

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN OUTAOUAIS

CONSERVATION DE LA TORTUE MOUCHETÉE (*Emydoidea blandingii*) :  
ÉVALUATION DE L'ÉTAT DES POPULATIONS EN OUTAOUAIS

MÉMOIRE  
PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN BIOLOGIE

PAR  
LAURA DÉSILETS

AOÛT 2024

## REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je voudrais remercier mon directeur de maîtrise, le professeur Yann Surget-Groba, pour son encadrement, sa patience envers moi et l'opportunité offerte en découvrant la tortue mouchetée. Cette tortue, qui me fait fondre avec son sourire coquin, va rester gravée dans mon cœur.

Je voudrais remercier Bautisse Didier Postaire pour toute l'aide, l'encadrement et le support offert lors de l'analyse de mes données et la rédaction du mémoire.

Je voudrais remercier la professeur Angélique Dupuch pour son aide précieuse lors de l'analyse de mes données.

Je voudrais remercier l'équipe du Ministère Forêt, Faune et Parc à Québec et à Gatineau. Votre aide sur le terrain et vos conseils m'ont grandement aidé. Merci spécialement à Yohann Dubois pour son encadrement lors de mon projet de recherche et les précieux conseils enseignés sur le terrain et lors de nos échanges par courriel. Merci à Simon Pelletier, l'expert en capture de tortues, pour le partage de ses connaissances et son aide sur le terrain. Je remercie aussi les stagiaires qui sont venus m'aider.

Je voudrais remercier l'équipe de Conservation Nature Canada, ainsi que les stagiaires, pour votre aide sur le terrain. Merci spécialement à Francisco Retamal-Diaz pour les fous rires et pour ses connaissances sur la mortalité routière.

Je voudrais remercier Laurence Danvoye, Émile Blais et Baptiste Didier Postaire pour l'aide et l'analyse de mes données ADN<sub>e</sub> au laboratoire. Laurence, nos fous rires au laboratoire ont été un baume sur les montagnes russes que j'ai vécues à la maîtrise.

Je voudrais remercier le professeur Marc Mazerolle pour l'aide concernant les modèles de Huggins.

Pour finir, je voudrais remercier tous mes amis (es), ma famille et ma collègue de travail/terrain, Daphnée Bernier, qui m'ont écouté dans mes moments de doutes et pour les fous rires qui m'ont fait garder le sourire. Merci infiniment à tous.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	II
LISTE DES FIGURES.....	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	VII
RÉSUMÉ .....	IX
CHAPITRE I INTRODUCTION.....	1
1.1 Objectifs du travail.....	3
1.2 La tortue mouchetée.....	4
1.3 Les méthodes traditionnelles de suivi de populations.....	10
1.4 L'ADN environnemental.....	12
CHAPITRE II MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	15
2.1 Échantillonnage.....	15
2.1.1 Capture – Marquage – Recapture.....	16
2.1.2 ADNe .....	19
2.2 Manipulations en laboratoire ADNe .....	21
2.3 Analyse des données .....	23
2.3.1 CMR.....	23
2.3.2 Sex-ratio .....	26
2.3.3 Distribution des tailles de carapaces .....	27
2.3.4 ADNe .....	28
2.4 Comparaison des deux méthodes d'échantillonnage .....	28
CHAPITRE III RÉSULTAT .....	29
3.1 Estimation de l'abondance .....	29
3.2 Estimation du sex-ratio .....	36
3.3 Structure d'âge de la population .....	38
3.4 Estimation de l'abondance avec l'ADNe.....	38
CHAPITRE IV DISCUSSION .....	40
4.1 Estimation de l'abondance .....	40

4.1.1	CMR.....	40
4.1.2	ADNe .....	42
4.1.3	Bilan de la population de tortues mouchetées en Outaouais.....	47
4.2	État de la population de tortues mouchetées en Outaouais.....	50
4.2.1	Sex-ratio .....	50
4.2.2	Les juvéniles.....	51
4.2.3	Projet « Coup de pouce » .....	55
CONCLUSION.....		57
ANNEXE A .....		59
ANNEXE B.....		62
BIBLIOGRAPHIE .....		64

## LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1.1	Distribution géographique de la tortue mouchetée en Amérique du Nord .....	5
2.1	Carte d'échantillonnage représentant les 13 sites échantillonnés lors du suivi de la population de la tortue mouchetée en 2021 et 2022 .....	15
2.2	Dimorphisme sexuel chez la tortue mouchetée .....	18
2.3	Échantillonnage CMR .....	19
2.4	Échantillonnage ADNe .....	20
3.1	Probabilité de première capture en fonction des neuf sites avec recaptures à partir du modèle « $p(\text{site+shell}) c()$ » .....	31
3.2	Prédiction de la probabilité de première capture en fonction de la taille de la carapace .....	36
3.3	Ratio des sexes des 13 sites échantillonnés en Outaouais .....	37
3.4	Distribution des tailles de carapace pour 12 sites échantillonnés et à travers l'Outaouais .....	38
3.5	Relation entre l'abondance estimée à partir de la méthode CMR et la quantité d'ADN cible dans chacun des six sites sélectionnés en plus du coefficient de corrélation .....	39

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page	
2.1	Information pour chacun des 13 sites au Québec sur l'année d'échantillonnage, la superficie du site en hectare, le nombre de pièges installés (CMR), le nombre d'échantillons d'ADNe collectés (ADNe) et la densité de pièges (Densité, nombre de pièges/ha) .....	16
2.2	Liste des réactifs présents dans le mélange de réactions PCR .....	22
2.3	Séquence des amorces et de la sonde utilisées .....	23
2.4	Liste des paramètres utilisés pour construire les différents modèles	25
2.5	Spécification des paramètres .....	26
3.1	Nombre de tortues uniques capturées (MNA), le nombre total de recapture (RE), l'abondance estimée (AB) de la tortue mouchetée à partir du modèle « $p(\text{Site}+\text{Shell}) c()$ », l'erreur standard (se), la limite inférieure de l'intervalle de confiance (lcl) et la limite supérieure (ucl) et la probabilité de première capture (p) pour les 13 sites échantillonnés en Outaouais en 2021-2022 .....	30
3.2	L'abondance estimée de la tortue mouchetée à partir du modèle « $p(\text{Shell}) c()$ », l'erreur standard (se), la limite inférieure de l'intervalle de confiance (lcl) et la limite supérieure (ucl) et la probabilité de première capture (p) pour les 13 sites échantillonnés en Outaouais en 2021-2022 .....	31
3.3	Superficie du site, probabilité de première capture (p), l'abondance estimée de la tortue mouchetée (AB), l'erreur	

	standard (se), la limite inférieure de l'intervalle de confiance (lcl) et la limite supérieure (ucl) à partir du meilleur modèle « p(Site_size+Shell) c() pour les 13 sites échantillonnés en Outaouais en 2021-2022 .....	33
3.4	Abondance estimée de la tortue mouchetée à partir du meilleur modèle (AB), le nombre de pièges installés par site (Pièges), la densité de pièges (Densité P., nombre de pièges/ ha) et la densité de tortues mouchetées (Densité T., nombre de tortues/ ha) pour chacun des 13 sites échantillonnés en Outaouais .....	34
3.5	Effet des covariables sur « p » et « c » dans le meilleur modèle « p(Site_size+Shell) c() » selon la valeur du paramètre (Beta), l'intervalle de confiance le plus petit (lcl) et le plus grand (ucl) .....	35



## RÉSUMÉ

La conservation d'une espèce en péril nécessite de connaître son abondance et sa répartition. La tortue mouchetée (*Emydoidea blandingii*) est une espèce en péril avec le statut menacé, au Québec, et en voie de disparition au Canada. L'état des populations de tortues mouchetées en Outaouais est incertain et nécessite un suivi régulier pour évaluer l'efficacité du plan de rétablissement 2020-2030. Les méthodes traditionnelles (observation directe, piégeage, marquage) sont utilisées pour estimer la taille d'une population. Cependant, elles demandent un grand effort d'échantillonnage et pour des espèces cryptiques, rares et peu abondantes, elles sont souvent peu efficaces. Pour améliorer la détection et le suivi de populations de ces espèces, l'ADN environnemental (ADNe) est une alternative prometteuse pour son faible coût et sa rapidité de détection. L'objectif principal de cette maîtrise est de mieux connaître l'état des populations de tortues mouchetées en Outaouais, puis d'évaluer s'il est possible d'estimer l'abondance de la population avec la méthode ADNe. En 2021-2022, 13 sites occupés par la tortue mouchetée ont été échantillonnés. Sur chacun des sites, 30 échantillons d'ADNe ont été récoltés et 30 pièges ont été installés durant neuf nuits consécutives. Une étude de Capture-Marquage-Recapture a permis d'estimer une population d'environ 358 tortues mouchetées. L'analyse de la distribution de taille des tortues capturées indique que la population est majoritairement constituée de tortues adultes. Le ratio du nombre de femelles et de mâles est équilibré dans les sites étudiés. La relation entre l'abondance estimée et la quantité d'ADN cible a été analysée pour six sites et montre une tendance positive qui n'a pas pu être testée statistiquement par manque de points de comparaison. Il serait pertinent de poursuivre et d'augmenter le nombre de sites analysés, car cette étude suggère que l'ADNe est une méthode prometteuse pour estimer la taille des populations de tortues mouchetées.

Mots clés : Tortue mouchetée, Abondance, État des populations, ADN environnemental, Outaouais

## CHAPITRE I

### INTRODUCTION

Sur la terre, plus de 42 000 espèces sont au bord de l'extinction, soit 28 % de toutes les espèces évaluées (UICN, 2023). Le taux d'extinction est 100 fois supérieur à celui du siècle passé et cela s'apparente à une sixième extinction de masse qui est, à l'inverse des autres extinctions massives, directement liée aux activités humaines (Ceballos et al., 2015). Les causes de cette extinction de masse sont les changements globaux provoqués par l'humain comme la destruction de l'habitat, la pollution et la surexploitation des espèces (Ceballos et al., 2015). Nous sommes en pleine crise de la biodiversité au Québec, au Canada et dans le monde entier. En 2023, le Canada dénombrait 10 espèces éteintes, 29 espèces en danger critique d'extinction, 57 espèces menacées et 125 espèces vulnérables (UICN, 2023). Pour sa part, le Québec dénombrait cinq espèces en danger critique d'extinction, 11 espèces menacées et 13 espèces vulnérables (UICN, 2023). Le besoin d'agir est urgent.

Au niveau mondial, l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) est l'un des acteurs principaux pour la protection de la biodiversité. L'UICN a pour but d'informer la société et de guider l'élaboration de plans d'actions qui visent la protection et la conservation d'écosystèmes, d'habitats menacés et d'espèces en péril, à travers le monde (UICN, 2023). Leurs actions sont menées en collaboration avec des gouvernements, des organismes internationaux et le secteur privé afin d'améliorer les plans de conservation mis en place et d'assurer, sans tarder, le rétablissement d'espèce cible (UICN, 2023). L'UICN a aussi pour mandat de garder la « Liste Rouge » des espèces en péril à jour. Cette liste est la référence sur l'état des populations et des

espèces menacées, vulnérables ou éteintes à travers la planète Terre. Du côté du Canada, la protection des espèces, animales et végétales sauvages, est garantie par la Loi sur les espèces en péril en assurant qu'elles ne soient pas menacées dans leur survie (Trudeau et Leroux, 2008). L'objectif de cette loi est de favoriser le rétablissement des espèces en péril en traitant directement les menaces qui pèsent sur elles (Trudeau et Leroux, 2008). Pour le Québec, la loi mise en place est la Loi sur les espèces menacées ou vulnérables. Cette loi vise à prévenir la disparition d'une espèce vivante (L.R.Q., Chapitre E-12.01, 36). Cependant, avant de pouvoir protéger une espèce avec ces deux lois, l'espèce doit être ajoutée à l'annexe ou aux règlements découlant de ces lois (Couturier et al., 2013). Pour pouvoir ajouter une espèce à l'annexe, il faut d'abord évaluer son statut ou son niveau de risque à disparaître, puis si la survie de l'espèce est considérée comme menacée, un plan de rétablissement sera alors préparé à son égard (Couturier et al., 2013).

La réalité est qu'il y a encore beaucoup d'espèces non évaluées par manque de données disponibles sur leur répartition, leur abondance et les différentes menaces auxquelles elles font face. Selon la « Liste Rouge », au Canada, on dénombre 132 espèces avec un manque de données sur leurs états, dont 17 espèces au Québec (UICN, 2023). L'évaluation du risque d'extinction ou du niveau de risque d'une espèce nécessite de connaître la répartition, le nombre de populations présentes et l'abondance de l'espèce cible. L'abondance est donc une donnée très importante en écologie, car elle est essentielle pour connaître l'état actuel et la tendance d'une population ou d'une espèce (Mali et al., 2018). Connaître l'abondance d'une espèce est un atout considérable lors de la mise en place d'un plan de rétablissement ainsi que pour évaluer l'efficacité de ce plan vis-à-vis de la population (Mali et al., 2018). Le suivi des populations et des plans de rétablissement est encore plus important lorsqu'on étudie une espèce menacée. Cette donnée indique si la disparition de l'espèce est imminente si rien n'est fait pour réduire l'impact des menaces qui affectent sa survie (Équipe de rétablissement des tortues du

Québec, 2020). Le défi est encore plus grand lorsque l'espèce étudiée est cryptique, donc difficile à observer, ce qui limite l'accumulation de données importantes sur l'état de la population.

Les tortues ont toujours été un groupe taxonomique très discret, mais grandement menacé (Lovich & Ennen, 2013). Depuis les années 1970, une course vers l'information fait rage pour en apprendre davantage sur les tortues des États-Unis et du Canada (Lovich & Ennen, 2013). Le Canada et les États-Unis abritent près de 20% des espèces de tortues mondiales, soit un total de 58 espèces natives. Sur les 58 espèces de tortues, 22 ont un statut vulnérable, menacé ou en danger de disparition et attendent la mise en place d'un plan de conservation ou d'un suivi plus rigoureux (Lovich & Ennen, 2013). Malheureusement, malgré la course à l'information, aucune espèce de tortues n'a encore été retirée de la liste des espèces en péril après y avoir été listée.

Dans le cadre de cette maîtrise, nous nous sommes intéressés à une espèce de tortue du Québec peu connue, la tortue mouchetée (*Emydoidea blandingii*). Le manque de données, sa faible abondance et sa répartition géographique seulement dans le sud-ouest du Québec dissimulent l'état de ses populations. L'acquisition de données et la mise en place d'un plan de conservation sont les outils nécessaires pour protéger une espèce d'une extinction certaine.

### 1.1 Objectifs du travail

L'abondance est une donnée importante pour la mise en place d'un plan de rétablissement et le suivi d'espèces en péril. La tortue mouchetée a un statut d'espèce en péril au Québec et au Canada. Le manque de données et le besoin de connaître son abondance, l'état des populations au Québec et sa répartition géographique demandent

un suivi régulier de l'espèce. Les méthodes traditionnelles comme la capture, le marquage et l'observation sont les méthodes présentement utilisées en écologie pour estimer l'abondance d'une population. Le coût, l'effort d'échantillonnage et la difficulté à suivre des espèces cryptiques rendent la méthode moins adaptée pour suivre la population de tortue mouchetée au Québec. Il serait avantageux de développer et de comparer des méthodes alternatives moins chères, plus rapides et sensibles. L'ADN environnemental est une piste envisageable. Afin d'évaluer l'efficacité de la méthode d'échantillonnage ADN environnemental, elle sera comparée à la méthode Capture - Marquage – Recapture.

L'objectif principal de ce projet est de mieux connaître l'état des populations de tortues mouchetées en Outaouais grâce à une étude Capture - Marquage - Recapture.

L'objectif secondaire est d'évaluer si la méthode d'échantillonnage ADN environnemental serait une approche plus performante pour estimer rapidement, à moindres coûts et plus précisément la taille des populations de tortues mouchetées en Outaouais.

## 1.2 La tortue mouchetée

La tortue mouchetée est une espèce semi-aquatique qui vit essentiellement dans des marais, des lacs peu profonds et des étangs à castor où la végétation est abondante (Hasler et al., 2015). Elle a un régime alimentaire omnivore. Son alimentation varie beaucoup selon le milieu dans lequel elle vit et la disponibilité des proies (St-Hilaire et al., 2003). Selon une étude, la tortue mouchetée se nourrit surtout d'écrevisses, d'escargots aquatiques et de larves d'insectes, mais aussi de petits poissons, de sangsues et de plantes (Lagler, 1943).



(Photos de tortues mouchetées prises par Laura Désilets, Outaouais, 2021)

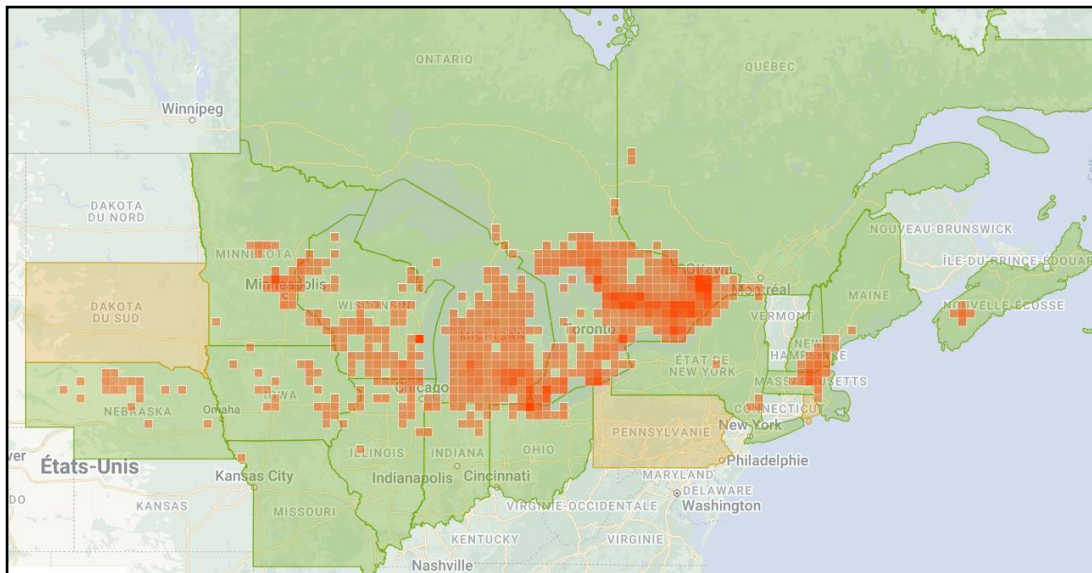


Figure 1.1 Distribution géographique de la tortue mouchetée en Amérique du Nord (Carte issue de <https://www.inaturalist.org/taxa/39885-Emydoidea-blandingii#map-tab>)

La tortue mouchetée se retrouve uniquement en Amérique du Nord. Son aire de répartition couvre majoritairement la région des Grands Lacs, le nord-est des États-Unis et le sud-est du Canada (Lyons et al., 2023). Dans la partie la plus au nord de son

aire de répartition, la tortue mouchetée atteint le sud du Québec et de l'Ontario, puis elle descend jusqu'au centre de l'Illinois pour la partie la plus au sud (Lyons et al., 2023). À l'Ouest de l'Illinois, elle s'étend jusqu'aux dunes de sable du Nebraska (King et al., 2021) puis jusqu'à l'état de New York pour sa partie la plus à l'est (Hartwig & Kiviat, 2007). Au Québec, la distribution de la tortue mouchetée couvre majoritairement le long de la rivière des Outaouais, le parc de la Gatineau et la région du Pontiac (Proulx et al., 2014). Plusieurs populations isolées sont aussi répertoriées comme la population de la Nouvelle-Écosse, de l'état de New York, du Massachusetts, du New Hampshire et du Maine (Gouvernement du Canada, 2016). Au Québec, des occurrences de la tortue mouchetée ont été détectées jusqu'en Abitibi-Témiscamingue (Gouvernement du Canada, 2016). Pour ce projet, nous nous sommes principalement intéressés à la population du Québec, soit celle des Grands Lacs et du Saint-Laurent. Cette population est la plus grande au Canada, car elle s'étend du sud de l'Ontario au sud du Québec.

