

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

**Évaluation empirique de la précision du suivi télémétrique
Argos dans le Haut-Arctique et implications pour l'estimation de
domaines vitaux**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en Gestion de la faune et de ses habitats

en vue de l'obtention du grade de Maître ès Sciences

PAR

© SYLVAIN CHRISTIN

Mars 2014

Composition du jury :

Joël Bêty, président du jury, UQAR

Dominique Berteaux, directeur de recherche, UQAR

Martin-Hugues St-Laurent, codirecteur de recherche, UQAR

Christian Dussault, examinateur externe, MFFP

Dépôt initial le 01 Avril 2014

Dépôt final le 20 Juin 2014

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Dominique Berteaux sans qui toute cette aventure n'aurait jamais commencé. Merci à toi de m'avoir donné non seulement l'opportunité d'aller visiter les magnifiques paysages arctiques dont je rêvais depuis le début de mon baccalauréat, mais également de m'avoir donné un sujet assez obscur et effrayant pour le commun des biologistes pour que seule une personne comme moi puisse s'y accrocher. Merci pour tes conseils avisés, ton attitude toujours rassurante, ton superbe esprit de synthèse et cette simplicité qui m'a permis de revenir de l'univers abstrait des informaticiens vers le monde plus concret de la biologie.

Je tiens également à remercier mon co-directeur, Martin-Hugues St-Laurent. Merci pour ta très grande disponibilité, tes précieux conseils, et surtout ton enthousiasme et ta passion indéfectibles. Merci de m'avoir constamment soutenu et motivé tout au long de mon parcours et de m'avoir apporté ton expertise et ton expérience dans le domaine de l'écologie spatiale.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet de recherche sur le terrain. Une petite mention à celles qui ont marché avec moi dans la toundra pour promener mes colliers (Camille et Coralie), mais aussi à toute l'équipe de Bylot 2012 pour la bonne ambiance sur le terrain. Merci également à Joël Bêty et Christian Dussault, membres du comité d'évaluation de mon mémoire, pour leurs commentaires constructifs qui m'ont permis de perfectionner encore ce document.

Merci pour les bourses d'études que j'ai obtenues lors de ma maîtrise, au Conseil de recherche en Sciences naturelles et Génie du Canada (CRNSG) (bourses obtenues via les subventions de mes superviseurs) et au Programme FONCER du CRSNG en sciences environnementales nordiques EnviroNord, sans qui ce projet n'aurait jamais vu le jour.

Merci à Alain Caron pour ses précieux conseils sur les analyses statistiques et pour avoir su éclairer ma lanterne quand j'étais dans la plus profonde obscurité.

Merci à la Fox Team 2012-2014 pour tous les conseils apportés tout au long de mon projet, du devis aux résultats, et aussi pour ces interminables réunions renards le midi à la recherche de la formulation parfaite qui de toute façon n'existe pas!

Merci à tous les membres des laboratoires Bêty-Berteaux et St-Laurent pour la bonne ambiance quotidienne du C405.

Merci à tous ceux qui étaient là aux bières du vendredi soir, aux soirées du REGÉE, aux soupers de Noël, au club dessert du lundi, à ceux qui ont fait les desserts des réunions de labos, bref à toutes les personnes qui m'ont nourri ou abreuvé et m'ont accompagné dans toutes mes activités extra scolaires et qui ont ainsi contribué au maintien de mon équilibre mental.

Enfin bien entendu, un très grand merci aux super-héros de la science, notre merveilleuse équipe du C405.3 qui rendait la vie au labo si agréable. Merci Marylène, Camille et Marie-Jeanne – a.k.a "the Yellow Flash", dont les visites rares et courtes n'en étaient pas moins intenses!

Je finirai par remercier toutes les personnes qui ont eu un jour à m'écouter parler de mon projet et qui ont si souvent eu ce regard d'incompréhension complète face à mes laborieuses tentatives pour essayer d'expliquer ce que je faisais. Ne vous inquiétez pas, parfois c'était dur pour moi aussi. Merci au moins d'avoir essayé de me comprendre!

RÉSUMÉ

Le suivi satellitaire Argos est l'une des technologies majeures utilisées pour étudier le mouvement animal en milieu naturel. Cependant, les localisations Argos sont parfois imprécises ; il devient alors nécessaire de quantifier cette erreur afin de ne pas nuire à l'interprétation des données au fil des analyses. Diverses méthodes de filtrage ont été développées, généralement dans le but d'améliorer des jeux de données de mauvaise qualité ; toutefois, leur précision et leur efficacité ont rarement été étudiées sur des données de bonne qualité. Les objectifs de cette étude étaient d'évaluer empiriquement la précision du suivi satellitaire par des tests expérimentaux statiques et mobiles dans une zone considérée comme offrant des conditions optimales pour la technologie Argos, de comparer différentes méthodes de filtrage pour voir comment elles amélioreraient la qualité des jeux de données et d'évaluer comment les erreurs de localisation impactaient l'estimation de la taille du domaine vital, une métrique biologique courante utilisée en écologie spatiale. Nous avons pour cela couplé des émetteurs Argos à des récepteurs GPS dans un environnement terrestre polaire, l'île Bylot, Nunavut. Nous avons ensuite réalisé des simulations afin d'évaluer comment les erreurs Argos pouvaient influencer les estimations de domaines vitaux à une échelle spatiale relativement petite (dans des rayons < 5000 m). Notre erreur statique était parmi les plus basses rapportées pour cette technologie mais l'imprécision augmentait grandement avec le mouvement des colliers. Les plus importantes améliorations dans la précision des localisations ont été obtenues en ne conservant que les meilleures classes de localisation Argos (LC3 et 2) mais les deux autres filtres utilisés ont fourni des estimations de tailles de domaines vitaux comparables tout en conservant davantage de localisations. La surestimation de la taille des domaines vitaux dépendait de l'échelle spatiale et de la méthode d'estimation utilisée, mais pouvait être aussi basse que 10%. Nous considérons la technologie Argos comme appropriée pour des études sur des

animaux terrestres dans des environnements polaires, mais nous recommandons de toujours filtrer les données et de quantifier l'erreur avant chaque analyse.

Mots clés : Argos, télémétrie satellite, évaluation de l'erreur, domaine vital, GPS, milieux polaires.

ABSTRACT

Argos satellite telemetry is one of the major technologies used to track free-ranging animals. However, provided locations are sometimes inaccurate and it becomes necessary to quantify this error to prevent erroneous interpretation of the data. In order to improve Argos datasets, various filtering methods have been developed. These filters were usually created to improve datasets with a high proportion of bad-quality locations; however, their accuracy and their efficiency have rarely been evaluated on high-quality datasets. The objectives of this study were to evaluate empirically the accuracy of the Argos satellite telemetry in experimental static and mobile tests in an area that was believed to provide optimal conditions for Argos technology, to compare different filtering methods to see how they improved the quality of the datasets and to evaluate how Argos errors might impact the estimated home-range size, a biological metric frequently used in spatial ecology. We coupled Argos transmitters to GPS receivers in experimental static and mobile tests in a terrestrial polar environment, Bylot Island, Nunavut. We then performed simulations aiming at evaluating how Argos errors might impact home-range estimations at a relatively small spatial scale (<5000-m radius). Our static error estimates were among the lowest reported for this technology but inaccuracy greatly increased with movement. The best improvements in location accuracy was obtained by keeping only the best Argos classes (LC3 and 2) but the two other filters gave comparable home-range size estimates while retaining more locations. Overestimation of home-range size was dependent on the spatial scale and the estimation method used but could be as low as 10%. We consider Argos telemetry to be appropriate for studies on terrestrial animals in polar environments, but we recommend always filtering the datasets and quantifying the error before analyses are performed.

Keywords : Argos, satellite telemetry, error quantification, home range, GPS, polar environments.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	vii
RÉSUMÉ	ix
ABSTRACT	xi
TABLE DES MATIÈRES	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 ÉVALUATION EMPIRIQUE DE LA PRÉCISION DU SUIVI TÉLÉMÉTRIQUE ARGOS DANS LE HAUT-ARCTIQUE ET IMPLICATIONS POUR L'ESTIMATION DE DOMAINES VITAUX	11
1.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE	11
1.2 EMPIRICAL EVALUATION OF ARGOS TELEMETRY ACCURACY IN THE HIGH- ARCTIC AND IMPLICATIONS FOR HOME-RANGE ESTIMATIONS	13
CHAPITRE 2 CONCLUSION	43
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	45

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Au cours des 50 dernières années, les chercheurs en écologie ont profité d'avancées technologiques majeures dans le domaine de la télémétrie pour approfondir leurs connaissances du mouvement animal (Hebblewhite et Haydon, 2010). La possibilité d'installer des appareils télémétriques sur les animaux sauvages leur a en effet permis d'accumuler une importante quantité de données sur leur localisation géographique, que ce soit sur terre (Rettie et Messier, 1998), en mer (Hazel, 2009) ou dans les airs (Georges *et al.*, 1997; Smith *et al.*, 2011). Ces données ont ainsi permis d'étudier des questions aussi variées que le déplacement (Lowry *et al.*, 2001), le comportement (Patterson *et al.*, 2010), les migrations (Mellone *et al.*, 2011) ou encore l'utilisation de l'habitat (Beauchesne *et al.*, 2013).

Le suivi satellitaire Argos

Parmi les technologies télémétriques disponibles, le système de suivi satellitaire Argos (<http://www.argos-system.org>) est l'une de celles qui a récemment reçu le plus d'attention (Costa *et al.*, 2010; Witt *et al.*, 2010). Le système Argos permet d'obtenir la localisation des animaux en se basant sur la mesure de l'effet Doppler-Fizeau entre la fréquence émise par une plate-forme de transmission déployée sur un animal et la fréquence reçue par les satellites Argos (Austin *et al.*, 2003; Service Argos, 2011). Le système Argos a été largement employé par le passé, notamment grâce à son coût autrefois inférieur aux technologies du Système de Positionnement Global (GPS) (Hebblewhite et Haydon, 2010), au fait que l'enregistrement des données est plus systématique et aisé qu'avec la technologie VHF (Deutsch *et al.*, 1998) et grâce à la possibilité d'accéder aux données en temps réel, ce qui élimine la nécessité de récupérer les appareils déployés pour obtenir les données récoltées (Costa *et al.*, 2010; Hebblewhite et Haydon, 2010).

Le principal désavantage de la technologie Argos est toutefois sa faible précision, en particulier par rapport au GPS, ce qui peut influencer l'interprétation des données et limiter la portée des conclusions (Kaczensky *et al.*, 2010; Patterson *et al.*, 2010). Argos regroupe les localisations en sept classes de localisation (LC) auxquelles est associé un rayon d'erreur standard. Les trois classes principales sont les LC3 (erreur < 250 m), LC2 (entre 250 et 500 m) et LC1 (entre 500 et 1500 m). Les localisations de classe LC0 n'ont quant à elles pas d'estimation de précision bornée associée et possèdent un rayon d'erreur supérieur à 1500 mètres. Les LC de 0 à 3 nécessitent, pour être calculées, la réception d'au moins 4 messages envoyés par les plateformes de transmission lors du passage d'un satellite. Lorsque moins de 4 messages sont reçus, des localisations auxiliaires (LCA et LCB) peuvent être fournies mais aucune estimation de la précision n'est alors disponible (Austin *et al.*, 2003; Freitas *et al.*, 2008; Service Argos, 2011). Enfin, Argos regroupe aussi des points dans la classe LCZ lorsque le processus de localisation a échoué (Freitas *et al.*, 2008). Bien comprendre les classes de précision fournies par le système Argos est essentiel à l'utilisation adéquate des données. À titre d'exemple, l'estimation d'une localisation de classe LC3 (rayon d'erreur < 250 m) indique en réalité que la probabilité que la localisation soit à moins de 250 m de la localisation réelle est de 68%. Ceci implique qu'une localisation peut être en réalité beaucoup moins précise que ce que n'indique sa classe de précision (Austin *et al.*, 2003; Freitas *et al.*, 2008). Par ailleurs, le nombre de localisations reçues et leur précision peuvent être influencés par la latitude, le comportement de l'animal, le nombre de satellites présents dans le ciel ou encore la vitesse de déplacement de l'émetteur (Harris *et al.*, 1990; Nicholls *et al.*, 2007). Elles ne semblent toutefois pas influencées par la topographie ou le couvert forestier (Sauder *et al.*, 2012).

Importance de la quantification de l'erreur

L'importance de l'imprécision des données Argos nécessite de bien séparer deux sources de variabilité dans les données, c-à-d. celle causée par l'imprécision de la technique et celle engendrée par la variabilité biologique, sans quoi l'erreur d'échantillonnage peut être interprétée comme un signal biologique (Jonsen *et al.*, 2005; Bradshaw *et al.*, 2007).

De plus, comme avec toute méthode télémétrique, connaître la précision d'une localisation est crucial pour savoir si elle peut permettre de répondre à une question précise, bien que le niveau de précision nécessaire dépende de la question posée et des conditions rencontrées sur le terrain (McKeown et Westcott, 2012). Bradshaw *et al.* (2007) ont ainsi montré qu'une erreur important par rapport à l'échelle de déplacement pouvait réduire fortement la capacité à détecter des patrons de déplacement biologiques. Le plus souvent, l'erreur est évaluée en plaçant des émetteurs à des endroits dont la vraie position est connue. Ces émetteurs peuvent être soit stationnaires (Stewart *et al.*, 1989; Keating *et al.*, 1991; Hays *et al.*, 2001; Cargnelutti *et al.*, 2007; Hebblewhite *et al.*, 2007; Nicholls *et al.*, 2007; Dubinin *et al.*, 2010) ou placés sur des animaux en mouvement dont la position est connue ou estimée (Stewart *et al.*, 1989; Britten *et al.*, 1999; Bowman *et al.*, 2000; Le Boeuf *et al.*, 2000; Vincent *et al.*, 2002; White et Sjöberg, 2002; Dubinin *et al.*, 2010). L'erreur associée à des émetteurs en mouvement est toutefois beaucoup plus rarement évaluée, quelle que soit la méthode de télémétrie utilisée (DeCesare *et al.*, 2005; Cargnelutti *et al.*, 2007; Nicholls *et al.*, 2007; Jiang *et al.*, 2008; McKeown et Westcott, 2012). Toutefois, le développement récent de nouvelles technologies permettant d'utiliser simultanément les systèmes Argos et GPS permet d'avoir une meilleure évaluation de la précision des localisations pour des animaux sauvages (Patterson *et al.*, 2010; Hoenner *et al.*, 2012). En règle générale, l'erreur associée à chaque classe de localisation semble être en accord avec les estimations fournies par le système Argos, bien que ces dernières aient tendance à sous-estimer l'erreur en latitude et en longitude (Vincent *et al.*, 2002; Hazel, 2009; Costa *et al.*, 2010; Tarroux, 2011; Hoenner *et al.*, 2012). De plus, alors que le système Argos présuppose une erreur isotropique (identique sur tous les axes) lors de l'assignation des classes de localisation (Service Argos, 2011), cette dernière semble en réalité être plus importante en longitude qu'en latitude (Vincent *et al.*, 2002; Costa *et al.*, 2010; Tarroux, 2011).

