

Utilisation de drones pour les inventaires de tortues d'eau douce : potentiel et limites

Samuel Denault, Jean-Philippe Gilbert, Julie Camy, François Fabianek, Christian Fortin et Patrick Galois

Dans le cadre de futurs travaux de réfection des ouvrages régulateurs du fleuve Saint-Laurent, la technologie du drone a été utilisée afin d'évaluer le nombre et les espèces de tortues fréquentant 3 secteurs d'intérêt. Les objectifs étaient de comparer les résultats d'inventaire et de dénombrement de tortues par drone avec ceux d'un inventaire visuel au sol, de valider les conditions météorologiques permettant de maximiser la détection des tortues par drone, de préciser certains éléments méthodologiques pour les futurs inventaires et d'identifier les limites de la présente approche. La méthode d'inventaire par drone s'est avérée plus efficace que l'inventaire visuel, principalement grâce à l'analyse des photos au retour du terrain. Toutefois, pour les espèces de tortues moins abondantes, le drone était moins performant. L'analyse des conditions météorologiques indique une faible influence négative de la température de l'air. Notre étude démontre que les drones permettent d'obtenir une détection des tortues supérieure à celle des relevés visuels faits à partir du sol. Cependant, il est probable que cette méthode soit moins performante dans des environnements où la densité des tortues est faible, les accès terrestres sont limités, la canopée domine ou en raison de restrictions réglementaires de vol. Selon nos observations, l'altitude optimale moyenne pour repérer et identifier les tortues avec le drone était de 20 m.

MOTS-CLÉS : altitude, détection, milieu humide, système d'aéronef télépiloté, tortues

The potential and limitations of using drones for surveying freshwater turtles

As part of a study linked to future repair work on water control structures along the St. Lawrence River (Québec, Canada), drone technology was used to evaluate the number and species of freshwater turtles present in 3 areas of interest. The objectives were to compare the results of turtle surveys conducted using drones, with those of visual surveys conducted on the ground; identify optimal weather conditions that maximize the detection of turtles by drone; clarify certain methodological elements for future inventories; and identify the limitations of the current approach. The drone survey method was more effective than visual surveys, mainly because it allowed the subsequent analysis of photographs taken in the field. However, the drone method was not as effective for less abundant species of turtles. Analysis of weather conditions indicated a small negative influence of air temperature. This study demonstrates that drone technology provides superior results in terms of turtle detection compared to visual surveys conducted on the ground. However, it is likely to be less efficient in environments where turtle density is low, land access is limited, canopy cover is extensive, or where there are regulatory flight restrictions. According to the present study, the average optimal altitude for detecting and identifying turtles using a drone is approximately 20 m.

KEYWORDS: altitude, detection, turtles, unmanned aerial system, wetland

Introduction

Les systèmes d'aéronefs télépilotés, communément appelés drones, ont grandement contribué à l'étude de plusieurs groupes fauniques, comme les oiseaux, les mammifères marins et les grands mammifères terrestres (Charbonneau et Lemaître, 2021; Hodgson et Koh, 2016; Wang et collab., 2019). Les drones sont en effet bien adaptés à la collecte de données à petite échelle spatiale par rapport aux photographies aériennes et satellitaires et sont particulièrement utiles pour l'étude de la faune et de son habitat dans les endroits difficiles d'accès ou dangereux (Chabot et Bird, 2015). Les données obtenues à l'aide de drones sont également souvent plus précises que celles obtenues par les méthodes classiques (observateur au niveau du sol, photographie aérienne et imagerie satellitaire), ce qui permet d'augmenter la puissance statistique lors des suivis des tendances démographiques (Hodgson et collab., 2018).

Samuel Denault est biologiste spécialisé en faune aviaire chez AtkinsRéalis.

samuelphilippe.denault@atkinsrealis.com

Jean-Philippe Gilbert, biologiste, est conseiller en expertise environnementale chez Hydro-Québec.

Julie Camy est cheffe Expertise intégrée robotisation et drones chez Hydro-Québec.

François Fabianek, biologiste, est directeur chez Solutions Wavx inc.

Christian Fortin est biologiste, spécialisé en faune terrestre, chez AtkinsRéalis.

Patrick Galois, herpétologiste, est consultant chez Amphibia-Nature.

Pour le groupe des tortues, plusieurs études se sont intéressées aux tortues marines (Bevan et collab., 2018; Schofield et collab., 2019; Yaney-Keller et collab., 2021), mais, à notre connaissance, seules 7 publications scientifiques portent précisément sur les tortues d'eau douce (Biserkov et Lukanov, 2017; Bogolin et collab., 2021; Daniels, 2018; Escobar et collab., 2020; Fagundes et collab., 2022; Gordon et collab., 2023; Karcher, 2019). La technologie du drone est particulièrement d'intérêt pour les tortues d'eau douce, car celles-ci sont généralement discrètes, distribuées sur de grandes superficies et sont sensibles aux perturbations anthropiques. De plus, il est souvent difficile d'accéder à leurs habitats, voire, dans certains cas, d'y naviguer en embarcation de façon sécuritaire.

Les tortues d'eau douce sont des organismes ectothermes dont la température corporelle dépend de la température du milieu ambiant. À travers différents comportements et mécanismes de thermorégulation, elles contrôlent leur température interne permettant le maintien des processus physiologiques (Hutchison, 1979). Durant la saison active, soit approximativement de la fin avril à octobre au Québec, les tortues s'exposent au soleil en dehors de l'eau (lézardage) ou en flottant à la surface (flottaison) pour augmenter leur température corporelle. Cette augmentation de température accélère certains processus physiologiques, comme la digestion, la croissance et le développement des œufs chez les femelles (Hutchison, 1979; Parmenter, 1981; Steyermark et collab., 2008). Ces comportements de thermorégulation varient notamment selon la saison, les conditions météorologiques, le moment de la journée, l'espèce, la taille, le sexe et l'état physiologique (Bulté et Blouin-Demers, 2010; Hutchison, 1979; Obbard et Brooks, 1979). Ces comportements d'exposition offrent une opportunité aux chercheurs d'inventorier visuellement à partir du sol ou par drone ce groupe d'espèces, en profitant du fait que les tortues demeurent hors de l'eau et à découvert pendant des périodes prolongées (Daniels, 2018).

La présente étude s'inscrivait dans le cadre de futurs travaux de réfection des ouvrages régulateurs (barrages, déversoirs, digues) du fleuve Saint-Laurent entre les lacs Saint-François et Saint-Louis dans la région de Montréal, Québec, Canada. Celle-ci consistait essentiellement à faire le point sur les connaissances et données existantes sur les milieux humides et la végétation, la faune (y compris les espèces à statut particulier) et à effectuer des campagnes de terrain pour l'acquisition de données. Un des volets visait à évaluer le nombre et à identifier les différentes espèces de tortues fréquentant l'aire d'étude. Comme le débit d'eau à la sortie des évacuateurs de crues au printemps est beaucoup trop fort pour s'y aventurer en embarcation de manière sécuritaire, la technologie du drone a été retenue pour inventorier ce groupe faunique.

L'étude visait à dénombrer et à identifier les tortues dans la zone d'étude, tout en testant la méthode du drone, dans un contexte favorable. En effet, la présence de 3 espèces était confirmée dans la région : d'abord, la tortue géographique (*Graptemys geographica*), désignée « vulnérable » selon la *Loi sur les espèces menacées ou vulnérables* du Québec (LEMV) et

« préoccupante » selon la *Loi sur les espèces en péril* du Canada (LEP); ensuite, la tortue peinte (*Chrysemys picta*) et la tortue serpentine (*Chelydra serpentina*), désignées « préoccupantes » selon la LEP. Puisque la tortue peinte et la tortue serpentine sont relativement abondantes dans ce secteur selon l'Atlas des amphibiens et des reptiles du Québec (AARQ, 2019), il s'agissait d'une zone d'étude idéale pour tester leur détection. De plus, comme l'aire d'étude était en grande partie accessible par le réseau routier, il était possible de faire décoller les drones à partir de plusieurs points et ainsi de couvrir l'aire d'étude en ayant le drone à vue en tout temps, tel qu'exigé par le *Règlement de l'aviation canadien* de Transports Canada (DORS/96-433). Finalement, la majorité des habitats d'intérêt pour les tortues étaient dans des milieux ouverts, permettant une couverture presque complète des secteurs d'intérêt par les drones.

Le premier objectif de l'étude était (1a) de comparer les résultats d'inventaire par drone (identification et dénombrement des tortues) avec ceux d'un inventaire visuel classique et (1b) de valider les conditions météorologiques (température et ennuagement) permettant de maximiser la détection des tortues par drone.

Dans un premier temps, nous avons vérifié si un inventaire par drone permettait de détecter significativement plus de tortues par visite comparativement à un inventaire visuel. Dans un deuxième temps, nous avons vérifié si le nombre de tortues pouvant être observées par drone était influencé par les conditions météorologiques, telles que la température ambiante et l'absence de couvert nuageux. Il était anticipé que le nombre de tortues observées varierait selon l'espèce entre les tortues serpentes et les tortues peintes, les 2 espèces les plus communes dans l'aire d'étude. L'hypothèse était que le nombre de tortues peintes serait supérieur au nombre de tortues serpentes détectées par drone en raison d'une différence entre les 2 espèces dans le comportement de lézardage.

