SUBVENTION D'ENGAGEMENT PARTENARIAL

Rapport final

DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE SÉLECTION DES PROVENANCES POUR LA MIGRATION ASSISTÉE DE POPULATIONS DE FEUILLUS NOBLES PAR LA PÉPINIÈRE CASSE-NOISETTE

Présenté à :

Pépinière Casse-Noisette

Marc-Olivier Harvey, propriétaire

Par :

CERFO
Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc.

Samuel Royer-Tardif, biol. Ph. D.

Xavier Gallagher Duval, M. Sc.

Décembre 2022

© CERFO 2022-31

Mots-clés : migration assistée, similarité climatique, niche climatique, sélection de provenances, modèles climatiques, *SeedWhere*, application Shiny,

Référence à citer :

Royer-Tardif S. et X. Gallagher-Duval. 2022. Développement d'un outil de sélection des provenances pour la migration assistée de populations de feuillus nobles par la pépinière casse-noisette. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). Rapport 2022-31. 23 pages.

Bénéficiaire du projet

- **Pépinière Casse-Noisette**

  Marc-Olivier Harvey, propriétaire

Partenaire du projet

- **Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO)**

  Xavier Gallagher-Duval, géogr. M. Sc.

  Samuel Royer-Tardif, biol. Ph. D.

Financement : CRSNG-Programme d'innovation dans les collèges et la communauté-Subvention d'engagement partenarial

Table des matières

Liste des figures iii

Résumé iv

Introduction 1

Méthode 2

Concepts sous-jacents à l'utilisation de l'outil 3

1.1 Approche *SeedWhere* 3

1.2 Variables bioclimatiques 3

1.3 Modèles climatiques 4

1.4 Évaluation de la similarité climatique 6

1.5 Niches climatiques 6

Guide d'utilisation de l'outil informatique produit 7

1.6 Déploiement des semences 7

1.7 Acquisition des semences 13

1.8 Niches climatiques 13

Conclusion 14

Références 16

Liste des figures

Figure 1 Projection de la concentration de CO2 équivalent selon les 4 *Representative Concentration Pathway* (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 et RCP 8.5) d'ici à 2100. 5
Figure 2 Variation de la température moyenne mondiale, par rapport à la période de référence de 1986 à 2005 5

Résumé

La migration assistée des essences forestières est souvent mise de l'avant comme mesure d'adaptation aux changements climatiques permettant de maintenir la santé et la productivité des écosystèmes forestiers. Toutefois, à l'heure actuelle, les pépinières telles que la pépinière Casse-Noisette ne sont pas outillées suffisamment afin d'orienter elles-mêmes la migration assistée des essences forestières, en particulier les feuillus nobles pour lesquels on possède encore peu d'informations sur leur diversité génétique et leurs adaptations locales. L'objectif du présent projet est de fournir un outil à la pépinière Casse-Noisette permettant d'identifier les sources de semences d'arbres les plus adaptées aux conditions climatiques attendues dans le futur dans le but de produire des semis de qualité d'essences possiblement importantes pour la santé des écosystèmes forestiers québécois, telles que les feuillus nobles.

Ce rapport présente la méthode employée pour le développement d'un outil informatique, inspiré de l'outil *SeedWhere* du Service Canadien des Forêts. De plus, il y est question des concepts sous-jacents à son développement et son utilisation. Enfin, un guide d'utilisation de l'outil produit est présenté. Par le développement de cet outil informatique, ce projet aura permis de renforcer la position stratégique que la pépinière Casse-Noisette possède pour la production d'arbres adaptés aux conditions climatiques futures, et offrira également une tribune afin de mieux faire connaître l'outil *SeedWhere* par les acteurs du milieu forestier. Il aura fait le premier pas vers l'adaptation des forêts aux changements globaux en favorisant l'établissement de forêts résilientes.

Introduction

La pépinière Casse-Noisette se spécialise dans la production d'arbres à noix et d'arbres rares au Québec. Avec les changements climatiques, il est attendu que l'abondance et l'aire de distribution de ces essences augmentent au Québec (ex : chênes, noyers, caryers : Périé *et al.*, 2014 ; McKenney *et al.*, 2014). De même, plusieurs essences produites par la pépinière, dont les chênes, sont possiblement plus résistantes aux sécheresses et aux conditions climatiques futures (Boisvert-Marsh *et al.*, 2020). Ainsi, cette pépinière pourrait jouer un rôle majeur dans la production des arbres du futur pour le Québec. Historiquement, il a été recommandé d'employer des sources locales de semences dans les plantations d'arbres afin d'associer les semences aux conditions environnementales auxquelles elles sont adaptées. Toutefois, avec l'action des changements climatiques, cette prémisse ne tient plus (O'Neill et Gómez-Pineda, 2021) et plusieurs observations indiquent que les sources locales ne sont plus les mieux adaptées au climat actuel Etterson *et al.*, 2020 ; St Clair et Howe, 2007 ; Frank *et al.*, 2017). Cette situation menace la santé et la productivité des écosystèmes forestiers Canadiens (Park *et al.*, 2014). Dans ce contexte, certains chercheurs (Borrell *et al.*, 2020 ; Rehfeldt *et al.*, 2018) utilisent les connaissances sur la diversité génétique et phénotypique des essences forestières afin d'élaborer des règles de transfert permettant de prélever des semences dans les localisations géographiques où l'on retrouve actuellement les conditions climatiques attendues dans le futur, une pratique appelée migration assistée. Toutefois, pour la plupart des espèces produites par la pépinière Casse-Noisette, nous n'avons actuellement que peu d'information sur leur diversité génétique et phénotypique déterminant leur capacité d'adaptation au climat (Royer-Tardif *et al.*, 2021). Afin de maintenir la qualité des plants fournis par la pépinière dans le futur et de renforcer sa position stratégique dans l'adaptation des forêts, elle doit s'équiper dès maintenant d'un outil lui permettant de s'approvisionner de semences adaptées au climat attendu dans le futur.

Le présent rapport fait état des résultats issus d'un projet réalisé en collaboration avec la pépinière Casse-Noisette dans le but de développer une méthode simple et un outil informatique permettant de sélectionner les provenances de feuillus nobles à planter dans un cadre de migration assistée. Une description de la méthode développée et des concepts sous-jacents à la conception de l'outil informatique sont d'abord présentés dans les sections 2 et 3 respectivement. La section 4 présente le guide d'utilisation de l'outil développé.

Méthode

Dans le cadre de ce projet, nous avons utilisé l'outil *SeedWhere* (McKenney *et al.*, 1999) développé par le Service Canadien des Forêts (Ressources Naturelles Canada ; RNCan). Cet outil sert à cartographier les similarités climatiques entre les régions géographiques[1]. Le nom *SeedWhere* fait référence à la phrase - « *Where can I move seeds?* » soit « Où puis-je déplacer les semences? » (traduction libre). L'outil utilise une approche basée sur la comparaison entre le climat actuel d'un territoire ou d'un lieu et le climat futur attendu. Plus précisément, il permet de calculer le coefficient de similarité climatique (coefficient de Gower) entre le climat historique d'un lieu dans lequel les semences sont collectées et le climat futur du site dans lequel ces semences seront plantées (McKenney *et al.*, 1999). Une migration assistée efficace devrait pouvoir déplacer des semences forestières de façon à ce que leur développement futur puisse se faire dans un climat similaire à celui retrouvé historiquement dans leur région d'origine.