Amélioration des jeux de données par filtrage

De nombreuses méthodes ont été utilisées afin d'améliorer la précision des données analysées. La plus simple consiste à ne conserver pour analyse que les localisations appartenant aux classes de localisation standard (LC1, 2 et 3, éventuellement 0) (Boyd *et al.*, 1998; Deutsch *et al.*, 1998; Tarroux *et al.*, 2010). Cependant, dans de nombreuses études, peu de localisations de bonne qualité (\geq LC1) sont obtenues – parfois moins de 15% (Britten *et al.*, 1999; Soutullo *et al.*, 2007; Hazel, 2009) et par conséquent supprimer les localisations de mauvaise qualité réduirait drastiquement la quantité de localisations disponibles pour les analyses (Keating, 1994; Burns et Castellini, 1998; Vincent *et al.*, 2002; Nicholls et Robertson, 2007). Par ailleurs, l'erreur la plus grande n'est pas forcément associée aux localisations des classes de moins bonne qualité et l'erreur associée aux localisations de classe LCA peut en réalité être inférieure à celles de classe LC0 (Vincent *et al.*, 2002; Royer et Lutcavage, 2008). Toutefois, certaines études suppriment tout de même les localisations de classe LCZ puisqu'elles ne rencontrent pas les standards de validation du système Argos (Lowry *et al.*, 2001; Freitas *et al.*, 2008; Hoenner *et al.*, 2012).

L'une des approches les plus fréquemment employées pour supprimer les valeurs exceptionnelles et improbables est de filtrer les données en fonction de la vitesse nécessaire à l'animal pour parcourir la distance entre deux points. Cette vitesse est comparée à une valeur seuil qui est déterminée à partir de la biologie de l'animal et qui représente généralement la vitesse maximale connue pour l'espèce (McConnell *et al.*, 1992; Austin *et al.*, 2003). McConnell *et al.* (1992) ont proposé l'utilisation d'un filtre calculant la moyenne géométrique des vitesses à un point avec les deux localisations précédentes et les deux localisations suivantes. Austin *et al.* (2003) ont toutefois trouvé deux problèmes principaux à cette approche: si une erreur importante est associée à l'une des localisations avec lesquelles on calcule la vitesse moyenne, alors la vitesse moyenne est biaisée et il est possible de supprimer des localisations qui sont en réalité précises. De plus, si l'intervalle de temps est suffisamment grand entre deux localisations, n'importe quelle localisation peut passer à travers du filtre de vitesse. Ils ont ainsi ajouté deux étapes basées sur la vitesse et la

distance maximale entre deux points pour essayer de contrer ces inconvénients et conserver un maximum de points. Malgré cela, le filtre de vitesse est de moins en moins employé seul, mais reste toujours fréquemment utilisé pour supprimer les points les plus improbables (Freitas *et al.*, 2008; Tremblay *et al.*, 2009; Costa *et al.*, 2010; Witt *et al.*, 2010; Hoenner *et al.*, 2012).

Un autre paramètre utilisé pour filtrer les données est l'angle de déplacement. Keating (1994) a développé un indice basé sur ce critère pour remplacer les classes de localisation fournies par le système Argos. Il se base sur le fait qu'il est plus probable d'avoir une localisation erronée lorsque l'on observe un grand mouvement suivi d'un retour immédiat à une position proche du point de départ. L'indice de Keating se base ainsi sur la distance parcourue et l'angle formé par les deux trajectoires reliant trois points consécutifs. L'indice ne supprime pas de points en tant que tel mais donne une indication de l'erreur probable. C'est ensuite aux utilisateurs de fixer le seuil à partir duquel les localisations sont rejetées, faisant en sorte que ce seuil puisse varier selon les études, permettant ainsi un meilleur contrôle sur le compromis entre précision et taille d'échantillon que si l'on supprimait directement certaines classes de localisation (Keating, 1994; Bergman *et al.*, 2000; Rettie et Messier, 2000; Lowry *et al.*, 2001). Rettie et Messier (2000) ont ainsi défini plusieurs seuils pour cet indice et vérifient si d'autres localisations à proximité et dans la même fenêtre temporelle permettent de conserver ou de supprimer ces points. L'utilisation de filtres, bien que simple, possède toutefois d'autres désavantages que de simplement réduire la taille de l'échantillon. En effet, si les filtres suppriment les positions de faible précision, ce qui améliore la qualité visuelle des trajectoires, ils peuvent également supprimer des localisations valides (Freitas *et al.*, 2008).

Autres approches

Diverses méthodes ont également été employées pour essayer d'améliorer la qualité des localisations obtenues par le suivi satellitaire. Tremblay *et al.* (2006) ont ainsi évalué plusieurs méthodes d'interpolation pour mieux simuler les trajectoires d'animaux marins. Tougaard *et al.* (2008) ont développé une analyse statistique qui calcule la probabilité de

présence d'animaux sur une grille dont les cellules ont 10 km de côté dans le but d'exploiter les localisations de mauvaise qualité et ainsi de déterminer si un individu était allé dans une zone définie. De leur côté, Tremblay *et al.* (2009) ont employé une méthode de ré-échantillonnage avec remise (*lib. bootstrap*) sur des modèles de marche aléatoire corrélés (*lib. correlated random walk*) en intégrant l'erreur associée aux localisations, pour ensuite calculer la moyenne de ces modèles afin d'obtenir la trajectoire finale. Thompson *et al.* (2003) ont plutôt généré des trajectoires en utilisant des algorithmes de lissage prenant en compte l'erreur des localisations.

L'une des pratiques qui a reçu de plus en plus d'attention depuis une dizaine d'années pour l'analyse des données de suivi faunique par télémétrie est l'utilisation de modèles espace-état (MEE) (Jonsen *et al.*, 2003, 2005, 2007, 2012; Royer *et al.*, 2005; Mills Flemming *et al.*, 2006; Patterson *et al.*, 2010; Dowd et Joy, 2011; Breed *et al.*, 2012). Les MEE sont des modèles dynamiques permettant d'estimer à travers le temps l'état d'un processus – tel que la position d'un animal (Royer *et al.*, 2005) ou son comportement (Pedersen *et al.*, 2011) – qui ne peut être observé à partir d'un jeu de données observées (Jonsen *et al.*, 2012). La façon dont l'état étudié varie au cours du temps est alors modélisée par des équations auxquelles sont associées des distributions d'erreur représentant la stochasticité biologique (Bolker, 2011). Le modèle est ensuite complété par une ou plusieurs équations qui prennent en compte l'erreur associée à la méthode d'observation et qui permettent de décrire le lien entre les données observées et l'état du système à un temps donné. Des distributions statistiques de l'erreur associée aux observations sont également associées à chacune de ces équations (Jonsen *et al.*, 2012) et peuvent ainsi être utilisées comme source d'information pour déduire la position de l'animal. Le principal avantage des MEE est donc qu'ils permettent de modéliser séparément la variabilité des processus due à la stochasticité biologique et l'erreur due à l'imprécision des observations (Jonsen *et al.*, 2005; Breed *et al.*, 2012). Ces modèles sont généralement assez difficiles à comprendre et à implémenter (Tremblay *et al.*, 2009), mais ils sont également très flexibles (Ionides *et al.*, 2006; Jonsen *et al.*, 2012), et de nombreuses approches peuvent être utilisées pour mettre en place des MEE. L'une des méthodes les plus connues et parmi les plus simples est le

filtre de Kalman (Royer et Lutcavage, 2008; Jonsen *et al.*, 2012), qui est d'ailleurs utilisé depuis 2011 par le système Argos pour améliorer la précision des localisations (Service Argos, 2011).

Problématique

En raison de son imprécision relative, le système Argos a principalement été utilisé pour des espèces se déplaçant sur de longues distances, de l'ordre de quelques centaines de kilomètres (Jonsen *et al.*, 2005; Costa *et al.*, 2010; Tarroux *et al.*, 2010). Cependant, les animaux de petite taille se déplaçant sur de petites distances sont beaucoup plus nombreux que ceux se déplaçant sur de larges distances. Or dans un environnement très hétérogène, structuré à une petite échelle, l'imprécision associée aux localisations Argos pourrait empêcher d'identifier avec certitude dans quel habitat les animaux évoluent et ainsi compromettre les résultats d'une étude et de mener à des conclusions erronées. Des appareils combinant à la fois la précision du GPS et le temps-réel Argos existent aujourd'hui. Malheureusement, à cause de restrictions au niveau de l'alimentation électrique, ces appareils sont encore généralement trop lourds pour être déployés sur des animaux de petite taille pendant une longue durée (Boyd et Brightsmith, 2013). Ces limitations renforcent donc la nécessité de mieux comprendre la précision des localisations Argos. De plus, alors que le mouvement semble influencer négativement la performance de la télémétrie Argos, à notre connaissance, aucune étude n'a évalué empiriquement à quel point le mouvement peut impacter la qualité des localisations.

Les milieux terrestres peuvent offrir des conditions favorables au suivi Argos; les régions polaires en particulier y sont particulièrement propices. En effet, les orbites des satellites Argos sont polaires et la couverture augmente avec la latitude (Harris, 1990), permettant ainsi d'acquérir un nombre élevé de localisations quotidiennement grâce à un grand nombre de satellites qui survolent l'aire d'étude. Par ailleurs, certains problèmes pouvant diminuer la précision des localisations sont évités, comme ceux rencontrés avec les

mammifères marins (p. ex. un temps passé en surface trop court en raison des plongées sous-marines, ce qui limite le nombre de signaux pouvant être envoyés (White et Sjöberg, 2002; Freitas *et al.*, 2008; Tougaard *et al.*, 2008)) ou avec les oiseaux (p. ex. une vitesse de vol importante et des changements d'altitude fréquents (Soutullo *et al.*, 2007)). De telles conditions permettent ainsi d'obtenir une proportion importante de localisations de bonne qualité (Tarrow, 2011). Malgré tout, l'erreur associée aux localisations Argos reste peu documentée en milieu terrestre comparativement au milieu marin (Soutullo *et al.*, 2007; McKeown et Westcott, 2012). De plus, la plupart des méthodes de filtrage ou d'amélioration de la précision ont été développées pour des données ayant un nombre important de localisations de mauvaise qualité, mais leur capacité à améliorer de bons jeux de données n'a encore jamais été évaluée (Jonsen *et al.*, 2007; Costa *et al.*, 2010; Patterson *et al.*, 2010).

Objectifs et résultats

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un programme de recherche mis en place en 2007 sur l'écologie spatiale du renard arctique (*Vulpes lagopus*) sur l'île Bylot, au Nunavut, dans le Haut-Arctique canadien, à l'aide de colliers télémétriques Argos. Nous avons profité du contexte scientifique et de la logistique de ce programme de recherche afin de répondre à trois objectifs principaux.

- 1- Évaluer empiriquement l'erreur associée aux localisations Argos. Cette erreur a été évaluée en jumelant des émetteurs Argos à des récepteurs GPS dans des configurations statiques et mobiles afin d'évaluer l'importance du mouvement sur la qualité des localisations. Nous nous sommes surtout concentrés à évaluer la justesse des localisations Argos, c'est-à-dire l'écart moyen entre une localisation et la vraie position, qui ne doit pas être confondue avec leur précision au sens propre, qui elle réfère à l'intervalle dans lequel la valeur exacte a une probabilité de 95% de se retrouver (Nicholls *et al.*, 2007).

- 2- Utiliser différentes méthodes de filtrage afin d'évaluer comment elles permettent d'améliorer la qualité des jeux de données. Pour ce faire, nous avons utilisé trois types de méthodes. La première consistait à conserver uniquement les meilleures classes de localisation définies par Argos. La seconde était un filtre "maison" basé sur des critères de vitesse de déplacement. La troisième visait à évaluer la performance du filtre Douglas Argos, un filtre se basant sur des critères de vitesse, d'angle de déplacement et de distance entre localisations consécutives et librement disponible sur la base de données en ligne gratuite Movebank (www.movebank.org).
- 3- Évaluer comment les erreurs de localisation impactent l'estimation de la taille du domaine vital, une métrique biologique couramment utilisée en écologie spatiale. Puisqu'il existe d'intenses débats dans la littérature sur le choix des estimateurs de domaines vitaux (Hemson *et al.*, 2005; Grueter *et al.*, 2009), nous avons étudié l'impact de l'erreur de localisation Argos sur deux estimateurs communs, le polygone convexe minimal (MCP) à 95% et le kernel à 95%.

