



Utilisation de la télémétrie satellitaire pour estimer l'abondance d'une population de caribous migrants

ENSEMBLE  
on fait avancer le Québec

Québec 

ÉQUIPE DE RÉALISATION

Auteurs :

Direction de la gestion de la faune du Nord-du-Québec

Vincent Brodeur

Stéphane Rivard

Direction de l'expertise sur la faune terrestre, l'herpétofaune et l'avifaune

Christian Dussault

Léa Harvey

Joëlle Taillon

BRODEUR, Vincent ; RIVARD, Stéphane ; DUSSAULT, Christian; HARVEY, Léa; TAILLON, Joëlle (2017). *Utilisation de la télémétrie satellitaire pour estimer l'abondance d'une population de caribous migrants*. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Québec, 25 p.

© Gouvernement du Québec

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2017

ISBN 978-2-550-79799-9 (imprimé)

ISBN 978-2-550-79800-2 (PDF)

Remerciements

La méthodologie présentée dans le présent rapport a été testée lors d'inventaires aériens réalisés au Nunavik et au Labrador depuis 2010, chacun achevé avec succès grâce à un travail d'équipe. Nous tenons à remercier Charles Jutras et Lyna Lambert, techniciens de la faune de la Direction de la gestion de la faune du Nord-du-Québec, ainsi que Serge Couturier, biologiste et ancien collègue, qui ont étroitement collaboré lors des récents inventaires des populations de caribous migrants. Les inventaires du troupeau de la rivière George ont aussi été réalisés en collaboration avec Sara McCarty, Shannon Crowley, David Elliott, Richard Neville et John Pisapio, du Gouvernement de Terre-Neuve-et-Labrador, et de Jennifer Mitchell Foley du Torngat Wildlife and Plants Co-Management Board. Il est important de souligner que les précédents travaux d'inventaires aériens post-mise bas réalisés au Québec et au Labrador, réalisés en 1993 et en 2001, sont à la base de l'approche présentée dans ce rapport. Enfin, nos remerciements vont à Josée Boivin, adjointe administrative à la Direction de la gestion de la faune du Nord-du-Québec, pour la révision de la version définitive du document.

Résumé

Les inventaires aériens des populations de caribous migrants du troupeau de la rivière aux Feuilles (TRAF) et du troupeau de la rivière George (TRG) sont réalisés selon une approche de « capture-marquage-recapture » (CMR) depuis que l'efficacité de cette méthode a été démontrée. Ce rapport présente les étapes de préparation et de réalisation d'un inventaire aérien d'une population de caribous migrants, basé sur l'utilisation d'un nombre adéquat de colliers télémétriques satellitaires répartis aléatoirement et entre des mâles et des femelles. Cette approche permet de valoriser la simplicité du modèle de Lincoln-Petersen, tel que le propose Chapman (1951; dans White et Garrott, 1990). Les prérequis méthodologiques et les prémisses de base du modèle qui doivent être respectés afin d'assurer la rigueur scientifique de ce modèle sont présentés en fonction des particularités du comportement des caribous migrants. Les préparatifs et les éléments techniques liés à l'échantillonnage des groupes de caribous et à leur décompte sur photographies sont décrits en détail. Finalement, le calcul de l'abondance d'une population et de son intervalle de confiance est présenté de pair avec les critères d'évaluation de la validité du résultat. L'utilisation de l'approche de CMR pour évaluer l'abondance d'une population de caribous migrants est toutefois conditionnelle aux grands regroupements des caribous qui surviennent brièvement lors de conditions environnementales particulières.

Table des matières

Remerciements.....	iii
Résumé	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux.....	vi
Liste des figures.....	vii
Introduction	1
Prérequis et préparation de l'inventaire	3
Suivi télémétrique représentatif de la population	3
Estimation du nombre adéquat de colliers émetteurs	5
Conditions environnementales propices aux agrégations	7
Préparation logistique.....	8
Réalisation de l'échantillonnage.....	9
Télémétrie VHF	9
Détermination du statut des individus marqués	11
Échantillonnage des groupes de caribous	11
Analyse des résultats.....	15
Dénombrement des faons	15
Traitement des images et décompte des groupes	16
Analyse des groupes atypiques.....	19
Calcul de l'abondance de la population	22
Références	25

Liste des tableaux

- Tableau 1. Caractéristiques de l'échantillon d'individus marqués relativement au nombre de groupes et à l'abondance de la population adulte (≥ 1 an) de caribous migrants pour les sept inventaires réalisés avec la méthode de CMR au Québec et au Labrador, dont l'intervalle de confiance était $< 20\%$ ($\alpha = 0,10$). 5
- Tableau 2. Exemple d'un tableau regroupant les données techniques des individus marqués qui permettent de planifier la navigation et qui informent la prise de décision en vol lorsque le signal radio d'un individu marqué est détecté. La description des champs est présentée ci-dessous..... 15

Liste des figures

- Figure 1. Paysage typique de l'habitat estival du troupeau de la rivière aux Feuilles dans les monts Puvirnituk (61,5° N. et 74° O.). Les caribous s'y regroupent par milliers, ce qui permet la réalisation d'un inventaire selon la technique de capture-marquage-recapture. La toundra est l'habitat le plus favorable aux inventaires puisque l'absence de couvert forestier facilite la prise des photographies qui serviront ensuite à dénombrer les caribous de chaque groupe..... 2
- Figure 2. Un petit groupe de caribous profite d'un des derniers îlots de neige pour se rafraîchir et limiter son exposition aux insectes piqueurs (30 juillet 2016, inventaire du TRAF). 8
- Figure 3. Exemple d'une des trois antennes directionnelles de type « H » qui sont fixées aux patins de l'hélicoptère grâce à une attache homologuée par Transport Canada et reliées au système de télémétrie VHF par un câble coaxial. 10
- Figure 4. Récepteur radio pour la télémétrie VHF et commutateur « *switch box* » permettant de sélectionner les antennes directionnelles. 12
- Figure 5. Tous les caribous de ce secteur se regroupent sur cette plage près de la côte du détroit d'Hudson, probablement pour se soulager du harcèlement des insectes. ... 14
- Figure 6. Les photographies sont analysées à l'aide d'un logiciel de traitement d'image qui permet de tracer les limites de la mosaïque qui seront respectées lors du décompte et d'identifier le numéro des photographies adjacentes. Les photographies a) et b) présentent un exemple du traitement de deux photographies successives (n° 75 et n° 76)..... 18
- Figure 7. Exemple de l'interface du logiciel utilisé pour réaliser le décompte des groupes. La qualité des photographies influence grandement l'aisance avec laquelle cette étape peut être réalisée. Cette approche permet une grande flexibilité pour la visualisation des images et permet facilement de valider ou de modifier le décompte. 19
- Figure 8. Les caribous sont parfois difficiles à distinguer dans un arrière-plan peu contrastant (a), ce qui nécessite parfois l'ajustement du contraste et de la luminosité des photographies. Un agrandissement de la photographie a) est présenté en b) afin d'illustrer l'importance des photographies numériques à haute résolution dans l'échantillonnage de grands groupes. 21

Introduction

Deux populations de caribous migrants fréquentent le Québec, soit le troupeau de la rivière aux Feuilles, qui y habite exclusivement, et le troupeau de la rivière George dont l'aire de répartition s'étend jusqu'au Labrador. Les inventaires aériens de ces populations de caribous migrants sont réalisés selon une approche de « capture-marquage-recapture » depuis qu'il a été démontré que cette méthode est efficace (Russell et coll., 1996). Les inventaires réalisés selon l'approche de CMR sont possibles grâce aux grands rassemblements de caribous, dont l'emplacement est connu en raison d'un nombre suffisant d'individus portant un collier émetteur au sein de la population. Ces rassemblements surviennent principalement à l'été, pendant la période dite de « post-mise bas », alors que le harcèlement par les insectes piqueurs incite les caribous à se regrouper (figure 1). Ces regroupements peuvent aussi, exceptionnellement, survenir lors de la migration printanière ou automnale, alors que les caribous empruntent des trajectoires migratoires convergentes. La méthode de CMR a remplacé les inventaires qui étaient auparavant réalisés au moment de la mise bas au Nunavik et au Labrador, notamment parce que cette méthode permet de produire une estimation plus fiable lorsque les conditions de réalisation sont réunies. Ce gain est attribuable au décompte simultané de tous les segments de la population de caribous adultes (≥ 1 an), et même parfois des faons, comparativement à l'inventaire de mise bas qui s'appuie sur une extrapolation basée uniquement sur le segment des femelles gestantes occupant l'aire de mise bas. La méthode de CMR permet ainsi d'estimer la taille de la population en se basant sur un échantillon constitué de la vaste majorité de la population. Cette approche diminue considérablement les biais potentiels en réduisant le nombre de paramètres à estimer et la marge d'erreur qui leur est associée.



