**7 | CHAPITRE 3 : DISCUSSION CONCLUSIVE**

**[Recap]**

L’objectif principal de cette étude était d’explorer les facteurs qui influencent l’estimation de la prévalence dans un contexte spatial. Nous avons utilisé une approche multi-échelle pour se pencher sur l’effet d’effort d’échantillonnage, les biais associés aux méthodes d’échantillonnage, les patrons de distribution spatiale et les prédicteurs d’infection de la maladie du point noir chez les communautés de poissons littoraux de lac. Les résultats ont démontré que la prévalence d’infection est distribuée de manière non-aléatoire dans le paysage. L’effort d’échantillonnage nécessaire pour estimer une prévalence représentative dépend de la méthode d’échantillonnage utilisé et un faible effort d’échantillonnage tend à surestimer la prévalence. En effet, le choix de la méthode d’échantillonnage influence la prévalence mesurée à l’échelle du lac et du paysage. Par ailleurs, la méthode de transect est la méthode qui requiert le moins d’échantillonnage pour estimer une prévalence représentative.

Les patrons de distribution spatiale de la prévalence à l’échelle du lac varient selon la méthode d’échantillonnage utilisée. Les transects et la combinaison de méthode ont révélé une distribution bimodale. Ce genre de patrons a parfois été observé chez les parasites en raison de leur tendance à s’agréger dans l’espace. Ces patrons suggèrent la présence de zones locales chaudes et zones froides. En revanche, aucun patrons n’ont pu être détecté avec les méthodes de pêche (senne et nasse).

À l’échelle du site, les facteurs physico-chimique et la structure de communauté se sont révélé les meilleurs prédicteurs de la prévalence d’infection dans les communautés de poissons. Nos résultats appuient la théorie d’effet de dilution. La prévalence est négativement liée au couvert de macrophyte qui suggère un effet de dilution par l’obstruction de la transmission des cercaires vers les poissons. L’abondance totale de poissons et l’abondance de poissons non-hôtes suggèrent également un effet de dilution par obstruction physique ou compatibilité physiologique. Plusieurs relations entre la prévalence et les prédicteurs environnementaux montraient de la non-linéarité suggérant des interactions complexes qui nous n’avons pu clarifier.

En bref, nous avons montré des variations dans la prévalence d’infection à travers plusieurs échelles spatiale, efforts d’échantillonnage et méthode d’échantillonnage. Ainsi, ces éléments devraient être pris en considération dans le contexte d’études comparatives.

En conséquence, nous encourageons à continuer la recherche sur les processus liant l’environnement et les paramètres d’infection pour intégrer dans les recensements et plans de conservation futurs. Dans un contexte de changements globaux, il est important de suivre et comprendre les dynamiques d’infection afin de prédire les risques d’infection sur la biodiversité.

**[Not discussed]**

Cette étude a été construite de manière à explorer les facteurs et processus qui influencent la prévalence d’infection à travers le paysage. Toutefois, les travaux n’ont pu couvrir l’entièreté de la dynamique de la maladie du point noir chez les communautés de poissons. D’abord, pour mieux comprendre les dynamiques spatiales, il faut comprendre les dynamiques de dispersion et de transmission. Par exemple, est-ce que les hôtes terminaux visitent tous les lacs ? Est-ce que les escargots infectés sont agrégés dans l’espace ? Sur les macrophytes ou dans le substrat ? Bref, une compréhension de la dynamique d’infection chez tous les hôtes du cycle de vie des trématodes qui causent la maladie du point noir (escargots, poissons et oiseaux) permettrait de dresser un portrait plus complet. Cela permettrait de répondre à des questions fondamentales comme : est-ce que les lacs non infectés ne sont simplement pas visités/habités par les escargots et les oiseaux ou est-ce que les conditions environnementales ne sont pas adéquate pour le parasite? À cet effet, dans son étude des lacs de la Station de biologie des Laurentides, Charrette (date) n’a observé aucun gastéropode dans le lac Triton, lequel nous avons mesurée une prévalence d’infection nulle chez les poissons. Également, l’abondance moyenne de gastéropodes était plus grande dans le lac Cromwell que dans le lac Croche ce qui suggère que la prévalence d’infection serait corrélée à l’abondance d’escargot dans le lac (nous avons mesurée une prévalence nettement supérieure dans le lac Cromwell par rapport au lac Croche).

We assumed that fish don’t move across systems

**[Conditions météo]** Parce que nous avons travaillé à moyenne échelle spatiale (tous les lacs échantillonnés se trouvaient dans la même municipalité), nous avons assumé que les conditions météorologiques étaient similaires entre les lacs. Toutefois, les conditions peuvent changer selon l’exposition l’utilisation et la qualité de la zone riparienne et bandes riveraines, et de l’élévation par exemple. Également, l’élévation et la taille du lac peuvent influencer la période de gel des lacs et potentiellement influencer la dynamique temporelle d’infection. Ainsi, la prévalence mesurée dans les lacs pourrait varier en raison des conditions météorologiques locales par médiation de l’élévation et la bathymétrie des lacs.

