



HAL
open science

Évaluer le degré de mobilité des rennes paléolithiques à partir de l'étude ostéométrique de métacarpiens

Ana Belem Galán López, Sandrine Costamagno, Ariane Burke

► To cite this version:

Ana Belem Galán López, Sandrine Costamagno, Ariane Burke. Évaluer le degré de mobilité des rennes paléolithiques à partir de l'étude ostéométrique de métacarpiens : Intérêt de l'approche actualiste et des algorithmes d'apprentissage automatique. 41emes Rencontres Internationales d'Archéologie et d'Histoire - Biodiversités, environnements et sociétés depuis la Préhistoire : nouveaux marqueurs et approches intégrées, Oct 2021, Nice, France. hal-03377101

HAL Id: hal-03377101

<https://hal.science/hal-03377101>

Submitted on 14 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉVALUER LE DEGRÉ DE MOBILITÉ DES RENNES PALÉOLITHIQUES À PARTIR DE L'ÉTUDE OSTÉOMÉTRIQUE DE MÉTACARPIENS

intérêt de l'approche actualiste et des algorithmes
d'apprentissage automatique

Ana Belén Galán López^a, Sandrine Costamagno^a, Ariane Burke^b

Résumé

Le Renne (*Rangifer tarandus*) a joué un rôle important pour les populations humaines en Europe occidentale et centrale durant une grande partie de la période paléolithique. Dans le Sud-Ouest de la France (notamment au Magdalénien), le Renne figure fréquemment parmi les proies privilégiées des groupes de chasseurs-cueilleurs. Malgré les nombreuses tentatives de reconstitution du comportement migratoire des rennes paléolithiques, il n'existe pas de consensus quant à son degré de mobilité. Les données éthologiques modernes indiquent que les troupeaux de rennes adoptent différentes stratégies de mobilité en fonction du type d'habitat et de la topographie. Le projet Emorph vise à rechercher des critères morphométriques, en combinaison avec des techniques d'apprentissage automatique, permettant d'identifier l'étendue des migrations du Renne. Fondés sur l'étude de populations de caribous modernes aux comportements migratoires distincts, les résultats obtenus seront ensuite appliqués sur divers assemblages magdaléniens du Sud-Ouest de la France pour reconstruire la mobilité de ces rennes tardiglaciaires.

Mots clés

Renne, ostéométrie, mobilité, apprentissage automatique

Abstract

Paleolithic reindeer (*Rangifer tarandus*) played an important role in the life of human populations in western and central Europe during much of the Paleolithic period. In the South-West of France and in particular during the Magdalenian, reindeer frequently were the privileged prey of hunter-gatherer groups. However, and despite numerous attempts to reconstruct the migratory behavior of Paleolithic reindeer, there is no agreement on the range of movement of this prey. Modern ethnological data indicate that reindeer herds adopted different migration strategies depending on the type of habitat and the topography of the environment. Thus, the Emorph project aims to research morphometric criteria using cutting-edge methodologies, such as Machine Learning, to identify the extent of reindeer migrations. Based initially on the study of modern Caribou populations with distinct migratory behaviors, the results obtained could be applied to several Magdalenian assemblages from southwestern France in the future, with the goal of reconstructing the routes of these tardiglacial reindeer.

Keywords

Reindeer, Osteometry, Migration, Machine Learning

a. Laboratoire TRACES (UMR 5608 CNRS) ; Travaux et Recherches Archéologiques sur les Cultures, les Espaces et les Sociétés, Université Jean Jaurès, ; Maison de la Recherche, 5 allées Antonio Machado ; 31058 Toulouse, France.

b. Département d'anthropologie, Université de Montréal ; Pavillon Lionel-Groulx, 3150 Jean-Brillant ; H3T 1N8 Montréal, Canada.

INTRODUCTION

L'étude du Renne et de son rôle dans la subsistance des chasseurs-cueilleurs du Paléolithique supérieur (notamment la période magdalénienne) a donné lieu à une vaste littérature (BOUCHUD *et al.* 1953; BOUCHUD 1954; LACORRE 1956; BOUCHUD 1966; BAHN 1977; SPIESS 1979; WHITE 1980; DELPECH 1983; 1987; GORDON 1988a; 1988b; 1990; DEPLANO 1994; WEINSTOCK 2000a; 2000b; FONTANA 2000; ENLOE 2001; WELADJI *et al.* 2002; SORENSSEN *et al.* 2007; BANKS *et al.* 2008; MORIN 2008; KUNTZ, COSTAMAGNO 2011; KUNTZ 2011; COSTAMAGNO *et al.* 2015). Au Magdalénien, le Renne figure presque systématiquement dans les tableaux de chasse (KUNTZ, COSTAMAGNO 2011) et, dans certaines zones géographiques, il constitue la proie principale, voire quasi exclusive des groupes humains (COSTAMAGNO 1999; COSTAMAGNO *et al.* 2016). À l'échelle du Sud-Ouest de la France, il est chassé durant toute l'année (COSTAMAGNO 1999), mais, pour autant, les données de saisonnalité obtenues à une échelle plus locale témoignent d'une réalité complexe qu'il est encore difficile de décrypter (KUNTZ, COSTAMAGNO 2011; FONTANA 2000; 2017). Pourtant, cette question du degré de mobilité des rennes est primordiale pour comprendre les stratégies de chasse et la mobilité des groupes de chasseurs-cueilleurs dépendant peu ou prou de ce gibier (DRIVER 1990; HEARD 1997; COSTAMAGNO 1999; 2003; COSTAMAGNO *et al.* 2008; 2016; KUNTZ, COSTAMAGNO 2011; KUNTZ 2011).

Les rennes et les caribous actuels se caractérisent par des comportements migratoires diversifiés, depuis des populations pouvant migrer annuellement sur plusieurs milliers de kilomètres à des rennes quasi sédentaires (HUMMEL, RAY 2010). Dans le Sud-Ouest de la France, différents modèles migratoires ont ainsi été proposés concernant les rennes chassés par les Magdaléniens. La première hypothèse propose un modèle de suivi des troupeaux avec des rennes migrant sur de longues distances à travers l'Europe (LACORRE 1956; BAHN 1977; GORDON 1988a; 1988b; 1990). Dans ce cadre, dans le Sud-Ouest de la France, les mouvements des humains et des rennes auraient suivi un axe nord-sud, les plaines girondines, le Périgord et le Quercy étant occupés durant la mauvaise saison et les Pyrénées en été et en automne (LACORRE 1956; BAHN 1977; GORDON 1988a; 1988b; 1990). Les données saisonnières qui se sont multipliées depuis les années 1990 semblent indiquer l'absence de migrations de grande ampleur sur un axe nord-sud (KUNTZ 2011). Une seconde hypothèse, fondée sur des données ostéométriques et dentaires ainsi que sur des études de saisonnalité, suggère des migrations relativement courtes d'est en ouest (DELPECH 1983; 1987; KUNTZ, COSTAMAGNO 2011). En troisième lieu, d'autres auteurs, en se fondant sur les bois et les restes dentaires, proposent une présence à l'année

des troupeaux de rennes dans le Périgord (BOUCHUD *et al.* 1953; BOUCHUD 1954; DEPLANO 1994; FONTANA 2000; 2017; FONTANA, CHAUVIÈRE 2018). La possibilité que les comportements migratoires des rennes aient évolué à la fin du Tardiglaciaire en raison de la mise en place de conditions climatiques plus clémentes peu propices à cette espèce glaciaire a été avancée pour les Pyrénées où les derniers rennes auraient pu effectuer des migrations altitudinales (DELPECH 1983; 1987; COSTAMAGNO *et al.* 2016).

