Impact de la variabilité climatique sur la démographie des rennes en Laponie suédoise: de l'intérêt du calendrier pastoral

Romain Courault, Marianne Cohen, Sonia Said, Josyane Ronchail

▶ **To cite this version:**

Romain Courault, Marianne Cohen, Sonia Said, Josyane Ronchail. Impact de la variabilité climatique sur la démographie des rennes en Laponie suédoise: de l'intérêt du calendrier pastoral. Marianne Cohen; Christian Giusti. Milieux extrêmes et critiques face au changement climatique. Climat, Territoire, Environnement., Sorbonne Université Presses, pp.155-194, 2021, 979-10-231-0642-8. hal-03343168

HAL Id: hal-03343168
https://hal.science/hal-03343168

Submitted on 15 Sep 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.

HAL
archives-ouvertes.fr

Impacts de la variabilité climatique sur la démographie des rennes en Laponie suédoise : de l'intérêt du calendrier pastoral

Romain Courault, Marianne Cohen, Sonia Said, Josyane Ronchail

▶ **To cite this version:**

Romain Courault, Marianne Cohen, Sonia Said, Josyane Ronchail. Impacts de la variabilité climatique sur la démographie des rennes en Laponie suédoise : de l'intérêt du calendrier pastoral. Marianne Cohen; Christian Giusti. Milieux extrêmes et critiques face au changement climatique. Climats, territoires, environnements, Sorbonne Université Presses, pp.155-194, 2021, 979 10 231 0642 8. hal-03328771

HAL Id: hal-03328771
https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03328771

Submitted on 30 Aug 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.

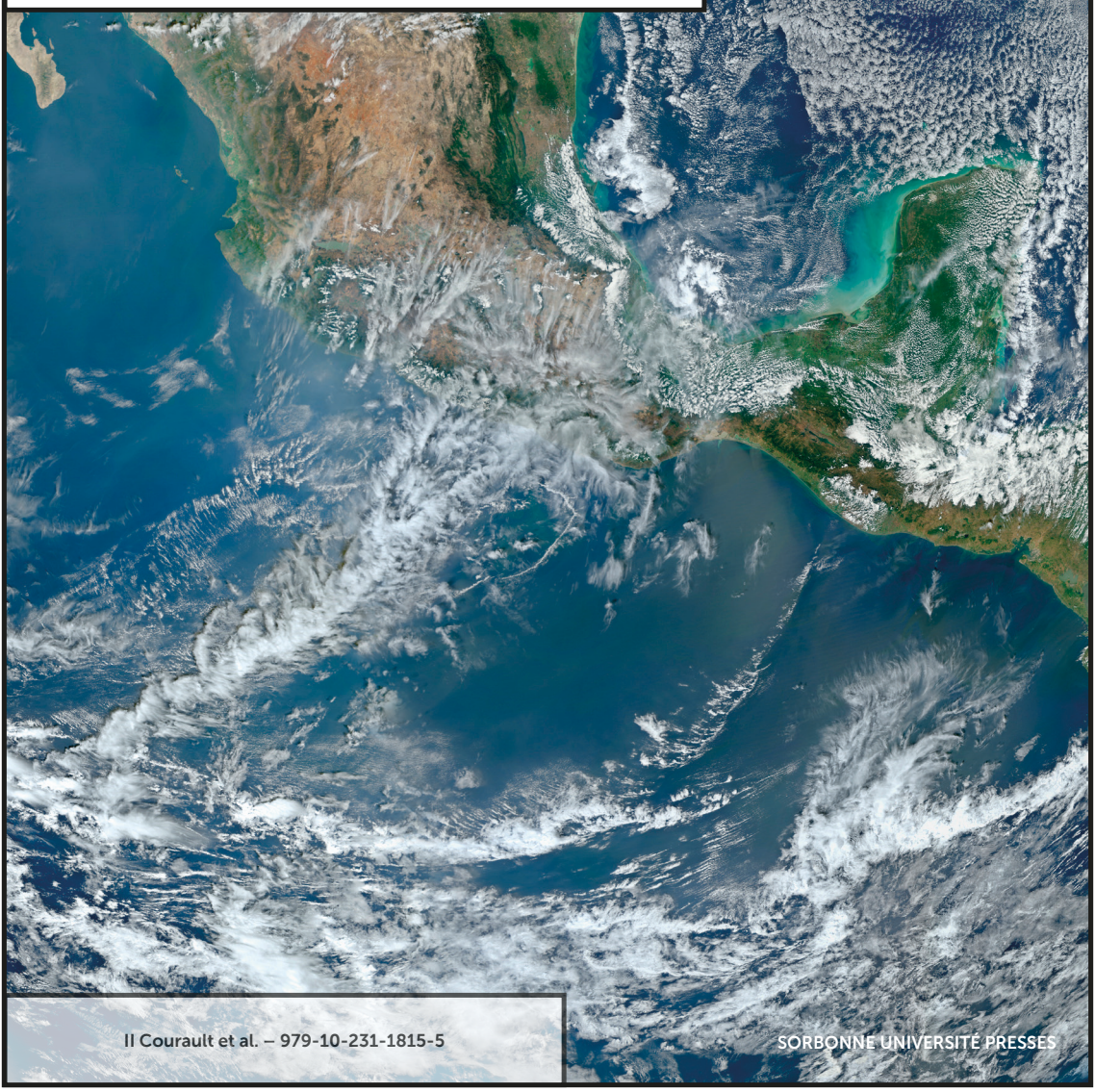
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

