

Direction de la recherche sur la faune
Direction de l'aménagement de la faune

**DÉVELOPPEMENT D'UNE TECHNIQUE D'INVENTAIRE AÉRIEN
ADAPTÉE AU CARIBOU FORESTIER**

par

Réhaume Courtois, André Gingras, Claude Dussault, Laurier Breton
et Jean-Pierre Ouellet

Société de la faune et des parcs du Québec
Université du Québec à Rimouski

RÉSUMÉ

Le caribou forestier vit en très faible densité, réparti en petites hardes disséminées sur de vastes territoires. La localisation exacte de la plupart des hardes et leur abondance ne sont actuellement pas connues au Québec, faute d'approche adéquate pour cette espèce en terme de précision, de biais et de coûts. Nous avons simulé diverses stratégies d'inventaire aérien du caribou forestier en utilisant les données de deux inventaires réalisés en 1991 et 1993 selon la technique de l'échantillonnage aléatoire stratifié (ÉAS). La superficie des parcelles était de parcelles de 200 km² lors du premier inventaire et de 100 km² lors du second. Les simulations ont montré qu'il fallait trouver tous les groupes principaux et les recenser pour obtenir un intervalle de confiance $\leq 20\%$ ($\alpha = 0,10$). L'ÉAS menait toujours à des résultats imprécis à cause de l'agrégation des caribous et parce que certains groupes étaient manqués lors de la stratification. La majeure partie de la variance (98-99 %) était causée par la strate forte et elle était très élevée parce que les groupes de caribous étaient de taille très variable et distribués de façon très hétérogène (0-49 caribous/parcelle). L'allocation de Neyman suggérait de recenser totalement cette strate. La plupart des parcelles de la strate faible étaient vides mais quelques-unes contenaient jusqu'à une dizaine de caribous, ce qui augmentait aussi la variance. Pour un inventaire réalisé à l'hiver 1999 dans un site d'étude de 42 539 km², il aurait fallu couvrir 30 à 35 parcelles dans la strate forte et une soixantaine dans la strate faible même si seulement quelques-unes d'entre elles étaient susceptibles de contenir des caribous. Nous avons plutôt opté pour une couverture complète du site d'étude, réalisée en deux phases. En phase 1, nous avons utilisé l'avion, avec des lignes espacées de 2,1 km afin de détecter la majeure partie des réseaux de pistes. L'hélicoptère fut utilisé seulement en phase 2, pour dénombrer et sexer les caribous. Le taux de visibilité des caribous a été estimé à 0,85 (SE = 0,08; $\alpha = 0,10$) en utilisant 20 caribous munis de colliers émetteurs. Considérant le biais de visibilité et sa variance, la densité corrigée fut estimée à 1,6 caribou par 100 km² avec une erreur relative de 15 % ($\alpha = 0,10$). L'inventaire a coûté environ 4 \$/km², ce qui est inférieur aux montants investis lors des inventaires antérieurs (7 \$/km²). La diminution des coûts est attribuable à deux facteurs principaux : 1) l'utilisation d'avions à grand rayon d'action (5-7 heures d'autonomie) pour minimiser les

déplacements en phase 1; 2) l'emploi des hélicoptères exclusivement pour le dénombrement et le sexage.

Mots clés : Caribou, biais, inventaire, précision, taux de visibilité, simulation

TABLE DES MATIÈRES

	Page
RÉSUMÉ	iii
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES	vi
1. INTRODUCTION	1
2. MÉTHODES.....	3
3. RÉSULTATS.....	5
4. DISCUSSION.....	15
4.1 Coûts d'un programme d'inventaires aériens du caribou forestier.....	17
5. RÉFÉRENCES	19

LISTE DES TABLEAUX

		page
Tableau 1.	Résumé des techniques utilisées lors de 30 inventaires aériens du caribou réalisés entre 1953 et 1997 au Québec et dans d'autres juridictions nord-américaines.....	6
Tableau 2.	Résultats des inventaires aériens du caribou réalisés en 1991 et 1993 dans des blocs de 12 000 km ² sur la Côte-Nord du Québec, Canada.....	8
Tableau 3.	Estimation des coûts reliés à l'inventaire aérien du caribou dans un bloc de 42 539 km ² selon trois stratégies d'échantillonnage.....	11

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Influence du nombre de parcelles survolées dans la strate faible (aucun réseau de pistes de caribou détecté lors du vol de stratification) sur la précision et les biais d'échantillonnage lors des inventaires aériens du caribou en milieu forestier. Chaque point sur la courbe représente 100 simulations. (a) intervalle de confiance ($\alpha = 0,10$) de la population estimée; (b) % des simulations ayant produit des intervalles de confiance > 20% ($\alpha = 0,10$); (c) biais d'échantillonnage moyen, en valeur absolue ($100 * [valeur estimée - valeur réelle] / valeur réelle$), obtenu en fonction du nombre de parcelles; (d) pourcentage des simulations par classe de biais d'échantillonnage et selon le nombre de parcelles inventoriées.....	10
Figure 2.	Localisation des réseaux de pistes de caribous lors de l'inventaire d'un bloc d'étude de 42 539 km ² , sur la Côte-Nord du Québec, en février et mars 1999	13

1. INTRODUCTION

Le caribou forestier vit en très faible densité, réparti en petites hardes disséminées sur de vastes territoires (Courtois *et al.* 2001a). D'après des inventaires systématiques réalisés au Québec durant les années 1960 et 1970, la limite méridionale de son aire de répartition se situerait aux environs du 49^e parallèle dans l'est de la province et du 52^e parallèle dans l'ouest (Brassard 1972). Ces inventaires ont révélé la présence de six grandes hardes forestières comptant quelques centaines à plusieurs milliers de caribous chacune. Entre ces dernières, on retrouvait aussi de nombreux groupes épars composés de 75 caribous ou moins. Plus au sud, la présence du caribou forestier se limitait à deux petites hardes isolées totalisant moins de 300 individus. L'abondance totale du caribou forestier au sud du 52^e parallèle avait alors été estimée à environ 12 000 individus mais l'intervalle de confiance de cette estimation n'était pas connu (Brassard 1979). L'aire de répartition actuelle semble encore plus réduite et la population totale pourrait être inférieure à 3 000 caribous, suite à la disparition des grandes hardes forestières (Courtois *et al.* 2001b).