Figure 1. Paysage typique de l'habitat estival du troupeau de la rivière aux Feuilles dans les monts Puvirnituk (61,5° N. et 74° O.). Les caribous s'y regroupent par milliers, ce qui permet la réalisation d'un inventaire selon la technique de capture-marquage-recapture. La toundra est l'habitat le plus favorable aux inventaires, puisque l'absence de couvert forestier facilite la prise des photographies qui serviront ensuite à dénombrer les caribous de chaque groupe.

Pour estimer la taille d'une population par CMR, les conditions suivantes sont nécessaires :

1. La population est fermée, elle varie donc uniquement en fonction des naissances et des morts;
2. Les individus marqués sont dispersés aléatoirement dans la population (test de khi-deux);
3. La méthode permet de recapter (photographier) les individus marqués, et ce, dans une grande proportion;
4. La méthode d'analyse compense les biais potentiels liés au nombre et à la composition de l'échantillon des individus marqués (taille de l'échantillon, particularités comportementales, etc.).

La qualité du suivi télémétrique, et donc de l'échantillonnage de la population, bénéficie grandement des avancées technologiques et de la réduction du coût des colliers émetteurs. Il est désormais possible de marquer suffisamment d'individus de chaque sexe et de connaître leur position sur une base quotidienne, et possiblement plus fréquemment. La transmission régulière de la position d'un grand nombre d'individus permet à l'équipe d'inventaire de se diriger directement vers tous les groupes significatifs de caribous. Ces connaissances détaillées sur les déplacements des caribous réduisent l'incertitude quant à l'emplacement des individus marqués, et donc de la population dans son ensemble, éliminant de ce fait le besoin d'effectuer des lignes de vol pour délimiter une aire d'étude et confirmer préalablement le nombre de colliers actifs (voir Couturier et coll., 2004). Ainsi l'utilisation de modèles statistiques complexes (Rivest et coll., 1998;

Crépeau et coll., 2012), visant à compenser une information fragmentaire de la position des caribous ou un nombre parfois insuffisant d'individus marqués, n'est plus nécessaire.

Le texte suivant présente en détail l'approche d'inventaire utilisée pour le caribou migrant dans le Nord-du-Québec ainsi que ses exigences méthodologiques. Cette approche valorise la simplicité du modèle de Lincoln-Petersen, tel que le propose Chapman (1951; dans White et Garrott, 1990), en minimisant les biais potentiels grâce à la technologie satellitaire et à une taille d'échantillon adéquate d'individus marqués.

Prérequis et préparation de l'inventaire

Suivi télémétrique représentatif de la population

Au Québec et au Labrador, les gouvernements utilisent des colliers émetteurs depuis les années 1960 pour effectuer le suivi des populations de caribous migrants. L'évolution technologique a permis de bonifier le suivi télémétrique en équipant certains caribous d'un collier muni d'un émetteur satellitaire Argos. Ces premiers émetteurs satellitaires permettaient aux satellites de calculer et de transmettre une position approximative du caribou marqué (moins de 100 m à plus de 1 500 m) à un intervalle de cinq jours par un service de télécommunication. Les émetteurs Argos ont été utilisés dès 1986, sur le TRG, et dès 1993, sur le TRAF. Plus récemment, l'ajout d'un récepteur GPS (*Global Positioning System*) au collier émetteur et la diversification des systèmes de télécommunication satellitaire ont permis de transmettre une localisation très précise à l'aide d'un émetteur satellitaire Argos, Iridium ou Globalstar. Des colliers émetteurs équipés d'un récepteur GPS et d'un émetteur satellitaire ont été utilisés pour la première fois en 2007 sur le TRAF et le TRG. Les colliers émetteurs équipés uniquement d'un émetteur radio VHF, sans émetteur satellitaire, ne sont plus utilisés sur le caribou migrant au Québec ni au Labrador depuis 2001. En 2017, tous les colliers du TRAF et du TRG étaient équipés d'un émetteur radio VHF, d'un GPS et d'un émetteur satellitaire qui transmet quotidiennement une localisation.

L'atteinte d'une bonne couverture télémétrique de la population implique que les individus marqués soient dispersés aléatoirement dans l'ensemble de l'aire de répartition. Les expéditions de marquage des individus sont planifiées en suivant cet objectif. Elles sont réalisées en hélicoptère durant l'hiver, soit au moment le plus opportun pour réaliser des captures avec un lance-filet. Les grands rassemblements hivernaux de caribous et les réseaux extensifs de pistes dans la neige contribuent à maintenir un échantillon représentatif de la population, car ils permettent de détecter les groupes de caribous en marge de concentrations qui seraient déjà connues. Pour réaliser des inventaires aériens périodiques, des expéditions de marquage

régulières sont nécessaires afin de remplacer les colliers en fin de vie utile et d'assurer le maintien d'un échantillon suffisant et une couverture adéquate de l'aire de répartition.

Le nombre d'individus marqués de chaque sexe, permettant de bien représenter la population, varie en fonction du paramètre à mesurer. Depuis 2010, les efforts des gouvernements du Québec et de Terre-Neuve-et-Labrador visent à maintenir environ 80 à 100 colliers actifs dans chacune des populations de caribous. Cette cible permet de satisfaire les besoins associés à l'estimation du taux de survie des mâles et des femelles, à la cartographie de l'aire de mise bas et des autres habitats saisonniers. De plus, cet effectif d'individus marqués est potentiellement adéquat pour réaliser un inventaire par CMR ou offre une bonne base qui permet de cibler efficacement les efforts requis pour atteindre une couverture complète de l'aire de répartition anticipée au moment de l'inventaire.

La répartition des colliers entre les mâles et les femelles correspond approximativement au rapport des sexes dans les populations. Puisque les deux populations font l'objet d'un suivi démographique à long terme, la variabilité annuelle du rapport des sexes peut être considérée. À titre d'exemple, le rapport des sexes pour le TRAF était en moyenne de 37 mâles/100 femelles de 2001 à 2015 et de 41 mâles/100 femelles lors de la classification d'automne en 2016. Bien que les grands groupes de caribous soient mixtes au moment d'un inventaire, des groupes exclusivement composés de mâles sont typiquement observés en marge des groupes composés d'individus qui proviennent majoritairement de l'aire de mise bas. Ce comportement est plus souvent observé lorsqu'une population compte plusieurs centaines de milliers d'individus et que le grand nombre de mâles favorise leur regroupement après la migration printanière. Il est estimé que le maintien d'une quarantaine de colliers sur des mâles permet de suivre leurs paramètres démographiques et de localiser adéquatement les groupes de mâles, puisque les groupes les plus nombreux contiennent généralement plus d'un individu marqué. Ces groupes de mâles sont souvent situés au sud des groupes de femelles qui effectuent une migration printanière plus hâtive et plus longue que la majorité des mâles, et ce, afin d'atteindre l'aire de mise bas à temps pour donner naissance à leur faon.

