouvons utiliser des machines différentes pour poursuivre les études en cours, nous avons voulu comparer le climat simulé par le modèle climat de l'IPSL sur ces différentes machines. Rappelons que le modèle climat de l'IPSL est un programme de calcul composé de nombreux sous-programmes représentant en tout plusieurs centaines de milliers de lignes de code. Pour chaque point du maillage du globe terrestre (latitude, longitude, altitude ou profondeur), ils détaillent les calculs à effectuer, pas de temps par pas de temps, pour quantifier les différentes variables d'état de chacune des composantes du système climatique (atmosphère, surfaces continentales, océan, glace de mer, biogéochimie, chimie atmosphérique) suivant les équations décrivant leur évolution. Les calculateurs actuels, composés d'un grand nombre de cœurs de calcul travaillant en parallèle, permettent de simuler ainsi l'évolution du climat sur des périodes allant de quelques mois à quelques dizaines ou centaines d'années, voire quelques milliers d'années. Chaque processeur (cœur de calcul) se charge d'un sous-ensemble des calculs, en général d'un sous-domaine du globe terrestre.

Le principe de notre protocole est de comparer des simulations réalisées avec la même version du

modèle IPSL-CM5A-LR compilée sur les différents calculateurs, avec les mêmes conditions aux limites, et démarrant du même état initial. Cinq simulations ont ainsi été réalisées (Figure 1) : piControl2M0 sur Mercure SX-9 (CCRT-TGCC), piControl2T0 sur Titane (CCRT-TGCC), piControl2C0 sur Curie (CCRT-TGCC), piControl2V0 sur Vargas (IDRIS) et piControl2A0 sur Ada (IDRIS). Les deux premières (piControl2M0 et piControl2V0) sont longues de 100 ans et les trois autres (piControl2T0, piControl2C0 et piControl2A0) font 200 ans (initialement 100 ans, puis prolongées pour les besoins des analyses, voir dans la suite). Nous avons utilisé la simulation de contrôle préindustriel piControl2 comme état initial et comme référence. Cette simulation longue et équilibrée de 1900 ans (période 1800-3699) est utilisée dans de nombreuses études réalisées avec le modèle IPSL-CM5A. Nous avons pris le mois de décembre de l'année 2499 de cette simulation comme point de départ de nos cinq nouvelles simulations. En plus de ces cinq simulations, nous ajoutons une simulation historique (couvrant la période 1900-1999) à nos analyses (v3.historical7), nommée Historical dans cette étude, pour montrer une simulation très différente de piControl2.

La figure 1 nous montre la température à 2m en moyenne globale dans les différentes simulations. Elle nous montre qu'elles ne suivent pas exactement la même trajectoire. La raison pour laquelle le modèle suit une trajectoire différente quand on change de calculateur provient des erreurs d'arrondis sur le résultat des opérations flottantes. Même sur un même calculateur, des différences peuvent survenir, induites par le compilateur utilisé, les options de compilation ou le découpage en domaines pour la parallélisation. Ces différences peuvent être considérées comme analogues à des perturbations infinitésimales à chaque pas de temps. Or du fait du caractère chaotique des équations de la météorologie, les différences entre deux simulations s'accroissent dans le temps. Reste à savoir si le modèle peut subir un changement significatif d'état moyen ou de variabilité. La simulation piControl2M0 a été réalisée pour illustrer l'influence de ce type de perturbation infinitésimale sur la trajectoire du modèle : le code, le calculateur, le compilateur, l'état initial et les conditions aux limites sont les mêmes que pour piControl2, seul change le fichier d'équilibrage de charge (Bands) entre les différents processus de calcul sur Mercure.