Considère juste la zone littorale

Les parasites causant le blackspot n'ont pas été identifiés à l'espèce, et donc, on ne sait pas si la répartition est associée à un ou plusieurs parasites différents.

On ne sait pas quel est le pourcentage de metacercariae encore vivant

* Individual feeding specialization in generalist population > intraspecific variations (Cirtwill et al., 2015)
* Est-ce que même patterns chez espèces avec même feeding ecology?

Analyse de communauté

**[Anthropique et utilisation du territoire]** Plusieurs facteurs intéressants n’ont pu être intégré à cette étude, malgré leur potentielle influence sur la prévalence d’infection. Notamment, l’utilisation du territoire à l’échelle du bassin versant est connu pour influencer les intrants de matière organique et de nutriments dans les milieux d’eau douce (refs). Par exemple, le pourcentage de milieu agricole, milieu forestier, milieu humide ou milieu anthropique pourrait avoir une incidence sur la dynamique hydrique et la qualité de l’eau des milieux aquatiques. À plus petite échelle, la densité d’habitations et la densité de route autour d’un lac, la présence de barrages, la présence d’embarcations à moteurs et la largeur de la zone riparienne pourraient être des facteurs influent sur les dynamiques d’infection dans les lacs du Québec.

Plusieurs éléments qui n’ont pas été considérés dans cette étude pourraient également influencer l’estimation de la prévalence chez les communautés de poissons. Par exemple, comme les trématodes qui causent la maladie du point noir s’accumulent sur les individus avec l’âge (plus longue période d’exposition) (ref), la structure d’âge des communautés aurait une incidence sur la prévalence d’infection. Ainsi, les communautés avec d’avantage d’individus plus âgés seraient plus susceptibles d’avoir une prévalence d’infection plus élevée. Un effet d’interaction entre la structure d’âge et la susceptibilité des espèces de poissons modulerait également la prévalence de la communauté. Donc, si les espèces-hôtes les plus susceptibles ont une structure d’âge assez élevée, la prévalence d’infection serait plus élevée qui si la structure d’âge était faible. Pour notre part, l’âge des poissons n’a pas été estimée. Par contre, la longueur des individus capturés par les méthodes de pêche a été mesurée et comme les poissons grandissent avec l’âge (ref), nous avons observé une augmentation de la prévalence médiane d’infection chez les populations de crapets-soleil et des perchaudes à travers le paysage (Annexe). Ainsi, la structure d’âge de ces populations pourrait avoir une incidence sur la prévalence infection des communautés de poissons, peu importe l’échelle.

**[Patrons spatiaux]** Quoique notre étude a soulevé un effet de la méthode d’échantillonnage sur l’interprétation des patrons spatiaux d’infection dans le paysage, aucun attributs géographiques ne semblent d’importants prédicteurs de la prévalence à petite échelle (échelle du transect). Nos modèles additifs n’ont révélé aucune relation significative entre la prévalence d’infection à l’échelle du transect et la distance au lac le plus près, la superficie du bassin versant, l’aire de drainage du lac, l’élévation du lac et le temps de résidence de l’eau. Certes, comme ces facteurs agissent à l’échelle du lac ou du bassin versant, une analyse à petite échelle peut potentiellement passer par-dessus un effet de ces variables en raison d’une prédominance des processus locaux. Un nombre de lac échantillonné nous permettrait, à cet effet, de tester l’influence de ces facteurs à l’échelle du lac par exemple. Cela permettrait également des faire des analyses spatiales pour tester statistiquement les différences d’infection entre les bassins versants et regarder les gradients d’infection le long d’une séquence hydrologique. À cet effet, la connectivité entre les milieux aquatiques influence la proximité génétique entre les populations de poissons et ainsi jouerait sur la tolérence aux parasites (refs). Les populations avec une faible variabilité génétique pourraient également être davantage vulnérables à la colonisation par de nouveaux parasites (refs). Parallèlement, nous avons testé l’effet de la distance au lac le plus proche par les voies aériennes comme proxy de la dispersion par l’hôte définitif. Cependant, la distance au lac le plus près par la voie aquatique n’a pas été prise en compte et permettrait de déterminer si la dispersion par les poissons (et escargots sur une plus grande échelle temporelle) est un bon prédicteur de la prévalence le long d’une séquence hydrologique.