Le second objectif était (2a) de préciser certains éléments méthodologiques pour les futurs inventaires, en se basant sur les leçons apprises, incluant l'altitude de vol et le type de survol (p. ex., vol autonome préprogrammé à moyenne altitude comparativement au vol manuel à basse altitude) et (2b) d'identifier les limites de l'approche.

Méthodologie

Aire d'étude

L'aire d'étude couvre une superficie de 243 km² qui englobe les barrages et digues du fleuve Saint-Laurent entre les lacs Saint-François et Saint-Louis et le milieu adjacent (figure 1). Elle comprend 3 secteurs d'inventaire, soit les secteurs des Coteaux (1 118 ha), de Structure 1 (86 ha) et de Pointe-des-Cascades (519 ha). Des zones d'inventaires ciblées (sous-secteurs) ont été déterminées à la suite des visites de reconnaissance afin de concentrer les efforts subséquents dans les habitats possédant un potentiel de présence de tortues plus élevé. Les baies tranquilles et les étangs stagnants où la végétation abonde ont ainsi été privilégiés, alors que les vastes superficies d'eau libre et les zones à fort courant ont été exclues. Le secteur des Coteaux comprend

4 sous-secteurs, soit l'île d'Aloigny (7,49 ha), l'embouchure de la rivière Delisle (2,72 ha), l'île Dondaine (10,65 ha) et la digue de l'île Liénard (3,14 ha). Le secteur Structure 1 ne comprend qu'un seul sous-secteur, soit l'île Beaudry–pointe Larivière (10,19 ha). Le secteur Pointe-des-Cascades ne comprend aussi qu'un seul sous-secteur : Les Faucilles Nord (8,88 ha) (tableau 1).

Tableau 1. Superficies des sous-secteurs d'inventaires ciblés de tortues d'eau douce.

Secteur	Sous-secteur	Superficie (ha)
Des Coteaux	Île d'Aloigny	7,49
Des Coteaux	Digue de l'île Liénard	3,14
Des Coteaux	Embouchure rivière Delisle	2,72
Des Coteaux	Île Dondaine	10,65
Pointe-des-Cascades	Les Faucilles Nord	8,88
Structure 1	Île Beaudry– Pointe Larivière	10,19

Périodes d'inventaire et conditions météorologiques

Les visites d'inventaire des différents sous-secteurs ont été réalisées du 27 mai au 8 juillet 2019 (tableau 2) et ont été inspirées par le Protocole d'inventaire pour la détection de la tortue géographique au Québec (sans drone) du ministère des

Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP, 2018). Les visites ont été espacées d'au moins 6 jours. Les survols ont été effectués entre 9 h et 16 h et les vols ont eu lieu principalement lors de journées ensoleillées. Aucun inventaire n'a été effectué sous des conditions pluvieuses, d'abord parce que les drones ne sont pas faits pour voler dans de telles conditions, mais aussi parce que les tortues sont alors moins portées à sortir de l'eau que lorsqu'il fait soleil. Des journées avec un vent faible à nul ont aussi été favorisées (rafales < 50 km/h), car les vents élevés limitent les possibilités de vol de drone (Duffy et collab., 2018). La température a été mesurée à l'aide d'un thermomètre et le vent a été déterminé selon l'échelle de Beaufort. Le couvert nuageux a été évalué visuellement selon une échelle de pourcentage de 0 à 100 %.

Inventaire visuel à partir du sol

La méthode d'inventaire visuel à partir du sol consistait à faire un balayage des rives à l'aide de jumelles (Vortex, modèle Diamondback HD, grossissement 10 × 42), en portant une attention particulière aux sites de lézardage potentiels pour chaque sous-secteur. Au besoin, une lunette d'approche (Swarovski, modèle Habicht ST 80, grossissement 20 × 60) a été utilisée pour confirmer les identifications les plus distantes. La même journée et avant les vols par drone, des séances d'observation des tortues de 10 à 15 min ont été réalisées à des distances variant de 10 à 100 m. L'observateur (toujours le même) était généralement localisé à proximité du site

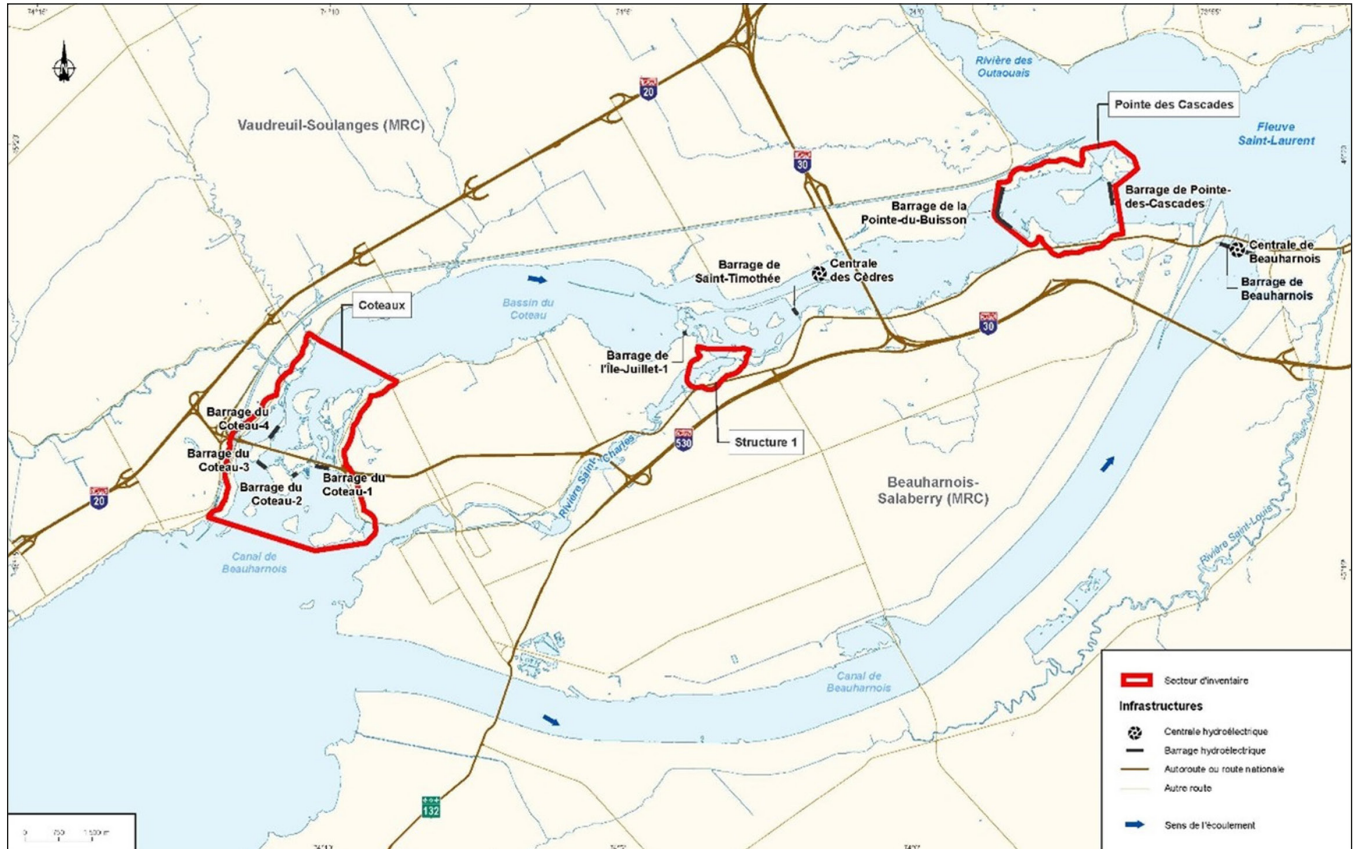


Figure 1. Carte montrant l'emplacement des 3 secteurs d'inventaire (des Coteaux, Structure 1 et Pointe-des-Cascades) près des municipalités régionales de comté (MRC) de Beauharnois-Salaberry et de Vaudreuil-Soulanges (Québec, Canada).

Tableau 2. Calendrier des activités réalisées lors de l'inventaire des tortues à l'aide de drones.

Date (2019)	Secteur	Sous-secteur	Activité
22 mai	Des Coteaux	Île d'Aloigny	Visite de reconnaissance
27 mai	Structure 1	Île Beaudry–Pointe Larivière	Visite de reconnaissance
27 mai	Des Coteaux	Île d'Aloigny	Visite 1
29 mai	Des Coteaux	Île d'Aloigny	Plan de vol
		Digue de l'île Liénard	Visite 1
31 mai	Pointe-des-Cascades	Ensemble du secteur	Visite de reconnaissance. Plan de vol
6 juin	Structure 1	Île Beaudry–Pointe Larivière	Visite 1
7 juin	Des Coteaux	Île Dondaine	Visite 1
12 juin	Structure 1	Île Beaudry–Pointe Larivière	Visite 2
17 juin	Des Coteaux	Île d'Aloigny	Visite 2
		Embouchure de la rivière Delisle	Visite 1
		Digue de l'île Liénard	Visite 2
		Île Dondaine	Visite 2
18 juin	Structure 1	Île Beaudry–Pointe Larivière	Visite 3
18 juin	Pointe-des-Cascades	Les Faucilles Nord	Visite 1
26 juin	Des Coteaux	Digue de l'île Liénard	Visite 3
		Embouchure de la rivière Delisle	Visite 2
		Île Dondaine	Visite 3
3 juillet	Pointe-des-Cascades	Les Faucilles Nord	Visite 2
8 juillet	Des Coteaux	Île d'Aloigny	Visite 3
		Embouchure de la rivière Delisle	Visite 3

de décollage. Le nombre d'individus par espèce de tortue observés visuellement était ensuite noté afin d'être comparé ultérieurement avec les observations par drones.

