

Écologie de la reproduction du faucon pèlerin au Nunavut

Mikaël Jaffré, Alastair Franke, Alexandre Anctil, Philippe Galipeau, Erik Hedlin, Vincent Lamarre, Vincent L'Hérault, Laurent Nikolaiczuk, Kristen Peck, Barry Robinson, et Joël Bêty

Résumé

Le déclin historique du faucon pèlerin (*Falco peregrinus*) observé en Amérique du Nord au milieu du xx^e siècle a été principalement attribué à l'échec de reproduction causé par les polluants organochlorés persistants. C'est dans ce contexte que le *Arctic Raptor Project* a été initié, en 1982, dans le but d'étudier la reproduction de faucons pèlerins *F.p. tundrius* nichant dans l'Arctique. Nous présentons ici une synthèse des principaux travaux conduits dans le cadre de ce programme de recherche réalisé essentiellement dans la région de Rankin Inlet, mais aussi plus récemment près d'Igloolik et sur l'île de Baffin au Nunavut. Des résultats portant sur le régime alimentaire, la phénologie de la reproduction, la croissance et la survie des jeunes, ainsi que sur la dynamique de population sont présentés. Le suivi à long terme dans la région de Rankin Inlet a permis de mettre en lumière, entre autres choses, une baisse du nombre de jeunes au cours des 3 dernières décennies. Des épisodes de fortes précipitations estivales, plus fréquents dans l'aire d'étude ces dernières années, semblent en partie responsables de ces diminutions. En outre, l'étude des rapaces nichant dans l'Arctique est cruciale pour comprendre les conséquences sur la dynamique des populations, notamment des changements climatiques, de l'environnement (p. ex. diminution des polluants organochlorés) et de la structure et du fonctionnement de l'écosystème arctique.

MOT CLÉS : Arctique, *Falco peregrinus*, dynamique de population, Rankin Inlet, régime alimentaire

Abstract

The historical decline of the peregrine falcon (*Falco peregrinus*) in North America during the 20th century was mainly attributed to reproductive failure due to the accumulation of persistent organochloride pollutants. As a direct result to this finding, the Arctic Raptor Project was established in 1982, and its goal was to monitor the breeding success of Arctic-nesting peregrine falcons (*F.p. tundrius*). The present article provides a synopsis of the major findings of its research, which was principally conducted around Rankin Inlet (Nunavut), but also, more recently, around Igloolik and on Baffin Island (Nunavut). The results cover raptor feeding regimes, reproductive phenology, growth and survival of young, and population dynamics. The long-term Rankin Inlet study has identified, among other things, a decrease in the number of young fledged over the past 3 decades. Episodes of heavy summer rain, which have occurred more frequently in recent years, appear, in part, to be responsible for this decline in reproductive output. The continued study of Arctic-nesting raptors is crucial to our understanding of population dynamics, including how these are affected by changes in climate and in the environment (e.g., reductions in organochloride pollutant levels), and on the structure and functioning of the Arctic ecosystem.

KEYWORDS: Arctic, *Falco peregrinus*, population dynamic, Rankin Inlet, diet

MIKAËL JAFFRÉ est stagiaire post-doctoral à l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) et collaborateur du « Arctic Raptor Project » de l'Institut circumpolaire canadien à l'Université d'Alberta à Edmonton. ALASTAIR FRANKE est le principal investigateur du « Arctic Raptor Project » et adjoint académique de l'Institut circumpolaire canadien à l'Université d'Alberta à Edmonton. ALEXANDRE ANCTIL est titulaire d'une maîtrise réalisée à l'UQAR en collaboration avec le « Arctic Raptor Project » alors que PHILIPPE GALIPEAU est étudiant à la maîtrise à la même institution et collaborateur du « Arctic Raptor Project ». ERIK HEDLIN est étudiant à la maîtrise au Département des ressources renouvelables à l'Université d'Alberta, à Edmonton, et collaborateur du « Arctic Raptor Project ». VINCENT LAMARRE est étudiant à la maîtrise à l'UQAR et collaborateur du « Arctic Raptor Project ». VINCENT L'HÉRAULT est titulaire d'une maîtrise réalisée à l'UQAR et collaborateur du « Arctic Raptor Project ». LAURENT NIKOLAICZUK est collaborateur du « Arctic Raptor Project ». KRISTEN PECK est étudiante à la maîtrise à l'UQAR et collaboratrice du « Arctic Raptor Project ». BARRY ROBINSON est étudiant au doctorat au Département de sciences biologiques de l'Université d'Alberta à Edmonton et collaborateur du « Arctic Raptor Project ». JOËL BÊTY est co-directeur de la Chaire de recherche du Canada en biodiversité nordique au sein du Département de biologie et du Centre d'études nordiques à l'UQAR.

mikael.jaffre@uqar.ca

Introduction

En raison de sa distribution cosmopolite, le faucon pèlerin (*Falco peregrinus*) est sans doute un des rapaces les plus étudiés. Avec près de 20 sous-espèces décrites, cette espèce présente un large éventail de traits d'histoire de vie, incluant des différences morphologiques, comportementales et de répartitions spatiales très marquées (White et collab., 2013). Ces spécificités ont vraisemblablement été principalement façonnées par la grande variabilité des habitats fréquentés par les différentes sous-espèces, allant de la forêt tropicale africaine à la toundra groenlandaise, en passant par les terres arides et chaudes d'Australie ou les grands massifs montagneux des Andes. Parallèlement, plusieurs stratégies de migration sont observées chez les faucons pèlerins, allant de longues migrations de plus de 13 000 km chez les oiseaux nichant dans les hautes latitudes, jusqu'à la sédentarité de la majorité de ceux nichant aux latitudes méridionales et tempérées. Contrairement aux populations européennes qui sont étudiées depuis le Moyen-Âge (Ratcliffe, 1980), les sous-espèces arctiques et migratrices longue distance sont beaucoup moins bien connues en raison de leur isolement géographique et des difficultés logistiques associées à leur suivi. De ce fait, le faucon pèlerin de la toundra (*F. p. tundrius* White; figure 1) fut la dernière sous-espèce de faucon pèlerin formellement décrite (1968). Nous présentons ici une synthèse des principaux travaux de recherche réalisés par notre équipe au cours des 3 dernières décennies sur les faucons pèlerins nichant au Nunavut, dans le Grand Nord canadien.

Historique du suivi

Les recherches de notre équipe (*Arctic Raptor Project*) sur les faucons pèlerins du Nunavut ont été initiées en 1982 et ont été réalisées par 6 chercheurs principaux et 11 étudiants diplômés. La plupart des recherches ont été conduites dans la région de Rankin Inlet, mais elles ont été étendues à Igloolik en 2009 et à l'île de Baffin en 2010. Dès le début, le programme de recherche a porté sur l'histoire naturelle (Court et collab., 1988), la dynamique de population (Court et collab., 1989) et la présence de pesticides organochlorés persistants (Court et collab., 1990) dans les tissus du faucon pèlerin. Bradley et Oliphant (1991) ont examiné le régime alimentaire et Bradley et collab. (1997) ont étudié les effets des conditions météorologiques sur le succès reproducteur des faucons. Johnstone et collab. (1996) ont étendu l'étude sur la dynamique de population initiée par Court et collab. (1989), en plus d'examiner la source des contaminants organochlorés et l'évolution de leur concentration au fil du temps. Les biologistes du gouvernement du Nunavut ont pris la responsabilité du suivi de l'occupation des sites de nidification et de la productivité annuelle de la population de Rankin Inlet de 1997 à 2002. Par la suite, les recherches de notre équipe se sont surtout concentrées sur les causes des variations annuelles de survie des adultes (Franke et collab., 2011) et les mécanismes responsables du déclin à long terme du succès de reproduction des faucons (Franke et collab.,



Mikaël Jaffré

Figure 1. Faucon pèlerin bagué dans la zone d'étude de Rankin Inlet.

2010; Anctil et collab., 2013; Franke et collab., 2013). Enfin, L'Hérault et collab. (2013) ont récemment raffiné l'étude sur le régime alimentaire des faucons en utilisant les isotopes stables.