Les données éthologiques modernes indiquent que les populations de rennes adoptent différentes stratégies de mobilité en lien avec le type d'habitat qu'ils occupent. Ainsi, les migrations sur de longues distances ont tendance à avoir lieu dans les habitats ouverts de la toundra et des steppes (MILLER 1990; SCHAEFER *et al.* 2000; GODDARD 2009; SEIP 2010), tandis que les animaux vivant dans ou à proximité de la forêt ont tendance à parcourir des distances plus courtes par rapport à leurs homologues de toundra (THOMAS, GRAY 2002). L'écomorphologie, qui étudie la relation entre les adaptations morphologiques des organismes et l'environnement (WAINWRIGHT 1991), semble donc particulièrement adaptée à nos questionnements. Dans le cadre de cette étude, nous proposons donc la mise en œuvre d'une approche actualiste dans une perspective écomorphologique. Cette démarche est largement utilisée pour interpréter le passé (*e.g.*, YELLEN 1977; GIFFORD-GONZALEZ 1989; GALLAY 2007). Plusieurs études fondées sur le principe d'actualisme ont démontré avec succès comment il est possible d'étudier et d'interpréter les différences écomorphologiques d'un taxon dans le passé, même si celles-ci sont différentes de celles de leurs descendants modernes (PLUMMER, BISHOP 1994; BISHOP 1999; DEGUSTA, VRBA 2003; BIGNON *et al.* 2005; VAN ASPEREN 2010; CURRAN 2009; 2012; KAPPELMAN 1988; 1991; KAPPELMAN *et al.* 1997; SCOTT *et al.* 1999).

Les analyses ostéométriques sur la base de mesures linéaires sont courantes en contexte archéologique. Elles ont été utilisées pour identifier le sexe (MUNRO *et al.* 2011; DAVIS 1987; 1985; 2000; WEINSTOCK 2000; ZEDER 2011; GALÁN LÓPEZ, DOMÍNGUEZ-RODRIGO 2014; ARCEREDILLO *et al.* 2011; GREENFIELD 2002; DAVIS *et al.* 2012; BERTEAUX, GUINTARD 1995), différencier les taxons (PLUMMER, FRISCH 1986; CASTAÑOS *et al.* 2012; PUPUTTI, NISKANEN 2008) ou encore reconstruire les paléohabitats (DEGUSTA, VRBA 2002; 2003; 2005a; 2005b; KAPPELMAN *et al.* 1997; PLUMMER, BISHOP 1994; PLUMMER *et al.* 2008; BISHOP 1994; KAPPELMAN 1988; KOVAROVIC 2004; KOVAROVIC, ANDREWS 2007; SPENCER 1997; VAN ASPEREN 2010). Pour le Renne, WEINSTOCK (2000) a utilisé l'analyse ostéométrique pour identifier le sexe des rennes et reconstruire des stratégies de chasse; DELPECH (1983) et KUNTZ (2011) ont réalisé des analyses ostéométriques pour reconstruire les modèles de mobilité des rennes.

L'objectif de la présente étude est de tester s'il est possible d'identifier le degré de mobilité des caribous actuels à partir de l'analyse des mesures linéaires des métacarpiens. Ce premier résultat sera ultérieurement complété par l'étude ostéométrique des métatarsiens et des phalanges et l'étude de la section transversale de ces os à travers la morphométrie géométrique et les propriétés de la section transversale. L'objectif *in fine* est de proposer un référentiel pouvant être appliqué au matériel issu des sites archéologiques.

Les caribous du Canada

Actuellement, au Canada, d'où proviennent tous les échantillons de l'étude, trois grands écotypes – une population ou un groupe de populations adapté à un ensemble particulier de conditions environnementales (COSEPAC 2011) – sont reconnus : écotype de toundra, de forêt boréale et de montagne (SEIP 2010). Le caribou de Peary est souvent considéré comme un écotype particulier, différent de celui de la toundra (TAILLON 2013) (fig. 1).

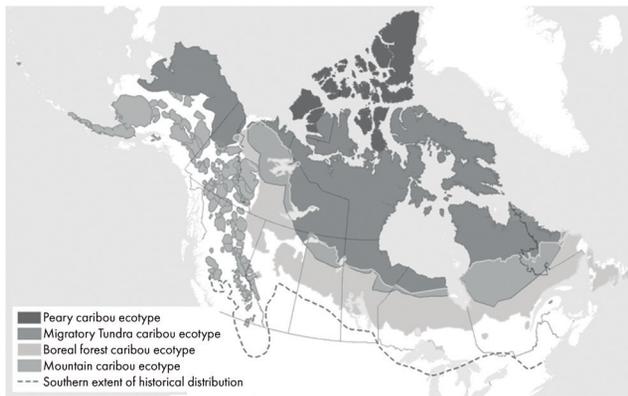


Fig. 1. Distribution des principaux écotypes au Canada (FESTA-BIANCHET *et al.* 2011).

Les biologistes distinguent généralement deux types de mobilité : migratoire et sédentaire (FESTA, BIANCHET *et al.* 2011). Les rennes migrants parcourent plus de 200 km tandis que ceux considérés comme sédentaires se déplacent sur des distances inférieures à 200 km (WITTMER *et al.* 2006). Cette définition est très éloignée de ce que l'on entend par renne sédentaire en contexte archéologique.

Il existe quatre sous-espèces de *Rangifer tarandus* qui sont décrites ci-dessous :

Le caribou de toundra (*Rangifer tarandus groenlandicus* et *R. t. granti*) est le Caribou par excellence (GUNN 2010). Il constitue de grands troupeaux pouvant réunir plusieurs centaines de milliers d'individus. Son aire de répartition s'étend de l'Alaska à l'ouest du Groenland et est continue dans tout le Nord de la partie continentale du Canada

(COSEPAC 2016), du Nord-Ouest du Yukon à l'île de Baffin. Ces caribous entreprennent des migrations annuelles sur de très longues distances, entre 800 et plus de 5 000 kilomètres, selon le troupeau et l'année (FANCY *et al.* 1988; FERGUSON, MESSIER 2000; SAHER 2005; COSEPAC 2016; JOLY 2019). Ils alternent entre la toundra (au printemps), où ils restent jusqu'à l'automne, et la forêt boréale en hiver.

Le caribou de Peary (*Rangifer tarandus pearyi*) est endémique dans l'archipel arctique canadien (à l'exception de l'île de Baffin). Il est génétiquement distinct des autres caribous du Canada (COSEPAC 2015). Son habitat est la toundra arctique sans arbre (GUNN 2010; BERGERUD 2000; TAILLON 2013; GEIST 1998). Les migrations saisonnières se produisent souvent entre les îles, ce caribou traversant la mer englacée en hiver (MILLER, GUNN, 1978; MILLER 1990; 2002; COSEPAC 2011; JENKINS *et al.* 2011). Les déplacements du caribou de Peary sont plus faibles que ceux du caribou de la toundra, avec des migrations saisonnières pouvant néanmoins s'étendre sur près de 500 km (GEIST 1998; MILLER 1991). Ces caribous peuvent passer la totalité de leur cycle annuel sur une seule île ou se déplacer entre deux ou plusieurs îles.

Dans la sous-espèce de Caribou *Rangifer tarandus caribou*, il est possible de distinguer trois grands groupes avec des comportements différents concernant la mobilité et l'utilisation et la répartition de l'habitat :

Le caribou de la forêt boréale ou le caribou des bois (*R. t. caribou*) est distinct génétiquement, géographiquement, comportementalement et morphologiquement du caribou de la toundra. Il vit toute l'année en petits groupes au sud de la limite forestière et il habite les forêts boréales et ouvertes de la taïga. Contrairement aux caribous qui habitent la toundra (c'est-à-dire *Rangifer tarandus groenlandicus*), les déplacements du caribou de la forêt boréale entre les aires d'été et d'hiver sont courts (NUTTAL 2005; MILLER 2003), entre 80 et 100 km (SEIP 2010; SCHAEFER 2010; THOMAS, GRAY 2002) ou entre 50 et 150 kilomètres (MALLORY, HILLIS 1998) selon la population de caribous.

Le caribou des bois migrateur (*R. t. caribou*) est constitué du troupeau de la rivière George et du troupeau de la rivière aux Feuilles. Il est présent dans la toundra ouverte et les habitats boréaux du Nord du Labrador et du Québec (COSEPAC 2017). Bien qu'ils appartiennent à la sous-espèce du caribou des bois, ces troupeaux se comportent comme le caribou de la toundra (*R. t. granti* et *groenlandicus*) et effectuent de longues migrations entre le Nord du Québec et le Sud du Labrador vers la forêt boréale du Québec en hiver (COSEPAC 2011; 2017), avec des distances comprises entre 1 120 et 1 770 kilomètres en moyenne par an (LEBLOND *et al.* 2016).

