



Université de Guelph  
Statistique/bioinformatique  
Compte de mots : 1319

Réduire au minimum l'insécurité alimentaire  
causée par les changements climatiques par  
l'intermédiaire de prédictions du caractère  
adéquat des terres et de la création de cultures  
résilientes aux changements climatiques

---

*Superviseur :*

Dr Khurram Nadeem  
(nadeemk@uoguelph.ca)

*Auteurs :*

Amanjot Bhullar  
(bhullara@uoguelph.ca) Patrick  
McMillan  
(pmcmilla@uoguelph.ca)

8 janvier 2024

## Introduction

En 2011, 16 % des ménages à l'échelle du Canada ont vécu une certaine forme d'insécurité alimentaire (Tarasuk et coll. 2022), tandis que 10 % de la population mondiale souffrait de faim chronique (Organisation mondiale de la Santé, 2022). Une augmentation de 70 % de la productivité alimentaire mondiale est nécessaire d'ici 2050 afin de nourrir la population projetée (Hannah et coll., 2020). Si la production alimentaire ne répond pas aux besoins de la population grandissante, le nombre de familles vivant dans l'insécurité alimentaire devrait croître au cours des décennies à venir. La réponse aux demandes mondiales en nourriture représente un défi d'envergure parce que, comme tout le monde s'entend pour le dire, les changements climatiques réduiront probablement le rendement de culture dans les pays de latitude moyenne, où les températures se situent déjà près des niveaux de tolérance des cultures (Mendelsohn 2008; Neufeldt et coll. 2018). En fait, la revue médicale Lancet estime que les déficits nutritionnels causés par les répercussions prévues des changements climatiques sur la sécurité alimentaire constituent la plus grave menace du siècle pour la santé publique et que l'intervention face à cette menace pourrait être (traduction) « la plus grande possibilité mondiale en matière de santé du XXI<sup>e</sup> siècle » (Watts et coll. 2018).

Les changements climatiques devraient avoir des répercussions positives et négatives sur la production agricole des pays à latitude élevée. En effet, le Canada et la Russie détiennent 56 % des nouvelles terres arables prévues du monde (Anderson et coll. 2020; Hannah et coll. 2020). Ainsi, si les changements climatiques réduisent le rendement des cultures dans les pays à latitude moyenne, le Canada doit jouer un rôle plus évident pour garantir la sécurité alimentaire à l'échelle mondiale. La capacité du Canada de tirer parti des effets positifs des changements climatiques sur la production agricole tout en atténuant leurs effets négatifs aura d'importantes conséquences, non seulement sur la sécurité alimentaire mondiale, mais aussi sur le produit intérieur brut du pays. Si le Canada souhaite maintenir sa position en tant que producteur de premier plan dans l'industrie agroalimentaire et aider à réduire au minimum l'insécurité alimentaire, il est crucial de cerner les éventuelles répercussions négatives et, dans la mesure du possible, de les gérer de façon proactive.

La majeure partie des terres agricoles viables, et donc, de la productivité agricole, du Canada se trouve dans les latitudes australes du pays. À cause des changements

climatiques, ces régions devraient connaître des taux de sécheresse et de stress causé par la chaleur au cours des prochaines décennies (King et coll., 2018; Palomo, 2017). Ce changement dans l'environnement devrait avoir une incidence négative sur le rendement agricole de ces régions. Cependant, la hausse de la température ouvrira de nouvelles terres aux fins de développement agricole dans les latitudes boréales. Il est prévu qu'environ 1,85 million de km<sup>2</sup> de terres canadiennes actuellement non viables seront propices à l'agriculture d'ici 2080. Le développement de ces terres permettrait de compenser les baisses de la productivité agricole causées par les changements climatiques, mais il libérerait 15 gigatonnes estimées de carbone, intensifiant ainsi les changements climatiques (KC et coll. 2021). Par conséquent, l'approche la plus adéquate pour accroître le rendement de culture à l'échelle du Canada pourrait être d'intensifier la productivité agricole aux exploitations en place. Cet article cherche à estimer la façon dont la productivité agricole au Canada peut changer sous l'effet des changements climatiques au cours des prochaines décennies et présente des solutions de politique axées sur des données probantes pour lutter contre ces effets et continuer de subvenir aux besoins de la population croissante.