Pour évaluer la proximité statistique de deux simulations nous proposons la méthode suivante : pour une période commençant à l'année 2500, de longueur  $T$  comprise entre 20 et 200 ans (augmentant par pas de 5 ans), nous calculons une distance quadratique QDIST (équation 1) entre la climatologie (champ spatial) de piControl2  $X_{T,piControl2}$  calculée sur cette

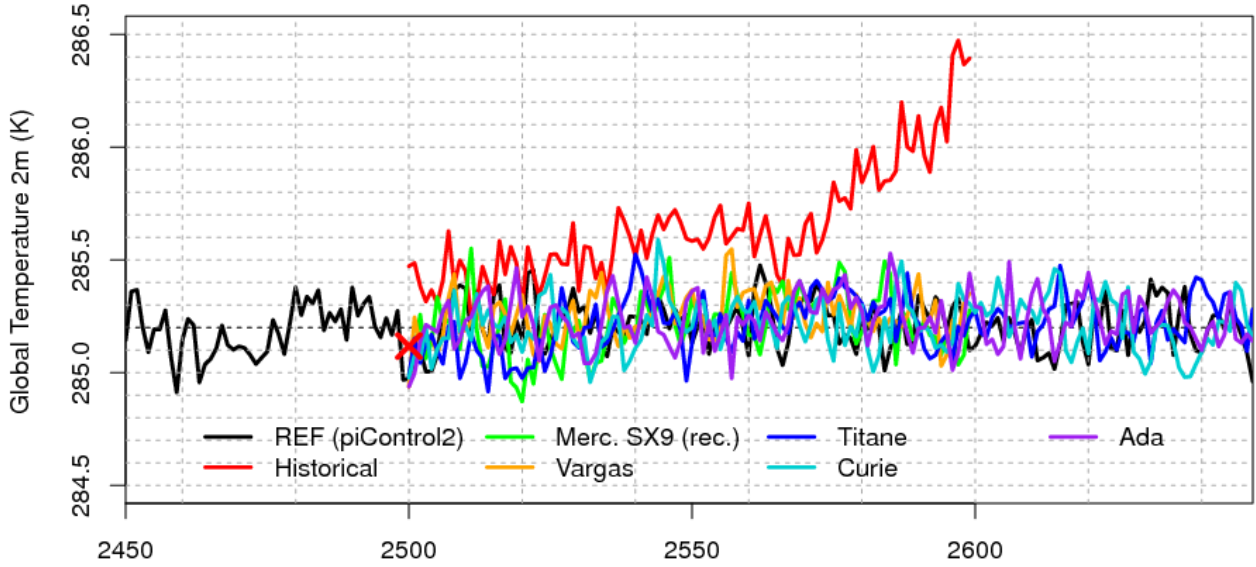


FIG. 1 – Température en moyenne globale de piControl2 (trait continu noir, simulation de référence sur SX-9), piControl2M0 (en vert, simulation perturbée sur SX-9), piControl2V0 (en orange, sur Vargas), piControl2T0 (en bleu, sur Titane), piControl2C0 (en bleu clair, sur Curie) et piControl2A0 (en violet, sur Ada). La simulation historique (Historical) est en rouge. La croix rouge indique le point de départ commun à toutes les simulations.

période et la climatologie  $X_{T,calc}$  sur la même période  $T$  d'une des simulations illustrées sur la figure 1 et réalisée sur le calculateur  $calc$ .

$$QDIST(T, calc) = \sum_{i=1}^N w_i (X_{T,calc}(i) - X_{T,piControl2}(i))^2 \quad (1)$$

L'indice  $i$  correspond aux points de grille ( $N$  au total);  $w_i$  est un poids calculé à partir de la surface des points de grille. La somme des  $w_i$  est égale à 1.

Avec l'augmentation de la longueur de la période on s'attend à ce que la climatologie converge vers l'état moyen du modèle; si cet état moyen est le même sur Mercure SX-9 (piControl2) et sur un autre calculateur, QDIST va tendre vers zéro avec l'augmentation de  $T$ . Les résultats obtenus pour les différents calculateurs sont représentés sur la figure 2. Pour avoir une estimation de l'intervalle de valeurs de cette distance quadratique entre deux climatologies obtenues sur le même calculateur, nous estimons, pour chaque longueur de période  $T$ , la distribution de la distance quadratique QDIST entre deux périodes tirées aléatoirement dans piControl2 (en grisé sur la figure 2, détails de la méthode dans la légende).

Nous présentons les résultats pour trois variables atmosphériques couramment utilisées en climatologie, la température à 2m (t2m), les précipitations (precip) et la Sea Level Pressure (SLP). Nous avons également regardé (résultats non montrés mais commentés dans le texte) le bilan radiatif au sol (bils) et en haut de l'atmosphère (nettop, tops et topl), et la pression au sol (psol) en regard de la SLP. Nous

travaillons sur des séries en moyennes annuelles.

