

Description du projet 2025

Modélisation du climat: cycle de l'eau et variabilité climatique

Camille Risi
Camille.Risi@lmd.ipsl.fr

January 31, 2025

Contents

1	Information générale	1
2	Les modèles	2
2.1	LMDZ	2
2.2	ORCHIDEE	2
2.3	NEMO	2
2.4	ICOLMDZ	2
3	Estimation des ressources	2
3.1	Partition utilisée	2
3.2	Ressources par type de simulations	2
3.3	Stockage	3
4	Justification scientifique	3
4.1	Climats polaires	4
4.2	Interactions atmosphère-banquise	4
4.3	Amélioration du code radiatif de LMDZ	5
4.4	Amélioration des ondes de gravité dans la stratosphère	6
5	Lien avec autres projets	6

1 Information générale

- Titre du projet: Modélisation du climat: cycle de l'eau et variabilité climatique
- Demande: **499 000 heures CPU sur Irène (réparties en 420 sur SKL et 79 sur Rome), 400 To de stockage**
- Ce projet est un renouvellement de la précédente demande. Il est complémentaire d'un projet portant le même nom à l'IDRIS. (AD010107632R1).

2 Les modèles

2.1 LMDZ

Site web: <https://lmdz.lmd.jussieu.fr/>

LMDZ est modèle de circulation général atmosphérique développé au LMD. Il constitue la composante atmosphérique du modèle couplé de l'IPSL [Mignot et al., 2021] et est un outil d'étude de l'atmosphère et du climat pour plusieurs équipes en France et à l'étranger.

2.2 ORCHIDEE

Site web: <https://orchidee.ipsl.fr/>

ORCHIDEE est le modèle de surface continentale développé à l'IPSL [Krinner et al., 2005]. Il constitue la composante continentale du modèle couplé de l'IPSL et est utilisé ici couplé à LMDZ.

2.3 NEMO

Site web: <https://www.nemo-ocean.eu/>

NEMO est le modèle d'océan qui constitue la composante océanique du modèle couplé de l'IPSL. Il est utilisé ici couplé à LMDZ et à ORCHIDEE, formant le modèle couplé de l'IPSL [Boucher et al., 2020].

2.4 ICOLMDZ

Site web: <https://www.lmd.ipsl.fr/modelisations/dynamico/>

ICOLMDZ est la version régionale de LMDZ qui permet de réaliser des simulations à fine résolution (de l'ordre de la dizaine de km) sur des domaines limités. Elle utilise DYNAMICO, un nouveau coeur dynamique non-hydrostatique fonctionnant sur une grille icosaédrique.

Pour tous ces modèles, les codes sont rédigés en fortran.

3 Estimation des ressources

3.1 Partition utilisée

Toutes les simulations seront réalisées sur **Irène SKL** (jusqu'en novembre 2025), puis sur **Irène Rome** ensuite.

Les scripts d'installation de LMDZ et de IPSL-CM ont été prévus sur ces 2 partitions.

Les codes sont parallélisés en openMP ou MPI et tournent sur 64 ou 128 processeurs selon les résolutions.

Tous les logiciels nécessaires au lancement de simulation et à leur post-traitement sont déjà installés sur Irène SKL et Rome.

3.2 Ressources par type de simulations

Ce projet utilise la version **LMDZ6**, qui a été utilisée pour CMIP6. Elle inclue de nombreuses améliorations dans les paramétrisations de la convection et de nuages, ainsi qu'un nouveau réglage [Hourdin et al., 2019, Hourdin et al., 2020]. Les ressources consommées dépendent de la résolution horizontale et verticale de la simulation.

- La **résolution horizontale** est définie par la grille: par exemple, une grille 144x142 signifie qu'il y a 144 points en longitude (2.5° de résolution), 142 points en latitude (1.25° de résolution). Les résolutions standard sont VLR (very low resolution, 95x96), LR (low resolution, 144x142) ou MR (medium resolution, 280x280).