Afin de faciliter l'utilisation de l'outil *SeedWhere* et l'interprétation de ses résultats par la pépinière Casse-Noisette, nous avons créé une nouvelle application avec une interface plus conviviale ainsi que l'addition de nouvelles fonctions à l'outil original. En fait, l'outil *SeedWhere* permet de comparer plusieurs climats futurs prédits par deux modèles climatiques selon différents trois scénarios climatiques, et ce, pour trois plages temporelles. Par conséquent, les conditions prédites sont multiples et il peut être difficile pour des personnes non spécialisées de se retrouver dans la multitude de conditions futures prédites par cet outil. Une approche intéressante est d'effectuer la moyenne et l'écart-type de plusieurs prédictions climatiques afin de cibler les régions à forte similarité moyenne, mais avec un faible écart-type, soit un bon niveau de concordance entre les différentes prévisions. En d'autres termes, une telle approche permettrait d'identifier les secteurs où les comparaisons climatiques permettent d'avoir une bonne confiance que les conditions climatiques futures seront favorables.

Pour ce faire, une réplique de l'application *SeedWhere* a été créée dans le package shiny (https://shiny.rstudio.com/) du logiciel R (https://www.r-project.org/) en ajoutant les fonctionnalités permettant de calculer la moyenne et l'écart-type de plusieurs comparaisons climatiques.

À l'hiver 2021, nous avons contacté les chercheurs Dan McKenney et John Pedlar du Service Canadien des Forêts afin d'obtenir les données sources du programme *SeedWhere*, soit des couches géoréférencées matricielles de 8 variables climatiques pour 2 modèles climatiques (canesm3 plages temporelles : une plage « historique » (1961-1990) et deux plages futures (2011-2040 et 2041-2070). Nous nous sommes limités à ces deux plages temporelles futures puisqu'il est actuellement déconseillé de conduire la migration assistée pour des plages temporelles excédant 30-50 ans dans le futur (O'Neill et Gómez-Pineda, 2021). De plus, les données climatiques ont été obtenues pour deux modèles climatiques et trois scénarios futurs (voir la prochaine section).

[1] https://cfs.cloud.nrcan.gc.ca/seedwhere/index.php?randNum=58910&lang=f

Concepts sous-jacents à l'utilisation de l'outil

1.1 Approche *SeedWhere*

La démarche de la migration assistée, pour l'acquisition ou le déploiement de semences, se base principalement sur un indice de similarité climatique. L'indice utilisé par *SeedWhere* est le coefficient de Gower. Ce coefficient varie entre 0 et 1, 1 indiquant une similarité climatique parfaite et 0 une dissimilarité maximale) et peut être calculé simultanément pour une ou plusieurs variables climatiques (ex. : température, précipitations, etc.). La méthode de *SeedWhere* compare la valeur climatique observée en un point géographique précis (un pixel) à chacune de celles retrouvées dans une zone prédéfinie (comportant plusieurs pixels) et attribue une valeur de similarité climatique variant entre 0 et 1 à chaque comparaison effectuée (*c.-à-d.* pour chaque pixel de la zone prédéfinie). Le résultat de cette opération est stocké sous forme de couche géoréférencée matricielle. Lorsqu'on effectue des comparaisons avec différentes données climatiques, on obtient plusieurs couches matricielles desquelles il est possible de dériver la moyenne et l'écart-type des similarités climatiques.

La méthode employée dans *SeedWhere* comprend deux approches pour comparer un lieu ponctuel à une zone géographique, soient le déploiement et l'acquisition de semences :

- Mode de déploiement des semences : Calcule la similarité entre le climat actuel d'un point déterminé et le climat futur de la zone sélectionnée. Cette approche permet d'identifier les régions dans lesquelles les semences récoltées au point déterminé peuvent être déployées.
- Mode d'acquisition des semences : Calcule la similarité entre le climat futur d'un point déterminé et le climat actuel de la zone sélectionnée. Cette approche permet d'identifier les régions dans lesquelles il serait possible de s'approvisionner en semences dans le but de les déployer au point déterminé.

1.2 Variables bioclimatiques

L'outil *SeedWhere* se base sur huit variables bioclimatiques :

Température moyenne annuelle : Il s'agit de la moyenne de toutes les températures hebdomadaires moyennes. La température hebdomadaire moyenne est la moyenne des températures maximales et minimales d'une semaine donnée. *Annual Mean Temperature (eng.)*

Température maximale de la période la plus chaude : Il s'agit de la plus élevée de toutes les températures maximales hebdomadaires relevées. *Max temperature of the warmest period (eng.)*

Température minimale de la période la plus froide : La plus basse de toutes les températures minimales hebdomadaires. *Min Temp of the coldest period (eng.)*

Précipitations annuelles : Somme de toutes les précipitations mensuelles estimatives. *Annual Precipitation (eng.)*

Précipitations du trimestre le plus chaud : Précipitations totales du trimestre le plus chaud, qui est déterminé à une semaine près. *Precipitaion of the warmest quarter (eng.)*

Précipitations du trimestre le plus froid : Précipitations totales du trimestre le plus froid, qui est déterminé à une semaine près. *Precipitation of the coldest quarter (eng.)*

Source : https://cfs.nrcan.gc.ca/projets/3/8

Indice d'humidité climatique (IHC) : Différence entre les précipitations annuelles et l'évapotranspiration potentielle, c'est-à-dire la perte potentielle d'eau par évaporation d'un milieu couvert de végétation**.** *Climate moisture index - CMI (eng.)*

Source : https://www.rncan.gc.ca/changements-climatiques/impacts-adaptation/changements-climatiques/indicateurs-des-changements-forestiers/secheresse/17773

Durée de la saison de croissance : Nombre de jours entre la dernière fois où il fait 0 °C au printemps et la première fois où il fait 0 °C à l'automne. *Number of days of the growing season (eng.)*

Source : https://www.rncan.gc.ca/changements-climatiques/changements-climatiques/indicateurs-des-changements-forestiers/saison-croissance/18471

1.3 Modèles climatiques

L'utilisation de variables climatiques passées et futures implique des modèles climatiques. Les modèles climatiques sont utilisés pour étudier le changement et la variabilité du climat. Ceux-ci permettent d'effectuer des projections de différentes variables climatiques. Pour ce projet, deux modèles ont été utilisés.

Le premier est le modèle canadien du système terrestre de deuxième génération (**CanESM2**) et a été développé par le Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique d'Environnement et Changement climatique Canada. Le modèle CanESM2 inclut plusieurs autres modèles qui permettent de prédire et modéliser divers aspects du climat. Le modèle MCCO modélise le cycle du carbone océanique, alors que le modèle CTEM couvre le cycle du carbone terrestre. Ces deux modèles servent à modéliser les concentrations de CO_2 en circulation.

Le deuxième modèle est le fruit du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) dans le cadre du cinquième rapport d'évaluation, terminé en novembre 2014. Lors de la rédaction de ce rapport, plus de 17 pays ont mis en commun 36 modèles climatiques. La contribution du Canada a été le modèle CanEMS2. Cette combinaison a produit le multimodèle **composite AR5**. Celui-ci prend également en compte les différents cycles du carbone et les modifications climatiques.

