

Introduction

Dans une province comme le Québec où le territoire est particulièrement grand par rapport au nombre d'habitants, il faut s'attendre à devoir diviser de grands espaces par des routes. En essayant de toujours connecter davantage les communautés, de plus en plus de routes sont construites. Ces nouveaux liens constituent une réelle barrière pour les animaux qui vivent près de celles-ci. En plus des collisions avec les voitures, la faune souffre des effets secondaires : perte d'habitat, réduction de mouvement ainsi que pollution de l'air, de l'eau et lumineuse. (Jaeger et al. 2005; Fahrig & Rytwinski 2009; van der Ree et al. 2015). Les États-Unis, pays un peu moins densément peuplé que le Canada, recense une quantité impressionnante de collisions avec des vertébrés. Selon la source, on parle de quelques centaines de milliers à plusieurs centaines de millions (e.g., Erritzoe et al. 2003; Seiler & Helldin 2006; Bishop & Brogan 2013; González-Suárez et al. 2018).

De plus en plus de pays optent pour l'utilisation de tunnels, de ponts et de clôtures afin de limiter les effets des routes. Bien que ces solutions n'adressent que quelques des problèmes mentionnés plus haut, elles sont tous de même importantes afin de rétablir la connectivité entre les populations et les écosystèmes (Rytwinski et al., 2016; Soanes et al., 2024). Lorsque bien utilisées, les clôtures peuvent être un incroyable outil, entre autres à Banff, clôturer les bonnes sections de routes a permis de réduire les collisions avec les ongulés d'au moins 80% (Clevenger et al., 2001; Ford et al., 2022)

Pour être efficaces, ces mesures doivent être bien choisies pour répondre aux besoins de la population ainsi qu'à la route que l'on cherche à protéger. Tunnels, ponts, clôtures, un mélange de toutes ces options? Une mauvaise décision pourrait faire en sorte que l'investissement de plusieurs milliers de dollars n'ait qu'un effet limité. Autre que le choix d'infrastructures, la longueur des clôtures joue aussi un rôle majeur. Lorsque les clôtures sont trop courtes, les animaux vont

simplement la longer jusqu'à trouver une brèche et ensuite essayer de traverser. On appelle ce phénomène : l'effet de bout de clôture. Il est facile de voir lorsqu'une configuration de clôture produit cet effet puisque les collisions se concentreront dans les tronçons où les clôtures sont trop courtes (Clevenger et al., 2001; Lafrance and Alain, 2019; Plante et al., 2019). Ce qui arrive dans cette situation c'est que la clôture ne fait que déplacer le point de concentration des collisions. Il n'y a donc pas seulement le positionnement qui est important, la longueur est tout aussi importante. Bien sûr, pour des raisons de coûts, il serait impossible de clôturer toute la longueur des routes, il faut alors choisir la meilleure configuration qui satisfait le budget et qui minimisent les collisions. La situation devient alors un problème d'optimisation. Comment avoir les plus petites clôtures, pour minimiser l'effet de bout de clôture et les collisions en maximisant les traversées sécuritaires des animaux?

Les modèles de simulations deviennent de plus en plus populaires en écologie. Grâce à leurs faibles coûts et leurs capacités de simuler une quantité incroyable de scénarios, ils deviennent une source de référence avant la prise de décision. On trouve plusieurs exemples de simulations appliquées au problème des collisions et des corridors écologiques. Jaeger and Fahrig (2004) ont utilisé un système informatique pour prédire les effets des clôtures sur la persistance d'une population en relation avec le nombre de collisions. Wilansky and Jaeger (2024) ont utilisé une simulation afin de visualiser et prédire les effets des bouts de clôtures dépendamment de plusieurs comportements différents de la population.

Méthode

Objectif

Le but de ce projet est de rendre l'exploration de solutions pour les corridors écologiques plus accessibles. Avec un modèle d'agents, j'ai pu reproduire les conditions que l'on retrouve dans le contexte des collisions routières. Nous savons très peu d'informations sur le comportement des animaux lorsqu'ils longent des clôtures (Wilansky and Jaeger, 2024) alors mon approche reste naïve pour essayer de simuler pour un grand nombre d'espèces. Ma simulation se veut une approche théorique et simpliste afin de mieux comprendre où positionner les clôtures et les tunnels afin de limiter les collisions et faciliter les traverses.