En milieu forestier, les inventaires se sont surtout intéressés aux grandes hardes ainsi qu'aux groupes isolés du sud du Québec. Les techniques ont varié passablement au fil des ans et selon les groupes visés. Les grandes hardes étaient recensées à l'aide de virées équidistantes dans les aires d'hivernage traditionnelles (Le Hénaff 1976a,b; Folinsbee 1979) alors que l'inventaire des petites hardes du sud du Québec faisaient généralement intervenir une couverture totale après délimitation de l'aire utilisée à l'aide de la télémétrie (Cantin 1991; Paré et Brassard 1994; Desrosiers et Faubert 1995). Aucune évaluation récente n'est cependant disponible pour l'ensemble du caribou forestier du Québec. Quelques estimations ont été tentées à l'aide de plans aléatoires mais elles étaient très imprécises et probablement très biaisées (Joly et Brassard 1980). Les difficultés d'échantillonnage étaient causées par les très faibles densités, généralement inférieures à 1,5 caribou par 100 km², et par l'agrégation des individus en petits groupes distribués de façon contagieuse (Crête 1991). De plus, les caribous vivant en milieu forestier sont difficiles à trouver et les biais de visibilité n'ont jamais été estimés. À cause de ces difficultés, il a été suggéré d'évaluer la tendance des populations dans des secteurs

témoins (Gingras et Malouin 1993; Bourbonnais *et al.* 1997) ou d'après les observations faites lors des inventaires de l'original (Courtois *et al.* 1996). La première approche s'est avérée efficace pour estimer la densité dans les sites témoins de superficie relativement restreinte, mais elle s'est avérée coûteuse et les résultats ne pouvaient être extrapolés à l'ensemble de l'aire de répartition (Courtois *et al.* 1996). La deuxième approche était peu coûteuse mais elle ne permettait pas de connaître la localisation exacte des hardes ce qui limitait son utilité à des fins d'aménagement forestier. Finalement, la présence assez fréquente d'individus des grands troupeaux migrateurs du nord du Québec parmi les caribous forestiers les plus nordiques, empêchait à toutes fins utiles une estimation non biaisée des effectifs, le caribou forestier et le caribou migrateur étant morphologiquement semblables (Courtois *et al.* 1996).

Faute de techniques d'inventaires adéquates en termes de précision, de biais et de coûts, la localisation actuelle des hardes forestières, leur abondance et leur dynamique de population ne sont pas connues au Québec (Crête *et al.* 1990). Ce manque de connaissances est inquiétant puisque le caribou forestier semble en difficulté presque partout en Amérique du Nord (Mallory et Hillis 1998). Par ailleurs, on assiste depuis une vingtaine d'années à une importante expansion septentrionale de l'exploitation forestière. Par conséquent, une gestion adéquate du caribou forestier et de ses habitats nécessite, à court terme, une meilleure connaissance de la localisation des hardes et de l'évolution des effectifs. Nous avons examiné les inventaires antérieurs et, à partir des données provenant de deux inventaires de blocs témoins, nous avons simulé divers scénarios d'échantillonnage afin de suggérer une technique applicable sur de grands territoires. Cette technique a été employée dans un site d'étude de 42 539 km² pour tester son applicabilité et évaluer les coûts inhérents. Finalement, nous discutons la faisabilité d'un programme d'inventaires pour l'ensemble de l'aire de répartition du caribou forestier au Québec.

2. MÉTHODES

Les périodes d'inventaires les plus propices pour le caribou forestier, la composition des équipes, les types d'aéronefs ainsi que l'altitude et la vitesse de vol ont été identifiés à partir de 30 rapports d'inventaires aériens réalisés au Québec et dans diverses juridictions nord-américaines entre 1953 et 1997. Les données qui ont servi aux simulations proviennent de deux inventaires aériens réalisés en 1991 et 1993 dans deux blocs de 12 000 km² ($\approx 69,0^\circ$ W, $50,0^\circ$ N et $\approx 63,0^\circ$ W, $50,5^\circ$ N; Gingras et Malouin 1993, Bourbonnais *et al.* 1997). Les sites d'étude ont été couverts totalement en avion à tous les 10 km dans l'axe nord-sud lors du premier inventaire et, en hélicoptère selon des virées de même orientation mais espacées de 3 km lors du second inventaire. Ces survols ont permis de stratifier les sites d'étude en deux strates selon la présence ou l'absence de réseaux de pistes de caribou, les sites ayant été au préalable découpés en parcelles-échantillons de 200 (en 1991) ou de 100 km² (en 1993). Par la suite, un sous-échantillon des parcelles était survolé en hélicoptère selon des virées nord-sud équidistantes d'un kilomètre. Les réseaux de pistes identifiés étaient survolés en basse altitude pour trouver, dénombrer et sexer les caribous. Cinq parcelles étaient tirées au hasard dans chaque strate au début de l'inventaire, puis l'allocation optimale de Neyman (Snedecor et Cochran 1971) était recalculée quotidiennement pour allouer d'autres parcelles jusqu'à l'obtention d'un intervalle de confiance de 25 % ($\alpha = 0,10$) ou de l'atteinte d'un taux de sondage de 50 %.

En supposant que ces inventaires constituaient un pré-échantillonnage représentatif, nous avons simulé divers scénarios d'échantillonnage dans un grand site d'étude fictif (36 000 km²), construit en tirant au hasard des parcelles-échantillons parmi celles survolées en 1991 et 1993. Les simulations étaient faites de façon à couvrir totalement la strate forte puisque l'allocation optimale avait suggéré d'inventorier toutes les parcelles de cette strate lors des deux inventaires. Pour la strate faible, 50 scénarios d'échantillonnage ont été simulés en tirant entre deux et 100 parcelles-échantillons. Dans chaque cas, 100 simulations ont été réalisées. Des parcelles de 100 et 200 km² ont été testées mais les

résultats étaient très similaires si bien que seuls les résultats obtenus avec des parcelles de 100 km² sont présentés.

En 1999, nous avons inventorié le caribou dans un site d'étude de 42 539 km² ($\approx 66-71^\circ$ W et $49-51^\circ$ N) qui englobait le territoire couvert en 1991. Nous avons retenu un plan d'échantillonnage en deux phases. En phase 1, deux avions (Navajo 350) avec quatre membres d'équipage chacun (pilote, navigateur-observateur, deux observateurs) parcouraient le site d'étude selon des virées nord-sud équidistantes de 2,1 km (1,75 minute de longitude) à une vitesse de 200 km/h et à une altitude moyenne de 200 m. Le site d'étude a été découpé en blocs d'environ 40 km selon l'axe nord-sud afin de limiter la longueur des lignes de vol et réduire la fatigue des observateurs. Le territoire à couvrir était partagé quotidiennement entre les deux équipages. Les observations (pistes de caribou, d'orignal, de cervidé et, le cas échéant, nombre d'individus observés) étaient consignées sur des cartes topographiques 1:50 000 et leur point central était localisé à l'aide du GPS qui servait également pour la navigation. Au besoin, les informations (carte, localisation des réseaux de pistes) étaient échangées entre les équipes à l'aide de la télécopie et du courrier électronique.

En phase 2, les réseaux de pistes de caribous et ceux de cervidés indéterminés étaient visités en hélicoptère (Bell 206B ou Astar 350A) avec trois membres d'équipage afin de dénombrer et de classer (mâles et femelles adultes, faons) les caribous présents dans les réseaux de pistes, en considérant la taille des individus, la présence d'une tache vulvaire et la taille des bois. Cette partie du travail s'effectuait généralement le lendemain du survol en phase 1. Lors des dénombrements en hélicoptère, l'équipe notait la présence d'animaux porteurs de colliers émetteurs. Ceux-ci, au nombre de 20, furent repérés au milieu et à la fin des travaux afin d'identifier ceux qui avaient été manqués par les observateurs et calculer le taux de visibilité des caribous selon la méthode de Crête *et al.* (1986). Ces caribous avaient été marqués l'année précédente pour favoriser leur répartition dans le site d'étude. Les équipes d'inventaire ne connaissaient pas la localisation des caribous marqués au moment de l'inventaire. Les travaux se sont déroulés entre le 20 février et le 28 mars 1999.