MILIEUX EXTRÊMES et CRITIQUES face au CHANGEMENT CLIMATIQUE

Climat, territoire, environnement

Marianne Cohen & Christian Giusti (dir.)



Il Courault et al. – 979-10-231-1815-5

SORBONNE UNIVERSITÉ PRESSES

MILIEUX EXTRÊMES ET CRITIQUES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

GÉOGRAPHIE

Collection dirigée par Christian Giusti

Le Sacre de la nature
Bertrand Sajaloli & Étienne Grésillon (dir.)

Îles révées.Territoires et identités en crise dans le Pacifique insulaire
Dominique Guillaud, Christian Huetz de Lemps & Olivier Sevin (dir.)

La Rue à Rome. Entre l'émotion et la norme
Brice Gruet, Prix Charles Maunoir de la Société de géographie

L'Hiver au Siècle d'or hollandais
Alexis Metzger

L'Asie-Pacifique des crises et des violences
Christian Huetz de Lemps & Olivier Sevin (dir.)

Les Campagnes en France et en Europe. Outils, techniques et sociétés, du Moyen Âge au XX^e siècle
Jean-René Trochet
Prix Antoine Alexandre Boutroue de la Société de géographie

Comme un parfum d'îles. Florilège offert à Christian Huetz de Lemps
Olivier Sevin (dir.)

Atlas des pays du Golfe
Philippe Cadène & Brigitte Dumortier

Atlas du Proche-Orient arabe
Fabrice Balanche

La Privatisation de Chicago. Idéologie de genre et constructions sociales
Laurence Gervais

Les Forêts de la Grande Guerre. Histoire, mémoire, patrimoine
Jean-Paul Amat

De l'Empire à la tribu. États, villes, montagnes en Albanie du Nord (VI^e-XV^e siècle)
Jean-René Trochet

Marianne Cohen
& Christian Giusti (dir.)

Milieux extrêmes et critiques face au changement climatique

Climats, territoires, environnement

SORBONNE UNIVERSITÉ PRESSES
Paris

Ouvrage publié avec le concours de l'Institut de la transition environnementale de Sorbonne Université (SU-ITE) et de la faculté des Lettres de Sorbonne Université

Sorbonne Université Presses est un service général
de la faculté des Lettres de Sorbonne Université.

© Sorbonne Université Presses, 2021
PDF complet : 979-10-231-0642-8

Introduction – 979-10-231-1809-4
I Ronchail *et al.* – 979-10-231-1810-0
I Quénol – 979-10-231-1811-7
I Chionne – 979-10-231-1812-4
I Liziard & Voiron – 979-10-231-1813-1
II Sultan *et al.* – 979-10-231-1814-8
II Courault *et al.* – 979-10-231-1815-5
II Vignal & Andrieu – 979-10-231-1816-2
III Beuzen-Waller *et al.* – 979-10-231-1817-9
Conclusion – 979-10-231-1818-6
Appendice – 979-10-231-1819-3

Mise en page Emmanuel Marc Dubois/3d2s, Issigeac/Paris
d'après le graphisme de Patrick van Dieren