Nos résultats confirment que les milieux polaires présentent des conditions exceptionnelles pour le suivi télémétrique Argos, les estimations d'erreur obtenues étant parmi les plus basses de celles rapportées dans la littérature. Le mouvement quant à lui semble être une source d'imprécision majeure, les erreurs calculées étant plus de deux fois plus importantes dans nos tests mobiles que dans les tests statiques. De plus, les meilleures améliorations de la qualité des jeux de données ont été obtenues en ne conservant que les localisations de meilleure qualité (LC3 et LC2). Toutefois, les données filtrées par notre filtre maison ainsi que le filtre Douglas Argos ont donné des résultats comparables aux jeux de données qui conservaient uniquement les localisations LC3 et LC2 lors de l'estimation de la taille des domaines vitaux, tout en conservant un nombre plus important de localisations. Les différents estimateurs ont généré des résultats différents, avec des domaines vitaux considérant les erreurs généralement plus semblables aux domaines vitaux de référence avec le kernel, mais au coût d'une surestimation de la taille des domaines vitaux par rapport au MCP. Cependant, quel que soit l'estimateur utilisé, les

conclusions quant à l'efficacité des différents filtres étaient globalement similaires, suggérant qu'elles sont toutes deux appropriées à l'étude des données Argos.

CHAPITRE 1

ÉVALUATION EMPIRIQUE DE LA PRÉCISION DU SUIVI TÉLÉMÉTRIQUE ARGOS DANS LE HAUT-ARCTIQUE ET IMPLICATIONS POUR L'ESTIMATION DE DOMAINES VITAUX

1.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE

La technologie télémétrique satellitaire Argos est l'une des technologies majeures utilisées pour suivre les animaux en milieu naturel, mais l'imprécision associée à ses localisations peut nuire à une interprétation détaillée du mouvement des individus suivis. De nombreuses études ont été menées sur des jeux de données Argos contenant une proportion importante de localisations de mauvaise qualité (classes de localisation Argos 0, A, B) et ont mené au développement de méthodes de filtrage visant à les éliminer. Cependant, la précision et l'efficacité de ces filtres ont rarement été étudiées sur un jeu de données de bonne qualité. Nous avons évalué empiriquement la précision du suivi satellitaire Argos en couplant des émetteurs Argos à des récepteurs GPS dans des tests expérimentaux statiques et mobiles dans un environnement terrestre polaire (île Bylot, Nunavut). La zone d'étude était considérée comme offrant des conditions optimales pour la technologie Argos. Nous avons utilisé trois méthodes de filtrage différentes – a) ne garder que les classes de localisation Argos de bonne qualité (3, 2 et 1), b) le filtre Douglas-Argos et c) un filtre de vitesse "maison" – et avons réalisé des simulations visant à évaluer comment les erreurs Argos pouvaient influencer les estimations de domaines vitaux à une échelle spatiale relativement petite (dans un rayon < 5000-m). Nos estimations de l'erreur statique étaient parmi les plus basses reportées pour cette technologie mais l'imprécision a augmenté grandement avec le mouvement. Les meilleures améliorations dans la précision des localisations ont été obtenues en ne conservant que les meilleures classes de localisation Argos (LC3 et 2) mais

les deux autres filtres ont fourni des estimations de domaines vitaux comparables tout en conservant plus de localisations. La surestimation des domaines vitaux était dépendante de l'échelle spatiale et de la méthode d'estimation utilisée mais pouvait être aussi basse que 10%. Nous considérons la technologie Argos comme appropriée pour des études sur des petits animaux terrestres dans des environnements polaires, mais nous recommandons de toujours filtrer les jeux de données et de quantifier l'erreur avant chaque analyse.

Cet article, intitulé «*Empirical evaluation of Argos telemetry accuracy in the High-Arctic and implications for home-range estimations*», est destiné à être soumis pour publication en 2014 dans la revue PLoS ONE. Les coauteurs (Dominique Berteaux et Martin-Hugues St-Laurent) ont contribué à l'élaboration de l'étude et du manuscrit.

1.2 EMPIRICAL EVALUATION OF ARGOS TELEMETRY ACCURACY IN THE HIGH-ARCTIC AND IMPLICATIONS FOR HOME-RANGE ESTIMATIONS

ABSTRACT

Argos satellite telemetry is one of the major technologies used to track free-ranging animals, but its locations' inaccuracy can prevent a detailed interpretation of animal movement. Numerous studies have been conducted on Argos datasets containing a high proportion of bad-quality locations (Argos classes 0, A, B) and have led to the development of filtering methods aiming at removing them. However, the accuracy and the efficiency of the filters have rarely been evaluated on a dataset of high quality. We empirically evaluated the accuracy of Argos satellite telemetry by coupling Argos transmitters to GPS receivers in experimental static and mobile tests in a terrestrial polar environment (Bylot Island, Nunavut). The study area was believed to provide optimal conditions for Argos technology. We used three different filtering methods – a) retaining only good quality Argos classes (3, 2 and 1), b) the Douglas Argos Filter and c) a Homemade Speed Filter – and performed simulations aiming at evaluating how Argos errors might impact home-range estimations at a relatively small spatial scale (<5000-m radius). Our static error estimates were among the lowest reported for this technology but inaccuracy greatly increased with movement. The best improvements in location accuracy was obtained by keeping only the best Argos classes (LC3 and 2) but the two other filters gave comparable home-range estimates while retaining more locations. Overestimation of home-range size was dependent on the spatial scale and the estimation method used but could be as low as 10%. We consider Argos telemetry to be appropriate for studies on small terrestrial animal in polar environments, but we recommend always filtering the datasets and quantifying the error before any analysis.

Introduction

Technological improvements now allow researchers to acquire huge amounts of data describing the geographical location of wild animals, whether these travel on land, in the water, or in the air (Hebblewhite and Haydon, 2010). This has allowed detailed descriptions and sophisticated hypothesis testing on questions such as movements (Lowry *et al.*, 2001), behavior (Georges *et al.*, 1997), migration (Mellone *et al.*, 2011), or even habitat selection and habitat use patterns (Beauchesne *et al.*, 2013) of hundreds of animal species. Argos satellite telemetry (<http://www.argos-system.org>) is one of the major telemetry technologies used in the past 30 years (Costa *et al.*, 2010; Witt *et al.*, 2010). Created in 1986, the Argos system calculates the location of a Platform Transmitter Terminal (PTT) by using the Doppler effect on transmission frequency between a message sent by the PTT deployed on an animal and an orbiting satellite (Austin *et al.*, 2003; Service Argos, 2011). The Argos system is widely used because observers can easily retrieve positions from their office in near real-time, a great advantage over all techniques relying on intensive field work (e.g., VHF telemetry) or on the retrieval of data stored in the deployed transmitters (p. ex., many Global Positioning System (GPS) transmitters) (Costa *et al.*, 2010; Hebblewhite and Haydon, 2010).

One potential limitation of the Argos system, however, lie in its lower accuracy compared to the GPS (Kaczensky *et al.*, 2010; Patterson *et al.*, 2010), to the point where the error associated with Argos locations can be large enough to prevent a detailed interpretation of animal movement (Patterson *et al.*, 2010). Argos attributes the position of a PTT to one of seven Locations Classes (LC), based on the number of messages received by the satellite during a passage over the PTT. When ≥ 4 messages are received, an error estimate can be calculated and the location is assigned a LC based on its estimated error radius. The upper bound for each LC is then 250 m (LC3), 500 m (LC2), 1500 m (LC1), or > 1500 m (LC0). In contrast, with < 4 messages, auxiliary locations LCA and LCB can be calculated, but no error estimate is provided (Service Argos, 2011). While some studies have suggested that LCA errors can sometimes be similar to LC1 ones (Vincent *et al.*, 2002; White and

Sjöberg, 2002), errors associated to LCA and B can still reach a few kilometers (Hazel, 2009; Costa *et al.*, 2010). Finally, LCZ indicates invalid locations (Service Argos, 2011). An important note here is that the bounding values for the LC3 to LC0 are not absolute bounds. They rather indicate that locations have a 68% probability of being between the bounding values.

The “accuracy problem” of Argos locations is thus an important issue, because distinguishing correctly biological variability from technological inaccuracy and sampling error is key to test biological hypotheses (Jonsen *et al.*, 2005; Bradshaw *et al.*, 2007). This problem has been approached in two ways, either through quantification of measurement error or through filtering of the locations most likely to be erroneous. The error can be evaluated experimentally by placing PTTs at a known location, be it on the ground (e.g., Keating *et al.*, 1991 ; Hays *et al.*, 2001; Nicholls *et al.*, 2007) or on a moving animal (e.g., Stewart *et al.*, 1989; Britten *et al.*, 1999; Dubinin *et al.*, 2010). Devices providing both GPS and Argos locations can also be used to evaluate the error associated to Argos locations by considering the GPS positions as the true ones (Patterson *et al.*, 2010; Hoenner *et al.*, 2012). Unfortunately, transmitters using both the GPS and the Argos system are generally too heavy to be deployed on small animals over the long term (Boyd and Brightsmith, 2013). The number and the accuracy of Argos locations can be influenced by the latitude, the animal's behaviour (including movement speed, McKeown et Westcott, 2012) or the number of satellites in the sky (Harris *et al.*, 1990; Nicholls *et al.*, 2007), while topography and canopy do not seem to seriously impact Argos telemetry performance (Sauder *et al.*, 2012).

Filtering of Argos location data can be done in several ways. The easiest approach consists in only keeping locations from the best location classes (usually LC3, LC2 and LC1) (Boyd *et al.*, 1998; Deutsch *et al.*, 1998; Tarroux *et al.*, 2010). However, in most studies, a low proportion of locations is found in these classes, resulting in a drastic reduction of the number of data points available for analyses (Keating, 1994; Burns and Castellini, 1998; Vincent *et al.*, 2002; Nicholls and Robertson, 2007). Moreover, as explained above, some

location errors can be much larger than the bounding value specified for a given LC (Vincent *et al.*, 2002; Royer and Lutcavage, 2008). An alternative approach thus uses destructive filters to remove improbable locations, based on criteria like movement speed, angle of movement or spatial redundancy between consecutive locations (McConnell *et al.*, 1992; Keating, 1994; Austin *et al.*, 2003; Douglas *et al.*, 2012). Still another approach relies on state-space models that use the estimated sampling error as part of the estimation process (Jonsen *et al.*, 2003, 2005, 2012; Patterson *et al.*, 2010; Breed *et al.*, 2012). While more complex to understand and implement, the latter approach is also very flexible and does improve the methodology of investigations on animal behavior (Ionides *et al.*, 2006; Jonsen *et al.*, 2007, 2012; Pedersen *et al.*, 2011).

The increasing speed at which new miniaturized battery-PTT units are developed creates a strong need to refine our understanding of the accuracy of Argos locations, defined here as the mean distance error from a known true position (not to be confused with precision, i.e., the area within which a given percentage of locations are likely to be found; Nicholls *et al.*, 2007). Animals of small size moving over small areas are indeed much more numerous than those of big size moving over large areas, so that hardware miniaturization both opens new research opportunities and increases the importance of the Argos “accuracy problem”. In addition, Argos accuracy in terrestrial environments is still relatively undocumented compared to marine environments (Soutullo *et al.*, 2007; McKeown and Westcott, 2012). Besides, while movement seems to impact negatively the performance of Argos telemetry, to our knowledge, no empirical experiment has ever quantified how movement can impact the quality of the locations.

Here we explore Argos accuracy in a context that has received little attention. Whereas many studies have focused on contexts where signal quality can be seriously degraded because animals spend most of their time underwater (White and Sjöberg, 2002; Freitas *et al.*, 2008; Tougaard *et al.*, 2008) or often change their flight altitude (Soutullo *et al.*, 2007), we rather focus on conditions where signal quality and thus location accuracy should be

maximal, to investigate the extent to which detailed biological questions could be answered in these conditions.

Most filtering methods have been created for datasets containing lots of bad quality locations but their ability to improve good quality datasets has never been tested (Jonsen *et al.*, 2007; Costa *et al.*, 2010; Patterson *et al.*, 2010). Polar regions offer exceptional conditions for Argos telemetry, considering that the Argos satellites have a polar orbit and that satellite coverage increases with latitude (Harris, 1990), resulting in a higher, optimal fix rate obtained every day. These conditions allow for an important proportion of good quality locations (Tarroux, 2011). We thus used the context of an ongoing study on Arctic fox (*Vulpes lagopus*) movement in the High Canadian Arctic to answer three main objectives. First, we evaluated empirically the error associated to Argos locations in a polar terrestrial environment, in a static and a mobile contexts. Second, we used different filtering methods to test how they improved the quality of Argos locations. Finally, we assessed how location error impacted the estimation of home-range size, one of the metrics most commonly used to quantify animal space use. Since there are intense debates in the literature as to the pros and cons of various home-range size estimators (Hemson *et al.*, 2005; Grueter *et al.*, 2009), we assessed the effect of Argos location error on two common estimators, the 95% minimum convex polygon (MCP) and the 95% fixed kernel density estimator.

Materials and methods

Study area

We worked during July 2012 in the southern plain of Bylot Island (73°N, 80°O) which is part of Sirmilik National Park, Nunavut, Canada. The area is characterized by flat lowland and upland plateaus intersected by valleys (Tarroux *et al.*, 2012). The tundra vegetation is composed mostly of low shrubs, grasses, mosses and lichens, with no forest cover.

Materials

We used twelve collars weighing < 115 g each and bearing Argos Platform Transmitter Terminals (PTT) (Model Kiwisat 203, Sirtrack Ltd, Hawkes Bay, New Zealand). The PTTs had a repetition rate of 60 seconds and transmitted daily between 14:00 and 17:00 GMT. To get reference locations of the Argos PTTs, each of them was randomly coupled to one of three GPS receivers (Garmin GPS76) as explained below (under *Static tests*). The inaccuracy associated with GPS locations is negligible compared to that associated with Argos locations; Cargnelutti *et al.* (2007) reported a median error < 10m for GPS units used to track wildlife in open areas, thus we considered the GPS locations as the true locations.

Static tests

We assessed Argos accuracy on static PTTs (static tests) in three classes of topography defined by the percentage of obstructed sky: 0-33% (hilltop), 33-66% (moderate relief) and 66-100% (incised valley). Two replicates were done for the first two classes and only one for the last, due to the rarity of incised valleys in our study area. For each test, we attached 3 Argos PTTs on wooden stakes located close to each other. Each PTT was located about 30 cm from the ground, with its antenna pointing towards the sky. The PTTs were left at the same spot during 6 days. During the first 3 days, they were restarted daily between 12:00 and 13:00 GMT, allowing them to transmit continuously during 24 hours after each start. During the last 3 days, they were not restarted daily and thus emitted only from 14:00 and 17:00 GMT. At each site, one GPS receiver was placed on the ground close to the

collars. The GPS receivers were programmed to record and store a location every 30 seconds. They were left for a full day or until the batteries were discharged.