3. RÉSULTATS

Les 30 publications consultées couvrent près de 70 inventaires aériens du caribou. Les techniques utilisées depuis les années 1950 ont varié considérablement (tableau 1). La stratégie d'échantillonnage la plus fréquente était le recensement de virées continues réparties systématiquement dans les aires d'étude (14 publications). Des inventaires par parcelles-échantillons (7) ou le survol de sites à fort potentiel pour le caribou (7) étaient assez fréquents, la dernière technique étant utilisée pour des territoires de petite superficie ou lorsque des sites de forte densité avaient été identifiés à l'aide de la télémétrie. L'avion (10) ou l'hélicoptère (10) ont été employés plus fréquemment que l'avion et l'hélicoptère simultanément (5). C'est surtout lors des inventaires les plus anciens que l'avion était employé seul. L'espacement entre les lignes de vol a varié entre 2 et 40 km, les plus larges espacements servant généralement à stratifier le territoire avant de réaliser le dénombrement. L'altitude de vol variait généralement entre 150 et 250 m alors que la vitesse était de l'ordre de 150 à 200 km/h. En milieux ouverts, les travaux étaient réalisés soit à l'automne (mi-septembre – mi-octobre) ou à la fin de l'hiver (mi-février – fin de mars) alors que la dernière période était retenue pour les sites forestiers.

Les inventaires réalisés au Québec en 1991 et 1993 ont donné des résultats satisfaisants, les intervalles de confiance étant de 20,1 % et 15,6 % ($\alpha = 0,10$) respectivement (tableau 2). Cependant, le taux de visibilité des caribous n'a pas été estimé si bien que le biais d'échantillonnage et la variance de ce biais n'étaient pas connus. La strate faible ne contenait que 18 à 21 % des caribous. Les groupes détectés étaient concentrés dans des réseaux de pistes espacés de moins de 10 km puisque, en 1991, la majorité (25 sur 29) de ceux qui ont été trouvés lors du survol en l'hélicoptère, selon des virées espacées de 1 km, avaient été détectés en avion lors de la stratification faite aux 10 km. Les réseaux de pistes de caribou occupaient en moyenne $3,1 \text{ km}^2 \pm 2,8$ (12) (moyenne \pm erreur type (n)) en 1991 et $0,78 \text{ km}^2 \pm 0,3$ (12) en 1993.

Tableau 1. Résumé des techniques utilisées lors de 30 inventaires aériens du caribou réalisés entre 1953 et 1997 au Québec et dans d'autres juridictions nord-américaines.

Auteur(s)	Superficie inventoriée	Méthode	Aéronef	Espacement des lignes de vol (km)		Altitude (m)	Vitesse (km/h)	Superf. Parcelles (km ²)	Période
				Phase 1 ^a	Phase 2 ^b				
Audet (1979)	171 140	Virées	Hélicoptère	10-40	- ^c	100-250	180	-	Février ?
Anonyme (1968)	92 700	Virées	Avion	16	-	250-300	-	-	-
Anonyme (1979)	87 000	Virées	Avion + hélico.	5	-	150-350			15 fév.-7 mars
Anonyme (1988)	122 000	Virées	Avion	10-20	-	120	140-160	-	18 mars-7 avr.
Banville (1998) ^d	1 500	Sites potentiels	Hélicoptère	-	1	100	160	-	Février - mars
Barnard (1983)	48 000	Aléatoire simple	Hélicoptère	-	0,5	100	160	60	Mi-février
Bergerud (1963)	-	Virées	Avion	8-32	0,8-32	150-300	130-160	-	Fin fév.- Début mars
Bergerud (1985)	1 878	Virées	Hélicoptère	2-5	-	-	-	-	Janvier-février
Bergerud et Elliot (1986)	-	Sites potentiels	-	-	-	-	-	-	Fin sept. mi-oct.
Boertji <i>et al.</i> (1996)	17 000	Complet	-	-	-	-	-	-	-
Bourbonnais <i>et al.</i> (1997)	12 000	Aléatoire stratifié	Hélicoptère	3,5	1	200	150-200	200	1-15 mars
Brassard (1967)	25 700	Virées	Avion	16	-	240-300	-	-	Fin fév. - début.mars
Brassard (1972)	533 500 ^e (29 135-250 250)	Virées, parcelles, complet	Avion	16	450-600	240-300		-	
Brassard (1982)	> 250 000	Aléatoire simple	Avion	-	-	-	-	-	Janvier-février

Tableau 1 (suite)

Auteur(s)	Superficie inventoriée	Méthode	Aéronef	Espacement des lignes de vol (km)		Altitude (m)	Vitesse (km/h)	Superf. Parcelles (km ²)	Période
				Phase 1 ^a	Phase 2 ^b				
Brassard et Brault (1997)	5 000	Sites potentiels	Hélicoptère	-	-	300	-	-	Fin mars
Couturier <i>et al.</i> (1996)	49 000	Virées	Avion + hélico.	13	-	40-60	180	-	Mi juin
Cumming <i>et al.</i> (1996)	6 500	Virées, complet		3		300		-	Mi-fin fév.
Desmeules et Brassard (1963)		Virées	Avion					-	
Desrosiers et Faubert (1995)	109	Sites potentiels	Hélicoptère	-	-	100	100	-	Octobre
Edmonds (1988)	16 000	Sites potentiels	Hélicoptère	-	-	75-100	-	-	Milieu-fin d'hiver
Farnell <i>et al.</i> (1996)	7 400 et 9 600	Aléatoire stratifié	-	-	-	-	-	-	Rut ou fin hiver
Gingras et Malouin (1991)	12 000	Aléatoire stratifié	Avion + hélico.	10	1	200	200	200	26 fév. – 23 mars
Heard et Ouellet. (1994)	5 600 et 34 000	Virées	Avion	4,3	-	122	185	-	23-24 juin
Joly et Brassard (1980)	82 000	Aléatoire stratifié	Avion + hélico.	-	0,5	-	-	60	-
Le Groupe Boréal (1992)	146 760	Aléatoire stratifié	Avion + hélico.	-	0,5	150	120	60	mi-janv. – début mars
Moisan (1957)	-	Sites potentiels	Avion	-	-	150-300	160-200	-	Novembre
Maltais (1997)	3 200	Complet	Hélicoptère	2	2	200-400	150	-	27-31 janv.
Pichette et Beauchemin (1973)		Virées	Avion	16	-				
Seip (1992)	5 000	Sites potentiels	Hélicoptère	-	-	-	-	-	Fin mars
Stuart-Smith <i>et al.</i> (1997)	20 000	Aléatoire stratifié	-	-	-	-	-	84	-

^a Survol permettant de localiser les réseaux de pistes soit pour circonscrire les hardes à inventorier systématiquement ou pour stratifier le territoire.

^b Dénombrement et sexage des hardes.

^c Ne s'applique pas ou valeur non précisée dans le rapport. ^e Six inventaires réalisés simultanément dans sept régions du Québec, avec des méthodes différentes.