SUP
Maison de la Recherche
Sorbonne Université
28, rue Serpente
75006 Paris

tél. : (33)(0)1 53 10 57 60

sup@sorbonne-universite.fr

sup.sorbonne-universite.fr

DEUXIÈME PARTIE

Milieux extrêmes et changement climatique

IMPACTS DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE SUR LA DÉMOGRAPHIE DES RENNES EN LAPONIE SUÉDOISE : DE L'INTÉRÊT DU CALENDRIER PASTORAL

Romain Courault,
Sorbonne-Université Faculté des Lettres– FRE Espaces, nature et culture
Marianne Cohen,
Sorbonne-Université Faculté des Lettres– FRE Espaces, nature et culture
Sonia Saïd,
Office national de la chasse et de la faune sauvage
Josyane Ronchail,
Université Paris-Diderot – UMR 7159 LOCEAN[1]

Le rapport à destination des décideurs émis en 2014 par le groupe de travail n° 2 du GIEC souligne l'importance de la prise en compte des connaissances et savoirs « traditionnels » (*traditional ecological knowledges* ou TEK, en anglais) des « communautés locales ». Il est ainsi reconnu que

> les systèmes de connaissances autochtones, locaux et traditionnels et leurs pratiques associées, incluant le point de vue holistique de ces populations autochtones sur l'organisation de la communauté humaine et l'environnement, sont une ressource majeure pour l'adaptation au changement climatique, mais leur inclusion dans les tentatives d'adaptation déjà existantes n'a pas toujours été cohérente[2].

Le groupe de travail n° 2 du GIEC distingue les savoirs scientifiques disciplinaires d'autres systèmes de connaissances. Reprenant cette dichotomie

1 Il faut remercier les membres du Parlement Saami de Suède (Sámeddigi/Sametinget) et la station de recherche d'Abisko, Suède (ANS) pour leur disponibilité et la mise à disposition des données utilisées dans cette étude (anthropologique, socio-économiques, biologiques, météorologiques). Nous espérons que celle-ci pourra aider à mieux saisir les interactions entre la variabilité bioclimatique, la gestion pastorale et les paysages de l'élevage de rennes en Laponie suédoise

2 Christopher B. Field, Vincente R. Barros *et. al* (dir.), *IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Cambridge (UK), CUP, 2014, partie A, « Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assesment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change », p. 27, en ligne : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-FrontMatterA_FINAL.pdf.

– et sans s'attarder sur l'héritage postcolonial de la terminologie employée par le GIEC –, ce chapitre se propose de comparer deux façons de découper l'année en saisons pour étudier les relations entre des séries temporelles atmosphériques, climatiques et démographiques des populations de rennes. Le premier découpage est celui du calendrier météorologique, traditionnellement utilisé par les climatologues pour scinder l'année en quatre saisons météorologiques calculées lors des solstices et des équinoxes. L'autre mode de découpage se fait selon le calendrier pastoral exprimé en langue saamie, dont on suppose qu'il est en partie fondé sur le cycle migratoire des cheptels de rennes semi-domestiqués.

On cherche ici à comprendre les effets directs et indirects du climat sur les dynamiques de population des troupeaux de rennes semi-domestiqués de la plus grande région de renniculture de l'Union européenne : le comté suédois de Nord-Botnie. Le renne *Rangifer tarandus* L. est en effet une espèce sentinelle des écosystèmes arctiques et subarctiques, dont les biotopes et biocénoses sont affectés par les effets grandissants du changement climatique[3]. Pour cela, nous proposons une approche en échelles spatiotemporelles emboîtées (continentale/pluri-décennale ; locale/inter-saisonnière) en affinant progressivement la résolution spatiale et temporelle de l'étude. Une première partie sera consacrée aux enjeux du changement climatique global et à ses effets sur les paysages pastoraux de l'élevage semi-nomade de rennes en Suède du Nord (1950-2100). Dans une seconde partie, nous proposons une méthodologie nous permettant d'observer à l'échelle interannuelle (1999-2013) et régionale (Nord-Botnie) les liens entre variables bioclimatiques et démographie des rennes semi-domestiqués de deux décomptes principaux de cheptels, en comparant l'intérêt des deux calendriers.

Le parti-pris de cette communication est celui d'une réduction progressive des échelles spatiales et temporelles d'analyse (*downscaling*), à partir de l'aire de répartition du renne, recouvrant partiellement deux biomes, la taïga et la toundra, particulièrement touchés par le changement climatique des dernières et des prochaines décennies en Scandinavie (période allant de 1950 à 2100). L'emboîtement des échelles d'espace et de temps vise à montrer l'étroite relation qui existe entre le réchauffement global des températures, ses effets régionaux et locaux et ses interrelations avec la biosphère et la noosphère.