Modèle	Grille horizontale	Grille verticale	Configuration	Thème où cette configuration est utilisé	Temps de calcul CPU par an
LMDZ6	144x142 (LR)	79	couplé à ORCHIDEE	Pluies tropicales; Amélioration du code radiatif	750 h
LMDZ6	95x96 (VLR)	79	non couplé, avec isotopes de l'eau	Isotopes de l'eau	1000 h
LMDZ6	144x142 (LR)	79	couplé à NEMO	Interactions atmosphère-banquise	1 500h
ICOLMDZ	20km	79	couplé à ORCHIDEE, aire limitée sur l'Arctique	Climats polaires	1 900 h
ICOLMDZ	20km	79	couplé à ORCHIDEE, zoom sur l'Antarctique	Climats polaires	2 900 h
ICOLMDZ	20km	79	couplé à ORCHIDEE, gobal	Ondes de gravité dans la stratosphère	2 500 h

Table 1: Temps de calcul, en heures CPU par an, que prennent les différentes versions de LMDZ pour différentes résolutions horizontales et verticales et différentes configurations prévues dans cette demande.

- La **résolution verticale** est définie par le nombre de points sur la verticale: 39 ou 79.

Les ressources consommées dépendent aussi de la configuration dans laquelle LMDZ est utilisé:

- LMDZ peut-être **couplé à ORCHIDEE** (LMDZ-OR) ou non, **couplé à NEMO** ou non.
- Les isotopes de l'eau ou le coloriage de l'eau peuvent être activés, sous forme de l'ajout de traceurs: le temps de calcul est alors multiplié par des facteurs qui dépendent du nombre de traceurs supplémentaires.
- LMDZ6 peut utiliser le coeur dynamique classique de LMDZ, ou le nouveau coeur dynamique DYNAMICO, et tourner sur un domaine limité (**ICOLMDZ**).

Le tableau 1 résume les ressources consommées pour différentes configurations de LMDZ utilisées dans ce projet. Elles sont cohérentes avec celles répertoriées par l'IPSL:

<https://forge.ipsl.jussieu.fr/igcmg/wiki/PerformancesIPSLCM6>

3.3 Stockage

L'espace de stockage nécessaire dépend de la fréquence et de la quantité des sorties que chacun souhaite. C'est donc très variable d'une étude à l'autre. On estime que le stockage nécessaire aux simulations prévues en 2025 sera d'environ **22 To** (détails en section 4).

Comme nous avons déjà demandé **400 To** pour ce projet l'an dernier, nous n'en demandont pas plus.

4 Justification scientifique

Ce projet concerne l'**amélioration du modèle atmosphérique LMDZ** et de son **utilisation pour l'étude des processus atmosphériques**:

thème	calcul CPU sur Irène (k heures CPU)	stockage sur Irène (To)
Total	499	22
climats polaires	48	4
interactions atmosphère-banquise	204	3
amélioration du code radiatif dans LMDZ	140	10
Ondes de gravité dans la stratosphère	107	5

Table 2: Tableau résumant les demandes de temps de calcul et de stockage sur Irène SKL.

1. Climats polaires
2. Interactions atmosphère-banquise
3. Amélioration du code radiatif de LMDZ
4. Amélioration des ondes de gravité dans la stratosphère

La demande pour chacun de ces 4 thèmes est détaillée dans le tableau 2.

4.1 Climats polaires

Étienne Vignon, Valentin Wiener (thèse), Jean-Baptiste Madeleine, Lea Raillard (thèse), Nicolas Chiabrando (thèse), Justine Charrel (thèse)

Le travail sur les vents catabatiques par Valentin Wiener se poursuivra en particulier via la réalisation de simulations LAM ICOLMDZ à l'échelle du continent antarctique. De premières évaluations de la configuration ICOLMDZ antarctique seront également réalisées dans le cadre de la thèse de Justine Charrel avec un regard particulier sur les nuages et les précipitations. En Arctique, nous poursuivrons le développement de la paramétrisation des nuages de phase mixte en s'intéressant dorénavant aux nuages bas localisés dans la couche limite atmosphérique. Nicolas Chiabrando, nouveau doctorant, s'intéressera quant à lui à l'effet du chauffage au sein des nuages sur la dynamique des dépressions arctiques en définissant une nouvelle configuration de simulation ICOLMDZ LAM autour de la région du Svalbard.