## **Projections des terres aptes à la culture dans le futur**

Plusieurs études, telles que celles d'Anusha et coll., 2023, d'Everest et coll., 2021 et de Han et coll., 2021, ont tenté d'établir des projections des terres aptes à la culture dans le futur pour différentes régions du monde. Cependant, ces projections ne reposent pas sur une approche axée sur les données et offrent à peine des indicateurs binaires qui déterminent si la terre est apte ou inapte à des cultures précises. La nature binaire des projections est restrictive, car il n'y a aucune indication de *la mesure* dans laquelle la terre est apte à chaque culture. Dans la recherche antérieure de Bhullar et coll., 2023, nous avons mis au point un cadre nouveau afin de produire une mesure continue de l'aptitude à la culture des terres agricoles en fonction de variables liées au climat et au sol qui se nomme Deep Simultaneous Suitability Scoring (DeepS3). DeepS3 est un modèle de perceptron multicouche qui met à profit des données historiques sur le sol, le climat, le paysage et le rendement de culture du Canada afin de prédire l'aptitude des terres à la culture pour six principales cultures de produits de base : l'orge, les pois, le blé de printemps, le canola, l'avoine et le soja. D'après ce que nous savons, il s'agit du seul algorithme axé sur les données pour déterminer l'aptitude des terres, destiné au

Canada. Il a été conclu que le modèle DeepS3 est en mesure d'obtenir une réduction de 2,82 fois de l'erreur absolue moyenne par rapport aux modèles courants pour une seule culture.

Des projections du climat fondées sur les scénarios RCP 4.5 et 8.5 ont été utilisées afin de prédire l'évolution de l'aptitude des terres d'ici 2050 et 2100. Les projections RCP proviennent du jeu de données NEX-GDDP au moyen du modèle climatique IPSL-CM5A-MR (Thrasher et coll., 2012). Le scénario 4.5 est considéré comme un scénario de stabilisation modérée où la planète entière agit pour lutter contre les changements climatiques, tandis que le scénario 8.5 est le pire des scénarios, où les émissions ne sont pas contrôlées (Van Vuuren et al. 2011). Afin de créer les cartes montrées dans la figure 1, on a utilisé DeepS3 afin de créer des cartes de l'aptitude pour les conditions actuelles et futures. On a ensuite soustrait les deux pour obtenir le résultat final.

La figure 1 montre des cartes propres à des cultures qui montrent le pourcentage de changement prévu dans l'aptitude des terres à l'agriculture. Nous avons constaté que les cultures d'orge et d'avoine devraient généralement augmenter là où la température de l'air diurne augmente et que la région est plate, mais diminuer là où les précipitations augmentent. On constate une relation opposée en ce qui concerne les pois, le blé de printemps, le canola et le soja et un changement faible, voire nul, de l'aptitude des terres prévue pour les latitudes nordiques, ce qui donne à penser que le développement de ces régions à des fins agricoles n'est peut-être pas une méthode efficace pour compenser la réduction du rendement. Les tendances présentées dans la figure 1 devraient aussi être évaluées en tenant compte de l'hypothèse selon laquelle l'agriculture ne s'étend pas à l'extérieur de la région où elle a lieu actuellement (tableau 1). Nous constatons que l'avoine devrait connaître la plus grande augmentation de production, suivie de l'orge. À l'inverse, le canola devrait subir la plus grande perte de production, suivi de près par les pois, le blé de printemps et le soja. Cette baisse possible de production pose une grave menace pour l'industrie agroalimentaire canadienne, car le Canada est l'un des cinq principaux exportateurs des cultures mentionnées. En outre, cela suppose que le Canada n'atteindra pas la cible d'augmentation de production de 70 % si les conditions demeurent inchangées. Ces résultats portent à croire qu'il faut davantage chercher à améliorer la qualité génétique des cultivars de canola et de pois afin de réduire au minimum l'incidence des changements climatiques sur ces cultures et moins mettre l'accent sur l'avoine et l'orge.