3 Ces interactions ne distinguent que peu les rennes sauvages et semi-domestiques de Scandinavie, où sont présentes deux sous-espèces de *Rangifer tarandus* L : le renne d'Europe, *Rangifer tarandus tarandus* L. 1758, le renne sauvage et semi-domestique de la péninsule fennoscandienne, et *Rangifer tarandus fennicus* Lönnberg, 1909, qui désigne quant à lui le renne sauvage de Carélie. Voir Delphine Kuntz, *Ostéométrie et migration(s) du renne (*Rangifer tarandus*) dans le Sud-Ouest de la France au cours du dernier Pléniglaciaire et du Tardiglaciaire (21500-13000 cal BP)*, thèse sous la dir. de Michel Barbaza & Sandrine Costamagno, université Toulouse 2-Le Mirail, 2011.

LE RENNE, ESPÈCE CLÉ DES ÉCOSYSTÈMES ARCTIQUES ET PILIERS DE L'ÉLEVAGE SEMI-NOMADE

Le renne (*Rangifer tarandus* L.) est un ruminant, de la famille des cervidés, dont l'aire de distribution est circumpolaire. Apparu au Pléistocène, le mammifère s'est adapté aux conditions difficiles des biomes de toundra et de taïga d'Amérique du Nord et d'Eurasie (Scandinavie, Sibérie). *Rangifer tarandus* L. est considéré par la communauté scientifique comme une espèce clé de ces écosystèmes[4], c'est-à-dire « [une espèce] dont l'impact sur ses communautés ou son écosystème est disproportionnellement important par rapport à son abondance[5] ».

Il est en effet admis que le positionnement trophique[6] des herbivores au sein des écosystèmes terrestres constitue un facteur important des dynamiques de végétation à l'échelle globale[7]. C'est le cas pour *Rangifer tarandus* L., qui prélève des ressources végétales au cours de ses migrations saisonnières à l'échelle de la centaine de kilomètres en Laponie suédoise. Le mouvement saisonnier des hardes de rennes s'établit entre les formations végétales riches en lichens, principalement présentes dans la taïga et pâturées en hiver, et les formations végétales d'altitude, où la végétation basse de la toundra arbustive fournit un régime estival composé d'herbacées[8]. Cet herbivore se caractérise notamment par les fortes variations de son poids corporel d'une saison à l'autre : il a en effet besoin d'acquérir des ressources abondantes durant l'été et l'automne afin de constituer ses réserves endogènes pour affronter l'hiver. *Rangifer tarandus* L. est ainsi catégorisé comme étant un herbivore *capital breeder*[9] : il stocke un nombre important de calories durant les mois où la biomasse végétale disponible le lui permet, et la graisse ainsi accumulée au cours de la « belle saison » lui garantira son succès reproductif, ainsi que sa survie au froid et à la faible disponibilité végétale au cours de l'hiver arctique. En sus, les fortes variations de luminosité déclenchent une réponse hormonale, régulant les fonctions de l'appétit (qui diminue en hiver) et du temps de sommeil (qui augmente en hiver).

4 Maria Väisänen, « Ecosystem-level Consequences of Climate Warming in Tundra Under Differing Grazing Pressures by Reindeer », *Acta Universitatis Ouluensis*, n° A 645, 2014.

5 Bruce Forbes et Timo Kumpula, « The Ecological Role and Geography Of Reindeer (*Rangifer tarandus*) in Northern Eurasia », *Geography Compass*, vol. 3, n° 4, 2009, p. 1356-1380.

6 Ou niveau trophique, c'est-à-dire la position de l'espèce dans la chaîne alimentaire de l'écosystème considéré (William J. Ripple, James A. Estes, Oswald J. Schmitz *et al.*, « What is a trophic cascade ? », *Trends in Ecology & Evolution,* vol. 31, n° 11, p. 842-849).

7 Maria Väisänen, « Ecosystem-level Consequences of Climate Warming in Tundra Under Differing Grazing Pressures by Reindeer », art. cit.

8 Bruce Forbes & Timo Kumpula, « The Ecological Role and Geography Of Reindeer (*Rangifer tarandus*) in Northern Eurasia », art. cit.