La performance des colliers émetteurs permet d'affirmer que tous les individus marqués ont une probabilité de détection équivalente, une prémisse fondamentale du modèle de Lincoln-Petersen. La détection des groupes de caribous migrants pour leur dénombrement dépend des colliers émetteurs satellitaires qui transmettent une ou plusieurs localisations à intervalles réguliers (12 à 48 heures) par lien Globalstar, Iridium ou Argos. L'utilisation d'un routeur Internet satellitaire portatif est un élément clé de la méthodologie, car l'accès régulier aux localisations permet d'adapter le plan de vol plusieurs fois par jour. Un inventaire estival (post-mise bas) ne requiert pas un vol structuré en lignes de vol comme c'est le cas pour l'orignal ou le caribou forestier, car la phase de détection repose entièrement sur les colliers émetteurs.

Estimation du nombre adéquat de colliers émetteurs

La taille de l'échantillon et le type de colliers actifs au moment d'un inventaire varient principalement en fonction des efforts investis dans le suivi des populations et de la durée de vie des colliers (de 3 à 5 ans), ainsi que des projets de recherche en cours. Il est essentiel que le nombre et la répartition de ces colliers permettent, au moins théoriquement, d'identifier tous les groupes de caribous dans la population lorsque les conditions d'agrégation sont idéales. Bien que cette prémisse soit fondamentale, elle ne peut être validée qu'au moment de l'inventaire, puisque le nombre adéquat de colliers dépend du nombre de groupes que formera la population lors de l'échantillonnage. La relation entre l'abondance d'une population et le nombre de groupes qui se formeront au moment de l'inventaire est cependant difficilement prévisible, car la taille des groupes varie en fonction de l'abondance de la population et des conditions environnementales. L'effectif d'individus marqués pour des inventaires qui ont généré un résultat dont la précision statistique est acceptable (intervalle de confiance < 20 %, $\alpha = 0,10$; tableau 1) offre cependant des indications quant à la relation entre l'abondance de la population et la taille adéquate de l'échantillon.

Tableau 1. Caractéristiques de l'échantillon d'individus marqués relativement au nombre de groupes et à l'abondance de la population adulte (≥ 1 an) de caribous migrants pour les sept inventaires réalisés avec la méthode de CMR au Québec et au Labrador, dont l'intervalle de confiance était < 20 % ($\alpha = 0,10$).

Inventaire	Nbre d'adultes ¹	Nbre de groupes	Nbre d'individus marqués (colliers)	Nbre de colliers dans le plus grand groupe	Nbre moyen de caribous/groupe	Nbre moyen d'adultes/collier	Nbre moyen de colliers/groupe
TRG 1993	451 000	28	92	8	16 107	4 902	3,3
TRG 2001	210 000	27	109	10	7 778	1 927	4,0
TRG 2010	57 003	13	71	10	4 385	803	5,5
TRG 2012	21 375	22	90	16	972	238	4,1
TRG 2014	10 900	29	99	29	376	110	3,4
TRG 2016	7 194	21	63	29	343	114	3,0
TRAF 2016	166 587	42	117	19	3 966	1 424	2,8

¹ Calculé selon la méthode de Lincoln-Petersen sans utiliser de seuil pour la taille de groupe minimale admissible à l'analyse (voir Russel et coll., 1994).

De façon générale, la taille des groupes augmente en fonction de l'abondance de la population, car le nombre de groupes est moins variable. La succession d'inventaires décrivant le déclin du TRG offre un exemple de l'évolution de ces paramètres en fonction de l'abondance de la population (tableau 1). Toutefois, le nombre de groupes de grande taille, qui contribuent significativement à l'estimation de l'abondance, diminue avec le déclin de la population. La taille

de l'échantillon d'individus marqués dans la population qui permettrait de détecter adéquatement tous les groupes de taille significative pourrait être proportionnelle à la taille de la population. Par exemple, le nombre de colliers dans le plus grand groupe du TRG, en 2014 et en 2016 (tableau 1) suggère qu'un nombre inférieur d'individus marqués n'aurait pas compromis la détection des groupes. Le nombre moyen de caribous/groupe, d'adultes/collier et de colliers/groupe sont hautement variables pour un même inventaire et sont largement influencés par l'abondance de la population. Ces paramètres constituent donc des indications approximatives quant à la taille de l'échantillon adéquate en fonction de l'abondance de la population. La distinction du nombre de groupes observés lors de l'inventaire du TRAF, comparativement aux inventaires du TRG, suggère que le comportement d'agrégation pourrait aussi varier selon la population.

Les critères suivants sont utilisés afin de déterminer si le nombre d'individus marqués est adéquat, selon les conditions d'agrégation observées au moment de l'inventaire :

1. Peu ou pas de caribous sont observés lors des déplacements entre les regroupements de caribous. Un seuil arbitraire de < 2 % du nombre total de caribous comptés dans les groupes est utilisé. Plus ce pourcentage est élevé, plus la probabilité que l'inventaire sous-estime l'abondance de la population est élevée;
2. Tous les grands groupes observés sont minimalement représentés par un caribou marqué (équipé d'un collier);

Le potentiel d'atteinte de ces conditions doit être évalué avant la réalisation d'un inventaire en analysant la cartographie des localisations, en sollicitant des mentions d'observations de caribous des communautés et des utilisateurs locaux et en effectuant des repérages extensifs lors des expéditions de marquage. Lorsqu'un nombre considérable de caribous est rapporté dans des secteurs non représentés par des individus marqués ou que de vastes rassemblements sont représentés par un nombre insuffisant d'individus marqués, la planification d'un inventaire aérien peut requérir l'ajout de colliers émetteurs afin d'obtenir une taille d'échantillon adéquate.

Conditions environnementales propices aux agrégations

L'occurrence de grands groupes de caribous migrants, parfois de très forte densité, n'est pas garantie chaque été, car ces regroupements résultent d'un compromis entre différentes contraintes pour le caribou. Les caribous dépendent de la courte période estivale pour s'alimenter d'un brout diversifié et de bonne qualité et ainsi combler leurs besoins liés à l'allaitement, à la croissance et au stockage des graisses. Or, les insectes se réfugient généralement dans la végétation, incitant les caribous à se regrouper dans des secteurs enneigés (figure 2), sablonneux ou rocheux, idéalement exposés aux vents, afin de limiter le harcèlement intensif. Puisque ces secteurs sont moins propices à l'alimentation et que les caribous s'y retrouvent en forte densité, le comportement d'agrégation limiterait la qualité de leur alimentation.

Une fois les préparatifs liés au marquage des individus terminés, la possibilité de réalisation d'un inventaire doit être évaluée après la mise bas, à la fin juin. Une analyse qualitative des déplacements des caribous et des données climatiques (aéroports, stations de recherche et de suivi climatique, parcs nationaux, etc.) doit être effectuée quotidiennement. La convergence de la trajectoire des individus marqués suggère que des groupes sont en formation ou qu'ils pourraient l'être rapidement, si les conditions climatiques devenaient propices à l'émergence des insectes. Il est donc important d'évaluer, régulièrement, si la température ambiante est propice à l'émergence de ces derniers (idéalement $> 12\text{ °C}$). Dans les semaines précédant l'inventaire, la température ambiante doit favoriser l'émergence des insectes, minimalement le jour, et les vents dominants doivent être de moins de 15 à 20 km/h, et ce, sur l'ensemble de l'aire de répartition des caribous. Dans la toundra, ces conditions sont rarement réunies et un système météorologique froid et venteux s'étalant sur plusieurs jours consécutifs peut compromettre la tenue d'un inventaire dans les derniers moments des préparatifs.



Figure 2. Un petit groupe de caribous profite d'un des derniers ilots de neige pour se rafraîchir et limiter son exposition aux insectes piqueurs (30 juillet 2016, inventaire du TRAF).

La fenêtre d'opportunité propice à un inventaire est généralement de quelques jours et survient à des dates différentes, selon leur localisation pendant la période estivale. Par exemple, le pic de regroupement du TRG (approx. 13 juillet) survient généralement deux semaines avant celui du TRAF (approx. 30 juillet). L'émergence des œstres (*Hypoderma tarandi* et *Cephenemyia trompe*; parasites dont la forme sexuée ressemble à une mouche) au début d'août est aussi un facteur à considérer, puisque ces derniers causent de l'agitation parmi les groupes de caribous qui peuvent se dissoudre, compromettant ainsi l'inventaire. La détérioration des conditions environnementales peut forcer l'annulation d'un inventaire en cours de réalisation. La faisabilité et le succès d'un inventaire ne peuvent donc être confirmés qu'une fois celui-ci terminé.