La tortue mouchetée a une morphologie reconnaissable avec son long cou et sa gorge d'un jaune vif. Sa carapace est de forme bombée, de couleur noire et parsemée de mouchetures variant du jaune au brun (Équipe de rétablissement des tortues du Québec, 2020). La dossière peut atteindre 28 cm, ce qui fait de la tortue mouchetée une tortue de taille moyenne (Environnement Canada, 2016; Équipe de rétablissement des tortues du Québec, 2020). Le plastron, lui, est de couleur jaune avec des taches noires. La tortue mouchetée présente un dimorphisme sexuel permettant de les sexer facilement à l'âge adulte (Environnement Canada, 2016).

La tortue mouchetée est une espèce dite cryptique, car elle est difficilement détectable dans son environnement (Davy et al., 2015; Équipe de rétablissement des tortues du Québec, 2020). L'abondance de la tortue mouchetée a déjà été évaluée par le passé,

mais elle reste très approximative. En 2005, la population de tortues mouchetées des Grands Lacs et du Saint-Laurent était inconnue, mais estimée grossièrement entre 1 000 et un peu moins de 10 000 individus reproducteurs (Environnement Canada, 2016). Au Québec, en 2010, un projet de télémétrie a suivi 44 tortues mouchetées adultes afin d'étudier l'étendue de leur domaine vital (Fortin et al., 2012). En 2016, on estimait, à la suite d'un gros effort d'échantillonnage s'étalant sur 6 saisons de captures (2 600 jours de piège), la population à moins de 200 individus adultes au Québec, car 188 individus ont été capturés (COSEPAC, 2016). Selon la « Liste Rouge », la population des Grands Lacs et du Saint-Laurent est en déclin et même, elle pourrait subir une perte de 50% ou plus au cours des trois prochaines générations (COSEPAC, 2016; Gouvernement du Canada, 2016; UICN, 2010).

L'abondance des populations de tortues mouchetées continue d'être peu suivie et estimée au courant des années. Au Canada, dans la ville d'Ottawa, la viabilité et la structure d'une population de tortues mouchetées, suite à des développements urbains, a été évaluées (Auge et al., 2024). Ils ont estimé la population à 81 individus en 2010 et un déclin drastique à environ 25 individus en 2020 (Auge et al., 2024). Aux États-Unis, davantage de recherches ont été effectuées sur la tortue mouchetée, mais encore là, un manque se ressent sur le nombre d'individus adultes ou juvéniles présent dans chacune des populations. Au Michigan, dans la réserve George, une étude de 1975 à 1994 a estimé que la population était restée stable avec une taille de 180 à 200 individus adultes (Congdon et al., 2001). Une autre étude faite par Ross (1989) a estimé la densité de tortues mouchetées au Michigan et au Missouri. Ils ont découvert qu'on retrouve 27,5 tortues mouchetées / hectare au Michigan et 55 tortues / hectare au Missouri. En général, les populations de tortues mouchetées varient d'une dizaine d'individus à une centaine (King et al., 2021).



La tortue mouchetée a une espérance de vie allant jusqu'à 75 ans et une maturité sexuelle vers l'âge de 14 à 25 ans (Congdon et al., 2001) ce qui fait d'elle la tortue canadienne la plus tardive sexuellement (Environnement Canada, 2016). Selon le rapport du COSEPAC (2016), une génération de tortues mouchetées dure en moyenne 40 ans. La tortue mouchetée femelle pond des œufs tous les un à trois ans, avec un nombre variant de trois à 22 par ponte (Gouvernement du Canada, 2016; Équipe de rétablissement des tortues du Québec, 2020). La stratégie reproductive de la tortue mouchetée se traduit par une faible production de descendant par année sur une longue période reproductive, soit tout au long de sa vie adulte. La forte prédation des nids, à chaque année, par des mammifères comme le raton laveur, est naturelle dans le cycle de vie des tortues (Reid et al., 2016). Cette stratégie reproductive est efficace, car techniquement très peu de prédateurs affectent les tortues adultes en raison de leur carapace rigide. Selon une étude de viabilité de la population de tortues mouchetées en Illinois et au Wisconsin, le taux de mortalité des juvéniles varie de 86,8%, à la naissance, à 28,9% vers l'âge d'un an, 14,6% à deux ans et 2,2% vers l'âge de six ans jusqu'à la maturité sexuelle (King et al., 2021). Les taux de mortalité élevés en bas âge expliquent le faible recrutement de tortues mouchetées vers l'âge adulte. Cependant, certains articles avancent un manque de juvéniles dans la nature qui affecteraient la survie des populations (King et al., 2021; Ross, 1989; Starking-Szymanski et al., 2018).

L'humain, avec la construction de ses routes, a ajouté une nouvelle menace contre les tortues adultes. Selon la stratégie reproductive de la tortue mouchetée et suivant la tendance, le taux de mortalité chez les tortues adultes devrait se situer sous les 2,2%. Cependant, en ajoutant la menace des routes, ce taux s'élève à 5,3% (King et al., 2021). Au mois de juin, la mortalité routière augmente et atteint un pic vers les deux dernières semaines de juin, ce qui concorde avec la période de ponte de la tortue mouchetée (Beaudry et al., 2010). Il est bien connu que nos routes créent une barrière au déplacement de la faune et diminuent la connectivité entre deux milieux. D'après le

rapport du COSEPAC (2016), le taux annuel de mortalité routière des tortues adultes varie entre six et 23 % pour la population des Grands Lacs et du Saint-Laurent. Une étude de Proulx et al. (2014) a testé l'effet des routes sur le déplacement des tortues mouchetées et leur niveau d'évitement pour différents types de route. Ils ont conclu que les tortues mouchetées évitent de traverser des routes, et aucune différence significative n'a été observée entre le type de route et le sexe de la tortue. Ainsi, que ce soit une route asphaltée ou non, les tortues mouchetées mâles ou femelles vont éviter de traverser un chemin.

Selon Congdon et al. (2001), le maintien d'une population de tortue repose sur un haut taux de survie des adultes et plus précisément des femelles. La perte d'un seul individu adulte peut causer de lourdes conséquences où l'augmentation de 5 % du taux de mortalité peut mener cette population à l'extinction (Weber et Layzer, 2011). La survie des femelles est le facteur limitant dans la survie des populations de tortues mouchetées et devrait être l'effort numéro un dans les plans de conservation (Hasler et al., 2015). La perte d'habitats, la mortalité routière et la forte prédation des nids occasionnent une réduction du recrutement habituel de tortues mouchetées vers l'âge adulte (Thompson et al., 2020). Ce changement est observé avec l'âge moyen de nos populations qui penche vers davantage d'adultes que de juvéniles (Reid et al., 2016). En général, les populations ont entre 1,5 à 30 individus adultes pour un seul juvénile (COSEPAC, 2016). Au Québec, l'étude a révélé un ratio d'âge et de sexe de 4,9 adultes pour un juvénile et 1,1 femelle pour un mâle (COSEPAC, 2016). Les populations de tortues mouchetées sont aussi affectées par la perte et la fragmentation de son habitat (Gouvernement du Canada, 2021). La loi sur les espèces en péril catégorise le statut d'une espèce selon l'état de ses populations. La tortue mouchetée est considérée « en voie de disparition » selon le critère A2 (section b, c, d et e) : perte de 60% de l'habitat depuis trois générations et déclin observé et inféré des sous-populations, mais aussi le critère A3 (section c, d et e) : déclin continu (observé et inféré) par le passé et prévu

pour les 100 prochaines années. Ainsi, la tortue mouchetée correspond au critère de la catégorie « En voie de disparition » selon le critère A4 (section b, c, d et e) : combinaison des justifications des critères A2 et A3 (COSEPAC, 2016).

Depuis 2010, la tortue mouchetée est considérée « en voie de disparition » en Amérique du Nord d'après la Liste Rouge (UICN, 2010) également par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature, car la taille des populations de l'espèce a décliné de près de 80% au cours des trois dernières générations (COSEPAC, 2016). Au Canada, la tortue mouchetée est considérée « en voie de disparition » depuis 2016, mais elle a obtenu ce statut en 2021. Au Québec, elle est considérée comme « menacée » depuis octobre 2009 (Environnement Canada, 2016). Sachant le déclin des populations de la tortue mouchetée depuis quelques années et le besoin d'agir afin de suivre leur évolution et de les protéger, le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs a publié un nouveau plan de rétablissement pour la période 2020 à 2030. Le but de ce plan de rétablissement est d'améliorer ou de maintenir stable l'état des habitats et des populations de la tortue mouchetée afin que des populations viables occupent l'ensemble de l'aire de répartition de l'espèce au Québec (Équipe de rétablissement des tortues du Québec, 2020). Pour assurer l'efficacité et évaluer l'impact des actions du plan de rétablissement, un suivi régulier est nécessaire afin de suivre l'état des populations, l'occupation des habitats et l'aire de répartition.

### 1.3 Les méthodes traditionnelles de suivi de populations

Les méthodes de suivi traditionnelles sont, encore aujourd'hui, les méthodes les plus utilisées pour effectuer le suivi de population de plusieurs espèces. Le piégeage, le marquage ou l'observation directe font partie des techniques d'échantillonnage traditionnelles utilisées pour évaluer et suivre l'état d'une population animale (Ream et

Ream, 1966). La méthode Capture - Marquage - Recapture (CMR) est souvent utilisée pour estimer la taille d'une population (Koper et Brooks, 1998). La méthode CMR se base sur la capture d'espèce. Pour estimer l'abondance, la méthode CMR prend en compte le nombre d'individus nouvellement attrapés et le nombre de recapture (Breton et Dufresne, 2003). En général, la capture de tortues aquatiques et de la tortue mouchetée, utilise le piège à cerceaux avec appâts (Gamble, 2006). L'appât le plus souvent utilisé, pour attirer des tortues, est la conserve de sardines. L'avantage premier d'utiliser les méthodes traditionnelles, comme la méthode CMR, est l'acquisition de données sur l'espèce cible comme la taille, le sexe et le poids ainsi que des échantillons de tissus pouvant être utilisés pour des analyses génétiques (Weber et Layzer, 2011). L'inconvénient est l'aspect invasif et coûteux de la méthode. La méthode CMR requiert d'attraper et de manipuler les individus ce qui engendre du stress chez l'animal. La méthode peut même engendrer de la mortalité chez certaines espèces capturées (Underwood et al., 2004). Aussi, l'effort fourni pour bien échantillonner une population cible est très important, autant en temps qu'en personnel. De plus, la méthode d'échantillonnage CMR est reconnue comme peu efficace lors du suivi de population d'espèces rares et cryptiques (Davy et al., 2015). Par exemple, lors d'une étude de suivi de population de tortues mouchetées, les auteurs Reid et al. (2016) ont démontré l'ampleur que nécessite l'effort d'échantillonnage et le temps requis afin de capturer une tortue mouchetée. Ils ont obtenu un taux de capture de 0,05 tortue mouchetée par nuit par piège (Reid et al., 2016). Pour récolter suffisamment de données sur la population, ils ont échantillonné sur une période de trois ans. L'approche CMR peut difficilement être utilisée pour des espèces cryptiques et rares. Le développement d'une méthode alternative plus efficace est nécessaire pour échantillonner de façon régulière ces espèces.

#### 1.4 L'ADN environnemental

La méthode d'échantillonnage ADN environnemental (ADNe) est une technique de plus en plus utilisée et présente dans les recherches scientifiques (Akre et al., 2019). La méthode utilise le patrimoine génétique de l'espèce cible libéré dans l'environnement pour l'étudier et en apprendre davantage sur l'espèce (Beng et Corlett, 2020). La récupération d'ADN d'espèces aquatiques se fait via une filtration de l'eau du milieu en captant l'ADNe sur un filtre (Capo et al., 2020). Les étapes suivantes sont effectuées en laboratoire. L'ADNe est extrait du filtre, purifié et amplifié afin de pouvoir détecter et identifier l'espèce cible (Capo et al., 2020). La méthode la plus souvent utilisée pour détecter l'ADNe est la PCR quantitative (qPCR) (Poitras et Houde, 2002). Cette méthode est capable de détecter une trace d'ADN et de quantifier sa proportion dans un échantillon d'eau (Griffin et al., 2020). La réaction en chaîne par polymérase (PCR) permet d'amplifier un ADN cible et de le détecter (Poitras et Houde, 2002). Une autre méthode de quantification de l'ADN, plus précise et moins sensible à la présence d'inhibiteurs dans l'échantillon est la PCR digitale (dPCR) (Doi et al., 2015). Cette technique est prometteuse aussi bien dans la détection que la quantification de l'ADNe (Doi et al., 2015; Capo et al., 2020). Il serait intéressant d'utiliser la technique même si elle reste relativement peu utilisée en raison du coût élevé de l'équipement et du matériel nécessaire. Il est possible d'utiliser la PCR pour détecter des organismes terrestres, d'eau douce ou marins (Akre et al., 2019). À ce jour, la méthode d'échantillonnage ADNe a surtout été utilisée pour détecter la présence - absence d'une ou de plusieurs espèces dans un milieu ainsi que comme outil de détection d'espèces rares, cryptiques ou invasives (Akre et al., 2019; Ficetola et al., 2019). Plusieurs documents prouvent son efficacité ce qui suscite beaucoup d'intérêt dans la communauté scientifique quant à l'utilité de l'ADNe dans le suivi de population sauvage difficile à échantillonner (Adams et al., 2019; Raemy & Ursenbacher, 2018; Yates et al., 2021). La méthode d'échantillonnage ADNe présente plusieurs avantages

à son utilisation comparée aux méthodes traditionnelles. En plus d'être rapide d'utilisation et peu coûteuse en personnel et en temps, la méthode n'a pas besoin de manipuler l'espèce cible pour obtenir son ADN, car l'ADN est récupéré directement dans l'environnement de l'organisme (Akre et al., 2019; Davy et al., 2015; Ficetola et al., 2019). L'inconvénient de la méthode ADNe est le niveau de précaution à prendre sur le terrain afin d'éviter une contamination croisée des échantillons et causer des erreurs de détection en laboratoire. Un faux positif est lorsque l'ADN de l'espèce cible est détecté dans un échantillon alors qu'elle n'est pas présente dans le milieu et un faux négatif est lorsque l'ADN n'est pas détecté alors que l'espèce est présente dans le milieu (Davy et al., 2015). Un faux positif peut être causé par la contamination du matériel sur le terrain ou en laboratoire (Akre et al., 2019). Un faux négatif, avec une espèce cryptique comme la tortue mouchetée, peut être causé par sa faible abondance et un manque de sensibilité du matériel en laboratoire à détecter une faible trace d'ADN cible (Davy et al., 2015). De plus, la méthode ADNe, face aux méthodes traditionnelles, ne permet pas de récolter des données biométriques comme le poids, la taille, ou même le sexe qui, chez plusieurs espèces, n'est pas déterminé génétiquement (Martinez et al., 2008). Les espèces animales dont le sexe est déterminé par la température d'incubation des œufs, ce qui est le cas chez la tortue mouchetée, n'ont pas de chromosome associé au sexe mâle ou femelle (Martinez et al., 2008). Ainsi, le manque d'informations sur le sexe-ratio ou l'âge des individus peuvent impacter la mise en place d'un plan de rétablissement adaptée à la situation de l'espèce.

Récemment, plusieurs études ont évalué la possibilité d'utiliser l'outil ADNe comme outil d'estimation d'abondance d'une population cible (Yates et al., 2019). Quelques recherches ont été réalisées sur des organismes aquatiques comme des poissons et des amphibiens (Beng & Corlett, 2020; Yates et al., 2021). Les auteurs Lacoursière-Roussel et al. (2016) ont estimés l'abondance de l'omble de fontaine avec la méthode ADNe et ils ont obtenu une bonne corrélation entre la concentration d'ADN cible et

l'abondance relative. Il serait intéressant de tester la performance de la méthode ADNe comme outil d'estimation d'abondance chez des espèces aquatiques cryptiques, rares et difficiles à observer comme les tortues d'eau douce (Akre et al., 2019). Chez des organismes recouverts d'écailles et d'une carapace, la dispersion de leur ADN, dans l'environnement, est moindre qu'un organisme recouvert de mucus comme chez les amphibiens et les poissons (Adams et al., 2019). En Europe, une étude sur la cistude d'Europe a testé l'utilisation de l'ADNe comme outil d'abondance. Malheureusement, il n'a pas été possible de corrélérer la concentration en ADN cible et la biomasse de l'espèce (Raemy et Ursenbacher, 2018). Au Québec, une étude d'abondance sur la tortue des bois a aussi été réalisée et ils ont conclu que le taux de détection de l'ADNe pourrait devenir un outil efficace de suivi d'abondance à condition que le calibrage et la standardisation soient préalablement effectués (Lacoursière-Roussel et al., 2017). Dans le cadre de cette maîtrise, nous évaluerons s'il est possible d'utiliser la méthode ADNe comme outil d'estimation de l'abondance de la tortue mouchetée en Outaouais.