9 Kjell Danell (dir.), *Large Herbivore Ecology: Ecosystem Dynamics and Conservation*, Cambridge/New York, CUP, 2006.

Les femelles *capital breeder* stockent de l'énergie préalablement à la reproduction. En matière de métabolisme et d'allocation optimale des ressources, le coût de la reproduction se mesure par l'effet de l'investissement énergétique nécessaire pour le succès reproducteur futur de l'individu et celui de sa descendance[10]. Cependant, la reproduction a également des conséquences immédiates pour les individus : la gestation et la lactation représentent un surcoût énergétique pouvant engendrer des modifications des modalités de sélection des ressources chez les femelles reproductrices[11]. Ce surcoût énergétique doit donc être compensé par une augmentation de la quantité ou de la qualité des ressources alimentaires ingérées. La mise-bas est notamment une étape critique de la reproduction des cervidés et impose des contraintes particulières aux femelles, liées à la vulnérabilité du nouveau-né. Tim Clutton-Brock et son équipe ont montré, par exemple, l'effet de la lactation sur la sélection des ressources par les biches (*Cervus elaphus*) de l'île de Rum (Hébrides intérieures, Écosse)[12]. Les biches élevant un faon consacraient plus de temps à l'alimentation, étaient plus sélectives envers les ressources alimentaires de qualité et avaient un domaine vital plus petit que les biches n'élevant pas de faon.

Dans le cas du renne, pendant la période estivale, les troupeaux profitent du court laps de temps où la quantité (biomasse disponible) et la qualité des ressources fourragères (valeur nutritionnelle) sont optimales, selon la phénologie des espèces broutées. C'est l'exemple le plus marquant des interrelations entre l'ongulé arctique et les habitats écologiques dans lesquels il migre et réside. Les échanges énergétiques (calories) et nutritionnels (azote) entre les communautés végétales et *Rangifer tarandus* L. sont ainsi partie intégrante de la structure et du fonctionnement des écosystèmes subarctiques. Plus largement, ces échanges, de même que le pastoralisme saami, contribuent à façonner les paysages naturels et culturels à travers l'incomplète domestication du renne[13]. En effet, le renne semi-domestiqué est une ressource naturelle et culturelle pour les éleveurs appartenant à la communauté ethnolinguistique saamie[14]. Les populations

10 Tim Clutton-Brock, Fiona Guinness & Steve Albon, « The Costs of Reproduction to Red Deer Hinds », *The Journal of Animal Ecology*, vol. 52, n° 2, 1983, p. 367-383.

11 Gideon Louw, *Physiological Animal Ecology*, Harlow/New York, Addison Wesley Longman Ltd./J. Wiley, 1993.

12 Tim Clutton-Brock, Fiona Guinness & Steve Albon, « The Costs of Reproduction to Red Deer Hinds », art. cit.

13 Marie Roué, « A Saami Reindeer Herder's Cultural Landscape: Memory, The Senses And Ethics », communication à la conférence « Northen Landscapes : "Implementation of the European Landscapes Convention in the North Calotte Area Municipalities" », Inari, Finlande, 7-9 septembre 2011.

14 Yves Delaporte & Marie Michèle Roué, *Une communauté d'éleveurs de rennes. Vie sociale des Lapons de Kautokeino*, Paris, Institut d'ethnologie, 1986 ; Samuel Roturier & Marie Roué, « Of Forest, Snow and Lichen: Sámi Reindeer Herders' Knowledge of Winter Pastures in Northern Sweden », *Forest Ecology and Management*, vol. 258, n° 9, 2009, p. 1960-1967.

de rennes sauvages, quant à elles, sont aujourd'hui rares dans le nord de la Scandinavie, et cantonnées sur les hauts plateaux de la chaîne fennoscandienne, en particulier dans le centre-est de la Norvège[15][16]. Ces populations sauvages ont en effet été chassées, puis progressivement décimées au cours du XIXe siècle[17]. Leur conservation est actuellement recommandée par les scientifiques[18]. Ces populations norvégiennes ne formaient qu'une des sous-populations d'Eurasie. La domestication, puis la fragmentation paysagère semblent avoir isolé géographiquement et génétiquement les cheptels de rennes sauvages. Cet effet d'île biogéographique tend progressivement à appauvrir la diversité génétique de *Rangifer tarandus* L., menaçant à long terme le potentiel adaptatif de cette espèce charnière des écosystèmes subarctiques.