Inventaire par drone et analyse des images

Les détails concernant les spécifications des drones utilisés et les aspects techniques des vols sont présentés en annexe. Ces spécifications suivent les recommandations de Barnas et collab. (2020) pour décrire les inventaires fauniques à l'aide d'un drone.

Planification des vols et visites de reconnaissance

L'élaboration des plans de vol a été réalisée à partir de la plateforme Web DroneDeploy (San Francisco, Californie). Chacun des 3 secteurs et des sous-secteurs a bénéficié d'un plan de vol pour la captation d'images aériennes permettant la réalisation d'une mosaïque 2D géoréférencée. Cette méthode permet de retourner au même endroit et de faire voler le drone selon un tracé identique à chacune des sorties afin de permettre la comparaison des données de façon standardisée. Préalablement aux inventaires, des visites ont été effectuées les 22, 27 et 31 mai afin de calibrer la méthode et d'effectuer une reconnaissance des secteurs. Ces visites ont permis d'identifier les éléments qui auraient pu nuire ou compliquer le plan de vol (p. ex., antennes, lignes de transport d'énergie, très grands arbres)

dans les 3 secteurs. Différents choix de site ont également été faits afin de retenir des aires de décollage et des aires d'atterrissage sécuritaires. La superficie précise des zones à survoler a été déterminée à l'aide d'ArcGIS Online (Esri Canada, Toronto, Ontario) avant la campagne de terrain afin de permettre d'estimer le temps de vol et de prévoir un nombre suffisant de batteries pour réaliser la mission dans son ensemble. Certains inventaires réussis pendant la période de reconnaissance ont cependant été conservés dans les analyses (tableau 2).

Le premier vol de reconnaissance était réalisé avec un drone DJI Phantom 4 Pro V2 (Dajiang Innovations Technology Co., Ltd. [DJI], Shenzhen, Guangdong, Chine). Ce vol consistait à repérer la présence d'habitats favorables aux tortues en survolant l'ensemble du territoire le long de lignes de vol prédéfinies. Ce passage se faisait à une altitude moyenne de 60 m, à une vitesse moyenne du drone de 4 m/s. Les photos étaient prises environ toutes les 5 s, et la superficie couverte par chaque photo à cette altitude était d'environ 50 m². Le niveau de résolution de ces photos ne permettait pas de détecter efficacement la présence de tortues à l'ordinateur. Toujours avec le même modèle de drone, un deuxième vol de reconnaissance était effectué à plus basse altitude, soit en moyenne à une altitude de 20 à 30 m, dépendant de la visite ou du site. La superficie couverte par chaque photo lors de ce survol était d'environ 25 m². Les sites jugés à fort potentiel étaient peu ou pas assujettis aux fluctuations rapides du niveau

d'eau, possédaient une végétation aquatique abondante et de nombreux débris ligneux (arbres tombés, bois flottant) et avaient un courant faible à nul.

Pour la caractérisation des habitats, les vols automatisés ont été réalisés avec le drone DJI Phantom 4 Pro V2 en utilisant un recouvrement lors de la prise des photographies de 60 % (longitudinal et latéral) à 120 m d'altitude. Ces vols avaient pour but de créer des mosaïques photographiques cartographiant l'intégralité de la zone. Pour les zones de vol à haute résolution en vue de la détection des tortues, des plans de vol automatisés ont été effectués avec le drone DJI Phantom 4 Pro V2 à une altitude variant de 4 à 30 m, avec un recouvrement des photographies de 85 % (longitudinal et latéral). Pour les zones de recherche active, un drone DJI Mavic 2 Pro a été utilisé à une altitude moyenne de 8 m alors que des photos étaient prises automatiquement toutes les 5 s. Le drone était opéré en mode manuel sans plan de vol préétabli. Dans de rares cas, le DJI Mavic 2 Pro a été piloté manuellement pour aller photographier des tortues déjà repérées visuellement à partir du sol, de façon opportuniste. Ces tortues n'avaient pas été détectées initialement par le drone (par le DJI Phantom 4 Pro V2 ou par le DJI Mavic 2 Pro). Elles n'ont pas été retenues dans les analyses d'individus, puisque ces vols étaient non aléatoires et guidés par un observateur au sol.

Les vols de reconnaissance automatisés visaient à identifier les milieux utilisés par les tortues et à orienter les recherches lors des visites subséquentes aux sites concernés. Les vols pilotés manuellement, quant à eux, avaient pour objectif de compléter les inventaires afin d'obtenir de meilleures prises de vues de sites à haut potentiel et d'ainsi confirmer les identifications et les dénombrements des spécimens. Dans toutes les phases, un moniteur affichait un suivi vidéo en temps réel des images captées permettant de détecter davantage de tortues et de s'en approcher lors de vols manuels pour confirmer l'identification. Chaque tortue détectée a été photographiée à l'aide de la caméra du drone DJI Mavic 2 Pro (20 mégapixels). Même en l'absence de tortues détectées sur le terrain, la caméra captait des images à différentes altitudes, afin de couvrir l'ensemble des sites potentiels.

Tous les sous-secteurs compris dans les secteurs des Coteaux et de Structure 1 ont été survolés à un minimum de 3 reprises alors que le sous-secteur Les Fauilles Nord de Pointe-des-Cascades a été survolé à 2 reprises. Ces réplicats ont permis de minimiser les probabilités de conclure à tort à l'absence d'une espèce de tortue donnée dans un secteur donné (faux négatif) et ont été combinés pour les analyses. En tout, 21 vols étalés sur 11 journées ont été effectués au-dessus de l'aire d'étude en incluant les vols de reconnaissance.

Analyses post-terrain des images

Les survols étaient suivis d'une phase de post-traitement des images pour préparer une mosaïque 2D orthorectifiée à l'aide du logiciel DroneDeploy. Un premier traitement a été effectué à l'aide du logiciel pour sélectionner les images les plus nettes afin de garantir la qualité de la mosaïque. Le logiciel a

effectué ensuite un travail de géoréférencement des images, puis d'orthorectification. Finalement, les images ont été assemblées entre elles de manière à créer une mosaïque.

Une fois la mosaïque d'images obtenue, chaque secteur d'étude a été scruté attentivement par un observateur avec le logiciel DroneDeploy en utilisant la fonction « zoom ». Les identifications ont ensuite été validées par un biologiste expert (Patrick Galois). Une note géoréférencée a été ajoutée à chaque occurrence de tortues avec l'identification de l'espèce et le nombre d'individus. Les tortues repérées à la suite du traitement post-terrain ont ensuite été ajoutées au formulaire de terrain pour mettre à jour le décompte total d'individus repérés à l'aide du drone pour chaque sous-secteur.

Analyses statistiques

Comparaison méthodologique

Afin de tester l'hypothèse qu'un inventaire par drone permet de détecter un plus grand nombre de tortues par visite qu'un inventaire visuel, nous avons utilisé un test t (à un seuil α de 5 %) pour données appariées pour estimer la différence moyenne entre les 2 méthodes d'inventaire. Pour ce faire, les détectations de tortues (toutes espèces confondues) ont été regroupées par sous-secteur ($n = 12$) pour chaque méthode d'inventaire. Ces regroupements ont ensuite été divisés par le nombre de visites qui différait (de 1 à 6 visites) selon le sous-secteur inventorié afin d'obtenir une détection moyenne de tortues par visite à comparer selon la méthode d'inventaire.

Nous avons utilisé le test de Shapiro-Wilk pour tester le critère de normalité de la différence de moyennes entre les 2 méthodes d'inventaire ($W = 0,88$, $p = 0,28$). Le logiciel R (R Core Team, 2025) a été utilisé afin de réaliser ces analyses.

Conditions météorologiques

Un modèle linéaire (avec une distribution normale) a été employé afin d'évaluer si le nombre moyen de tortues détectées par drone (par unité de surface) était influencé par la température ambiante, la couverture nuageuse et l'espèce (tortue peinte et tortue serpentine). Pour ce faire, les détectations de tortues peintes ($n = 15$) et de tortues serpentines ($n = 15$) ont été combinées par visite et par sous-secteur, pour donner un total de 30 décomptes. Après vérification des conditions d'application du modèle, il y avait un effet de levier important en raison d'une observation influente (distance de Cook = 2,2). Nous avons par conséquent supprimé cette observation. Les tests de Breusch-Pagan et de Shapiro-Wilk ont permis de confirmer respectivement l'homoscédasticité ($BP = 7,45$; $p = 0,06$) et la normalité des résidus ($W = 0,93$; $p = 0,05$) du modèle et aucun effet de levier n'a été constaté après la suppression de l'observation influente. Les tests étaient considérés comme significatifs à $\alpha = 0,05$.

Résultats

Quatre espèces de tortues ont été recensées au cours de nos inventaires, soit la tortue à oreilles rouges (*Trachemys scripta elegans*), la tortue géographique, la tortue peinte et la

tortue serpentine. Au total, 171 tortues peintes, 16 tortues serpentes, 7 tortues géographiques et 3 tortues à oreilles rouges ont été dénombrées dans les 3 secteurs, pour un total global de 197 individus. Les sites présentant le plus d'observations étaient tous des baies et des étangs stagnants sans activité humaine à proximité et à l'abri des grands vents.