Aires d'étude

La zone d'étude principale entourant Rankin Inlet (62,8085° N, -92,0853° O; figure 2), couvre approximativement 350 km² de toundra, de falaises littorales et d'îles situées sur la côte de la Baie d'Hudson. Dans cette région, la fonte printanière commence à la mi-mai et la glace de mer côtière persiste jusqu'à la seconde semaine de juillet. Les étés sont typiquement courts et frais, avec des températures quotidiennes moyennes maximales et minimales, en juillet, de 14,9°C et 6,1°C respectivement. Les précipitations annuelles moyennes atteignent 18,2 cm de pluie et 131,9 cm de neige (données météorologiques enregistrées à l'aéroport de Rankin Inlet de 1981 à 2010 par Environnement Canada). Ce site est relativement facile d'accès à partir de l'aéroport de Rankin Inlet. Les moyens utilisés pour accéder aux nids des faucons varient selon la saison. Des motoneiges sont généralement utilisées tôt en saison, tant que la baie d'Hudson est gelée et que la neige couvre une grande partie de la région, généralement jusqu'à mi-juin. Plus tard, l'accès se fait par véhicule tout terrain ou par bateau. Une route de 25 km, ouverte toute l'année, relie Rankin Inlet et la mine d'Agnico Eagle située au bord du lac Méliadine, au nord de Rankin Inlet, et offre des accès supplémentaires aux sites de reproduction des faucons. La densité de faucons pèlerins dans cette zone d'étude était estimée à un couple nicheur par 15 km² entre 1982 et 2009 (Franke et collab., 2010).

L'aire d'étude de l'île d'Igloolik, localisée à 800 km au nord-est de Rankin Inlet, se situe entre les îles Coxe et le continent, à la pointe nord de la péninsule de Melville,

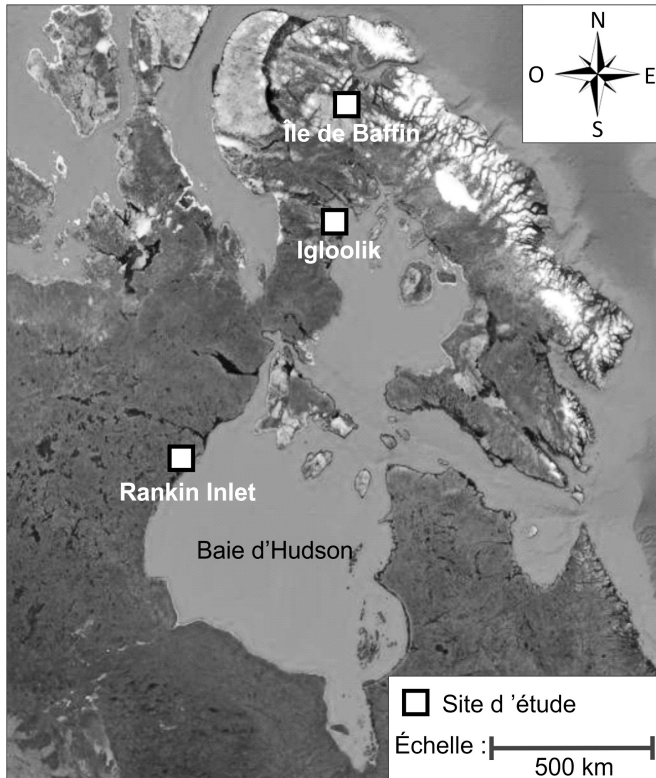


Figure 2. Localisation des aires d'étude du faucon pèlerin au Nunavut, Canada.

près de la communauté d'Igloolik (69,5345° N, -82,5070° O; figure 2). Le dégel printanier commence au début de juin et la majorité de la neige a fondu au début de juillet. La persistance de la glace de mer varie selon les années, mais la mer est généralement libre de glace entre le milieu et la fin de juillet. Les températures moyennes minimales et maximales de juillet sont de 3,6 à 11,2°C, respectivement, et la moyenne des précipitations annuelles est de 8,7 cm de pluie et 136,2 cm de neige (données d'Environnement Canada pour la période 1981-2010). La zone d'étude comprend 2 030 km² de toundra, de côtes escarpées, de lacs et de mer. La densité estimée de faucons pèlerins nicheurs était d'environ 1 couple par 93 km² entre 2010 et 2013. Les falaises sont nombreuses, généralement situées sur le littoral ou au bord des grands lacs intérieurs qui parsèment la région. Les petits lacs et les zones humides sont également nombreux en milieu toundrique.

L'aire d'étude de l'île de Baffin, localisée à 1 000 km au nord-est de Rankin Inlet, s'étend sur 10 500 km² et se situe le long d'un axe latitudinal de 215 km, au nord-ouest de l'île de Baffin, Nunavut (71,326° N -79,374° O; figure 2). Les températures moyennes de juillet fluctuent entre un minimum de 2,7°C et un maximum de 10,5°C alors que les précipitations annuelles moyennes totalisent 9,1 cm de pluie et 131,9 cm de neige (Environnement Canada – 1981-2010). Le terrain est accidenté et l'élévation peut atteindre 900 m. Les collines, entrecoupées de fjords sur la côte nord de l'île, laissent place à des plaines et à des plateaux en allant vers le

sud-ouest. La densité de faucons pèlerins, estimée à partir des sites de reproduction connus, était d'environ 1 couple nicheur par 130 km² entre 2011 et 2013. L'aire d'étude comprend un site d'activité minière exploratoire. La compagnie Baffinland Iron mines Corp. projette d'exploiter plusieurs dépôts de fer au centre de la zone d'étude, à Mary River. Une route relie présentement les camps miniers de Mary River et de Milne Inlet (71,884° N, -80,907° O). Ces infrastructures minières sont le port d'attache de tous les travaux de recherche effectués dans cette zone et commencés en 2010.

La buse pattue (*Buteo lagopus*), le harfang des neiges (*Bubo scandiacus*) et le faucon gerfaut (*Falco rusticolus*) sont les autres principaux rapaces nicheurs également observés sur nos aires d'étude. Les milieux bien drainés et les falaises sont couverts d'une formation de lichens, de mousses, et de graminées. Des *Poaceae* spp., *Cyperaceae* spp. (dont les *Carex* spp.), lichens et petits arbustes (*Betula glandulosa* et *Salix* spp.) sont présents dans les zones basses et humides, dans les crevasses rocheuses et dans la plupart des pentes et coteaux.

Synthèse des résultats

Comme les tailles d'échantillon et la variance différaient entre les zones d'étude, nous avons comparé les dates de ponte et d'éclosion entre les zones en utilisant le test de la somme des rangs de Kruskal-Wallis avec comparaisons de groupes *post-hoc* à un seuil de signification de $p = 0,05$ grâce au progiciel Pgrimess sous R (R Core Team, 2003; Giraudoux, 2013). Pour toutes les autres comparaisons entre les zones d'étude, nous avons utilisé des analyses de variance à 2 facteurs ou des tests *t* de Student sous R (R Core Team, 2003). La relation entre les températures moyennes de mai et la date de ponte médiane à Rankin Inlet a été évaluée par régression linéaire simple. Toutes les erreurs associées aux estimations sont représentées par des écarts-types, sauf indication contraire.

Régime alimentaire

Les faucons pèlerins nichant dans l'Arctique se nourrissent d'espèces d'oiseaux et de mammifères de petites et moyennes tailles (Cade, 1960; Rosenfield et collab., 1995). Les proies sont identifiables grâce à 3 techniques: l'analyse de pelotes de régurgitation et de restes trouvés près des nids (Bradley et Oliphant, 1991), via l'observation à partir de caméras automatisées et à l'aide des isotopes stables (L'Héault et collab., 2013). Les principales proies peuvent être classées en 3 groupes fonctionnels: les herbivores terrestres (petits mammifères, oies et bernaches), les insectivores terrestres (passereaux et limicoles) et les oiseaux marins. Les études portant sur le régime alimentaire des faucons à Rankin Inlet (Court et collab., 1988; Bradley et Oliphant, 1991; L'Héault et collab., 2013) concordent avec d'autres études indiquant que les faucons pèlerins utilisent un large éventail de proies (tableau 1; figure 3a), et suggèrent que l'espèce n'est pas un prédateur strictement spécialiste des proies aviaires. En utilisant les isotopes stables, L'Héault et collab. (2013) ont montré des différences dans la composition des espèces de