Ces interrelations posent la question de la place de l'humain au sein de ces régions, en particulier dans le nord-est eurasiatique. Le renne a été chassé de manière extensive par les premiers chasseurs-cueilleurs du Paléolithique[19]. La viande, la fourrure et les autres sous-produits animaux issus de l'exploitation du renne (bois, os, viscères) présentent un intérêt certain pour les populations nomades, ayant progressivement apprivoisé le renne pour les biens immédiats qu'il fournit et sa valeur marchande. Le contrôle des flux saisonniers migratoires du renne a permis un établissement humain pérenne, en particulier dans le nord de l'Europe[20]. Actuellement, les populations nomades saamies sont réparties entre la Norvège, la Suède, la Finlande et l'ouest de la Russie. Les « Lapons », « Sâmes » ou Saamis ont le statut de minorité nationale ethnique et linguistique dans plusieurs pays[21]. L'appellation « Laponie historique » peut recouvrir deux réalités. La première est la province historique de Laponie, en Suède, apparue au XVIe siècle, mais dont les contours géographiques ne sont tracés qu'au XVIIIe siècle

15 Manuela Panzacchi, Bram Van Moorter, Per Jordhøy *et al.*, « Learning From the Past to Predict the Future: Using Archaeological Findings and GPS Data to Quantify Reindeer Sensitivity to Anthropogenic Disturbance in Norway », *Landscape Ecology*, vol. 28, nº 5, 2013, p. 847-859.

16 Romain Courault, Alexiane Franclet, Kévin Bourrand *et al.*, « Recent Vegetation Phenology Variability and Wild Reindeer Migration in Hardangervidda Plateau (Norway) », communication avec *proceeding* à la 28th International Cartographic Conference, Washington USA, July 2017.

17 Ernst Mauritz Manker, *Les Lapons de montagnes suédoises*, Paris, Gallimard, coll. « Géographie humaine », 1954.

18 Manuela Panzacchi, Bram Van Moorter, Per Jordhøy *et al.*, « Learning From the Past to Predict the Future: Using Archaeological Findings and GPS Data to Quantify Reindeer Sensitivity to Anthropogenic Disturbance in Norway », art. cit.

19 Delphine Kuntz, *Ostéométrie et migration(s) du renne (*Rangifer tarandus*) dans le Sud-Ouest de la France au cours du dernier Pléniglaciaire et du Tardiglaciaire (21500-13000 cal BP)*, *op. cit.*

20 Bruce Forbes & Timo Kumpula, « The Ecological Role and Geography Of Reindeer (*Rangifer tarandus*) in Northern Eurasia », art. cit.

21 Ces pays sont signataires de la Convention-cadre pour la protection des minorités nationales (Conseil de l'Europe) et de la Charte européenne des langues régionales ou minoritaires, deux traités juridiques européens entrés en vigueur en 1998.

par les administrations scandinaves et russes. La Laponie en tant que région historique administrative est donc liée au tracé des frontières septentrionales séparant la Norvège de la Suède. Cet accord frontalier est acté par le traité politique de 1751 partitionnant la Laponie administrative norvégienne de la Laponie administrative suédoise. Mais la « Laponie historique », aussi appelée « Sápmi », correspond aussi très schématiquement aux frontières linguistiques où les différents dialectes saamis – de famille finno-ougrienne – sont parlés. La Laponie linguistique concerne donc le nord de la Scandinavie et l'ouest de la Russie[22]. Ce particularisme ethnolinguistique régional est désormais associé à une tendance à la revitalisation de l'activité pastorale d'élevage de rennes, entrant en résonnance avec les discours transnationaux de droit au territoire et de droit à l'autodétermination ethnique. Actuellement, le renne et le système d'élevage semi-nomade font figure d'emblèmes culturels et politiques d'une société et d'un territoire saamis aux contours flous[23].

LES PAYSAGES DE L'ÉLEVAGE DE RENNES MENACÉS PAR LES CHANGEMENTS GLOBAUX

Les tendances à l'affirmation d'une culture locale s'inscrivent dans un contexte de valorisation et de diversification économique des paysages de Laponie historique par les États scandinaves, en lien avec le changement climatique. D'après un article paru en 2007, « la variabilité climatique, le changement climatique ainsi que les transformations sociétales et culturelles associées à la mondialisation des échanges ont été et continuent d'être les responsables de changements majeurs de l'environnement physique, biotique et culturel des communautés locales [autochtones] de l'Arctique[24] ».