^d Synthèse de 14 inventaires aériens du même site. Certains inventaires étaient accompagnés de décomptes et sexages terrestres.

Tableau 2. Résultats des inventaires aériens du caribou réalisés en 1991 et 1993 dans des blocs de 12 000 km² sur la Côte-Nord du Québec, Canada.

Strate	N / 100 km ²	Population	Erreur type	IC % ^a	F ^b
Inventaire de 1991					
Forte	6,1	141	0,0	0,0	100,0
Faible	0,3	31	20,4	114,1	38,8
Total	1,4	172	20,4	20,1	50,0
Inventaire de 1993					
Forte	8,4	92	0,0	0,0	100,0
Faible	0,2	24	10,9	74,5	45,0
Total	1,0	116	10,9	15,6	50,0

^a Intervalle de confiance exprimé en pourcentage de la population estimée ($\alpha = 0,10$).

^b Taux d'échantillonnage (nombre de parcelles survolées / nombre total de parcelles).

La variance en strate forte était très élevée, soit 273,4 et 114,5 en 1991 et 1993 respectivement (coefficients de variation (CV) : 129 % et 128 %), si bien que l'allocation optimale de Neyman avait suggéré de recenser totalement cette strate lors des deux inventaires. En plus d'être distribués de façon hétérogène dans le milieu, les caribous formaient des groupes de taille variable (0-49 caribous par parcelle à chacune des années) ce qui augmentait la variance des dénombrements. La variance dans la strate faible était également élevée compte tenu de la faible abondance du caribou dans ces parcelles ($S^2 = 5,4$ et $0,9$; $CV = 383$ % et 427 %). La plupart étaient vides mais quelques-unes contenaient jusqu'à une dizaine de caribous parce que certains réseaux de pistes avaient été manqués lors de la stratification. Ceci a entraîné l'échantillonnage d'un grand nombre de parcelles sans caribou pour diminuer la variance dans cette strate.

Pour un site d'étude de 36 000 km², les simulations montraient qu'on obtiendrait un intervalle de confiance moyen de 20 % ($\alpha = 0,10$) en inventoriant totalement la strate forte (l'équivalent de 33 parcelles de 100 km²) et 48 parcelles dans la strate faible (figure 1a). Cependant, avec un tel effort d'échantillonnage, près de 60 simulations sur 100 avaient un intervalle de confiance supérieur au seuil visé, soit une erreur relative de 20 % (figure 1b). De plus, un biais de l'ordre de 11 % était noté (figure 1c). Il aurait fallu inventorier environ 80 parcelles dans la strate faible pour obtenir un intervalle de confiance inférieur à 20 % dans environ 90 % des inventaires et avec un biais d'échantillonnage inférieur à 10 % (figure 1d).

Il semblait que le seul moyen de diminuer la variance était de trouver et de dénombrer presque tous les groupes de caribous en couvrant l'ensemble du site d'étude avec des lignes de vol assez rapprochées. Dans un tel inventaire, la seule source de variance serait celle liée au taux de visibilité des caribous, lequel pourrait être estimé à l'aide d'animaux munis de colliers émetteurs. Une estimation préliminaire des coûts a été faite pour trois plans d'échantillonnage : 1) échantillonnage aléatoire stratifié (ÉAS) en utilisant l'avion et l'hélicoptère (scénario retenu en 1991); 2) ÉAS en hélicoptère seulement (scénario de 1993); et 3) couverture totale du site en avion suivi d'un dénombrement en hélicoptère dans les réseaux de pistes détectés par l'avion (tableau 3). Le troisième scénario paraissait moins coûteux parce qu'il ne nécessitait pas de vol de stratification et qu'il demandait moins de déplacements entre les bases d'opération et le site d'étude ainsi qu'entre les parcelles. Ce scénario simplifiait aussi la logistique de l'inventaire et permettait le recensement des réseaux de pistes de l'orignal et du loup.