Ces deux modèles climatiques dépendent de la concentration de CO_2 disponible. Le GIEC a développé les scénarios climatiques RCP, pour *Representative Concentration Pathway* (Trajectoires représentatives de concentration), dans le cadre du cinquième rapport d'évaluation. Il s'agit de quatre scénarios de forçage radiatif positif où l'augmentation de CO_2 génère une augmentation de la température. Étant donné que les forçages radiatifs quantifient une augmentation ou une diminution d'énergie, les unités sont en Watt par mètre carré. Les RCP représentent des augmentations du forçage radiatif de 2.6 W/m², 4.5 W/m², 6 W/m² et 8.5 W/m². Les RCP sont généralement dénotés RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 et RCP 8.5. Plus la valeur est élevée, plus le système terre-atmosphère gagne en énergie et se réchauffe. Pour ce projet, les RCP

utilisés sont RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5. La Figure 1 représente les augmentations des concentrations de CO_2 équivalent dans le système terre-atmosphère selon les différents RCP. Le concept de CO_2 équivalent correspond à la quantité de dioxyde de carbone qui aurait le même potentiel de réchauffement climatique qu'une quantité donnée d'un autre gaz à effet de serre.

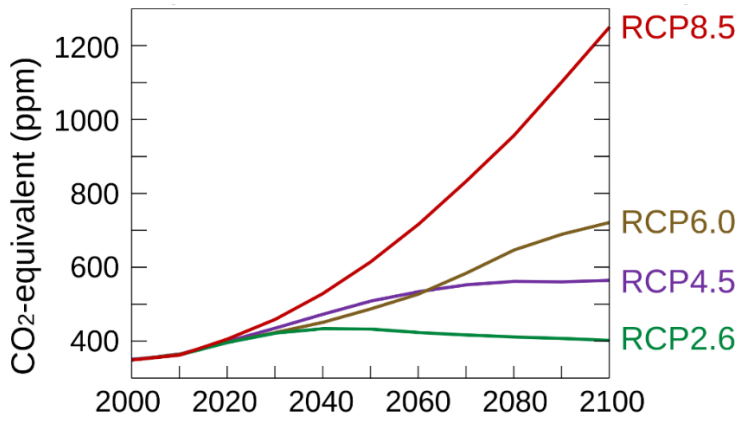


Figure 1 Projection de la concentration de CO2 équivalent selon les 4 *Representative Concentration Pathway* (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 et RCP 8.5) d'ici à 2100.
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ab/All_forcing_agents_CO2_equivalent_concentration.svg

Le dernier élément des modèles climatiques est la période temporelle. L'utilisation d'un modèle climatique et d'un RCP comprend un degré d'incertitude qui augmente à mesure que la plage temporelle s'éloigne de la période de référence. Pour *SeedWhere*, les variables climatiques disponibles ont été modélisées sur trois périodes temporelles : 2011 à 2040, 2041 à 2070 et 2071 à 2100. Toutefois, dans le cadre de la migration assistée il est recommandé de ne pas excéder une plage future de 30-50 ans (O'Neill et Gómez-Pineda, 2021). Les données correspondant à chaque variable climatique modélisée pour chaque combinaison de modèles et chaque période temporelle ont été obtenues du Service Canadien des Forêts.

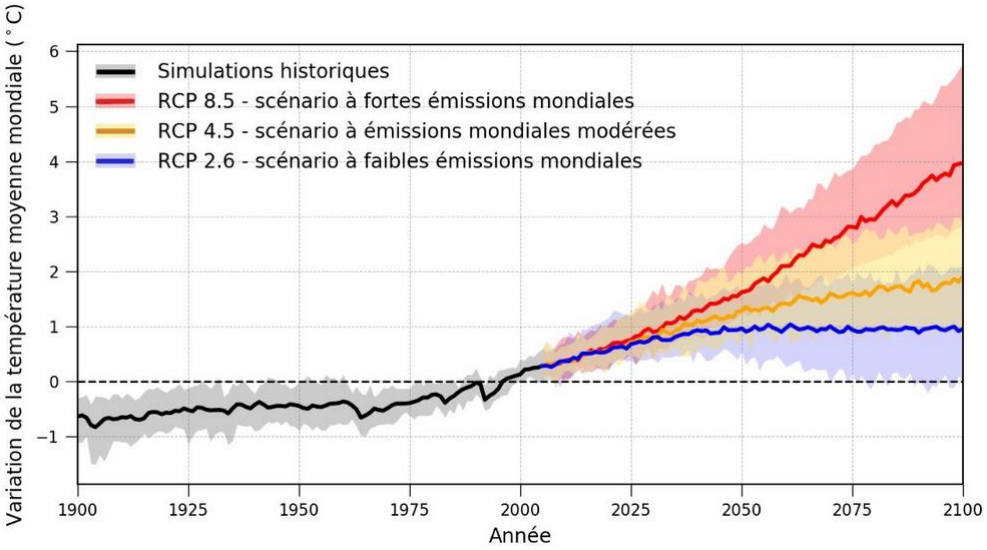


Figure 2 Variation de la température moyenne mondiale, par rapport à la période de référence de 1986 à 2005
https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/centre-canadien-services-climatiques/essentiels/scenarios-modeles.html

Le dernier élément nécessaire au calcul de la similarité climatique est le climat de base, aussi appelé période de référence. Pour ce projet, la période de référence s'étendait de 1961 à 1990. Les variables climatiques ont été simulées et moyennées en comparaison à cette période.

1.4 Évaluation de la similarité climatique

L'importance de la similarité climatique est également de pouvoir comparer différentes prédictions. Le calcul de l'écart-type entre les différents calculs de similarité (Gower) permet de rapidement repérer les endroits où ceux-ci présentent des valeurs équivalentes. Les pixels qui ont un indice de Gower comparable présenteront un faible écart-type alors que les pixels ayant des indices de Gower divergents auront des écarts-types plus grands.

Une façon alternative d'évaluer la convergence des similarités climatiques est l'indice de Sharpe. Cet indice mesure la performance d'un investissement et le comparant à un investissement sans risque. Dans le cas des similarités climatiques, un investissement correspond à la migration en fonction des similarités climatiques moyennes. Un indice de Sharpe négatif indique un investissement générant des pertes (trop grand écart climatique et mortalité des plants). Les valeurs entre 0 et 1 représentent un bénéfice, mais au détriment d'un risque trop élevé (potentiel d'avoir des bénéfices, mais trop d'incertitudes entre les scénarios). Les valeurs supérieures à 1 font référence à un bénéfice avec des risques faibles. En fonction des différentes simulations effectuées, l'indice de Sharpe permet de rapidement identifier les zones où le coût-bénéfice d'une migration est le plus avantageux (valeurs supérieures à 1).

1.5 Niches climatiques

En plus de la similarité climatique, il est possible de simuler l'évolution géographique des niches climatiques de différentes espèces. Une niche climatique correspond aux conditions climatiques qui sont retrouvées dans l'aire de distribution historique d'une espèce : soit les conditions auxquelles on suppose qu'elle est adaptée. Avec l'évolution du climat, il est possible d'évaluer à quel endroit géographique on devrait retrouver ces conditions climatiques dans le futur, soient les régions propices à la croissance de l'espèce en se basant uniquement sur les données climatiques. En plus d'avoir produit le logiciel *SeedWhere*, le Service Canadien des Forêts a également modélisé l'aire de distribution future de centaines d'espèces végétales d'Amérique du Nord en se basant sur leurs niches climatiques. Les données disponibles ont été générées à l'aide du logiciel ANUCLIM. L'analyse se base sur 6 variables climatiques.