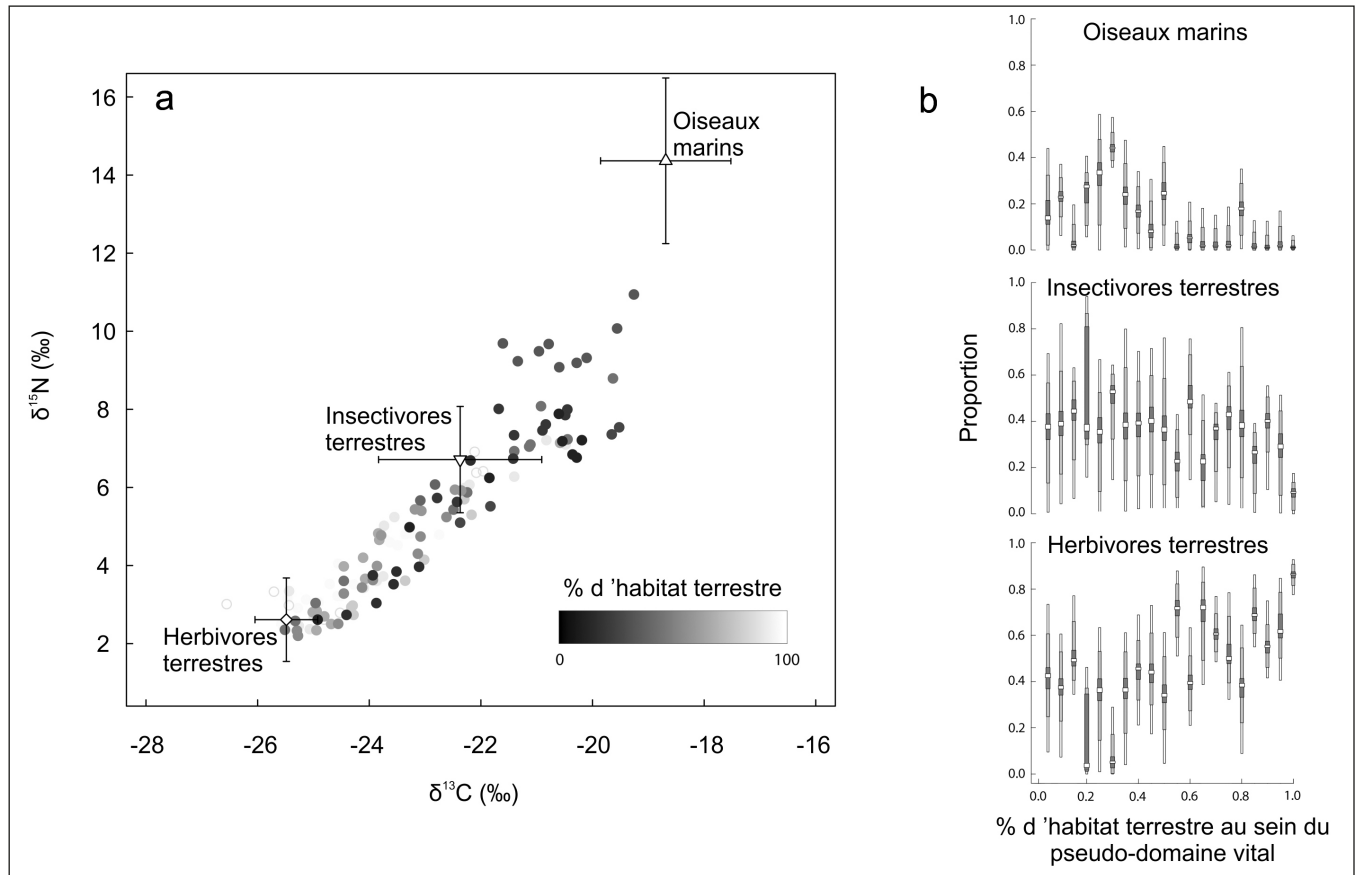


Figure 3. a) Relation entre la proportion d'habitats terrestres dans le pseudo-domaine vital des parents et la signature isotopique des oisillons de faucon pèlerin à Rankin Inlet à l'été 2008. Plus le cercle est foncé, plus la proportion d'habitats marins est grande. Les croix illustrent l'étendue de la signature isotopique de 3 catégories de proies (modifié de L'Hérault et collab., 2013). b) Contribution relative des oiseaux marins, des insectivores terrestres et des herbivores terrestres dans le régime alimentaire des oisillons de faucons pèlerins à Rankin Inlet à l'été 2008, en fonction de la proportion d'habitats terrestres (versus marins) dans le pseudo-domaine vital des parents. Chaque boîte à moustaches montre les intervalles de 5, 25, 75 et 95 % (boîtes blanches, marques gris foncé, gris clair et blanches, respectivement) des probabilités de distribution (modifié de L'Hérault et collab., 2013).

proies utilisées pour nourrir les oisillons en fonction de la position géographique du territoire occupé par un couple. Les oisillons élevés à proximité de la mer, sur des îles ou sur la côte recevaient plus de nourriture d'origine marine que ceux élevés à l'intérieur des terres. La composition du régime alimentaire du faucon pèlerin était ainsi liée à l'abondance des proies disponibles à proximité des nids, ce qui correspond à une stratégie généraliste telle que décrite par Andersson et Erlinge (1977). Toutefois, le régime alimentaire de tous les faucons, incluant ceux nichant dans les environnements à dominance marine, était principalement composé de proies d'origine terrestre (figure 3b).

Dans l'Arctique, les lemmings jouent un rôle clé dans les écosystèmes terrestres. Leurs populations fluctuent généralement en suivant des cycles, se traduisant par des pics périodiques observés tous les 4 ans environ (Gilg et collab., 2003; Gauthier et collab., 2013). Lors des années de forte abondance, les lemmings peuvent représenter une composante majeure du régime alimentaire des prédateurs aviaires (Gilg et collab., 2009; Legagneux et collab., 2012;

Therrien et collab., 2014), incluant le faucon pèlerin (Court et collab., 1988; Bradley et Oliphant, 1991). Cependant, peu d'études ont examiné la proportion des proies dans le régime alimentaire des faucons en fonction de leurs disponibilités (Hunter et collab., 1988; Dawson et collab., 2011), et aucune n'a été menée dans l'Arctique. Afin de mieux comprendre la sélection des proies par le faucon pèlerin, nous avons quantifié leur disponibilité en inventariant les proies aviaires et les signes de présence de lemmings le long de transects, pendant la période 2010-2012 à Igloodik (Robinson et collab., 2014). Les années 2010 et 2012 n'ont pas connu de fortes densités de lemmings, contrairement à 2011 marquée par une densité de micromammifères environ 10 fois supérieure à celle de 2010. Bien que la consommation de lemmings semble avoir été plus grande en 2011 sur la base de l'étendue de la niche isotopique (figure 4), la niche isotopique des faucons semblait tout de même centrée sur les insectivores terrestres (figure 4). Cette situation contraste avec d'autres rapaces arctiques qui se nourrissent essentiellement de micromammifères lorsque ceux-ci sont présents en forte abondance (p. ex. buse pattue

Tableau 1. Liste des principales espèces consommées par le faucon pèlerin dans l'aire d'étude de Rankin Inlet, au Nunavut, entre 1982 et 2012.

Groupes fonctionnels	Nom commun	Nom scientifique
Insectivores terrestres	Plectrophane des neiges	<i>Plectrophenax nivalis</i>
	Alouette haussecol	<i>Eremophila alpestris</i>
	Plectrophane lapon	<i>Calcarius lapponicus</i>
	Pipit d'Amérique	<i>Anthus rubescens</i>
	Bécasseau variable	<i>Calidris alpina</i>
	Phalarope à bec large	<i>Phalaropus fulicarius</i>
	Pluvier semipalmé	<i>Charadrius semipalmatus</i>
	Bécasseau de Baird	<i>Calidris bairdii</i>
	Bécasseau à croupion blanc	<i>Calidris fuscicollis</i>
	Herbivores terrestres	Oie des neiges
Lemming à collier		<i>Dicrostonyx groenlandicus</i>
Lemming brun		<i>Lemmus trimucronatus</i>
Spermophile arctique		<i>Urocitellus parryii</i>
Oiseaux marins	Goéland argenté	<i>Larus argentatus</i>
	Sterne arctique	<i>Sterna paradisaea</i>
	Harelde kakawi	<i>Clangula hyemalis</i>
	Eider à duvet	<i>Somateria mollissima</i>
	Guillemot à miroir	<i>Cephus grylle</i>

Buteo lagopus (Pokrovsky et collab., 2014), harfang des neiges *Bubo scandiacus* (Wiklund et Stigh, 1986), labbe pomarin *Stercorarius pomarinus* (Maher, 1970b) et labbe à longue queue *Stercorarius longicaudus* (Maher, 1970a)).