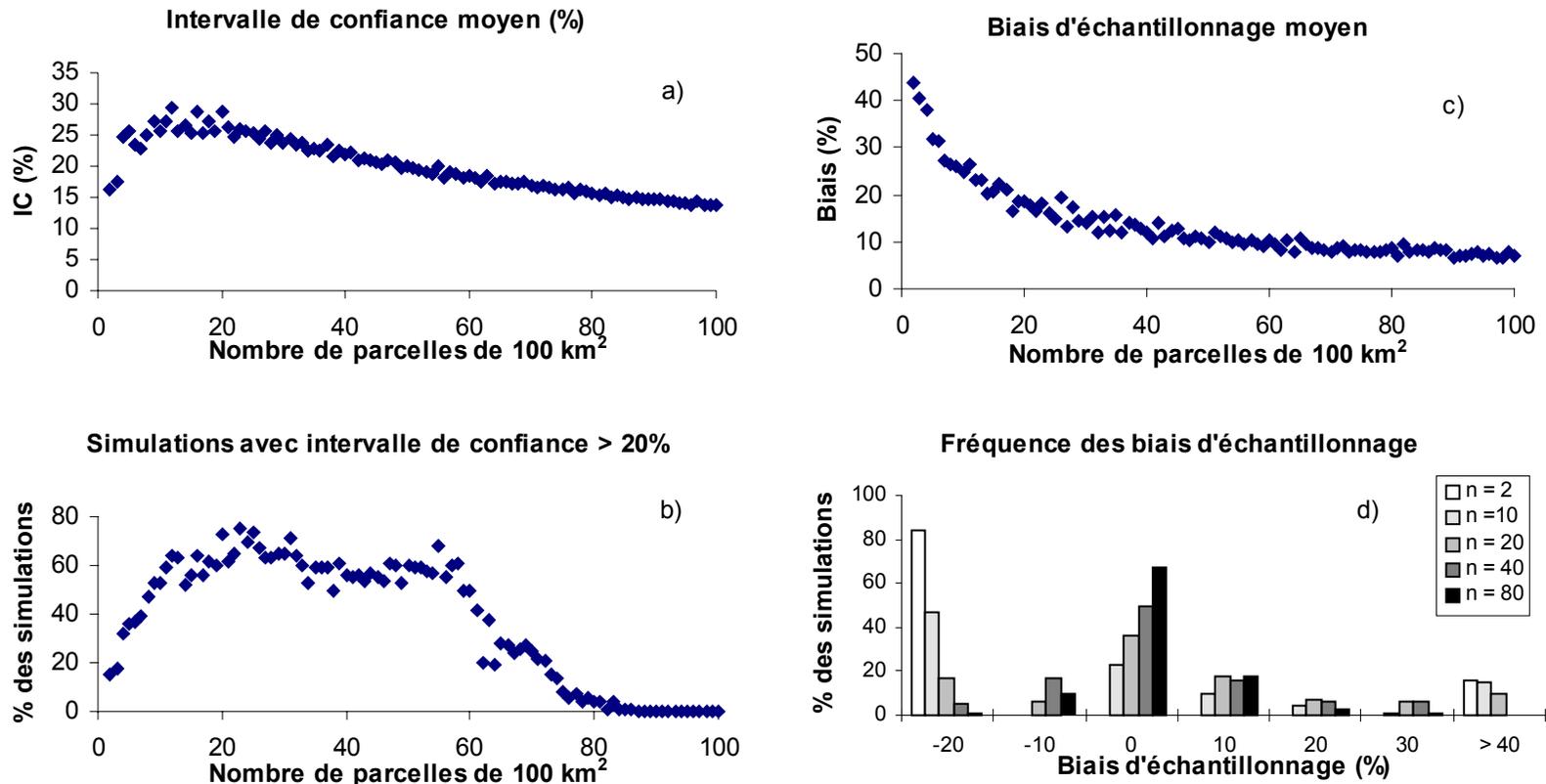


Figure 1. Influence du nombre de parcelles survolées dans la strate faible (aucun réseau de pistes de caribou détecté lors du vol de stratification) sur la précision et les biais d'échantillonnage lors des inventaires aériens du caribou en milieu forestier. Chaque point sur la courbe représente 100 simulations. (a) intervalle de confiance ($\alpha = 0,10$) de la population estimée; (b) % des simulations ayant produit des intervalles de confiance $> 20\%$ ($\alpha = 0,10$); (c) biais d'échantillonnage moyen, en valeur absolue ($100 * [| \text{valeur estimée} - \text{valeur réelle} |] / \text{valeur réelle}$), obtenu en fonction du nombre de parcelles; (d) pourcentage des simulations par classe de biais d'échantillonnage et selon le nombre de parcelles inventoriées.

Tableau 3. Estimation des coûts reliés à l'inventaire aérien du caribou dans un bloc de 42 539 km² selon trois stratégies d'échantillonnage.

	Heures de vol	Aéronef	Total ('000\$)
Avion et hélicoptère (scénario de 1991)			
Stratification – survol à 10 km	24,8	Avion	9,9
Stratification - déplacements	28,3	Avion ^b	11,3
Survol des parcelles à 1 km	131,0	Avion	52,4
Déplacements lors des survols	156,9	Avion	62,8
Dénombrement et sexage	53,1	Hélicoptère	37,2
Déplacements lors du sexage	28,3	Hélicoptère	19,8
Hébergement	-	-	40,6
Autres	-	-	3,9
Total			237,9
Hélicoptère seulement (scénario de 1993)			
Stratification - survol à 3,5 km	75,8	Hélicoptère	53,1
Survol des parcelles à 1 km	129,3	Hélicoptère	90,5
Dénombrement et sexage	40,7	Hélicoptère	28,5
Déplacements	83,6	Hélicoptère	58,5
Élingue	12,4	Hélicoptère	8,7
Hébergement	-	-	40,6
Autres	-	-	3,9
Total			283,7
Recouvrement total (avion et hélicoptère)			
Survol à 3,0 km	100,0	Avion	40,0
Déplacements de l'avion	30,0	Hélicoptère	12,0
Dénombrement et sexage	40,7	Hélicoptère	28,5
Déplacements	83,6	Hélicoptère	58,5
Hébergement	-	-	40,6
Autres	-	-	3,9
Total			183,5

^a Coûts estimés à 400 \$/h

^b Coûts estimés à 700 \$/h

Dans le site d'étude de 42 539 km², cette stratégie d'échantillonnage a permis de localiser 230 réseaux de pistes de caribous d'une superficie variant entre 0,06 à 9,52 km² (0,53 ± 0,06), comprenant entre 0 et 64 caribous (2,39 ± 0,42). Les réseaux de pistes étaient concentrés dans trois secteurs principaux (figure 2). Les équipes en hélicoptère ont compté 572 caribous. Dix-huit des 20 caribous munis de colliers émetteurs étaient dans des réseaux de pistes identifiés lors du survol en avion et, parmi ceux-ci, 17 ont été trouvés pendant les dénombrements. Le taux de visibilité a donc été de 0,90 (SE = 0,067) en phase 1 et de 0,94 (0,056) en phase 2, pour un taux global de 0,85 (0,080). La population totale corrigée pour le biais de visibilité a été estimée à 673 ± 100 caribous, soit un intervalle de confiance de 15 % ($\alpha = 0,10$). La densité corrigée était de 1,6 caribou/100 km² ± 15 % et il y avait 60,6 ± 4,5 mâles/100 femelles et 16,0 % ± 1,4 % de faons dans la population.

L'inventaire a coûté 160 100 \$ incluant le temps nécessaire pour estimer le taux de visibilité. Le survol en avion a requis 38 % du budget alors que 13 % ont été affectés aux déplacements des avions entre les bases d'opération et le site d'étude. Le dénombrement en hélicoptère a exigé 13 % du budget alors que 17 % ont été consacrés aux déplacements de cet aéronef. Le reste du budget (19 %) a été affecté aux frais d'hébergement des équipages et à diverses dépenses.