- La température annuelle moyenne
- La température minimale du mois le plus froid
- La température maximale du mois le plus chaud
- Les précipitations annuelles
- Les précipitations du trimestre le plus froid
- Les précipitations du trimestre le plus chaud

Pour chacune de ces variables climatiques, ANUCLIM calcule des statistiques descriptives (moyenne, minimum, maximum et divers quantiles) aux points d'occurrence des espèces. Par la suite, ANUCLIM fournit deux distributions spatiales de l'espèce en question en fonction des conditions climatiques futures

prédites. La première distribution spatiale correspond à la plage complète des variables climatiques (traduction libre de *full climatic range*), soit les pixels ayant des valeurs situées entre le minimum et le maximum de tous les points d'occurrence de l'espèce. La deuxième distribution correspond à la plage de base (traduction libre de *core climatic range*), définie par les pixels qui ont une valeur entre le 5e et 95e quantile pour les variables climatiques mesurées aux points d'occurrence. Cette dernière distribution est plus restrictive, mais probablement plus représentative des conditions optimales pour les espèces.

Pour permettre une simulation climatique, les 6 variables climatiques ont été simulées à l'aide des modèles climatiques, des différents RCP et des différentes périodes temporelles. Ces variables simulées ont ensuite été intégrées dans ANUCLIM pour produire les deux distributions spatiales des niches climatiques. La liste des espèces produites par la pépinière Casse-Noisette et dont les niches climatiques ANUCLIM ont été modélisées par le Service Canadien des Forêts a été ajoutée à l'outil informatique produit dans le cadre de ce projet. Les fichiers matriciels des niches climatiques pour les différentes combinaisons de modélisations climatiques ont été gracieusement fournis par l'équipe de Dan McKenney et John Pedlar au Service Canadien des Forêts.

Guide d'utilisation de l'outil informatique produit

L'outil développé est accessible à l'adresse suivante :

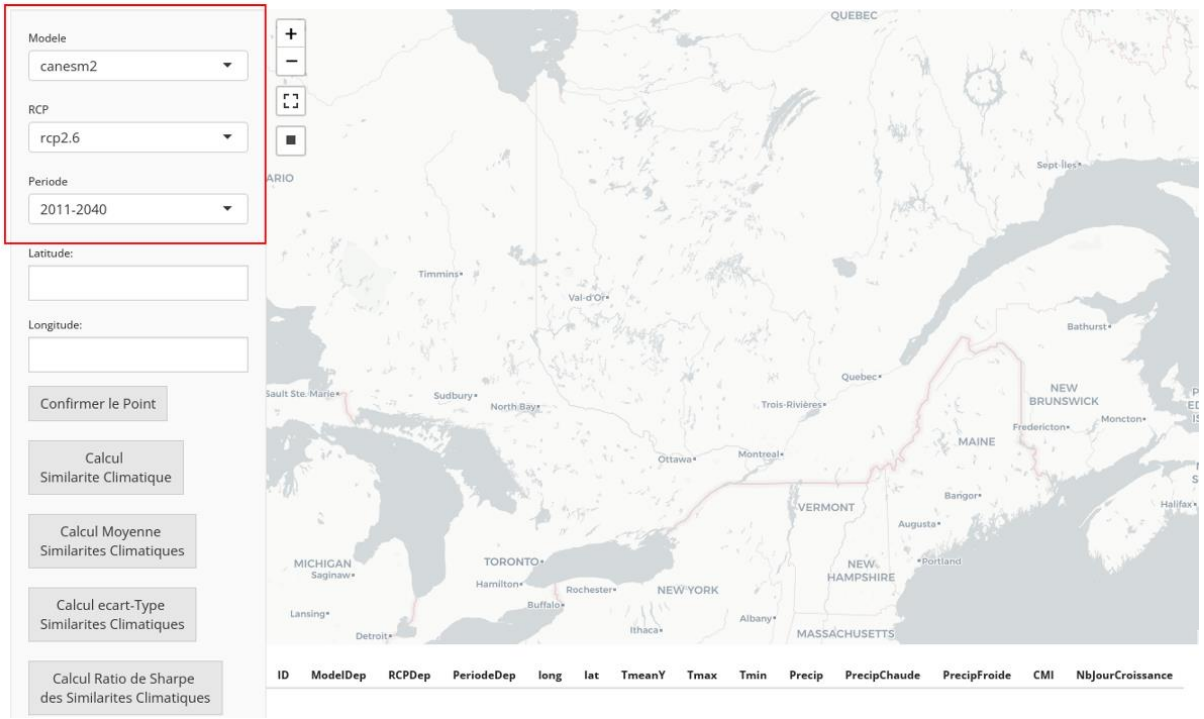
https://cerfo-xgallagher.shinyapps.io/semence_apps/?_ga=2.44343716.1802729950.1671124353-1089907226.1661258224

La page web comprend cinq onglets. Le premier onglet comprend la description du projet avec ses grandes lignes ainsi qu'une description des données utilisées. Le deuxième onglet comprend l'analyse de la similarité climatique pour le déploiement des semences. Le troisième onglet correspond à l'analyse de la similarité climatique pour l'acquisition de semences. Le quatrième onglet comprend les niches climatiques des espèces produites par la pépinière Casse-Noisette. Finalement, le dernier onglet comprend un guide d'utilisation sommaire des différents aspects du projet.

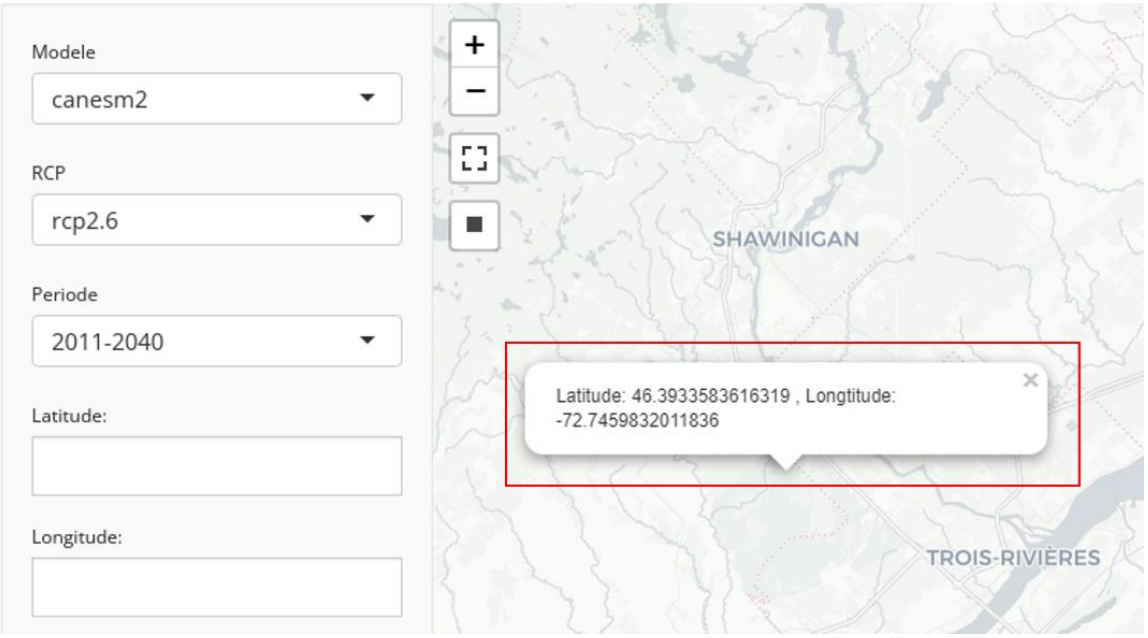
1.6 Déploiement des semences

L'onglet **Déploiement des semences** est composé d'une fenêtre cartographique et d'un panneau de boutons. Le mode de déploiement des semences permet de calculer la similarité climatique entre le climat actuel d'un point et le climat futur d'une zone sélectionnée. Voici les étapes nécessaires pour effectuer l'analyse.