Donc selon une population définie, comment devrait-on positionner les infrastructures pour avoir le meilleur résultat possible? Par-dessus la simulation, j'utiliserai un algorithme génétique afin de faire l'exploration des solutions et trouver la meilleure configuration selon un budget et un segment de route préétabli. Le tout pourra être testé et utilisé dans un navigateur, rendant ainsi le projet le plus accessible possible.

Il faut tout d'abord avoir une population de vertébrés pour générer les résultats de la simulation. Pour mon projet, un vertébré est représenté par un carré de couleur aléatoire. Chaque carré possède une position dans l'espace 2D ainsi qu'une vitesse en X et en Y. En modifiant la vitesse sur l'un des axes, la direction du vertébré va changer. La vitesse doit rester en dessous d'un certain seuil pour éviter des déplacements trop rapides.

Les carrés apparaissent à des endroits paramétrables. Il peut y avoir qu'un seul point d'apparition ou bien plusieurs points d'apparitions. Lorsqu'il y a plus d'une position de départ, les carrés sont répartis équitablement entre les différentes options.

Lorsqu'il y a une collision avec les limites de l'environnement, le vertébré doit changer de direction de façon aléatoire. Il ne peut sortir de l'environnement prédéfini.

Lorsqu'il y a une collision avec une clôture (rectangle mince brun), au contraire des collisions avec l'environnement, le carré ne change pas complètement de direction. Lorsqu'il entre en collision avec une clôture, il sera redirigé dans d'un côté ou de l'autre de celle-ci selon son point de collision. Si le carré entre en collision avec une clôture horizontale avant sa moitié, alors le carré ira vers la gauche, sinon vers la droite. Ensuite si dans le mouvement aléatoire le carré change ensuite de direction, il ne longera plus la clôture, mais ce n'est pas la collision en elle-même qui provoque le changement de direction, au contraire. C'est une approche beaucoup plus naïve que celle utilisé par Wilansky and Jaeger (2024), mais pour le but de la simulation elle fonctionne suffisamment bien.

Lorsqu'il y a une collision avec la route (grand rectangle noire), le vertébré "meurt" et il ne bouge plus. Le concept de mort sera important lors de l'évaluation de la population qui sera abordée plus tard.

Lorsqu'il y a une collision avec un tunnel (représenté par des carrés fixes bleu) alors le carré est téléporté au tunnel de l'autre côté de la route. En réalité, les vertébrés n'utilisent pas toujours avec succès les installations (Denneboom et al., 2021). Par simplicité et aussi pour maximiser l'impact des traversés sur la position des tunnels, j'ai décidé que lorsqu'un carré entre en collision avec un tunnel, il le traverse automatiquement. Ce détail sera important lors de l'évaluation de la population.

L'environnement de simulation est défini comme suit:

- Chaque animal est défini par un carré 20px par 20px
- Il n'y a qu'une route qui sépare l'environnement en deux horizontalement. Cette route occupe toute la largeur de l'environnement et est haute de 75px

- Les clôtures peuvent être placées n'importe où le long de la route. La longueur est générée aléatoirement, mais sa hauteur est de 20px. La longueur totale des clôtures et le nombre sont des paramètres.
- Les tunnels peuvent être placés n'importe où le long de la route. Les tunnels sont toujours en pair, une entrée et une sortie. Il est important de noter qu'ils sont bidirectionnels. Ils font 20px par 20px. Le nombre de tunnels est un paramètre.

J'ai choisi d'utiliser un algorithme génétique afin d'explorer l'espace de solutions pour les configurations d'infrastructures. Cet algorithme d'abord présenté par John Holland (1992) est particulièrement intéressant par sa simplicité. En définissant une fonction que l'on souhaite optimiser, l'algorithme utilise une population sur laquelle des opérations de sélections et de recombinaisons sont appliquées. Ces opérations permettent de garder l'information critique tout en introduisant de la nouveauté et donc de potentiellement trouver de meilleures solutions. Basé sur la logique derrière l'évolution des espèces on y retrouve les grandes étapes : sélection, reproduction et mutation.