Pour t2m, on voit sur la figure 2a que toutes les simulations sont dans la distribution de piControl2, sauf Historical (du fait du réchauffement simulé sur le 20<sup>e</sup> siècle). On note même que les simulations sur les autres calculateurs sont dans la partie inférieure de la distribution (en-dessous ou proche du 25<sup>e</sup> quantile) pour des périodes de longueur supérieure à 50 ans. Cela indique que les climatologies de température à 2m des simulations réalisées sur les autres calculateurs que la SX-9 sont très proches de la climatologie du modèle sur SX-9. Des résultats similaires ont été obtenus pour le bilan radiatif net à la surface et en haut de l'atmosphère.

Pour les précipitations, les simulations réalisées sur Vargas, Titane et la deuxième simulation sur SX-9 sont dans la distribution de piControl2. La simulation sur Curie dépasse le 99<sup>e</sup> quantile de la distribution de piControl2 pour certaines périodes. C'est le cas également pour la simulation Historical. On note cependant que, pour des périodes d'une longueur supérieure à 70 ans, la simulation sur Curie et même la simulation Historical sont comprises dans la distribution de piControl2. La climatologie des précipitations du modèle sur les différents calculateurs tend donc à converger vers la climatologie sur SX-9 quand on augmente la longueur de la période.

Pour la SLP, la simulation Historical sort de la distribution de piControl2 pour une période

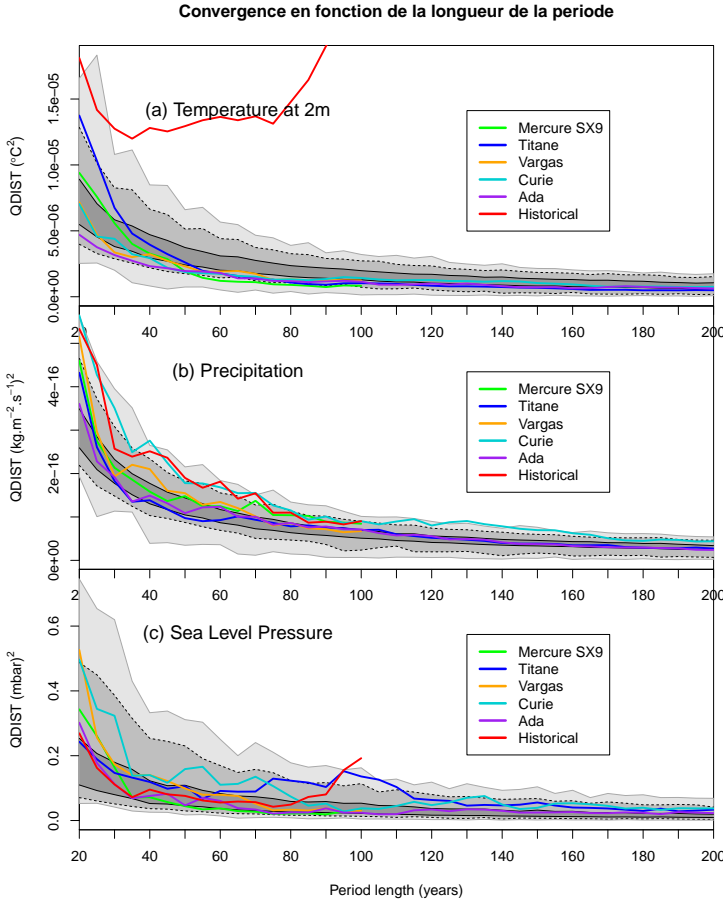


FIG. 2 – Distance quadratique QDIST entre les climatologies des simulations réalisées sur les différents calculateurs (courbes en couleurs, identifiées dans les légendes), ainsi que la simulation historique, et la simulation piControl2 (de référence sur SX-9) sur la période commune 2500-2699. En abscisse est affichée la longueur de la période en années ( $T$  dans l'eq.1) sur laquelle est calculée la moyenne climatologique. Le panneau en haut (a) montre les résultats pour la température à 2m, celui du milieu (b) montre les résultats pour les précipitations et celui du bas (c) montrent les résultats pour la SLP. Le grisé montre la distribution de la distance quadratique calculée entre deux périodes prises aléatoirement dans les 1900 ans de la simulation piControl2. Les dates de départ des périodes tirées aléatoirement (avec remise, 600 tirages) sont prises à intervalles de  $x$  années, pour une climatologie calculée sur  $x$  années. Du plus clair au plus foncé, les grisés indiquent les intervalles  $1/99^e$  (mis en évidence par des lignes grises fines),  $5/95^e$  (mis en évidence par des tirets) et  $25/75^e$  (mis en évidence par des lignes noires fines) quantiles de la distribution des distances quadratiques entre 2 périodes tirées aléatoirement dans piControl2.

