



Analyse des risques climatiques pour la planification de l'adaptation au changement climatique dans le secteur agricole à Madagascar

l'Information Supplémentaire

Carla Cronauer, Chiara Sophia Weituschat, Anna Hampf, Sabine Undorf, Stephanie Gleixner, Jillian Waid, Lisa Murken

Un rapport préparé par Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) en collaboration avec la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH pour le compte du ministère fédéral allemand de la coopération économique et du développement (BMZ).

1. Information additionnelle sur les scénarios climatiques utilisés dans l'analyse des risques climatiques

Les scénarios de projection des futures émissions présentés dans ce rapport, en particulier les scénarios RCP (basés sur les SSP), reposent sur les nouvelles versions des trajectoires de concentration représentatives (RCP) qui ont été introduites dans le cadre du sixième rapport d'évaluation (AR6) du Groupe d'experts Intergouvernementaux sur l'Evolution du Climat (GIEC) (GIEC, 2022). Les scénarios d'évolution socio-économique (SSP) décrivent les conditions socio-économiques possibles, les changements d'affectation des terres et d'autres facteurs climatiques d'origine humaine qui influencent les émissions de gaz à effet de serre, affectant ainsi le forçage radiatif et les conditions sociétales potentielles futures. Différents modèles d'évaluation intégrée (Integrated Assessment Models ou IAM) ont été utilisés pour traduire les conditions socio-économiques des SSP en trajectoires possibles d'émissions de gaz à effet de serre (Hausfather, 2018). Les IAM comprennent des hypothèses sur l'évolution potentielle de la population, de l'éducation, de l'utilisation de l'énergie, de la technologie et d'autres facteurs au cours du siècle prochain, et prévoient donc des trajectoires d'émissions différentes pour les différents scénarios de développement durable. Au total, il y a cinq scénarios, SSP1 à SSP5, qui représentent un éventail de trajectoires socio-économiques, couvrant des défis faibles à élevés en matière d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. Ces différentes trajectoires d'émissions sont regroupées et représentées par les sept RCP, qui définissent un forçage radiatif atteint en 2100. Les RCP sont désignés par le niveau de forçage radiatif supplémentaire atteint en 2100 par rapport à l'époque préindustrielle (+1,9, +2,6, +3,4, +4,5, +6,0, +7,0

et +8,5 W/m², respectivement) (van Vuuren et al., 2011; Wayne, 2013). Toutes les trajectoires de concentration représentatives pour le XXI^e siècle peuvent être atteints avec n'importe quel SSP, à l'exception du RCP8.5, qui ne peut être atteint qu'avec le SSP5 (O'Neill et al., 2014; van Vuuren et al., 2014). Dans l'analyse des risques climatiques pour la planification de l'adaptation au changement climatique dans le secteur agricole de Madagascar, nous utilisons les scénarios SSP1-RCP2.6, SSP3-RCP7.0 et SSP5-RCP8.5. Le premier, SSP1-RCP2.6, est le deuxième scénario le plus optimiste du GIEC et représente une évolution de la société vers des pratiques plus durables, et un passage de la croissance économique au bien-être général. Dans ce scénario, l'augmentation de la température mondiale devrait être de 2 °C d'ici 2100 par rapport aux valeurs préindustrielles. Le deuxième scénario, SSP3-RCP7.0, présente des défis importants en matière d'atténuation et d'adaptation dans un monde où il n'y a pas ou peu d'interventions en matière de politique climatique et où l'augmentation de la température peut atteindre 5 °C jusqu'à la fin du siècle (Hausfather, 2018; van Vuuren et al., 2011). Avec un forçage radiatif supplémentaire de 7 W/m² d'ici 2100, ce scénario se situe dans la partie moyenne supérieure de la gamme des scénarios envisagés par le GIEC. Le troisième scénario, SSP5-RCP8.5, représente un développement alimenté par les combustibles fossiles sans politique climatique supplémentaire. Avec un forçage radiatif supplémentaire de 8,5 W/m² d'ici 2100, ce scénario se situe à la limite supérieure de la gamme des scénarios envisagés par le GIEC (Chen et al., 2021).

2. Information supplémentaire sur les projections climatiques

Dans cette analyse des risques climatiques, les données climatiques historiques issues de l'observation et les données du modèle climatique projetées dans le futur, sont utilisées comme données d'entrée pour la modélisation agricole. Pour l'étalonnage du modèle agricole, on utilise l'ensemble de données W5E5 dérivées de l'observation. Ce jeu de données possède une couverture mondiale avec une résolution spatiale de 0,5° et une résolution temporelle journalière. Il a été compilé pour ajuster le biais des données d'entrée dérivées des modèles climatiques pour la phase 3 du projet de comparaison des modèles d'impact intersectoriels (ISIMIP3), faisant partie de l'ISIMIP3a (Lange et al., 2021). Dans un deuxième temps, le modèle agricole calibré a été exécuté à nouveau avec les données climatiques de l'ISIMIP3b qui sont constituées des données de sortie du modèle climatique corrigées des biais de la phase 6 du Projet de comparaison des modèles couplés (CMIP6) pour les conditions historiques, SSP1-RCP2.6, SSP3-RCP7.0, et SSP5-RCP8.5 (Lange, 2019, 2021).