Préparation logistique

Ce type d'inventaire est réalisé en hélicoptère. Il nécessite le déploiement de carburant dans des secteurs isolés, où il est anticipé que les principaux groupes seront localisés. Le comportement de la population au cours des années antérieures offre des indications valables à cet effet. L'utilisation des commodités offertes dans les communautés inuites est parfois possible, mais les

caribous sont majoritairement situés dans le centre de la péninsule de l'Ungava. Pour le TRAF, ils sont généralement dans les monts Puvirnituk où il est possible de loger dans un camp de prospection minière. Pour le TRG, des pourvoiries situées sur la rive de la rivière George et la station de recherche du Gouvernement de Terre-Neuve-et-Labrador, située près de l'aire de mise bas dans le secteur du fjord Hebron, sont stratégiques. La rareté des campements implique que du carburant soit aussi entreposé dans des caches réservées uniquement au ravitaillement, ce qui permet d'accroître l'efficacité de l'équipe d'inventaire qui est principalement limitée par l'autonomie de l'aéronef. L'obtention régulière des localisations des individus marqués, l'accès à du carburant dans l'aire de répartition estivale et l'utilisation de camps de base à proximité des caribous réduisent les contraintes logistiques associées à l'étude d'une espèce migratrice dans un milieu éloigné.

Réalisation de l'échantillonnage

Télémétrie VHF

La phase de recapture de la méthodologie CMR est réalisée en validant la présence d'un individu marqué dans un groupe par la détection du signal radio émis par le collier. La télémétrie VHF est donc un élément très important d'un inventaire de caribous et requiert une attention particulière pour assurer le bon fonctionnement de chacune des composantes du système.

L'hélicoptère est équipé de trois antennes directionnelles (figure 3), reliées aux récepteurs télémétriques par l'intermédiaire de commutateurs qui permettent l'activation simultanée ou exclusive de l'antenne avant, gauche ou droite. La télémétrie VHF étant une composante cruciale de la technique d'inventaire, il est recommandé que deux ou trois membres de l'équipage aient un récepteur pour effectuer un balayage déphasé de la totalité des fréquences. Le temps d'écoute pour chaque fréquence est déterminé par une légère majoration de la fréquence de pulsation du plus lent des colliers actifs (p. ex. : 2,25 secondes pour une pulsation de 30 battements par minute).

Bien que la position approximative des colliers satellitaires soit connue grâce aux communications satellitaires, la télémétrie VHF permet de détecter le signal radio des colliers à proximité, de localiser la position des groupes à fine échelle et, une fois un groupe circonscrit, d'identifier les individus marqués qu'il contient. En vol, l'équipage effectue un balayage télémétrique des fréquences VHF en continu afin de détecter des individus marqués à tout moment.

Le matériel télémétrique doit être adéquatement installé dans l'hélicoptère et des composantes de remplacement doivent être disponibles. Le matériel de télémétrie est composé :

- d'attaches homologuées par Transport Canada pour les antennes directionnelles;
- d'antennes directionnelles propres à la gamme de fréquences VHF des colliers;
- de câbles coaxiaux RG-38 de longueurs variables et d'unions robustes;
- de multiplicateurs de ports pour diviser le signal entre les utilisateurs;
- des commutateurs directionnels « *switch box* » pour le contrôle simultané ou indépendant des trois antennes;
- des récepteurs VHF;
- d'un commutateur de partage de communications entre le récepteur VHF et le système de communication de l'hélicoptère;
- d'adaptateurs de port audio compatibles pour casques d'écoute du système de communication de l'hélicoptère (*jack bantam*).



Figure 3. Exemple d'une des trois antennes directionnelles de type « H » qui sont fixées aux patins de l'hélicoptère grâce à une attache homologuée par Transport Canada et reliées au système de télémétrie VHF par un câble coaxial.

Le bon fonctionnement du système de télémétrie doit préalablement être validé au sol en positionnant un collier dans chacun des axes directionnels des antennes. Un second test en vol est aussi nécessaire afin de vérifier le degré d'interférence provenant du système électronique de l'hélicoptère ou de l'électricité statique dans chacune des antennes.

Détermination du statut des individus marqués

Le nombre d'individus marqués dans une population varie régulièrement en raison du nombre de morts, des défauts des colliers ou, dans de rares occasions, de la fin de vie utile de la pile d'un ou de plusieurs colliers. Le nombre de colliers actifs au moment de l'inventaire doit cependant être déterminé précisément, puisqu'il représente une variable utilisée dans le calcul de l'estimation de l'abondance de la population. Les émetteurs radio et satellitaires sont utilisés pour déterminer si un collier est actif au moment de l'inventaire.

Il est tenu pour acquis que le bon fonctionnement de l'émetteur satellitaire d'un collier est garant de celui de son émetteur VHF. La télémétrie VHF est généralement fiable lorsque le matériel est en bon état et utilisé adéquatement. Néanmoins, il est possible que des irrégularités surviennent et que le signal VHF du collier émetteur ne soit pas détecté malgré sa proximité. Ce phénomène peut être expliqué par une défectuosité mineure de l'équipement, par de l'interférence due à la pollution électromagnétique ou par l'erreur humaine. Il est pratiquement impossible de confirmer si un signal VHF n'a pas été détecté en raison d'une défectuosité permanente. Dans la majorité des cas, un individu qui n'a pas été détecté par signal radio durant l'inventaire était simplement hors de portée. La position de cet individu pourra rarement être investiguée, faute de temps ou de carburant. Un collier est considéré comme actif lors de l'inventaire s'il respecte minimalement un des deux critères suivants :

1. Le collier émetteur de l'individu marqué a transmis régulièrement des localisations différentes au cours de l'inventaire, confirmant qu'il était vivant;
2. La fréquence VHF d'un individu marqué est confirmée dans un groupe échantillonné.

Échantillonnage des groupes de caribous

Lorsqu'un groupe de caribous est repéré, il est survolé en périphérie dans le but de circonscrire son étendue. L'absence de caribous en marge du groupe est validée visuellement par un survol élargi du secteur, permettant de confirmer la qualité des conditions d'agrégation. La configuration spatiale d'un groupe peut être très variable. Un groupe peut être circonscrit sur une petite étendue de neige, couvrir la totalité du versant d'une colline ou s'étendre le long d'un sentier sur plus de 10 km. Des groupes fragmentés, mais situés dans un périmètre rapproché (< 1 km), sont habituellement fusionnés dans les analyses pour simplifier le travail de télémétrie. En présence

d'une agrégation dense, l'aéronef survole d'abord le groupe bien défini à une altitude qui ne dérange pas les caribous. Lorsque les caribous sont légèrement dispersés, l'aéronef vole à une altitude inférieure qui favorise le rassemblement des animaux, cela afin de faciliter la prise de photographies. La localisation précise du groupe doit être notée. Lorsqu'un groupe est dispersé sur une vaste superficie ou le long d'un sentier, le tracé GPS du survol initial devient utile au pilote et aux membres de l'équipage afin de créer une référence spatiale servant à la planification de la prise de photographies.

Le nombre d'individus marqués et intégrés dans un groupe est déterminant dans le calcul de l'abondance de la population. L'identité de ces colliers est notée en vol par les deux ou trois membres de l'équipage qui effectuent une écoute télémétrique indépendante. Après avoir balayé la table complète des fréquences VHF à deux reprises, les membres de l'équipage partagent leurs résultats en guise de validation. Une fréquence qui ne serait pas confirmée par tous les membres de l'équipe doit être confirmée par une écoute particulière.

L'utilisation simultanée de plusieurs récepteurs VHF (figure 4) augmente le temps d'écoute sur chaque fréquence afin de réduire les biais associés à l'erreur humaine et aux problèmes techniques (filage, multiplicateurs de ports, commutateurs, force du signal, étalonnage des fréquences, etc.). Le travail d'équipe améliore ainsi la précision et l'efficacité de la période d'échantillonnage.