Comparaison méthodologique

La moyenne de tortues détectées par sous-secteur avec l'inventaire par drone était de 11,7 (écart-type = 10,6 tortues, $n = 6$) comparativement à 1,3 tortue détectée en moyenne par sous-secteur pour l'inventaire visuel (écart-type = 0,7 tortue, $n = 6$). Le test t apparié indiquait une différence significative de la différence moyenne entre les 2 méthodes d'inventaire employées sur le terrain ($t = 3,46$; $df = 5$; $p = 0,02$; différence de moyennes = 7,34 avec IC à 95 % : [0,5, 22,3]). Pour toutes les espèces confondues, le nombre d'observations par drone était plus élevé que le nombre d'observations par la méthode visuelle (figure 2).

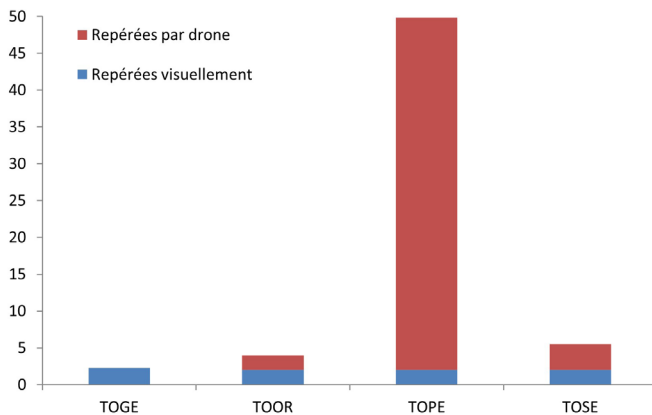


Figure 2. Nombre de détections de tortues par visite selon l'espèce et la méthode d'inventaire employée. TOGE = tortue géographique; TOOR = tortue à oreilles rouges; TOPE = tortue peinte; TOSE = tortue serpentine.

Conditions météorologiques

Les températures de l'air pendant les inventaires ont varié de 13 à 27 °C (moyenne $\pm$ écart-type: $20,9 \pm 3,8$ °C), alors que le vent n'a jamais dépassé 3 sur l'échelle de Beaufort. Le couvert nuageux variait quant à lui de 0 à 100 % (28 ± 31 %) durant les inventaires.

Le tableau 3 présente les estimations et leurs erreurs-types ainsi que les valeurs de t et de p pour les coefficients de chaque variable réponse ainsi que pour l'intercepte du modèle. Ainsi, ces résultats indiquent une faible influence négative de la température ambiante ($t = -2,27$; $df = 28$; $p = 0,03$), une faible influence négative de la couverture nuageuse ($t = -2,21$; $df = 28$; $p = 0,03$). La tortue serpentine (TOSE) était significativement moins détectée ($t = -4,85$; $df = 28$; $p < 0,001$) que la tortue peinte (TOPE) durant les inventaires par drone (figure 2). L'erreur résiduelle standard du modèle était de 1,86 pour 25 degrés de liberté et un R^2 ajusté de 0,5 ($F = 10,34$; $df = 25$; $p = 0,0001$).

Discussion

Comparaison méthodologique

La méthode d'inventaire à l'aide du drone s'est avérée plus efficace que l'inventaire visuel pour repérer, dénombrer et identifier à l'espèce les tortues d'eau douce dans les conditions environnementales de l'aire d'étude. La méthode par drone a permis d'identifier à l'espèce la majorité des individus repérés. De nombreuses tortues observées par drone auraient été difficilement détectables avec une autre méthode d'observation. En effet, les milieux aquatiques où les tortues ont été observées étaient souvent envahis par la végétation ou simplement trop peu profonds pour être inventoriés à l'aide d'une embarcation. De plus, la méthode du drone a permis une couverture presque totale des zones à inventorier alors que seules les tortues observées au premier plan étaient repérables à l'aide de l'inventaire visuel. Une approche à pied à l'aide de bottes-pantalon en caoutchouc aurait pour sa part certainement fait fuir les tortues avant de pouvoir les localiser, les dénombrer et les identifier. De plus, la méthode de capture avec les verveux est invasive, puisqu'elle nécessite une manipulation et une contention des individus. Les conditions dans lesquelles cette étude a été réalisée étaient cependant optimales: les densités de tortues peintes et de tortues serpentes y étaient apparemment élevées, les accès terrestres pour le décollage du drone étaient nombreux et les habitats les plus propices étaient généralement ouverts, donc favorables à une couverture aérienne presque complète de la superficie à couvrir pour avoir le drone à vue en tout temps.

Contrairement à ce qui était prévu en amorçant la campagne de terrain, la plupart des tortues ont été détectées lors des analyses de photos au retour du terrain et non à même le moniteur par le retour vidéo du drone. L'analyse post-terrain s'est avérée à ce point efficace que l'équipe a concentré ses efforts sur les analyses de ces images, plutôt qu'au repérage des individus en

Tableau 3. Sommaire des coefficients des modèles linéaires comparant le nombre moyen de tortues observées par drone (par rapport à la superficie de chaque sous-secteur) en fonction des variables météorologiques et de l'espèce considérée.

Modèle	Variable	Estimation	Erreur type	t	p
Nb de tortues/superficie ~ couverture nuageuse + température ambiante + espèce (TOSE, TOPE)	Ordonnée à l'origine	10,51	2,99	3,51	0,002
	Couverture nuageuse	-0,04	0,02	-2,21	0,036
	Température ambiante	-0,29	0,13	-2,27	0,032
	Espèce: tortue serpentine (TOSE)	-3,36	0,69	-4,85	< 0,001

temps réel sur le moniteur. De plus, le grossissement numérique réalisé à l'ordinateur a permis de conserver une altitude de vol plus élevée et ainsi de limiter l'effarouchement des tortues, une fois la phase de reconnaissance terminée.

Conditions météorologiques

Les inventaires ont été réalisés durant la période de ponte des tortues d'eau douce au Québec (Ernst et Lovich, 2009). L'activité de lézardage varie selon la période (Bulté et Blouin-Demers, 2010; Krawchuk et Brooks, 1998; Lindeman, 2000), et le calendrier retenu pour nos inventaires représente donc un facteur pouvant avoir influencé favorablement la probabilité de détection, les tortues étant plus exposées.

La température ambiante moyenne semble être le facteur le plus influent sur le nombre de tortues peintes détectées par drone au cours de l'étude. Contrairement à la prédiction initiale, le nombre de tortues peintes détectées par drone semble diminuer légèrement avec une augmentation de la température moyenne de l'air alors que la couverture nuageuse ne semble pas influencer significativement les détectations. L'écart de température entre l'eau et l'air n'a cependant pas été mesuré. Il est ainsi possible qu'une augmentation de la température de l'air pousse les tortues à retourner dans l'eau plus fraîche que l'air. Le faible écart entre la température de l'eau et de l'air, au fur et à mesure que l'été avance, pourrait également réduire le besoin des tortues d'avoir recours au lézardage pour la thermorégulation.

Le lézardage est reconnu pour être plus fréquent lorsque le couvert nuageux est moindre, et ce, à la fois pour la tortue peinte (Lefevre et Brooks, 1995) et pour la tortue serpentine (Obbard et Brooks, 1979). L'absence d'effet significatif du couvert nuageux dans notre étude pourrait avoir plusieurs causes. D'abord, un nombre limité d'occurrences réparties sur 11 journées d'inventaire. De plus, les inventaires ont été menés lors de journées avec une température ambiante qui était possiblement assez élevée pour atténuer l'effet du couvert nuageux. Par ailleurs, même avec un ciel couvert réduisant les radiations solaires directes, le rayonnement infrarouge continue à transmettre de la chaleur (Boyer, 1965; Hutchison, 1979).

Le modèle utilisé traite les visites comme indépendantes et ne prend pas en compte l'effet de saisonnalité dans la prise des mesures. Les conditions et les besoins des tortues en début de saison sont pourtant différents de ceux en fin de saison. Une

étude couvrant une plus longue période avec suffisamment de mesures répétées dans le temps permettrait d'intégrer l'effet de saisonnalité afin d'expliquer le comportement de lézardage des tortues et les conséquences sur leur détectabilité par drone sur le terrain. De même, l'effet du vent et des précipitations devrait être contrôlé comme variables explicatives dans les futures études, les tortues étant reconnues pour s'exposer davantage les journées avec peu ou pas de vent et sans pluie (Boyer, 1965).

Éléments méthodologiques

Différents éléments méthodologiques pouvant limiter le nombre de faux négatifs ont pu être identifiés lors des travaux de terrain et de l'analyse des images (tableau 4).

Altitude de vol et réponse comportementale

La tortue peinte était l'espèce la plus abondamment détectée lors des inventaires réalisés par drone. L'espèce étant grégaire, ce sont généralement plusieurs individus simultanément qui étaient détectés, le plus souvent en lézardage (figure 3). De nombreux individus ont également été repérés à l'eau avec la dossière émergée dans les zones où la végétation aquatique abondait (figure 4). La carapace lisse et foncée, souvent d'aspect luisant (figure 5), facilitait son repérage. Si certains individus de cette espèce sont détectés jusqu'à une altitude de 50 m du DJI Phantom 4 Pro V2, lors de l'analyse des photos (figure 6), c'est à une altitude d'environ 20 m avec le Mavic 2 Pro que les critères permettant de confirmer l'identification étaient visibles. Des individus commençaient à quitter les troncs d'arbres couchés pour retourner dans l'eau lorsque le drone était à moins de 15 m d'altitude, mais leur tolérance variait. Certaines tortues peintes ont été approchées à 5 m de distance.