The coordinates of the reference location for each test site were calculated as the average coordinates of all GPS locations for this site.

Mobile tests

We assessed Argos accuracy on mobile PTTs (mobile tests) during 20 sessions when we walked in the tundra with 3 Argos PTTs and one GPS receiver attached on our backpack. Each mobile session lasted > 4 hours. The Argos PTTs were restarted at the beginning of each session and the GPS was set to record a track location every 20 seconds. The tracks performed on 15 sessions were loops originating and ending at our field camp, whereas 5 other tracks reflected one-way trips to camp after we were dropped by a helicopter a few kilometers from the camp. Our average walking speed was $3.39 \pm 0.4 \text{ km.h}^{-1}$.

To determine a reference location for each Argos location obtained during a mobile test, we looked for the two GPS locations that were obtained just before (GPS1) and after (GPS2) the Argos location, and then calculated through linear interpolation a reference GPS location at the time of the Argos location. The timestamp provided by Argos for a given location is the average time between the first and the last message used to calculate this location (D. Stakem, Service Argos, pers. comm.), and the average duration of an Argos satellite pass is ca. 10 min. We therefore decided to calculate a reference GPS location only when the time difference between GPS1 and GPS2 was <10 minutes.

Data filtering

For both static and mobile tests, we defined the error associated to an Argos location as the Euclidean distance between that location and the associated reference GPS location. We filtered our mobile dataset in three ways to evaluate the extent to which we could improve the accuracy of our data set (Figure 1). First, we assessed the error distributions when we kept only the LC3, only the LC3 and LC2 (LC32), and only the LC3, LC2 and LC1

(LC321). Second, we assessed the error distributions after applying the Douglas Argos filter (hereafter referred to as DAF) (Douglas *et al.*, 2012), which is freely available on the Movebank website (www.movebank.org). Movebank is a free online infrastructure that allows researchers to archive, manage, analyze and share animal tracking data from various telemetry methods such as Argos, GPS or even light-level geolocators. As more and more data about animal tracking are collected every day, the scientific community may increasingly use tools such as Movebank (Urbano *et al.*, 2010). We therefore evaluated the efficiency of the DAF on our data. DAF is a destructive filter that flags implausible locations based on criteria such as spatial redundancy, movement rates and angles. We decided to filter our data based on all available criteria (Filter method = DAR) and keep all location classes (keep_lc = G). Since we worked at a local scale, we kept all near-consecutive locations within 2 km (maxredun = 2) and considered that the maximum sustainable speed for a human walking in the tundra was $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (minrate = 8) and that our tracks were tortuous (ratecoef = 5). These parameters were overall conservative and allowed to maximize the number of locations retained. . Third, we assessed the error distributions after applying a homemade speed filter (HSF; A. Tarroux and N. Casajus, Université du Québec à Rimouski, unpublished). This destructive filter considers a location to be valid only when one of the two following conditions is met: 1- a location is kept if the speed between that location and the previous one is inferior to a cruise speed determined by the user; 2- a location is kept if the speed between that location and the previous one is inferior to a maximum acceleration speed determined by the user and if the duration between the two locations is inferior to the maximum time during which the animal can sustain this maximum speed (also determined by the user). When none of these conditions is met, the last of the two consecutive locations is removed. Similarly to the DAF, we used as parameters a cruise speed of $6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, a maximum acceleration speed of $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, and a maximum acceleration duration of 20 min.

Assessment of the effect of location error on home-range estimation

We used three approaches to evaluate how Argos error impacts home-range size estimation. We first evaluated the impact of data filtering on home-range size (Figure 1, Objective 3A). To this end, we calculated home-range size for the 20 mobile sessions in five ways: 1- using the unfiltered data, 2- using the LC3 and LC2 locations (LC32), 3- using the LC3, LC2 and LC1 locations (LC321), 4- using the DAF-filtered datasets, and 5- using the HSF-filtered datasets. We did not calculate home-range size using only the LC3 locations because sample sizes were too small during some mobile sessions.

We then evaluated the impact of static (Figure 1, Objective 3B) and mobile (Figure 1, Objective 3C) Argos error on home-range size. To evaluate the impact of static errors, we applied the Argos errors (latitude and longitude) measured for the LC3 and LC2 locations during the static tests to each of the 20 GPS tracks generated during our mobile sessions. We generated the same number of dummy Argos locations as we obtained in each mobile track of the LC32 dataset, with the same proportion of locations in each location class. To evaluate the impact of mobile errors, we repeated the same procedure except that we applied Argos errors measured for the LC3 and LC2 locations during the mobile tests.

The home ranges generated by the tracks obtained during our mobile sessions may have been of a much more elongated shape than those of territorial animals. We thus, finally, decided to perform simulations to investigate how Argos error can influence home-range size estimation when locations are randomly distributed within a given area. To this end, we generated artificial random locations uniformly distributed in circles of a given radius. We used different radii (250 m, 500 m, 750 m, 1 000 m, 2 500 m and 5 000 m; Figure 1D) in order to investigate how the Argos error influences the home-range estimations at different spatial scales. We then applied errors from the mobile LC3 and LC2 distributions to each of these locations. To be consistent with our previous simulations, and to allow comparisons between our three approaches, for each radius, we performed 20 simulations (one for each mobile Argos track), and we generated the same number of artificial locations, with the same proportion of locations in each location class, as in the respective

mobile sessions of the LC32 dataset. We repeated all simulations (static, mobile and circular areas) 100 times.

Minimum convex polygon versus fixed kernel

To assess the effect of Argos location error on the 95% minimum convex polygon (MCP) and the 95% fixed kernel density estimators, we compared each estimate of home-range size generated from Argos data to the size of a reference home range. For the filtered datasets and the static and mobile simulations, reference home ranges were generated from the GPS tracks for each session. For the circular area simulations, the reference datasets were the randomly generated locations. As there were always more GPS locations than Argos locations, reference home ranges were estimated by randomly selecting in the reference datasets as many points as there were Argos locations. We repeated this process 1000 times for each Argos home-range estimation. For each iteration and for each method of home-range estimation (MCP vs. kernel), we calculated the size of the reference and Argos home-range estimations, the ratio of the Argos home range to the reference home range (ratio Argos : Reference), and the proportion of Argos locations found within the reference home range.

To ensure that kernel estimates would be comparable across all scenarios, we used a grid with a fixed cell size of 250 m and a fixed smoothing parameter of 850 m. This smoothing parameter value corresponds to the average value estimated from the *ad hoc* method for the Argos and reference home range as defined and implemented in the *adehabitat* R package (Calenge, 2006) for all filtering treatments of the smoothing parameters. Kernel areas were estimated as the 95% contours of the utilization distributions.

Statistical analyses

To evaluate the impact of topography on the distribution error of static locations (objective 1), we used a MANOVA on compositional data with the proportion of locations in each LC as dependant variable and the visibility as explanatory variable. We used linear mixed models with PTTs as a random factor to evaluate the impact of the interaction between LC

and test type (static or mobile) on the error. All errors were previously log-transformed to meet the normality requirement of the analysis. Filtered data (objective 2) were explored with descriptive statistics only. We finally used linear mixed models with the mobile sessions as a random factor to determine the influence of the treatment on home-range estimation of simulated and filtered mobile data (objective 3).

Unless otherwise indicated, all data are expressed as mean \pm standard deviation. We set the significance level at 0.05 for all tests and performed all statistical analyses in R 3.0.2 (R Core Team, 2013).

Results

Static tests

Static tests generated 2,106 Argos locations, with an average of 3.2 ± 1.2 locations per hour per PTT, and 86.2% of these locations were in LC3, LC2 or LC1 (

Table 1). One LCZ location was removed from the dataset prior to analyses, as Argos considers these locations as invalid. We estimated the true position of PTTs from 1,331 to 2,917 GPS locations, depending on the site. The measured 68th error percentiles were slightly greater for LC3 and LC2 locations than the values provided by CLS America (Table 1), but values for the other location classes fell within the provided range. The 68th error percentile in LCA was surprisingly 33% smaller than the LC1 one. We calculated a posteriori the longitude/latitude error ratio for each location, and found that errors were on average 5.4 ± 44.2 times greater in longitude than in latitude across all LCs. We detected no significant effect of topography on the proportion of locations in each LC (Wilks's $\lambda_{(df=10,4)} = 0.18$, $p = 0.76$), but the 68th error percentiles were respectively 27% and 30% smaller over all LCs for the 66-100% obstructed sky class compared to the 0-33% and 33-66% obstructed sky classes.

Mobile tests

Mobile tests generated 1,275 Argos locations, with an average of 64 ± 20 locations obtained per session (Table 1). The proportion of locations of LC3, LC2 or LC1 was still large (80.9%), but the proportion of LC3 decreased by half compared to static tests (20.9% vs. 45.8%) and the proportion of LC1 more than doubled compared to static tests (25.6% vs. 11.0%, Table 1). Mobile errors were significantly greater than static errors for all LCs (linear mixed model, $F_{(df=1)} = 371.52$, $p < 0.001$), and the 68th error percentiles were 1.7 to 3.8 times greater than their static counterparts.

Data filtering

The DAF and HSF removed respectively 34.0% and 38.5% of locations, with LC1, 0 and B being most severely filtered out (Table 2). All filtering methods led to an effective reduction of the 68th error percentiles (Figure 2). The examination of the error distributions shows that the DAF and the HSF performed very similarly. However, keeping only the LC3 or LC32 locations was the most efficient way of reducing location error (Figure 2).

Assessment of the effect of location error on home-range estimation

Average home-range sizes calculated from GPS locations were $6.9 \pm 3.1 \text{ km}^2$ with the MCP estimator and $31.5 \pm 4.6 \text{ km}^2$ with the kernel estimator (Figure 3A). The four filtering methods resulted in significantly improved estimates of home-range size, as evidenced by the fact that Argos-generated home-range sizes were closer to GPS-generated home-range sizes after the data were filtered (Figure 3A). The lowest size ratios (Figure 3B) and the highest proportions of Argos locations falling in the GPS home range (Figure 3C) were obtained when keeping only locations of LC3 and LC2. Keeping only LC32 indeed resulted in a decrease of the home-range size of 74% with MCP and 49% with the kernel compared to unfiltered data, and the proportion of locations in the reference home range increased by 5.0% (MCP) and 12.0% (kernel). Although they did not provide the best results, the

Douglas Argos filter and our homemade speed filter led to parameter estimates that did not significantly differ from the LC32 ones (Table S1).

Size ratios of home ranges and the proportion of locations found in the reference home range calculated for simulated Argos locations with mobile errors were not statistically different from those calculated with the LC32 locations (Figure 3B-C, Table S1), except for the proportion of locations in the reference home range calculated with the MCP (Figure 3C, Table S1). However, both size ratios and the proportion of locations in reference home ranges calculated for the "Static" dataset differed significantly from the LC32 and "Mobile" datasets, both when using MCP and kernel (Table S1). As predicted, the "Static" dataset gave consistently estimates of better quality than its counterpart based on mobile error, with mobile home-range size ratios being 49% (MCP) and 18% (kernel) higher than static home-range size ratios, and the proportion of locations in the reference home range being the highest for both methods.

The performance of estimations for locations randomly generated in circular areas of various sizes consistently improved as the radius of the circle increased (Figure 4bc). While for a 250-m radius, home-range sizes were overestimated by 2,250% and 50% respectively with MCP and kernel estimators, the overestimations were reduced to 27% and 17% for a 2,500-m radius and to 9% and 6% for a 5,000-m radius. The proportion of locations in the reference home range was $\sim 98\%$ with the kernel estimation for radii < 1000 m but started to decrease from radii ≥ 2500 m (Figure 4c). In contrast, this proportion increased steadily with the radius for the MCP estimations.

Influence of the home-range estimator on the home-range size estimation

Home-range size estimates were always larger with the kernel estimation method than with the MCP (Figures 3-4), especially so for the reference home ranges (Figure 3). The kernel estimator also generated lower size ratios between the reference home ranges and the Argos ones, and it generated a higher proportion of locations in the reference home range (Figures 3-4).

Discussion

Accuracy of Argos locations during static tests

Our static experiments yielded high quality data containing a very high proportion of accurate locations (LC3). To our knowledge, only Sauder *et al.* (2012), working in the northwest of the United States, reported a location set of similar accuracy. Also in good agreement with Sauder *et al.* (2012), topography did not significantly impact Argos performance in our study area, except for a gain in accuracy when topography increased. This gain might reflect the screening out of bad quality locations generated when satellites were at a low angle above the horizon. Sauder *et al.* (2012) attributed the high quality of their datasets to recent improvements in satellite technology, PTT technology, and data processing algorithms. We get further by suggesting that the geographical area where PTTs are active might influence the accuracy of reported locations. Indeed, Boyd and Brightsmith (2013) recently obtained locations of poor accuracy in Peru, even when using the Kalman filter, introduced in 2011 by CLS America. We suggest that increased satellite coverage at high latitudes might have a strong influence on Argos performance (Harris, 1990). Other factors, such as PTT power or electromagnetic interference, might also affect Argos location quality differentially according to where the study is conducted (Nicholls *et al.*, 2007; Soutullo *et al.*, 2007; Dubinin *et al.*, 2010). The greater error in longitude than in latitude that we observed is however consistent with other studies and is to be expected because of the polar orbit of the satellites (Hoenner *et al.*, 2012; Boyd and Brightsmith, 2013).

Influence of PTT movement on Argos location error

More than 80% of the locations of our moving PTTs were in LC3, LC2 or LC1, which contrasts with previous reports from Vincent *et al.* (2002) (29.8%), Britten *et al.* (1999)

(11.0%), and Hazel (2009) (12.5%). Yet movement did strongly affect the accuracy of Argos locations, since error estimates were almost twice as large for mobile tests than for static tests, whatever the location class. This occurred even though our movement speed (a human pace in the tundra) was relatively low. This confirms that PTT movement is one of the dominant sources of inaccuracy for Argos telemetry (McKeown and Westcott, 2012).