## CHAPITRE II

### MATÉRIEL ET MÉTHODE

#### 2.1 Échantillonnage

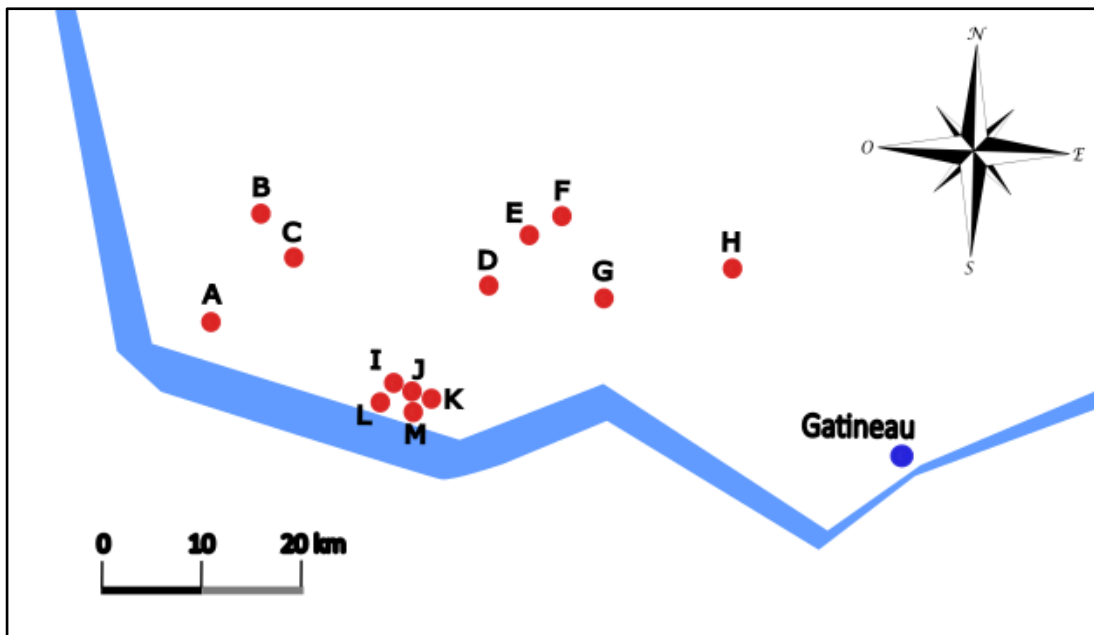


Figure 2.1 Carte d'échantillonnage représentant les 13 sites échantillonnés lors du suivi de la population de la tortue mouchetée en 2021 et 2022. La localisation précise des sites ne peut être divulguée pour des raisons de protection de l'espèce.

L'échantillonnage pour cette maîtrise a eu lieu à l'été 2021 et 2022, dans la vallée de l'Outaouais et le parc de la Gatineau (Figure 2.1, Tableau 2.1). La méthode CMR et des échantillons d'ADNe ont été prélevés sur les 13 sites conjointement. La superficie des milieux humides, dans la précision des estimations d'abondance, est importante. Nous



avons calculé la superficie des 13 sites avec le logiciel Google Earth. La superficie calculée comprend le milieu humide au complet où la tortue mouchetée peut être retrouvée. Le calcul de la superficie permet aussi d'estimer la densité de pièges et de tortues mouchetées sur nos sites. La densité de pièges ou l'effort d'échantillonnage est une information importante dans l'élaboration d'un plan d'échantillonnage ainsi que le nombre de pièges à installer, car la superficie que couvre les pièges peut impacter la probabilité de première capture (p).

Tableau 2.1 Information pour chacun des 13 sites au Québec sur l'année d'échantillonnage, la superficie du site en hectare, le nombre de pièges installés (CMR), le nombre d'échantillons d'ADNe collectés (ADNe) et la densité de pièges (Densité, nombre de pièges/ha)

Année	Site	Superficie	CMR	ADNe	Densité
2021	A	65,4	30	30	0,5
2021	B	31,9	30	30	0,9
2021	C	6,7	24	31	3,6
2021	D	74,8	30	30	0,4
2022	E	35,6	30	30	0,8
2022	F	26,1	30	30	1,1
2021	G	10,9	30	30	2,7
2022	H	47,5	30	30	0,6
2021	I	10,4	20	20	1,9
2021	J	3,4	10	10	2,9
2021	K	7,2	24	24	3,4
2021	L	41,3	30	30	0,7
2021	M	1,1	6	6	5,5

### 2.1.1 Capture – Marquage – Recapture

Sur chacun des sites où des données de CMR ont été collectées, nous avons installé entre six et 30 verveux. Un piège à cerceaux, ou verveux, est un piège en maille à trois anneaux de métal (76,2 cm de diamètre (ou 30 pouces), taille des mailles de 1,9 cm ou 3,8 cm étirée). Les tortues mouchetées sont appâtées avec des sardines en conserve.

Chaque piège est installé pour une période de neuf nuits consécutives. Une équipe vient relever les pièges aux 24 heures.

Pour chaque tortue mouchetée, capturée et non marquée, un ensemble de données biométriques ont été collectées. Le poids est mesuré à l'aide d'une balance de type pesola d'un kg ou de 2,5 kg. Les tailles de la carapace et du plastron sont mesurées avec un vernier forestier de 50 cm. Les individus sont sexés lorsque c'est possible. Trois caractéristiques diffèrent entre les sexes (Figure 2.2). Premièrement, le plastron est de forme plate pour les femelles adultes et les juvéniles alors qu'il est concave chez les mâles (Équipe de rétablissement des tortues du Québec, 2020). Deuxièmement, les mâles ont un cloaque éloigné du plastron alors que celui des femelles est très rapproché de la base du plastron (Environnement Canada, 2016). Troisièmement, la lèvre supérieure, chez les mâles, a une coloration noire alors que les femelles, et les juvéniles, ont une lèvre supérieure plus pâle striée de bandes jaunes ou brunes (Communication personnelle de Yohann Dubois et Simon Pelletier).







Caractéristiques	Mâle	Femelle
<b>Plastron</b>		
	©Laura Désilets	©Yohann Dubois
<b>Cloaque</b>		
	©Yohann Dubois	©Yohann Dubois
<b>Lèvre supérieure</b>		
	©Laura Désilets	©Yohann Dubois

Figure 2.2 Dimorphisme sexuel chez la tortue mouchetée

La présence de malformations ou d'amputations apparentes et l'âge sont pris en note. Lors de la capture d'une nouvelle tortue mouchetée, un numéro unique lui est attribué. Le marquage se fait en limant l'arrière de la carapace. À des fins d'analyses génétiques, des fragments d'écailles seront prélevés sur les pattes avant des individus capturés à l'aide d'une pince coupante et conservés dans de l'éthanol absolu.

Lors de la recapture d'individus capturés durant l'année de CMR en cours, seul le numéro d'identification est pris en note. Cependant, si l'individu a déjà été marqué lors d'une année précédente et recapturé cette année, les données biométriques sont reprises en note.



Figure 2.3 Échantillonnage CMR (Photos prises par Laura Désilets)

Sur la première photo (Figure 2.3), on peut voir la collecte d'échantillon de tissu et un vernier forestier dans le fond du canot. Sur la deuxième photo, on peut voir un piège installé et sur la troisième photo, on peut voir une tortue mouchetée capturée.

### 2.1.2 ADNe

Sur chacun des sites, 30 échantillons d'ADNe ont été récoltés (Tableau 2.1). Chaque échantillon consiste à filtrer de l'eau du milieu sur un filtre Whatmann GF/C (pore 1,2  $\mu\text{m}$ ) à l'aide d'une pompe péristaltique (modèle conçu dans notre laboratoire, Figure 2.4). Un pré-filtre de nylon est installé sur le porte-filtre afin de limiter l'accumulation de matières organiques sur le filtre. Chaque filtration dure cinq minutes et tente d'atteindre deux litres d'eau filtrés. Toutefois, la saturation du filtre par de la matière

organique a parfois limité le volume de filtration; le volume filtré après cinq minutes est pris en note. Les prélèvements d'eau sont récoltés à deux mètres du canot, à l'aide d'une perche, afin de limiter les risques de contaminations. Une filtration d'eau distillée est effectuée, après dix filtrations, comme contrôle négatif sur le terrain afin de contrôler et d'identifier une possible contamination des échantillons. Après chaque filtration, l'échantillon est conservé sur glace. Pour une conservation à long terme, les filtres sont insérés dans des enveloppes individuelles puis, déposés dans des sacs remplis de silica gel pour les déshydrater.



Figure 2.4 Échantillonnage ADNe (Photos prises par Laura Désilets)

Sur la première photo (Figure 2.4), on peut voir la glacière où les porte-filtres sont conservés et le modèle de pompe péristaltique utilisé. Sur la deuxième photo, utilisation de la perche à deux mètres du canot.

## 2.2 Manipulations en laboratoire ADN

L'ADN cible est extrait des filtres et purifié à l'aide du kit d'extraction Quiagen suivant le protocole du manuel « *DNeasy® Blood & Tissue Handbook* » à la p. 25. (*DNeasy Blood & Tissue Handbook - QIAGEN, 2020*). Quelques modifications ont été apportées au protocole. Tout d'abord, lors de l'extraction d'ADN, 540 µl de tampon ATL et 20 µl de protéinase K ont été rajoutés dans les tubes contenant les filtres. L'incubation à 56°C a duré deux heures. Ensuite, les filtres, ainsi que le liquide, ont été transférés dans une colonne QiaShredder et centrifugés à 20 000 g pendant cinq minutes pour récupérer un maximum de liquide. Enfin, 600 µl de tampon AL et 600 µl d'éthanol ont été rajoutés à l'échantillon et vortexer sans effectuer d'incubation. Le reste des étapes (lavage et élution) suivent le protocole.

L'ADN purifié a été analysé en laboratoire par PCR digitale (dPCR). L'intérêt d'utiliser la dPCR est sa plus grande sensibilité à détecter des traces d'ADN cible dans un échantillon et une plus grande précision (Huggett & Whale, 2013). Aussi, les résultats obtenus avec la dPCR n'ont pas besoin d'être comparés avec une courbe de calibration. La dPCR utilisée, avec une machine QIAcuity, analyse chaque échantillon en séparant le volume total de PCR (20 µL) à travers 24 000 micropuits. Une réaction PCR se produit dans chacun des micropuits, de façon individuelle. Le ratio du nombre de micropuits positifs sur le nombre total permet de calculer la concentration initiale d'ADN cible dans l'échantillon en se basant sur la loi de Poisson (Huggett & Whale, 2013). Une plaque d'analyse dPCR est composée de 24 puits, permettant d'analyser 11 échantillons de terrain en duplicat en plus d'un contrôle négatif (filtration d'eau distillée sur le terrain) et positif (extraction d'ADN d'écaïlle de *E. blandingii*). Pour une question de temps, la machine dPCR n'étant disponible que pour une durée limitée, l'entièreté des échantillons d'ADNe récoltés en 2021-2022 n'ont pu être analysés. Seul six sites ont été sélectionnés selon les critères qu'ils ont des recaptures, qu'ils ont une

bonne estimation d'abondance et des tailles de populations différentes. Ce sont les six sites suivant : B, F, G, H, K et L. Sur les 30 filtrations récoltées par site, seulement 11 échantillons ont été sélectionnés aléatoirement pour être analysés en raison du temps limité avec la machine dPCR. Les échantillons restants sont conservés au laboratoire et seront analysés ultérieurement.

Avant l'amplification, l'ADNe purifié est dilué à un ratio 1/10 afin de diminuer l'effet des inhibiteurs présents dans l'échantillon. Pour détecter l'ADN de tortue mouchetée, un mélange de réactif est ajouté aux échantillons d'ADNe dilués. Le mélange de réactif comprend le Supermix, l'amorce « Forward », l'amorce « Reverse » et la sonde TaqMan (Tableau 2.2). La sonde possède un fluorochrome (Hex) et émet de la fluorescence pour chacun des puits contenant le fragment cible, et ce à chaque amplification.

Tableau 2.2 Liste des réactifs présents dans le mélange de réactions PCR

Réactifs	Nom	Concentration finale
Supermix	4x Probe PCR Master Mix	1 X
Amorce « Forward »	EblCOIIF	0,25 µM
Amorce « Reverse »	EblCOIIR	0,25 µM
Sonde TaqMan	MGB_Ebl_FAM	0,1 µM

Les puits seront soumis à 75 cycles de 15 secondes à 95°C, puis 30 secondes à 60°C. Une mesure de fluorescence (temps d'exposition : 300 millisecondes) est effectuée à la fin de l'analyse.

Tableau 2.3 Séquence des amorces et de la sonde utilisées (Hernandez et al., 2020)

Réactifs	Séquence
Amorce « Forward » (EblCOI1F)	ATCATCAGGAATTGAAGCAGGG
Amorce « Reverse » (EblCOI1R)	GGGATTTTATGTTAATTGCTGTGGTAATA
Sonde TaqMan (MGB_Ebl_FAM)	CTGAACTGTATATCCACCACTA

## 2.3 Analyse des données

### 2.3.1 CMR

La base de données CMR contient, pour chaque site, l'historique de capture de chacune des tortues mouchetées ainsi que des covariables individuelles : le sexe, le stade de vie (adulte ou juvénile) et la taille de la carapace. Certaines sessions de CMR concordent avec la période de ponte des tortues mouchetées ainsi la covariable statut reproducteur a été rajoutée. Le statut reproducteur se divise en deux catégories soit si la tortue capturée est une femelle en âge de se reproduire (taille de la carapace plus grande ou égale à 17 cm) ou non (Communication personnelle de Yohann Dubois et Sylvain Giguère). Comme les femelles en âge de se reproduire peuvent quitter les milieux étudiés pour aller pondre, nous voulions évaluer l'influence qu'elles ont sur la probabilité de capture et de recapture d'individu.

L'analyse des données de CMR a été faite via le programme MARK version 9.0 (Cooch & White, 2023) et le package RMARK version 3.0.0 (Laake, 2013). La base de données permet au programme MARK d'estimer une taille de population. Plus le nombre de recapture est grand, plus l'estimation de la taille de la population est précise. Le package RMARK permet d'analyser l'ensemble des données dans le logiciel R (R Core Team, 2022).



L'analyse des données de capture nécessite d'évaluer si l'échantillonnage de la population cible est considéré comme une population fermée ou ouverte. Une population fermée présente une absence d'émigration, d'immigration, de mortalité et de naissance (Langtimm et al., 1996). Une population ouverte prend en considération tous les mouvements d'immigration et d'émigration, les naissances et la mortalité (Langtimm et al., 1996). En raison de la courte période d'échantillonnage de notre étude (neuf nuits consécutives), les populations sont considérées comme fermées. Pour analyser les données de CMR, la première étape est d'établir un modèle de population. Ce modèle est une simplification d'une population suffisamment fidèle pour qu'on puisse estimer mathématiquement une abondance d'individu tout en conservant des paramètres pertinents tels que le sex-ratio ou des taux de recaptures différents entre la taille des individus. À partir du nombre de captures, du taux de recapture et des paramètres du modèle, on obtient une abondance théorique de l'espèce cible.

Puisque nos sites d'échantillonnage sont considérés comme des populations fermées, nous avons décidé d'utiliser un modèle dit « de Huggins », spécialement adapté à notre type de données (R. Huggins & Hwang, 2011). Les modèles de Huggins sont des modèles de population fermée capable d'estimer une taille de population avec des données de captures et d'évaluer l'effet des covariables individuelles sur la probabilité de capture. Le modèle de Huggins testé est le modèle dit « Closed Captures » comprenant les paramètres principaux « p » et « c ». Le paramètre « p » est la probabilité de première capture et le paramètre « c » est la probabilité de recapture. Le modèle « Closed Captures » se base sur la vraisemblance conditionnelle pour estimer les probabilités « p » et « c » en fonction de covariables individuelles ou environnementales (Huggins & Hwang, 2011; Huggins, 1989). La taille de la population "N" n'est pas directement estimée par le modèle, mais calculée comme un paramètre dérivé (White, 2008). Les modèles dépendant du temps n'ont pas été testés, car l'échantillonnage s'effectue sur une courte période. Nous considérons donc qu'il

est peu probable, biologiquement parlant, d'avoir un taux de capture et de recapture qui varie chaque jour, donc nous considérons également que la probabilité reste constante pendant toute la session d'échantillonnage.

Les covariables prises en compte dans le modèle sont certaines des données biométriques collectées. On pense que la taille de l'individu influence les probabilités « p » et « c ». Afin d'éliminer certaines covariables, nous avons testé la potentielle corrélation entre la taille de la carapace, la longueur du plastron et le poids avec un test de Spearman. Nous avons obtenu une forte corrélation entre les covariables ( $R > 0,9$ ). La taille de la carapace a été sélectionnée, car la valeur varie peu d'une journée à l'autre contrairement au poids. La donnée taille de la carapace a été centrée et réduite et la donnée statut reproducteur a été transformée en donnée binaire (Tableau 2.4).

Tableau 2.4 Liste des paramètres utilisés pour construire les différents modèles

Paramètres	Descriptions
p	Probabilité de première capture
c	Probabilité de recapture
Shell.0	Taille de la carapace (Donnée numérique centrée et réduite)
Site	Milieu échantillonné
Mom.bin	Statut reproducteur (Donnée binaire)

L'élaboration des différents modèles, dans le logiciel R avec le package RMARK, commence par l'attribution des covariables aux paramètres « p » et/ou « c » (make.design.data). Le modèle le plus basique correspond à « p » et « c » égaux et fixes. À ce modèle, toutes les combinaisons possibles des trois covariables sélectionnées ont été ajoutées, influençant la valeur des deux paramètres (p pouvant être égal à c pour l'ensemble des modèles testés avec la fonction « Shared » écrit c() )

(Tableau 2.5). Au total, trente modèles ont été construits et comparés (voir Annexe A). Le meilleur modèle est sélectionné selon le critère d'Akaike (Hu, 2007). Ce modèle a été utilisé afin d'estimer l'abondance des tortues mouchetées dans chacun des sites échantillonnés (voir Annexe B).

Tableau 2.5 Spécification des paramètres

Paramètres		Définition
$p \neq c$	$p = c$	
$p(\cdot), c(\cdot)$	$p(\cdot)c()$	Les paramètres sont fixes pour l'ensemble des sites.
$p(\text{site}), c(\text{site})$	$p(\text{site})c()$	Les paramètres varient en fonction du site.
$p(\text{shell}), c(\text{shell})$	$p(\text{shell})c()$	Les paramètres varient en fonction de la taille de la carapace.
$P(\text{mom}), c(\text{mom})$	$p(\text{mom})c()$	Les paramètres varient en fonction du statut reproducteur.
$p(\text{site+shell}), c(\text{site+shell})$	$p(\text{site+shell})c()$	Les paramètres varient en fonction du site et de la taille de la carapace.
$p(\text{shell+mom}), c(\text{shell+mom})$	$p(\text{shell+mom})c()$	Les paramètres varient en fonction de la taille de la carapace et du statut reproducteur.
$p(\text{site+shell+mom}), c(\text{site+shell+mom})$	$p(\text{site+shell+mom})c()$	Les paramètres varient en fonction du site, de la taille de la carapace et du statut reproducteur.

### 2.3.2 Sex-ratio

Lors d'une analyse préliminaire, nous avons testé si le sexe de la tortue avait un effet sur la probabilité de première capture, mais ce n'est pas le cas. Donc, la probabilité d'attraper un mâle ou une femelle sur le terrain est similaire. Lors de la sélection des

covariables pour le modèle final, le sexe de la tortue capturée n'a donc pas été pris en compte. Afin de poursuivre nos analyses et d'augmenter nos connaissances sur l'état des populations de la tortue mouchetée en Outaouais, le ratio du nombre de mâles et de femelles tortues capturées sera comparé dans chacun des 13 sites échantillonnés. Aussi, le sex-ratio dans nos sites sera analysé afin d'évaluer si le ratio est équilibré à un mâle pour une femelle. Pour réaliser l'analyse, une base de données a été construite avec le sex-ratio des tortues mouchetées capturées dans chacun des 13 sites échantillonnés. La normalité des données mâles et femelles a été testée avec un test de Shapiro, mais le test a dénoté un manque de normalité. Ainsi, un test non paramétrique doit être utilisé en plus de considérer le design pairé des données, car un mâle et une femelle, dans un même site, sont des données dépendantes. Nous avons utilisé le test de Wilcoxon pairé ou « Wilcoxon signed-rank test » pour évaluer le ratio d'abondance des mâles et des femelles tortues mouchetées dans nos sites.