L'usage d'un drone s'est avéré efficace pour l'observation de la tortue serpentine bien qu'elle s'expose peu par rapport aux tortues de la famille des Emydidae (p. ex., tortue à oreilles rouges, tortue géographique, tortue peinte). En effet, la tortue serpentine a été observée par drone plus souvent en flottaison qu'en lézardage (figure 7). Les tortues serpentes adultes étaient malgré tout aisément identifiables par vue aérienne grâce à leur grande taille. Les 3 carènes étaient parfois visibles, mais rarement lorsque les tortues étaient enfouies en partie

Tableau 4. Éléments méthodologiques pouvant minimiser les erreurs de détection.

Type d'erreur de détection	Erreur de détection*	Éléments méthodologiques
Faux négatif	Erreur de disponibilité	- Sélection d'une aire d'étude avec prédominance de milieux ouverts - Inventaire lors d'une période où les tortues s'exposent (lézardage)
	Erreur de perception	- Dénombrement manuel des tortues à partir d'orthophotographies - Résolution des capteurs - Altitude de vol permettant le repérage des tortues
Faux positif	Mauvaise identification	- Dénombrement manuel des tortues à partir d'orthophotographies - Résolution des caméras - Altitude de vol permettant l'identification des tortues à l'espèce
	Double décompte	Dénombrement manuel des tortues à partir d'orthophotographies

* : D'après Brack et collab. (2018).



Photo recadrée : Hydro-Québec

Figure 3. Tortues peintes en lézardage grégaire, secteur des Coteaux, sous-secteur ile d'Aloigny, photographiées à environ 10 m d'altitude lors de l'échantillonnage par drone en 2019.

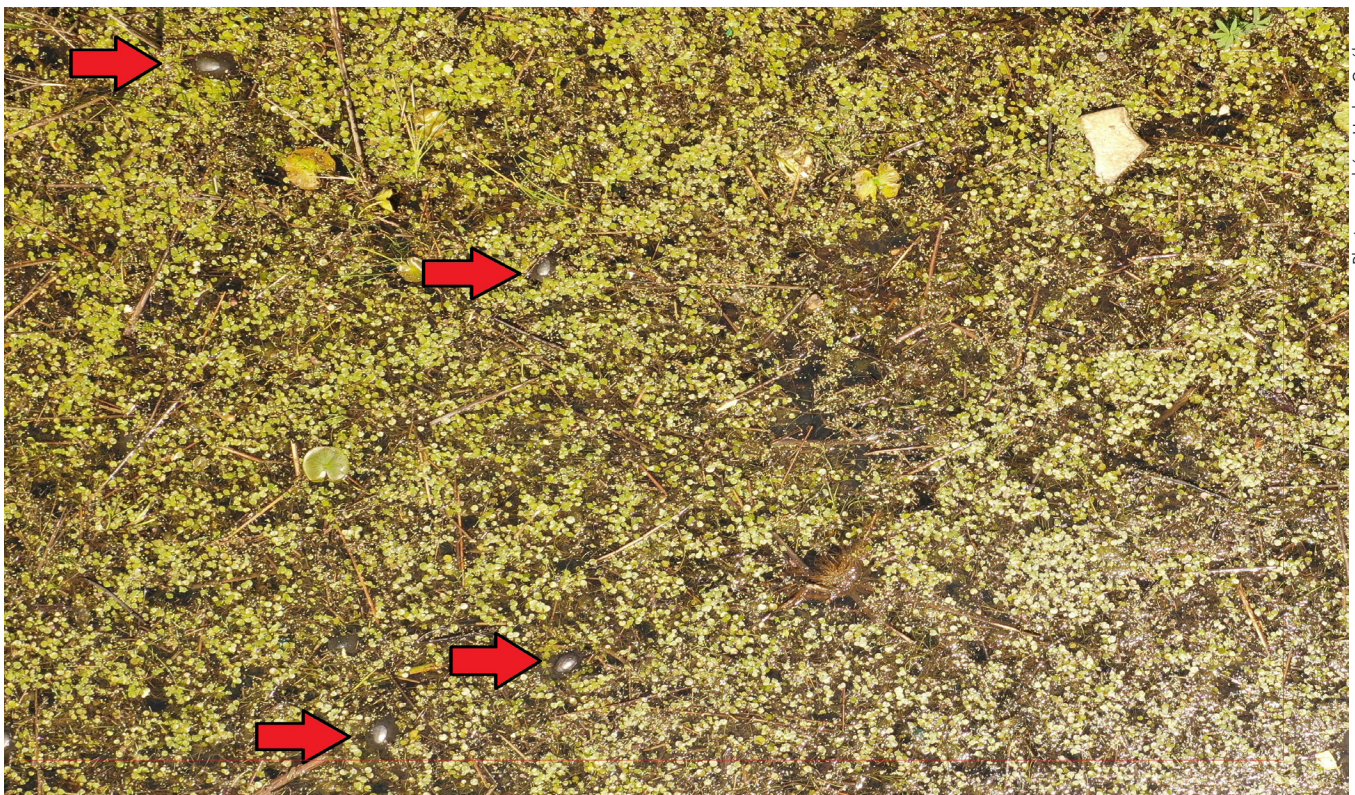


Photo recadrée : Hydro-Québec

Figure 4. Dossières émergées de tortues peintes dans la végétation aquatique dans le sous-secteur Les Faucilles Nord, à Pointe-des-Cascades, photographiées à environ 15 m d'altitude (DJI Mavic 2 Pro), lors de l'échantillonnage par drone en 2019.



Photo : Hydro-Québec

Figure 5. Tortue peinte en lézardage dans le secteur des Coteaux, sous-secteur île d'Aloigny, photographiée à environ 5 m d'altitude (DJI Mavic 2 Pro) lors de l'échantillonnage par drone en 2019. Remous dans l'eau causés par le drone.



Photo : Hydro-Québec

Figure 6. Tortue peinte présumée, en lézardage dans le secteur des Coteaux, sous-secteur île d'Aloigny, photographiée à environ 50 m d'altitude (DJI Phantom 4 Pro V2) lors de l'échantillonnage par drone en 2019.



Photo : Hydro-Québec

Figure 7. Dossière émergée d'une tortue serpentine dans la végétation aquatique du secteur des Coteaux, sous-secteur embouchure rivière Delisle, photographiée à environ 18 m d'altitude (DJI Mavic 2 Pro) lors de l'échantillonnage par drone en 2019.

dans la vase. Parmi les 4 espèces observées, la tortue serpentine était la plus facilement identifiable à une altitude de vol plus élevée. En effet, bien qu'ils ne soient pas visibles sur le moniteur en temps réel, la plupart des individus de cette espèce ont été détectés à partir d'une altitude de 50 m de hauteur (voir figure 6), lors de l'analyse des images du drone DJI Phantom 4 Pro V2. La réaction comportementale contre le drone était par ailleurs minime dans le cas de cette espèce. Certains individus se mettaient en mouvement à une altitude de vol du drone (DJI Mavic 2 Pro) à 7 ou 8 m, mais d'autres individus ne réagissaient pas à des hauteurs de vol inférieures (4 m).

Au total, 7 tortues géographiques ont été observées pendant ces inventaires, toutes en lézardage (figure 8). Ces individus avaient toutefois tous été repérés visuellement auparavant par l'observateur au sol. Les images de tortue géographique ont été obtenues grâce à l'assistance de l'observateur au sol qui guidait la pilote de drone vers le site où il voyait les tortues géographiques. Ces dernières n'ont donc pas été détectées grâce au moniteur du drone ni par l'analyse des images post-terrain. La carapace mate et le motif unique de celle-ci est bien visible à environ 20 m d'altitude avec le drone DJI Mavic 2 Pro. L'espèce était la plus farouche dans sa réaction à ce drone. Des comportements de fuite ont été observés à partir de 15 m bien que ces individus soient revenus rapidement sur leur site de lézardage après le passage de l'appareil. La détection de tortues géographiques plus fréquente par observation sur le terrain plutôt qu'en direct sur le moniteur ou par l'analyse d'images du

drone au retour du terrain pourrait s'expliquer par le fait qu'elles semblent apparemment peu abondantes dans les 3 secteurs d'étude. Tout comme la tortue peinte, elle est considérée comme une espèce grégaire, ce qui augmente les chances de repérer cette espèce par rapport à une autre plutôt solitaire.

Quant à la tortue à oreilles rouges (figure 8), une espèce exotique introduite potentiellement envahissante (Gouvernement du Québec, 2024), 3 individus ont été repérés en lézardage au même site. La dossière rappelle celle de la tortue peinte sans son aspect foncé et luisant. Il s'agissait de l'espèce la moins farouche, le drone pouvant s'approcher à 4 m de ces dernières sans qu'elles plongent dans l'eau. Ces 3 individus ont également été repérés par un observateur à l'embouchure de la rivière Delisle avant d'être photographiés par drone. Comme les tortues à oreilles rouges ont aussi été détectées lors des analyses post-terrain, elles ont été retenues pour les analyses statistiques.