Le caribou montagnard (*R. t. caribou*) occupe la forêt mature montagnaise et a tendance à vèler en hautes

altitudes. Principalement présentes en Alberta et en Colombie-Britannique, les populations entreprennent des migrations altitudinales le plus souvent au printemps et à l'automne (STUART-SMITH *et al.* 1997; EDMONDS 1988; SAHER 2005; HEGEL, RUSSEL 2013; WEAVER 2006; CAVEDON *et al.* 2019), mais certaines peuvent effectuer quatre migrations par an. De manière générale, ces caribous parcourent des distances relativement courtes (COSEPAC 2017). Certaines populations parcourent des distances très faibles, de 10 à 40 kilomètres jusqu'aux sites de mise bas (WEAVER 2006), tandis d'autres qui vèlent à des altitudes plus élevées peuvent parcourir jusqu'à 200 kilomètres entre les aires de répartition saisonnières (COSEPAC 2011).

En ce qui concerne les adaptations pour la locomotion, le caribou (*Rangifer tarandus*) a de longs sabots, ce qui facilite la marche dans la neige, et ceux-ci sont plus larges que longs et courbés vers l'intérieur (TAILLON 2013). Les caribous sont bien adaptés à la marche en raison des migrations, mais aussi à l'escalade, car ils peuvent gravir des falaises, des parois abruptes de neige dure et traverser des champs de neige glaciaires (MILLER 1990). Ce sont aussi d'excellents nageurs (en particulier les caribous des montagnes et de la toundra) capables de traverser rivières et lacs (TAILLON 2013).

CORPUS D'ÉTUDE ET MÉTHODE

Les 54 métacarpiens pris en compte dans l'étude proviennent de 54 rennes issus des 4 écotypes précédemment cités : 16 de l'écotype Peary Caribou, 20 de la toundra, 6 de la forêt boréale et 12 de la montagne. Au sein de ces écotypes, 41 individus sont issus de populations migratrices (distances parcourues supérieures à 200 km) et 13 individus de populations sédentaires (distances parcourues inférieures à 200 km). Le métacarpien a été sélectionné, car des études morphométriques ont montré la forte corrélation entre la morphologie de cet élément squelettique et la taille corporelle, le comportement locomoteur ou encore le type d'habitat (SCOTT 1985; PURDUE 1987; PLUMMER, BISHOP 1994; SCOTT 2004; REESE 2015). Par ailleurs, malgré un état de conservation variable, cet ossement est relativement abondant dans les sites préhistoriques du Pléistocène moyen et supérieur d'Europe occidentale, et notamment au cours du Paléolithique supérieur.

Malheureusement, les caribous sédentaires sont en voie de disparition, ce qui a rendu plus difficile l'acquisition d'un plus grand nombre d'individus. Des biologistes de la Direction générale de la faune de la Colombie-Britannique ont fourni les échantillons de caribou des montagnes et des renseignements sur les troupeaux (type de troupeau, sexe, aire géographique occupée). Les spécimens de caribou de Peary, de toundra et de caribou Granti proviennent du Musée canadien de la nature

(Ottawa), qui possède l'une des plus grandes collections de squelettes de caribous. Certains spécimens de caribous de forêt ont été obtenus grâce aux biologistes de la Direction des forêts et de la faune du gouvernement du Québec, tandis que d'autres proviennent du laboratoire de préhistoire et de bioarchéologie de l'université Laval ainsi que de l'ostéothèque de l'université de Montréal. Les informations connues sur la population d'origine de chaque spécimen, en particulier l'étendue des migrations lorsqu'elle était connue, ont été notées. Lorsque cette donnée était absente, nous nous sommes référés aux données des biologistes (BERGERUD *et al.* 2008; COSEPAC 2002; 2004; 2011; 2015; 2016; 2017; CUMMING, BEANGE 1987; FANCY *et al.* 1987; FESTA-BIANCHET *et al.* 2011; GUNN 2010; HUMMEL, RAY 2010; JENKINS *et al.* 2011; JOLY *et al.* 2019; MALLORY, HILLIS 1998; MILLET 2002; SAHER *et al.* 2005; SEIP, McLELLAN 2010; WEAVER 2006; WITTMER *et al.* 2006).

Les mesures des métacarpiens ont été réalisées à l'aide d'un pied à coulisse numérique en suivant principalement VON DEN DRIESCH (1976) et KLEIN *et al.* (2010) (tabl. 1 et fig. 2).

Mesure	Description
Gl	Longueur maximale du métacarpien
Bp	Diamètre transversal maximal de l'extrémité proximale
Dp	Diamètre antéro-postérieur maximal de l'extrémité proximale
SD	Diamètre transversal minimal de la diaphyse
Bd	Diamètre transversal maximal de l'extrémité distale
Dd	Diamètre antéro-postérieur maximal de l'extrémité distale
TMLMIN	Diamètre transversal de la poulie articulaire médiale

Tab. 1. Description des mesures prises sur les métacarpiens.

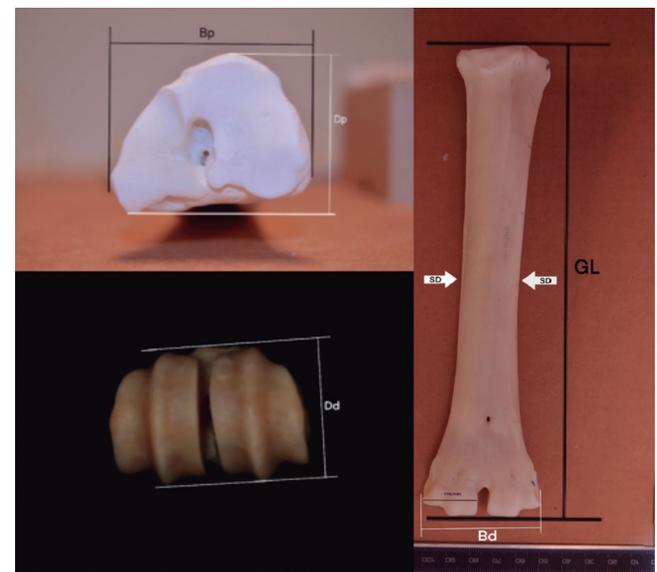


Fig. 2. Mesures prises sur les métacarpiens.

Le logiciel RStudio 1.3.1093 (www.r-project.org) a été utilisé pour effectuer des analyses exploratoires (en utilisant le package tidyverse) et prédictives et classificatoires (test de blending). Les variables ont été standardisées avant l'analyse. Dans l'analyse exploratoire, la normalité multivariée (valeur $p = 0,13$) a été testée à l'aide du test de Mardia, et la distribution de chaque groupe en fonction de l'habitat, de la mobilité ou encore des sous-espèces a été testée.

Une première Manova a été réalisée en tenant compte de l'ensemble des mesures prises sur le métacarpien afin de déterminer le poids de chaque catégorie (mobilité, habitat, sous-espèce) sur la distribution des données. Une seconde Manova a été réalisée avec les seules mesures distales pour tester aussi les différences entre les catégories, les extrémités distales étant relativement fréquentes dans les sites archéologiques. Finalement, une analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée pour terminer l'exploration des données pour reconnaître les modèles de comportement présents dans les données et examiner le poids des variables.

Une fois que nous avons pu vérifier que le modèle de mobilité était un bon prédicteur (et écarter les variables habitat et sous-espèce des analyses suivantes), quatre algorithmes d'apprentissage automatique, ont été utilisés sur le corpus d'étude (blending, stacking, Extreme Gradient Boosting Tree et neural network). Ces techniques ont été récemment appliquées en contexte archéologique et ont montré leur grande utilité et leur précision par rapport aux méthodes plus traditionnelles (ARRIAZA *et al.* 2016; LEFEBVRE *et al.* 2016; EGELAND *et al.* 2018; DOMÍNGUEZ-RODRIGO *et al.* 2020). Lors de l'application des algorithmes, les modèles ont été réglés avec des méthodes d'autocorrection, permettant l'amélioration des prédictions au fil de l'apprentissage. C'est l'un des grands avantages des tests d'apprentissage automatique. Lors de l'élaboration du modèle, plusieurs techniques (*e.g.*, validation croisée généralisée, k-fold validation croisée, validation croisée leave-one-out, bootstrapping) permettent d'estimer les performances du modèle sur de nouveaux jeux de données. Différents types d'algorithmes ont été comparés pour tester leur efficacité et leur degré de précision (KUHN, JOHNSON 2013). Les bibliothèques « Caret », « CaretEnsemble », « gbm », « xgboost » pour les méthodes ensemblistes (algorithmes blending, stacking, Extreme Gradient Boosting Tree), et « neuralnet » pour l'algorithmes de « neural network » (www.r-project.org) ont été utilisées.