### 2.3.3 Distribution des tailles de carapaces

La covariable taille de la carapace, ou « Shell » dans les modèles, a été sélectionnée, car on pense qu'elle influence la probabilité de première capture. Pour poursuivre nos recherches sur l'état des populations de la tortue mouchetée en Outaouais, la distribution des tailles de carapaces dans nos 13 sites échantillonnés sera regardée et comparée. Cette donnée nous informe sur la structure d'âge de nos populations. Pour cela, une base de données a été construite avec la taille de la carapace (mm) de chacune des tortues mouchetées capturées dans nos 13 sites échantillonnés.

### 2.3.4 ADNe

Les résultats de la dPCR sont compilés dans le logiciel QIAcuity. Deux types de données sont obtenues. Premièrement, on obtient le nombre de partitions positives par réaction PCR. Il représente le nombre de micropuits produisant de la fluorescence. Deuxièmement, on obtient une concentration en ADN par réaction PCR (nombre de copies d'ADN par microlitre). L'équation mathématique suivante permet de calculer la concentration d'ADN (QIAGEN, 2021) :

Équation 1. Le nombre de copie d'ADN cible par réaction PCR

$$\lambda = -\ln \left( \frac{\text{Nombre de partitions valides} - \text{Nombre de partitions positives}}{\text{Nombre de partitions valides}} \right)$$

Où

$\lambda$  = Le nombre de copie d'ADN cible

## 2.4 Comparaison des deux méthodes d'échantillonnage

Pour comparer l'abondance estimée par la méthode CMR et la concentration d'ADN cible de tortues mouchetées par site, nous avons calculé le coefficient de corrélation entre l'abondance estimée et la quantité d'ADN cible par site (copies/ $\mu$ l). Cependant, en raison du faible nombre de points de comparaison (sept points au total), la significativité du résultat n'a pas été testée statistiquement.

## CHAPITRE III

### RÉSULTAT

#### 3.1 Estimation de l'abondance

Au total, 188 tortues mouchetées uniques ont été capturées en 2021-2022 en Outaouais.

Les premières analyses d'estimation d'abondance de la tortue mouchetée ont utilisé les covariables « Site », « Taille de la carapace » et « Statut reproducteur ». Treize sites en Outaouais ont été analysés. Trente modèles ont été construits et le critère d'AIC a sélectionné « p(Site+Shell) c() » comme le meilleur modèle. Le modèle considère que la probabilité de première capture varie en fonction du site et de la taille de la carapace, et que la probabilité de recapture est identique à la probabilité de première capture ( $p = c$ ).

Tableau 3.1 Nombre de tortues uniques capturées (MNA), le nombre total de recapture (RE), l'abondance estimée (AB) de la tortue mouchetée à partir du modèle «  $p(\text{Site}+\text{Shell})\ c()$  », l'erreur standard (se), la limite inférieur de l'intervalle de confiance (lcl) et la limite supérieur (ucl) et la probabilité de première capture (p) pour les 13 sites échantillonnés en Outaouais en 2021-2022

Site	MNA	RE	AB	se	lcl	ucl	p
A	22	4	72,9	34,3	37,0	189,8	0,041
B	37	44	41,8	3,4	38,0	53,0	0,232
C	6	0	130572,6	10257671,1	405,1	42716241,4	4,83E-06
D	18	4	50,8	22,0	27,9	126,5	0,047
E	1	0	17338,5	2885011,5	33,9	9149549,5	4,40E-06
F	11	13	12,9	1,9	11,4	20,6	0,181
G	5	4	6,6	2,1	5,2	16,1	0,135
H	7	2	16,7	10,0	8,8	58,2	0,051
I	5	0	278417,3	28688823,6	717,8	108747574,9	1,55E-06
J	5	0	172127,2	18284965,1	437,1	68560155,9	2,86E-06
K	17	10	29,3	8,6	20,6	59,2	0,138
L	33	8	93,0	30,3	56,6	185,5	0,052
M	23	25	26,7	2,6	24,1	35,7	0,194

Dans le tableau 3.1, on constate que le modèle est capable d'estimer une taille de population lorsque le site a plusieurs recaptures. Cependant, pour les sites avec aucune recapture comme C, E, I et J, ce modèle n'est pas en mesure d'estimer les paramètres. Nous avons donc sélectionné le meilleur modèle ne comprenant pas la covariable « Site ». Ce modèle est «  $p(\text{Shell})\ c()$  » dans lequel la probabilité de première capture varie en fonction de la taille de la carapace ( $p=c$ ). De cette façon, la probabilité de première capture est estimée à l'échelle de l'Outaouais et cela permet d'estimer une abondance pour les sites avec aucune recapture (Tableau 3.2). L'inconvénient d'un modèle ignorant l'effet site est que l'estimation de « p » est non spécifique au site alors qu'on observe, avec le meilleur modèle «  $p(\text{Site}+\text{Shell})\ c()$  », un effet du site sur l'estimation de l'abondance (Figure 3.1).

Tableau 3.2 L'abondance estimée de la tortue mouchetée à partir du modèle « p(Shell) c() », l'erreur standard (se), la limite inférieure de l'intervalle de confiance (lcl) et la limite supérieure (ucl) et la probabilité de première capture (p) pour les 13 sites échantillonnés en Outaouais en 2021-2022

Site	Abondance estimée	se	lcl	ucl	p
A	30,8	4,2	25,4	43,0	0,123
B	53,8	6,1	45,3	70,3	0,123
C	8,5	1,9	6,7	15,6	0,123
D	25,8	3,6	21,3	36,4	0,123
E	1,3	0,7	1,0	5,0	0,123
F	15,4	2,6	12,5	23,9	0,123
G	7,0	1,7	5,5	13,6	0,123
H	9,7	2,0	7,7	16,9	0,123
I	6,8	1,6	5,4	13,0	0,123
J	7,0	1,7	5,5	13,5	0,123
K	26,9	4,8	21,0	41,6	0,123
L	48,1	5,4	40,7	62,8	0,123
M	33,0	4,1	27,6	44,5	0,123

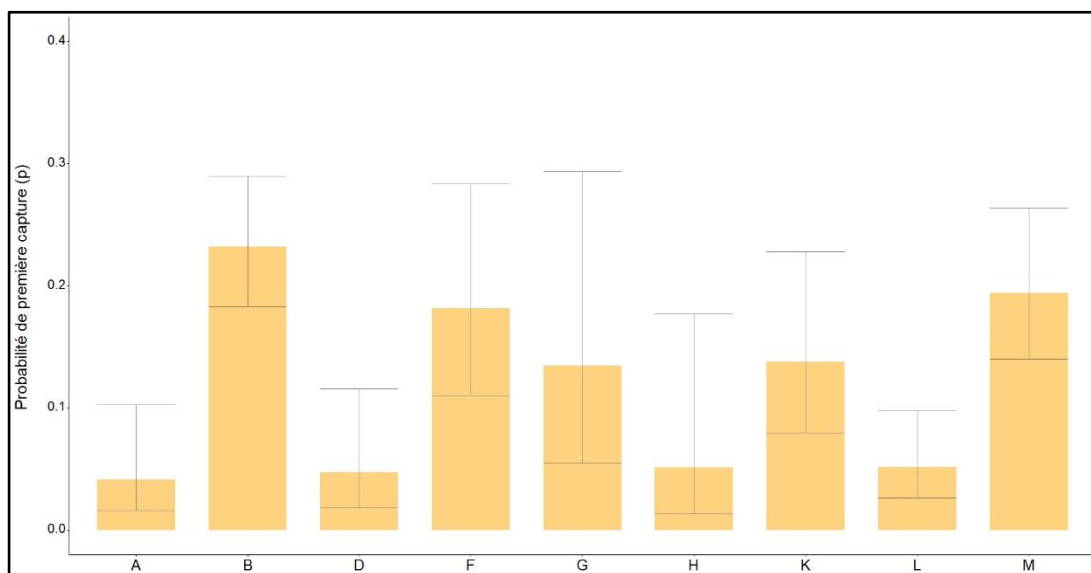


Figure 3.1 Probabilité de première capture en fonction des neuf sites avec recaptures à partir du modèle « p(site+shell) c() »



Dans la figure 3.1, les sites C, E, I et J ont été retirés des analyses en raison de l'absence de recapture qui empêche l'estimation des paramètres avec le meilleur modèle «  $p(\text{Site}+\text{Shell}) c()$  » (Tableau 3.1). L'intervalle de confiance à 95% a été rajouté dans la figure. On observe, dans la figure 3.1, que les neuf sites peuvent être divisés en deux catégories en fonction de la valeur de la probabilité de première capture ( $p$ ). La première catégorie a une probabilité de première capture ( $p$ ) autour de 0,048 et la deuxième catégorie a une probabilité autour de 0,176. Cette division de la probabilité de première capture semble être causée par la superficie du site et l'effort d'échantillonnage (Tableau 2.1). Un site avec une petite superficie obtient une probabilité de première capture plus grande qu'un site avec une grande superficie (Figure 3.1).

Suite à cette observation, nous avons décidé de construire un nouveau modèle en ajoutant la variable catégorique « Taille du site » qui peut prendre les valeurs « Petite » ou « Grande » (Tableau 3.3). Ceci permet d'estimer l'abondance des sites sans recapture de façon plus précise en estimant une probabilité de première capture ( $p$ ) et de recapture ( $c$ ) représentatives de leur taille. Ainsi, pour cette deuxième analyse, la covariable « Site » est remplacée par la covariable « Site\_size ». Les covariables « Taille de la carapace » et « Statut reproducteur » sont conservées dans les analyses. Un total de 30 modèles ont été formés et le meilleur modèle est sélectionné avec le critère d'AIC. Le meilleur modèle est «  $p(\text{Site\_size}+\text{Shell}) c()$  ». Les données d'abondance sont rassemblées dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 Superficie du site, probabilité de première capture (p), l'abondance estimée de la tortue mouchetée (AB), l'erreur standard (se), la limite inférieure de l'intervalle de confiance (lcl) et la limite supérieure (ucl) à partir du meilleur modèle « p(Site\_size+Shell) c() » pour les 13 sites échantillonnés en Outaouais en 2021-2022

Site	Superficie	p	AB	se	lcl	ucl
A	Grande	0,049	60,0	16,0	38,9	105,6
D	Grande	0,049	48,9	12,9	32,1	85,7
E	Grande	0,049	2,3	1,7	1,2	10,5
H	Grande	0,049	17,7	6,2	10,7	37,5
L	Grande	0,049	93,0	22,3	62,7	154,4
B	Petite	0,170	46,1	4,4	40,5	58,8
C	Petite	0,170	7,3	1,3	6,3	12,6
F	Petite	0,170	13,2	1,7	11,6	19,5
G	Petite	0,170	6,0	1,1	5,2	11,0
I	Petite	0,170	5,8	1,0	5,1	10,3
J	Petite	0,170	6,0	1,1	5,2	10,8
K	Petite	0,170	23,4	3,9	19,1	36,1
M	Petite	0,170	28,1	2,7	25,0	36,6
Outaouais			357,8		263,5	589,3

Cinq sites sont inclus dans la catégorie grande superficie et huit sites sont inclus dans la catégorie petite superficie. Tout d'abord, pour les sites avec aucune recapture comme C, E, I et J, le modèle estime une abondance plus réaliste. Par exemple, pour le site C, le modèle « p(Site+Shell) c() » ne permettait pas d'estimer une abondance, car le site a eu aucune recapture (Tableau 3.1), alors qu'avec le modèle « p(Site\_size+Shell) c() », on estime que le site C a 7,3 individus (Tableau 3.3). Ensuite, en additionnant l'abondance des 13 sites, nous avons obtenu une abondance totale de 357,8 tortues mouchetées, variant entre 263,5 (lcl) et 589,3 individus (ucl), pour l'ensemble des populations échantillonnées.

Tableau 3.4 Abondance estimée de la tortue mouchetée à partir du meilleur modèle (AB), le nombre de pièges installés par site (Pièges), la densité de pièges (Densité P., nombre de pièges/ ha) et la densité de tortues mouchetées (Densité T., nombre de tortues/ ha) pour chacun des 13 sites échantillonnés en Outaouais

Sites	AB	Pièges	Densité P.	Densité T.
A	60,0	30	0,5	0,9
B	46,1	30	0,9	1,4
C	7,3	24	3,6	1,1
D	48,9	30	0,4	0,7
E	2,3	30	0,8	0,1
F	13,2	30	1,1	0,5
G	6,0	30	2,7	0,6
H	17,7	30	0,6	0,4
I	5,8	20	1,9	0,6
J	6,0	10	2,9	1,7
K	23,4	24	3,4	3,3
L	93,0	30	0,7	2,3
M	28,1	6	5,5	25,8

Le site E a une grande superficie (Tableau 2.1, Tableau 3.3) et une seule tortue mouchetée a été capturée (Tableau 3.1). Nous avons installé entre 6 et 30 pièges en fonction de la grosseur du site. La densité de pièges varie entre 0,4 et 5,5 pièges/ ha avec une densité de pièges médiane de 1,2 pièges /ha. Pour ce qui est de la densité de la tortue mouchetée, les données varient entre 0,1 et 25,8 tortues mouchetées/ha avec une densité médiane de 0,9 tortue/ha.

Lors des analyses, trois covariables ont été sélectionnées, soit la taille de la carapace « Shell », la superficie du site « Site size » et le statut reproducteur « Mom », en fonction de leur potentiel effet sur la probabilité de première capture (p) et la probabilité de recapture (c). Pour déterminer si une covariable a un effet significatif, on regarde l'intervalle de confiance à 95% du paramètre dans le modèle. S'il comprend la valeur zéro, il n'y a pas d'effet significatif. Comme le statut reproducteur n'est pas présent

dans le meilleur modèle, son effet n'est pas significatif. Dans le tableau 3.5, nous avons regardé si les deux autres covariables présentes dans le meilleur modèle ont un effet sur la probabilité de première capture « p ».

Tableau 3.5 Effet des covariables sur « p » et « c » dans le meilleur modèle « p(Site\_size+Shell) c() » selon la valeur du paramètre (Beta), l'intervalle de confiance le plus petit (lcl) et le plus grand (ucl)

Covariables	Beta	lcl	ucl	Significatif
Superficie du site	1,374	0,875	1,873	Oui
Taille de la carapace	0,250	0,027	0,473	Oui

L'intervalle de confiance à 95% des deux covariables ne comprend pas zéro. Donc, ils ont tous les deux un effet significatif sur la probabilité de capture (p) pour une tortue mouchetée en Outaouais avec un poids de 0,468.

La taille de la carapace ayant un effet significatif sur la probabilité de première capture, nous avons utilisé la fonction « covariate.prediction » pour illustrer la relation entre les deux (Figure 3.2).

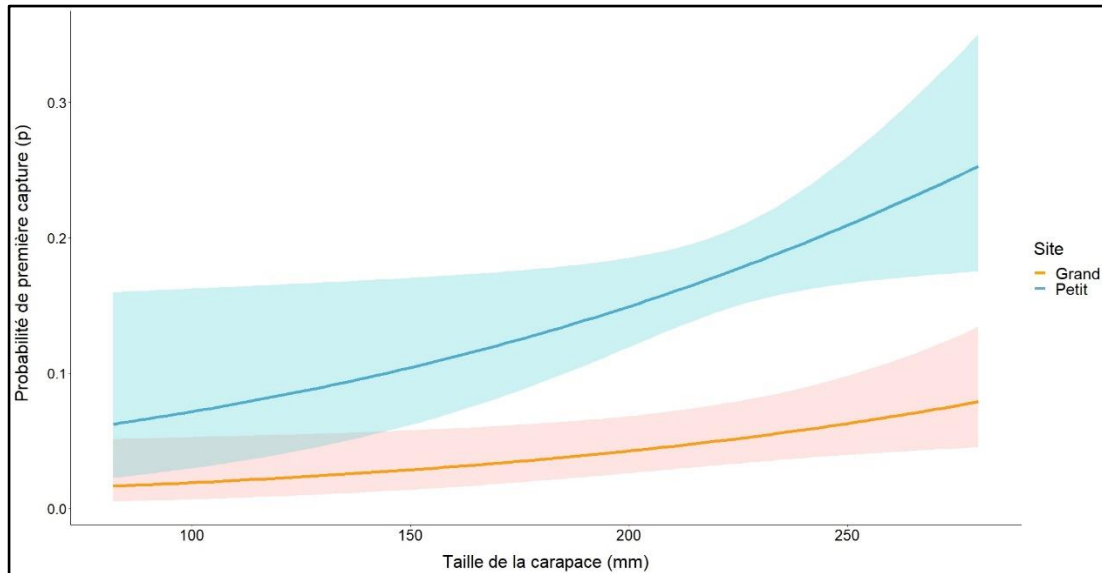


Figure 3.2 Prédiction de la probabilité de première capture en fonction de la taille de la carapace

La prédiction a été réalisée sur 100 données. On peut voir, dans la figure 3.2, que plus la tortue est grosse, plus la probabilité de première capture augmente. Ainsi, on capture plus facilement les grosses tortues mouchetées. Aussi, selon la superficie du site, la probabilité de première capture « p » change. On voit qu'une grosse tortue mouchetée dans un site avec une petite superficie sera plus facilement capturable que cette même tortue dans un grand site.

### 3.2 Estimation du sex-ratio

Après avoir réussi à estimer l'abondance de la tortue mouchetée, nous avons élargi nos analyses afin d'avoir une meilleure connaissance de l'état des populations de cette tortue en Outaouais. Plusieurs données, comme le sexe des individus capturés, ont été récoltées sur le terrain. Le sexe de ces individus nous renseigne sur le ratio des sexes dans chacun de nos sites échantillonnés.