La prise de photographies du groupe est réalisée au moment le plus opportun, souvent dès sa détection lorsqu'il est petit ou de bonne densité (figure 5), ou une fois le balayage télémétrique terminé lorsqu'il est avantageux d'utiliser l'hélicoptère pour rabattre graduellement les animaux de la périphérie vers le centre du groupe. Les grands groupes nécessitent souvent la prise de plusieurs photographies successives, à intervalles variables, selon la vitesse de l'appareil, les déplacements des caribous et l'étendue du groupe. Les photographies peuvent être prises par l'ouverture de la fenêtre de la porte lorsque le groupe est petit. L'utilisation d'un aéronef avec une porte coulissante s'avère avantageuse pour élargir l'horizon du photographe lorsque les groupes sont dispersés sur de grandes superficies. Autrement,

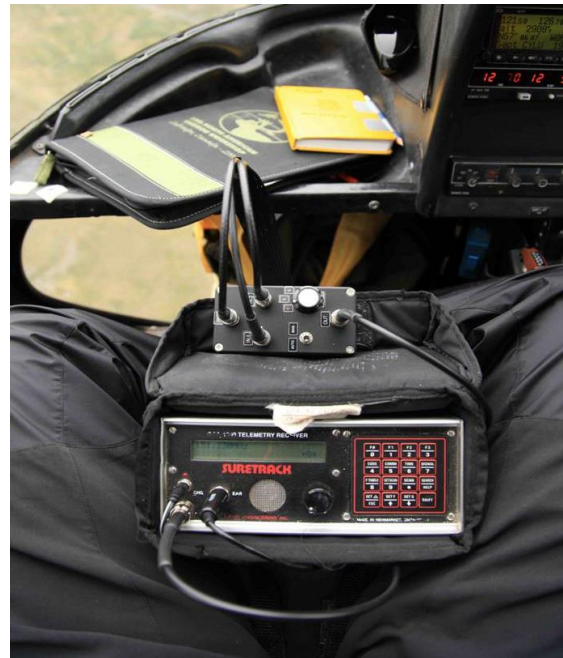


Figure 4. Récepteur radio pour la télémétrie VHF et commutateur « switch box » permettant de sélectionner les antennes directionnelles.

la photographie des grands groupes requiert le retrait des portes d'un bord de l'aéronef. La réalisation de deux, parfois trois séances de photographie pour un même groupe est recommandée lorsque les conditions d'éclairage ou de regroupement sont difficiles, puisque la qualité de chacune des photographies et la continuité des superpositions de cadrage ne peuvent être validées efficacement en vol.

L'utilisation d'un appareil photographique numérique muni d'un capteur de 50 millions de pixels permet la prise de photographies en haute altitude, une prise de vue élargie lorsque les groupes sont de faible densité ainsi que l'identification des faons dans la majorité des cas. Il est important d'utiliser le survol initial du groupe pour planifier la stratégie de prise de photographies (parcours, variations d'altitude) et d'éviter de prendre les photographies à contre-jour.

L'échantillonnage des groupes fournit beaucoup d'information qui doit systématiquement être comptabilisée en vol. Ainsi, la liste des fréquences VHF entendues lors des transits de l'équipe ou validées dans les groupes, de même que leur localisation, la localisation des groupes et le numéro des photographies correspondant à chacun des essais, et ce, pour chacun des groupes, doivent être saisis de façon structurée. Une liste décrivant les données techniques de tous les individus marqués est consultée régulièrement (tableau 2). Elle permet notamment d'effectuer la correspondance entre la cartographie des localisations et les fréquences VHF entendues en vol, et de faire le suivi des individus marqués qui ont été échantillonnés afin d'orienter la prise de décision quant à la navigation et à l'échantillonnage.

Certains éléments techniques liés à la télémétrie doivent être considérés lors de la validation des individus marqués d'un groupe. Par exemple, des individus marqués appartenant à deux groupes distincts peuvent parfois sembler être dans un même groupe, malgré l'usage d'antennes directionnelles, lorsque l'hélicoptère et les deux colliers sont dans un même axe. Ceux-ci doivent être départagés stratégiquement à l'aide des antennes directionnelles et de l'ajustement du gain du récepteur. Cette tâche nécessite une bonne vigilance, puisque la position d'un deuxième groupe serait perçue en alternance dans les trois antennes pendant que l'hélicoptère tourne autour du groupe ciblé. Il est aussi important de considérer que la force du signal VHF d'un collier varie selon son modèle et le fabricant. La force du signal des colliers, indiquant leur proximité, peut donc varier pour un même réglage de gain sur le récepteur VHF. Il est donc important que les gens responsables de la télémétrie, lors d'un inventaire, soient expérimentés, que l'utilisation des récepteurs VHF leur soit familière et qu'ils soient conscients des particularités des colliers utilisés.



Figure 5. Tous les caribous de ce secteur se regroupent sur cette plage près de la côte du détroit d'Hudson, probablement pour se soulager du harcèlement des insectes.

La fréquence d'un collier pourrait ne pas avoir été entendue dans un groupe en raison d'un problème technique (p. ex., déficience du signal VHF) ou d'une erreur humaine. Puisqu'un collier transmet parfois plusieurs positions GPS par jour, il est possible d'investiguer précisément la position des individus qui n'ont pas été entendus par rapport à la position des groupes échantillonnés. La présence d'un individu marqué, mais non entendu, peut ainsi être validée ultérieurement en utilisant l'information précise quant à l'heure des localisations GPS, à son affiliation temporelle et spatiale à d'autres individus marqués et appartenant à un groupe, et à la délimitation spatiale des groupes échantillonnés. Dans certains cas, un individu peut être ajouté *a posteriori* au nombre d'individus marqués d'un groupe, et ce, lorsque sa localisation peut être clairement associée à celle d'un groupe échantillonné.

Tableau 2. Exemple d'un tableau regroupant les données techniques des individus marqués qui permettent de planifier la navigation et qui informent la prise de décision en vol lorsque le signal radio d'un individu marqué est détecté. La description des champs est présentée ci-dessous.

IDSat	FreqVHF	IDAnimal	Sexe	StatAnimal	Photo	BPMVif	Pulse
10673	151,860	2009080	F	Vivant	Groupe 8	30	simple
10688	148,310	2013117	M	Vivant		30	double
10937	150,110	2006022	F	Vivant	Groupe 3	40	simple
123498	149,350	2008043	F	Inconnu		40	simple
...							

IDSat : Numéro d'identifiant du *Platform Terminal Transmitter* du système de télécommunication satellitaire du collier.

FreqVHF : Fréquences de la balise radio VHF.

IDAnimal : Numéro d'identification unique de l'animal qui lui est attribué à sa première capture.

Sexe : Sexe de l'animal. F = femelle; M = mâle.

StatAnimal : Le statut de l'animal (vivant ou mort). Le statut de l'animal peut être inconnu, si son collier ne transmet pas de localisation télémétrique satellitaire.

Photo : Indique si l'animal a été photographié et dans quel ou quels groupes.

BPMVif : Nombre de battements par minute du signal radio VHF.

Pulse : Type de battement émis par le collier (simple, double ou triple). P. ex., double; 30 bpm = bipbip... 2 secondes ... bipbip.

Analyse des résultats

Dénombrement des faons

Le dénombrement des faons au moment de l'inventaire procure une information démographique importante qui permet d'estimer l'abondance de l'ensemble de la population et sa tendance annuelle. La haute résolution des images numériques et la réduction de la taille des groupes, due au déclin actuel des populations, permettent désormais de réduire considérablement le biais associé à la difficulté de dénombrer les faons au moment de l'inventaire. Cependant, il est possible que les conditions de photographie ne permettent pas l'identification des faons sur quelques photographies d'un groupe ou dans une minorité de groupes en raison d'une résolution inadéquate, d'un mauvais réglage de l'appareil photographique ou de la très forte densité d'un groupe. La proportion de faons (nombre de faons/nombre total de caribous) pour ces photographies ou ces groupes peut être estimée à partir des photographies de bonne qualité du même groupe ou d'un autre groupe. Dans le second cas, puisque la répartition des femelles

accompagnées d'un faon n'est pas homogène dans l'aire d'estivage, cette estimation devrait être faite à partir d'un groupe d'abondance similaire et échantillonné dans le même secteur.