Les méthodes ensemblistes (blending et stacking) sont des techniques d'apprentissage automatique qui combinent plusieurs modèles de base afin de produire un modèle prédictif optimal et d'améliorer les performances globales du modèle. L'idée de l'apprentissage ensembliste est de construire un modèle de prédiction en combinant les atouts d'une collection de modèles de base plus simples (TREVOR *et al.* 2008). Ce type de méthodes est conçu pour améliorer la

précision des algorithmes d'apprentissage automatique. Ils ont été privilégiés en raison de la petite taille de l'échantillon, afin de trouver la meilleure façon de prédire les données d'apprentissage et de réduire tout biais. Les algorithmes ensemblistes de blending et stacking que nous avons utilisés comprennent cinq modèles : Linear Discriminant Analysis (lda), Extreme Gradient Boosted Tree (xgbTree), Random Forests (rf), Support Vector Machines (svmRadial) and Gradient Boosting (glmboost).

L'algorithmes « Extreme Gradient Boosting Tree », qui peut également être considéré comme ensembliste, a été utilisé comme algorithmes indépendant. Il est construit à partir de modèles d'arbres de décision. Les arbres sont ajoutés un par un à l'ensemble et ajustés pour corriger les erreurs de prédiction faites par les modèles précédents (BROWLEE 2016).

Les algorithmes de réseaux neuronaux ou « neural network » sont un moyen de faire de l'apprentissage automatique, dans lequel un ordinateur apprend à effectuer une tâche en analysant des échantillons d'apprentissage qui sont étiquetés et connus à l'avance (JAMES *et al.* 2017). Ils fonctionnent de la même manière que les réseaux neuronaux du cerveau humain.

Durant la phase d'apprentissage au cours de laquelle le modèle est construit, 60 % de l'échantillon est pris au hasard en tenant compte de la proportion de toutes les classes. Le modèle est ensuite évalué avec les 40 % restants. Le processus d'apprentissage a été évalué par une validation croisée (10-folds, qui consiste en un partitionnement de l'échantillon d'origine en 10 ensembles de taille similaire) répétée trois fois durant la phase d'apprentissage.

Les performances du modèle ont été évaluées sur la base de différents paramètres : « Kappa », « Sentivity », « Specificity », « Balanced accuracy ». « Kappa » tient compte de la possibilité d'une prédiction correcte par le seul hasard. Les valeurs Kappa sont comprises entre 1 (accord parfait entre les prédictions du modèle et les valeurs vraies) à -1 (accord imparfait). Ainsi, les valeurs kappa de 0,3 à 0,6 montrent une concordance raisonnable. Les valeurs supérieures à 0,6 indiquent un accord élevé entre la prédiction et la réalité. Les paramètres « Sentivity » et « Specificity » précisent respectivement la probabilité d'une prédiction positive ou d'une prédiction négative dans un cas positif ou un cas négatif. Des valeurs élevées indiquent un faible taux d'erreur et donc un modèle statistiquement puissant. La « Balanced accuracy », qui combine mesures de « Sentivity » et de « Specificity », est utilisée pour évaluer la qualité prédictive de la classification, en particulier lorsque les effectifs des différentes classes testées sont déséquilibrés (CLARK 2013).

Plusieurs analyses ont été réalisées, l'une utilisant toutes les variables et les deux autres utilisant uniquement des variables distales ou proximales afin de tenir compte de la forte fragmentation des ossements en contexte archéologique.

RÉSULTATS

Comment cela peut être observé dans le graphe d'analyse exploratoire (fig. 3), GL et SD (tab. 1) ne sont pas fortement corrélées, mais alors que GL (corrélée avec toutes les mesures) sépare assez bien les sous-espèces, SD n'est pas une bonne discriminante entre les prédicteurs. Le diamètre antéro-postérieur de l'extrémité distale (Dd) est l'une des meilleures variables permettant de discriminer le patron migratoire, c'est quelque chose de très positif du fait de la forte fragmentation des ossements de renne archéologique (fig. 2). Discriminer l'habitat sur la base de ces données apparaît problématique, car il y a un fort recouvrement entre écotype de forêt et écotype de montagne.

Les résultats de la Manova tenant compte de l'ensemble des variables montrent que la mobilité et les sous-espèces présentent des valeurs statistiquement significatives ($p = 9,941 \times 10^{-7}$

et $1,310 \times 10^{-13}$ respectivement) ce qui n'est pas le cas de l'habitat ($p = 0,4852$). La Manova réalisée uniquement avec les variables distales montre que les différences de mobilité ($p = 0,000249$) sont plus importantes que l'habitat ($p = 0,001324$), mais les deux sont statistiquement significatives.

Pour terminer l'analyse exploratoire, une analyse en composante principale (fig. 4) a été réalisée pour observer la distribution des données. Les deux premiers axes expriment 92,4 % de la variance, avec 86,5 % pour le premier et 5,9 % pour le deuxième. Les variables qui contribuent le plus sur les axes sont : Bp (diamètre transversal maximal de l'extrémité proximale), SD (diamètre transversal minimal de la diaphyse), et Bd (diamètre transversal maximal de l'extrémité distale) avec des parties distales plus larges dans le cas du groupe sédentaire. Si l'on observe le patron migratoire, les individus considérés comme sédentaires sont séparés des individus migrants.

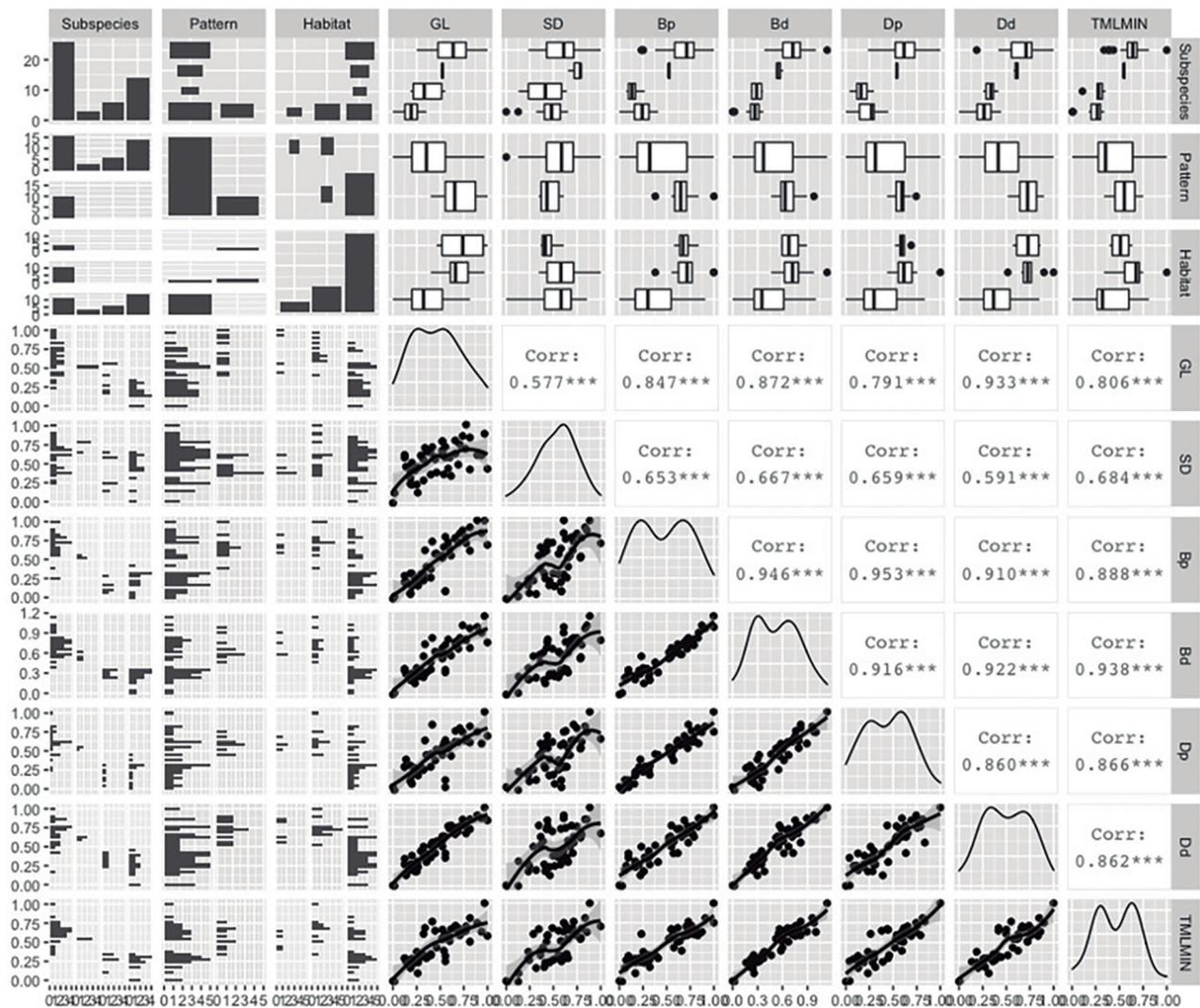


Fig. 3. Analyse exploratoire des données correspondant aux catégories de sous-espèces, de mobilité et d'habitat pour les sept variables décrites (cf. tab. 1 pour les légendes, descripteurs: subspecies: sous-espèce, Pattern: mobilité, Habitat: habitat).