Dans tous les cas, le dérangement occasionné par l'utilisation d'un drone semble beaucoup moins important que celui causé par les embarcations en mouvement. En effet, bon nombre de tortues sont demeurées immobiles au passage du drone à des altitudes de plus de 15 m, alors que la presque totalité des tortues retournent généralement dans l'eau lorsqu'une embarcation passe à proximité. Bevan et collab. (2018) mentionnent que des tortues de mer (la tortue à dos plat *Natator depressus*, la tortue imbriquée *Eretmochelys imbricata* et la tortue verte *Chelonia mydas*,) ne présentent pas de comportement de fuite en réponse au drone à des altitudes



Figure 8. Tortues à oreilles rouges (à gauche et au centre) et tortue géographique (à droite) en lézardage dans le secteur des Coteaux, sous-secteur de l'embouchure de la rivière Delisle, photographiées à environ 13 m d'altitude (DJI Mavic 2 Pro) lors de l'échantillonnage par drone en 2019.

de 20 à 30 m, lorsqu'un appareil survole les plages de ponte ou les habitats d'alimentation. Pour les tortues d'eau douce, la littérature sur ce sujet est limitée. Lors du recensement de 9 individus de 2 espèces de tortues différentes en Bulgarie, les auteurs suggèrent une hauteur de vol idéale de 10 m (Biserkov et Lukanov, 2017). Cette brève étude a cependant été réalisée en milieu urbain, notamment avec la tortue à oreilles rouges, l'espèce la moins farouche selon nos observations. Ces conditions ne sont probablement pas applicables à d'autres espèces de tortues dans des milieux plus sauvages, de sorte qu'il ne nous apparaît pas réaliste de pouvoir maintenir une altitude de 10 m en tout temps sans effaroucher certaines espèces de tortues retrouvées dans le sud du Québec. En Caroline du Nord, le taux de fuite des tortues en lézardage n'était que de 0,7 % lors de survols d'un drone à 20 m d'altitude (Escobar et collab., 2020). Néanmoins, dans un milieu plus diversifié de 6 espèces de tortues d'eau douce au Tennessee, Daniels (2018) rapporte devoir s'approcher aussi près qu'à 4 m des spécimens pour être en mesure d'identifier chacune des espèces, mais en utilisant davantage la vidéo que la photo. Le drone utilisé pour le projet de Daniels (2018) était le drone DJI Mavic Pro dont la caméra avait une définition de 12 mégapixels, ce qui était de trop faible résolution pour la photo-identification. En comparaison, le drone DJI Mavic 2 Pro utilisé dans notre étude était muni d'une caméra de 20 mégapixels (annexe).

Types de survol

Nos tests ont révélé que les vols automatisés à plus haute altitude (20 m) étaient plus efficaces à détecter les tortues que les vols à plus basse altitude. En effet, ce type de vol conjugué à l'analyse post-terrain des images s'est avéré la meilleure approche pour identifier et dénombrer les tortues. Un inventaire basé uniquement sur des vols pilotés manuellement et à basse altitude ne permettait que de repérer une faible fraction des individus tout en nécessitant beaucoup de temps et plusieurs changements de batterie.

Complémentarité des méthodes

Bien que notre analyse ait indiqué une différence significative du nombre moyen d'observations entre l'inventaire par drone et l'inventaire visuel, il apparaît que les 2 méthodes devraient être utilisées de façon concomitante, lorsque les accès terrestres le permettent. Au Tennessee, Daniels (2018) n'a pas noté de différence significative lorsque l'inventaire de tortues d'eau douce en rivière était effectué avec un drone ou une lunette d'approche. L'accessibilité au terrain peut donc influencer considérablement les résultats et ainsi permettre ou non à la méthode visuelle d'être efficace pour repérer et identifier des tortues. Dans notre étude, les vols automatisés suivis de l'analyse post-terrain des images permettaient de couvrir adéquatement plusieurs sites propices pour lesquels

aucun point d'accès terrestre n'était accessible pour faire l'inventaire visuel. Dans le sous-secteur de l'île Beaudry–pointe Larivière, presque aucune tortue n'était visible de la rive alors que l'analyse des images prises avec le drone permettait de repérer des dizaines de tortues cachées dans la végétation aquatique ou situées sur des sites de lézardage dans un angle mort de l'observateur sur la rive. Le drone permettait donc de repérer beaucoup plus d'individus dans les marais où la végétation aquatique était abondante, tandis que, dans d'autres milieux, notamment les milieux riverains ouverts, certaines tortues demeuraient aisément détectables à l'œil nu, aux jumelles ou à la lunette d'approche.

La richesse spécifique serait toutefois demeurée la même (4 espèces) à l'échelle des secteurs si nous avions effectué des inventaires visuels, sans l'aide d'un drone. Cependant, lorsqu'il s'agissait d'effectuer un dénombrement, le décompte d'individus par drone permettait d'estimer plus précisément le nombre d'individus à un site donné. Ainsi, pour les études dont l'objectif ultime serait de détecter des fluctuations de population, cette plus grande précision dans le dénombrement des tortues permettrait d'augmenter la puissance statistique (Hodgson et collab., 2018), mais sans pour autant remplacer le CMR (capture-marquage-recapture).

Recommandations

Les recommandations suivantes concernant les inventaires de tortues à l'aide de drones sont tirées de l'expérience acquise lors de la présente étude et d'informations tirées de la littérature scientifique (Escobar et collab., 2020; Hodgson et Koh, 2016; Mulero-Pázmány et collab., 2017).

- 1) La prise de photos afin de créer une mosaïque d'images s'est avérée être l'outil de prédilection pour repérer et identifier des tortues dans cette étude. La vidéo a cependant permis des résultats concluants pour les tortues d'eau douce dans d'autres études (Gordon et collab., 2023).
- 2) L'analyse d'images au retour du terrain, bien que fort utile, nécessite un temps d'analyse considérable, selon la superficie à couvrir. L'analyse visuelle ou automatisée des photos devrait aussi être validée respectivement par au moins 2 observateurs ou des tests comparatifs pour limiter les erreurs de perception (Brack et collab., 2018). Il faut donc prévoir un temps d'analyse important et le budget en conséquence. Comme il a été relevé dans d'autres études scientifiques (Brack et collab., 2018; Hodgson et collab., 2018), le développement de méthodes d'analyse d'images par ordinateur devrait permettre d'accélérer l'étape fastidieuse d'analyse des images et d'améliorer la précision des décomptes.
- 3) À partir du moment où les tortues sont identifiables à l'espèce, il est préférable de voler le plus haut possible, autant pour réduire le temps de vol que pour limiter le dérangement (Hodgson et Koh, 2016). Selon nos résultats, l'altitude optimale se situait à 20 m dans les conditions rencontrées, bien qu'il ait été possible d'identifier des individus à l'espèce jusqu'à 50 m lors de

l'analyse des photos au retour du terrain. C'est également cette même hauteur de vol (20 m) qui est suggérée afin de limiter le dérangement de la podocnémie de Cayenne (*Podocnemis unifilis*) au Brésil (Fagundes et collab., 2022). Le Protocole standardisé de détection et d'identification des tortues d'eau douce à l'aide de drones au Québec (MFFP, 2021) ainsi que Charbonneau et Lemaître (2021) font également mention d'une recommandation préliminaire pour une altitude de 20 m pour effectuer des inventaires de tortues sans les déranger.

- 4) À une altitude de vol de 20 m et plus, le grossissement numérique sera normalement nécessaire lors de l'analyse des images pour l'identification des tortues, de sorte que la caméra du drone devrait avoir une définition d'au minimum 20 mégapixels. Une résolution plus basse rendra l'identification et le repérage des tortues difficiles (Daniels, 2018; Escobar et collab., 2020).
- 5) Les conditions météorologiques comportant un faible vent, sans précipitation, et une température variant de 10 à 25 °C devraient être privilégiées (MFFP, 2021).

Conclusion

La présente étude démontre que l'approche utilisée (drone et analyses post-terrain des images) permet d'obtenir des résultats probants (identification à l'espèce, richesse spécifique, dénombrement) lorsque les conditions optimales sont remplies, tout particulièrement lorsque l'objectif de l'étude est d'identifier les zones importantes de concentration de tortues dans un secteur donné. Toutefois, il est possible que l'efficacité de la méthode par drone diminue dans des environnements où la densité des tortues est faible, lorsque les accès terrestres pour les opérateurs sont limités ou encore que la canopée couvre une superficie appréciable de la zone d'inventaire. De plus, la réglementation actuelle au Canada impose d'avoir le drone à vue, ce qui peut limiter son utilisation dans certaines situations. Cette méthode présente cependant un potentiel intéressant pour réaliser des inventaires dans des milieux où l'observation directe est limitée ou même impossible. Elle peut aussi être utilisée pour le repérage dans des projets prévoyant la capture en permettant d'identifier les secteurs fréquentés par les tortues dans un milieu humide ou hydrique de grande superficie avec peu d'accès à la rive ou difficilement navigable. L'observation des tortues par drone est une avancée prometteuse en raison de son efficacité par rapport à l'observation à partir du sol ou d'une embarcation. L'efficacité de la méthode sur la tortue géographique et la tortue à oreilles rouges restent cependant à préciser, nos résultats ne pouvant pas nous permettre de tirer des conclusions. En effet, les tortues géographiques détectées pendant ces relevés l'ont été grâce à la méthode traditionnelle, c'est-à-dire à partir du sol avec des jumelles. Il apparaît néanmoins probable que le drone puisse être tout aussi efficace pour la tortue géographique dans d'autres circonstances, puisque cette espèce pratique le lézardage à découvert comme la tortue peinte. L'amélioration de la différenciation des

juvéniles des adultes demeure pour l'instant un défi. Dans un avenir rapproché, il est probable que les drones, couplés à des caméras adéquates et à des outils d'analyse liés à l'intelligence artificielle, permettront d'améliorer les inventaires et les suivis des populations de tortues d'eau douce, notamment les espèces nécessitant des actions de conservation.