La caractérisation des groupes et la qualité des inventaires bénéficient largement de l'évolution de l'imagerie numérique. Avant 2012, des inventaires photographiques ont été réalisés en été alors que la résolution des appareils photographiques ne permettait pas de détecter les faons sur la vaste majorité des photographies. Dans ces conditions, les faons qui pouvaient être reconnus sur les photographies n'étaient pas dénombrés puisque cette limitation technique menait uniquement à une estimation de la population adulte (≥ 1 an) en été. Pour obtenir l'abondance totale de la population, le nombre de faons était dérivé de leur proportion dans la population, qui était mesurée ultérieurement, lors de la classification d'automne. L'utilisation des résultats de la classification d'automne pour compléter le résultat d'un inventaire impliquait que les faons soient ajoutés à la population adulte qui avait survécu du moment de l'inventaire jusqu'à l'automne. Les taux de survie des adultes de l'été à l'automne étaient estimés par la proportion de caribous marqués de chaque sexe ayant survécu depuis l'inventaire, jusqu'au 1^{er} novembre. La survie des adultes et la proportion de faons à l'automne étaient généralement traitées comme des constantes afin de ne pas modifier l'intervalle de confiance initial de l'inventaire. Cette approche permettait de produire une estimation de la population totale au 1^{er} novembre, basée sur un inventaire estival et une classification automnale. Le dénombrement des faons au moment de l'inventaire est donc fort avantageux sur le plan analytique, puisqu'il permet d'éliminer les biais potentiels associés à la distinction d'un faon ou d'un adulte sur photographie, et l'imprécision liée à l'intervalle de confiance de la survie des adultes et à la classification des faons à l'automne.

Traitement des images et décompte des groupes

Le nombre de photographies à traiter dépend du nombre de groupes échantillonnés, de leur densité et de la résolution de l'appareil photographique. Certains groupes en déplacement peuvent nécessiter plusieurs dizaines, parfois quelques centaines de photographies, si plusieurs essais ont été réalisés. Lorsque l'étendue d'un groupe dépasse celle d'une photographie, chaque photographie doit être analysée visuellement relativement à sa photographie voisine à l'aide d'un logiciel de traitement d'image (Photoshop ou PhotoFiltre). Une mosaïque continue est alors définie en traçant manuellement les limites de chacune des photographies à l'aide de repères du paysage et des caribous. Chaque fichier d'image est cependant traité individuellement lors du dénombrement des caribous qu'elle contient. Le numéro des photographies adjacentes doit donc être inscrit sur chaque photographie en guise de repère, puisqu'une photographie peut parfois être adjacente à plusieurs photographies (figure 6). Les caribous apparaissant sur chaque photographie retenue dans la mosaïque sont dénombrés. La superficie à traiter doit être clairement délimitée afin d'éviter qu'un caribou soit exclu ou compté deux fois.

Le dénombrement des caribous est réalisé, une fois la mosaïque complétée, en affichant les photographies une à une dans un logiciel de géomatique (ArcMap par ESRI). Deux couches de points, une pour les adultes et une pour les faons, sont éditées en mode création. Un clic de souris crée un point qui se superpose à la photographie, ancré à la coordonnée du pixel sélectionné (figure 7). La photographie peut être agrandie (*zoom in*) et déplacée (*pan*) sans compromettre la relation entre un point et le caribou qu'il représente. Une fois tous les caribous comptés, on peut connaître le nombre de caribous sur la photographie à partir du nombre de lignes dans la table d'attributs de la couche de points. Une photographie et ses fichiers de points peuvent être visualisés ultérieurement par différents utilisateurs pour valider le décompte et la distinction entre les faons et les adultes.

La validation des décomptes peut être réalisée différemment, selon la qualité des photographies et la taille des groupes. Les photographies qui ne représentent pas un défi pour l'identification des adultes et des faons sont validées par le même observateur, ou un second observateur, afin de détecter et de corriger des erreurs d'inattention. Les photographies pour lesquelles les caribous sont difficilement distinguables de l'arrière-plan (figure 8), et qui nécessitent une part d'interprétation des contrastes, doivent être validées par un second observateur. Le contraste entre un caribou et le paysage est parfois subtil. Pendant la mue, les caribous sont de couleurs variables allant du blanc au brun foncé. De plus, les faons étant parfois de la même couleur que les adultes (blancs, gris ou brun roux), ils sont généralement distingués par leur plus petite taille. La détection et la distinction des faons constituent une source d'erreur potentielle. Dans de rares cas, la validation du décompte bénéficie de la concertation de deux observateurs et peut nécessiter l'avis d'un troisième observateur, dans les cas où les deux premiers ne peuvent arriver à un consensus.

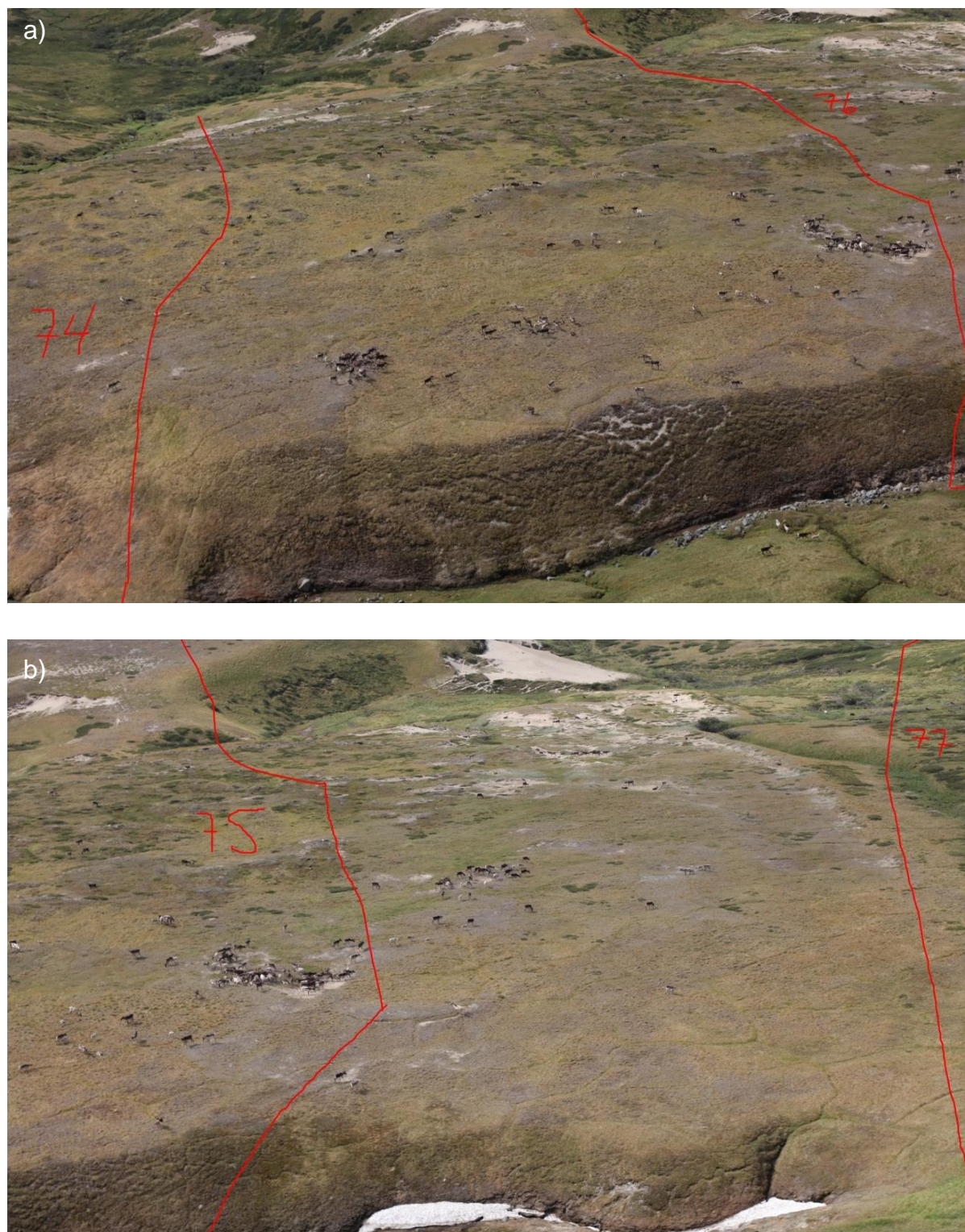


Figure 6. Les photographies sont analysées à l'aide d'un logiciel de traitement d'image qui permet de tracer les limites de la mosaïque qui seront respectées lors du décompte et d'identifier le numéro des photographies adjacentes. Les photographies a) et b) présentent un exemple du traitement de deux photographies successives (n° 75 et n° 76).