Ils se caractérisent par des métapodes qui sont plus courts et plus graciles avec un condyle distal plus étroit.

Nos analyses ayant montré que la morphologie des métacarpiens est en partie tributaire du degré de mobilité des individus, nous avons utilisé différents algorithmes afin de classer de manière prédictive les individus migrants et sédentaires. L'introduction innovante de l'apprentissage automatique dans la classification des individus permet d'éviter les biais inhérents aux limites imposées par la subjectivité. C'est donc un outil puissant pour la construction de modèles de classification. Par ailleurs, les algorithmes d'apprentissage automatique utilisés ne nécessitent pas de transformation des données pour gérer la normalité, l'asymétrie ou la colinéarité, facilitant leur utilisation.

Le tableau 2 synthétise le degré de précision de la classification selon le type d'algorithme utilisé.

La classification utilisant toutes les variables selon l'algorithme « Stacking » donne une précision de 0,904 en utilisant les cinq modèles précisés dans la méthode. Plus de 90 % de l'échantillon de validation est donc correctement classé avec une précision équilibrée de 93 % (Balanced accuracy).

Pour les mesures de l'extrémité distale, deux algorithmes indépendants, des tests « Blending » (testé initialement avec les 5 modèles puis en tenant compte uniquement de lda, glmboost et xgbTree, SVMRadial et Random Forest diminuant la précision finale) et « Neural network », ont été utilisées, et permettent d'atteindre une précision de 90 %, dans les deux cas, pour l'échantillon de validation, qui renforce son résultat en étant obtenu par deux algorithmes fonctionnant différemment.

Dans le cas des mesures proximales, la meilleure performance a été obtenue par l'algorithme xgbTree, avec une

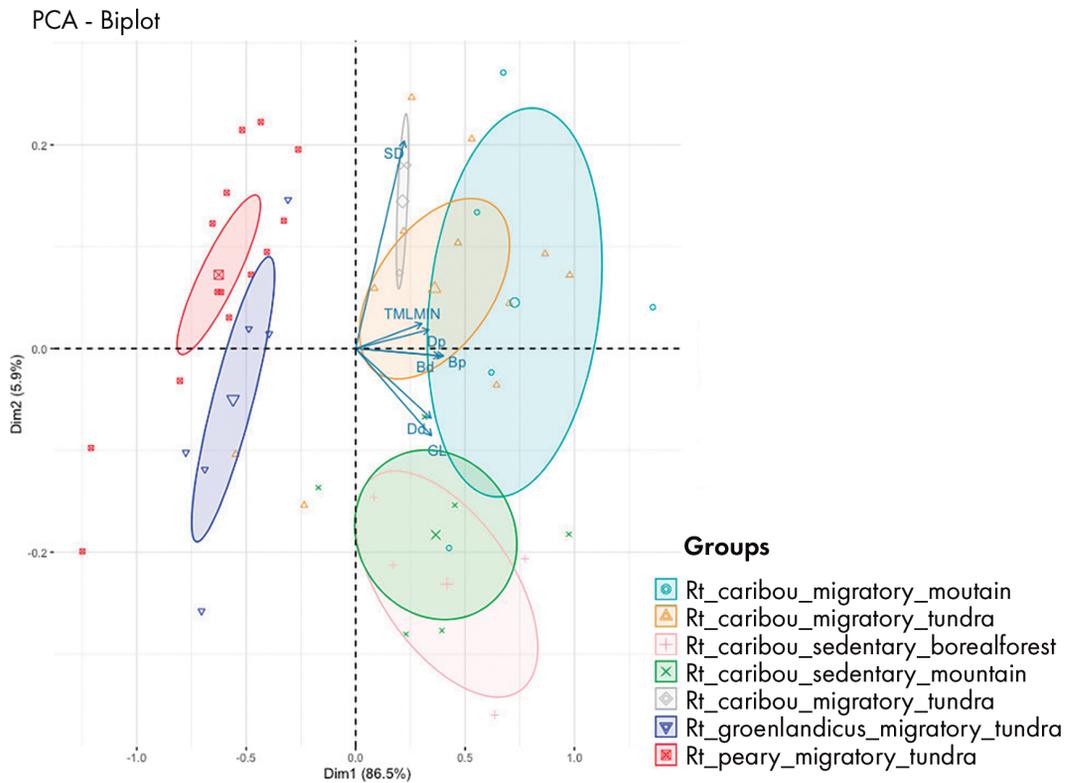


Fig. 4. Analyse en composantes principales. Les 7 groupes pris en compte tiennent compte de la sous-espèce, de l'habitat et de la mobilité. Avec la corrélation de variables et distribution des individus, montrant une séparation des groupes sédentaires des groupes migrants et comment, combien la plupart des variables, à l'exception du SD, contribue à la première composante.

Skeletal Part	Algorithm	Accuracy	Kappa	95 % CI	Sensitivity	Specificity	Balanced Accuracy
Métacarpien complet	Stacking	90,40%	0,76	0,69-0,98	0,87	1	0,93
Extrémité proximale	XgbTree	95,20%	0,85	0,76-0,99	1	0,8	0,9
Extrémité distale	Neural Network et Blending	90%	0,73	0,68-0,98	0,87	1	0,93

Tab. 2. Détails sur les performances des algorithmes d'apprentissage automatique selon le modèle de mobilité (migratoire/sédentaire) comme variable prédictive.

précision de 95,2 % (Balanced accuracy de 90 %) contre 80 % (Balanced accuracy de 87 %) obtenue par le Blending test utilisant trois modèles (xgbTree, rf, svmRadial).

Comme on peut le voir dans le tableau 2, la précision équilibrée est supérieure à 90 % dans les trois analyses (métacarpiens complets, extrémités distales, extrémités proximales). Ces valeurs hautes attestent de la précision des modèles malgré le caractère déséquilibré de l'échantillon (plus d'individus migrants que d'individus sédentaires).

CONCLUSION

Les études ostéométriques réalisées sur des métacarpiens issus de différentes populations de caribou actuels montrent qu'il est possible de distinguer les populations sédentaires des populations mobiles. Les individus sédentaires ont des métacarpiens plus longs et des extrémités distales plus larges que les individus migrants, tandis que les individus migrants sont plus graciles, résultat en accord avec d'autres études réalisées (COURTURIER *et al.* 2010). Au niveau des extrémités distales et proximales, la mobilité et, dans une moindre mesure, l'habitat apparaissent comme des facteurs expliquant les différences enregistrées.

La méthodologie de classification, élaborée de manière prédictive grâce à des algorithmes d'apprentissage automatique, montre qu'il est possible de classer les écotypes migrants et sédentaires avec une précision supérieure à 90 %, sur la seule base de la morphométrie des métacarpiens. Ce système de classification, réalisé avec plusieurs algorithmes d'apprentissage automatique, évite tout biais pouvant être produit dans l'analyse et offre donc un bon moyen pour différencier la mobilité des caribous en fonction de leurs caractéristiques anatomiques. Les algorithmes montrent également qu'il est possible de classer correctement plus de 90 % des échantillons en ne tenant compte que des mesures des extrémités proximales et distales. L'objectif *in fine* étant de proposer un référentiel pouvant être appliqué au matériel issu de sites archéologiques, ces résultats sont donc très encourageants. En effet, l'état souvent fragmentaire de la plupart des os dans les assemblages archéologiques ne devrait pas être un obstacle à la reconstruction du patron de mobilité des rennes fossiles.