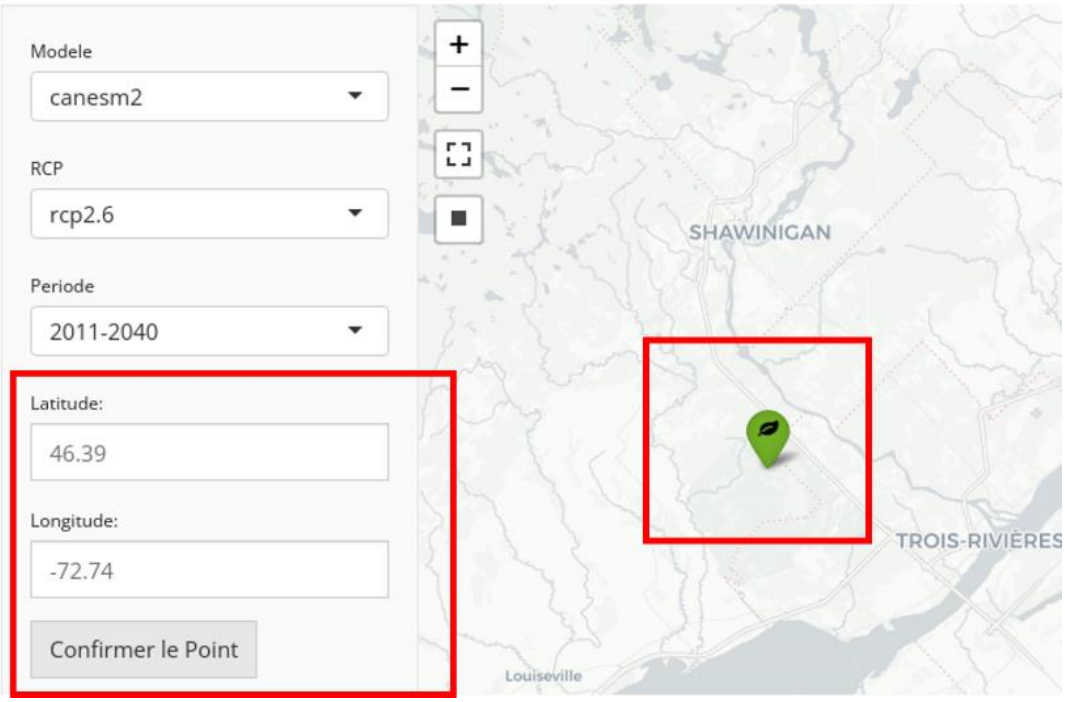
1. À l'aide du panneau de bouton situé à gauche de la page, sélectionnez le modèle climatique, le RCP et la Période temporelle voulue. À titre indicatif, la trajectoire du réchauffement climatique actuel se situe entre les RCP 4.5 et RCP 8.5 pour la plage 2011-2040 (https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/).



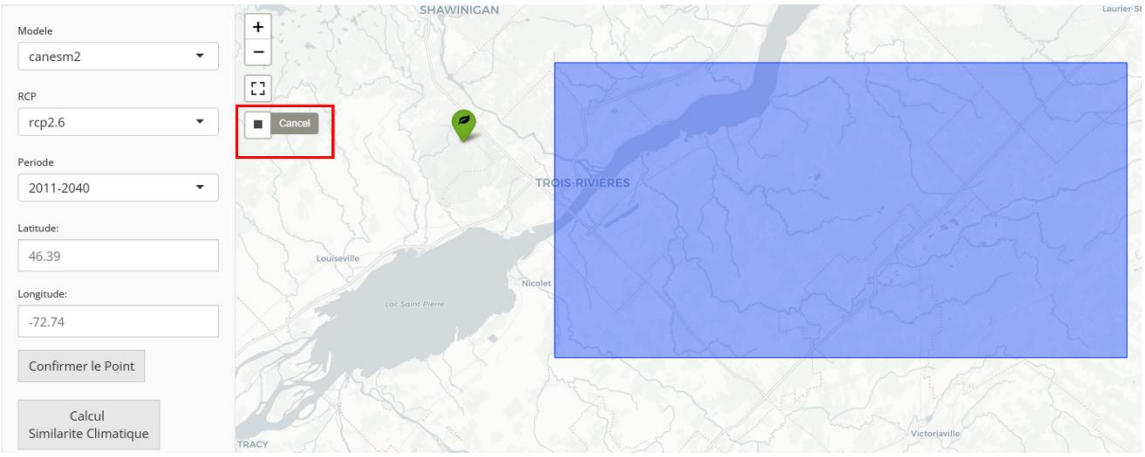
2. La deuxième étape consiste à sélectionner un point sur la carte. Si les coordonnées latitude/longitude sont déjà connues en format degré décimal (exemple : 45.3212, -72.432) il est possible de les entrer dans les deux champs correspondants. Il est également possible de naviguer sur la carte jusqu'à un point voulu à l'aide de la souris et de cliquer sur un point désiré. Une fenêtre apparaîtra avec les coordonnées. Il ne reste plus qu'à copier-coller ou écrire les coordonnées dans les champs adéquats. À noter qu'il n'est pas nécessaire d'inscrire tous les chiffres décimaux, les 3 premiers sont suffisants.



Une fois les coordonnées entrées, il faut appuyer sur le bouton **Confirmer le point**. Un marqueur s'affichera alors à l'endroit spécifié par les coordonnées. La fenêtre des coordonnées peut alors être fermée en appuyant sur le x dans le coin supérieur droit.