L'ensemble ISIMIP3b comprend une simulation de chacun des dix modèles CMIP6, répartis en cinq modèles primaires¹ et cinq modèles secondaires², sur la base de critères de performance, d'indépendance et de disponibilité, qui, ensemble, représentent bien l'écart de sensibilité climatique de l'ensemble CMIP6 (Lange, 2021). Après l'ajustement des biais et la réduction d'échelle effectués par le projet ISIMIP, ces données climatiques ont été encore réduites pour atteindre une résolution spatiale de 0,125° × 0,125°, ce qui correspond à environ 12,5 km × 12,5 km près de l'équateur. La réduction d'échelle des simulations du modèle a été réalisée à l'aide d'un ensemble de données d'observation à haute résolution produit en appliquant l'algorithme CHELSA (Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas) aux données W5E5 (Karger et al., 2022), ce qui permet aux ensembles de données de rester cohérents avec l'étalonnage du modèle, tout en tenant compte de l'influence de la topographie à haute résolution sur le climat local (Hampf et al., 2024a, en préparation).

1 GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, UKESM1-0-LL, IPSL-CM6A-LR
2 MIROC6, EC-Earth3, CNRM-ESM2-1, CNRM-CM6-1, CanESM5

3. Modélisation des cultures

3.1 Méthodologie et modèle EcoCrop

Le modèle Crop Ecological and Environmental Requirements (EcoCrop) est un modèle agricole basé sur les processus qui utilisent des plages environnementales pour déterminer l'aptitude d'une culture à être cultivée dans un lieu spécifique (Ramirez-Villegas et al., 2013). Il compare les données climatiques mensuelles avec les seuils de température et de précipitations minimales et maximales spécifiques aux cultures, et prend également en compte le pH du sol. Le résultat du modèle EcoCrop est un indice qui varie entre 0 et 1 (0 : ne convient pas, à 1 : convient parfaitement). Cet indice peut être classé en cinq catégories : non approprié (0–0,2), marginal (0,21–0,4), approprié (0,41–0,6), très approprié (0,61–0,8) et excellentement approprié (0,81–1).

Pour ce rapport, les cartes du pH du sol pour Madagascar ont été dérivées des cartes mondiales des propriétés du sol qui sont publiquement mis à disposition par le Centre international de référence et d'information sur les sols (Soil Reference and Information Centre) (ISRIC, 2020). Pour la calibration du modèle, les données climatiques W5E5 ont été utilisées et les moyennes des températures et des précipitations ont été calculées sur la période de 1986 à 2015, représentant l'année de référence 2000. Le modèle EcoCrop a été évalué en comparant les zones d'aptitude prédites aux surfaces récoltées observées au niveau du district. La superficie récoltée observée pour la production de café, de poivre, et de vanille au niveau des districts a été obtenue auprès du ministère malgache de l'agriculture pour la période 2005–2010. Des périodes plus longues au niveau des districts n'étaient pas disponibles.

3.2 Méthodologie et modèle APSIMX

Les rendements des arachides ont été simulés avec la prochaine génération de l'Agricultural Production Systems sIMulater (APSIMX, version 2023.8.7287.0). APSIMX est un modèle de culture basé sur les processus qui simule la croissance et le développement de diverses espèces de cultures en réponse à la gestion dans diverses conditions environnementales (Holzworth et al., 2018; Holzworth et al., 2014). Il a été largement utilisé et testé dans diverses études, notamment dans le cadre de projets de comparaison de modèles de l'Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP, Asseng et al., 2013; Bassu et al., 2014; Müller et al., 2016). Le module arachide de l'APSIM a été développé par Robertson et al. (2002) et a été testé dans le nord de l'Australie avec des facteurs tels que les cultivars, la date de semis, l'irrigation et le type de sol.

De plus amples informations sur la modélisation, y compris les données d'entrée, l'étalonnage et l'évaluation, sont disponibles dans Hampf et al. (en préparation a, b).