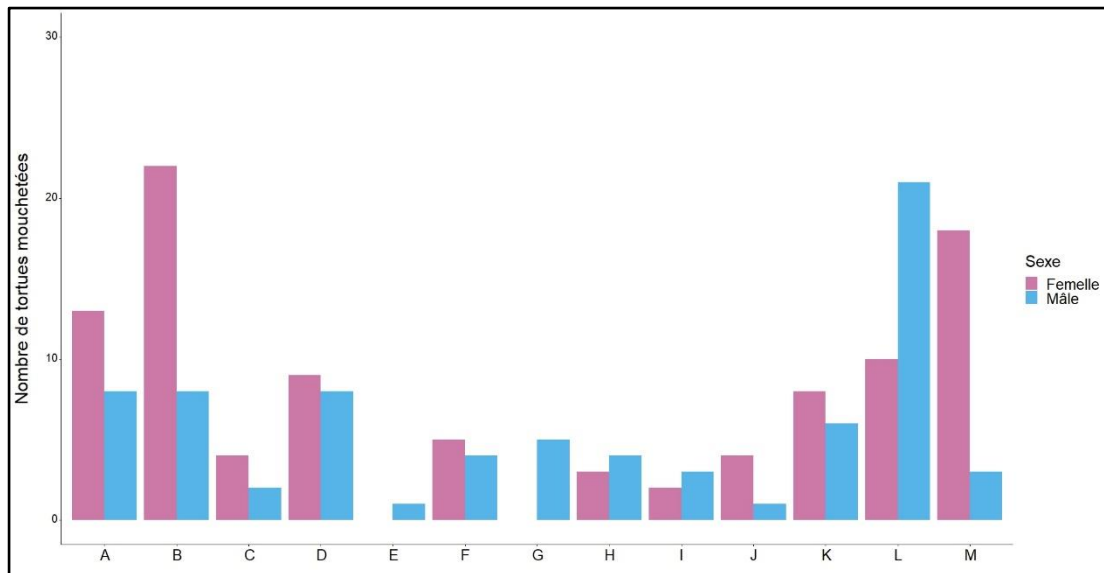


Figure 3.3 Ratio des sexes des 13 sites échantillonnés en Outaouais

La figure 3.3 illustre le nombre de tortues mouchetées mâles et femelles capturées dans chacun des 13 sites. Pour les sites E et G, aucune tortue mouchetée femelle n'a été capturée. On observe, en général, que davantage de tortues mouchetées femelles ont été capturées que de mâles dans nos sites. Au total, nous avons capturé 74 mâles et 98 femelles tortues mouchetées, ce qui donne un ratio 1 : 1,3 soit un mâle pour 1,3 femelle. Suite à cette observation, nous avons regardé s'il y avait une différence significative entre le nombre de mâles et de femelles dans nos sites en Outaouais. Le test de Wilcoxon pairé est ressorti non significatif ( $p = 0,2755$ ). Ainsi, les populations de tortues mouchetées en Outaouais ne s'écartent pas significativement d'un ratio d'un mâle pour une femelle.

### 3.3 Structure d'âge de la population

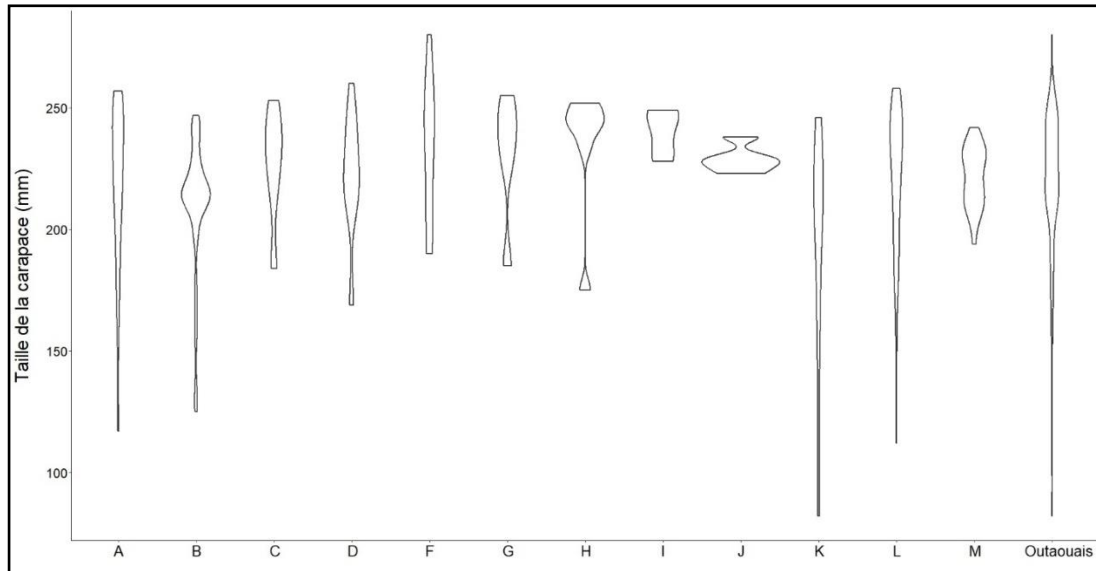


Figure 3.4 Distribution des tailles de carapace pour 12 sites échantillonnés et à travers l'Outaouais

Le site E a été retiré de l'analyse, car une seule tortue mouchetée a été capturée (Tableau 3.1). Dans la figure 3.4, on peut observer que la majorité des tortues mouchetées se situe entre une longueur de carapace de 200 à 250 millimètres. La moyenne est de 218,2 mm. La tortue mouchetée, avec la plus petite taille de carapace, a été capturée dans le site K et elle mesurait 82 mm. On peut voir qu'il y a davantage de tortues adultes capturées que de juvéniles. Au total, sur les 188 tortues mouchetées capturées, 12 sont des juvéniles ce qui représente 6 % de l'ensemble de nos captures et un ratio de 14,7 adultes : 1 juvénile.

### 3.4 Estimation de l'abondance avec l'ADNe

Afin d'observer la relation entre l'abondance estimée par la méthode CMR et l'abondance estimée avec la méthode ADNe, la figure 3.5 a été produite.

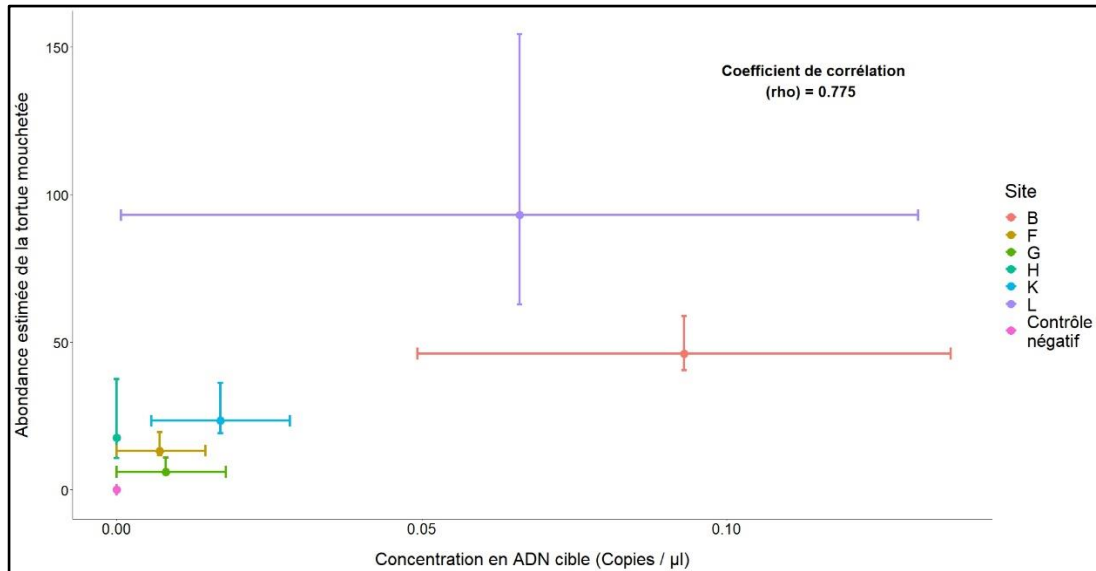


Figure 3.5 Relation entre l'abondance estimée à partir de la méthode CMR et la quantité d'ADN cible dans chacun des six sites sélectionnés en plus du coefficient de corrélation

Dans la figure 3.5, on peut voir une tendance vers l'augmentation. Lorsque la taille d'une population augmente, la concentration en ADN cible, dans le milieu, augmente. Le coefficient de corrélation a été calculé entre les deux méthodes d'échantillonnage et obtient un rho de 0,7748062. Les intervalles de confiance à 95% ont été rajoutés à la figure. On peut voir que certains sites ont des intervalles très larges qui parcourent presque en totalité la figure.



## CHAPITRE IV

### DISCUSSION

#### 4.1 Estimation de l'abondance

L'objectif principal, de cette maîtrise, est de mieux connaître l'état des populations de tortues mouchetées en Outaouais en commençant par connaître son abondance. Deux méthodes d'échantillonnages ont été utilisées soit la méthode Capture - Marquage - Recapture (CMR) et l'ADN environnemental (ADNe).

##### 4.1.1 CMR

Lors de l'analyse des données de captures, le critère d'Akaike a sélectionné le modèle «  $p(\text{Site\_size}+\text{Shell})c()$  » comme étant le meilleur modèle de Huggins pour interpréter la population de tortues mouchetées en Outaouais. Les covariables « Taille de la carapace » (Shell) et « Superficie du site » (Site size) expliquent le plus de variations dans nos 13 sites échantillonnés avec un poids de 0,468 (voir Annexe B, Tableau 3.5). Lors des deux sessions de terrain en 2021-2022, chacune des sessions ont potentiellement été biaisées puisqu'elles superposaient la période de reproduction de la tortue mouchetée. Nous avons donc testé si la sortie du milieu des femelles en âge de se reproduire (Statut reproducteur « Mom ») a impacté la probabilité de première capture ( $p$ ). Comme le statut reproducteur n'est pas présent dans le meilleur modèle (voir Annexe B), on peut en déduire que les déplacements des femelles pour aller

pondre n'ont pas d'effet sur la probabilité de première capture ( $p$ ). Cependant, la covariable est présente dans le deuxième modèle de la liste avec un poids de 0,195. Ainsi, nous avons regardé si la covariable a un effet significatif dans ce second modèle. L'intervalle de confiance à 95% du paramètre est de -0,474 à 0,277. Comme l'intervalle comprend zéro, cela indique que les femelles en âges de se reproduire n'ont pas d'effet significatif sur la probabilité de première capture ( $p$ ). L'échantillonnage n'est pas biaisé par la période de reproduction de la tortue mouchetée et, parmi les variables considérées, seules la taille du site et la taille de la carapace ont un effet significatif sur la probabilité de première capture ( $p$ ).

Un total de 188 tortues mouchetées ont été capturées, en Outaouais, durant l'été 2021-2022. La population totale est estimée à 357,8 individus. L'estimation de l'abondance de la tortue mouchetée dans chacun des 13 sites échantillonnés a été calculée en prenant en compte la superficie du site à partir du meilleur modèle de Huggins «  $p(\text{Site\_size} + \text{Shell}) c()$  ». La décision de construire un nouveau modèle en divisant les 13 sites échantillonnés selon la superficie du site soit « Petite » ou « Grande » a été prise pour deux raisons. Premièrement, l'estimation de l'abondance en fonction de la taille des sites permet d'estimer une abondance plus réaliste pour les sites avec aucune recapture. Deuxièmement, l'estimation de l'abondance pour les sites sans recapture est plus précise lorsqu'elle est basée sur la superficie du site, plutôt que d'estimer à l'échelle de tous les sites en Outaouais. Cependant, la division des 13 sites échantillonnés génère des estimations d'abondance précises pour les sites avec une petite superficie et moins précises pour ceux de grande superficie. L'intervalle de confiance de la probabilité de première capture ( $p$ ) semble varier fortement en fonction de l'effort de capture (Figure 3.1). Pour améliorer la précision des estimations, il serait pertinent de prendre en considération la superficie totale du site et d'y appliquer un effort d'échantillonnage et une densité de piège en conséquence. L'effort d'échantillonnage semble être insuffisant pour les grands sites et cela se reflète par un faible taux de recaptures et une petite

probabilité de première capture (Figure 3.1). Ainsi, adapter le nombre de pièges en fonction de la superficie du milieu pourrait améliorer l'estimation de la taille de la population. Selon le tableau 3.4, on a obtenu une densité de tortues variant entre 0,1 et 25,8 tortues mouchetées/ha avec une densité médiane de 0,9 tortue mouchetée/ha. Ainsi, pour bien couvrir l'entièreté du milieu et augmenter nos chances de capturer toutes les tortues disponibles dans le milieu, il devrait y avoir un minimum d'un piège par hectare. Selon nos résultats de terrain, la densité de pièges déployés varie entre 0,4 à 5,5 pièges/ha avec une densité médiane de 1,2 piège/ ha.

#### 4.1.2 ADNe

En écologie, on sait que la méthode ADNe est avantageuse pour détecter une espèce cryptique ou effectuer un inventaire d'espèces en comparaison aux méthodes traditionnelles (Akre et al., 2019; Ficetola et al., 2019). Cependant, son utilisation pour estimer l'abondance d'une population est récente sur des espèces comme des poissons, des amphibiens ou des reptiles (Akre et al., 2019). L'objectif secondaire, de cette maîtrise, est d'évaluer si la méthode d'échantillonnage ADN environnemental serait une approche plus performante, moins coûteuse et plus précise que la méthode CMR pour estimer la taille des populations de tortues mouchetées en Outaouais. Lors de l'échantillonnage, nous avons obtenu un taux de capture global de 0,06 tortue mouchetée par nuit de piège. Dans la littérature, la méthode CMR obtient un taux de capture de 0,05 tortue mouchetée par nuit de piège (Dubois et al., 2012; Reid et al., 2016) ce qui démontre l'immensité de l'effort d'échantillonnage requis pour récolter suffisamment de données. L'intérêt d'optimiser la prise de données pour une espèce cryptique comme la tortue mouchetée est de réduire le temps d'échantillonnage et les coûts sur le terrain.

La détection de l'ADNe en laboratoire est le plus souvent utilisée avec la méthode d'analyse PCR quantitative (qPCR) (Poitras & Houde, 2002). Les espèces cryptiques et difficiles à observer que les méthodes traditionnelles ont de la difficulté à détecter sont plus facilement suivies et détectées avec l'ADNe (Davy et al., 2015). Cependant, lorsqu'il est question d'échantillonner une espèce cryptique, difficile à observer et des populations peu abondantes comme c'est le cas chez les tortues d'eau douce, l'utilisation de la méthode qPCR devient moins efficace. Dans leur recherche sur la tortue des bois, Akre et al. (2019) ont détecté visuellement la tortue dans 17 des 37 sites échantillonnés. La méthode d'échantillonnage ADNe, avec la méthode qPCR, a détecté la tortue dans 16 des 37 sites. Selon eux, la faible abondance de la tortue des bois est la cause première du faux négatif. Une autre recherche n'a pu corrélérer la concentration en ADN et l'abondance pour une espèce de tortue en Europe (Raemy & Ursenbacher, 2018). Ainsi, l'utilisation de la méthode qPCR en laboratoire afin de détecter et d'estimer l'abondance de la population de tortue mouchetée en Outaouais, tout en sachant que l'espèce est peu abondante, cryptique et difficile à observer, sera difficilement applicable (Capo et al., 2020; Fortin & Côté, 2018; Tarof et al., 2021). Comme alternative, la technique de quantification par PCR digitale (dPCR) devient de plus en plus prometteuse et utilisée dans les recherches scientifiques (Capo et al., 2020; Doi et al., 2015; Huggett & Whale, 2013). La dPCR est une technique plus précise avec un taux de détection d'ADN supérieur et moins sensible aux inhibiteurs comparés à la qPCR (Doi et al., 2015; Huggett & Whale, 2013). Capo et al. (2020) ont utilisé la technique qPCR et dPCR afin de comparer la concentration en ADN capté selon cinq types de filtrations pour deux espèces de poissons. Une des conclusions est la recommandation d'utiliser la dPCR comme technique d'analyse en laboratoire pour sa résistance contre les inhibiteurs. Au vu de ces résultats, nous avons utilisé la dPCR pour analyser nos données et avons obtenu de bons résultats comme la concentration en ADN cible par site. Une analyse préliminaire menée dans notre laboratoire a montré une sensibilité de la dPCR 1000 fois supérieure à celle de la qPCR. Nous recommandons l'utilisation de la dPCR au lieu de la qPCR dans la détection et

l'estimation d'abondance d'espèces rares et peu abondantes avec l'ADNe pour sa précision, sa résistance aux inhibiteurs et son taux de détection d'ADN cible supérieur.

En raison d'un manque de temps en laboratoire ADNe, seuls six sites ont été analysés par dPCR. Un total de sept points de comparaison, soit six sites et un contrôle négatif, n'est pas suffisant pour tester statistiquement si le coefficient de corrélation entre l'abondance estimée par la méthode CMR et la concentration d'ADN cible par site est significatif. Afin d'estimer l'effort d'échantillonnage à déployer selon l'analyse statistique prévue, la règle du pouce ou « Rules of Thumb » propose un barème de données à récolter. Selon la règle du pouce, un minimum de 30 points de comparaison est nécessaire pour identifier une différence dans un groupe avec un niveau de puissance à 80% (VanVoorhis & Morgan, 2007). Pour évaluer la relation entre deux méthodes avec un test de corrélation, la règle du pouce indique un effectif d'environ 50 points (VanVoorhis & Morgan, 2007). Un échantillonnage de moins que 30 points de comparaison risque de faire face, lors des analyses, à un problème de puissance ou de représentativité du milieu. Ainsi, pour effectuer l'analyse comparative de nos deux méthodes d'échantillonnage, il serait nécessaire, premièrement, de calculer la concentration en ADN cible des sept sites échantillonnés à l'été 2021-2022 qui n'ont pas été analysés par dPCR dû au manque de temps avec la machine. Deuxièmement, il serait nécessaire d'échantillonner 37 sites supplémentaires en Outaouais afin d'obtenir une taille d'échantillonnage raisonnable de 50 points de comparaisons. L'analyse comparative est réalisable, selon les auteurs (Bujang & Baharum, 2016), avec un petit jeu de données soit 11 points de comparaison, mais il est nécessaire d'avoir un niveau de corrélation de 0,9 afin de détecter une relation (puissance à 80% et alpha à 0,05). Notre taille d'échantillonnage est de sept points de comparaison et nous avons obtenu un coefficient de corrélation entre l'abondance estimée et la concentration en ADN cible par site de 0,775. Malgré cela, on observe sur la figure 3.5 une corrélation positive

très encourageant pour la méthode ADNe et l'échantillonnage futur de la population de tortues mouchetées en Outaouais.