Nous demandons:

- 10 ans de simulations ICOLMDZ globales zoomées sur l'Antarctique: $10ans \times 2\,900\,h \simeq 29\,000\,h\,cpu$
- 10 ans de simulations ICOLMDZ LAM dans la région du Svalbard: $10\,ans \times 1\,900\,h \simeq 19\,000\,h\,cpu$

$\Rightarrow$ Demande = 48 000h heures CPU sur Irène SKL, 4 To stockage

4.2 Interactions atmosphère-banquise

Camille Risi, Xiaohe Huan (thèse), Guillaume Gastineau, Francis Codron

Dans le cadre du programme de cotutelle avec l'Université de Tongji, la thèse de Xiaohe Huan vise à comprendre l'interaction atmosphère - glace de mer dans le contexte du changement climatique. La glace de mer est affectée par le réchauffement climatique, mais il s'agit d'un processus complexe

impliquant des changements dans la circulation thermohaline, le forçage radiatif et la circulation océanique et atmosphérique [Swart, 2017]. D’après des recherches antérieures, les changements de la circulation atmosphérique font partie des principaux facteurs contribuant au recul de la glace de mer [Ding et al., 2017]. Ce travail s’inscrit dans la continuité de la collaboration avec l’Université de Tongji pour quantifier davantage le rôle de la circulation atmosphérique dans le recul de la glace de mer [Liu et al., 2022].

Pour étudier cette question, Xiaohe Huan effectue des simulations avec le modèle couplé de l’IPSL avec des forçages de contrôle préindustriel et de scénarios abrupts de 4xCO2. Par la suite, une simulation 4xCO2 sera réalisée avec le champ de vent guidé par la simulation préindustrielle, ce qui constitue une application originale du guidage du vent dans les simulations couplées. Afin d’éliminer les erreurs introduites par le guidage, une simulation 4xCO2 avec le champ de vent guidé par le champ de vent 4xCO2 sera réalisée. En analysant les différences de glace de mer entre les deux simulations ci-dessus, nous pouvons isoler l’impact du champ de vent sur le changement de la glace de mer.

Ces simulations seront réalisées à basse résolution. Comme le champ de vent est susceptible d’évoluer rapidement sous l’effet du changement climatique [Ceppi et al., 2018], les simulations seront effectuées pendant 25 ans.

$$2 \times 25 \text{ ans} \times 1500 \text{ h} + 5\,000 \text{ h pour le débogage} = 80\,000 \text{ heures}$$

Pour parvenir à une compréhension globale des interactions entre l’atmosphère et la glace de mer, nous analyseront l’impact de la perte de glace de mer sur les précipitations [Bintanja and Selten, 2014]. En appliquant la méthode de taggage de l’eau [Risi et al., 2010], différentes couleurs de l’eau selon leur origine peuvent être suivies pour mieux identifier les changements de sources de vapeur d’eau pour les précipitations [Vázquez et al., 2016, Gimeno et al., 2019].

L’étude sera réalisée à l’aide du modèle LMDZiso à basse résolution. Les zones océaniques et continentales seront considérées pour les régions de marquage. Dans un premier temps, des tests de base avec H216O seront effectués pour valider le modèle et évaluer ses performances sur les régions continentales. Une fois le modèle correctement configuré, d’autres tags seront ajoutés pour quantifier la contribution des sources d’évaporation aux précipitations arctiques.

$$20 \text{ ans} \times 1000 \text{ h} \times 6 \text{ (facteur pour le coloriage)} + 4\,000 \text{ h pour le débogage} = 124\,000 \text{ h}$$

$$\Rightarrow \text{Demande} = 204\,000 \text{ h heures CPU sur Irène SKL, 3 To stockage}$$