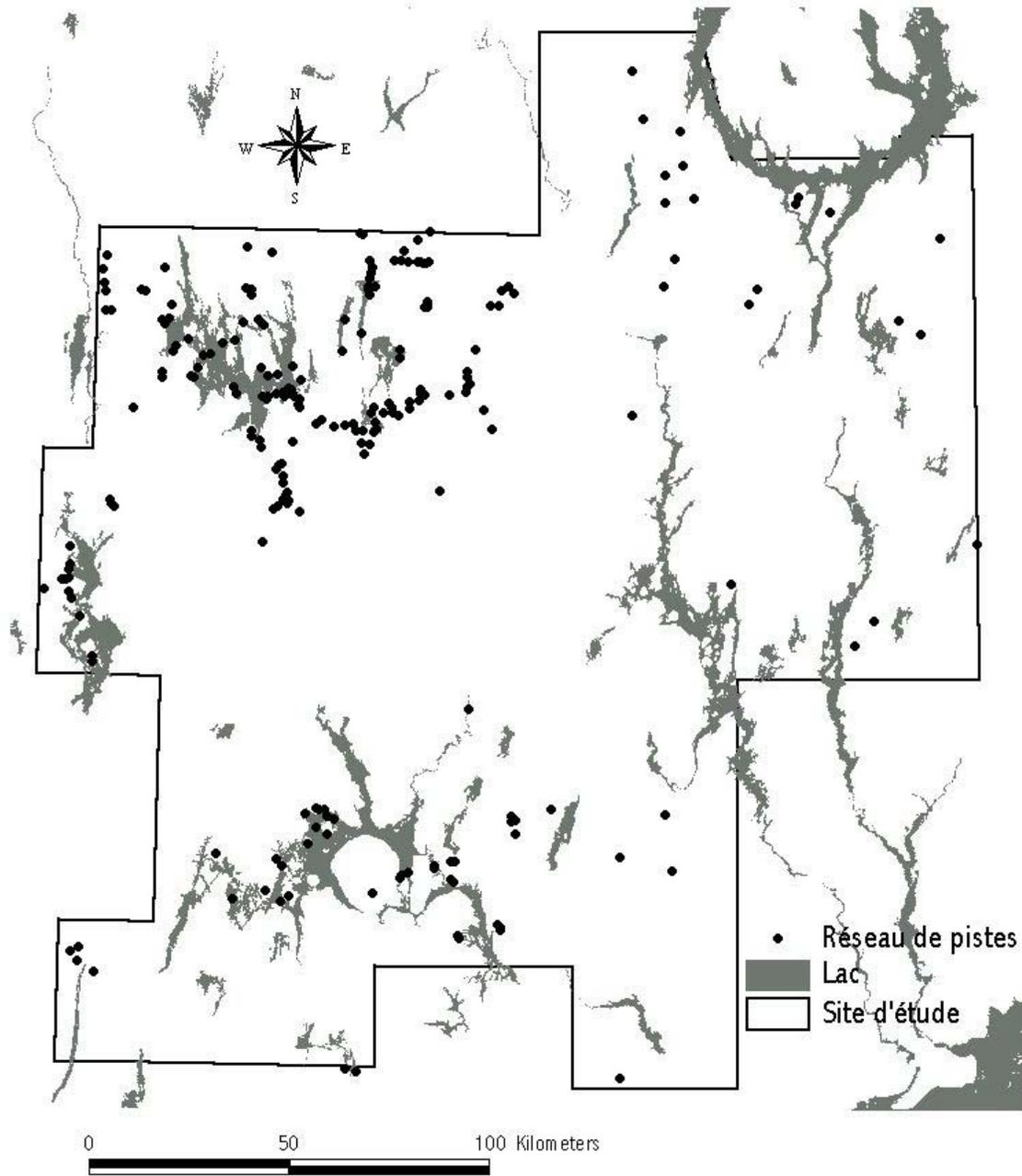


Figure 2. Localisation des réseaux de pistes de caribous lors de l'inventaire d'un bloc d'étude de 42 539 km², sur la Côte-Nord du Québec, en février et mars 1999.

4. DISCUSSION

Les inventaires aériens réalisés depuis une cinquantaine d'années illustrent bien le comportement grégaire des caribous, des groupes de quelques dizaines à quelques milliers d'individus ayant été observés dans des superficies relativement restreintes. Les techniques d'inventaire ont tenté d'exploiter ces comportements. Ainsi, pour les grands troupeaux nordiques, on profite généralement des regroupements durant la mise bas (Couturier *et al.* 1996) ou l'été (Rivest *et al.* 1994) pour effectuer les recensements. Les animaux sont alors concentrés dans des milieux ouverts de superficie relativement réduite ce qui facilite les décomptes.

Il n'existe cependant pas de méthode fiable pour les caribous vivant en milieu forestier. Les recensements antérieurs ont été faits en hiver pour profiter de la plus grande visibilité des bêtes à cette époque de l'année et, surtout, pour faciliter leur détection à l'aide des pistes dans la neige. Cependant, les faibles densités rencontrées et l'agrégation des caribous en groupes de tailles variables, eux-mêmes répartis de façon très contagieuse, ont mené à des estimations très imprécises. Par exemple, Joly et Brassard (1980) ont inventorié les cervidés dans 30 parcelles-échantillons de 60 km² dans un site de 82 000 km² au sud de la Baie James ($\approx 77,0^\circ$ W, $50,5^\circ$ N). Ils ont estimé la population d'orignaux avec une précision acceptable (intervalle de confiance = 25 %, $\alpha = 0,10$) en profitant du fait que la distribution des réseaux de pistes suivait une loi de Poisson. Par contre, les réseaux de pistes de caribou n'étaient pas assez nombreux pour appliquer la même technique. Au début des années 1990, 194 parcelles de 60 km² ont été inventoriées dans un site d'étude de 146 760 km² situé à l'est de la Baie James (Le groupe Boréal 1992). Même un effort d'échantillonnage aussi grand a mené à un intervalle de confiance très élevé (14 caribous/100 km² \pm 64 %, $\alpha = 0,10$). L'inventaire a permis de localiser deux zones de forte concentration qui ont été inventoriées selon des virées équidistantes de 10 km. La densité dans ce territoire plus restreint ($\approx 26\ 000$ km²) a été estimée à 450 caribous/100 km² avec un intervalle de confiance de 42 %.

Les observations tirées des inventaires et des simulations montrent qu'il faut trouver tous les groupes principaux et les recenser pour diminuer la variance lors d'un inventaire du caribou forestier. Même dans les zones de forte concentration, les techniques de sondage habituelles mènent à une variance très élevée et à des biais importants à cause du comportement grégaire des caribous forestiers et parce que certains groupes sont manqués lors de la stratification. Selon Bergerud (1963), l'épaisseur de la neige et la disponibilité des sites d'alimentation seraient les principaux facteurs influençant la répartition et la taille des groupes, les caribous étant plus concentrés lorsque la neige est plus épaisse et que les bons sites d'alimentation sont moins limitatifs. Cet auteur suggère de couvrir toute l'aire d'étude en avion pour délimiter les concentrations de caribou (≥ 232 caribous/100 km²). Par la suite, il conseille de recenser les aires de concentration dans le sens de la largeur à l'aide de bandes couvrant ≥ 33 % de leur superficie. En milieu fermé, les bandes devraient recouvrir environ 400 m de largeur de chaque côté de l'appareil, à 150 m d'altitude, ces deux paramètres pouvant être doublés en milieu ouvert. Dans les sites boisés, les inventaires devraient être réalisés lorsque l'épaisseur de neige est élevée. Les caribous sont alors plus concentrés et moins enclins à fréquenter les milieux fermés à la recherche de lichens arboricoles. Bergerud (1963) estimait que cette méthode sous-estimait les effectifs d'environ 20 % (extrêmes : 10-40 %) dans les aires de forte concentration.

Cette méthodologie, prévue pour les aires occupées par les grandes hardes de caribou forestier, devrait être appliquée dans l'ensemble d'une aire d'étude lorsque les densités sont très faibles. En pareil cas, les groupes de caribous sont petits et occupent des réseaux de pistes de superficie relativement réduite (< 3 km²). Lors des inventaires de 1991 et 1993, 18 à 21 % des caribous recensés étaient dans des réseaux de pistes non observés lors du survol de stratification réalisé selon des virées équidistantes de 3 à 10 km (Gingras et Malouin 1993; Bourbonnais *et al.* 1997). Dans le site inventorié en 1999, les réseaux de pistes des trois hardes principales auraient vraisemblablement été détectés par un vol de stratification fait à l'aide de virées espacées de 10 km. Par contre, plusieurs réseaux de pistes isolés auraient été manqués. Ceux-ci comprenaient au total entre 160 et 170 caribous, soit près de 30 % des effectifs. Les inventaires devraient être réalisés entre

la mi-février et la mi-mars, les caribous semblant alors plus enclins à fréquenter les milieux ouverts. De plus, les conditions d'observation sont plus favorables (ensoleillement, journées plus longues et plus chaudes). Finalement, des photographies pourraient être utilisées pour confirmer le décompte des grands groupes.

Avec des virées espacées de 2,1 km, environ 90 % des réseaux de pistes ont été trouvés lors du survol en avion et 94 % des caribous présents dans les réseaux de pistes détectés furent dénombrés, donnant un taux de visibilité total de l'ordre de 85 % et un intervalle de confiance de 15 % ($\alpha = 0,10$). Ce niveau de précision correspond aux seuils acceptés pour l'inventaire des cervidés en Amérique du Nord (Gasaway et Dubois 1987). Le taux de visibilité doit cependant être considéré comme une première approximation parce qu'il a été établi à partir d'un nombre relativement limité de caribous et que les mâles étaient peu représentés (trois individus sur 20).