À Rankin Inlet, L'Hérault et collab. (2013) ont montré que la contribution relative des différents groupes de proies changeait en fonction de la date durant l'élevage des jeunes. En effet, il y avait une utilisation prédominante d'herbivores terrestres tôt en saison suivie d'une plus grande consommation des oiseaux insectivores terrestres plus tard durant l'élevage des poussins (L'Hérault et collab., 2013), probablement en lien avec l'augmentation de la disponibilité des passereaux et limicoles juvéniles. Un changement saisonnier du régime alimentaire semble aussi survenir à Igloodik; bien que les passereaux soient utilisés régulièrement tout au long de la saison de reproduction, la contribution relative des oiseaux marins, tels que le guillemot à miroir (*Cephus grylle*), l'harelde kakawi (*Clangula hyemalis*) et l'eider à duvet (*Somateria mollissima*), augmentait au cours de la saison de reproduction dans le régime alimentaire des faucons (Robinson et collab., 2014). L'utilisation accrue de ces proies coïncide vraisemblablement avec la période au cours de laquelle les jeunes de nombreuses

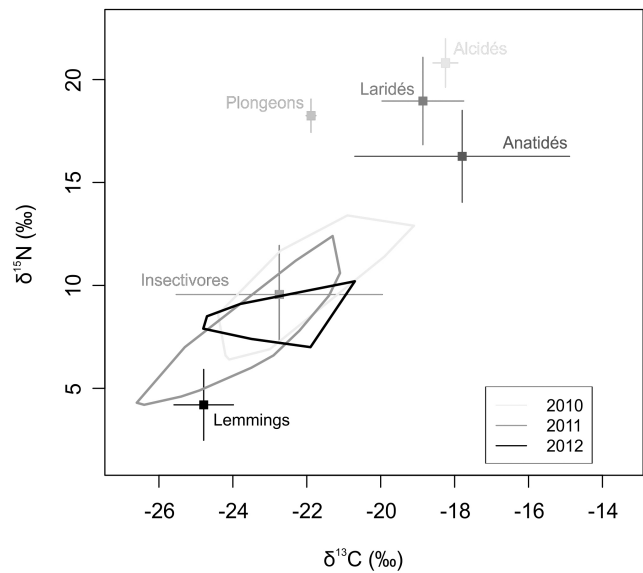


Figure 4. Étendue de la niche isotopique (caractérisée en utilisant l'enveloppe convexe d'un polygone) de poussins de faucon pèlerin suivis près de la communauté d'Igloodik, Nunavut, Canada, pendant les années 2010 à 2012, ainsi que la signature isotopique des 6 principales proies potentielles dans cette région.

espèces deviennent vulnérables à la prédation aérienne, et survient au moment où les faucons femelles commencent à contribuer au nourrissage des jeunes.

Biologie de la reproduction

Arrivée et occupation

Les couples de faucon pèlerin sont monogames et demeurent fidèles souvent durant plusieurs saisons de reproduction. Les 2 sexes sont aussi fidèles au site de reproduction, et, comme chez de nombreuses espèces philopatriques, leur comportement monogame résulte probablement davantage de leur fidélité au site de reproduction qu'au partenaire en soi (Cézilly et collab., 2000; Naves et collab., 2006). Les faucons pèlerins peuvent atteindre leur maturité sexuelle à l'âge de 1 an, mais en général ils l'atteignent pendant leur deuxième année (Ratcliffe, 1980). L'ordre d'arrivée sur le territoire de reproduction ne semble pas lié au sexe (Cade, 1960; Ratcliffe, 1980), et nos observations au Nunavut ont confirmé cette tendance (Court et collab., 1988). La date d'arrivée connue la plus précoce à Rankin Inlet fut le 10 mai, et la majorité des couples arrivent dans les sites de reproduction autour de la 3^e semaine de mai.

À la fin de mai, les territoires de nidification sont visités régulièrement par notre équipe jusqu'à ce que l'occupation par les faucons soit confirmée ou jusqu'à ce que la saison de reproduction soit suffisamment avancée pour conclure que le site est vacant (Franke et collab., 2010). Un site est considéré occupé lorsqu'au moins un individu présentant un comportement territorial (présence sur un site connu, signes

d'agressivité, cris de défense (*kakking*) y est observé ou lorsque des activités de reproduction sont observées (appariement incluant des vocalisations, accouplement, aménagement du nid, chasse coopérative ou échanges de nourriture). À Rankin Inlet, le taux d'occupation moyen (nombre de sites occupés sur l'ensemble des sites connus), de 1982 à 2013, fut de $75 \pm$ SD = 6 %, et a varié d'un minimum de 62 % en 2004 à un maximum de 85 % en 1988 et 1994 (figure 5).

Ponte

La date médiane de ponte du premier œuf a été mesurée dans chaque zone d'étude en utilisant les observations faites lors des visites des nids, à l'aide de caméras automatisées ou à l'aide de rétro-calculs, en soustrayant la durée d'incubation aux dates d'éclosions connues. Comme la ponte du premier œuf a souvent lieu entre 2 visites du nid, la date de ponte de chaque œuf fut estimée en supposant un intervalle de 2 jours entre chaque œuf pondu (Ricklefs, 1969). Les différents sites d'étude ayant une différence latitudinale marquée, on s'attendrait à ce que les sites plus au sud initient leur reproduction plus tôt. En effet, nos données nous permettent de constater que la date médiane de ponte à Rankin Inlet (9 juin \pm 4,0 jours) était plus précoce qu'à Igloolik (15 juin \pm 3,6 jours; $\text{Khi}^2 = 31,56$, $p < 0,001$) et à l'île de Baffin (16 juin \pm 3,5 jours; $\text{Khi}^2 = 35,56$, $p < 0,001$), aucune différence n'ayant été observée entre Igloolik et Baffin ($\text{Khi}^2 = 0,77$, $p = 0,38$) (figure 6). Cet ordre phénologique respecte l'ordre latitudinal des sites, les conditions propices à la reproduction survenant plus tard aux latitudes plus septentrionales.

Par ailleurs, la date médiane de ponte chaque année est également dépendante des conditions météorologiques que rencontrent les adultes reproducteurs sur les sites. À Rankin Inlet, entre 2009 et 2013, les variations interannuelles de la date de ponte étaient négativement liées à la température moyenne en mai (date de ponte = $-0,763 \times \text{température} + 4,9604$; $R^2 = 0,71$; $p < 0,05$). Ainsi, une augmentation de 1 degré Celsius de la température de mai générerait en moyenne un avancement de 0,763 jour de la date de ponte.

La taille de ponte était typiquement de 3 ou 4 œufs au Nunavut (90 % des observations ($n = 288$); tableau 2). La majorité (6 sur 7) des couvées d'un seul œuf ont été abandonnées pendant l'incubation, et seulement 16 % ($n = 19$) des couvées de 2 œufs ont produit au moins un jeune à l'envol. À Rankin Inlet et à Igloolik, la durée d'incubation médiane du premier œuf était de 36 jours, et a diminué de 1 jour pour chaque œuf additionnel (tableau 2). La durée d'incubation du quatrième œuf (33 jours) était similaire à ce qui a été rapporté ailleurs (Burnham, 1983).

Éclosion et élevage

Comme pour la date de ponte, nous avons constaté une tendance similaire pour la date médiane d'éclosion, soit des dates plus hâtives à Rankin Inlet (14 juillet \pm SD = 4,0 jours) qu'à Igloolik (20 juillet \pm 3,9 jours; $\text{Khi}^2 = 30,93$ et $p < 0,001$) et sur l'île de Baffin (18 juillet \pm 2,9 jours; $\text{Khi}^2 = 19,88$ et

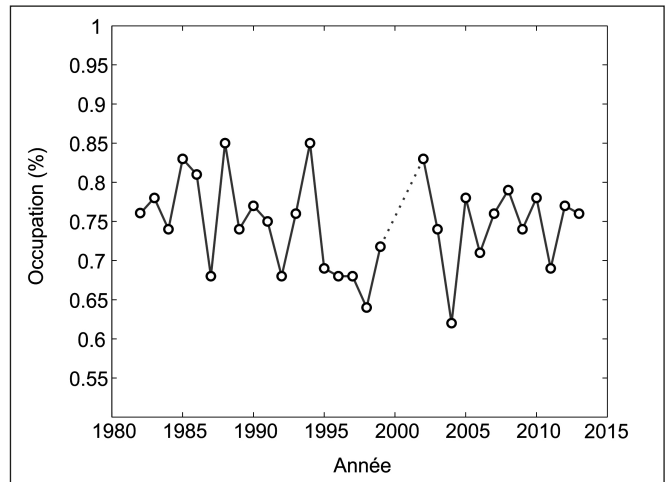


Figure 5. Taux d'occupation (%) des sites de reproduction connus des faucons pèlerins à Rankin Inlet, Nunavut, entre 1982 et 2013.

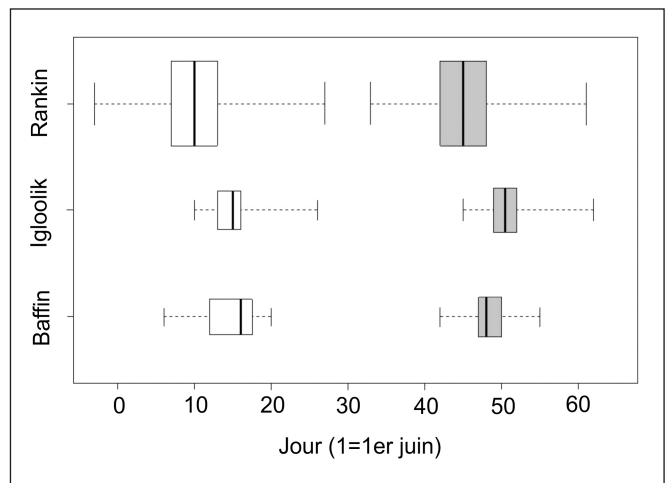


Figure 6. Phénologie de la ponte (blanc) et de l'éclosion (gris) du premier œuf chez les faucons pèlerins suivis à 3 sites d'étude au Nunavut (Rankin Inlet, Igloolik, et île de Baffin). La taille de chaque boîte à moustaches est proportionnelle à la taille de l'échantillon. Chaque boîte présente la médiane (trait noir), les interquartiles entre 25 et 75 % (limites de la boîte) et toute la gamme des données (moustaches).