4.3 Amélioration du code radiatif de LMDZ

Abderrahmane Idelkadi, Frédéric Hourdin, Lionel Guez, Maelle Coulon Decorzens (thèse), Najda Villefranche

Dans la suite du travail sur l’évaluation de LMDZ avec Ecrad (voir rapport), une série de simulations continuera à être mise en place. La résolution standard LR sera utilisée pour ces simulations avec le double appel du code de transfert radiatif Ecrad. Voici les tests prévus

- Tests effets 3D des nuages : $10 \times 5 \text{ ans} \times 750 \text{ h} \times 1.5 \text{ (facteur pour le double appel)} = 56\,000 \text{ h}$
- Tests des hypothèses sur le recouvrement des nuages : $10 \times 5 \text{ ans} \times 750 \text{ h} \times 1.5 \text{ (facteur pour le double appel)} = 56\,000 \text{ h}$
- Autres tests : au cas où il faut refaire des simulations (erreurs ou manque de sorties) : $3 \times 5 \text{ ans} \times 750 \text{ h} \times 1.5 \text{ (facteur pour le double appel)} = 17\,000 \text{ h}$

$$\Rightarrow \text{Demande} = 129\,000 \text{ h sur Irène SKL et 10 To d’espace de stockage}$$

4.4 Amélioration des ondes de gravité dans la stratosphère

Déborah Bardet (post-doc), François Lott, Lionel Guez

Cet axe historique de la version IDRIS de ce projet est nouveau pour la version TGCC. Il s'agit d'optimiser la représentation de la circulation dans la stratosphère de LMDZ puis d'ICOLMDZ en utilisant des paramétrisations d'ondes de gravité dont les paramètres sont optimisés vis à vis:

- des données ballons issues de la campagne Strateole 2 [Lott et al., 2023, Lott et al., 2024], pour les tropiques et des ballons LOON [Green et al., 2024] pour l'ensemble du globe
- des simulations globales à haute résolution (kilométrique pour IFS) faites par les modèles ICON et IFS [Toghraei et al., 2025].

L'objectif est d'avoir des paramétrisations plus réalistes, permettant de simuler l'oscillations Quasi biennale (QBO), les stratosphériques warming [Martínez-Andradas et al., 2024], et la date de fin du vortex de l'hémisphère sud au printemps. Comme il s'agit de variabilités lentes, des simulations de plusieurs dizaines d'années sont nécessaires.

Nous réaliserons donc:

- Simulations avec LMDZ6 LR: $10 \times 20 \text{ ans} \times 750h = 15\,000h$
- Simulations avec ICOLMDZ: $2 \times 20 \text{ ans} \times 2\,300h = 92\,000h$

$\Rightarrow$ Demande = 107 000h sur Irène SKL et 5 To d'espace de stockage

5 Lien avec autres projets

- Ce projet est jumeau avec le projet AD010107632R3 à l'IDRIS
- Ce projet se différencie des autres projets impliquant le modèle LMDZ en explorant des pistes de développement du modèle très en amont.

References

- [Bintanja and Selten, 2014] Bintanja, R. and Selten, F. (2014). Future increases in arctic precipitation linked to local evaporation and sea-ice retreat. *Nature*, 509(7501):479–482.
- [Boucher et al., 2020] Boucher, O., Servonnat, J., Albright, A. L., Aumont, O., Balkanski, Y., Bastrikov, V., Bekki, S., Bonnet, R., Bony, S., Bopp, L., et al. (2020). Presentation and evaluation of the ipslcm6a-lr climate model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(7):e2019MS002010.
- [Ceppi et al., 2018] Ceppi, P., Zappa, G., Shepherd, T. G., and Gregory, J. M. (2018). Fast and slow components of the extratropical atmospheric circulation response to co 2 forcing. *Journal of Climate*, 31(3):1091–1105.
- [Ding et al., 2017] Ding, Q., Schweiger, A., L'Heureux, M., Battisti, D. S., Po-Chedley, S., Johnson, N. C., Blanchard-Wrigglesworth, E., Harnos, K., Zhang, Q., Eastman, R., et al. (2017). Influence of high-latitude atmospheric circulation changes on summertime arctic sea ice. *Nature Climate Change*, 7(4):289–295.
- [Gimeno et al., 2019] Gimeno, L., Vázquez, M., Eiras-Barca, J., Sorí, R., Algarra, I., and Nieto, R. (2019). Atmospheric moisture transport and the decline in arctic sea ice. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 10(4):e588.