Les coûts totaux d'un tel inventaire représentent environ 4 \$/km², ce qui est inférieur au montant investis pour des échantillonnages aléatoires stratifiés dans des superficies 3,5 fois plus petites (7 \$/km²; Gingras et Malouin 1993; Bourbonnais *et al.* 1997). La diminution des coûts lors de l'inventaire de 1999 est attribuable à deux facteurs principaux : 1) l'utilisation d'avions à grand rayon d'action (5-7 heures d'autonomie) pour minimiser les déplacements en phase 1, et 2) l'emploi des hélicoptères, plus coûteux, exclusivement pour le dénombrement et le sexage.

4.1 Coûts d'un programme d'inventaires aériens du caribou forestier

Notre travail montre qu'il est possible d'inventorier le caribou forestier avec précision et sans biais à la condition de couvrir l'ensemble des sites potentiels. Pour contenir les coûts d'inventaire, il faudrait toutefois circonscrire, à petite échelle, les principales aires potentiellement fréquentées en utilisant les données disponibles (récolte sportive, observations fortuites ou réalisées lors des inventaires d'autres cervidés, etc.).

Les informations colligées depuis une quarantaine d'années montrent que la répartition du caribou forestier est limitée à la forêt boréale (Courtois *et al.* 2001b). Plus

spécifiquement, on le retrouve dans le domaine bioclimatique de la pessière à mousse et presque exclusivement dans sa partie est, où le cycle des feux est beaucoup plus long. Environ 90 % des observations se retrouvent dans $\approx 234\,500\text{ km}^2$, ce qui correspond à l'aire de répartition continue du caribou forestier au Québec. Les aires à inventorier ainsi que divers scénarios d'inventaires sont présentés dans Courtois et al. (2001c). Selon la méthode utilisée en 1999, l'inventaire de toute l'aire de répartition continue coûterait près d'un million de dollars. Cependant, environ 257 700 \$ suffiraient à inventorier les aires d'utilisation intensive ($\approx 64\,400\text{ km}^2$) où l'on retrouve 70 % des observations de caribous (Courtois *et al.* 2001b). Le reste de l'aire fréquentée pourrait être inventorié de façon ad hoc, par exemple lors de l'élaboration de plans d'aménagement forestier. À cet effet, une mise de fond initiale d'environ 25 000 \$ par année pourrait être mise à la disposition des responsables régionaux ce qui leur permettrait de trouver des partenaires qui s'impliqueraient dans ces travaux. Les inventaires pourraient être réalisés dans le cadre d'un programme quinquennal où l'on recenserait simultanément le caribou, l'orignal et le loup et où l'on étudierait les habitats utilisés par ces trois espèces.

Les hardes isolées du sud du Québec font déjà l'objet d'un programme d'inventaire aérien qui coûte environ 147 500 \$ par période de cinq ans. Un programme complet couvrant les hardes isolées et celles de l'aire de répartition principale coûterait donc environ 100 000 \$ par année. Par ailleurs, il n'apparaît pas approprié d'inventorier les hardes sédentaires du nord du Québec à cause de leur co-occurrence avec les caribous migrants durant l'hiver (Paré 1987; Brown *et al.* 1986; Le Groupe Boréal 1992), ce qui empêche l'obtention d'estimations non biaisées.

5. RÉFÉRENCES

- Audet, R. 1979. Inventaire aérien de l'ensemble du bassin versant de la moyenne et de la basse Côte-Nord. Hydro-Québec, Direction de l'Environnement. Montréal, Québec. 42 p.
- Anonyme. 1968. Inventaire aérien des ongulés sauvages, section située dans le nord de l'Abitibi (janvier 1968). Service de la faune. Québec, Québec. 7 p.
- Anonyme. 1979. Inventaire aérien des ongulés de la Côte-Nord, 1979. Rapport technique. Hydro-Québec, Direction Environnement. Montréal, Québec. 6 p. + annexes.
- Anonyme. 1988. Late winter distribution of caribou and moose in southern Labrador and the Quebec North Shore. Renewable Resources Consulting Services Ltd, Sidney, BC and S. Fudge and Associates Limited, St. John's, NFLD. 27 p.
- Banfield, A.W.F., et J.S. Tener. 1958. A preliminary study of *Ungava caribou*. *J. Mammal.* 39: 560-573.
- Banville, D. 1998. Plan de gestion du caribou de Charlevoix. Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction régionale de Québec. 26 p.
- Barnard, F. 1983. Rapport de l'inventaire aérien des ongulés de la basse Côte-Nord en février 1983. Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Service de l'aménagement et de l'exploitation de la faune. Sept-Îles, Québec. 11 p.
- Bergerud, A.T. 1963. Aerial census of caribou. *J. Wildl. Manage.* 27: 438-449.
- Bergerud, A.T. 1985. Antipredator strategies of caribou: dispersion along shorelines. *Can. J. Zool.* 63: 1324-1329.
- Bergerud, A.T., et J.P. Elliot. 1986. Dynamics of caribou and wolves in Northern British Columbia. *Can. J. Zool.* 64 : 1515-1529.
- Boertje, R.D., P. Valkenburg, et M.E.Mcnay. 1996. Increases in moose, caribou, and wolves following wolf control in Alaska. *J. Wildl. Manage.* 60 : 474-489.
- Bourbonnais, N., A. Gingras, et B. Rochette. 1997. Inventaire aérien du caribou dans une portion de la zone de chasse 19 sud (partie est) en mars 1993. Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction régionale de la Côte-Nord, Service de l'aménagement et de l'exploitation de la faune. 24 p.

- Brassard, J.-M. 1967. Inventaire aérien des ongulés sauvages de la Côte-Nord et identification des aires d'hivernement en fonction des formes du relief et de la végétation. Service de la faune. Québec, Québec. 15 p.
- Brassard, J.-M. 1972. Inventaire aérien du gros gibier. Ministère du Tourisme, de la Chasse et de la Pêche, Service de la faune. Québec, Québec. 39 p.
- Brassard, J.-M. 1979. Le caribou. L'Aubelle, Supplément au numéro 15: 9-11.
- Brassard, J.-M. 1982. Inventaire aérien du caribou des territoires situés sur les versants de la Côte-Nord du Saint-Laurent. Ministère du Tourisme, de la Chasse et de la Pêche, Service de la faune. Québec, Québec. 13 p.
- Brassard, C., et M. Brault. 1997. État de la situation du caribou des bois (*Rangifer tarandus caribou*) de la Côte-Nord du Saint Laurent. Ministère de l'Environnement et de la Faune, Service de l'aménagement et de l'exploitation de la faune, Baie-Comeau, Québec.
- Brown, W., J. Huot, P. Lamothe, M. Paré, G. St-Martin, et J.B. Theberge. 1986. The distribution and movement patterns of four woodland caribou herds in Quebec and Labrador. *Rangifer*, Spec. Issue 1: 43-49.
- Cantin, M. 1991. Tendances démographiques de la population de caribous (*Rangifer tarandus*) des Grands-Jardins. Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Service de l'aménagement et de l'exploitation de la faune. Charlesbourg, Québec, 26 p.
- Courtois, R., J.-P. Ouellet, A. Gingras, C. Dussault, et D. Banville. 2001a. La situation du caribou forestier au Québec. *Naturaliste Can.* (sous presse).
- Courtois, R., J.-P. Ouellet, A. Gingras, C. Dussault, L. Breton, et J. Maltais. 2001b. Changements historiques et répartition actuelle du caribou au Québec. Société de la faune et des parcs du Québec, Direction de la recherche sur la faune. Québec, Québec. (sous presse).
- Courtois, R., A. Gingras, C. Dussault et L. Breton. 2001c. Proposition d'un plan d'inventaires aériens du caribou forestier. Société de la faune et des parcs du Québec, Direction de la recherche sur la faune. Québec, Québec. (sous presse).
- Courtois, R., F. Potvin, S. Couturier, et A. Gingras. 1996. Révision des programmes d'inventaires aériens des grands cervidés. Ministère de l'Environnement et de la