Pour appliquer l'algorithme génétique à ce problème, il faut penser au problème en inversant les rôles. Ici la population que l'on souhaite "évoluer" est l'environnement, soit les clôtures et les tunnels. Les animaux seront alors l'environnement d'apprentissage. Les gènes qui seront modifiés sont alors le positionnement des clôtures et des tunnels. Par soucis de compréhension chaque étape de l'algorithme sera présentée avec les gènes en premier et ensuite appliquée sur la population (clôtures et tunnels).

Lorsque je ferai référence à un individu, je ferai référence à l'ensemble des clôtures et des tunnels pour une simulation.

Initiation

Après quelques tests, mon ordinateur me permettait de rouler au maximum 100 individus en simultané, donc chaque génération aura 100 individus. Les clôtures et les tunnels sont générés de façon aléatoire, mais contraints par certaines règles :

- Il y a un nombre maximal de clôtures et tunnels. Ce nombre est un paramètre. De façon aléatoire, chaque individu pourra avoir entre 1 et le maximum de chaque infrastructure.
- Il y a une longueur maximale pour les clôtures. C'est aussi un paramètre.

Les clôtures sont d'abord générées et ensuite en regardant les espaces restants disponibles, les tunnels sont générés à leur tour.

Évaluation

Après un cycle de 200 images/secondes, environ 4 secondes, la génération courante est évaluée. Pour faire ça il faut établir les critères d'évaluations. J'utilise le nombre de carrés qui sont morts et le nombre de carrés qui ont traversés en utilisant les tunnels. Afin de mettre l'accent sur la disposition des clôtures et non sur celle des tunnels, je pondère légèrement le poids de l'utilisation des tunnels. Voici la fonction d'évaluation utilisée :

$$fitness = x + 0.5 \cdot w$$

Où x est le nombre d'animaux encore en vie et w est le nombre de traversées de la route par tunnels.

Sélection

La fonction d'évaluation est appliquée à tous les individus et ils sont ensuite classés selon leur performance. Afin d'être certain de conserver les solutions qui performant bien, le top 20% est conservé tel quel. Cela est l'étape d'élitisme dans l'algorithme.

Cross Over

Pour créer de la diversité dans l'exploration des solutions, les gènes de deux individus seront combinés. Dans l'ensemble de la population, incluant l'élite, deux parents seront choisis aléatoirement. Les gènes de ces parents seront combinés pour former un nouvel individu qui se joindra à la prochaine génération. Ce processus sera répété jusqu'à ce que la population ait la taille d'origine, dans mon cas, 100 individus.

Ici les gènes sont les clôtures et les tunnels. Alors je prends la moitié de gauche du premier parent et la moitié contenant le plus de clôtures dans le 2ème parent (Figure 1, étape 1). Je combine ces deux moitiés et ça forme le nouvel individu (Figure 1, étape 2). Il est important de conserver la longueur totale de la clôture alors si elle est trop longue, des segments seront retirés aléatoirement jusqu'à atteindre la longueur voulue (Figure 1, étape 3). Le processus inverse sera appliqué si la clôture est trop courte.

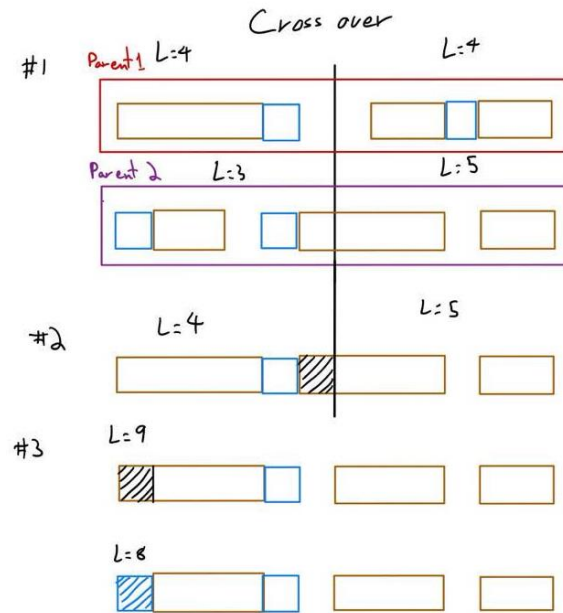


Figure 1

Processus de “crossover”