En effet, si la foresterie et l'extraction minière ont contribué au développement économique de la Laponie historique, et en particulier du comté suédois de Nord-Botnie, les politiques scandinaves de valorisation économique des forêts ont impulsé récemment une gestion intensive de la taïga. L'orientation vers un mix énergétique tourné vers l'hydroélectricité et l'éolien, implique la construction de barrages hydroélectriques et de champs d'éoliennes. Ceci est allé de pair avec la prospection minière par forage, et la densification progressive des réseaux de transports d'énergie (lignes à haute tension) et de matières premières (chemins de fer, routes carrossables). Il faut y ajouter la valorisation

22 Yves Delaporte & Marie Michèle Roué, *Une communauté d'éleveurs de rennes*, *op. cit.*

23 Karen Hoffmann-Schickel, *Un peuple du renne entre hier et demain. Les Sâmes de Kautokeino dans le Finnmark norvégien*, thèse sous la dir. d'Éric Navet, université de Strasbourg, 2011.

24 Nicholas Tyler, Johan Mathis Turi, Monica Sundset, Kirsti Bull *et al.*, « Saami Reindeer Pastoralism Under Climate Change: Applying a Generalized Framework for Vulnerability Studies to a Sub-Arctic Social-Ecological System », *Global Environmental Change*, vol. 17, n° 2, 2007, p. 191-206.

touristique de cet hinterland européen, à l'échelle locale et transnationale : sports d'hiver, randonnées, observation des aurores boréales en hiver, activités de plein air en été, multiplication des résidences secondaires notamment sur les littoraux ou en bordure des lacs[25]. Ces activités humaines d'importance croissante entraînent une fragmentation et une destruction des espaces naturels et leur remplacement par des surfaces artificialisées, contribuant à perturber le cycle migratoire des rennes semi-domestiqués et à isoler génétiquement des sous-populations de rennes sauvages[26]. En outre, elles ont des conséquences sur le paysage sonore (du fait du bruit des moteurs ou autres, provoqués par les activités anthropiques), qui dérangent les animaux[27]. Ceci concerne aussi bien les rennes sauvages que les rennes semi-domestiques, mais des nuances sont à apporter selon la domesticité (habituation aux bruits, à la proximité humaine) et le comportement social et individuel de *Rangifer tarandus* L.[28].

Tous ces facteurs contribuent à réduire directement les possibilités d'approvisionnement en ressources fourragères par le renne. Certaines stratégies déployées par le renne pour se prémunir les nuisances causées par les activités humaines tendent à fragiliser l'équilibre entre hardes et cheptels de rennes et ressources végétales. Ainsi, les zones les plus évitées par les rennes deviennent celles où la biomasse et les qualités nutritionnelles des végétaux sont les meilleures[29]. Inversement, les espaces naturels moins touchés par les perturbations anthropiques sont ceux où le surpâturage et le surpiétinement sont les plus évidents, du fait de la concentration d'un nombre important de rennes semi-domestiques ou sauvages[30].

25 Anna Skarin & Birgitta Åhman, « Do Human Activity and Infrastructure Disturb Domesticated Reindeer? The Need for Reindeer's Perspective », *Polar Biology*, vol. 37, n° 7, 2014, p. 1041-1054.

26 Manuela Panzacchi, Bram Van Moorter, Olav Strand *et al.*, « Searching for the Fundamental Niche Using Individual-Based Habitat Selection Modelling Across Populations », *Ecography*, vol. 38, n° 7, 2015, p. 659-669.

27 Manuela Panzacchi, Bram Van Moorter & Olav Strand, « A Road in the Middle of One of the Last Wild Reindeer Migration Routes in Norway: Crossing Behaviour and Threats to Conservation », *Rangifer*, vol. 33, n° 2, 2013, p. 15-26.

28 Jennifer Gill, Ken Norris & William Sutherland, « Why Behavioural Responses May not Reflect the Population Consequences of Human Disturbance », *Biological Conservation*, vol. 97, n° 2, 2001, p. 265-268.

29 Bjørn Dahle, Eigil Reimers & Jonathan Colman, « Reindeer (*Rangifer tarandus*) Avoidance of a Highway as Revealed by Lichen Measurements », *European Journal of Wildlife Research*, vol. 54, n° 1, 2008, p. 27-35.