Our simulations showed that the size ratios of home ranges were at least 20% higher for mobile than for static errors. This suggests that a static evaluation of Argos error is not sufficient to assess the accuracy of Argos locations, as is sometimes suggested in the literature (Le Boeuf *et al.*, 2000). We recommend always evaluating Argos accuracy in conditions similar to those encountered by PTTs deployed on animals, for example through the use of captive animals (e.g. Vincent *et al.*, 2002) or through a mix of Argos and GPS technology (e.g. Hoenner *et al.*, 2012).

Effect of data filtering on the quality of Argos datasets

The lowest home-range sizes and the highest proportions of locations in reference home ranges were obtained when retaining only high quality location classes (LC3 and LC2), not when applying one of our data filters. This is not surprising, since we only tested destructive filters, which are meant to remove the less accurate locations. Moreover, destructive filter usually remove few good quality locations, mostly by screening out locations from LC0, A and B (Freitas *et al.*, 2008; Douglas *et al.*, 2012). However, keeping only locations from LC3 and LC2 resulted in a more reduced dataset than when applying other filtering methods. Keeping only LC3 and LC2 locations might also bias the evaluation of animal space use for some specific areas, such as those where animals rest and thus do not move (Deutsch *et al.*, 1998). In addition, since the error estimates provided by CLS represent only the 68th percentile of the error, some locations can still have an important associated error, even in LC3 (Austin *et al.*, 2003). Since no significant difference was found between home-range size estimations based on the LC32 data, Douglas Argos-filter and homemade filter datasets, we suggest that filtering full datasets is more appropriate than using only LC32 locations, whenever possible.

We only tested the efficiency of destructive filters in this study, so the filtered datasets could only be as accurate as the best quality locations. It would be interesting to see how more complex approaches, like state-space models, might improve even more data quality and home-range estimates (Hoenner *et al.*, 2012; Jonsen *et al.*, 2012).

Influence of home-range delineation method on home-range size estimation

Kernel home ranges had consistently lower size ratios and a higher proportion of locations in the reference home range than MCPs. However, home-range size estimates were always greater with the kernel estimator, which might seem counter-intuitive since the MCP method is known to overestimate home-range size (Grueter *et al.*, 2009). Our choice of smoothing factor might explain this result, since we used for all our home-range estimations the average value of the smoothing parameters estimated for all filtering treatments and the reference datasets. By including datasets that contained Argos errors when choosing our smoothing parameter, we might have obtained a larger value than if we only used the reference datasets and that might have resulted in the overestimation of our reference home ranges (Seaman and Powell, 1996; Gitzen *et al.*, 2006). Moreover, we used the *ad hoc* method defined in the *adehabitat* R package (Calenge, 2006) to select our smoothing parameter which might also lead to bandwidth overestimation (Seaman and Powell, 1996). This could explain why the size ratios were lower and why the reference home ranges included a more important proportion of locations. Spatial scale did not influence greatly our kernel results, even though the proportion of locations found in home ranges started to decrease in circles with a 5000-m radius, which might be the result of the smoothing factor becoming too small, thus resulting in an underestimation of the reference home ranges (Gitzen *et al.*, 2006). On the contrary, the MCP method depended much more on the spatial scale, with only a very low proportion of locations found in reference home ranges and a very high size ratio with a 250-m radius. This is not surprising considering the MCP is sensitive to outliers and thus is more prone to overestimation if the error is important compared to the spatial scale (Burgman and Fox, 2003). The size ratios and the proportion of locations in reference home ranges decreased as the spatial scale increased,

reflecting the fact that, as the spatial scale becomes sufficiently large compared to the measurement error, the error becomes diluted and biological signals can be detected (Bradshaw *et al.*, 2007). In the end, even though a better estimation of the kernel bandwidth might be preferable, the choice of the home-range estimator did not influence our decision when comparing the efficiency of the filters, as both methods yielded comparable results.

Conclusion

Our methodological study, performed in a terrestrial polar region, yielded a high number of good quality locations with error estimates close to what CLS is advertising. However, PTT movement greatly impacted location accuracy, even at low speeds, and a next step should be to quantify how PTT speed influences accuracy of Argos locations. The assessment of location accuracy in a mobile setup and data filtering should be two prerequisites before analyzing any Argos dataset in a biological context. We showed that applying the Douglas-Argos filter or a basic speed filter provide similar home range estimates than keeping only locations falling in the best Argos location classes (LC3 and LC2), while retaining more locations, and should therefore be advocated. It is noteworthy that Argos inaccuracy will always lead to an overestimation of home-range size. The importance of this overestimation will be larger for small home ranges. Yet our results suggest that, considering the quality of the data we obtained, Argos telemetry still has a high benefit/cost ratio when studying small terrestrial animals in polar environments.

Acknowledgements

We are grateful to C. Morin and C. Henry-Brouillette for helping walk the collars in the tundra, and to M-J. Rioux and C. Chevallier for their help with static experiments. Many thanks as well to A. Caron for his great help with statistical analyses. We also thank Joël Bêty and Christian Dussault for their useful comments on previous versions of this manuscript. This study was supported by (alphabetical order): Canada Foundation for Innovation, Canada Research Chairs Program, Kenneth M Molson Foundation, Mittimatalik Hunters and Trappers Organization, Natural Sciences and Engineering

Research Council of Canada (NSERC), Network of Centers of Excellence of Canada ArcticNet, Parks Canada Agency, Polar Continental Shelf Program (Natural Resources Canada), and Université du Québec à Rimouski (UQAR).

References

- Austin, D., J. I. Mcmillan and W. D. Bowen, 2003. A three-stage algorithm for filtering erroneous Argos satellite locations. *Marine Mammal Science*, **19**(2): 371-383.
- Beauchesne, D., J. A. Jaeger and M.-H. St-Laurent, 2013. Disentangling woodland caribou movements in response to clearcuts and roads across temporal scales. *PLoS ONE*, **8**(11): e77514.
- Boyd, I. L., D. J. Mccafferty, K. Reid, R. Taylor and T. R. Walker, 1998. Dispersal of male and female antarctic fur seals (*Arctocephalus gazella*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **55**(4): 845-852.
- Boyd, J. D. and D. J. Brightsmith, 2013. Error properties of Argos satellite telemetry locations using least squares and Kalman filtering. *PLoS ONE*, **8**(5): e63051.
- Bradshaw, C. J. A., D. W. Sims and G. C. Hays, 2007. Measurement error causes scale-dependent threshold erosion of biological signals in animal movement data. *Ecological Applications*, **17**(2): 628-638.
- Breed, G. A., D. P. Costa, I. D. Jonsen, P. W. Robinson and J. Mills-Flemming, 2012. State-space methods for more completely capturing behavioral dynamics from animal tracks. *Ecological Modelling*, **235**: 49-58.
- Britten, M. W., P. L. Kennedy and S. Ambrose, 1999. Performance and accuracy evaluation of small satellite transmitters. *Journal of Wildlife Management*, **63**(4): 1349-1358.
- Burgman, M. A. and J. C. Fox, 2003. Bias in species range estimates from minimum convex polygons: implications for conservation and options for improved planning. *Animal Conservation*, **6**(1): 19-28.
- Burns, J. M. and M. A. Castellini, 1998. Dive data from satellite tags and time-depth recorders: A comparison in Weddell seal pups. *Marine Mammal Science*, **14**(4): 750-764.
- Calenge, C., 2006. The package “adehabitat” for the R software: a tool for the analysis of space and habitat use by animals. *Ecological Modelling*, **197**(3): 516-519.
- Cargnelutti, B., A. Coulon, A. J. M. Hewison, M. Goulard, J. M. Angibault and N. Morellet, 2007. Testing Global Positioning System performance for wildlife monitoring using mobile collars and known reference points. *Journal of Wildlife Management*, **71**(4): 1380-1387.
- Costa, D. P., P. W. Robinson, J. P. Y. Arnould, A. L. Harrison, S. E. Simmons, J. L. Hassrick, A. J. Hoskins, S. P. Kirkman, H. Oosthuizen, S. Villegas-Amtmann and D. E. Crocker, 2010. Accuracy of ARGOS locations of pinnipeds at-sea estimated using fastloc GPS. *PLoS ONE*, **5**(1).
- Deutsch, C. J., R. K. Bonde and J. P. Reid, 1998. Radio-tracking manatees from land and space: tag design, implementation, and lessons learned from long-term study. *Marine Technology Society Journal*, **32**(1): 18-29.
- Douglas, D. C., R. Weinzierl, S. C. Davidson, R. Kays, M. Wikelski and G. Bohrer, 2012. Moderating Argos location errors in animal tracking data. *Methods in Ecology and Evolution*, **3**(6): 999-1007.

- Dubinín, M., A. Lushchekina and V. C. Radeloff, 2010. Performance and accuracy of Argos transmitters for wildlife monitoring in Southern Russia. *European Journal of Wildlife Research*, **56**(3): 459-463.
- Freitas, C., C. Lydersen, M. A. Fedak and K. M. Kovacs, 2008. A simple new algorithm to filter marine mammal Argos locations. *Marine Mammal Science*, **24**(2): 315-325.
- Georges, J. Y., C. Guinet, P. Jouventin and H. Weimerskirch, 1997. Satellite tracking of seabirds: interpretation of activity pattern from the frequency of satellite locations. *Ibis*, **139**(2): 403-405.
- Gitzen, R. A., J. J. Millspaugh and B. J. Kernohan, 2006. Bandwidth selection for fixed-kernel analysis of animal utilization distributions. *Journal of Wildlife Management*, **70**(5): 1334-1344.
- Grueter, C., D. Li, B. Ren and F. Wei, 2009. Choice of analytical method can have dramatic effects on primate home range estimates. *Primates*, **50**(1): 81-84.
- Harris, R. B., 1990. Tracking wildlife by satellite: current systems and performance. Fish and Wildlife technical report.
- Harris, S., W. J. Cresswell, P. G. Forde, W. J. Trehwella, T. Woollard and S. Wray, 1990. Home-range analysis using radio-tracking data - a review of problems and techniques particularly as applied to the study of mammals. *Mammal Review*, **20**(2-3): 97-123.
- Hays, G. C., S. Åkesson, B. J. Godley, P. Luschi and P. Santidrian, 2001. The implications of location accuracy for the interpretation of satellite-tracking data. *Animal Behaviour*, **61**(5): 1035-1040.
- Hazel, J., 2009. Evaluation of fast-acquisition GPS in stationary tests and fine-scale tracking of green turtles. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **374**(1): 58-68.
- Hebblewhite, M. and D. T. Haydon, 2010. Distinguishing technology from biology: A critical review of the use of GPS telemetry data in ecology. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **365**(1550): 2303-2312.
- Hemson, G., P. Johnson, A. South, R. Kenward, R. Ripley and D. Macdonald, 2005. Are kernels the mustard? Data from global positioning system (GPS) collars suggests problems for kernel home-range analyses with least-squares cross-validation. *Journal of Animal Ecology*, **74**(3): 455-463.
- Hoenner, X., S. D. Whiting, M. A. Hindell and C. R. McMahon, 2012. Enhancing the use of argos satellite data for home range and long distance migration studies of marine animals. *PLoS ONE*, **7**(7).
- Ionides, E. L., C. Breto and A. A. King, 2006. Inference for nonlinear dynamical systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **103**(49): 18438-18443.
- Jonsen, I. D., R. A. Myers and J. M. Flemming, 2003. Meta-analysis of animal movement using state-space models. *Ecology*, **84**(11): 3055-3063.
- Jonsen, I. D., J. M. Flemming and R. A. Myers, 2005. Robust state-space modeling of animal movement data. *Ecology*, **86**(11): 2874-2880.

- Jonsen, I. D., R. A. Myers and M. C. James, 2007. Identifying leatherback turtle foraging behaviour from satellite telemetry using a switching state-space model. *Marine Ecology Progress Series*, **337**: 255-264.
- Jonsen, I. D., M. Basson, S. Bestley, M. V. Bravington, T. A. Patterson, M. W. Pedersen, R. Thomson, U. H. Thygesen and S. J. Wotherspoon, 2012. State-space models for bio-loggers: A methodological road map. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*(0).
- Kaczensky, P., T. Y. Ito and C. Walzer, 2010. Satellite telemetry of large mammals in Mongolia: What expectations should we have for collar function? *Wildlife Biology in Practice*, **6**(2): 108-126.
- Keating, K. A., 1994. An alternative index of satellite telemetry location error. *Journal of Wildlife Management*, **58**(3): 414-421.
- Keating, K. A., W. G. Brewster and C. H. Key, 1991. Satellite telemetry: performance of animal-tracking systems. *Journal of Wildlife Management*, **55**(1): 160-171.
- Le Boeuf, B. J., D. E. Crocker, D. P. Costa, S. B. Blackwell, P. M. Webb and D. S. Houser, 2000. Foraging ecology of northern elephant seals. *Ecological Monographs*, **70**(3): 353-382.
- Lowry, L. F., K. J. Frost, J. M. Ver Hoep and R. A. Delong, 2001. Movements of satellite-tagged subadult and adult harbor seals in Prince William Sound, Alaska. *Marine Mammal Science*, **17**(4): 835-861.
- McConnell, B. J., C. Chambers and M. A. Fedak, 1992. Foraging ecology of southern elephant seals in relation to the bathymetry and productivity of the Southern Ocean. *Antarctic Science*, **4**(4): 393-398.
- McKeown, A. and D. A. Westcott, 2012. Assessing the accuracy of small satellite transmitters on free-living flying-foxes. *Austral Ecology*, **37**(3): 295-301.
- Mellone, U., P. López-López, R. Limiñana and V. Urios, 2011. Weather conditions promote route flexibility during open ocean crossing in a long-distance migratory raptor. *International Journal of Biometeorology*, **55**(4): 463-468.
- Nicholls, D. G. and C. J. R. Robertson, 2007. Validating locations from CLS:Argos satellite telemetry. *Notornis*, **54**(3): 121-136.
- Nicholls, D. G., C. J. R. Robertson and M. D. Murray, 2007. Measuring accuracy and precision for CLS: Argos satellite telemetry locations. *Notornis*, **54**(3): 137-157.
- Patterson, T. A., B. J. McConnell, M. A. Fedak, M. V. Bravington and M. A. Hindell, 2010. Using GPS data to evaluate the accuracy of state-space methods for correction of Argos satellite telemetry error. *Ecology*, **91**(1): 273-285.
- Pedersen, M. W., T. A. Patterson, U. H. Thygesen and H. Madsen, 2011. Estimating animal behavior and residency from movement data. *Oikos*, **120**(9): 1281-1290.
- Royer, F. and M. Lutcavage, 2008. Filtering and interpreting location errors in satellite telemetry of marine animals. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **359**(1): 1-10.
- Sauder, J. D., J. L. Rachlow and M. M. Wiest, 2012. Influence of topography and canopy cover on argos satellite telemetry performance. *Wildlife Society Bulletin*, **36**(4): 813-819.