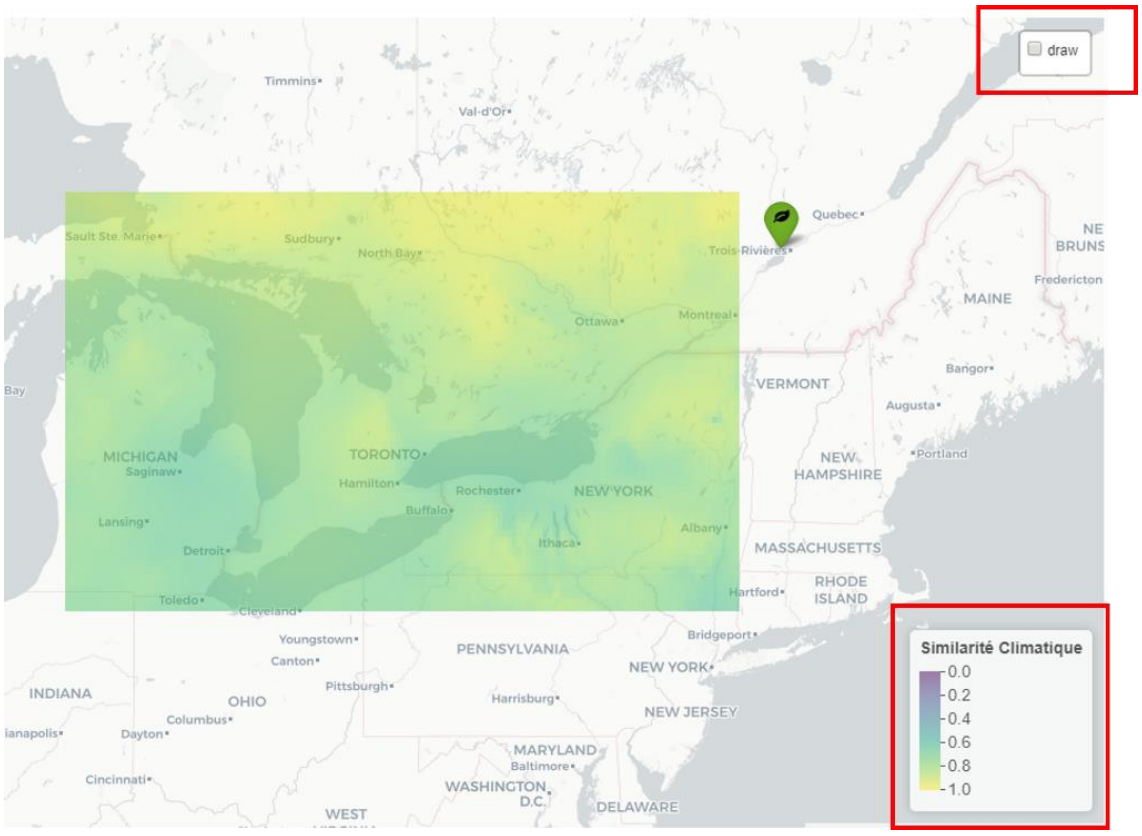


3. À l'aide de l'outil de traçage, tracer la zone d'analyse en *click and drag* la souris pour former un rectangle couvrant la zone voulue (en cliquant ce bouton : ▪). Si en cours de traçage vous n'êtes pas satisfait de votre rectangle, tout en conservant le bouton de gauche de la souris enfoncée, cliquer sur l'option *cancel*.



Important : Une fois le polygone tracé, vous ne pouvez pas l'effacer. Il faut rafraichir la page web de l'outil. La sélection du point et du polygone doit rester inchangée si vous voulez comparer plusieurs modèles sur les mêmes zones.

4. Il ne reste plus qu'à appuyer sur le bouton **Calcul Similarité climatique** pour lancer le calcul du coefficient de Gower. Ce calcul prend quelques secondes. Une fois le calcul terminé, l'indice de Gower apparaît sur la carte automatiquement tout comme la légende. Vous pouvez enlever le polygone dessiné en décochant le bouton **draw.**



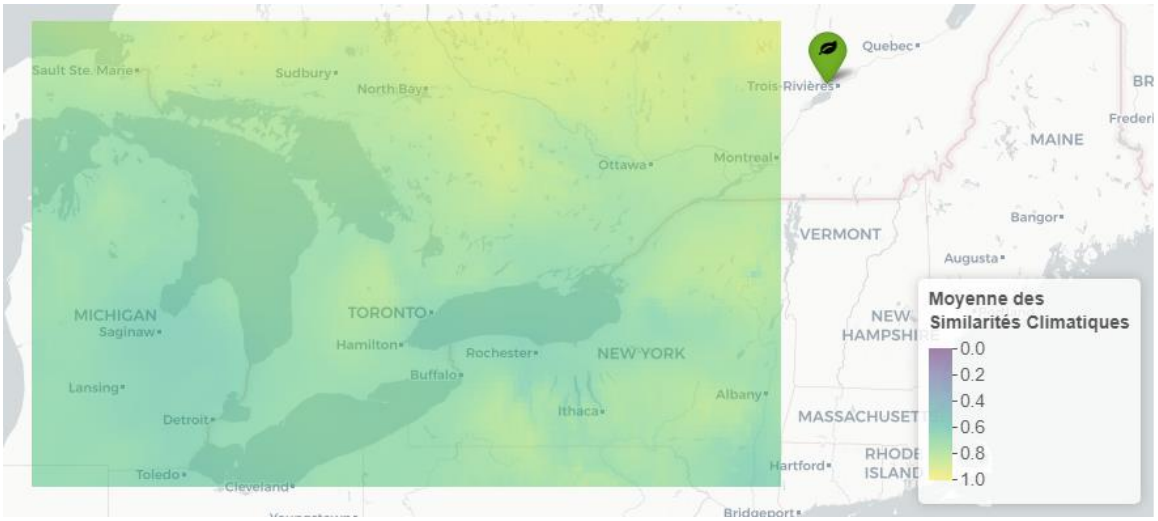
5. Les données utilisées en intrants apparaissent dans le tableau sous la figure. Il contient les choix de modèle, RCP, la période temporelle et les coordonnées du point utilisé. Finalement, le tableau contient également les valeurs des variables climatiques retrouvées sous le point sélectionné. Pour le mode déploiement, les valeurs climatiques seront les mêmes étant donné qu'il s'agit du climat de la période de référence. Pour le mode acquisition de semences, ces valeurs vont changer étant donné qu'il s'agit du climat futur simulé.

ID	ModelDep	RCPDep	PeriodeDep	long	lat	TmeanY	Tmax	Tmin	Precip	PrecipChaude	PrecipFroide	CMI	NbJourCroissance
1	canesm2	rcp2.6	2011-2040	-72.74	46.39	45.00	260.00	-191.00	1007.00	291.00	201.00	52.56	194.00

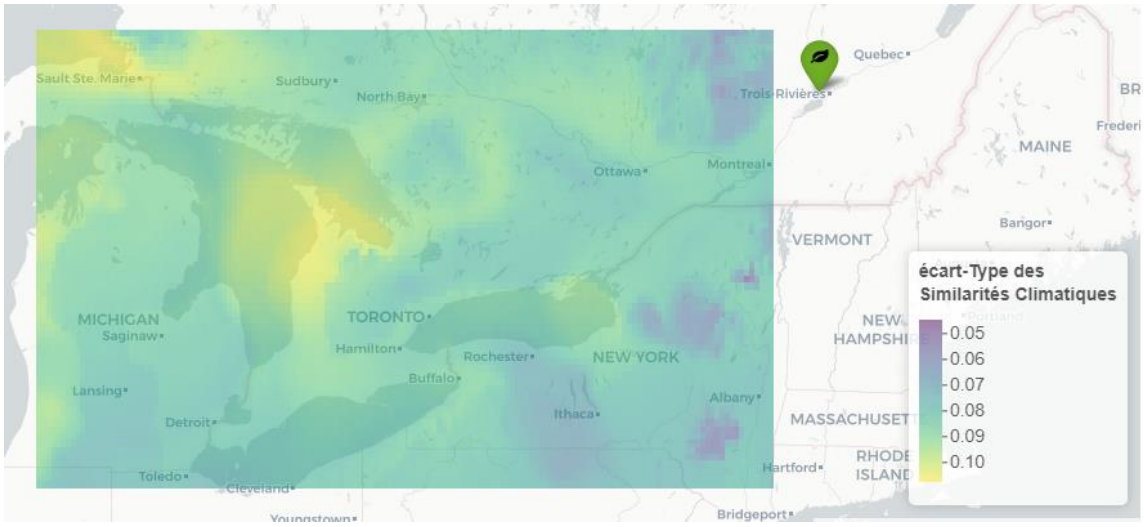
6. Suite à ces étapes, il est maintenant possible de changer les valeurs du modèle, du RCP ou de la période d'analyse. À chaque nouvelle combinaison, en appuyant sur le bouton **Calcul Similarité Climatique**, une nouvelle couche apparaît ainsi qu'une nouvelle entrée dans le tableau. Plusieurs simulations peuvent être ainsi réalisées (jusqu'à 18 combinaisons pour toutes les plages temporelles, les RCP et les modèles contenus dans l'outil actuellement). Toutefois, il est

recommandé de ne comparer que les différents modèles et RCP pour une seule période temporelle puisque les prévisions sont fortement influencées par la période temporelle.