$p < 0,001$). Il n'y avait cependant pas de différence entre Igloolik et Baffin ($p > 0,05$; figure 6).

L'éclosion asynchrone est commune chez les oiseaux nidicoles, et plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer l'avantage évolutif que confère cette stratégie (Stenning, 1996). Lack (1947) a proposé que l'éclosion asynchrone était une adaptation évolutive pour s'accommoder à une disponibilité alimentaire saisonnière imprévisible. Les plus jeunes oisillons (et généralement les plus petits) étaient ainsi susceptibles de survivre uniquement lors des années où la nourriture était relativement abondante, mais étaient généralement condamnés

Tableau 2. Taille de ponte de couples du faucon pèlerin (nombre d'œufs par nid), taux d'éclosion (nombre de poussins éclos par nid ayant reçu des œufs) et productivité moyenne (nombre de jeunes ayant atteint l'âge 25 jours) dans 3 sites d'étude du Nunavut.

		Aire d'étude ^a			Durée d'incubation médiane en jours (n ^c)
		Rankin Inlet	Igloolik	Île de Baffin	
Taille de ponte et % des nids (n ^b)	1	1,7 (3)	8,3 (3)	1,3 (1)	36 ± 1,8 ^d (48)
	2	6,8 (12)	0,0 (0)	9,3 (7)	35 ± 1,7 (47)
	3	28,8 (51)	52,8 (19)	32,0 (24)	34 ± 1,3 (42)
	4	61,6 (109)	38,9 (14)	57,3 (43)	33 ± 1,5 (21)
	5	1,1 (2)	n/a	n/a	n/a
Taux d'éclosion		1,9 ± 0,6 ^d	2,2 ± 0,6		
Productivité		0,9 ± 0,4 ^d	1,9 ± 0,9	1,2 ± 0,9	

^a. Nombre d'années d'observation : Rankin Inlet : 2008-2013, Igloolik : 2010-2013, Île de Baffin : 2011-2013 (excluant 2011 pour la taille de ponte).

^b. Nombre de nids.

^c. Nombre d'œufs considérés, suivis dans 43 nids de Rankin Inlet et 5 nids d'Igloolik.

lorsque les conditions environnementales conduisaient à une faible disponibilité en nourriture (Wiebe et Bortolotti, 1995; Estes et collab., 1999). Dans la population de faucons pèlerins de Rankin Inlet, le deuxième œuf éclot au plus un jour après le premier, le troisième au plus 2 jours après le second et le quatrième entre 3 et 4 jours suivant le début de l'éclosion. Cela suggère que l'incubation commence avant la ponte du troisième œuf. Les 2 premiers œufs sont probablement couvés durant la ponte pour éviter le gel, mais pas assez pour permettre le développement de l'embryon. Cette différence de synchronie à l'éclosion, pouvant atteindre jusqu'à 5 jours dans certains cas, peut générer une différence de plus de 100 g entre le 1^{er} et le 4^e jeune d'une couvée à une même date (figure 7). La date d'éclosion et l'ordre d'éclosion ont un effet important sur la survie des oisillons. Anctil et collab. (2013) ont montré que les jeunes avec une date d'éclosion tardive combinée avec un rang subalterne dans la séquence d'éclosion (p. ex. 4^e position) avaient une survie plus faible. Court et collab. (1988) ont suggéré que les oisillons éclos en 4^e position pourraient avoir connu un retard de croissance dans les premiers jours suivant l'éclosion, lié à la concurrence accrue de la part des frères et sœurs plus âgés (Court et collab., 1988; McDonald et collab., 2005). Nos résultats récents soutiennent cette hypothèse; cette occurrence se traduisait en effet par un taux de croissance plus faible pour les oisillons éclos en 4^e position qui n'atteignaient pas 25 jours (figure 8a). En revanche, les 4^{es} oisillons éclos qui survivaient plus de 25 jours atteignaient un taux de croissance semblable à celui des frères et sœurs éclos plus tôt, mais seulement après 10 jours d'âge environ. Les 4^{es} oisillons pouvaient également être victimes d'une réduction de couvée initiée par un parent (Franke et collab., 2013). Ainsi, la survie du 4^e oisillon est probablement liée à une combinaison entre la phénologie de l'éclosion, l'abondance de proies, et la qualité des parents en termes de capacité intrinsèque à approvisionner les jeunes.

Le dimorphisme sexuel inverse (femelle plus grande que le mâle) est typique chez le faucon pèlerin comme chez



Figure 7. Photographie montrant la différence de taille entre le quatrième oisillon d'une nichée et les autres. Cette disproportion est liée à l'éclosion asynchrone de 4 jours entre le premier et le quatrième œuf (Arctic Raptor Project – Rankin Inlet, Nunavut, 8 août 2013).

beaucoup de rapaces (White et collab., 2002). Toutefois, les oisillons mâles et femelles montraient peu de différences de masse jusqu'à environ 2 semaines d'âge. Les différences entre les 2 sexes étaient plus marquées à partir de 3 semaines d'âge environ (figure 8b).

Facteurs influant le succès de reproduction

Les conditions météorologiques

Le succès de reproduction du faucon pèlerin a souvent été associé aux conditions météorologiques, en particulier à l'ampleur des précipitations (Mearns et Newton, 1988; Bradley et collab., 1997). Anctil et collab. (2013) ont réalisé une expérience à Rankin Inlet à l'aide de nichoirs offrant une protection directe contre les intempéries, et ont démontré que plus du tiers de la

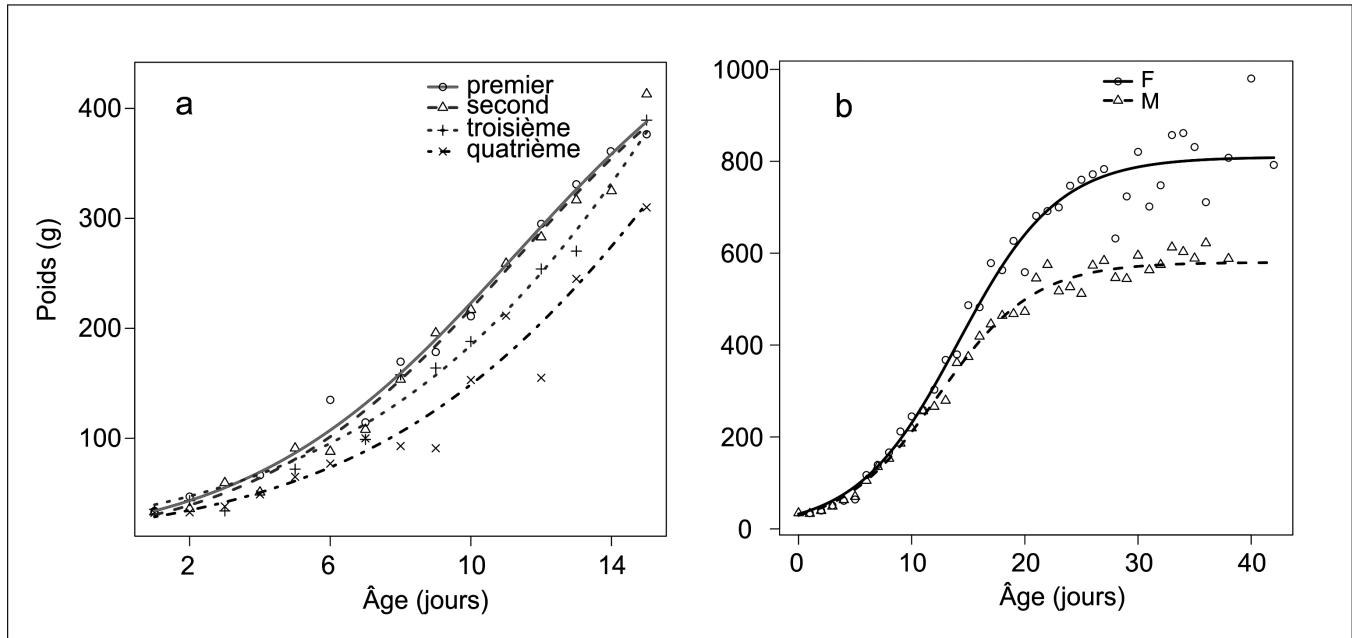


Figure 8. a) Croissance de la masse corporelle de jeunes faucons pèlerins en fonction de l'ordre d'éclosion de leur œuf dans 4 nichées différentes suivies durant les étés 2008, 2009, 2010 et 2013 (n = 16 nichées). Les courbes de croissance moyenne sont présentées pour les jeunes éclos aux 3 premières positions et qui ont survécu jusqu'à l'envol (premier: n = 11, second: n = 11, troisième: n = 9) et pour les jeunes éclos en 4^e position qui n'ont pas survécu jusqu'à l'envol (n = 13). En raison de la croissance différentielle entre les sexes et l'impossibilité de déterminer le sexe des individus morts à un jeune âge, les courbes de croissance ne couvrent que 15 jours, période pendant laquelle la croissance est similaire chez les mâles et les femelles. b) Croissance de la masse corporelle de jeunes mâles (n = 54) et femelles (n = 37) de faucon pèlerin qui ont survécu au moins 25 jours lors des étés de 2008 à 2010, Rankin Inlet, Nunavut.