Lors de l'analyse de la figure 3.5, il est difficile de ne pas remarquer que l'intervalle de confiance de certains sites parcourt presque en totalité la figure. Afin d'augmenter la précision de l'analyse et la figure 3.5, il serait pertinent de diminuer les intervalles de confiance. Pour diminuer l'intervalle de confiance de l'abondance estimée de la tortue mouchetée à partir de la méthode CMR, il serait nécessaire de prendre en compte la superficie du site lors de l'analyse et d'appliquer un échantillonnage adapté sur le terrain (Tableau 3.3). Par exemple, le site L est un grand site avec de nombreuses captures (33 individus uniques) et peu de recaptures (8). L'effort d'échantillonnage est insuffisant pour la taille du site et cela se reflète avec de grandes incertitudes concernant le nombre de tortues mouchetées présent dans le milieu. Pour l'intervalle de confiance de la concentration en ADN cible par site, il varie en fonction du nombre de réactions positives. Chaque site est divisé en 22 réplicats et parmi les réplicats, certains seront positifs (présence d'ADN cible) et d'autres négatifs (absence d'ADN cible). La somme des réactions cause cette forte incertitude, car l'ADN de la tortue mouchetée peut être non détecté par sa faible concentration ou être absent dans un échantillon. Ainsi l'intervalle de confiance à l'échelle du site augmente si le site obtient peu de réactions positives sur la totalité. Comme nous travaillons avec une espèce qui libère peu de matériel génétique dans l'environnement étant donné sa peau recouverte d'écaille et sa carapace (Adams et al., 2019), il est difficile de détecter cette espèce dans chacun des échantillons d'un site (Fortin & Côté, 2018). Une analyse de plus en plus utilisée avec l'ADNe et qui aurait été pertinente dans ce projet de maîtrise est l'utilisation des modèles d'occupation (Beng & Corlett, 2020; Dorazio & Erickson, 2018; Furlan et al., 2016; Mazerolle et al., 2007; Souza et al., 2016; Strickland & Roberts, 2019). Les modèles d'occupation peuvent évaluer la concentration en ADN cible par site et le taux de dispersion de l'ADN dans un milieu pour ensuite évaluer l'efficacité d'une

méthode d'échantillonnage (Furlan et al., 2016). Les modèles d'occupation ont aussi été utilisés pour évaluer l'efficacité de la méthode ADNe pour détecter la présence de la tortue des bois dans l'état de la Virginie (Akre et al., 2019). Ils ont été utilisés pour comparer les résultats de présence de la tortue des bois, dans un milieu, entre la méthode ADNe et les méthodes traditionnelles. Suite à leur étude, les auteurs (Akre et al., 2019) recommandent la méthode ADNe comme outil de détection et de suivi de population pour son efficacité et son faible coût. Pour notre projet de maîtrise, les modèles d'occupation auraient permis de comparer les données de concentration d'ADN cible par site et l'abondance estimée par CMR pour obtenir une estimation de l'abondance de la tortue mouchetée par site plus robuste. L'acquisition de données sur la répartition géographique de la tortue mouchetée en Outaouais est aussi possible avec les modèles d'occupation si des données environnementales comme la superficie du milieu, le couvert forestier, le nombre de milieux humides disponible autour du milieu et l'âge du milieu sont récoltées sur le terrain. Ces données sont connues pour affecter la probabilité d'occupation de la tortue mouchetée dans un milieu (Fyson & Blouin-Demers, 2021). Ainsi, les modèles d'occupation auraient pu améliorer la figure 3.5 en réduisant l'intervalle de confiance de la concentration en ADN cible et en améliorant l'estimation d'abondance par site et globale. Cependant, ce type d'analyse n'a pas été effectué en raison d'un manque de temps et à un manque de données sur le terrain.

Ce projet de maîtrise permet l'avancement des connaissances et suggère que la méthode ADNe pourrait être un outil prometteur d'estimation d'abondance et de suivi de population d'espèces cryptiques, rares et difficiles à observer. L'ADNe est une technique moins invasive, moins coûteuse et démontrée comme très efficace pour échantillonner une espèce cryptique et rare comme la tortue mouchetée. Ces résultats sont encourageants pour l'échantillonnage des autres tortues du Québec, mais doivent être confirmés par l'analyse d'un plus grand nombre d'échantillons.

#### 4.1.3 Bilan de la population de tortues mouchetées en Outaouais

L'état de la population de tortues mouchetées préoccupe beaucoup par son statut « Menacé » au Québec et « En voie de disparition » au Canada (Canada, 2018). L'abondance est une donnée primordiale en conservation, car elle permet d'estimer le niveau de risque d'extinction d'une population et d'évaluer l'efficacité d'un plan de rétablissement (Mali et al., 2018). En Ontario, deux sous-populations de tortues mouchetées, au sud-ouest, ont chacune une population d'environ 700 à 800 individus adultes, alors que six autres sous-populations, le long des Grands Lacs et du Saint-Laurent, ont des populations d'environ 41 à 138 individus adultes (COSEPAC, 2016). Une autre sous-population, dans une aire protégée au sud-est de l'Ontario, a 85 individus adultes. Sur les mêmes sites, les populations de tortues peintes et de tortues serpentes sont largement plus grandes que celles de la tortue mouchetée (COSEPAC, 2016). En 2015, une étude d'impact sur la population de tortues mouchetées, à l'ouest d'Ottawa, a estimé la population à 93 individus adultes (Hasler et al., 2015). Cette même population proche d'Ottawa a été analysée pour étudier la viabilité et la structure de la population de tortues mouchetées suite à des développements urbains (Auge et al., 2024). La capture de 92 tortues mouchetées de 2010 à 2013, dont 21 tortues ont été équipées d'un GPS, a permis d'estimer la population à 81 individus en 2010. La même étude s'est répétée de 2017 à 2020 avec 36 tortues mouchetées capturées (31 tortues équipées d'un GPS) et ils ont pu observer un déclin drastique de la taille de la population à seulement 24 individus en 2020 (Auge et al., 2024). Ces résultats sont peu encourageants pour le futur des populations de tortues mouchetées en milieu urbain et reflètent peut-être une réalité déjà en cours ailleurs dans le Canada et aux États-Unis. Aux États-Unis, l'aire de répartition de la tortue mouchetée est beaucoup plus grande et son abondance varie grandement entre les états et les années. Au Michigan, la population comptait 561 individus avec une longueur de plastron supérieure à 100 mm (Gibbons, 1968), puis de 1975 à 1994, la population se maintenait entre 180 à 200



individus adultes (Congdon et al., 2001). Au Wisconsin, la population de tortue mouchetée a été estimée à 21 individus dans un étang du sanctuaire Petenwell (Ross, 1989). En 2016, une étude dans le sanctuaire de Sandhill, au Wisconsin, a capturé 309 individus (Reid et al., 2016). Au Massachusetts, une étude sur la population de tortues mouchetées, dans le refuge national « Great Meadow », de 1971 à 1973, estimait l'abondance à 135 individus avec une longueur de plastron supérieur à 110 mm (Graham & Doyle, 1977). En Illinois, un projet « Coup de pouce », pour augmenter la population de tortue mouchetée, a été implanté sachant que la population comptait seulement 60 individus adultes (Thompson et al., 2020). En général, les populations de tortues mouchetées varient entre dix et cent individus, mais la plus grande population se situe au Nebraska, dans le refuge national « Valentine » où, en 2004, la population excédait les 100 000 individus (King et al., 2021). Au sud-est du Minnesota, la deuxième plus grande population comptait 5 000 individus en 2003 (King et al., 2021). Bien que la majorité des informations sur la tortue mouchetée nous viennent des recherches effectuées aux États-Unis, l'estimation de l'abondance de la tortue mouchetée dans plusieurs états date de plusieurs années et elle n'a pas été calculée régulièrement pour évaluer l'état des populations. La diversité génétique est un enjeu important quand on travaille avec des petites populations. Sans catastrophe, une population de plus de 20 à 50 adultes a un risque d'extinction inférieur à 5% et une population supérieure à 50 à 110 adultes permet de conserver une diversité génétique au-dessus ou égale à 95% sur plus de 100 ans (King et al., 2021). Avec catastrophe, la population doit compter plus de 50 à 200 adultes afin d'avoir un risque d'extinction inférieur à 5% et plus de 110 à 200 adultes sont nécessaires pour conserver plus de 95% de la diversité génétique (King et al., 2021). Au Québec, la dernière estimation d'abondance, en Outaouais, a été réalisée en 2016 avec une population estimée sous les 200 individus (COSEPAC, 2016). Ce projet de maîtrise permet d'ajuster l'abondance de la tortue mouchetée puisqu'en 2021-2022, la population est estimée à 357,8 individus à partir de 13 sites échantillonnés (Tableau 3.3). La taille réelle de la population de l'Outaouais est certainement plus élevée, car il reste plusieurs milieux

dans la région que nous n'avons pas échantillonnés. En évaluant cette estimation d'abondance, la population est supérieure à une centaine d'individus, ce qui est un résultat encourageant pour l'espèce, mais la population est répartie sur une grande superficie. La densité de tortues mouchetées en Ontario est de 20 tortues/ha (Wijewardena et al., 2023). Au Wisconsin, le ratio est de 27,5 tortues/ha, au Missouri le ratio est de 55 tortues/ha et au Michigan il est de 8,8 à 10 tortues/ha (Ross, 1989). En Outaouais, nous avons obtenu une densité variant entre 0,1 et 25,8 tortues mouchetées/ha avec une densité médiane de 0,9 tortue/ha (Tableau 3.4). Il faut être prudent lors de l'interprétation de ces résultats de densité, car les critères de calcul de la superficie des milieux diffèrent d'un article à l'autre. Certains articles incluent les eaux profondes dans le calcul de la superficie du milieu alors que d'autres excluent les eaux à plus de cinq mètres (Wijewardena et al., 2023). Ainsi, en considérant l'abondance estimée à 357,8 individus et sachant que ce nombre est certainement inférieur à la réalité, la population a une abondance raisonnable en comparaison aux populations et sous-populations réparties à travers l'Ontario et les États-Unis. Cependant, la densité de tortues mouchetées est faible en comparaison avec les populations plus méridionales. Ce grand territoire pourrait probablement supporter davantage de tortues mouchetées, mais sachant que le Québec se situe à la limite nord de son aire de distribution, peut-être que cette contrainte impacte plus notre abondance qu'ailleurs. Nous en concluons que la population de tortues mouchetées en Outaouais, estimée à partir de 13 sites, se porte bien, mais il serait pertinent de continuer à la protéger, à augmenter le nombre de milieux échantillonnés et à obtenir une estimation d'abondance à l'échelle de l'Outaouais.

## 4.2 État de la population de tortues mouchetées en Outaouais

### 4.2.1 Sex-ratio

L'une des données récoltées sur le terrain est le sexe de l'individu. Selon la figure 3.3, nous avons attrapé davantage de tortues mouchetées femelles que de mâles dans nos 13 sites soit un ratio 1,3 : 1. Un test de Wilcoxon pairé a été réalisé afin de tester cette différence, et il conclut que le ratio de nos populations n'est pas différent de 1 : 1. Une population avec plus de femelles a déjà été observée et analysée au Nebraska (Ruane et al., 2008). Selon cette étude, le biais vers davantage de femelles viendrait que les femelles gravides sélectionnent les sites les plus chauds pour pondre leurs œufs. On sait que le sexe de la tortue mouchetée est déterminé en fonction de la température du nid soit une température de 26,5°C produit que des mâles, une température de 31°C produit que des femelles et une température d'environ 29°C produit un ratio 1 : 1 (Gutzke & Packard, 1987). À l'inverse, une population avec davantage de mâles est corrélée avec la densité de route autour du milieu, car les femelles, en déplacement pour trouver un site de ponte, se font plus fréquemment tuer (Reid & Peery, 2014). Lorsque le sex-ratio d'une population est déséquilibré, il peut y avoir des avantages et des inconvénients associés. On sait que la viabilité et le maintien d'une population de tortue reposent sur la survie des adultes reproducteurs, mais avant tout sur les femelles (Congdon et al., 2001). Une tendance vers plus de femelles que de mâles dans nos milieux serait bien pour la survie de la population. L'impact de la mortalité routière sur nos femelles reproductrices serait moindre sachant leur grand nombre dans la population même si l'impact serait toujours présent et néfaste. Cependant, d'un autre côté, un débalancement du sex-ratio est souvent suivi d'une perte de diversité génétique (Reid & Peery, 2014). Il serait intéressant d'augmenter le nombre de sites échantillonnés avec la méthode CMR et d'évaluer si cette tendance vers plus de tortues mouchetées femelles en Outaouais est perçue à nouveau et si elle devient significative.

#### 4.2.2 Les juvéniles

Le recrutement chez les tortues se définit par le passage des juvéniles au groupe des adultes. On sait que la stratégie de survie de la tortue mouchetée repose sur un haut taux de survie des adultes, une maturité reproductive tardive (environ 20 ans) et peu de descendants par année (Congdon et al., 2001; King et al., 2021). Le recrutement est essentiel pour garder une population de tortue viable dans le temps. Sans recrutement, la population vieillit et se dirige vers une extinction certaine. Plusieurs facteurs peuvent affecter le recrutement, soit la forte prédation des nids, le développement urbain ou la mortalité routière des juvéniles (King et al., 2021). La mortalité dans les nids est très forte avec un taux de prédation de 90% (Thompson et al., 2020) en plus d'avoir une mortalité des juvéniles de 86,8% la première année de vie (King et al., 2021). Durant la période de ponte, les ratons laveurs sont souvent présents sur les sites de ponte à patrouiller et détruire la majorité des nids, mais aussi à manger les œufs directement déposés dans le nid par une femelle qui pond (Avery et al., 2000). Le raton laveur est le principal prédateur des nids de tortues (Thompson et al., 2020). La prédation des nids par les ratons laveurs est normale, mais l'augmentation des populations de ratons laveurs, influencée par la présence des activités humaines, accentue la prédation et la mortalité dans les nids (Reid et al., 2016). La forte prédation des ratons laveurs peut provoquer une mortalité de presque 100% des œufs en plus de causer des dommages aux femelles (Thompson et al., 2020). Les attaques sur les tortues femelles sont majoritairement non dangereuses (retournée sur le dos), mais elles peuvent être parfois graves pour la survie de la tortue (une patte arrachée) ou fatale (une tortue éviscérée ou sans tête) (Avery et al., 2000). Le contrôle des populations de ratons laveurs a un impact direct positif sur le taux de succès des nids (Thompson et al., 2020).

Selon la figure 3.4 qui illustre la distribution des tailles de carapace, la population de tortues mouchetées en Outaouais suit la tendance de la littérature où nous avons

beaucoup plus d'adultes que de juvéniles. Au Québec, le rapport moyen est de 4,9 adultes : 1 juvénile (COSEPAC, 2016). Lors de nos sessions de capture en 2021-2022, seulement 6% des captures étaient des tortues mouchetées juvéniles soit un ratio de 14,7 adultes : 1 juvénile. En Nouvelle-Écosse, le rapport adulte : juvénile en nature est en moyenne 2,2 adultes : 1 juvénile, sauf lorsqu'on considère les juvéniles relâchés des programmes d'élevage où le rapport devient 1 adulte : 2,2 juvéniles (COSEPAC, 2016). En Ontario, même constat où le rapport tend vers davantage d'adultes dans la nature que de juvéniles. La figure 3.2, qui illustre une prédiction de la probabilité de première capture en fonction de la taille de la carapace de la tortue, nous démontre clairement qu'il est plus facile d'attraper une grosse tortue mouchetée qu'une petite tortue. Nos résultats indiquent un ratio encore plus marqué vers davantage d'adultes, mais cela suit la stratégie évolutive de la tortue mouchetée où peu de descendants sont produits et survivent jusqu'à l'âge adulte. Cependant, depuis plusieurs années, les scientifiques avancent un manque réel de juvéniles dans la nature qui impacte grandement le recrutement (Reid et al., 2016; Ross, 1989; Starking-Szymanski et al., 2018; Thompson et al., 2020). Un manque de juvénile est détecté en Ontario et aux États-Unis. Est-ce que la population de tortues mouchetées au Québec présente la même situation ? Deux hypothèses peuvent être proposées soit :

1. Les juvéniles sont présents, mais ils sont difficilement capturés avec la méthode CMR
2. Un manque de juvéniles se fait ressentir au Québec

Concernant la première hypothèse ci-dessus, trois possibilités pourraient expliquer le faible taux de capture de tortues mouchetées juvéniles :

1. L'habitat : La première possibilité est que les tortues mouchetées juvéniles occupent un milieu différent des adultes. Une étude a testé différents habitats et

évalué la préférence chez les tortues mouchetées juvéniles d'un programme d'élevage, libérés dans la nature (Starking-Szymanski et al., 2018). Ils ont observé que les juvéniles parcourent de grandes distances s'ils sont libérés en eau libre et priorisent des habitats comprenant une végétation dense et flottante avec la présence de huttes de rats musqués et de quenouilles. Ainsi, le type de végétation et la profondeur de l'eau sont des facteurs qui influencent grandement la distance que les juvéniles parcourent à la suite de leur remise en liberté. Cela nous indique les habitats qu'ils fréquentent (Starking-Szymanski et al., 2018). Les tortues mouchetées adultes préfèrent le même type d'habitat avec une végétation dense et submergée, préfèrent des eaux peu profondes (1 à 110 cm) et la présence de huttes de castors ou de rats musqués (Hartwig & Kiviat, 2007; Hasler et al., 2015; Starking-Szymanski et al., 2018). Ainsi, les adultes et les juvéniles de la tortue mouchetée semblent sélectionner des habitats similaires.

2. L'alimentation : La deuxième possibilité est l'alimentation. Lors des séances de capture, nous avons utilisé des conserves de sardines pour attirer les tortues mouchetées. Chez certaines espèces de tortues, comme la tortue peinte, l'alimentation change du stade juvénile à l'âge adulte (Kofron & Schreiber, 1985). Les tortues mouchetées adultes se nourrissent principalement des macro-invertébrés présents dans la végétation flottante, submergée et parmi les algues filamenteuses (Millar & Blouin-Demers, 2011). En Outaouais, les escargots aquatiques constituent la principale source de nourriture des tortues mouchetées en raison de leur forte présence dans nos milieux (St-Hilaire et al., 2003). Pour les juvéniles, il s'avère qu'ils consomment le même type de nourriture que les adultes (Rowe, 1992a), mais peu de recherches ont évalué l'alimentation des tortues mouchetées juvéniles.

3. Le type de piège : La troisième possibilité serait que les tortues mouchetées juvéniles peuvent s'échapper en passant à travers les mailles du piège. Des pièges en mailles à trois anneaux de métal sont utilisés. La maille mesure 1,5 pouce étirée ou 38,1 mm et une carapace de tortue mouchetée nouveau-née mesure en moyenne 36,3 mm (Wijewardena et al., 2023). Le taux de croissance, chez la tortue mouchetée, est très rapide la première année et diminue graduellement jusqu'à l'âge de quatre ans où il se stabilise (Rowe, 1992b). Ainsi, il est concevable de croire que des individus d'un an aient réussi à passer entre les mailles du piège, mais peu probable pour des individus de deux ans et plus. Cependant, pour des espèces de tortues comme la tortue serpentine et la tortue peinte, nous avons réussi à attraper des bébés de la saison passée avec ces mêmes pièges. Lors de la séance de capture, la plus petite tortue mouchetée capturée avait une longueur de carapace de 82 millimètres. On estime qu'elle aurait environ cinq ans (communication personnelle de Rachelle Fortier, Zoo de Toronto). Donc, il semble que le type de piège ne serait pas en cause, mais le manque de données fait qu'on ne peut pas écarter la possibilité que les juvéniles soient capables de s'échapper des pièges.

Ainsi, le fait que nous avons attrapé 12 juvéniles sur les 188 tortues mouchetées capturées en Outaouais, en 2021-2022, serait possiblement dû à l'alimentation ou le type de piège utilisé. Le manque d'informations ne nous permet pas d'écarter les deux hypothèses, mais un manque réel de juvéniles dans la nature serait aussi une hypothèse plausible.