- Faune. Direction de la faune et des habitats et Direction des affaires régionales. Québec, Québec. 49 p.
- Couturier, S., R. Courtois, H. Crépeau, L.-P. Rivest, et S. Luttich. 1996. The June 1993 photocensus of the Rivière George caribou herd and comparison with an independent census. *Rangifer*, Spec. Issue 9: 283-296.
- Crête, M. 1991. Mise au point de la technique d'inventaire du caribou dans la taïga. Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Service de la faune terrestre. 20 p.
- Crête, M., R. Nault, et H. Laflamme. 1990. Caribou. Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Direction de la faune et de habitats. 73 p. SP 1780-02-91
- Crête, M, L.-P. Rivest, H. Jolicoeur, J.-M. Brassard, et F. Messier. 1986. Predicting and correcting helicopter counts of moose with observations made from fixed-wing aircraft in southern Québec. *J. Appl. Ecol.* 23 : 751-761.
- Cumming, H.G., D.B. Beange, et G. Lavoie. 1996. Habitat partitioning between woodland caribou and moose in Ontario: the potential role of shared predation risk. *Rangifer*, Special Issue 9: 81-94.
- DesMeules, P., et J.-M. Brassard. 1963. Inventaire préliminaire du caribou *Rangifer tarandus* d'un secteur de la Côte-Nord et du secteur centre de l'Ungava. Ministère du Tourisme, de la Chasse et de la Pêche, Service de la faune, Québec. 40 p.
- Desrosiers, A., et R. Faubert. 1995. Méthode d'inventaire aérien pour déterminer la composition automnale de la population de caribous du parc de la Gaspésie et synthèse des résultats obtenus entre 1953 et 1994. Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Direction de la faune et des habitats. Québec, Québec. 22 p.
- Farnell, R., N. Barichello, K. Egli, et G. Kuzyk, G. 1996. Population ecology of two woodland caribou herds in the southern Yukon. *Rangifer*, special issue 9 : 63-72.
- Folinsbee, J.D. 1979. Distribution et abondance passées et présentes du caribou (*Rangifer tarandus*), au Labrador méridional et dans les régions adjacentes du Québec. *Recherches Amérindiennes au Québec* 9 : 37-46.
- Gasaway, W.C., et S.D. Dubois. 1987. Estimating moose population parameters. *Swedish Wildlife Research Suppl.* 1: 603-617.
- Gingras, A., et B. Malouin. 1993. Inventaire aérien du caribou dans la zone de chasse 19 sud (partie ouest) en mars 1991. Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche

- Direction régionale de la Côte-Nord, Service de l'aménagement et de l'exploitation de la faune. 26 p.
- Heard, D., et J.-P. Ouellet. 1994. Dynamics of an introduced caribou population. *Arctic* 47 : 88-95.
- Joly, R., et J.-M. Brassard. 1980. Inventaire aérien des ongulés d'une portion sud du territoire de la municipalité de la Baie James. Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Direction générale de la faune, Rapport DGF 16 : 119-136.
- Le Groupe Boréal. 1992. Complexe Nottaway-Broadback-Rupert. : Les mammifères – volume 3 - Abondance et habitat du caribou (*Rangifer tarandus*). Rapport présenté à Hydro-Québec, vice-présidence Environnement. Le Groupe Boréal. St-Romuald, Québec. 55 p. + annexes.
- Le Hénaff, D. 1976a. Vérification des principales aires du caribou (*Rangifer tarandus*) dans le secteur de Waco (basse Côte-Nord) et au Nouveau Québec, avril 1976. Ministère du Tourisme, de la Chasse et de la Pêche. Service de la recherche biologique. 31 p.
- Le Hénaff, D. 1976b. Inventaire aérien du secteur Natashquan à Blanc-Sablon. Ministère du Tourisme, de la Chasse et de la Pêche, Service de la faune. 7 p.
- Mallory, F.F., et T.L. Hillis. 1998. Demographic characteristics of circumpolar caribou populations : ecotypes, ecological constraints/releases, and population dynamics. *Rangifer*, Special Issue No. 10 : 49-60.
- Maltais, J. 1997. Inventaire de reconnaissance (aire commune 24-1) : caribous des bois (*Rangifer tarandus*) de la région des lacs Péribonca et Manouane. Abondance et besoins de l'espèce par rapport à l'exploitation forestière. Stone-Consolidated Inc. Division Saguenay. Chicoutimi, Québec. 39 p. + annexes.
- Moisan, G. 1957. Le caribou de Gaspé. III, Analyse de la population et plan d'aménagement. *Naturaliste Can.* 84 (1) : 5-27.
- Paré, M. 1987. Effets du remplissage d'un réservoir hydroélectrique sur la population de caribous de Caniapiscau. Thèse de Maîtrise, Université Laval. Sainte-Foy, Québec. 141 p.

- Paré, M., et C. Brassard. 1994. Écologie et plan de protection de la population de caribous de Val-d'Or. Ministère de l'Environnement et de la Faune. Direction régionale de l'Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Québec. 56 p.
- Pichette, C., et P. Beauchemin. 1973. Inventaire aérien du caribou. Ministère du Tourisme, de la Chasse et de la Pêche. Service de la faune. Québec, Québec. 11 p.
- Rivest, L.-P., S. Couturier, et H. Crépeau. 1994. Statistical methods for estimating caribou abundance using post-calving aggregations detected by radiotelemetry. *Biometrics* 54: 865-876.
- Seip, D.R. 1992. Factors limiting woodland caribou populations and their interrelationships with wolves and moose in southeastern British Columbia. *Can. J. Zool.* 70: 1494-1503.
- Snedecor, G.W., et W.G. Cochran. 1971. Méthodes statistiques, 6^e édition. Association de coordination technique agricole. Paris. 649 p.
- Stuart-Smith, A.K., C.J.A. Bradshaw, S. Boutin, S., D.M. Hebert, et A.B. Rippin. 1997. Woodland caribou relative to landscape pattern in northeastern Alberta. *J. Wildl. Manage.* 622-633.