**[Interactions parasites]** Les parasites cooccupant un même individu-hôte (i.e., infra-communauté) peuvent interagir les uns avec les autres (refs). Par exemple, certains parasites se compétitionnent pour les ressources à l’intérieur de l’hôte (refs). Cela fait en sorte qu’en nature, certains parasites ne co-occurrent que très rarement ensemble. Au contraire, certains favorisent l’établissement d’un autre parasite (ref). Cet aspect d’interactions parasitaires n’a pas été considéré dans cette étude. Toutefois, comme la métacercaire est en période de dormance dans le poisson, une compétition interspécifique qui limiterait l’intensité d’infection serait surprenante. Par contre, une compétition pour l’espace intra-guilde (entre les individus qui causent la maladie du point noir) serait envisageable. En effet, il serait plus difficile pour les cercaires de pénétrer le poisson si le point de contact est déjà occupé par un autre individu (ref?). Cependant, une superposition de points noirs est parfois observé chez les individus fortement infectés (observation de terrain)(refs?).

**[Photo-AI]** Obtenir des mesures d’infection chez les animaux sauvage est souvent compliqué puisque cela nécessite de pouvoir s’approcher de l’animal, de pouvoir le contenir ou bien le mettre à mort. Toutefois, ce genre de proximité et manipulations occasionnent du stress envers les individus sauvages. Avec les endoparasites, avoir des mesures d’infection sans avoir à sacrifier les individus s’avère particulièrement compliqué. Cependant, certaine infection comme la maladie du point noir causent des signes physiques d’infection et permettent d’évaluer l’infection sans sacrifier les individus. Toutefois, sur le terrain, comme les chercheurs cherchent à limiter le stress causé aux animaux, la prévalence d’infection est souvent la seule mesure d’infection reportée. En réalité, le nombre de points noirs est souvent trop élevée pour compter sur un individu stressé ou en mouvement dans l’eau. Ainsi, les mesures d’abondance et d’intensité d’infection requiert généralement la mise à mort des individus. Un moyen de palier à ce problème serait de prendre les individus en photo sur le terrain et de compter le nombre de points noirs par la suite soit à la main ou avec un logiciel d’analyse d’images (e.g., le logiciel calcul en intensité d’infection selon le pourcentage du corps recouvert de point noir). Par contre, les points noirs ont tendance à s’agréger et se superposent parfois. Ainsi, soit le logiciel ou le modèle d’intelligence artificiel est capable de bien les distinguer en fonction de l’effet profondeur dans l’image ou bien un facteur de correction devrait être développer à la suite de tests de comparaison entre l’estimation du logiciel et le nombre réel de point noir.

**[Analyses]** Les analyses présentées dans ce mémoire ne permettent pas d’identifier les mécanismes derrière les relations entre la prévalence d’infection et les caractéristiques de l’environnement. Conséquemment, d’autres études seront nécessaires afin de confirmer les mécanismes suggérés dans le présent mémoire. Par exemple, une approche expérimentale in situ ou en mésocosmes pourrait confirmer si les macrophytes agissent comme barrière de transmission vis-à-vis les cercaires. D’autre part, une analyse de pistes serait une bonne option pour mettre en évidence les mécanismes causals entre les facteurs environnementaux et la prévalence d’infection.

**[Modèles]** Les modèles empiriques (i.e., basés sur des données) sont de bons outils pour décrire et comprendre les relations entre la biodiversité et l’environnement. Ce genre d’approche est très flexible et ne requiert aucune information préalable. Cependant, l’approche empirique comporte des limites : elle ne considère par les processus théoriques sous-jacents à la relation et les résultats sont limités au système d’étude. Ainsi, un modèle empirique qualifiant une relation X peut fortement varier d’une espèce ou d’un endroit à l’autre et donc, ne peuvent pas être extrapoler dans un contexte comparatif. Dès lors, un modèle a besoin d’un large éventail d’ensembles de données pour détecter des patrons à grande échelle (Maestrini et al., 2022). À l’opposée, les modèles mécanistiques sont basés sur les processus bien établis dans le domaine de recherche, ce qui les rend théoriquement universel. Toutefois, cette approche nécessite une compréhension préalable des lois et mécanismes qui régissent la relation (Maestrini et al., 2022). Dans le domaine du parasitisme, les modèles mécanistes sont plutôt rares (mais voir Fox et al., 2015 et Robinson et al., 2022) puisque les interactions hôte-parasites sont particulièrement complexes et les lois et processus qui régissent leur dynamique sont difficiles à identifier (Poulin, 2007). La présente étude contribue au développement des dynamiques entre les macro-parasites aquatiques et l’environnement. Ainsi, nous encourageons le développement des connaissances empiriques sur les interactions hôtes-parasites afin de clarifier les processus derrière les patrons observés en nature et conséquemment, développer des modèles mécanistiques pour prédire les dynamiques d’infection à grande échelle.