Remerciements

Ce projet a pu se concrétiser grâce à l'appui et au financement d'Hydro-Québec. Nous tenons à remercier Marie-Ève Côté et Karine Roberge pour leur contribution en géomatique, Marie-Josée Grimard comme directrice environnement chez Hydro-Québec et Christian Laliberté pour la direction de projet chez AtkinsRéalis. Nous remercions également le travail du rédacteur adjoint, Marc Mazerolle, des réviseurs anonymes, du rédacteur en chef adjoint, Claude Samson, et de la rédactrice en chef, Denise Tousignant, ainsi que les autres bénévoles de l'équipe de la revue *Le Naturaliste canadien* qui ont participé à la vérification technique, à la révision linguistique et à l'édition finale du manuscrit. ◀

Références

- [AARQ] ATLAS DES AMPHIBIENS ET DES REPTILES DU QUÉBEC, 2019. Atlas des amphibiens et des reptiles du Québec: banque de données active depuis 1998 alimentée par des bénévoles et professionnels de la faune. Société d'histoire naturelle de la vallée du Saint-Laurent et Centre de données sur le patrimoine naturel du Québec, résultats obtenus en avril 2019. <https://www.atlasamphibiensreptiles.qc.ca/wp/>.
- BARNAS, A.F., D. CHABOT, A.J. HODGSON, D.W. JOHNSTON, D.M. BIRD et S.N. ELLIS-FELEG, 2020. A standardized protocol for reporting methods when using drones for wildlife research. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 8 (2): 89-98. <http://dx.doi.org/10.1139/juvs-2019-0011>.
- BEVAN, E., S. WHITING, Y. TUCKER, M. GUINEA, A. RATH et R. DOUGLAS, 2018. Measuring behavioral responses of sea turtles, saltwater crocodiles, and crested terns to drone disturbance to define ethical operating thresholds. *PLOS ONE*, 13 (3): e0194460. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0194460>.
- BISERKOV, V.Y. et S.P. LUKANOV, 2017. Unmanned aerial vehicles (UAVs) for surveying freshwater turtle populations: Methodology adjustment. *Acta Zoologica Bulgarica*, 10: 161-163.
- BOGOLIN, A.P., D.R. DAVIS, R.J. KLINE et A.F. RAHMAN, 2021. A drone-based survey for large, basking freshwater turtle species. *PLOS ONE* 16 (10): e0257720. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257720>.
- BOYER, D.R., 1965. Ecology of the basking habit in turtles. *Ecology*, 46: 99-118.
- BRACK, I.V., A. KINDEL et L.F.B. OLIVEIRA, 2018. Detection errors in wildlife abundance estimates from unmanned aerial systems (UAS) surveys: Synthesis, solutions, and challenges. *Methods in Ecology and Evolution*, 9 (8): 1864-1873.
- BULTÉ, G. et G. BLOUIN-DEMERS, 2010. Implications of extreme sexual size dimorphism for thermoregulation in a freshwater turtle. *Oecologia*, 162: 313-322. <http://dx.doi.org/10.1007/s00442-009-1469-8>.
- CHABOT, D. et D.M. BIRD, 2015. Wildlife research and management methods in the 21st century: Where do unmanned aircraft fit in? *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3 (4): 137-155. <https://doi.org/10.1139/juvs-2015-0021>.
- CHARBONNEAU, P. et J. LEMAÎTRE, 2021. Revue des applications et de l'utilité des drones en conservation de la faune. *Le Naturaliste canadien*, 145 (2): 3-34. <https://doi.org/10.7202/1080620ar>.
- DANIELS, K., 2018. Inferences about the conservation utility of using unmanned aerial vehicles to conduct rapid assessments for basking freshwater turtles. Mémoire de maîtrise, University of Tennessee at Chattanooga, Chattanooga, 70 p.
- DUFFY, J.P., A.M. CUNLIFFE, L. DEBELL, C. SANDBROOK, S.A. WICH, J.D. SHUTLER, I.H. MYERS-SMITH, M.R. VARELA et K. ANDERSON, 2018. Location, location, location: Considerations when using lightweight drones in challenging environments. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 4 (1): 7-19. <http://dx.doi.org/10.1002/rse2.58>.
- ERNST, C.H. et J.E. LOVICH, 2009. *Turtles of the United States and Canada*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, 827 p.
- ESCOBAR, J.E.C., M. ROLLINS et S. UNGER, 2020. Preliminary data on an affordable UAV system to survey for freshwater turtles: Advantages and disadvantages of low-cost drones. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 9 (1): 67-74. <http://dx.doi.org/10.1139/juvs-2018-0037>.
- FAGUNDES, C.K., M. AMEND et C. FERRARA, 2022. The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) to study a freshwater turtle population in the Brazilian Amazon. *Herpetological Conservation and Biology*, 17 (1): 43-50. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235537>.
- GORDON, M., J. NAGRO, D. DECHELLIS, J. OAKLEY, J.J. APODACA, L. COLLINS, L. SPEIGHT, M. MOKRECH, D. BUSH et G. GUILLEN, 2023. Distribution and habitat association of Western Chicken Turtles (*Deirochelys reticularia miaria*) in Texas. Rapport final n° EIH23-001, préparé pour le Texas Comptroller of Public Accounts (contract 20-6997BG), 133 p. <https://www.uhcl.edu/environmental-institute/research/publications/documents/23-001-distribution-habitat-association-western-chicken-turtle-final-report.pdf>.
- GOVERNEMENT DU QUÉBEC, 2024. Tortue à oreilles rouges (*Trachemys scripta elegans*). <https://mffp.gouv.qc.ca/la-faune/especes/envahissantes/tortue-oreille-rouge/>.
- HODGSON, J.C. et L.P. KOH, 2016. Best practice for minimising unmanned aerial vehicle disturbance to wildlife in biological field research. *Current Biology*, 26 (10): R404-R405. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2016.04.001>.
- HODGSON, J.C., R. MOTT, S.M. BAYLIS, T.T. PHAM, S. WOTHERSPOON, A.D. KILPATRICK, R.R. SEGARAN, I. REID, A. TERAUDS et L.P. KOH, 2018. Drones count wildlife more accurately and precisely than humans. *Methods in Ecology and Evolution*, 9 (5): 1160-1167. <http://dx.doi.org/10.1111/2041-210X.12974>.
- HUTCHISON, V.H., 1979. Thermoregulation. Dans: HARLESS, M. et H. MORLOCK (édit.). *Turtles: Perspectives and research*. Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar, 695 p.
- KARCHER, J., 2019. Biotelemetric study comparing diving behavior and brumation sites of translocated and resident northern map turtles (*Graptemys geographica*) and their response to replica model turtles on artificial basking/nesting platforms in the Upper Niagara River. Mémoire de maîtrise, State University of New York, Buffalo, 67 p.
- KRAWCHUK, M.A. et R.J. BROOKS, 1998. Basking behavior as a measure of reproductive cost and energy allocation in the painted turtle, *Chrysemys picta*. *Herpetologica*, 54 (1): 112-121.
- LEFEVRE, K. et R.J. BROOKS, 1995. Effects of sex and body size on basking behavior in a northern population of the painted turtle, *Chrysemys picta*. *Herpetologica*, 51: 217-224.
- LINDEMAN, P.V., 2000. Resource use of five sympatric turtle species: Effects of competition, phylogeny, and morphology. *Canadian Journal of Zoology*, 78 (6): 992-1008. <http://dx.doi.org/10.1139/z00-013>.
- [MFFP] MINISTÈRE DES FORÊTS, DE LA FAUNE ET DES PARCS, 2018. Protocole d'inventaire pour la détection de la tortue géographique au Québec. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la gestion de la faune de l'Estrie, de Montréal, de la Montérégie et de Laval, Secteur des opérations régionales, Longueuil, Québec, 13 p.

- [MFFP] MINISTÈRE DES FORÊTS, DE LA FAUNE ET DES PARCS, 2021. Protocole standardisé de détection et d'identification des tortues d'eau douce à l'aide de drones au Québec. Gouvernement du Québec, Québec, 53 p. + ann. <https://mffp.gouv.qc.ca/nos-publications/protocole-detection-tortues-drones/>.
- MULERO-PÁZMÁNY, M., S. JENNI-EIERMANN, N. STREBEL, T. SATTler, J.J. NEGRO et Z. TABLADO, 2017. Unmanned aircraft systems as a new source of disturbance for wildlife: A systematic review. PLOS ONE 12 (6): e0178448. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0178448>.
- OBbARD, M.E. et R.J. BROOKS, 1979. Factors affecting basking in a northern population of the common snapping turtle, *Chelydra serpentina*. Canadian Journal of Zoology, 57 (2): 435-440. <http://dx.doi.org/10.1139/z79-051>.
- PARMENTER, R.R., 1981. Digestive turnover rates in freshwater turtles: The influence of temperature and body size. Comparative Biochemistry and Physiology, 70 (2): 235-238. [http://dx.doi.org/10.1016/0300-9629\(81\)91451-1](http://dx.doi.org/10.1016/0300-9629(81)91451-1).
- SCHOFIELD, G., N. ESTEBAN, K.A. KATSELIDIS et G.C. HAYS, 2019. Drones for research on sea turtles and other marine vertebrates—A review. Biological Conservation, 238: 108214. <https://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108214>.
- STEYERMARK, A.C., M.S. FINKLER et R.J. BROOKS, 2008. Biology of the snapping turtle (*Chelydra serpentina*). Johns Hopkins University Press, Baltimore, 225 p.
- YANEY-KELLER, A., R. SAN MARTIN et R.D. REINA, 2021. Comparison of UAV and boat surveys for detecting changes in breeding population dynamics of sea turtles. Remote Sensing, 13 (15): 2857. <http://dx.doi.org/10.3390/rs13152857>.
- WANG, D., Q. SHAO et H. YUE, 2019. Surveying wild animals from satellites, manned aircraft and unmanned aerial systems (UASs): A review. Remote Sensing, 11 (11): 1308. <https://dx.doi.org/10.3390/rs11111308>.