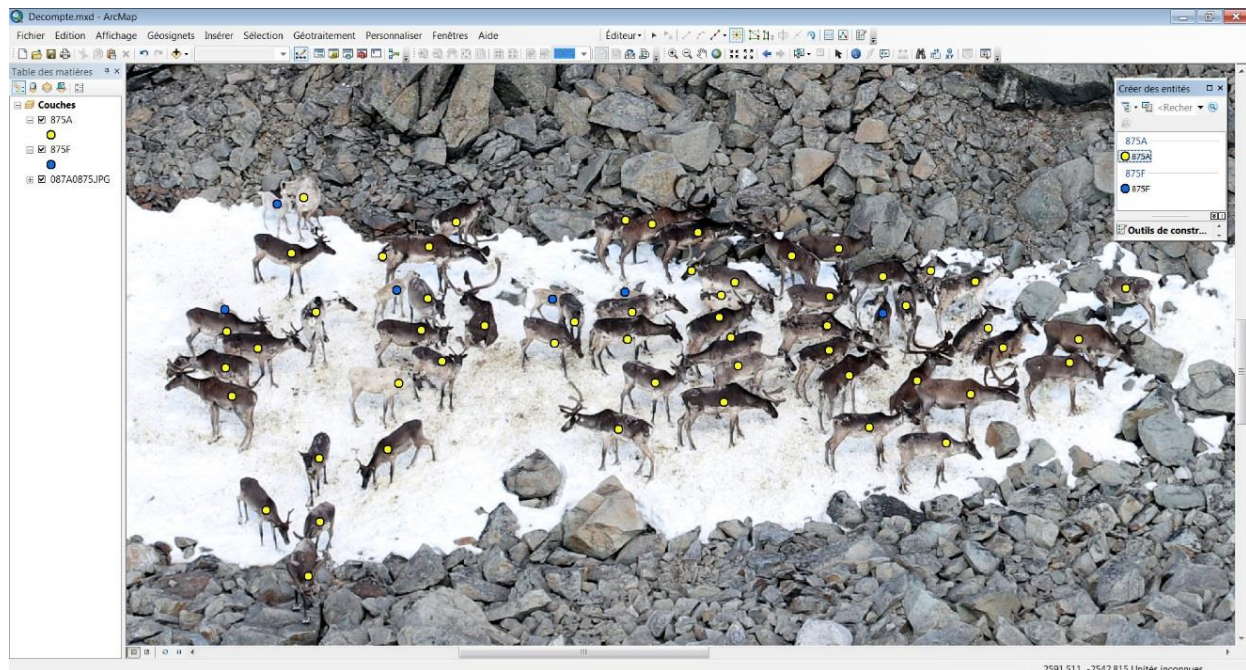


Figure 7. Exemple de l'interface du logiciel utilisé pour réaliser le décompte des groupes. La qualité des photographies influence grandement l'aisance avec laquelle cette étape peut être réalisée. Cette approche permet une grande flexibilité pour la visualisation des images et permet facilement de valider ou de modifier le décompte.

Le résultat du décompte validé est ensuite transféré dans un fichier sommaire qui décrit chaque groupe de caribous observé durant l'inventaire. Ce fichier contient un numéro séquentiel pour identifier le groupe de caribous ainsi que le nombre d'adultes, le nombre de faons, le nombre total de caribous, le nombre d'individus marqués qu'il contient et leur identité (fréquence VHF, ID de l'émetteur satellitaire, ID de l'animal, sexe, statut du collier), ainsi que tout commentaire pertinent.

Analyse des groupes atypiques

Les particularités comportementales des caribous migrants et la variabilité des conditions météorologiques dans l'aire de répartition estivale se traduisent par des groupes de tailles pouvant varier d'un caribou à plusieurs dizaines de milliers de caribous. Par exemple, à faible abondance de population, les mâles sont souvent trouvés seuls, ou en petits groupes de quelques individus, en périphérie des grandes concentrations mixtes. Ce comportement est nettement documenté pour le TRG depuis 2012 alors que la population était estimée à 27 600 caribous, et il s'est accentué en 2016 alors que la population était réduite à 8 900 caribous. Il arrive donc que la visite d'un individu marqué se solde par l'échantillonnage d'un individu seul ou de quelques individus très éloignés des grandes concentrations de caribous. Le choix de considérer ou non cet individu ou ces quelques individus comme un groupe dans les analyses doit être basé sur le

contexte environnant. Dans ces cas, le survol des environs permet de déterminer si ce groupe est une unité d'échantillonnage valide ou une observation dans un secteur où les conditions d'agrégation ne sont pas favorables à un inventaire. Si aucun autre caribou n'est détecté dans un rayon d'environ 2 km (environ 12 km²), cette observation est considérée comme un groupe dans l'analyse, puisque la méthode implique que l'ensemble des groupes échantillonnés soit représentatif du comportement de la population. S'il y a un ou d'autres caribous dans ce périmètre, cette observation n'est pas retenue en tant que groupe en raison de l'absence de l'agrégation des individus dans ce secteur. Il est donc nécessaire que l'analyse considère les grands rassemblements et les petits groupes épars qui circulent en marge de ceux-ci afin que l'échantillon de groupes représente bien la population.

Le caribou migrant se déplace quotidiennement sur de longues distances qui varient selon la période de l'année et les conditions environnementales. Bien que les localisations télémétriques donnent une bonne indication de la position d'un caribou marqué, il faut garder à l'esprit que le taux de déplacement d'un caribou en été peut être de plusieurs dizaines de kilomètres par jour. Il faut donc demeurer vigilant en faisant la télémétrie, puisque les caribous marqués sont susceptibles de se déplacer au moment de l'échantillonnage ou d'amorcer un déplacement soutenu suivant l'échantillonnage du groupe dont ils font partie. Ainsi, il est important de maintenir une bonne connaissance de l'emplacement des individus échantillonnés par rapport aux individus non échantillonnés. D'un jour à l'autre, il est possible que deux ou plusieurs petits groupes convergent vers un même lieu pour former un groupe plus grand. Il est aussi probable qu'un individu marqué soit échantillonné dans un second groupe qui contiendrait un ou des individus marqués non échantillonnés. L'échantillonnage dans un secteur où une forte proportion de la population converge peut donc représenter un défi logistique considérable. La démarche qui est utilisée lors du traitement des groupes qui contiennent le même individu marqué est la suivante :

1. Les groupes sont dénombrés et le nombre de caribous représentés par un individu marqué est noté pour chacun des groupes (p. ex., le groupe A de 1 000 caribous contient 2 caribous marqués = 500 caribous/collier);
2. L'individu marqué est retenu uniquement dans le groupe où il représente le plus grand nombre de caribous. Le nombre de caribous représentés par l'individu marqué est alors soustrait du groupe duquel il est retiré (p. ex., 1 des individus marqués du groupe A est retenu dans le groupe B où il représente 800 caribous/collier; le groupe A est alors redéfini comme étant de 500 caribous et représenté par 1 individu marqué);
3. Si tous les individus marqués d'un groupe se retrouvent dans un autre groupe où ils représentent un plus grand nombre de caribous, le groupe où les individus marqués représentent le moins de caribous est retiré de l'analyse.