mortalité des jeunes âgés de moins de 25 jours était attribuable aux effets directs de la pluie. De plus, les auteurs ont montré que c'était le nombre de jours de fortes précipitations (c'est-à-dire ≥ 8 mm par jour) au cours de la période d'élevage qui était le plus fortement relié à la mortalité des jeunes, et non pas la quantité totale de précipitations. Enfin, le déclin de la productivité observé dans la population de Rankin Inlet ces dernières décennies pourrait être en partie lié à des changements dans le régime des précipitations (Anctil et collab., 2013). En effet, une augmentation de la fréquence des fortes précipitations a été documentée dans la région de Rankin Inlet au cours des 3 dernières décennies (Anctil et collab., 2013) comme ailleurs dans l'Arctique canadien (Groisman et collab., 2005).

La situation géographique

La position géographique du territoire d'un couple peut avoir un effet sur son succès reproducteur. En effet, L'Hérault et collab. (2013) ont montré que, parmi les nids ayant produit au moins un jeune de 25 jours d'âge, le nombre total de jeunes produits était plus élevé pour les sites situés dans les milieux principalement terrestres (figure 9). En moyenne, les nids situés en milieu à dominance terrestre produisaient 0,47 jeune de plus par rapport aux nids situés sur de petites îles loin de la côte. Ainsi, cela suggère que les sites installés sur les îles seraient des sites suboptimaux pour l'élevage des jeunes chez cette espèce.

La disponibilité en nourriture

Le succès de reproduction du faucon pèlerin nichant dans l'Arctique semble également influencé par la disponibilité des proies. À Rankin Inlet, l'occupation, la taille des couvées et la productivité (nombre de jeunes/site occupé) ont toutes augmenté au cours des années de pic de lemmings (Court et collab., 1988). Cet effet s'explique probablement de 2 façons. D'une part, les faucons peuvent profiter directement des fortes abondances de petits mammifères en les incluant dans leur régime alimentaire (Bradley et Oliphant, 1991). D'autre part, une forte abondance de lemmings peut indirectement augmenter la disponibilité de proies aviaires pour les faucons. En effet, le succès de reproduction des oiseaux insectivores et herbivores est généralement positivement relié à l'abondance de lemmings à cause d'une réduction de la pression de prédation des renards arctiques *Vulpes lagopus* sur les nids (Bêty et collab., 2002; Smith et collab., 2007; McKinnon et collab., 2014). Nos récents résultats suggèrent un fort effet de la disponibilité des proies aviaires sur le succès de reproduction des faucons: à Igloodik, l'abondance des passereaux et des limicoles a décliné de près de 80 % en 2012, par rapport à 2010 et 2011. En parallèle, la productivité des faucons a diminué de 50 % au cours de la même année. Ainsi, tous les facteurs environnementaux susceptibles d'avoir un effet important sur les oiseaux insectivores et herbivores, incluant les cycles de

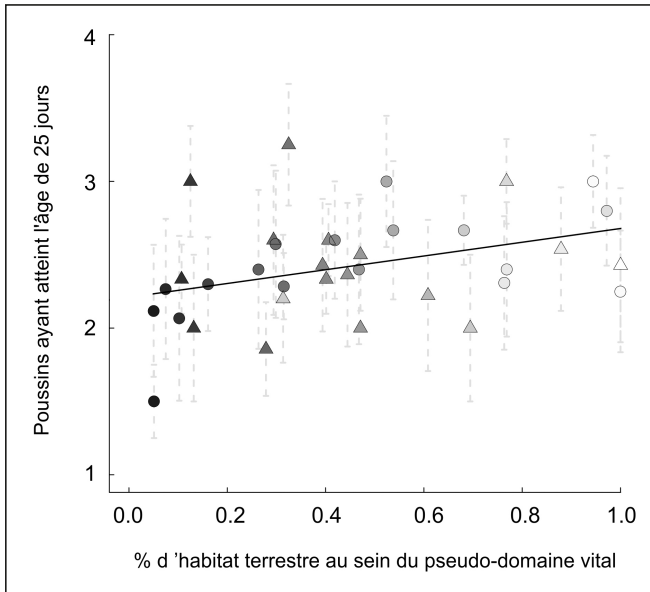


Figure 9. Influence de la proportion d'habitat terrestre au sein du pseudo-domaine vital (surface définie par un cercle de 5 km de rayon autour de chaque nid) des faucons pèlerins sur le nombre moyen d'oisillons produits près de Rankin Inlet, au Nunavut, Canada (1982-2010). Les cercles représentent le nombre moyen d'oisillons produits par nid ($n = 36$) et les pointillés indiquent l'erreur standard. La droite noire illustre l'augmentation du succès de reproduction en fonction de la proportion d'habitat terrestre autour des nids. Les triangles permettent d'identifier les sites échantillonnés en 2008 et qui ont servi à la réalisation des travaux sur les isotopes stables (figure 3). L'intensité du gris de chaque symbole est proportionnelle à la proportion d'habitat terrestre dans le pseudo-domaine vital des parents, de tout noir (0 %) à tout blanc (100 %) (modifié de L'Hérault et collab., 2013).

lemmings et les conditions météorologiques, sont susceptibles d'affecter indirectement la productivité des faucons.

Prédation, ecto-parasitisme et infanticide

Bien que des événements de prédation sur les œufs ou les oisillons par les mammifères terrestres aient été documentés, la prédation semble rarement responsable des insuccès de reproduction à nos sites d'étude. Sur approximativement 150 nids suivis par caméra automatisée entre 2008 et 2013, seulement 2 cas de prédation sur les œufs ont été documentés, soit 1 par un renard roux (*Vulpes vulpes*) et 1 par une hermine (*Mustela erminea*). Dans les 2 cas, 1 seul œuf a été dérobé par le prédateur et a été abandonné près du nid. Quelques cas de prélèvements d'œufs par un renard arctique dans des couvées abandonnées ont également été observés. Quatre oisillons dont le nid avait été aménagé à même le sol ainsi qu'un oisillon d'un autre nid situé à flanc de falaise ont été consommés par un carcajou (*Gulo gulo*) à Rankin Inlet, alors que 3 poussins d'une même couvée ont été victimes d'une hermine à Igloolik. Un poussin a également été tué, mais pas consommé, par un ours blanc (*Ursus maritimus*). Aucun cas de mortalité attribuable

aux prédateurs aviaires n'a été enregistré. Enfin, au cours des dernières années à Rankin Inlet, des ectoparasites de la famille des *Simuliidae*, celle des mouches noires, se sont avérés être la cause confirmée de la mort de 21 oisillons appartenant à 10 nids. Contrairement aux prédateurs, la détection des ectoparasites, dont la période d'émergence est très éphémère, est difficile à partir de photos et la proportion réelle de la mortalité attribuable à ces ectoparasites est certainement sous-estimée à Rankin Inlet.

Franke et collab. (2013) ont également rapporté qu'un faucon femelle avait tué, partiellement consommé, puis caché les restes de ses 2 oisillons au cours d'une période de fortes pluies. Dans ce cas, il semble que les conditions environnementales locales (temps frais et humide), en association avec une grave restriction alimentaire, aient été les éléments déclencheurs de ce comportement rare (Franke et collab., 2013).