Il serait intéressant d'évaluer s'il y a un réel manque de juvéniles au Québec. La figure 3.4, qui illustre la distribution des tailles de carapace, serait un bon outil pour évaluer le recrutement chez la tortue mouchetée. Présentement, la taille moyenne d'une

carapace est de 218,2 millimètres. Ainsi, pour évaluer le recrutement, il serait pertinent d'échantillonner la population tous les cinq ans. Si, les tailles de carapaces des tortues mouchetées capturées dans un site restent inchangées ou diminuent, cela indiquerait un bon recrutement au sein de cette population. Si les tailles de carapaces augmentent, cela indique que la population vieillit et qu'un manque de recrutement se fait sentir. Ce deuxième scénario est à éviter, car notre espèce, qui est « Menacé » au Québec et « En voie de disparition » au Canada, se dirige vers une extinction certaine si le recrutement des juvéniles n'est pas rectifié. Si tel est le cas, un programme d'élevage de jeunes tortues mouchetées qu'on nomme Projet « Coup de pouce » ou « Headstarting » en anglais serait une solution à envisager.

#### 4.2.3 Projet « Coup de pouce »

La méthode « Coup de pouce » est une solution souvent utilisée pour augmenter l'abondance d'espèces menacées ou vulnérables (Starking-Szymanski et al., 2018) et chez des espèces où la mortalité en bas âge est très élevée (King et al., 2021). On connaît très bien le programme chez les tortues marines où l'on voit des milliers de juvéniles libérés sur des plages. En Illinois, les chercheurs Thompson et al. (2020) ont testé l'efficacité de collecter des œufs de tortues mouchetées afin d'augmenter la taille des populations. Le projet s'est effectué sur une période de 21 ans où, chaque année, des juvéniles âgés entre neuf et dix mois ont été remis en liberté au mois de mai, soit un total de 1400 individus (Thompson et al., 2020). Leurs résultats démontrent un bon taux de survie et de croissance chez les juvéniles remis en liberté, une augmentation du nombre d'adultes reproducteurs et une modification dans la distribution des tailles de carapaces dans la population (Thompson et al., 2020). En Ontario, un programme « Coup de pouce » a démarré au Zoo de Toronto en 2012. Le zoo et des partenaires collectent les œufs dans la nature et les élèvent jusqu'à l'âge de deux ans (Wijewardena et al., 2023). Une tortue mouchetée de deux ans, élevée en captivité, a une taille



similaire à une tortue mouchetée sauvage d'environ quatre à six ans (communication personnelle de Rachelle Fortier, Zoo de Toronto). Les résultats sont encourageant, car le programme augmente l'abondance des populations de tortues mouchetées, ajuste le sex-ratio dans la nature et obtient un taux de survie élevée pour les juvéniles remis en liberté (Wijewardena et al., 2023). Ainsi, une tortue mouchetée née en captivité et libérée en nature bénéficiera de paramètres de début de vie favorable dû à une croissance accélérée.

Au vu du succès du programme aux États-Unis et en Ontario et la possibilité d'avoir un manque de juvénile au Québec, il serait pertinent d'implanter un projet « Coup de pouce » en Outaouais. Il est évident que le programme améliore l'abondance et le recrutement des tortues mouchetées.

## CONCLUSION

À la fin de cette maîtrise, nous avons pu estimer l'abondance de la population de tortues mouchetées en Outaouais à 357,8 individus à partir des modèles de Huggins. Seules les covariables « Taille de la carapace » et « Superficie du site » influencent significativement la probabilité de première capture ( $p$ ) de la tortue mouchetée. L'état de la population démontre un sex-ratio balancé, même si nous avons capturé davantage de femelles que de mâles. Nous avons aussi constaté et démontré une abondance d'adultes et peu de juvéniles dans notre population avec la distribution des tailles de carapaces qui se situe en moyenne entre 200 et 250 millimètres. Un manque de juvéniles dans la nature n'est pas écarté, car il semble y avoir de plus en plus de données aux États-Unis et en Ontario qui démontrent ce phénomène, mais les données récoltées lors des séances de capture ne permettent pas d'évaluer la population en Outaouais. Comme solution, les projets « Coup de pouce » semblent être une idée intéressante pour le manque de juvéniles chez les tortues mouchetées et un succès pour augmenter l'abondance des populations de tortues. Enfin, les problèmes rencontrés en laboratoire nous ont limité à estimer une concentration en ADN cible pour seulement six sites. Une corrélation positive entre l'abondance estimée à partir des méthodes CMR et la concentration d'ADN cible par site a été observée, mais n'a pas pu être testée en raison du faible nombre de points. Cette découverte est encourageante pour l'échantillonnage futur de la tortue mouchetée ou d'espèces aquatiques cryptiques, rares et difficiles à échantillonner. En conclusion, ce projet de maîtrise a permis de mieux connaître l'état des populations de la tortue mouchetée en Outaouais et mis en lumière un besoin urgent d'évaluer un possible manque de juvéniles dans nos populations. Cette maîtrise a aussi démontré l'aspect prometteur de la méthode ADNe comme outil d'estimation

d'abondance de la tortue mouchetée même s'il est nécessaire de continuer la recherche pour confirmer les résultats préliminaires obtenus.

## ANNEXE A

### Liste des 30 modèles construits dans le logiciel R

Modèles	Descriptions
p(~1)c(~1)	La probabilité de capture et de recapture reste constante dans le temps.
p(~1)c()	La probabilité de capture reste constante dans le temps et partage les mêmes valeurs qu'avec la probabilité de recapture. $p = c$
p(~Shell.0)c(~1)	La probabilité de capture varie selon la taille de la carapace et la probabilité de recapture reste constante dans le temps.
p(~1)c(~Shell.0)	La probabilité de capture reste constante dans le temps et la probabilité de recapture varie en fonction de la taille de la carapace.
p(~Shell.0)c(~Shell.0)	La probabilité de capture et de recapture varient en fonction de la taille de la carapace.
p(~Shell.0)c()	La probabilité de capture varie en fonction de la taille de la carapace et partage les mêmes valeurs qu'avec la probabilité de recapture. $P=c$
p(~Mom.bin)c(~1)	La probabilité de capture varie en fonction que c'est une femelle reproductrice ou non et la probabilité de recapture reste constante dans le temps.
p(~1)c(~Mom.bin)	La probabilité de capture reste constante dans le temps et la probabilité de recapture varient en fonction que c'est une femelle reproductrice ou non.
p(~Mom.bin)c(~Mom.bin)	La probabilité de capture et de recapture varie en fonction que c'est une femelle reproductrice ou non.
p(~Mom.bin)c()	La probabilité de capture varie en fonction que c'est une femelle reproductrice ou non et partage les mêmes valeurs qu'avec la probabilité de recapture. $P=c$
p(~Site_size)c(~1)	La probabilité de capture varie en fonction de la grosseur du site, petit ou grand milieu, et la probabilité de recapture reste constante dans le temps.
p(~1)c(~Site_size)	La probabilité de capture reste constante dans le temps et la probabilité de recapture varie en fonction de la grosseur du site, petit ou grand milieu.
p(~Site_size)c(~Site_size)	La probabilité de capture et de recapture varie en fonction de la grosseur du site, petit ou grand milieu.

$p(\sim\text{Site\_size})c()$		La probabilité de capture varie en fonction de la grosseur du site, petit ou grand milieu, et partage les mêmes valeurs qu'avec la probabilité de recapture. $P=c$
$p(\sim\text{Mom.bin} + \text{Shell.0})c(\sim 1)$		La probabilité de capture varie en fonction que c'est une femelle reproductrice ou non et la taille de la carapace alors que la probabilité de recapture reste constante dans le temps.
$p(\sim 1)c(\sim\text{Mom.bin} + \text{Shell.0})$		La probabilité de capture reste constante dans le temps alors que la probabilité de recapture varie en fonction que c'est une femelle reproductrice ou non et la taille de la carapace.
$p(\sim\text{Mom.bin} + \text{Shell.0})c(\sim\text{Mom.bin} + \text{Shell.0})$	+	La probabilité de capture et de recapture varie en fonction que c'est une femelle reproductrice ou non et la taille de la carapace.
$p(\sim\text{Mom.bin} + \text{Shell.0})c()$		La probabilité de capture varie en fonction que c'est une femelle reproductrice ou non et la taille de la carapace tout en partageant ses mêmes valeurs qu'avec la probabilité de recapture.
$p(\sim\text{Mom.bin} + \text{Site\_size})c(\sim 1)$		La probabilité de capture varie en fonction que c'est une femelle reproductrice ou non et la grosseur du site alors que la probabilité de recapture reste constante dans le temps.
$p(\sim 1)c(\sim\text{Mom.bin} + \text{Site\_size})$		La probabilité de capture reste constante dans le temps alors que la probabilité de recapture varie en fonction que c'est une femelle reproductrice ou non et la grosseur du site.
$p(\sim\text{Mom.bin} + \text{Site\_size})c(\sim\text{Mom.bin} + \text{Site\_size})$	+	La probabilité de capture et de recapture varie en fonction que c'est une femelle reproductrice ou non et la grosseur du site.
$p(\sim\text{Mom.bin} + \text{Site\_size})c()$		La probabilité de capture varie en fonction que c'est une femelle reproductrice ou non et la grosseur du site tout en partageant ses mêmes valeurs qu'avec la probabilité de recapture. $P=c$
$p(\sim\text{Site\_size} + \text{Shell.0})c(\sim 1)$		La probabilité de capture varie en fonction de la grosseur du site et de la taille de la carapace alors que la probabilité de recapture reste constante dans le temps.
$p(\sim 1)c(\sim\text{Site\_size} + \text{Shell.0})$		La probabilité de capture reste constante dans le temps alors que la probabilité de recapture varie en fonction de la grosseur du site et de la taille de la carapace.
$p(\sim\text{Site\_size} + \text{Shell.0})c(\sim\text{Site\_size} + \text{Shell.0})$	+	La probabilité de capture et de recapture varie en fonction de la grosseur du site et de la taille de la carapace.
$p(\sim\text{Site\_size} + \text{Shell.0})c()$		La probabilité de capture varie en fonction de la grosseur du site et de la taille de la carapace tout en

	partageant ses mêmes valeurs qu'avec la probabilité de recapture. $P=c$
$p(\sim \text{Mom.bin} + \text{Site\_size} + \text{Shell.0})c(\sim 1)$	La probabilité de capture varie en fonction que c'est une femelle reproductrice ou non, la grosseur du site et la taille de la carapace alors que la probabilité de recapture reste constante dans le temps.
$p(\sim 1)c(\sim \text{Mom.bin} + \text{Site\_size} + \text{Shell.0})$	La probabilité de capture reste constante dans le temps alors que la probabilité de recapture varie en fonction que c'est une femelle reproductrice ou non, la grosseur du site et la taille de la carapace.
$p(\sim \text{Mom.bin} + \text{Site\_size} + \text{Shell.0})c(\sim \text{Mom.bin} + \text{Site\_size} + \text{Shell.0})$	La probabilité de capture et de recapture varie en fonction que c'est une femelle reproductrice ou non, la grosseur du site et la taille de la carapace.
$p(\sim \text{Mom.bin} + \text{Site\_size} + \text{Shell.0})c()$	La probabilité de capture varie en fonction que c'est une femelle reproductrice ou non, la grosseur du site et la taille de la carapace tout en partageant ses mêmes valeurs qu'avec la probabilité de recapture. $P=c$

## ANNEXE B

Classement des 30 modèles construits selon le critère d'AICc

p	c	Modèles	AICc	DeltaAICc	Poids	Deviance
~Site_Size + Shell,0		p(~Site_Size + Shell,0)c()	1456,8	0,0	0,5	1450,8
~Mom,bin + Shell,0 + Site_Size		p(~Mom,bin + Shell,0 + Site_Size)c()	1458,5	1,7	0,2	1450,5
~Site_Size + Shell,0	~Site_Size + Shell,0	p(~Site_Size + Shell,0)c(~Site_Size + Shell,0)	1459,9	3,2	0,1	1447,9
~Site_Size		p(~Site_Size)c()	1460,2	3,4	0,1	1374,9
~Mom,bin + Shell,0 + Site_Size	~Mom,bin + Shell,0 + Site_Size	p(~Mom,bin + Shell,0 + Site_Size)c(~Mom,bin + Shell,0 + Site_Size)	1460,4	3,6	0,1	1444,3
~Mom,bin + Site_Size		p(~Mom,bin + Site_Size)c()	1461,6	4,8	4,19E-02	1455,6
~Site_Size	~Site_Size	p(~Site_Size)c(~Site_Size)	1463,9	7,1	1,37E-02	1374,5
~Mom,bin + Site_Size	~Mom,bin + Site_Size	p(~Mom,bin + Site_Size)c(~Mom,bin + Site_Size)	1464,2	7,5	1,12E-02	1452,2
~1	~Site_Size + Shell,0	p(~1)c(~Site_Size + Shell,0)	1464,6	7,8	9,44E-03	1456,6
~1	~Mom,bin + Shell,0 + Site_Size	p(~1)c(~Mom,bin + Shell,0 + Site_Size)	1466,6	9,8	3,53E-03	1456,5
~1	~Site_Size	p(~1)c(~Site_Size)	1469,8	13,0	7,01E-04	1382,5
~1	~Mom,bin + Site_Size	p(~1)c(~Mom,bin + Site_Size)	1471,8	15,0	2,57E-04	1463,8
~Mom,bin + Site_Size	~1	p(~Mom,bin + Site_Size)c(~1)	1489,0	32,2	4,83E-08	1480,9

~Mom,bin + Shell,0 + Site_Size	~1	p(~Mom,bin + Shell,0 + Site_Size)c(~1)	1490,4	33,6	2,40E-08	1480,3
~Site_Size	~1	p(~Site_Size)c(~1)	1490,6	33,8	2,14E-08	1403,3
~Site_Size + Shell,0	~1	p(~Site_Size + Shell,0)c(~1)	1491,9	35,1	1,12E-08	1483,8
~Shell,0		p(~Shell,0)c()	1493,5	36,7	4,97E-09	1489,5
~1	~Shell,0	p(~1)c(~Shell,0)	1494,4	37,7	3,12E-09	1488,4
~1		p(~1)c()	1494,7	38,0	2,68E-09	1411,4
~Mom,bin + Shell,0		p(~Mom,bin + Shell,0)c()	1495,1	38,4	2,19E-09	1489,1
~1	~Mom,bin + Shell,0	p(~1)c(~Mom,bin + Shell,0)	1495,5	38,7	1,81E-09	1487,5
~Shell,0	~Shell,0	p(~Shell,0)c(~Shell,0)	1496,4	39,6	1,17E-09	1488,4
~1	~1	p(~1)c(~1)	1496,5	39,7	1,10E-09	1411,2
~Mom,bin		p(~Mom,bin)c()	1496,7	39,9	1,02E-09	1492,7
~Mom,bin	~1	p(~Mom,bin)c(~1)	1498,0	41,2	5,32E-10	1492,0
~1	~Mom,bin	p(~1)c(~Mom,bin)	1498,2	41,4	4,84E-10	1492,1
~Shell,0	~1	p(~Shell,0)c(~1)	1498,5	41,7	4,14E-10	1492,5
~Mom,bin + Shell,0	~Mom,bin + Shell,0	p(~Mom,bin + Shell,0)c(~Mom,bin + Shell,0)	1498,9	42,1	3,38E-10	1486,8
~Mom,bin	~Mom,bin	p(~Mom,bin)c(~Mom,bin)	1499,6	42,8	2,34E-10	1491,6
~Mom,bin + Shell,0	~1	p(~Mom,bin + Shell,0)c(~1)	1499,9	43,1	2,07E-10	1491,8



## BIBLIOGRAPHIE

- Adams, C. I. M., Hoekstra, L. A., Muell, M. R., & Janzen, F. J. (2019). A Brief Review of Non-Avian Reptile Environmental DNA (eDNA), with a Case Study of Painted Turtle (*Chrysemys picta*) eDNA Under Field Conditions. *Diversity*, *11*(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/d11040050>
- Akre, T. S., Parker, L. D., Ruther, E., Maldonado, J. E., Lemmon, L., & McInerney, N. R. (2019). Concurrent visual encounter sampling validates eDNA selectivity and sensitivity for the endangered wood turtle (*Glyptemys insculpta*). *PLOS ONE*, *14*(4), Article 4. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215586>
- Auge, A. C., Blouin-Demers, G., Hasler, C. T., & Murray, D. L. (2024). Demographic evidence that development is not compatible with sustainability in semi-urban freshwater turtles. *Animal Conservation*, *27*(2), 253-266.
- Avery, H. W., Van Loben Sels, R. C., & Tinkle, D. W. (2000). Nesting ecology and embryo mortality : Implications for hatchling success and demography of Blanding's turtles (*Emydoidea blandingii*). *Chelonian Conservation and Biology*, *3*(4), 569-579.
- Beaudry, F., Demaynadier, P. G., & Hunter Jr, M. L. (2010). Identifying Hot Moments in Road-Mortality Risk for Freshwater Turtles. *The Journal of Wildlife Management*, *74*(1), 152-159. <https://doi.org/10.2193/2008-370>
- Beng, K. C., & Corlett, R. T. (2020). Applications of environmental DNA (eDNA) in ecology and conservation : Opportunities, challenges and prospects. *Biodiversity and Conservation*, *29*(7), Article 7. <https://doi.org/10.1007/s10531-020-01980-0>

- Breton, S., & Dufresne, F. (with Société de la faune et des parcs du Québec). (2003). *Validation des marqueurs microsatellites pour l'élaboration d'un protocole de marquage génétique chez la population d'ours noir (Ursus americanus) de la Réserve faunique des Laurentides*. Société de la faune et des parcs du Québec, Direction du développement de la faune.
- Bujang, M. A., & Baharum, N. (2016). Sample Size Guideline for Correlation Analysis. *World Journal of Social Science Research*, 3(1), 37. <https://doi.org/10.22158/wjssr.v3n1p37>
- Canada, E. and C. C. (2018, décembre 20). *Blanding's Turtle (Emydoidea blandingii) : Recovery strategy 2018*. Gouvernement Du Canada. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/species-risk-public-registry/recovery-strategies/blandings-turtle-2018.html>
- Capo, E., Spong, G., Königsson, H., & Byström, P. (2020). Effects of filtration methods and water volume on the quantification of brown trout (*Salmo trutta*) and Arctic char (*Salvelinus alpinus*) eDNA concentrations via droplet digital PCR. *Environmental DNA*, 2(2), Article 2. <https://doi.org/10.1002/edn3.52>
- Ceballos, G., Ehrlich, P. R., Barnosky, A. D., García, A., Pringle, R. M., & Palmer, T. M. (2015). Accelerated modern human-induced species losses : Entering the sixth mass extinction. *Science Advances*, 1(5), Article 5. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400253>
- Congdon, J. D., Nagle, R. D., Kinney, O. M., & van Loben Sels, R. C. (2001). Hypotheses of aging in a long-lived vertebrate, Blanding's turtle (*Emydoidea blandingii*). *Experimental Gerontology*, 36(4), Article 4. [https://doi.org/10.1016/S0531-5565\(00\)00242-4](https://doi.org/10.1016/S0531-5565(00)00242-4)
- Cooch, E., & White, G. (2023). *Program MARK - « A Gentle Introduction »*. <https://www.phidot.org/software/mark/docs/book/>

- COSEPAC. (2016). *Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC sur la tortue mouchetée (Emydoidea blandingii), population de la Nouvelle-Écosse et population des Grands Lacs et du Saint-Laurent au Canada* (p. xxi +124 p.). Comité sur la situation des espèces en péril au Canada. <http://www.registrelep-sararegistry.gc.ca/default.asp?lang=Fr&n=24F7211B-1>
- Couturier, T., Cheylan, M., Bertolero, A., Astruc, G., & Besnard, A. (2013). Estimating abundance and population trends when detection is low and highly variable : A comparison of three methods for the Hermann's tortoise. *The Journal of Wildlife Management*, 77(3), Article 3. <https://doi.org/10.1002/jwmg.499>
- Davy, C. M., Kidd, A. G., & Wilson, C. C. (2015). Development and Validation of Environmental DNA (eDNA) Markers for Detection of Freshwater Turtles. *PLOS ONE*, 10(7), Article 7. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130965>
- DNeasy Blood & Tissue Handbook—QIAGEN*. (2020, juillet). <https://www.qiagen.com/us/resources/resourcedetail?id=68f29296-5a9f-40fa-8b3d-1c148d0b3030&lang=en>
- Doi, H., Uchii, K., Takahara, T., Matsushashi, S., Yamanaka, H., & Minamoto, T. (2015). Use of Droplet Digital PCR for Estimation of Fish Abundance and Biomass in Environmental DNA Surveys. *PLOS ONE*, 10(3), Article 3. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122763>
- Dorazio, R. M., & Erickson, R. A. (2018). ednaoccupancy : An r package for multiscale occupancy modelling of environmental DNA data. *Molecular Ecology Resources*, 18(2), 368-380. <https://doi.org/10.1111/1755-0998.12735>
- Dubois, Y., Fortin, G., & Pelletier, S. (2012). *Cartographie des habitats essentiels et identification des menaces au maintien des populations de tortues mouchetees dans le parc de la Gatineau et les aires prioritaires de conservation de*

*l'espece en peripherie du Parc – Rapport final suite aux trois années des travaux de terrain (2009-2011)* (p. 71). Conservation de la nature Canada.