Il est désormais nécessaire de tester ces méthodes, et notamment les algorithmes d'apprentissage automatique, sur des métacarpiens de *Rangifer tarandus* fossiles dans le but d'appréhender le type de mobilité des rennes en contexte paléolithique européen. En parallèle et en raison de la taille réduite du corpus, il s'agira de compléter cette étude par la prise en compte d'autres éléments squelettiques (métatarsiens, phalanges) issus de notre référentiel moderne.

REMERCIEMENTS

Ce projet a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne (Marie Skłodowska Curie Actions, convention n° 794 925). Nous remercions également Claire Saint-Germain (Ostéothèque de l'université de Montréal, Québec, Canada), Maeve Winchester (ministère des Forêts, des Terres, des Opérations de ressources naturelles et du développement rural de Colombie Britannique, Canada), Kamal Khidas (Musée canadien de la nature, Ottawa, Canada), Guillaume Gingras (Direction de la forêt et de la faune du Gouvernement du Québec, Canada) et James Woollett et Steeve Côté (Université Laval, Québec, Canada) qui nous ont fourni des échantillons de caribous pour mener à bien cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

- ARCEREDILLO D., GÓMEZ-OLIVENCIA A. & GARCÍA-PÉREZ A. 2011. « Three statistical methods for sex determination in extant and fossil carprines: assessment of the Rupicapra long bones ». *Journal of Archaeological Science*, 38: 2450-2460.
- ARRIAZA M. C. & DOMÍNGUEZ-RODRIGO M. 2016. « When felids and hominins ruled at Olduvai Gorge: a machine learning analysis of the non-anthropogenic sites of Bed I ». *Quaternary Science Reviews*, 139:43-52.
- BAHN P. G. 1977. « Seasonal migration in South-West France during the Late Glacial Period ». *Journal of Archaeological Science*, 4: 245-257.
- BANKS WE., ERRICO F. (D'), PETERSON A. T., KAGEYAMA M. & COLOMBEAU G. 2008. « Reconstructing ecological niches and geographic distributions of Rangifer tarandus and Cervus elaphus during the LGM ». *Quaternary Science Reviews*, 27: 2568-2575.
- BERGERUD A.T. 2000. « Caribou », in: DEMARIS S., KRAUSMAN P. R. (eds.), *Ecology and management of large mammals in North America*. New Jersey, Prentice-Hall: 658-693.
- BERGERUD A. T., CAMPS L. & LUTTICH S. N. 2008. *The return of caribou to Ungava*. Montreal. Ithaca: McGill-Queen's University Press.
- BERTEAUX D. & GUINTARD C. 1995. « Osteometric study of the metapodials of Amsterdam Island feral cattle ». *Acta Theriologica*, 40: 97-110.
- BIGNON O., BAYLAC M., VIGNE J. D. & EISENMANN V. 2005. « Geometric morphometrics and the population diversity of Late Glacial horses in Western Europe (*Equus caballus arcelini*): phylogeographic and anthropological implications ». *Journal of Archaeological Science*, 32: 375-391.
- BISHOP L. 1994. *Pigs and the ancestors: hominids, suids and environments during the Plio-Pleistocene of East Africa*. Ph. D. Dissertation, Yale University.
- BISHOP L. C. 1999. « Suid paleoecology and habitat preferences at African Pliocene and Pleistocene hominid localities », in: SCHRENK T. G. (ed.), *African Biogeography, Climate Change, & Human Evolution*. New York: Oxford University Press.
- BOUCHUD J., CHEYNIER A & GUILLIEN Y. 1953. « Dents de Renne et migrations ». *Bulletin de la Société préhistorique française*, 50: 127-132

- BOUCHUD J. 1954. « Dents de Rennes, Bois de Rennes et migrations ». *Bulletin de la Société préhistorique française*, 51 : 340-345
- BOUCHUD J. 1966. *Essai sur le renne et la climatologie du Paléolithique moyen et supérieur*. Périgueux : Imprimerie Magne.
- BROWNLEE J. 2016. *Machine Learning Mastery with R*. Melbourne : Machine Learning Mastery.
- CAVEDON M., GUBILI C., HEPPENHEIMER E., VON HOLDT B., MARIANI S., HEBBLEWHITE M., HEGEL T., HERVIEUX D., SERROUYA R., STEENWEGS R., WECKWORTH B. & MUSSIANI M. 2019. « Genomics, environment and balancing selection in behaviorally bimodal populations : The caribou case ». *Molecular Ecology*, 28 : 1946-1963.
- COSEPEC 2011. *Designatable Units for Caribou (Rangifer tarandus) in Canada*. Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada. Ottawa.
- COSEPEC 2015. *Assessment and Status Report on the Peary Caribou, Rangifer tarandus pearyi in Canada*. Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada. Ottawa.
- COSEPEC 2016. *Assessment and status report on the Caribou Rangifer tarandus, Barren-ground population, in Canada*. Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada. Ottawa.
- COSEPEC 2017. *Assessment and status report on the Caribou Rangifer tarandus, Eastern Migratory population and Torngat Mountains population, in Canada*. Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada. Ottawa.
- CASTAÑOS J. P., MURELAGA X., ALONSO-OLAZABAL A., ORTEGA L. A. & ZULUAGA M. C. 2012. « Osteometric Analysis of the Scapula and Humerus of Rangifer tarandus and Cervus elaphus : a Contribution to the Discrimination of Late Pleistocene Cervids ». *Acta Palaeontologica Polonica*, 59 (4) : 779-786
- CLARK M. 2013. *An Introduction to Machine Learning with applications in R*. Indiana : Centre for Social Research, University of Notre Dame.
- COSTAMAGNO S. 1999. *Stratégies de chasse et fonction des sites au Magdalénien dans le sud de la France*. Thèse de l'université Bordeaux I.
- COSTAMAGNO S. & MATEOS A. 2007. « Milieu animal de part et d'autre de la chaîne pyrénéenne : implication sur les modes de subsistance au Magdalénien », in : CAZALS N., GONZALEZ URQUIJO J., TERRADAS X. (éd.), *Frontières naturelles et frontières culturelles dans les Pyrénées préhistoriques*. Santander : 53-73.
- COSTAMAGNO S., BARSHAY-SZMIDT C., KUNTZ D., LAROULANDIE V., PÉTILLON J.-M., BOUDADI-MALIGNE M., LANGLAIS M., MAYLLE J.-B. & CHEVALLIER A. 2016. « Reexamining the timing of reindeer disappearance in southwestern France in the larger context of late glacial faunal turnover ». *Quaternary International*, 414 : 34-61.
- COURTURIER S., OTTO R., CÔTÉ S. D., LUTHER G. & MAHONEY S. P. 2010. « Body size variations in caribou ecotypes and relationships with demography ». *Journal of Wildlife Management*, 74 : 395-404.
- CUMMING H. G. & BEANGE D. B. 1987. « Dispersion and movements of woodland caribou near Lake Nipigon, Ontario ». *Journal of Wildlife Management*, 51 : 69-79.
- CURRAN S. C. 2009. *Homimid Paleoeology and cervid ecomorphology*. Ph. D. University of Minesota.
- CURRAN S. C. 2012. « Expanding ecomorphological methods : geometric morphometric analysis of Cervidae post-crania ». *Journal of Archaeological Science*, 39 : 1172-1182.
- DAVIS S. J. M. 1987. *The archaeology of animals*. London : Batsford.
- DAVIS S. J. M. 1985. « The large mammal bones », in : MAZAR A. (ed.), *Excavations at Tell Qasile 2*. Qedem 20, Jerusalem, Hebrew University.
- DAVIS S. J. M. 2000. « The Effect of Castration and Age on the Development of the Shetland Sheep Skeleton and a Metric Comparison Between Bones of Males, Females and Castrates ». *Journal of Archaeological Science*, 27 : 373-390.
- DAVIS S. J. M., SVENSSON E. M., ALBARELLA U., DETRY C., GÖTHERSTRÖM A., PIRES A. E. & GINJA D. 2012. « Molecular and osteometric sexing cattle metacarpals : a case of study from 15th century AD Beja, Portugal ». *Journal of Archaeological Science*, 39 : 1445-1454.
- DEGUSTA D. & VRBA E. 2003. « A method for inferring paleohabitats from the functional morphology of bovid astragali ». *Journal of Archaeological Science*, 30 : 1009-1022.
- DEGUSTA D., VRBA E. 2005a. « Methods for inferring paleohabitats from discrete traits of the bovid procranial skeleton ». *Journal of Archaeological Science*, 32 : 1115-1123.
- DEGUSTA D. & VRBA E. 2005b. « Methods for inferring paleohabitats from the functional morphology of bovid phalanges ». *Journal of Archaeological Science*, 32 : 1099-1113.
- DELPECH F. 1983. *Les faunes du Paléolithique supérieur dans le Sud-Ouest de la France*. Paris : Cahiers du Quaternaire 6.
- DELPECH F. 1989. L'environnement animal des Magdaléniens. In : OTTE M. (éd.), *Le Magdalénien en Europe* : 5-30. Actes du Colloque de Mayence, XI^e congrès U.I.S.P.P. Liège, ERAUL.
- DEPLANO S. 1994. *Étude de la faune des grands mammifères de la couche IX de L'ABRI du Flageolet 3, Dordogne. Approche taphonomique et paléontographique*. Mémoire de maîtrise en Préhistoire de l'université de Paris.
- DOMÍNGUEZ-RODRIGO M., CIFUENTES-ALCOBENDAS G., JIMÉNEZ-GARCÍA B., ABELLÁN N., PIZARRO-MONZO M., ORGANISTA E. & BAQUEDANO E. 2020. « Artificial intelligence provides greater accuracy of modern and ancient bone surface modifications ». *Scientific Reports*, 10 : 18862.
- DRIVER J. C. 1990. « Meat in due season : the timing of communal hunts », in : DAVIS L. B., REEVES B. O. (eds.), *Hunters of the recent past*. London : Routledge.
- EDMONDS E. 1988. « Population status, distribution, and movements of woodland caribou in west central Alberta ». *Canadian Journal of Zoology*, 66 : 817-826.
- EGELAND C. P., DOMÍNGUEZ-RODRIGO M., PICKERING T. R., MENTER C. G. & HEATON J. L. 2018. « Hominin skeletal part abundances and claims of deliberate disposal of corpses in the Middle Pleistocene ». *PNAS* 115 : 4601-4606.
- ENLOE J. G. 2001. « Seasonality, Strategy and Site Function : Reindeer Hunting at Verberie ». *Journal of Human Evolution*, 40, 3 : A7-A8.
- FANCY S. G. & WHITTEN K. R. 1987. « Energy expenditure for locomotion by barren-ground caribou ». *Canadian Journal of Zoology*, 65 : 122-128.
- FERGUSON M. A. D. & MESSIER F. 2000. « Traditional winter range : Population Dynamics and Physical Condition ». *The Journal of Wildlife Management*, 64 : 168-178.
- FESTA-BIANCHET M., RAY J. C., CÔTÉ S. D. & GUNN A. 2011. « Conservation of caribou (Rangifer tarandus) in Canada : an uncertain future ». *Canadian Journal of Zoology*, 89 : 419-434.