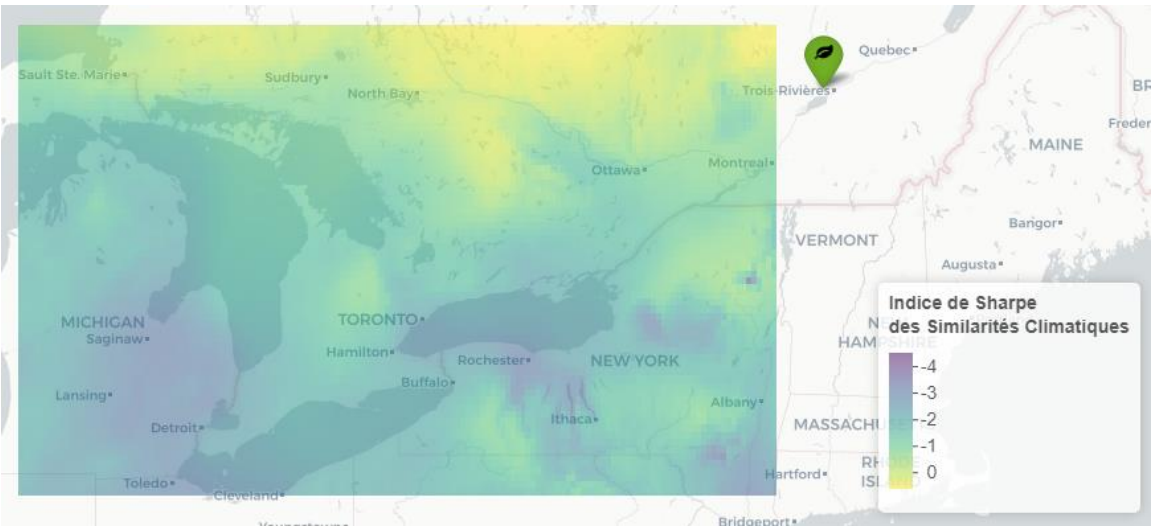
7. Suite aux modélisations, il est possible de comparer les similarités climatiques obtenues, c'est-à-dire les différentes couches générées dans les étapes précédentes à l'aide de trois mesures. La première mesure est la moyenne. Elle indique les endroits où l'on trouve une forte similarité climatique en moyenne selon les différentes prédictions utilisées. Ceci peut être fait en appuyant sur **Calcul Moyenne Similarités Climatique**. Les régions à viser pour la migration assistée sont celles indiquées en jaune, c'est-à-dire celles qui ont en moyenne une forte similarité climatique avec le point de référence.



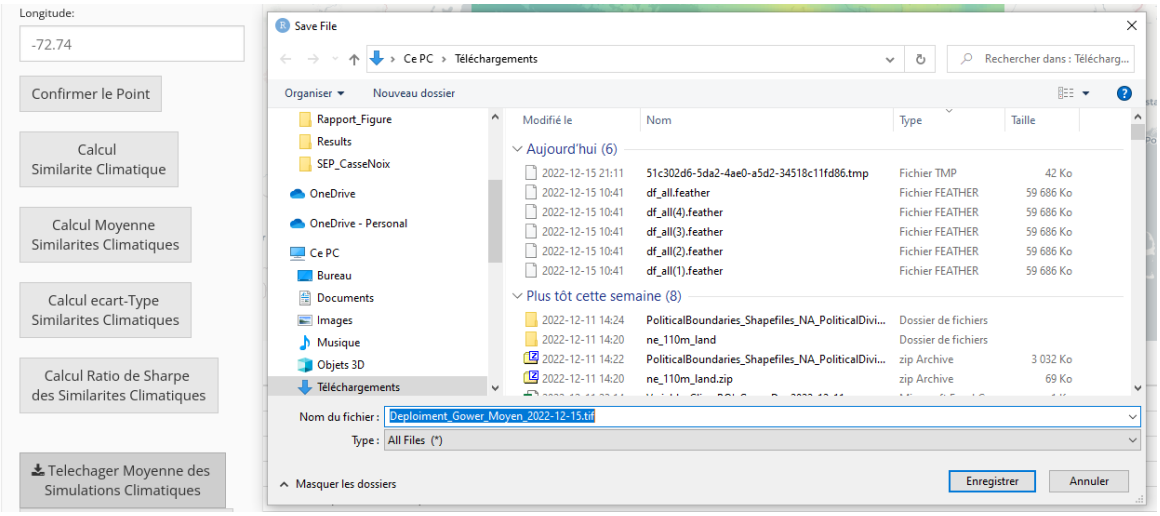
Par la suite, il est possible de calculer l'écart-type entre les différentes simulations en appuyant sur **Calcul écart-type Similarités Climatiques.** Cette nouvelle carte indique à quel point les différentes simulations réalisées fournissent des résultats similaires (en bleu) ou différents (en jaune).



Finalement, il est possible de calculer le ratio de Sharpe avec le bouton **Calcul Ratio de Sharpe des Similarités Climatiques**. Ce ratio compare les deux dernières images produites de façon à identifier les régions avec une forte similarité climatique moyenne et un faible écart-type. Les valeurs positives indiquent un investissement qui présente un risque décroissant, alors qu'une valeur négative réfère à un investissement où les risques sont plus grands que les bénéfices. En règle générale, on vise à sélectionner les régions avec le ratio de Sharpe le plus élevé et au moins supérieur à 1.



8. Une fois les analyses effectuées, il est possible de télécharger et sauvegarder en format .tif géoréférencé les résultats : la moyenne, l'écart-type et le ratio de Sharpe. En cliquant sur le bouton, une fenêtre Windows apparaît avec un nom prédéfini. Il est possible de le modifier au besoin puis de cliquer sur **enregistrer**.



9. Le dernier bouton de téléchargement sert à sauvegarder le tableau contenant les informations sur les choix et les variables climatiques ayant servi à l'analyse. Une fenêtre Windows permet de sauvegarder le tableau en format .csv.

1.7 Acquisition des semences

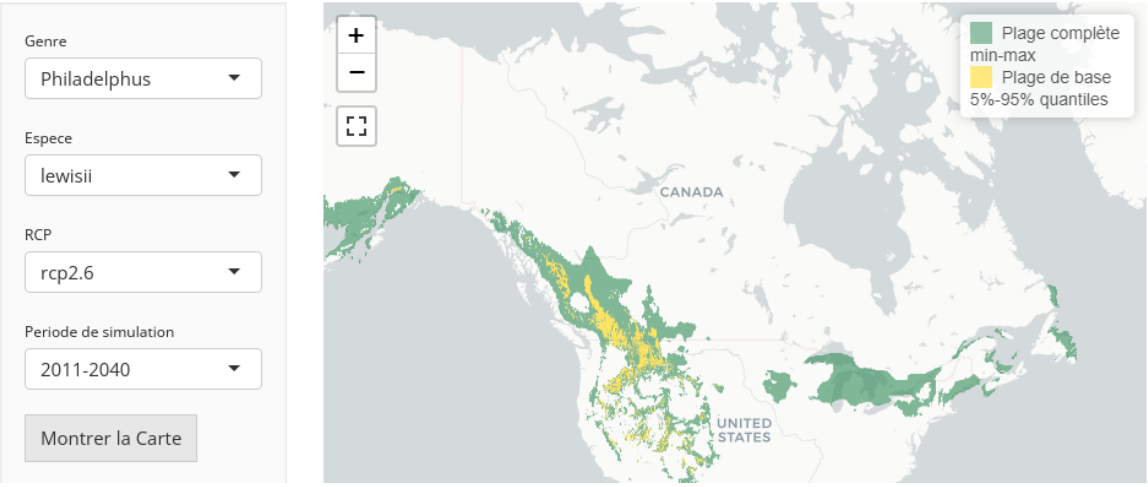
Les étapes nécessaires à l'utilisation de l'acquisition des semences sont les mêmes que pour le déploiement des semences. Seulement les valeurs des variables climatiques à l'intérieur du tableau changent, mais les étapes restent les mêmes. Ceci permet de déterminer les zones géographiques propices à l'approvisionnement en semences d'un point précis.