supérieure à 95 ans. La simulation sur Titane est proche ou supérieure au 95<sup>e</sup> quantile pour des périodes comprises entre 70 et 115 ans. Initialement, les cinq simulations duraient seulement 100 ans, et c'est à la suite de ce résultat que la décision a été prise de prolonger trois d'entre elles (dont celle sur Titane) à 200 ans pour voir si elles pouvaient diverger de la distribution de piControl2 en augmentant la période considérée pour calculer les climatologies. Les résultats obtenus pour des périodes d'une longueur supérieure à 115 ans nous ont confirmé que les différentes simulations convergeaient bien à l'intérieur de la distribution de piControl2. Pour en savoir plus sur le comportement de piControl2T0 pour des périodes comprises entre 70 et 115 ans, nous avons regardé la carte des différences de SLP (moyennées sur 100 ans) entre piControl2T0 et piControl2. Celle-ci montre un pattern avec un pôle négatif sur l'Antarctique rappelant le Southern Annular Mode (SAM). La série temporelle de SLP dans piControl2T0 moyennée sur cette région montre une importante basse fréquence, caractérisée par une diminution continue jusqu'en 2550, puis une augmentation continue jusqu'à la fin de la période pour revenir au niveau de 2500. Le comportement de piControl2T0 reflète donc seulement l'expression de la basse fréquence du modèle couplé.

Les résultats obtenus pour t2m et le bilan radiatif sont rassurants. Ceux que nous avons obtenus sur les précipitations pour Curie mériteraient des investigations supplémentaires, mais le fait que la climatologie de la simulation sur Curie converge vers celle de la référence (à l'intérieur de la distribution de piControl2) pour des périodes de longueurs supérieures à 70 ans tend à montrer que la climatologie de précipitation sur Curie (de même que sur les autres calculateurs) n'est pas différente de la climatologie de précipitation sur SX-9. Pour la SLP, la convergence de toutes les simulations à l'intérieur de la distribution de piControl2 nous indique que le modèle converge vers la même climatologie de SLP sur les différents calculateurs. Cependant, il aura été nécessaire de prolonger les simulations pour s'assurer qu'il ne s'agissait que de l'expression de la basse fréquence du modèle, et non de la dérive du modèle vers un autre état moyen sur Titane que sur Mercure.

Cette étude nous a permis de poser les bases de la comparaison du climat du modèle IPSL-CM5A-LR sur les différents calculateurs utilisés à l'IPSL. Elle nous a permis de voir que la climatologie des variables atmosphériques du modèle, couramment utilisées en climatologie, ne dépendait pas du calculateur utilisé. Nous avons également pu voir que la variabilité basse fréquence du modèle était potentiellement importante, et qu'il pouvait être utile de comparer les simulations sur plus de 100 ans (même pour des

variables atmosphériques). On peut donc s'attendre à avoir besoin de simulations encore plus longues si on s'intéresse à des variables océaniques. Après ces premiers résultats rassurants sur l'état moyen du modèle, la prochaine étape de cette comparaison du climat du modèle obtenu sur différents calculateurs sera d'analyser la variabilité climatique du modèle.

#### Remerciements

Les auteurs remercient Claude Frankignoul (LOCEAN), Francis Codron (LMD), Pascale Braconnot (LSCE) et Yann Meurdesoif (LSCE) pour leurs suggestions et participations aux discussions. Les calculs ont été réalisés au CCRT, au TGCC et à l'IDRIS dans le cadre de projets GENCI <sup>1</sup>. Nous tenons à remercier ici l'ensemble des personnes qui financent, installent, surveillent, font évoluer, réparent ou aident à l'utilisation de ces ressources de calcul indispensables à nos projets de recherche.

---

---

<sup>1</sup>Grand Equipement National de Calcul Intensif