- FONTANA L. 2000. « La chasse au renne au Paléolithique supérieur : nouvelles voies de recherche ». *Paleo*, 12: 141-164
- FONTANA L. & CHAUVIÈRE F.-X. 2018. « Économie et nomadisme au Pléniglaciaire supérieur et au Tardiglaciaire en Europe de l'Ouest : le système renne », in: DJINDJIAN F. (éd.), *La préhistoire de la France*. Paris : Hermann Éditeurs, Histoire et Archéologie : 141-148.
- GALÁN LÓPEZ A. B. & DOMÍNGUEZ-RODRIGO M. 2014. « A biometric analysis of the pelvic acetabulum as an indicator of sex in bovids ». *Comptes rendus Palevol*, 13: 561-567.
- GALLAY A. 2007. *Pour une ethnoarchéologie théorique*. Paris : Errance.
- GEIST V. 1998. *Deer of the World: Their Evolution, Behavior and Ecology*. Mechanisburg : Stackpole Press.
- GIFFORD-GONZALEZ D. 1989. « Modern analogues : Developing an interpretative framework », in: BONNICHSEN R., SORG M. (eds.), *Bone modification*. Orono, Center for the Study of the First Americans: 179-246.
- GODDARD A. D. 2009. *Boreal caribou in Northeastern British Columbia*. Peace Region Technical Report: 1-27.
- GORDON B. C. 1988a. « Des Hommes et des Rennes dans la Préhistoire française magdalénienne : résultats ». *Archaeozoologia*, 2: 227-242.
- GORDON B. C. 1988b. *Of Men and Reindeer Herds in French Magdalenian Prehistory*. Oxford: Archaeopress, BAR International Series, vol. 390.
- GORDON B. C. 1990. « More on herd-following hypothesis ». *Current Anthropology*, 31: 399-400.
- GREENFIELD H. J. 2002. Sexing fragmentary Ungulate Acetabulae. In: RUSCILLO D. (ed.), *Recent Advances in Ageing and Sexing Animal Bones*: 68-86. Proceeding of the 9th ICAZ Conference. Durham. Oxford: Oxbow Press.
- GUNN A. 2010. « Migratory Tundra Caribou », in: HUMMEL M., RAY J. C. (eds.), *Caribou and the North: a shared future*. Toronto: Dundurn Press: 240-267.
- HEARD D. C. & VAGT K. L. 1998. « Caribou in British Columbia: a 1996 status report ». *Rangifer Special Issue*, 10: 117-123.
- HEGEL T. M. & RUSSEL K. 2013. « Status of northern mountain Caribou (*Rangifer tarandus caribou*) in Yukon, Canada ». *Rangifer*, 33: 59-70.
- HUMMEL M. & RAY J. C. 2010. *Caribou and the North: a shared future*. Toronto: Dundurn Press.
- JAMES G., WITTEN D., HASTIE T. & TIBSHIRANI R. 2017. *An Introduction to Statistical Learning with applications in R*. New York: Springer.
- JENKINS D., CAMPBELL M., HOPE G., GOORTS J. & MCLOUGHLIN P. 2011. « Recent trends in abundance of Peary Caribou (*Rangifer tarandus pearyi*) and Muskoxen (*Ovibos moschatus*) in the Canadian Arctic Archipelago, Nunavut ». *Wildlife Report no. 1*, Pond Inlet, Nunavut Department of Environment, Government of Nunavut.
- JOLY K., GURARIE E., SORUM M. S., KACZENSKY P., CAMERON M. D., JAKES A. F., BORG B. L., NANDINTSETSEG D., HOPCRAFT J. G., BUUVEIBAATAR B., JONES P. F., MUELLER T., WALZER C., OLSON K. A., PAYNE J. C., YADAMSUREN A. & HEBBLEWHITE M. 2019. « Longest terrestrial migrations and movements around the world ». *Scientific Reports*, 9: 15333
- KAPPELMAN J., PLUMMER T., BISHOP L., DUNCAN A. & APPLETON S. 1997. « Bovids as indicators of Plio-Pleistocene paleoenvironments in East Africa ». *Journal of Human Evolution*, 32: 229-256.
- KAPPELMAN J. 1988. « Morphology and locomotor adaptations of the bovid femur in relation to habitat ». *Journal of Morphology*, 198: 119-130.
- KLEIN R. G. & CRUZ-URIBE K. 1984. *The Analysis of Animal Bones from Archaeological Sites*. Chicago: The University of Chicago Press.
- KLEIN R. G., FRANCIGUS R. G. & STEELE T. E. 2010. « Morphometric identification of bovid metapodials to genus and implications for taxon-free habitat reconstruction ». *Journal of Archaeological Science*, 37: 389-401.
- KOVAROVIC K., 2004. *Bovids as palaeoenvironmental indicators. An ecomorphological analysis of bovid postcranial remains from Laetoli, Tanzania*. PhD diss., University of London.
- KOVAROVIC K. & ANDREWS P. 2007. « Bovid postcranial ecomorphological survey of the Laetoli paleoenvironments ». *Journal of Human Evolution*, 52: 663-680.
- KUHN M. & JOHNSON K. 2013. *Applied Predictive Modelling*. New York: Springer.
- KUNTZ D. & COSTAMAGNO S. 2011. « Relationships between reindeer and man in southwestern France during the Magdalenian ». *Quaternary Research*, 238: 12-24.
- KUNTZ D. 2011. *Ostéométrie et migration(s) du renne (Rangifer tarandus) dans le Sud-Ouest de la France au cours du dernier Pléniglaciaire et du Tardiglaciaire (21 500 – 13 000 cal. BP)*. Thèse de l'université de Toulouse le Mirail – Toulouse II.
- LACORRE F. 1956. « Les Migrations des rennes dans la Province préhistorique des Eyzies ». *Bulletin de la Société préhistorique française*, 53: 302-310.
- LEBLOND M., ST LAURENT M. H. & CÔTÉ S. D. 2016. « Caribou, water and ice-fine-scale movements of a migratory arctic ungulate in the context of climate change ». *Movement Ecology*, 4: 14.
- LEFEBVRE A., ROCHEFORT G. Y., SANTOS F., LE DENMAT D., SALMON B. & PÉTILLON J.-M. 2016. « A Non-Destructive Method for Distinguishing Reindeer Antler (*Rangifer tarandus*) from Red Deer Antler (*Cervus elaphus*) Using X-Ray Micro-Tomography Coupled with SVM Classifiers ». *PLoS ONE*, 11: E0149658.
- MALLORY F. F. & HILLIS T. L. 1998. « Demographic characteristics of circumpolar caribou populations: ecotypes, ecological constraints/releases, and population dynamics ». *Rangifer*: 9-60.
- MILLER F. L. & GUNN A., 1978. « Inter-island movements of Peary Caribou south of viscount Melville sound, Northwest Territories ». *Canadian Wildlife Service*, 92: 327-333.
- MILLER F. L. 1990. « Inter-island movements of Peary caribou: a review and appraisal of their ecological importance », in: HARRINGTON C. R. (ed.) *Canada's missing dimension: science and history in the Canadian Arctic Islands*. Ottawa, Ontario, Canadian Museum Nature, vol. 2: 608-632.
- MILLER F. L. 2002. « Multi-island seasonal home range use by two Peary Caribou, Canadian High Arctic Islands, Nunavut, 1993-94 ». *Arctic*, 55: 133-142.
- MORIN E. 2008. « Evidence for declines in human population densities during the early Upper Paleolithic in Western Europe ». *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105: 48-53.