Annexe

Supplément méthodologique décrivant l'usage des drones (basé sur les recommandations de Barnas et collab., 2020).

1. Objectif général :

Prise d'images fixes d'habitats susceptibles d'abriter des tortues d'eau douce.

2. Systèmes d'opération des drones**2.1 Spécifications des plateformes****2.1.1 DJI Phantom 4 Pro V2**

- Quadricoptère
- Poids : 1375 g
- Endurance de vol : 30 min (batterie Phantom IV)
- Capteur : 1 po CMOS 20 mégapixels
- Distance focale : équivalent 35 mm
- Ouverture de diaphragme géométrique : f/2.8–f/11 (généralement F/5)
- Vitesse de l'obturateur électronique : jusqu'à 1/8000 s
- ISO : ISO-100-3200 (généralement ISO 100)
- Caméra fixe
- Mode photographie : prise de vue simple
- Prise automatique de photo lors des vols
- Cartes micro SD
- Géoréférencement automatique pour chaque image

2.1.2 DJI Mavic 2 Pro

- Quadricoptère
- Poids : 907 g
- Endurance de vol : 30 min (batterie Mavic)
- Capteur : 1 po CMOS 20 mégapixels
- Distance focale : 10-35 mm
- Ouverture de diaphragme géométrique : f/2.8–f/11 (généralement F/5)
- Vitesse de l'obturateur mécanique : 1/2000 s (généralement 1/320)
- ISO : ISO-100
- Caméra fixe
- Prise de photos manuelle
- Cartes micro SD
- Géoréférencement automatique pour chaque image

2.2. Méthodes et exigences pour le décollage du drone

Le drone décollait et était récupéré sur une surface plane dégagée d'au minimum 5 m². Un tapis de décollage, un cône orange, un extincteur et une trousse de premiers soins faisaient partie de l'équipement de base en tout temps.

2.3 Approche générale pour les vols durant l'étude

Vols autonomes pour la reconnaissance et vols manuels pour la recherche de tortues.



Figure A1. Drone DJI Phantom 4 Pro V2.



Figure A2. Drone DJI Mavic 2 Pro.

2.4 Type de données récoltées avec le drone

Des photographies aériennes détaillées ont été prises sur l'ensemble du territoire. À partir de ces images géoréférencées, des photographies aériennes ont ensuite été produites en format Geotiff en utilisant le système de projection NAD27(CGQ77) UTM zone 18N compatible avec tous les logiciels de géomatique, et ce, à une résolution de 3 cm. L'analyse de ces photographies aériennes pour détecter la présence de tortues a été réalisée au retour du terrain.

3. Détails des opérations

- Heures des vols entre 9 h et 16 h
- Températures entre 13 et 27 °C
- Vents entre 0 et 3 sur l'échelle de Beaufort

4. Traitement des données post-terrain

Les inventaires sur le terrain étaient suivis d'une phase de post-traitement des images pour préparer une mosaïque 2D orthorectifiée, et ce, à partir du logiciel DroneDeploy. Un premier traitement a été effectué à l'aide du logiciel pour sélectionner les images les plus nettes afin de garantir la qualité de la mosaïque. Le logiciel effectue ensuite un travail de géoréférencement des images, puis d'orthorectification. Finalement, les images sont assemblées entre elles de manière à créer une mosaïque. Une fois la mosaïque d'images obtenue, chaque secteur d'étude a été scruté attentivement avec DroneDeploy en utilisant la fonction de zoom au besoin. Une note géoréférencée a été ajoutée sur DroneDeploy à chaque observation de tortues avec l'identification de l'espèce et le nombre d'individus par point.

5. Listes des permis d'utilisation du drone et certification du pilote

- Certificat restreint d'opérateur de compétence en radio
- Certification du pilote pour les opérations avancées
- Formation de pilotes de drones civils de l'école I/Drone Montréal

Tous les vols ont été réalisés en accord avec la réglementation encadrant l'utilisation d'un drone à des fins non récréatives (Règlement de l'aviation canadien). Le type d'espace aérien a été vérifié à chaque vol et une radio VHF (Yaesu FTA-550 Pro-X) était disponible en tout temps pour communiquer avec les aéronefs de la zone. Des avis de vol ont été envoyés chaque fois à Hydro-Québec Drones qui était responsable de réguler le trafic hélicoptère et avion dans la zone. Aucune mesure particulière n'a été prise relativement à l'aéroport international Pierre-Elleot-Trudeau de Montréal en raison de la distance (plus de 35 km).

Tableau A1. Résultats par secteur des inventaires de tortues détectées selon la méthode.

Date (2019)	Secteur	Sous-secteur	Nombre de visites	Espèce détectée*	Nombre d'individus	Méthode d'observation
27 mai	Des Coteaux	Aloigny	0	TOPE	36	drone
			0	TOSE	1	visuelle
	Pointe-des-Cascades	Pointe-du-Buisson	0	-	0	drone
	Structure 1	Île Beaudry-Pointe Larivière	0	TOPE	32	drone
			0	TOSE	1	drone
		Île Forest	0	-	0	drone
29 mai	Des Coteaux	Aloigny	1	TOPE	28	drone
			1	TOSE	1	visuelle
		Bienville	1	-	0	drone
		Digue	1	-	0	drone
31 mai	Pointe-des-Cascades	Île barrage Pointe-des-Cascades	1	-	0	drone
		Île des Cascades	1	-	0	drone
		Île Joybert	1	-	0	drone
		Pointe-du-Buisson	1	-	0	drone
6 juin	Pointe-des-Cascades	Cordon entre les îles	1	-	0	drone
		Île des Cascades	2	-	0	drone
		Les Faucilles littoral	2	-	0	drone
	Structure 1	Île Beaudry-Pointe Larivière	1	TOPE	52	drone
			1	TOSE	7	drone
			1	-	0	visuelle
7 juin	Des Coteaux	Dondaine	1	-	0	drone
	Pointe-des-Cascades	Chemin du fleuve	1	-	0	drone
		Île barrage Pointe-des-Cascades	2	-	0	drone
		Pointe-du-Buisson	2	-	0	drone

Tableau A1. Résultats par secteur des inventaires de tortues détectées selon la méthode. (Suite)

Date (2019)	Secteur	Sous-secteur	Nombre de visites	Espèce détectée*	Nombre d'individus	Méthode d'observation
12 juin	Pointe-des-Cascades	Île Joybert	3	-	0	drone
	Structure 1	Île Beaudry-Pointe Larivière	2	TOPE	21	drone
			2	TOSE	1	drone
			2	TOPE	2	visuelle
17 juin	Des Coteaux	Aloigny	2	TOPE	67	drone
		Digue	2	TOPE	3	drone
		Dondaine	2	TOPE	3	drone
			2	TOSE	1	visuelle
		Embouchure Delisle	1	TOOR	2	drone
			1	TOGE	1	visuelle
			1	TOOR	1	visuelle
18 juin	Pointe-des-Cascades	Chemin du fleuve	2	-	0	drone
		Les Faucilles littoral	2	-	0	drone
			1	TOPE	21	drone
			1	TOSE	2	drone
			1	TOGE	6	visuelle
			1	TOSE	1	visuelle
	Structure 1	Île Beaudry-Pointe Larivière	3	TOPE	42	drone
			3	TOSE	1	drone
			3	-	0	visuelle
26 juin	Des Coteaux	Digue	3	TOPE	1	drone
			3	TOSE	1	visuelle
		Dondaine	3	TOPE	11	drone
			3	TOSE	1	drone
		Embouchure Delisle	2	TOPE	14	drone
			2	TOSE	1	drone
			2	TOGE	1	visuelle
			2	TOOR	3	visuelle
3 juillet	Pointe-des-Cascades	Chemin du fleuve	2	-	0	drone
		Île barrage Pointe-des-Cascades	3	-	0	drone
		Île des Cascades	3	-	0	drone
		Les Faucilles littoral	3	-	0	drone
		Les Faucilles Nord	2	TOGE	1	visuelle
		Pointe-du-Buisson	3	-	0	drone
8 juillet	Des Coteaux	Aloigny	3	TOPE	70	drone
			3	TOSE	3	drone
		Embouchure Delisle	3	TOPE	10	drone
			3	TOOR	2	visuelle

*Espèces : TOPE = tortue peinte ; TOSE = tortue serpentine ; TOGE = tortue géographique ; TOOR = tortue à oreilles rouges.