Mutation

Afin d’augmenter davantage la diversité dans la population et donc des solutions possibles, certains individus recevront un traitement supplémentaire. 5% des individus auront une modification de leurs gènes de façon aléatoire. Pour les clôtures et les tunnels, ça veut dire qu’il y aura des déplacements, ce qui garantit que les clôtures resteront la même longueur.

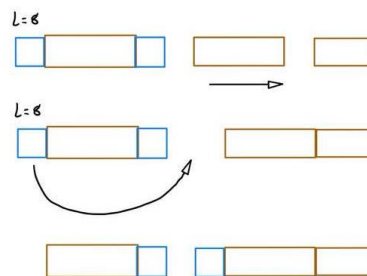


Figure 2

Processus de mutation

Résultats

Les résultats sont assez limités dans le cadre de ce projet. Le but était plus de fournir une preuve de concept que de faire une analyse approfondie pour tirer des conclusions. Je peux néanmoins conclure que mon approche fonctionne pour optimiser la fonction d'évaluation présentée plus tôt. J'arrive à cette conclusion car lorsque je positionne, par exemple, deux points d'apparition, les clôtures et les tunnels se concentrent directement devant eux-ci. Si ces deux points d'apparition sont aux extrémités, alors le milieu aura beaucoup moins d'infrastructures.

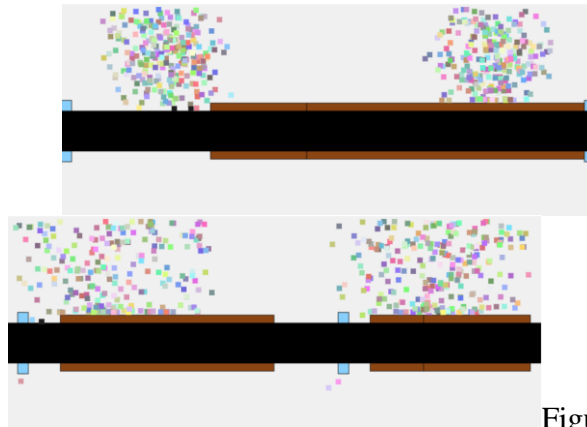


Figure 3

À gauche l'initialisation, à droite la même simulation 20 générations plus tard

Dans la figure 3 on peut observer le changement de positionnement des clôtures et des tunnels afin de s'adapter aux points d'apparition. Les clôtures sont déplacées vers les extrémités afin de protéger les vertébrés. Les tunnels sont aussi déplacés afin de maximiser le nombre de vertébrés qui peuvent traverser. Il est intéressant de remarquer que le tunnel de droite change de position, passant de l'extrémité droite vers une position plus centrale. Cela s'expliquerait par le fait qu'à l'extrémité il n'y a qu'une petite ouverture, mais au centre elle est bien plus grande alors en positionnant un tunnel au centre, l'algorithme minimise le nombre d'animaux écrasés en plus d'augmenter le nombre de passages.

Discussion

L'utilisation d'un algorithme génétique semble une approche intéressante, mais je crois que mon implémentation contient trop de limitations afin d'arriver à une conclusion.

Tout d'abord la simulation est toujours aléatoire, donc toutes les générations et tous les individus ont des animaux qui se comportent différemment. Donc la meilleure solution de la génération passés n'est pas garantie de performer encore bien pour la prochaine génération si les animaux ont un comportement qui diverge de beaucoup du cycle précédent. Il aurait été intéressant de s'assurer que les animaux ont toujours les mêmes mouvements pour réellement trouver la meilleure solution, mais afin d'obtenir une diversité suffisante j'ai opté pour un comportement toujours aléatoire ce qui, selon moi, limite le projet.