- Seaman, D. E. and R. A. Powell, 1996. An evaluation of the accuracy of kernel density estimators for home range analysis. *Ecology*, **77**(7): 2075-2085.
- Service Argos, 2011. Manuel utilisateur Argos. CLS, 63 p
- Soutullo, A., L. Cadahía, V. Urios, M. Ferrer and J. J. Negro, 2007. Accuracy of lightweight satellite telemetry: A case study in the Iberian Peninsula. *Journal of Wildlife Management*, **71**(3): 1010-1015.
- Stewart, B. S., S. Leatherwood, P. K. Yochem and M. Heide-Jorgensen, 1989. Harbor seal tracking and telemetry by satellite. *Marine Mammal Science*, **5**(4): 361-375.
- Tarroux, A., 2011. Utilisation de l'espace et des ressources chez un carnivore terrestre de l'arctique : le renard polaire. Université du Québec à Rimouski, 197 p.
- Tarroux, A., D. Berteaux and J. Bêty, 2010. Northern nomads: Ability for extensive movements in adult arctic foxes. *Polar Biology*, **33**(8): 1021-1026.
- Tarroux, A., J. Bêty, G. Gauthier and D. Berteaux, 2012. The marine side of a terrestrial carnivore: Intra-population variation in use of allochthonous resources by arctic foxes. *PLoS ONE*, **7**(8): e42427.
- Tougaard, J., J. Teilmann and S. Tougaard, 2008. Harbour seal spatial distribution estimated from Argos satellite telemetry: Overcoming positioning errors. *Endangered Species Research*, **4**(1-2): 113-122.
- Urbano, F., F. Cagnacci, C. Calenge, H. Dettki, A. Cameron and M. Neteler, 2010. Wildlife tracking data management: a new vision. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **365**(1550): 2177-2185.
- Vincent, C., B. J. McConnell, V. Ridoux and M. A. Fedak, 2002. Assessment of Argos location accuracy from satellite tags deployed on captive gray seals. *Marine Mammal Science*, **18**(1): 156-166.
- White, N. A. and M. Sjöberg, 2002. Accuracy of satellite positions from free-ranging grey seals using ARGOS. *Polar Biology*, **25**(8): 629-631.
- Witt, M. J., S. Åkesson, A. C. Broderick, M. S. Coyne, J. Ellick, A. Formia, G. C. Hays, P. Luschi, S. Stroud and B. J. Godley, 2010. Assessing accuracy and utility of satellite-tracking data using Argos-linked Fastloc-GPS. *Animal Behaviour*, **80**(3): 571-581.

Table 1. Number and proportion of locations obtained, mean error, mean longitudinal and latitudinal errors, median error, 68th error percentiles as estimated by CLS America, and 68th and 90th error percentiles calculated from Argos locations obtained during static (n = 7) and mobile tests (n= 20) from Argos Platform Terminal Transmitters deployed simultaneously with GPS receivers on Bylot Island, Nunavut, Canada in July 2012.

LC	n	Proportion of total (%)	Mean error ± SD (m)	Longitudinal mean error ± SD (m)	Latitudinal mean error ± SD (m)	Median error (m)	Estimated 68 th error percentiles (m)	Error percentiles (m)		
								68 th	90 th	
Static	3	964	45.8	259 ± 208	171 ± 165	162 ± 166	213	< 250	298	469
	2	622	29.5	456 ± 359	306 ± 301	283 ± 270	357	250 < < 500	517	953
	1	232	11.0	773 ± 607	540 ± 464	471 ± 486	588	500 < < 1500	920	1613
	0	45	2.1	5330 ± 17085	4152 ± 12852	3123 ± 11321	1454	> 1500	2475	8253
	A	126	6.0	640 ± 866	397 ± 483	419 ± 770	397	NA	618	1128
	B	117	5.6	1195 ± 2143	694 ± 1371	831 ± 1723	478	NA	787	2580
	Total	2106	100	557 ± 2656	379 ± 1992	348 ± 1771	299		440	978
Mobile	3	267	20.94	556 ± 409	369 ± 310	347 ± 353	470	< 250	643	1007
	2	438	34.35	822 ± 726	533 ± 551	525 ± 583	624	250 < < 500	887	1593
	1	327	25.65	2007 ± 1946	1359 ± 1593	1253 ± 1365	1430	500 < < 1500	2124	3933
	0	161	12.63	6270 ± 9402	4601 ± 8328	3757 ± 4805	3845	> 1500	5780	12850
	A	27	2.12	1988 ± 2166	1350 ± 1750	1144 ± 1575	954	NA	2351	4853
	B	55	4.31	5028 ± 16059	3058 ± 12025	3502 ± 10819	1233	NA	2184	8367
	Total	1275	100	1964 ± 5189	1350 ± 4191	1224 ± 3146	864		1433	4105

Table 2. Number of Argos locations of each location class (LC) and number of Argos locations retained by the Douglas Argos Filter (DAF) and a Homemade Speed Filter (HSF) applied to data obtained during 20 mobile tests from Argos Platform Terminal Transmitters deployed on Bylot Island, Nunavut, Canada in July 2012.

LC	Raw	LC3	LC32	LC321	DAF	HSF
3	267	267	267	267	226 (84.6%)	200 (74.9%)
2	438	0	438	438	343 (78.3%)	310 (70.8%)
1	327	0	0	327	189 (57.8%)	174 (53.2%)
0	161	0	0	0	47 (29.2%)	50 (31.1%)
A	27	0	0	0	19 (70.4%)	17 (63%)
B	55	0	0	0	18 (32.7%)	33 (60%)
Total	1275	267	705	1032	842 (66.0%)	784 (61.5%)
Average no. of loc. per session \pm SD	64 \pm 20	13 \pm 10	35 \pm 19	52 \pm 17	42 \pm 17	39 \pm 15
Mean error (m \pm SD)	1964 \pm 5189	556 \pm 409	721 \pm 638	1129 \pm 1355	895 \pm 820	915 \pm 964

The percentage of locations retained by each filter within each LC is shown in parentheses.

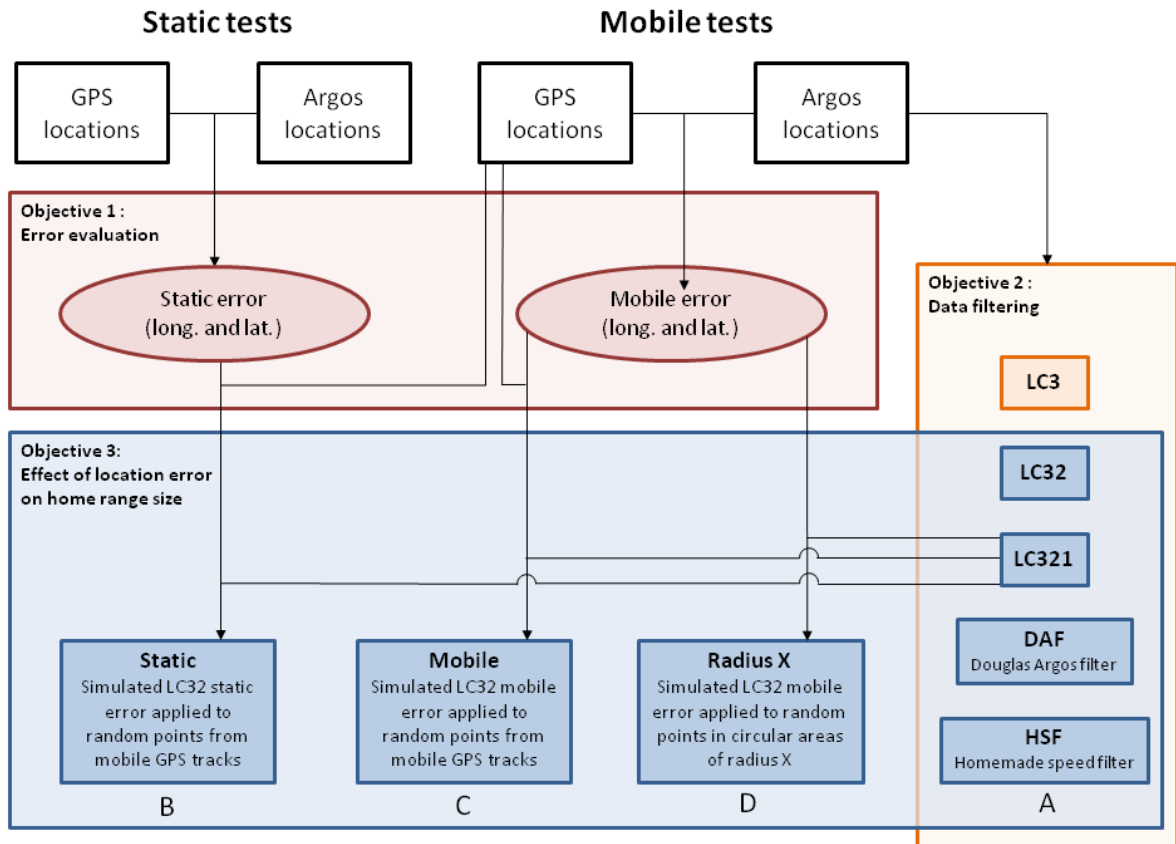


Figure 1. Linkages between study design, data structure, and research objectives.

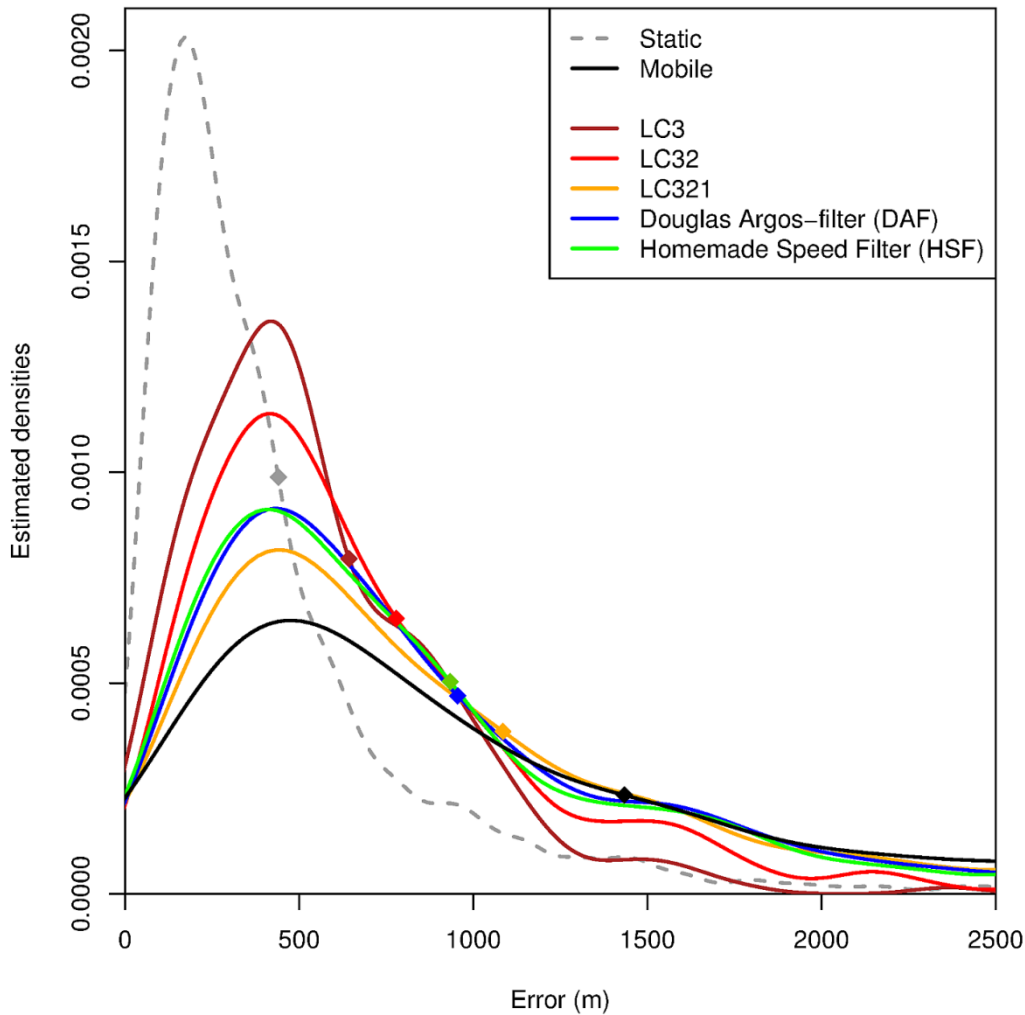


Figure 2. Probability density distributions of the error associated with Argos locations. Locations were obtained during static tests (Static, $n=2,106$) and mobile tests (Mobile, $n=1,275$). The latter category is decomposed into LC3 locations ($n=267$), LC3 + LC2 locations (LC32, $n=705$), LC3 + LC2 + LC1 locations (LC321, $n=1,032$), locations filtered with the Douglas Argos Filter (DAF, $n=842$) and locations filtered with a Homemade Speed Filter (HSF, $n=784$). The diamonds indicate the 68th percentile of data. Data were obtained from Argos Platform Terminal Transmitters deployed simultaneously with GPS receivers on Bylot Island, Nunavut, Canada in July 2012.