Références

- Asseng, S., Ewert, F., Rosenzweig, C., Jones, J. W., Hatfield, J. L., Ruane, A. C., Boote, K. J., Thorburn, P. J., Rötter, R. P., Cammarano, D., Brisson, N., Basso, B., Martre, P., Aggarwal, P. K., Angulo, C., Bertuzzi, P., Biernath, C., Challinor, A. J., Doltra, J., ... Wolf, J. (2013). Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change*, 3(9), Article 9. <https://doi.org/10.1038/nclimate1916>
- Bassu, S., Brisson, N., Durand, J.-L., Boote, K., Lizaso, J., Jones, J. W., Rosenzweig, C., Ruane, A. C., Adam, M., Baron, C., Basso, B., Biernath, C., Boogaard, H., Conijn, S., Corbeels, M., Deryng, D., De Sanctis, G., Gayler, S., Grassini, P., ... Waha, K. (2014). How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors? *Global Change Biology*, 20(7), 2301–2320. <https://doi.org/10.1111/gcb.12520>
- Chen, D., M. Rojas, B.H. Samset, K. Cobb, A. Diongue Niang, P. Edwards, S. Emori, S.H. Faria, E. Hawkins, P. Hope, P. Huybrechts, M. Meinshausen, S.K. Mustafa, G.-K. Plattner, and A.-M. Tréguier, 2021: Framing, Context, and Methods. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 147–286, doi:10.1017/9781009157896.003.
- Hampf, A. C., Gleixner, S., Undorf, S., & Gornott, C. (en préparation a). Climate change impacts on the agroclimatic suitability of major food and cash crops in Madagascar.
- Hampf, A. C., Weituschat, C. S., Gleixner, S., Undorf, S., & Murken, L. (en préparation b). Adaptation strategies to climate change for smallscale farmers in Madagascar.
- Hausfather, Z. (2018). Explainer: How “shared socioeconomic pathways” explore future climate change. *CarbonBrief*. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>
- Holzworth, D., Huth, N. I., Fainges, J., Brown, H., Zurcher, E., Cichota, R., Verrall, S., Herrmann, N. I., Zheng, B., & Snow, V. (2018). APSIM Next Generation: Overcoming challenges in modernising a farming systems model. *Environmental Modelling & Software*, 103, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.02.002>
- Holzworth, D. P., Huth, N. I., deVoil, P. G., Zurcher, E. J., Herrmann, N. I., McLean, G., Chenu, K., van Oosterom, E. J., Snow, V., Murphy, C., Moore, A. D., Brown, H., Whish, J. P. M., Verrall, S., Fainges, J., Bell, L. W., Peake, A. S., Poulton, P. L., Hochman, Z., ... Keating, B. A. (2014). APSIM – Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environmental Modelling & Software*, 62, 327–350. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.009>
- IPCC (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- ISRIC (2020). SoilGrids web portal. SoilGrids Web Portal. <https://soilgrids.org>
- Karger, D. N., Lange, S., Hari, C., Reyer, C. P. O., & Zimmermann, N. E. (2022). CHELSA-W5E5 v1.0: W5E5 v1.0 downscaled with CHELSA v2.0. ISIMIP Repository. [dataset]. <https://doi.org/10.48364/ISIMIP.836809.2>
- Lange, S. (2019). Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0). *Geoscientific Model Development*, 12(7), 3055–3070. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3055-2019>
- Lange, S. (2021). ISIMIP3b bias adjustment fact sheet. https://www.isimip.org/documents/413/ISIMIP3b_bias_adjustment_fact_sheet_Gnsz7CO.pdf
- Lange, S., Menz, C., Gleixner, S., Cucchi, M., Weedon, G. P., Amici, A., Bellouin, N., Müller Schmied, H., Hersbach, H., Buontempo, C., & Cagnazzo, C. (2021). WFDE5 over land merged with ERA5 over the ocean (W5E5 v2.0). ISIMIP Repository. [dataset]. <https://doi.org/10.48364/ISIMIP.342217>
- Müller, C., Elliott, J., Chryssanthacopoulos, J., Arneth, A., Balkovic, J., Ciais, P., Deryng, D., Folberth, C., Glotter, M., Hoek, S., Iizumi, T., Izaurre, R. C., Jones, C., Khabarov, N., Lawrence, P., Liu, W., Olin, S., Pugh, T. A. M., Ray, D., ... Yang, H. (2016). Global Gridded Crop Model evaluation: Benchmarking, skills, deficiencies and implications. *Geoscientific Model Development Discussions*. <https://doi.org/10.5194/gmd-2016-207>

O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., & van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socio-economic pathways. *Climatic Change*, 122(3), 387–400. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>

Ramirez-Villegas, J., Jarvis, A., & Läderach, P. (2013). Empirical approaches for assessing impacts of climate change on agriculture: The EcoCrop model and a case study with grain sorghum. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.09.005>

Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>

Robertson, M. J., Carberry, P. S., Huth, N. I., Turpin, J. E., Probert, M. E., Poulton, P. L., Bell, M., Wright, G. C., Yeates, S. J., & Brinsmead, R. B. (2002). Simulation of growth and development of diverse legume species in APSIM. *Australian Journal of Agricultural Research*, 53(4), 429–446. <https://doi.org/10.1071/ar01106>

van Vuuren, D. P., Kriegler, E., O'Neill, B. C., Ebi, K. L., Riahi, K., Carter, T. R., Edmonds, J., Hallegatte, S., Kram, T., Mathur, R., & Winkler, H. (2014). A new scenario framework for Climate Change Research: Scenario matrix architecture. *Climatic Change*, 122(3), 373–386. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0906-1>

van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J. F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

Wayne, G. P. (2013). The Beginner's Guide to Representative Concentration Pathways. *Skeptical Science*. <https://doi.org/10.1063/1.1370531>