## **Culture préventive**

Notre analyse nous a permis d'avoir une idée des cultures qui devraient subir les plus importants effets négatifs des changements climatiques et les raisons qui l'expliquent. Ces connaissances nous permettent de prendre des mesures proactives pour réduire au minimum l'incidence des changements climatiques sur le rendement de culture. Il est possible d'améliorer le rendement de culture en suivant deux approches principales : l'amélioration de la génétique et les techniques de gestion. On a toujours constaté que le gain génétique est le facteur le plus important pour améliorer le rendement des cultures (Mackay et coll. 2011; Rijk et coll. 2013). Cependant, étant donné que le cycle de sélection pour de nombreuses cultures peut durer une décennie afin de produire un cultivar prêt pour le marché, il est essentiel de commencer de façon préventive le processus de sélection pour assurer la résilience aux changements climatiques (Fugerey-Scarbel et coll. 2021).

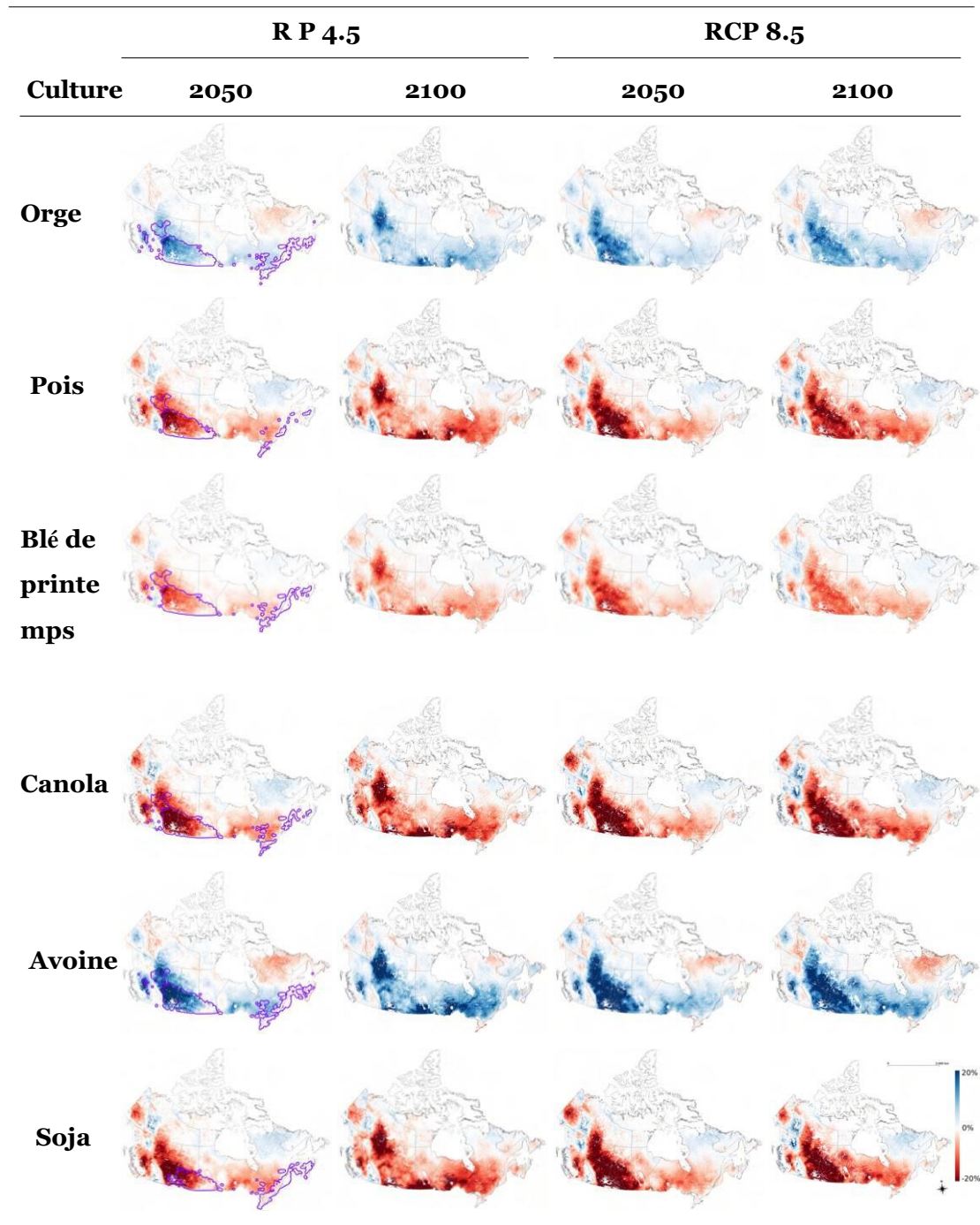


Figure 1. Les régions du Canada qui devraient avoir des rendements de culture plus élevés (bleu) et moins élevés (rouge) par rapport aux années 2010. En particulier, le blanc représente une augmentation relative de rendement de culture de 0 %, tandis que le bleu le plus foncé représente une augmentation relative de rendement de culture de 20 % et le rouge le plus foncé, une baisse relative de rendement de culture de 20 %. La bordure mauve dans la première colonne montre grossièrement où la culture respective a été cultivée pendant les saisons de culture de 2013 à 2020. QGIS 3.30.0 (<http://www.qgis.org>) a été utilisée pour créer la figure (QGIS Association s.d.).

<b>Culture</b>	<b>Actuel</b>	<b>Projeté</b>			
	<b>(2013-2020)</b>	<b>Production moyenne RCP 8.5</b>		<b>RCP 4.5</b>	
		<b>2050</b>	<b>2100</b>	<b>2050</b>	<b>2100</b>
<b>Avoine</b>	241,280	+11 %	+11 %	+16 %	+17 %
<b>Orge</b>	412,727	+10 %	+6 %	+13 %	+10 %
<b>Soja</b>	233,943	-2 %	-10 %	-5 %	-6 %
<b>Blé de printemps</b>	880,088	-8 %	-7 %	-13 %	-10 %
<b>Pois</b>	14,128	-14 %	-10 %	-21 %	-16 %
<b>Canola</b>	851,620	-16 %	-14 %	-24 %	-20 %