Figure 8. Les caribous sont parfois difficiles à distinguer dans un arrière-plan peu contrastant (a), nécessitant parfois l'ajustement du contraste et de la luminosité des photographies. En b), un agrandissement de la photographie a) illustre l'importance des photographies numériques à haute résolution lorsque des photographies doivent être prises à une altitude relativement élevée.

Calcul de l'abondance de la population

La méthode de calcul (modèle) qui permet d'estimer la taille de la population doit permettre de produire un résultat réaliste, malgré les facteurs parfois complexes qui influencent la taille et le nombre de groupes. Puisque les caribous ne se dispersent pas aléatoirement sur le territoire, il est important que le nombre de colliers permette d'échantillonner la majorité des caribous d'une population afin d'éviter un biais causé par l'hétérogénéité de la densité de caribous dans son aire de répartition. Les principaux facteurs qui influencent la taille des groupes et qui expliquent que leur formation n'est pas un phénomène aléatoire sont :

- l'hétérogénéité comportementale due au sexe et au statut reproducteur;
- la proximité dans l'espace des femelles reproductrices issues de l'aire de mise bas;
- l'hétérogénéité des conditions climatiques et topographiques dans l'aire de répartition estivale (habitat côtier et continental);
- l'effet catalytique de regroupement lorsqu'il y a une grande abondance de caribous dans un secteur (masse critique).

Sachant que les facteurs qui influencent les variables du modèle ne sont pas aléatoires, la méthodologie doit viser un échantillon considérable de la population afin d'intégrer cette variabilité dans l'analyse et minimiser la proportion du résultat qui est issue d'une extrapolation. Dans ces conditions, l'exactitude du résultat du modèle est dépendante du nombre de colliers télémétriques actifs et du nombre de colliers télémétriques échantillonnés.

La prémisse de la répartition aléatoire des individus marqués dans la population est conditionnelle au calcul de l'abondance. Cette prémisse est validée par un test de khi-deux (χ^2) permettant de comparer le nombre de colliers observés dans les groupes au nombre de colliers attendu en fonction de leur taille, selon la loi de probabilité de Poisson. Le degré de liberté pour cette analyse correspond au plus grand nombre de colliers observés dans un groupe -1. La valeur de la statistique χ^2 est définie pour un risque d'erreur de 5 % ($\alpha = 0,05$) et avec le nombre de degrés de liberté approprié.

Au cours de la dernière décennie, une attention particulière a été portée au maintien d'un suivi télémétrique adéquat des populations de caribous migrants au Québec et au Labrador. Un nombre suffisant de colliers télémétriques a été déployé sur le terrain, favorisant le choix de la méthode de Lincoln-Petersen, un modèle simple de « capture-marquage-recapture » pour estimer l'abondance des populations. Comme il est expliqué précédemment, les biais potentiels de cette méthode, issus du non-respect des conditions méthodologiques du modèle, sont réduits par le nombre relativement élevé de colliers télémétriques actifs et par la capacité à échantillonner des groupes d'abondances variables, puisque leur détection est indépendante de leur taille

(colliers satellitaires). L'estimation de la taille de la population est obtenue selon la formule suivante :

$$N = \left(\frac{(M + 1)(C + 1)}{R + 1} \right) - 1$$

où :

N = estimation de la taille de la population au moment de l'inventaire;

M = nombre total de caribous marqués (équipés d'un collier émetteur actif) dans la population au moment de l'inventaire;

C = nombre total de caribous répertoriés dans les groupes échantillonnés au moment de l'inventaire;

R = nombre de caribous marqués, répertoriés dans les groupes de caribous échantillonnés au moment de l'inventaire.

L'intervalle de confiance du résultat du modèle (N_i) est calculé comme suit pour un risque d'erreur de 10 % ($\alpha = 0,10$; valeur de la statistique t déterminée selon un degré de liberté infini) :

$$N_i = 1,645\sqrt{Var(N)}$$

où :

$$Var(N) = \frac{(M + 1)(C + 1)(M - R)(C - R)}{(R + 1)^2(R + 2)}$$

Puisque ce modèle utilise la somme des caribous dans les groupes échantillonnés (C) en tant que variable, l'intervalle de confiance de ce modèle n'est pas influencé par la variabilité entre les groupes, mais uniquement par le nombre total de caribous dans les groupes échantillonnés (C), le nombre total d'individus marqués dans la population (M) et le nombre d'individus marqués qui a été échantillonné (R). Cette approche considère que la grande variabilité de la taille des groupes de caribous est normale et qu'elle ne constitue pas une source d'incertitude pour l'estimation du résultat final (N). Ce modèle simple implique donc que des vérifications soient faites afin de s'assurer que la validité du résultat n'est pas compromise en ne considérant pas la variance associée à la taille et au nombre de groupes échantillonnés.

La validité du résultat (N) ne dépend donc pas uniquement de l'intervalle de confiance du résultat, mais aussi des critères qui procurent une assurance quant à la qualité de l'échantillon et au choix d'un modèle simple :

1. Aucun groupe de taille significative et non représenté par un individu marqué n'est observé au moment de l'inventaire;
2. Les groupes les plus abondants sont représentés par plus d'un caribou marqué;
3. Les individus marqués et non échantillonnés lors de l'inventaire ($M - R$) sont dispersés dans les différents secteurs de densité de caribous de l'aire de répartition de la population au moment de l'inventaire;
4. Environ 80 % des colliers actifs ont été échantillonnés lors de l'inventaire (M/R).

Le non-respect de ces critères suggère que le nombre de colliers télémétriques est inadéquat (critères 1 et 2) ou que l'effort d'échantillonnage est insuffisant ou mal réparti dans l'habitat estival (critères 3 et 4) pour être représentatif de la population. Il en résulterait que l'estimation d'abondance est surestimée ou sous-estimée, selon le biais en cause.

En terminant, il existe d'autres modèles de CMR que celui de Lincoln-Petersen pour estimer une population de caribous migrants à l'aide de la télémétrie (voir Rivest et coll., 1998). Une variante du modèle de Lincoln-Petersen utilisant un seuil pour la taille minimale d'un groupe pourrait aussi être utilisée lorsque la taille de l'échantillon d'individus marqués est sous-optimale ou que la population est relativement abondante (voir Russell et coll., 1994 et Couturier et coll., 2014). Ce document ne vise toutefois pas à présenter une revue ou une comparaison des différentes méthodologies statistiques disponibles. Les avancées technologiques décrites précédemment soutiennent l'utilisation du modèle de Lincoln-Petersen qui, malgré les biais inhérents à tout modèle statistique, fournit des résultats précis permettant de décrire adéquatement les variations actuelles de l'abondance des populations de caribous migrants au Québec et au Labrador.

Références

- COUTURIER, S., D. JEAN, R. OTTO ET S. RIVARD (2004). *Démographie des troupeaux de caribous migrants-toundriques (Rangifer tarandus) au Nord-du-Québec et au Labrador*, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction de l'aménagement de la faune du Nord-du-Québec et Direction de la recherche sur la faune, Québec 71 p.
- CREPEAU, H., L-P. RIVEST, S. COUTURIER et S. BAILLARGEON (2012). *Estimation of caribou abundance based on large scale aggregations monitored by radio telemetry*, Caribou-Package version 1.1. R project.
- RIVEST, L.-P., S. COUTURIER et H. CREPEAU (1998). "Statistical methods for estimating caribou abundance using post calving aggregations detected by radio telemetry", *Biometrics*, 54 865 876.
- RUSSELL, J., S. COUTURIER, L. G. SOPUCK et K. OVASKA (1996). "Post-calving photosensus of the Rivière George caribou herd in July 1993", Sixth North American Caribou Workshop, Prince George, British Columbia, Canada, 1-4 March 1994, *Rangifer Special Issue*, 9: 319-330.
- WHITE, G. C. et R. A. GARROTT (1990). *Analyses of radio-tracking data*, Chapter 10 "Population Estimation", Academic Press, p. 255-270.

*Forêts, Faune
et Parcs*

Québec 