1.8 Niches climatiques

Cet onglet de l'outil permet de représenter la distribution potentielle de différentes espèces en fonction de variables climatiques simulées selon le modèle composite ar5, trois RCP et trois périodes temporelles. Une liste d'environ 170 espèces est implémentée dans l'outil. Les niches climatiques et aires de distributions futures d'autres espèces sont également disponibles sur le site de RNCan à (http://www.planthardiness.gc.ca/index.pl?m=2b&lang=fr).

Les étapes d'utilisation de cet onglet sont les suivantes :

1. Sélectionner le genre et l'espèce désirés dans les deux listes déroulantes. Les noms sont en latin.
2. Choisir le RCP entre le 2.6, 4.5 et 8.5
3. Déterminer la période temporelle voulue.
4. Appuyer sur le bouton **Montrer la carte**. La distribution potentielle de l'espèce choisie apparaîtra sur la carte selon la simulation climatique choisie. Le résultat contient deux classes : la plage complète et la plage de base. La plage complète réfère aux endroits où les variables climatiques ont des valeurs situées entre les valeurs maximales et minimales dans l'aire de distribution historique de l'espèce. La plage de base correspond aux endroits où les valeurs des variables climatiques se retrouvent entre le 5e et 95e quantile de celles mesurées dans l'aire de distribution historique de l'espèce. La plage de base est plus conservatrice et probablement plus près des conditions optimales de l'espèce.



Conclusion

La foresterie est régulièrement décrite comme une piste de solutions majeure pour atténuer les effets des émissions de GES, grâce au stockage du carbone in situ (en forêt) et ex-situ (ex. dans les produits du bois) (Climate change 2014). En favorisant une meilleure adéquation entre les conditions d'origines auxquelles les espèces sont adaptées et les conditions futures influencées par les changements climatiques, la migration assistée pourrait maintenir la santé et la productivité des arbres issus de la pépinière Casse-Noisette tout en permettant aux forêts futures de maintenir leurs services écosystémiques dans un climat changeant.

Pour plusieurs essences commerciales (surtout des conifères), on possède beaucoup d'informations sur leur autoécologie et leur diversité génétique pouvant orienter précisément la migration assistée. Toutefois, pour la majorité des essences feuillues, dont plusieurs sont anticipées être favorisées par l'action des changements climatiques au Québec (ex : caryer, chênes, noyers), on ne dispose pas de ces informations. Pourtant, la diversité spécifique et fonctionnelle des essences est souvent mise de l'avant comme un gage de la résilience des forêts face aux changements globaux (Messier *et al.*, 2021). Dans cette situation, la seule option pouvant orienter la migration assistée est de se baser sur les comparaisons climatiques entre les sites d'approvisionnement en semences et le climat attendu dans les aires de déploiement de ces semences.

Bien que le logiciel *SeedWhere* ait été développé il y a plus de 20 ans et qu'il soit libre d'accès, il est encore relativement peu utilisé au Québec par les professionnels forestiers et les pépinières. Les raisons de cette faible utilisation résident dans un manque de connaissances spécifiques de même qu'une faible publicité autour du logiciel. Le projet actuel a permis de faire connaître cet outil à la pépinière Casse-Noisette, d'en améliorer les fonctionnalités et de produire un guide détaillant les concepts sous-jacents à la migration assistée et à l'utilisation de ce logiciel.

Dans le cadre d'un autre projet, le CERFO a utilisé cet outil en 2021 afin de conduire la migration assistée du chêne rouge sur le territoire de Sault-au-Cochon dans la MRC Côte de Beaupré (Royer-Tardif *et al.*, 2022). Les comparaisons climatiques de *SeedWhere* ont été comparées selon la méthode décrite ici (moyenne et écart-type) afin de sélectionner cinq provenances de chêne rouge correspondant à différentes périodes futures. Ce projet permettra de confirmer si la migration assistée basée majoritairement sur les comparaisons climatiques est efficace dans un contexte opérationnel. En effet, plusieurs autres facteurs peuvent affecter le succès de l'implantation des semences, dont la compétition végétale, l'ouverture du couvert et la prédation des semences et des semis par les herbivores. Ensemble,

le projet actuel et celui conduit à Sault-au-Cochon permettront d'acquérir plus de connaissances sur la façon la plus efficace, de conduire la migration assistée au Québec et peut-être maintenir les services écosystémiques fournis par les forêts.

Références

Boisvert-Marsh, L., Royer-Tardif, S., Nolet, P., Doyon, F. & Aubin, I. 2020. Using a Trait-Based Approach to Compare Tree Species Sensitivity to Climate Change Stressors in Eastern Canada and Inform Adaptation Practices. Forests 11, 989.

Borrell, J. S., Zohren, J., Nichols, R. A. & Buggs, R. J. A. 2020. Genomic assessment of local adaptation in dwarf birch to inform assisted gene flow. Evolutionary Applications 13, 161–175.

Climate change 2014 : mitigation of climate change: Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Cambridge University Press, 2014)

Etterson, J. R., Cornett, M. W., White, M. A. & Kavajecz, L. C. 2020. Assisted migration across fixed seed zones detects adaptation lags in two major North American tree species. Ecological Applications 0, 1–20.

Frank, A. *et al.* 2017. Risk of genetic maladaptation due to climate change in three major European tree species. Global Change Biology 23, 5358–5371.

McKenney, D. W., Mackey, B. G. & Joyce, D. 1999. *SeedWhere*: a computer tool to support seed transfer and ecological restoration decisions. Environmental Modelling & Software 14, 589–595.

McKenney, D. W. *et al.* 2014. Change and Evolution in the Plant Hardiness Zones of Canada. BioScience 64, 341–350.

Messier, C. *et al.* 2019. The functional complex network approach to foster forest resilience to global changes. Forest Ecosystems 6, 21

O'Neill, G. A. & Gómez-Pineda, E. 2021. Local was best: sourcing tree seed for future climates. Canadian Journal of Forest Research. doi:10.1139/cjfr-2020-0408

Park, A. *et al.* 2014. Can Boreal and Temperate Forest Management be Adapted to the Uncertainties of 21st Century Climate Change? Crit. Rev. Plant Sci. 33, 251–285.

Périé, C., de Blois, S., Lambert, M.-C. & Casajus, N. 2014. Effets anticipés des changements climatiques sur l'habitat des espèces arborescentes au Québec. 46.

Rehfeldt, G. E., Leites, L. P., Joyce, D. G. & Weiskittel, A. R. 2018. Role of population genetics in guiding ecological responses to climate. Global Change Biology 24, 858–868.

Royer-Tardif, S., Boisvert-Marsh, L., Godbout, J., Isabel, N. & Aubin, I. 2021. Finding common ground: Toward comparable indicators of adaptive capacity of tree species to a changing climate. Ecology and Evolution 11, 13081-13100.

Royer-Tardif, S., G. Joanisse et G. Lessard. 2022. Migration assistée de chêne rouge à Sault-au-Cochon (MRC Côte-de-Beaupré : Phase 1 Implantation. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO).) Rapport 2022-31, 25 pages + 6 annexes.

St Clair, B. J. & Howe, G. T. 2007. Genetic maladaptation of coastal Douglas-fir seedlings to future climates. Global Change Biology 13, 1441–1454.