Environnement Canada. (2016). *Registre public des espèces en péril—Programme de rétablissement de la tortue mouchetée (Emydoidea blandingii), population des Grands Lacs et du Saint-Laurent, au Canada—2016 [Proposition]* [Environnement du Canada]. Série de Programme de rétablissement de la Loi sur les espèces en péril. <https://registrelep-sararegistry.gc.ca/default.asp?lang=Fr&n=703A5852-1&pedisable=false>

Équipe de rétablissement des tortues du Québec. (2020). *Plan de rétablissement de la tortue mouchetée (Emydoidea blandingii) au Québec—2020-2030* (p. 52). Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs.

Ficetola, G. F., Manenti, R., & Taberlet, P. (2019). Environmental DNA and metabarcoding for the study of amphibians and reptiles : Species distribution, the microbiome, and much more. *Amphibia-Reptilia*, *40*(2), Article 2. <https://doi.org/10.1163/15685381-20191194>

Fortin, G., Blouin-Demers, G., & Dubois, Y. (2012). Landscape composition weakly affects home range size in Blanding's turtles (*Emydoidea blandingii*). *Écoscience*, *19*(3), Article 3. <https://doi.org/10.2980/19-3-3528>

Fortin, G., & Côté, G. (2018). *Comparaison des méthodes de piégeage et d'ADN environnemental pour la détection et la quantification de la tortue mouchetée en Outaouais*. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction générale de la gestion de la faune et de ses habitats, Direction de l'expertise sur la faune terrestre, l'herpétofaune et l'avifaune, Service de la conservation de la biodiversité et des milieux humides.

Furlan, E. M., Gleeson, D., Hardy, C. M., & Duncan, R. P. (2016). A framework for estimating the sensitivity of eDNA surveys. *Molecular Ecology Resources*, *16*(3), Article 3. <https://doi.org/10.1111/1755-0998.12483>

Fyson, V. K., & Blouin-Demers, G. (2021). Effects of landscape composition on wetland occupancy by Blanding's Turtles (*Emydoidea blandingii*) as determined by environmental DNA and visual surveys. *Canadian Journal of Zoology*, 99(8), 672-680.

Gamble, T. (2006). *The Relative Efficiency of Basking and Hoop Traps for Painted Turtles (Chrysemys picta)*. 5.

Gibbons, J. W. (1968). Observations on the ecology and population dynamics of the Blanding's turtle, *Emydoidea blandingii*. *Canadian Journal of Zoology*, 46(2), Article 2. <https://doi.org/10.1139/z68-043>

Gouvernement du Canada. (2021). *Tortue mouchetée (Emydoidea blandingii), Population des Grands Lacs et du Saint-Laurent—Recherche d'espèces—Registre public des espèces en péril* [Fédéral]. Gouvernement du Canada. <https://registre-especes.canada.ca/index-fr.html#/especes/846-577>

Gouvernement du Canada, E. C. (2016, mars 11). *Programme de rétablissement de la tortue mouchetée (Emydoidea blandingii), population des Grands Lacs et du Saint-Laurent, au Canada—2016 [Proposition]*. Gouvernement du Canada. <https://registrelep-sararegistry.gc.ca/default.asp?lang=Fr&n=703A5852-1&pedisable=false>

Graham, T. E., & Doyle, T. S. (1977). Growth and Population Characteristics of Blanding's Turtle, *Emydoidea blandingii*, in Massachusetts. *Herpetologica*, 33(4), 410-414.

Griffin, J. E., Matechou, E., Buxton, A. S., Bormpoudakis, D., & Griffiths, R. A. (2020). Modelling environmental DNA data; Bayesian variable selection accounting for false positive and false negative errors. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 69(2), Article 2. <https://doi.org/10.1111/rssc.12390>

- Gutzke, W. H. N., & Packard, G. C. (1987). The Influence of Temperature on Eggs and Hatchlings of Blanding's Turtles, *Emydoidea blandingii*. *Journal of Herpetology*, 21(2), 161-163. <https://doi.org/10.2307/1564476>
- Hartwig, T. S., & Kiviat, E. (2007). Microhabitat Association of Blanding's Turtles in Natural and Constructed Wetlands in Southeastern New York. *The Journal of Wildlife Management*, 71(2), 576-582. <https://doi.org/10.2193/2005-619>
- Hasler, C. T., Robinson, K., Stow, N., & Taylor, S. R. (2015). Population size and spatial ecology of Blanding's Turtle (*Emydoidea blandingii*) in South March Highlands, Ottawa, Ontario, Canada. *Canadian Journal of Zoology*, 93(7), 509-514. <https://doi.org/10.1139/cjz-2015-0064>
- Hernandez, C., Bougas, B., Perreault-Payette, A., Simard, A., Côté, G., & Bernatchez, L. (2020). 60 specific eDNA qPCR assays to detect invasive, threatened, and exploited freshwater vertebrates and invertebrates in Eastern Canada. *Environmental DNA*, 2(3), 373-386. <https://doi.org/10.1002/edn3.89>
- Hu, S. (2007). Akaike Information Criterion. *Center for Research in Scientific Computation*, 93, 42.
- Huggett, J. F., & Whale, A. (2013). Digital PCR as a Novel Technology and Its Potential Implications for Molecular Diagnostics. *Clinical Chemistry*, 59(12), 1691-1693. <https://doi.org/10.1373/clinchem.2013.214742>
- Huggins, R., & Hwang, W.-H. (2011). A Review of the Use of Conditional Likelihood in Capture-Recapture Experiments. *International Statistical Review*, 79(3), 385-400. <https://doi.org/10.1111/j.1751-5823.2011.00157.x>
- Huggins, R. M. (1989). On the statistical analysis of capture experiments. *Biometrika*, 76(1), 133-140. <https://doi.org/10.1093/biomet/76.1.133>

- King, R. B., Golba, C. K., Glowacki, G. A., & Kuhns, A. R. (2021). Blanding's Turtle Demography and Population Viability. *Journal of Fish and Wildlife Management*, 12(1), 112-138. <https://doi.org/10.3996/JFWM-20-063>
- Kofron, C. P., & Schreiber, A. A. (1985). Ecology of Two Endangered Aquatic Turtles in Missouri : *Kinosternon flavescens* and *Emydoidea blandingii*. *Journal of Herpetology*, 19(1), 27-40. <https://doi.org/10.2307/1564417>
- Koper, N., & Brooks, R. J. (1998). Population-size estimators and unequal catchability in painted turtles. *Canadian Journal of Zoology*, 76(3), Article 3. <https://doi.org/10.1139/z97-220>
- Laake, J. (2013). *RMark : An R interface for analysis of capture-recapture data with MARK*.
- Lacoursière-Roussel, A., Dubois, Y., Normandeau, E., & Bernatchez, L. (2017). Improving herpetological surveys in eastern North America using the environmental DNA method. *The 6th International Barcode of Life Conference*, 01(01), Article 01. <https://doi.org/10.1139/gen-2015-0218@gen-iblf.issue01>
- Lacoursière-Roussel, A., Rosabal, M., & Bernatchez, L. (2016). Estimating fish abundance and biomass from eDNA concentrations : Variability among capture methods and environmental conditions. *Molecular Ecology Resources*, 16(6), Article 6. <https://doi.org/10.1111/1755-0998.12522>
- Lagler, K. F. (1943). Food Habits and Economic Relations of the Turtles of Michigan with Special Reference to Fish Management. *The American Midland Naturalist*, 29(2), 257-312. <https://doi.org/10.2307/2420793>
- Langtimm, C. A., Dodd, C. K., & Franz, R. (1996). Estimates of Abundance of Box Turtles (*Terrapene carolina bauri*) on a Florida Island. *Herpetologica*, 52(4), Article 4.

- Lovich, J. E., & Ennen, J. R. (2013). A quantitative analysis of the state of knowledge of turtles of the United States and Canada. *Amphibia-Reptilia*, 34(1), 11-23. <https://doi.org/10.1163/15685381-00002860>
- Lyons, M. P., Nikiel, C. A., LeDee, O. E., & Boyles, R. (2023). Potential effects of climate change on *Emydoidea blandingii* (Blanding's turtle). Dans *Potential effects of climate change on Emydoidea blandingii (Blanding's turtle)* (USGS Numbered Series 2021-1104-D; Open-File Report, Vol. 2021-1104-D, p. 58). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr20211104D>
- Mali, I., Duarte, A., & Forstner, M. R. J. (2018). Comparison of hoop-net trapping and visual surveys to monitor abundance of the Rio Grande cooter (*Pseudemys gorzugi*). *PeerJ*, 6, e4677. <https://doi.org/10.7717/peerj.4677>
- Martinez, P. A., Ezaz, T., Valenzuela, N., Georges, A., & Marshall Graves, J. A. (2008). An XX/XY heteromorphic sex chromosome system in the Australian chelid turtle *Emydura macquarii* : A new piece in the puzzle of sex chromosome evolution in turtles. *Chromosome Research*, 16(6), 815-825. <https://doi.org/10.1007/s10577-008-1228-4>
- Mazerolle, M. J., Bailey, L. L., Kendall, W. L., Royle, J. A., Converse, S. J., & Nichols, J. D. (2007). Making Great Leaps Forward : Accounting for Detectability in Herpetological Field Studies. *Journal of Herpetology*, 41(4), 672-689. <https://doi.org/10.1670/07-061.1>
- Millar, C. S., & Blouin-Demers, G. (2011). Spatial Ecology and Seasonal Activity of Blanding's Turtles (*Emydoidea blandingii*) in Ontario, Canada. *Journal of Herpetology*, 45(3), 370-378. <https://doi.org/10.1670/10-172.1>
- Poitras, E., & Houde, A. (2002). La PCR en temps réel : Principes et applications. *Reviews in Biology and Biotechnology*, 2(2), 2-11.



- Proulx, C. L., Fortin, G., & Blouin-Demers, G. (2014). Blanding's Turtles (*Emydoidea blandingii*) Avoid Crossing Unpaved and Paved Roads. *Journal of Herpetology*, 48(2), 267-271. <https://doi.org/10.1670/12-176>
- QIAGEN. (2021, juin). *QIAcuity User Manual Extension*. <https://www.qiagen.com/us/resources/resourcedetail?id=5d19083d-fa10-4ed2-88a0-2953d9947e0c&lang=en>
- R Core Team. (2022). *R : A Language and environment for statistical computing* [Software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>.
- Raemy, M., & Ursenbacher, S. (2018). Detection of the European pond turtle (*Emys orbicularis*) by environmental DNA : Is eDNA adequate for reptiles? *Amphibia-Reptilia*, 39(2), Article 2. <https://doi.org/10.1163/15685381-17000025>
- Ream, C., & Ream, R. (1966). The Influence of Sampling Methods on the Estimation of Population Structure in Painted Turtles. *The American Midland Naturalist*, 75(2), Article 2. <https://doi.org/10.2307/2423395>
- Reid, B. N., & Peery, M. Z. (2014). Land use patterns skew sex ratios, decrease genetic diversity and trump the effects of recent climate change in an endangered turtle. *Diversity and Distributions*, 20(12), 1425-1437. <https://doi.org/10.1111/ddi.12243>
- Reid, B. N., Thiel, R. P., & Peery, M. Z. (2016). Population dynamics of endangered blanding's turtles in a restored area. *The Journal of Wildlife Management*, 80(3), Article 3. <https://doi.org/10.1002/jwmg.1024>
- Ross, D. A. (1989). Population ecology of painted and Blanding's turtles (*Chrysemys picta* and *Emydoidea blandingii*) in central Wisconsin. *Wisconsin Academy of Sciences, Arts and Letters*, 77-84.

- Rowe, J. W. (1992a). Dietary Habits of the Blanding's Turtle (*Emydoidea blandingii*) in Northeastern Illinois. *Journal of Herpetology*, 26(1), 111-114. <https://doi.org/10.2307/1565040>
- Rowe, J. W. (1992b). Observations of body size, growth, and reproduction in Blanding's turtle (*Emydoidea blandingii*) from western Nebraska. *Canadian Journal of Zoology*, 70(9), 1690-1695. <https://doi.org/10.1139/z92-235>
- Ruane, S., Dinkelacker, S. A., & Iverson, J. B. (2008). Demographic and Reproductive Traits of Blanding's Turtles, *Emydoidea blandingii*, at the Western Edge of the Species' Range. *Copeia*, 2008(4), 771-779. <https://doi.org/10.1643/CE-07-108>
- Souza, L. S. de, Godwin, J. C., Renshaw, M. A., & Larson, E. (2016). Environmental DNA (eDNA) Detection Probability Is Influenced by Seasonal Activity of Organisms. *PLOS ONE*, 11(10), Article 10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165273>
- Starking-Szymanski, M. D., Yoder-Nowak, T., Rybarczyk, G., & Dawson, H. A. (2018). Movement and habitat use of headstarted Blanding's turtles in Michigan. *The Journal of Wildlife Management*, 82(7), 1516-1527. <https://doi.org/10.1002/jwmg.21530>
- St-Hilaire, D., Société de la faune et des parcs du Québec, & Direction de l'aménagement de la faune de l'Outaouais. (2003). *Rapport sur la situation de la tortue mouchetée (Emydoidea blandingii blandingii) au Québec*. Société de la faune et des parcs du Québec [Direction de l'aménagement de la faune de l'Outaouais.
- Strickland, G. J., & Roberts, J. H. (2019). Utility of eDNA and occupancy models for monitoring an endangered fish across diverse riverine habitats. *Hydrobiologia*, 826(1), 129-144. <https://doi.org/10.1007/s10750-018-3723-8>

- Tarof, S. A., Crookes, S., Moxley, K., Hathaway, J., Cameron, G., & Hanner, R. H. (2021). Environmental DNA bioassays corroborate field data for detection of overwintering species at risk Blanding's turtles (*Emydoidea blandingii*). *Genome*, *64*(3), 299-310. <https://doi.org/10.1139/gen-2020-0043>
- Thompson, D., Glowacki, G., Ludwig, D., Reklau, R., Kuhns, A. R., Golba, C. K., & King, R. (2020). Benefits of Head-starting for Blanding's Turtle Size Distributions and Recruitment. *Wildlife Society Bulletin*, *44*(1), 57-67. <https://doi.org/10.1002/wsb.1054>
- Trudeau, H., & Leroux, T. (2008). Conjurer un Sort Incertain : Le Principe de Precaution et L'Evaluation des Espèces en Peril au Canada. *Canadian Bar Review*, *87*, 161.
- IUCN. (2010). IUCN Red List of Threatened Species : *Emydoidea blandingii*. *IUCN Red List of Threatened Species*. <https://www.iucnredlist.org/en>
- IUCN. (2023). *The IUCN Red List of Threatened Species*. IUCN Red List of Threatened Species. <https://www.iucnredlist.org/search/stats?landRegions=CA&searchType=species>
- Underwood, T. J., Bromaghin, J. F., & Klosiewski, S. P. (2004). Evidence of Handling Mortality of Adult Chum Salmon Caused by Fish Wheel Capture in the Yukon River, Alaska. *North American Journal of Fisheries Management*, *24*(1), 237-243. <https://doi.org/10.1577/M02-006>
- VanVoorhis, C. R. W., & Morgan, B. L. (2007). Understanding Power and Rules of Thumb for Determining Sample Sizes. *Tutorials in quantitative methods for psychology*, *3*(2), 43-50.

- Weber, A., & Layzer, J. (2011). A Comparison of Turtle Sampling Methods in a Small Lake in Standing Stone State Park, Overton County, Tennessee. *Journal. Tennessee Academy of Science*, 86, 45-52.
- White, G. C. (2008). Closed population estimation models and their extensions in Program MARK. *Environmental and Ecological Statistics*, 15(1), 89-99. <https://doi.org/10.1007/s10651-007-0030-3>
- Wijewardena, T., Keevil, M. G., Mandrak, N. E., Lentini, A. M., & Litzgus, J. D. (2023). Evaluation of headstarting as a conservation tool to recover Blanding's Turtles (*Emydoidea blandingii*) in a highly fragmented urban landscape. *PLOS ONE*, 18(3), e0279833. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0279833>
- Yates, M. C., Fraser, D. J., & Derry, A. M. (2019). Meta-analysis supports further refinement of eDNA for monitoring aquatic species-specific abundance in nature. *Environmental DNA*, 1(1), Article 1. <https://doi.org/10.1002/edn3.7>
- Yates, M. C., Glaser, D. M., Post, J. R., Cristescu, M. E., Fraser, D. J., & Derry, A. M. (2021). The relationship between eDNA particle concentration and organism abundance in nature is strengthened by allometric scaling. *Molecular Ecology*, 30(13), Article 13. <https://doi.org/10.1111/mec.15543>