- MUNTO N. D., BAR-OZ G. & MILL A. C. 2011. « An exploration of character traits and linear measurements for sexing mountain gazelle (*Gazella gazella*) skeletons ». *Journal of Archaeological Science*, 38: 1253-1265.
- NUTTAL M. 2004. *Encyclopedia of the Arctic*. New York: Routledge.
- PURDUE J. R. 1987. « Estimation of body weight of white-tailed deer (*Odocoileus virginianus*) from central Illinois ». *Journal of Ethnobiology*, 7: 1-12.
- PLUMMER T. W. & BISHOP L. C. 1994. « Hominid paleoecology at Olduvai Gorge, Tanzania, as indicated by antelope remains ». *Journal of Human Evolution*, 27: 47-75.
- PLUMMER T. W., BISHOP L. C. & HERTEL F. 2008. « Habitat preference of extant African bovids based on astragalus morphology: operationalizing ecomorphology for palaeoenvironmental reconstruction ». *Journal of Archaeological Science*, 35: 3016-3027.
- PRUMMEL W. & FRISCH H. J. 1986. « A guide for the distinction of species, sex, and body side in bones of sheep and goat ». *Journal of Archaeological Science*, 13: 567-577.
- PUPUTTI A. K. & NISKANEN M. 2008. « The estimation of body weight of the reindeer (*Rangifer tarandus* L.) from skeletal measurements: preliminary analyses and application to archaeological material from 17th and 18th century northern Finland ». *Environmental Archaeology*, 13: 153-164.
- REESE N. E. 2015. *The Ecomorphology of White-tailed Deer Lower Limb Bones Through the Holocene in Central North America*. Master of Science Thesis. Southern Illinois University Edwardsville.
- SAHER D. J. & SCHMIEGELOW F. K. 2005. « Movement pathways and habitat selection by woodland caribou during spring migration ». *Rangifer*, 25: 143-154.
- SEIP D. & McLELLAN B. 2010. « Mountain Caribou », in: HUMMEL M., RAY J. C. (eds), *Caribou and the North: a shared future*. Toronto, Dundurn Press: 289-306.
- SCOTT K. M. 1985. « Allometric trends and locomotor adaptations in the Bovidae ». *Bulletin of the AMNH*, 179, article 2.
- SCOTT R. S. 2004. *The comparative paleoecology of late Miocene Eurasian hominoids*. Ph. D. Dissertation, University of Texas, Austin.
- SCHAEFER J. A., BERGMAN C. M. & LUTTICH S. N. 2000. « Site fidelity of female caribou at multiple spatial scales ». *Landscape Ecology*, 15: 731-739.
- SORENSEN K., MÜHLENDORFF R. & PETERSEN E. B. 2007. « The Scandinavian reindeer (*Rangifer tarandus* L.) after the last glacial maximum: time, seasonality and human exploitation ». *Journal of Archaeological Science*, 34: 914-923.
- STUART-SMITH A. K., BRADSHAW C. J. A., BOUTIN S., HEBERT D. M. & RIPPIN A. B. 1997. « Woodland caribou relative to landscape patterns in northeastern Alberta ». *Journal of Wildlife Management*, 61: 622-633.
- SPENCER L. 1997. « Dietary adaptations of Plio-Pleistocene Bovidae: implications for hominid habitat use ». *Journal of Human Evolution*, 32: 201-228.
- SPIESS A. 1979. *Reindeer and caribou hunters - An archaeological study*. New York: Academic Press.
- TAILLON J. 2013. « Caribou », in: PRESCOTT J., FERRON J., TAILLON J. (éd.), *Sur la piste de nos cervidés: orignal, cerf de Virginie, caribou*. La Macaza, Québec: Orinha.
- THOMAS D. C. & GRAY D. R. 2002. *Assessment and update status report on the Woodland Caribou Rangifer tarandus caribou in Canada*. Ottawa: Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada.
- TREVOR H., TIBSHIRANI R. & FRIEDMAN J. 2008. *The Elements of Statistical Learning*. New York: Springer.
- VAN ASPEREN E. N. 2010. « Ecomorphological adaptations to climate and substrate in late Middle Pleistocene caballoid horses ». *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 297: 584-596.
- VON DEN DRIESCH A. 1976. *A guide to the measurement of animal bones from archaeological sites*. Bulletin 1. Cambridge: Peabody Museum, Harvard University.
- WAINWRIGHT P. 1991. « Ecomorphology: Experimental functional anatomy for ecological problems ». *American Zoologist*, 31: 680-693.
- WEAVER J. L. 2006. *Big Animals and Small Parks: Implications of Wildlife Distribution and Movements for Expansion of Nahanni National Park Reserve*. Toronto, Ontario: Wildlife Conservation Society Canada Conservation Report No 1.
- WEINSTOCK J. 2000a. « Late Pleistocene reindeer populations in Middle and Western Europe, an osteometrical study of Rangifer tarandus ». *BioArchaeologica*, 3.
- WEINSTOCK J. 2000b. « Demography through osteometry: sex ratios of reindeer and hunting strategies in the Late Glacial site of Stellmoor, northern Germany ». *Archaeozoologia*, 11: 187-198.
- WELADJI R. B., KLEIN R. G., HOLAND O. & MYSTERUD A. 2002. « Comparative response of Rangifer tarandus and other northern ungulates to climatic variability ». *Rangifer*, 22: 33-50.
- WHITE R. 1980. *The Upper Palaeolithic occupation of the Perigord: a topographic approach to subsistence and settlement*. Ph. D. University of Alberta, Alberta.
- WITTMER H. U., McLELLAN B. N. & HOVEY F. W. 2006. « Factors influencing variation in site fidelity of woodland caribou (*Rangifer tarandus caribou*) in southeastern British Columbia ». *Canadian Journal of Zoology*, 84: 537-545.
- YELLEN J. E. 1977. *Archaeological Approaches to the Present: Models for Reconstructing the Past*. New-York: Academic Press.
- ZEDER M. A. 2001. « A metrical analysis of a collection of modern goats (*Capra hircus aegargus* and *Capra hircus hircus*) from Iran and Iraq: implications for the study of Caprine domestication ». *Journal of Archaeological Science*, 28: 61-79.