**Tableau 1 : Changement prévu en pourcentage de la production de culture à l'échelle du pays par rapport à la période actuelle (2013-2020). La production moyenne actuelle est indiquée en boisseaux et provient de Statistique Canada, 2021, et permet de convertir le pourcentage en boisseaux. Les projections supposent que l'agriculture ne s'étend pas à des terres situées à l'extérieur de la région où les cultures ont été cultivées de 2013 à 2020**

Le cadre proposé pour cette méthodologie est d'obtenir un jeu de données d'essais de rendement de cultures dans des environnements multiples avec des cultivars génotypés, d'analyser ces données ainsi que des variables liées au climat pour saisir le génotype par interactions environnementales et finalement de prédire le rendement de cultivars moderne dans des scénarios de changements climatiques pour cerner les variétés potentiellement résilientes aux changements climatiques. Cette information nous permet de quantifier la relation entre le rendement d'un cultivar et l'environnement où il est cultivé. Cette analyse peut aussi permettre de déterminer les gènes responsables de la résilience pour différents stressseurs. Ensuite, ces principaux cultivars peuvent être utilisés en tant que germoplasmes parentaux pour commencer la culture de cultivar ayant une meilleure résistance aux changements climatiques. Étant donné que de nombreuses provinces sont affiliées à des organes officiels qui mènent des essais d'enregistrement de variétés de cultivars tels que l'Ontario Cereals and Crops Committee, une grande quantité de données sur le rendement des cultivars modernes est

disponible à l'interne. Cependant, étant donné que les cultivars sont habituellement très adaptés à des régions géographiques précises. Il faut sélectionner des cultivars résilients aux changements climatiques pour toutes les principales régions qui produisent des cultures. Cela représente une grande quantité de travail qui va au-delà de la portée de la présente recherche. Il est crucial que le gouvernement du Canada instaure une politique pour commencer à financer la recherche sur la sélection proactive de cultures résilientes aux changements climatiques s'il veut remédier de façon proactive aux défis avec lesquels l'industrie agroalimentaire du pays est aux prises et assurer la sécurité alimentaire mondiale.