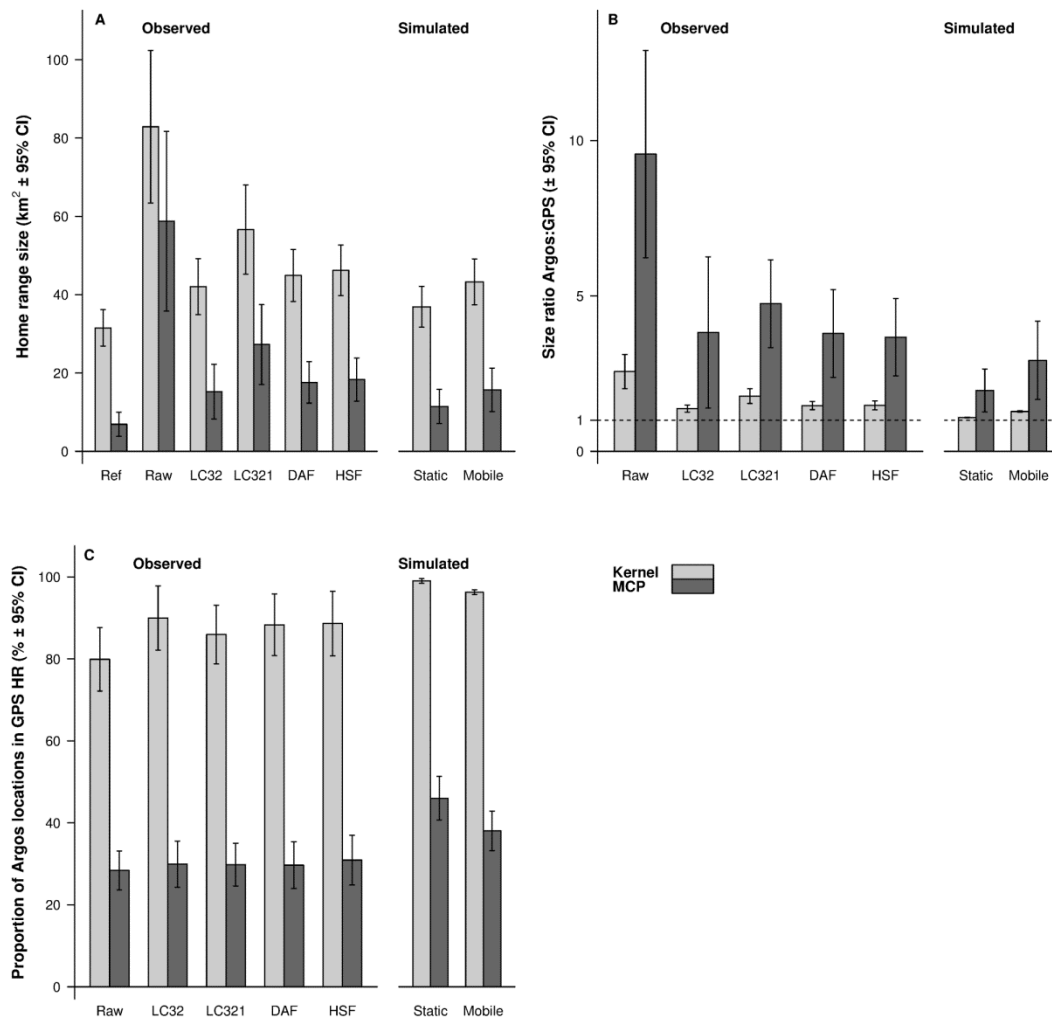


Figure 3. Influence of filtering methods on home-range estimations. We present the average home-range size (A), the size ratio Argos : GPS (B) and the proportion of Argos locations found in GPS home-range estimates (C) calculated while estimating home ranges based on Argos and GPS locations from mobile experiments using two methods : 95% MCP and 95% kernel ($h = 850$, cell grid size = 250m). The home ranges were estimated for the following scenarios: raw data (Raw), only LC3 and LC2 locations (LC32), LC3 and LC2 and LC1 locations (LC321), data filtered with the Douglas Argos-filter (DAF), data filtered with a Homemade Speed Filter (HSF), simulated Argos locations with errors from the static error distribution (Static), simulated Argos locations with errors from the mobile error distribution (Mobile). Home-range size (A) using the GPS reference area (Ref) is also shown. Data were obtained from Argos Platform Terminal Transmitters deployed simultaneously with GPS receivers on Bylot Island, Nunavut, Canada in July 2012.

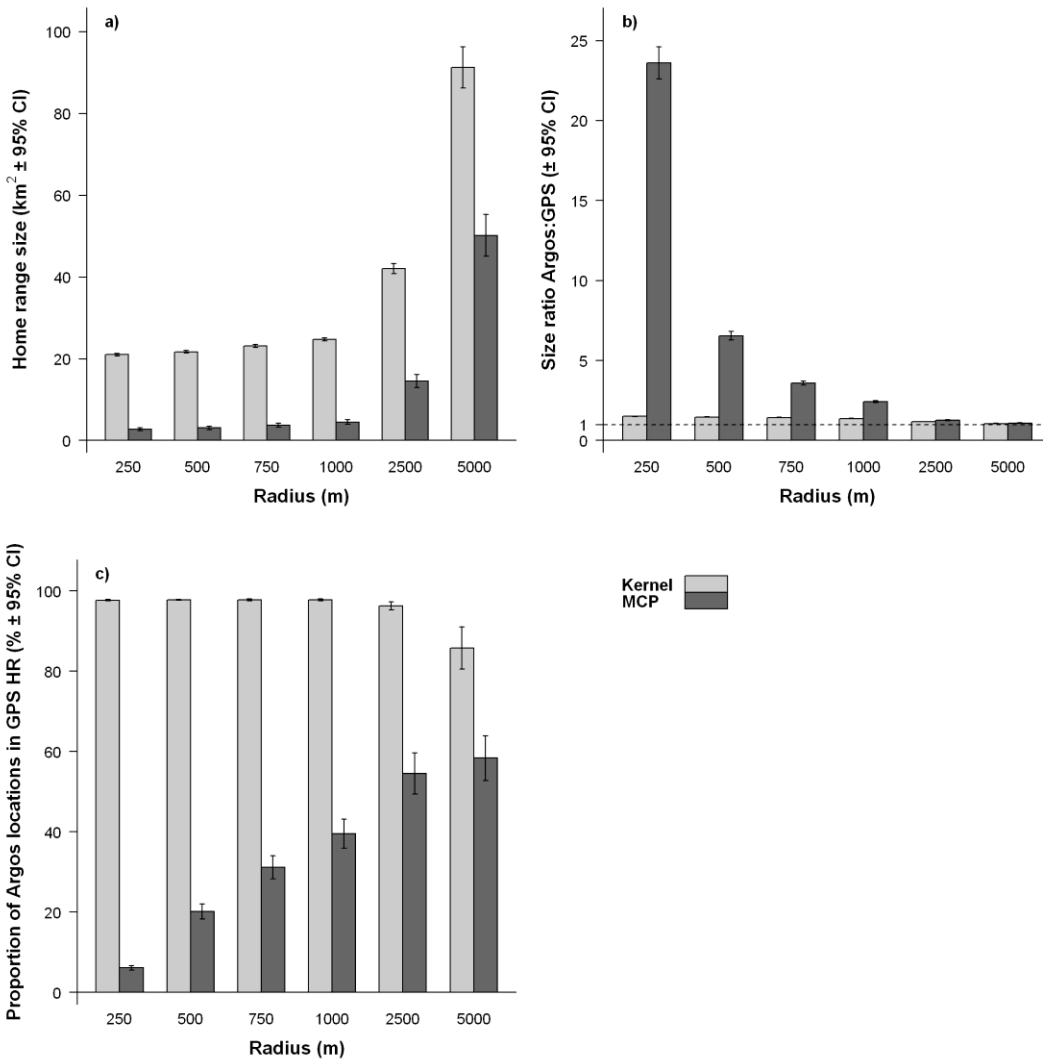


Figure 4: Home-range estimations for simulated Argos errors in circles of varying radii. We present the average home-range size (A), the size ratio Argos:GPS (B) and the proportion of Argos locations found in GPS home-range estimates (C) calculated while estimating Argos and GPS home ranges from mobile experiments using two methods : MCP 95% and kernel 95% ($h = 850$, grid cell size = 250m). The home ranges were estimated for simulated random GPS and Argos locations in circular areas of radius 250m, 500m, 750m, 1,000m, 2,500m, and 5,000m.

Supporting Data

Table S1 : Differences of least squared means between the fixed factors of mixed models comparing the effect of filtering methods (Observed) and simulated data (Simulated) on the size ratio of home-range estimations and the proportion of locations in the reference home range.

		Size ratio		Proportion in reference	
		MCP	Kernel	MCP	Kernel
Observed	Raw - LC32	5.62 (<0.001)	7.57 (<0.001)	-1.15 (0.25)	-6.09 (<0.001)
	Raw - LC321	4.71 (<0.001)	5.03 (<0.001)	-1.06 (0.29)	-3.65 (<0.001)
	Raw - DAF	5.65 (<0.001)	6.98 (<0.001)	-0.96 (0.34)	-5.08 (<0.001)
	Raw - HSF	5.77 (<0.001)	6.93 (<0.001)	-1.89 (0.06)	-5.27 (<0.001)
	LC32 - LC321	-0.91 (0.4)	-2.55 (0.01)	0.09 (0.93)	2.44 (0.02)
	LC32 - DAF	0.03 (1)	-0.6 (0.55)	0.18 (0.85)	1 (0.32)
	LC32 - HSF	0.15 (0.9)	-0.64 (0.52)	-0.74 (0.46)	0.81 (0.42)
	LC321 - DAF	0.94 (0.4)	1.95 (0.06)	0.09 (0.93)	-1.44 (0.16)
	LC321 - HSF	1.06 (0.3)	1.9 (0.06)	-0.84 (0.41)	-1.62 (0.11)
	DAF - HSF	0.12 (0.9)	-0.05 (0.96)	-0.93 (0.36)	-0.19 (0.85)
Simulated	LC32 - Static	-2.25 (0.03)	-4.91 (<0.001)	6.69 (<0.001)	2.37 (0.03)
	LC32 - Mobile	-1.6 (0.13)	-1.58 (0.12)	3.32 (0.004)	1.65 (0.12)
	Static - Mobile	3.34 (0.003)	19.23 (<0.001)	-12.02 (<0.001)	-36.7 (<0.001)

Home-range estimations were conducted using two methods : 95% MCP and 95% kernel ($h = 850$, cell grid size = 250 m). Are presented the t -values of the differences and the P -values in parenthesis. Significant differences ($p < 0.05$) are shown in bold.

CHAPITRE 2

CONCLUSION

Cette étude a permis de montrer que les milieux polaires peuvent offrir des conditions favorables au suivi télémétrique Argos, avec une forte proportion de localisations de bonne qualité et des estimations d'erreur parmi les plus faibles rapportées. Cependant, bien que des résultats comparables aient été obtenus en Amérique du Nord, il est probable que nos résultats ne soient pas généralisables à l'ensemble du globe, les régions polaires bénéficiant d'un nombre accru de passages de satellites. Nous avons également démontré que le mouvement des colliers pouvait avoir un fort impact sur la précision des localisations, et ce même à faible vitesse. Il serait maintenant intéressant d'étudier comment l'erreur varie à mesure que la vitesse change.

Les méthodes de filtrage initialement développées pour des jeux de données de mauvaise qualité ont permis d'améliorer la qualité de nos données tout en conservant un nombre plus important de localisations que si l'on ne conservait que les classes de localisation de meilleure qualité. Ainsi, même si les erreurs étaient plus faibles en ne conservant que les LC32, les estimations de domaines vitaux étaient comparables que ce soit avec le filtre Douglas-Argos ou avec notre filtre de vitesse. Il est donc préférable d'utiliser un de ces deux derniers filtres afin d'optimiser le gain de précision tout en maximisant le nombre de localisations conservées. Toutefois, nous n'avons testé ici que des filtres destructeurs entraînant la suppression de localisations et dont la précision maximale ne peut être que celle des meilleures classes de localisation. Il serait maintenant intéressant d'étudier si d'autres méthodes non-destructrices, telles que les modèles espace-état peuvent améliorer la qualité de notre jeu de données.

Lors de l'estimation de domaines vitaux, nous avons vu que l'influence des erreurs diminuait à mesure que l'échelle spatiale augmentait, mais aussi que le choix de l'estimateur n'influait pas la décision quant à savoir quelle méthode de filtrage était la plus appropriée. Les domaines vitaux semblent toutefois avoir été surestimés avec la méthode du kernel, probablement en lien avec la méthode de détermination du facteur de lissage. Par conséquent, il pourrait être judicieux d'étudier comment le facteur de lissage peut influencer les estimations de domaines vitaux pour des localisations avec erreur. Il pourrait également être intéressant de travailler à des échelles spatiales encore plus grandes, afin de voir dans quelle mesure l'erreur Argos se dilue lorsque que l'échelle spatiale augmente. Enfin, nous n'avons ici simulé que des cercles à l'intérieur desquels nous distribuions aléatoirement des points, ce qui n'est pas représentatif de la réalité. Effectuer des simulations avec des formes de domaines vitaux et des répartitions de points variables pourrait permettre d'étudier plus en profondeur comment l'erreur Argos peut influencer les estimations de domaines vitaux.