Une autre limitation est dans la façon de séparer et repositionner les clôtures et les tunnels. Par faute de temps j'ai pris l'approche la plus simple, mais cette approche est un peu trop naïve pour réellement valoriser la diversité.

Donc et au niveau de la simulation et au niveau de l'algorithme il y aurait des améliorations faciles à faire pour obtenir une solution plus intéressante. Je crois que cette idée a du potentielle, mais par faute de temps, je n'ai pas pu l'explorer pleinement.

Références

- Jaeger, J. A., Bowman, J., Brennan, J., Fahrig, L., Bert, D., Bouchard, J., ... & Von Toschanowitz, K. T. (2005). Predicting when animal populations are at risk from roads: an interactive model of road avoidance behavior. *Ecological modelling*, 185(2-4), 329-348.
- Fahrig, L., & Rytwinski, T. (2009). Effects of roads on animal abundance: an empirical review and synthesis. *Ecology and society*, 14(1).
- Van Der Ree, R., Smith, D. J., & Grilo, C. (2015). *Handbook of road ecology*. John Wiley & Sons.
- Erritzoe, J., Mazgajski, T. D., & Rejt, Ł. (2003). Bird casualties on European roads—a review. *Acta Ornithologica*, 38(2), 77-93.
- Seiler, A., & Helldin, J. O. (2006). Mortality in wildlife due to transportation. In *The ecology of transportation: Managing mobility for the environment* (pp. 165-189). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Bishop, C. A., & Brogan, J. M. (2013). Estimates of Avian Mortality Attributed to Vehicle Collisions in Canada
Estimation de la mortalité aviaire attribuable aux collisions automobiles au Canada. *Avian Conservation and Ecology*, 8(2), 2.
- González-Suárez, M., Zanchetta Ferreira, F., & Grilo, C. (2018). Spatial and species-level predictions of road mortality risk using trait data. *Global Ecology and Biogeography*, 27(9), 1093-1105.
- Rytwinski, T., Soanes, K., Jaeger, J. A., Fahrig, L., Findlay, C. S., Houlahan, J., ... & van der Grift, E. A. (2016). How effective is road mitigation at reducing road-kill? A meta-analysis. *PLoS one*, 11(11), e0166941.
- Soanes, K., Rytwinski, T., Fahrig, L., Huijser, M. P., Jaeger, J. A., Teixeira, F. Z., ... & van Der Grift, E. A. (2024). Do wildlife crossing structures mitigate the barrier effect of roads on animal movement? A global assessment. *Journal of Applied Ecology*, 61(3), 417-430.
- Clevenger, A. P., Chruszcz, B., & Gunson, K. E. (2001). Highway mitigation fencing reduces wildlife-vehicle collisions. *Wildlife society bulletin*, 646-653.

- Ford, A. T., Dorsey, B., Lee, T. S., & Clevenger, A. P. (2022). A before-after-control-impact study of wildlife fencing along a highway in the Canadian Rocky Mountains. *Frontiers in Conservation Science*, 3, 935420.
- Lafrance, M., & Alain, É. (2019). Impacts de l'ajout de passages fauniques et du prolongement de clôtures anticervidés sur la sécurité routière de la route 138 à Petite-Rivière-Saint-François. *Le naturaliste canadien*, 143(1), 48-54.
- Plante, J., Jaeger, J. A., & Desrochers, A. (2019). How do landscape context and fences influence roadkill locations of small and medium-sized mammals? *Journal of environmental management*, 235, 511-520.
- Jaeger, J. A., & Fahrig, L. (2004). Effects of road fencing on population persistence. *Conservation biology*, 18(6), 1651-1657.
- Wilansky, J., & Jaeger, J. A. (2024). Predicting the effectiveness of wildlife fencing along roads using an individual-based model: How do fence-following distances influence the fence-end effect?. *Ecological Modelling*, 495, 110784.
- Holland, J. H. (1992). Genetic algorithms. *Scientific american*, 267(1), 66-73.