- [Green et al., 2024] Green, B., Sheshadri, A., Alexander, M. J., Bramberger, M., and Lott, F. (2024). Gravity wave momentum fluxes estimated from project loon balloon data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129(5):e2023JD039927.
- [Hourdin et al., 2019] Hourdin, F., Jam, A., Rio, C., Couvreux, F., Sandu, I., Lefebvre, M.-P., Brient, F., and Idelkadi, A. (2019). Unified parameterization of convective boundary layer transport and clouds with the thermal plume model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(9):2910–2933.
- [Hourdin et al., 2020] Hourdin, F., Rio, C., Grandpeix, J.-Y., Madeleine, J.-B., Cheruy, F., Rochetin, N., Jam, A., Musat, I., Idelkadi, A., Fairhead, L., et al. (2020). Lmdz6a: The atmospheric component of the ipsl climate model with improved and better tuned physics. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(7):e2019MS001892.
- [Krinner et al., 2005] Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudre, N., Ogee, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., and Prentice, I. C. (2005). A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 19.
- [Liu et al., 2022] Liu, Z., Risi, C., Codron, F., Jian, Z., Wei, Z., He, X., Poulsen, C. J., Wang, Y., Chen, D., Ma, W., et al. (2022). Atmospheric forcing dominates winter barents-kara sea ice variability on interannual to decadal time scales. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(36):e2120770119.
- [Lott et al., 2024] Lott, F., Rani, R., McLandress, C., Podglajen, A., Bushell, A., Bramberger, M., Lee, H.-K., Alexander, J., Anstey, J., Chun, H.-Y., et al. (2024). Comparison between non orographic gravity wave parameterizations used in qboi models and strateole 2 constant level balloons. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.
- [Lott et al., 2023] Lott, F., Rani, R., Podglajen, A., Codron, F., Guez, L., Hertzog, A., and Plougonven, R. (2023). Direct comparison between a non-orographic gravity wave drag scheme and constant level balloons. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(4):e2022JD037585.
- [Martínez-Andradas et al., 2024] Martínez-Andradas, V., de la Cámara, A., Zurita-Gotor, P., Lott, F., and Serva, F. (2024). Quantifying the spread in sudden stratospheric warming wave forcing in cmip6. *EGUsphere*, pages 1–20.
- [Mignot et al., 2021] Mignot, J., Hourdin, F., Deshayes, J., Boucher, O., Gastineau, G., Musat, I., Vancoppenolle, M., Servonnat, J., Caubel, A., Chérut, F., et al. (2021). The tuning strategy of ipsl-cm6a-lr. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(5):e2020MS002340.
- [Risi et al., 2010] Risi, C., Bony, S., Vimeux, F., Frankenberg, C., and Noone, D. (2010). Understanding the Sahelian water budget through the isotopic composition of water vapor and precipitation. *J. Geophys. Res.*, 115, D24110:doi:10.1029/2010JD014690.
- [Swart, 2017] Swart, N. (2017). Natural causes of arctic sea-ice loss. *Nature Climate Change*, 7(4):239–241.
- [Toghraei et al., 2025] Toghraei, I., Lott, F., Kohler, L., Stephan, C. C., and Alexander, M. J. (2025). Can parameterizations reproduce the gravity waves momentum fluxes and drag simulated by a global high resolution model? *Geophys. Res. Lett.*, subm:1–20.
- [Vázquez et al., 2016] Vázquez, M., Nieto, R., Drumond, A., and Gimeno, L. (2016). Moisture transport into the arctic: Source-receptor relationships and the roles of atmospheric circulation and evaporation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(22):13–493.