Cette étude nous aura ainsi permis de mieux comprendre comment l'erreur Argos peut influencer certaines de nos décisions biologiques. Elle renforce la nécessité de procéder à des tests de quantification de cette erreur avant toute analyse d'un jeu de données, idéalement dans un contexte mobile et dans des conditions aussi proches que possible de celles qui du suivi des animaux. Nous avons également démontré que la surestimation du domaine vital n'était que de $\sim 10\%$ dans un cercle de 5000 m de rayon. Ceci nous mène à conclure que la technologie Argos offre un rapport coût/bénéfice intéressant pour l'étude de petits mammifères dans des régions polaires.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Austin, D., J. I. McMillan et W. D. Bowen, 2003. A three-stage algorithm for filtering erroneous Argos satellite locations. *Marine Mammal Science*, **19**(2): 371-383.
- Beauchesne, D., J. A. Jaeger et M.-H. St-Laurent, 2013. Disentangling woodland caribou movements in response to clearcuts and roads across temporal scales. *PLoS ONE*, **8**(11): e77514.
- Bergman, C. M., J. A. Schaefer et S. N. Luttich, 2000. Caribou movement as a correlated random walk. *Oecologia*, **123**(3): 364-374.
- Bolker, B. M., 2011. *Ecological models and data in R*. Princeton University Press
- Bowman, J. L., C. O. Kochanny, S. Demarais et B. D. Leopold, 2000. Evaluation of a GPS collar for white-tailed deer. *Wildlife Society Bulletin*, **28**(1): 141-145.
- Boyd, I. L., D. J. McCafferty, K. Reid, R. Taylor et T. R. Walker, 1998. Dispersal of male and female antarctic fur seals (*Arctocephalus gazella*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **55**(4): 845-852.
- Boyd, J. D. et D. J. Brightsmith, 2013. Error properties of Argos satellite telemetry locations using least squares and Kalman filtering. *PLoS ONE*, **8**(5): e63051.
- Bradshaw, C. J. A., D. W. Sims et G. C. Hays, 2007. Measurement error causes scale-dependent threshold erosion of biological signals in animal movement data. *Ecological Applications*, **17**(2): 628-638.
- Breed, G. A., D. P. Costa, I. D. Jonsen, P. W. Robinson et J. Mills-Flemming, 2012. State-space methods for more completely capturing behavioral dynamics from animal tracks. *Ecological Modelling*, **235**: 49-58.
- Britten, M. W., P. L. Kennedy et S. Ambrose, 1999. Performance and accuracy evaluation of small satellite transmitters. *Journal of Wildlife Management*, **63**(4): 1349-1358.
- Burns, J. M. et M. A. Castellini, 1998. Dive data from satellite tags and time-depth recorders: A comparison in Weddell seal pups. *Marine Mammal Science*, **14**(4): 750-764.
- Cargnelutti, B., A. Coulon, A. J. M. Hewison, M. Goulard, J. M. Angibault et N. Morellet, 2007. Testing Global Positioning System performance for wildlife monitoring using mobile collars and known reference points. *Journal of Wildlife Management*, **71**(4): 1380-1387.
- Costa, D. P., P. W. Robinson, J. P. Y. Arnould, A. L. Harrison, S. E. Simmons, J. L. Hassrick, A. J. Hoskins, S. P. Kirkman, H. Oosthuizen, S. Villegas-Amtmann et D. E. Crocker, 2010. Accuracy of ARGOS locations of pinnipeds at-sea estimated using fastloc GPS. *PLoS ONE*, **5**(1).

- DeCesare, N. J., J. R. Squires et J. A. Kolbe, 2005. Effect of forest canopy on GPS-based movement data. *Wildlife Society Bulletin*, **33**(3): 935-941.
- Deutsch, C. J., R. K. Bonde et J. P. Reid, 1998. Radio-tracking manatees from land and space: tag design, implementation, and lessons learned from long-term study. *Marine Technology Society Journal*, **32**(1): 18-29.
- Dowd, M. et R. Joy, 2011. Estimating behavioral parameters in animal movement models using a state-augmented particle filter. *Ecology*, **92**(3): 568-575.
- Dubinin, M., A. Lushchekina et V. C. Radeloff, 2010. Performance and accuracy of Argos transmitters for wildlife monitoring in Southern Russia. *European Journal of Wildlife Research*, **56**(3): 459-463.
- Freitas, C., C. Lydersen, M. A. Fedak et K. M. Kovacs, 2008. A simple new algorithm to filter marine mammal Argos locations. *Marine Mammal Science*, **24**(2): 315-325.
- Georges, J. Y., C. Guinet, P. Jouventin et H. Weimerskirch, 1997. Satellite tracking of seabirds: interpretation of activity pattern from the frequency of satellite locations. *Ibis*, **139**(2): 403-405.
- Grueter, C., D. Li, B. Ren et F. Wei, 2009. Choice of analytical method can have dramatic effects on primate home range estimates. *Primates*, **50**(1): 81-84.
- Harris, R. B., 1990. Tracking wildlife by satellite: current systems and performance. Fish and Wildlife technical report.
- Harris, S., W. J. Cresswell, P. G. Forde, W. J. Trewhella, T. Woollard et S. Wray, 1990. Home-range analysis using radio-tracking data - a review of problems and techniques particularly as applied to the study of mammals. *Mammal Review*, **20**(2-3): 97-123.
- Hays, G. C., S. Åkesson, B. J. Godley, P. Luschi et P. Santidrian, 2001. The implications of location accuracy for the interpretation of satellite-tracking data. *Animal Behaviour*, **61**(5): 1035-1040.
- Hazel, J., 2009. Evaluation of fast-acquisition GPS in stationary tests and fine-scale tracking of green turtles. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **374**(1): 58-68.
- Hebblewhite, M. et D. T. Haydon, 2010. Distinguishing technology from biology: A critical review of the use of GPS telemetry data in ecology. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **365**(1550): 2303-2312.
- Hebblewhite, M., M. Percy et E. H. Merrill, 2007. Are all global positioning system collars created equal? Correcting habitat-induced bias using three brands in the Central Canadian Rockies. *Journal of Wildlife Management*, **71**(6): 2026-2033.
- Hemson, G., P. Johnson, A. South, R. Kenward, R. Ripley et D. Macdonald, 2005. Are kernels the mustard? Data from global positioning system (GPS) collars suggests problems for kernel home-range analyses with least-squares cross-validation. *Journal of Animal Ecology*, **74**(3): 455-463.
- Hoenner, X., S. D. Whiting, M. A. Hindell et C. R. McMahon, 2012. Enhancing the use of argos satellite data for home range and long distance migration studies of marine animals. *PLoS ONE*, **7**(7).

- Ionides, E. L., C. Breto et A. A. King, 2006. Inference for nonlinear dynamical systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **103**(49): 18438-18443.
- Jiang, Z., M. Sugita, M. Kitahara, S. Takatsuki, T. Goto et Y. Yoshida, 2008. Effects of habitat feature, antenna position, movement, and fix interval on GPS radio collar performance in Mount Fuji, central Japan. *Ecological Research*, **23**(3): 581-588.
- Jonsen, I. D., R. A. Myers et J. M. Flemming, 2003. Meta-analysis of animal movement using state-space models. *Ecology*, **84**(11): 3055-3063.
- Jonsen, I. D., J. M. Flemming et R. A. Myers, 2005. Robust state-space modeling of animal movement data. *Ecology*, **86**(11): 2874-2880.
- Jonsen, I. D., R. A. Myers et M. C. James, 2007. Identifying leatherback turtle foraging behaviour from satellite telemetry using a switching state-space model. *Marine Ecology Progress Series*, **337**: 255-264.
- Jonsen, I. D., M. Basson, S. Bestley, M. V. Bravington, T. A. Patterson, M. W. Pedersen, R. Thomson, U. H. Thygesen et S. J. Wotherspoon, 2012. State-space models for bio-loggers: A methodological road map. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*(0).
- Kaczensky, P., T. Y. Ito et C. Walzer, 2010. Satellite telemetry of large mammals in Mongolia: What expectations should we have for collar function? *Wildlife Biology in Practice*, **6**(2): 108-126.
- Keating, K. A., 1994. An alternative index of satellite telemetry location error. *Journal of Wildlife Management*, **58**(3): 414-421.
- Keating, K. A., W. G. Brewster et C. H. Key, 1991. Satellite telemetry: performance of animal-tracking systems. *Journal of Wildlife Management*, **55**(1): 160-171.
- Le Boeuf, B. J., D. E. Crocker, D. P. Costa, S. B. Blackwell, P. M. Webb et D. S. Houser, 2000. Foraging ecology of northern elephant seals. *Ecological Monographs*, **70**(3): 353-382.
- Lowry, L. F., K. J. Frost, J. M. Ver Hoep et R. A. Delong, 2001. Movements of satellite-tagged subadult and adult harbor seals in Prince William Sound, Alaska. *Marine Mammal Science*, **17**(4): 835-861.
- McConnell, B. J., C. Chambers et M. A. Fedak, 1992. Foraging ecology of southern elephant seals in relation to the bathymetry and productivity of the Southern Ocean. *Antarctic Science*, **4**(4): 393-398.
- McKeown, A. et D. A. Westcott, 2012. Assessing the accuracy of small satellite transmitters on free-living flying-foxes. *Austral Ecology*, **37**(3): 295-301.
- Mellone, U., P. López-López, R. Limiñana et V. Urios, 2011. Weather conditions promote route flexibility during open ocean crossing in a long-distance migratory raptor. *International Journal of Biometeorology*, **55**(4): 463-468.
- Mills Flemming, J. E., C. A. Field, M. C. James, I. D. Jonsen et R. A. Myers, 2006. How well can animals navigate? Estimating the circle of confusion from tracking data. *Environmetrics*, **17**(4): 351-362.
- Nicholls, D. G. et C. J. R. Robertson, 2007. Validating locations from CLS:Argos satellite telemetry. *Notornis*, **54**(3): 121-136.

- Nicholls, D. G., C. J. R. Robertson et M. D. Murray, 2007. Measuring accuracy and precision for CLS: Argos satellite telemetry locations. *Notornis*, **54**(3): 137-157.
- Patterson, T. A., B. J. McConnell, M. A. Fedak, M. V. Bravington et M. A. Hindell, 2010. Using GPS data to evaluate the accuracy of state-space methods for correction of Argos satellite telemetry error. *Ecology*, **91**(1): 273-285.
- Pedersen, M. W., T. A. Patterson, U. H. Thygesen et H. Madsen, 2011. Estimating animal behavior and residency from movement data. *Oikos*, **120**(9): 1281-1290.
- Rettie, W. J. et F. Messier, 1998. Dynamics of woodland caribou populations at the southern limit of their range in Saskatchewan. *Canadian Journal of Zoology*, **76**(2): 251-259.
- Rettie, W. J. et F. Messier, 2000. Hierarchical habitat selection by woodland caribou: its relationship to limiting factors. *Ecography*, **23**(4): 466-478.
- Royer, F. et M. Lutcavage, 2008. Filtering and interpreting location errors in satellite telemetry of marine animals. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **359**(1): 1-10.
- Royer, F., J. M. Fromentin et P. Gaspar, 2005. A state-space model to derive bluefin tuna movement and habitat from archival tags. *Oikos*, **109**(3): 473-484.
- Sauder, J. D., J. L. Rachlow et M. M. Wiest, 2012. Influence of topography and canopy cover on argos satellite telemetry performance. *Wildlife Society Bulletin*, **36**(4): 813-819.
- Service Argos, 2011. Manuel utilisateur Argos. CLS, 63 p
- Smith, C. S., J. H. Epstein, A. C. Breed, R. K. Plowright, K. J. Olival, C. de Jong, P. Daszak et H. E. Field, 2011. Satellite telemetry and long-range bat movements. *PLoS ONE*, **6**(2).
- Soutullo, A., L. Cadahía, V. Urios, M. Ferrer et J. J. Negro, 2007. Accuracy of lightweight satellite telemetry: A case study in the Iberian Peninsula. *Journal of Wildlife Management*, **71**(3): 1010-1015.
- Stewart, B. S., S. Leatherwood, P. K. Yochem et M. Heide-Jorgensen, 1989. Harbor seal tracking and telemetry by satellite. *Marine Mammal Science*, **5**(4): 361-375.
- Tarroux, A., 2011. Utilisation de l'espace et des ressources chez un carnivore terrestre de l'arctique : le renard polaire. Université du Québec à Rimouski, 197 p.
- Tarroux, A., D. Berteaux et J. Bêty, 2010. Northern nomads: Ability for extensive movements in adult arctic foxes. *Polar Biology*, **33**(8): 1021-1026.
- Thompson, D., S. E. W. Moss et P. Lovell, 2003. Foraging behaviour of South American fur seals *Arctocephalus australis*: Extracting fine scale foraging behaviour from satellite tracks. *Marine Ecology Progress Series*, **260**: 285-296.
- Tougaard, J., J. Teilmann et S. Tougaard, 2008. Harbour seal spatial distribution estimated from Argos satellite telemetry: Overcoming positioning errors. *Endangered Species Research*, **4**(1-2): 113-122.
- Tremblay, Y., P. W. Robinson et D. P. Costa, 2009. A parsimonious approach to modeling animal movement data. *PLoS ONE*, **4**(3).
- Tremblay, Y., S. A. Shaffer, S. L. Fowler, C. E. Kuhn, B. I. McDonald, M. J. Weise, C.-A. Bost, H. Weimerskirch, D. E. Crocker, M. E. Goebel et D. P. Costa, 2006.

- Interpolation of animal tracking data in a fluid environment. *Journal of Experimental Biology*, **209**(1): 128-140.
- Vincent, C., B. J. McConnell, V. Ridoux et M. A. Fedak, 2002. Assessment of Argos location accuracy from satellite tags deployed on captive gray seals. *Marine Mammal Science*, **18**(1): 156-166.
- White, N. A. et M. Sjöberg, 2002. Accuracy of satellite positions from free-ranging grey seals using ARGOS. *Polar Biology*, **25**(8): 629-631.
- Witt, M. J., S. Åkesson, A. C. Broderick, M. S. Coyne, J. Ellick, A. Formia, G. C. Hays, P. Luschi, S. Stroud et B. J. Godley, 2010. Assessing accuracy and utility of satellite-tracking data using Argos-linked Fastloc-GPS. *Animal Behaviour*, **80**(3): 571-581.