Tendance démographique

Dans les années 1960, les populations de faucons pèlerins d'Amérique du Nord ont connu une baisse d'effectif à l'échelle continentale, approchant même l'extinction dans certaines régions (p. ex. dans l'est des États-Unis (Fyfe et collab., 1976)). Aujourd'hui, les populations sont rétablies et l'espèce a été retirée de la liste des espèces menacées en 1999 (U.S. Fish and Wildlife Service, 2013). Notre étude à Rankin Inlet a été initialement motivée par la nécessité de comprendre les effets des pesticides organochlorés sur les populations arctiques et d'évaluer leur influence sur la dynamique des populations. Bien que le nombre brut de couples recensés de 1982 à 2013 ait augmenté (figure 10), cette tendance cache un effort de recherche croissant sur le terrain. Franke et collab. (2010) ont tenté de prendre en compte ce facteur afin d'obtenir une estimation plus robuste de la tendance démographique. Ainsi, ils ont utilisé uniquement les sites qui avaient été suivis régulièrement au fil des années et ont estimé la proportion de sites occupés chaque année ($n = 22$). Cette méthode de calcul a révélé une baisse ($p < 0,001$) du taux d'occupation des sites depuis les années 1990 (moyenne de 86 % des sites occupés dans les années 1980 et 81 % dans les années 1990, contre 70 % dans les années 2000). De même, une baisse continue ($p < 0,01$) du succès reproducteur des faucons a également été décelée, particulièrement marquée après les années 1980 (moyenne de 1,4 jeune produit par site occupé dans les années 1980, contre 0,8 dans les années 1990 et 0,7 dans les années 2000; Franke et collab., 2010). De plus, malgré l'augmentation du nombre brut de couples suivis sur la zone d'étude (en lien avec une plus large couverture spatiale), le nombre total de jeunes produits a diminué de 1982 à 2013 (figure 10).

Chez les espèces longévives, le taux de survie des adultes joue un rôle central dans les tendances démographiques. Bien que les effets des contaminants sur la survie des adultes restent inconnus dans notre zone d'étude, Franke et collab. (2011) ont constaté que la survie annuelle apparente des oiseaux nicheurs est restée relativement constante entre 1982 et 2008, soit 0,73

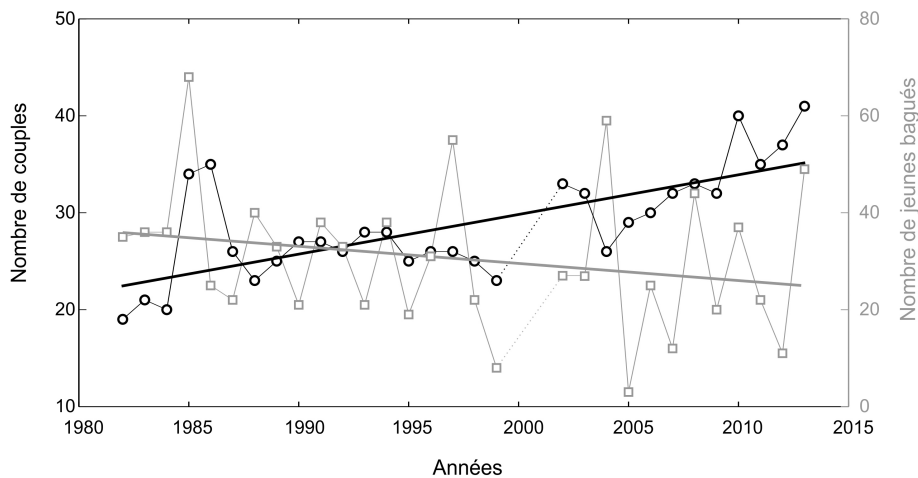


Figure 10. Nombre de couples de faucons pèlerins recensés (en noir) et nombre de jeunes atteignant l'âge de 25 jours (en gris) à Rankin Inlet entre 1982 et 2013 (aucune observation en 2000 et 2001). Le nombre de couples recensé fut à la hausse ($p < 0,001$) en lien avec l'augmentation de l'effort de prospection, contrairement au nombre total de jeunes produits, qui a montré une baisse cependant non significative ($p > 0,05$).

$\pm 0,02$ pour les 2 sexes. Les variations de survie annuelle (allant de 0,49 entre les saisons 1983 et 1984 à 1,00 entre les saisons 1992 et 1993) ont été plutôt corrélées aux conditions climatiques rencontrées durant la migration automnale (Franke et collab., 2011).

Conclusion

Les suivis de populations d'espèces sauvages sur de longues périodes sont précieux et rares en Amérique. Le suivi maintenu par notre équipe au Nunavut sur le faucon pèlerin depuis 1982 a, entre autres, permis de mieux documenter la biologie de la reproduction ainsi que la tendance démographique d'une population de la sous-espèce *tundrius*. Nos travaux ont notamment mis en évidence un déclin de la productivité de la population étudiée, attribuable en partie aux changements climatiques qui sont particulièrement prononcés dans les régions arctiques. En l'occurrence, ce sont les changements dans le régime des précipitations qui apparaissent comme le principal facteur altérant le succès de reproduction des faucons. Au-delà des effets directs des fortes pluies sur la survie des jeunes, les précipitations sont susceptibles d'avoir des conséquences sur les autres espèces aviaires, incluant des proies consommées par les faucons. La position du faucon pèlerin au sommet du réseau trophique arctique le soumet en effet aux perturbations de l'écosystème aux niveaux inférieurs. Toutefois, d'autres travaux de recherche sont nécessaires pour approfondir nos connaissances sur les effets indirects du climat sur les faucons. Globalement, les conséquences des changements environnementaux sur les faucons demeurent difficiles à prévoir. Les espèces longévives comme les faucons ont une maturité sexuelle retardée et les

effets des changements climatiques sur la population en réponse à une diminution du recrutement ne seront probablement pas détectés à court terme. Le suivi à long terme et l'amélioration de nos connaissances sur la biologie des rapaces du Nunavut sont essentiels pour mieux comprendre leur vulnérabilité et celle de l'écosystème arctique face aux changements globaux et aux pressions grandissantes causés par l'augmentation des activités humaines dans le Grand Nord.

Remerciements

Ces recherches ont été financées par ArcticNet, le conseil de gestion de la faune du Nunavut, le gouvernement du Nunavut (Département de l'environnement),

le *Peregrine Fund*, le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, le Programme de formation scientifique dans le Nord – Commission canadienne des affaires polaires, le Fonds Québécois de Recherche sur la Nature et les Technologies, la fondation Garfield-Weston, *Alberta Innovates – Technology Futures*, la Fédération Canadienne de la Faune, Mitacs, *Baffinland Iron Mine* (avec des remerciements particuliers à Oliver Curran, Jim Millard, et Trevor Myers), et *Agnico Eagle Meliadine Mine* (avec des remerciements particuliers à Stéphane Robert et Ryan VanEngen). Nous remercions Andy Aliyak, Mike Qrunnut, Poisey Alogut, Mark Prostor, Gabrielle Robineau-Charette, Stephanie Penner, Catherine Doucet, Zoltan Domahidi, Cesar Bravo, Hilde Marie Johansen, Frankie Jean-Gagnon, James Kublu, et Chris Carli pour leur contribution aux travaux de terrain, ainsi que Gordon Court, Mark Bradley, Tom Duncan, Robin Johnstone, Dave Abernethy et Mike Settingerton qui ont contribué à la collecte des données de ce manuscrit. Nous sommes extrêmement reconnaissants pour l'aide et le soutien que nous avons reçus du personnel du gouvernement du Nunavut, Département de l'environnement, en particulier Mitch Campbell, Chris Hotson, Raymond Mercer, Johanne Coutu-Autut, David Oolooyuk et Matt Fredlund. Nous remercions les membres du *Kangiqliniq Hunters and Trappers Organization* et du *Igloodik Hunters and Trappers Organization* pour leur approbation et leur soutien continu pour ces recherches. Nous sommes particulièrement reconnaissants envers Mike Shouldice et Dorothy Tootoo du *Nunavut Arctic College* à Rankin Inlet. Enfin, nous tenons à remercier les habitants de Rankin Inlet et Igloodik qui, finalement, sont les gardiens des paysages dont dépendent les faucons pèlerins et d'autres espèces. ◀