## Références :

- Anderson, R., P. E. Bayer, et D. Edwards, D. Climate change and the need for agricultural adaptation. *Current opinion in plant biology*, vol 56, p. 197–202 (2020).
- Anusha, B., K. R. Babu, B. P. Kumar, P. P. Sree, G. Veeraswamy, C. Swarnapriya, et M. Rajasekhar, M. Integrated studies for land suitability analysis towards sustainable agricultural development in semi-arid regions of ap, india. *Geosystems and Geoenvironment*, vol. 2 n° 2, 100131 (2023).
- Bhullar, A., Nadeem, K. et R. A. Ali. Simultaneous multi-crop land suitability prediction from remote sensing data using semi-supervised learning. *Scientific Reports*, vol. 13, n° 1, 6823 (2023).
- Everest, T., Sungur, A. et H. Özcan. Determination of agricultural land suitability with a multiple-criteria decision-making method in northwestern turkey. *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 18, p. 1073–1088 (2021).
- Fugerey-Scarbel, A., C. Bastien, M. Dupont-Nivet, S. Lemarié, R. Consortium, et coll. 2021. Why and how to switch to genomic selection: Lessons from plant and animal breeding experience. *Frontiers in Genetics*, vol. 12, p. 1185 (2021).
- Han, C., S. Chen, Y. Yu, Z. Xu, B. Zhu, X. Xu. et Z. Wang Evaluation of agricultural land suitability based on rs, ahp, and mea: A case study in jilin province, china. *Agriculture*, vol. 11, n° 4, p. 370 (2021).
- Hannah, L., P. R. Roehrdanz, K. B. KC, E. D. Fraser, C. I. Donatti, L. Saenz, T. M. Wright, R. J., Hijmans, M. Mulligan, A. Berg et coll. 2020. The environmental consequences of climate-driven agricultural frontiers. *PloS one*, vol 15, n° 2, e0228305 (2020).
- K. B. KC, A. G. Green, D. Wassmansdorf, V. Gandhi, K. Nadeem, et E. D. Fraser. Opportunities and trade-offs for expanding agriculture in canada's north: An ecosystem service perspective. *Facets*, vol. 6, n° 1, p. 1728–1752 (2021).
- King, M., D. Altdorff, P. Li, L. Galagedara, J. Holden et A. Unc. North-ward shift of the agricultural climate zone under 21st-century global climate change. *Scientific Reports*, vol. 8, n° 1, 7904 (2018).
- Mackay, I., A. Horwell, J. Garner, J. White, J. McKee, et H. Philpott. Reanalyses of the historical series of UK variety trials to quantify the contributions of genetic and



- environmental factors to trends and variability in yield over time. *Theoretical and Applied Genetics*, vol 122, p. 225–238 (2011).
- Mendelsohn, R. (2008). The impact of climate change on agriculture in developing countries. *Journal of Natural Resources Policy Research*, vol. 1, n° 1, p. 5–19. <https://doi.org/10.1080/19390450802495882>
- Neufeldt, H., G. S. Martinez, A. Olhoff, C. M. S. Knudsen et K. E. Dorkenoo. The adaptation gap report 2018. united nations environment programme (unep), nairobi, kenya.
- Palomo, I. (2017) [2018]. Climate change impacts on ecosystem services in high mountain areas: A literature review. *Mountain Research and Development*, vol. 37, n° 2, p. 179– 187.
- QGIS Association. (s.d.). Qgis geographic information system.
- Rijk, B., M. van Ittersum et J. Withagen. Genetic progress in dutch crop yields. *Field Crops Research*, vol. 149, p. 262–268 (2013).
- Statistique Canada. 2021. Estimation de la superficie, du rendement, de la production, du prix moyen à la ferme et de la valeur totale à la ferme des principales grandes cultures, en unités métriques et impériales
- Tarasuk, V., T. Li. et A.-A Fafard St-Germain. Household food insecurity in canada, 2021 (2022).
- Thrasher, B., E. P. Maurer, C. McKellar et P. B. Duffy. Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 16, n° 9, p. 3309–3314 (2012).
- Van Vuuren, D. P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G. C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J.-F. Lamarque et coll. 2011. Le ou la representative concentration pathways: An overview. *Climatic change*, vol. 109, p. 5–31.
- Watts, N., M. Amann, S. Ayeb-Karlsson, K. Belesova, T. Bouley, M. Boykoff, P. Byass, W. Cai, D. Campbell-Lendrum, J. Chambers et coll. 2018. The lancet countdown on health and climate change: From 25 years of inaction to a global transformation for public health. *The Lancet*, vol. 391, n° 10120, p. 581–630 (2018).
- Organisation mondiale de la Santé 2022. D’après un rapport de l’ONU, la faim dans le monde progresse et pourrait avoir touché jusqu’à 828 millions de personnes en 2021 (2022).