Références

- ANCTIL, A., A. FRANKE et J. BÉTY, 2014. Heavy rainfall increases nestling mortality of an arctic top predator: Experimental evidence and long-term trend in peregrine falcons. *Oecologia*, 174: 1-11.
- ANDERSSON, M. et S. ERLINGE, 1977. Influence of predation on rodent populations. *Oikos*, 29: 591-597.
- BÉTY, J., G. GAUTHIER, E. KORPIMÄKI et J.-F. GIROUX, 2002. Shared predators and indirect trophic interactions: Lemming cycles and Arctic-nesting geese. *Journal of Animal Ecology*, 71: 88-98.
- BRADLEY, M., R. JOHNSTONE, C. GORDON et T. DUNCAN, 1997. Influence of weather on breeding success of peregrine falcons in the Arctic. *The Auk*, 114: 786-791.
- BRADLEY, M. et L.W. OLIPHANT, 1991. The diet of peregrine falcons in Rankin Inlet, Northwest-Territories: An unusually high proportion of mammalian prey. *The Condor*, 93: 193-197.
- BURNHAM, W., 1983. Artificial incubation of falcon eggs. *The Journal of Wildlife Management*, 47: 158-168.
- CADE, T. J., 1960. Ecology of the peregrine and gyrfalcon populations in Alaska. University of California publications in Zoology, 63: 151-290.
- CÉZILLY, F., F. DUBOIS et M. PAGEL, 2000. Is mate fidelity related to site fidelity? A comparative analysis in Ciconiiforms. *Animal Behaviour*, 59: 1143-1152.
- COURT, G., C. GATES, D. BOAG, J. MACNEIL, D. BRADLEY, A. FESSER, J. PATTERSON, G. STENHOUSE et L. OLIPHANT, 1990. A toxicological assessment of peregrine falcons, *Falco peregrinus tundrius*, breeding in the Keewatin district of the NorthWest Territories, Canada. *Canadian Field-Naturalist*, 104: 255-272.
- COURT, G.S., D.M. BRADLEY, C.C. GATES, et D.A. BOAG, 1989. Turnover and recruitment in a tundra population of peregrine falcons *Falco peregrinus*. *Ibis*, 131: 487-496.
- COURT, G.S., C.C. GATES et D.A. BOAG, 1988. Natural history of the peregrine falcon in the Keewatin district of the Northwest-Territories. *Arctic*, 41: 17-30.
- DAWSON, R.D., D.H. MOSSOP et B. BOUKALL, 2011. Prey use and selection in relation to reproduction by peregrine falcons breeding along the Yukon River, Canada. *Journal of Raptor Research*, 45: 27-37.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 2013. Climate data online. Disponible en ligne à : http://climate.weather.gc.ca/index_e.html. [Visité le AA-MM-JJ].
- ESTES, W.A., S.R. DEWEY et P.L. KENNEDY, 1999. Sibilicide at northern goshawk nests: Does food play a role? *The Wilson Bulletin*, 111: 432-436.
- FRANKE, A., P. GALIPEAU et L. NIKOLAICZUK, 2013. Brood reduction by infanticide in peregrine falcons. *Arctic*, 66: 226-229.
- FRANKE, A., M. SETTERINGTON, G. COURT et D. BIRKHOLZ, 2010. Long-term trends of persistent organochlorine pollutants, occupancy and reproductive success in peregrine falcons (*Falco peregrinus tundrius*) breeding near Rankin Inlet, Nunavut, Canada. *Arctic*, 63: 442-450.
- FRANKE, A., J.-F. THERRIEN, S. DESCAMPS et J. BÉTY, 2011. Climatic conditions during outward migration affect apparent survival of an Arctic top predator, the peregrine falcon *Falco peregrinus*. *Journal of Avian Biology*, 42: 544-551.
- FYFE, R.W., S. TEMPLE et T. CADE, 1976. The 1975 North American peregrine falcon survey. *Canadian Field-Naturalist*, 84: 228-273.
- GAUTHIER, G., J. BÉTY, M.-C. CADIEUX, P. LEGAGNEUX, M. DOIRON, C. CHEVALLIER, S. LAI, A. TARROUX et D. BERTEAUX, 2013. Long-term monitoring at multiple trophic levels suggests heterogeneity in responses to climate change in the Canadian Arctic tundra. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368: 1624.
- GILG, O., I. HANSKI et B. SITTLER, 2003. Cyclic dynamics in a simple vertebrate predator-prey community. *Science*, 302: 866-868.
- GILG, O., B. SITTLER et I. HANSKI, 2009. Climate change and cyclic predator-prey population dynamics in the high Arctic. *Global Change Biology*, 15: 2634-2652.
- GIRAUDOUX, P., 2013. pgirmess: Data analysis in ecology. R package version, 1. Disponible en ligne à : <http://perso.orange.fr/giraudoux>. [Visité le AA-MM-JJ].
- GROISMAN, P.Y., R.W. KNIGHT, D.R. EASTERLING, T.R. KARL, G.C. HEGERL et V.N. RAZUVAEV, 2005. Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of Climate*, 18: 1326-1350.
- HUNTER, R.E., J.A. CRAWFORD et R.E. AMBROSE, 1988. Prey selection by peregrine falcons during the nestling stage. *The Journal of Wildlife Management*, 52: 730-736.
- JOHNSTONE, R.M., G.S. COURT, A.C. FESSER, D.M. BRADLEY, L.W. OLIPHANT et J.D. MACNEIL, 1996. Long-term trends and sources of organochlorine contamination in Canadian tundra peregrine falcons, *Falco peregrinus tundrius*. *Environmental Pollution*, 93: 109-120.
- L'HÉRAULT, V., A. FRANKE, N. LECOMTE, A. ALOGUT et J. BÉTY, 2013. Landscape heterogeneity drives intra-population niche variation and reproduction in an Arctic top predator. *Ecology and Evolution*, 3: 2867-2879.
- LACK, D., 1947. The significance of clutch-size. *Ibis*, 89: 302-352.
- LEGAGNEUX, P., G. GAUTHIER, D. BERTEAUX, J. BÉTY, M.C. CADIEUX, F. BILODEAU, E. BOLDUC, L. MCKINNON, A. TARROUX, J.F. THERRIEN, L. MORISSETTE et C.J. KREBS, 2012. Disentangling trophic relationships in a High Arctic tundra ecosystem through food web modeling. *Ecology*, 93: 1707-1716.
- MAHER, W.J., 1970a. Ecology of the long-tailed jaeger at Lake Hazen, Ellesmere Island. *Arctic*, 23: 112-129.
- MAHER, W.J., 1970b. The pomarine jaeger as a brown lemming predator in northern Alaska. *The Wilson Bulletin*, 82: 130-157.
- MCDONALD, P.G., P.D. OLSEN et A. COCKBURN, 2005. Sex allocation and nestling survival in a dimorphic raptor: does size matter? *Behavioral Ecology*, 16: 922-930.
- MCKINNON, L., D. BERTEAUX et J. BÉTY, 2014. Predator-mediated interactions between lemmings and shorebirds: A test of the alternative prey hypothesis. *The Auk*, 131: 619-628.
- MEARNS, R. et I. NEWTON, 1988. Factors affecting breeding success of peregrines in South Scotland. *Journal of Animal Ecology*, 57: 903-916.
- NAVES, C.L., J.Y. MONNAT et E. CAM, 2006. Breeding performance, mate fidelity, and nest site fidelity in a long-lived seabird: Behaving against the current? *Oikos*, 115: 263-276.
- POKROVSKY, I., D. EHRICH, R.A. IMS, O. KULIKOVA, N. LECOMTE et N.G. YOCOZO, 2014. Diet, nesting density, and breeding success of rough-legged buzzards (*Buteo lagopus*) on the Nenetsky Ridge, Arctic Russia. *Polar Biology*, 37: 447-457.
- R CORE TEAM, 2003. R: A language and environment for statistical computing. Disponible en ligne à : <http://www.r-project.org/>. [Visité le AA-MM-JJ].
- RATCLIFFE, D., 1980. The peregrine falcon. Buteo books, Vermillion, 416 p.
- RICKLEFS, R.E., 1969. An analysis of nesting mortality in birds. *Smithsonian Contributions to Zoology*, 9: 1-48.
- ROBINSON, B.G., A. FRANKE et A.E. DEROCHE, 2014. The Influence of weather and lemmings on spatiotemporal variation in the abundance of multiple avian guilds in the Arctic. *PLoS ONE*, 9: e101495.
- ROSENFELD, R.N., J.W. SCHNEIDER, J.M. PAPP et W.S. SEEGAR, 1995. Prey of peregrine falcons breeding in west Greenland. *The Condor*, 97: 763-770.
- SMITH, A.P., G.H. GILCHRIST et J.N.M. SMITH, 2007. Effects of nest habitat, food, and parental behavior on shorebird nest success. *The Condor*, 109: 15-31.
- STENNING, M.J., 1996. Hatching asynchrony, brood reduction and other rapidly reproducing hypotheses. *Trends in Ecology & Evolution*, 11: 243-246.
- THERRIEN, J.F., G. GAUTHIER, E. KORPIMÄKI, et J. BÉTY, 2014. Predation pressure by avian predators suggests summer limitation of small-mammal populations in the Canadian Arctic. *Ecology*, 95: 56-67.
- U.S. FISH AND WILDLIFE SERVICE, 2013. Peregrine Falcon (*Falco peregrinus*). Endangered species.
- WHITE, C.M., T.J. CADE et J.H. ENDERSON, 2013. Peregrine falcons of the World. Lynx Edicions, Barcelona, 379 p.
- WHITE, C.M., N.J. CLUM, T.J. CADE et W.G. HUNT, 2002. Peregrine falcon (*Falco peregrinus*). Dans: Poole, A. et F. Gill (édit.). *The birds of North America*, 660. The Birds of North America Incorporated, Philadelphia, xx p.
- WIEBE, K.L. et G.R. BORTOLOTTI, 1995. Food-dependent benefits of hatching asynchrony in American kestrels *Falco sparverius*. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 36: 49-57.
- WIKLUND, C. G. et J. STIGH, 1986. Breeding density of snowy owls *Nyctea scandiaca* in relation to food, nest sites and weather. *Ornis Scandinavica*, 17: 268-274.