30 Sonia Kivinen & Timo Kumpula, « Detecting Land Cover Disturbances in the Lappi Reindeer Herding District Using Multi-source Remote Sensing and GIS Data », *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, n° 27, 2014, p. 27-35 ; Per Sandström, Tina Granqvist Pahlén, Lars Edenius *et al.*, « Conflict Resolution by Participatory Management: Remote Sensing and GIS as Tools for Communicating land-use Needs for Reindeer Herding in Northern Sweden », *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, vol. 32, n° 8, 2003, p. 557-567.

Ces impacts anthropiques cumulatifs contraignent donc fortement les flux migratoires des rennes semi-domestiques, diminuant leurs capacités de résilience aux effets locaux particulièrement sensibles du changement climatique global causé par l'homme[31]. Ces flux migratoires saisonniers, s'inscrivant au sein de l'écotone entre toundra et taïga, sont conjointement menacés par la valorisation économique et l'intensification de la construction d'infrastructures diverses, elles-mêmes directement et indirectement liées aux effets locaux du changement climatique.

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE EN SCANDINAVIE ET SES EFFETS SUR L'ÉCOLOGIE DE RANGIFER TARANDUS L. LA TENDANCE LINÉAIRE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET SES SIGNAUX RÉGIONAUX À LOCAUX

À ces enjeux s'ajoutent les effets du changement climatique global. Les latitudes arctiques et subarctiques sont particulièrement concernées par les impacts locaux du changement climatique[32]. Dans le nord de la Norvège et de la Suède, l'augmentation des précipitations au cours de la période 1951-2010 est comprise entre 5 et 50 mm par décade selon la région considérée[33]. On observe conjointement une augmentation tendancielle des cumuls de précipitations, et une transformation de leur nature, les cumuls de neige devenant de plus en plus des cumuls de pluie. Pour le climat futur (2080-2100), si le scénario le moins optimiste sur les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre est retenu, on prévoit une augmentation d'au moins 20 % des précipitations par rapport aux volumes moyens au cours de la période 1985-2005, en particulier sous forme non neigeuse[34].

Les **figures 1a** et **1b** cartographient les moyennes annuelles de températures maximales en Scandinavie telles qu'elles étaient observées durant la période 1950-2000 (**fig. 1a**), et telles qu'elles sont projetées pour la période 2080-2100 selon le scénario le plus pessimiste du GIEC[35]

31 Nicholas Tyler, Johan Mathis Turi, Monica Sundset, Kirsti Bull *et al.*, « Saami Reindeer Pastoralism Under Climate Change: Applying a Generalized Framework for Vulnerability Studies to a Sub-Arctic Social-Ecological System », art. cit.

32 Stef Bokhorst, Hans Tømmervik, Terry Callaghan *et al.*, « Vegetation Recovery Following Extreme Winter Warming Events in the Sub-Arctic Estimated Using NDVI from Remote Sensing and Handheld Passive Proximal Sensors », *Environmental and Experimental Botany*, n° 81, 2012, p. 18-25.

33 Thomas F. Stocker, Dahe Qin *et al.* (dir.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, New York, CUP, 2013, « Summary for Policymakers ».

34 *Ibid*.

35 Avec une projection d'élévation des températures globales de l'ordre de 8,5 °C d'ici à 2100, corollaire d'une hypothèse de concentration de gaz à effet de serre liée à un scénario économique de type « *business as usual* ». La sortie des températures moyennes utilisée ici

(**fig. 1b** ; source : worldclim.org ; CMIP5[36]). Pendant la période 1950-2000, les températures maximales s'échelonnent de – 8,2 °C sur les sommets des montagnes fennoscandiennes (centre de la Norvège, nord de la Suède) à plus de 11,6 °C au sud du Danemark. La dérive nord-atlantique ainsi que la situation d'abri des fjords norvégiens expliquent les températures maximales annuelles dépassant 8 °C au-delà du cercle polaire (66° 33' N). Le gradient latitudinal et altitudinal des températures moyennes est prononcé, aussi bien pour la péninsule scandinave que pour les plaines russes. Si les bornes des intervalles ont été conservées pour la période 2080-2100, les gradients s'atténuent du fait de la réduction drastique des surfaces où les températures maximales moyennes sont inférieures à 5 °C, et de l'extension des zones où elles dépassent le seuil de 10 °C.

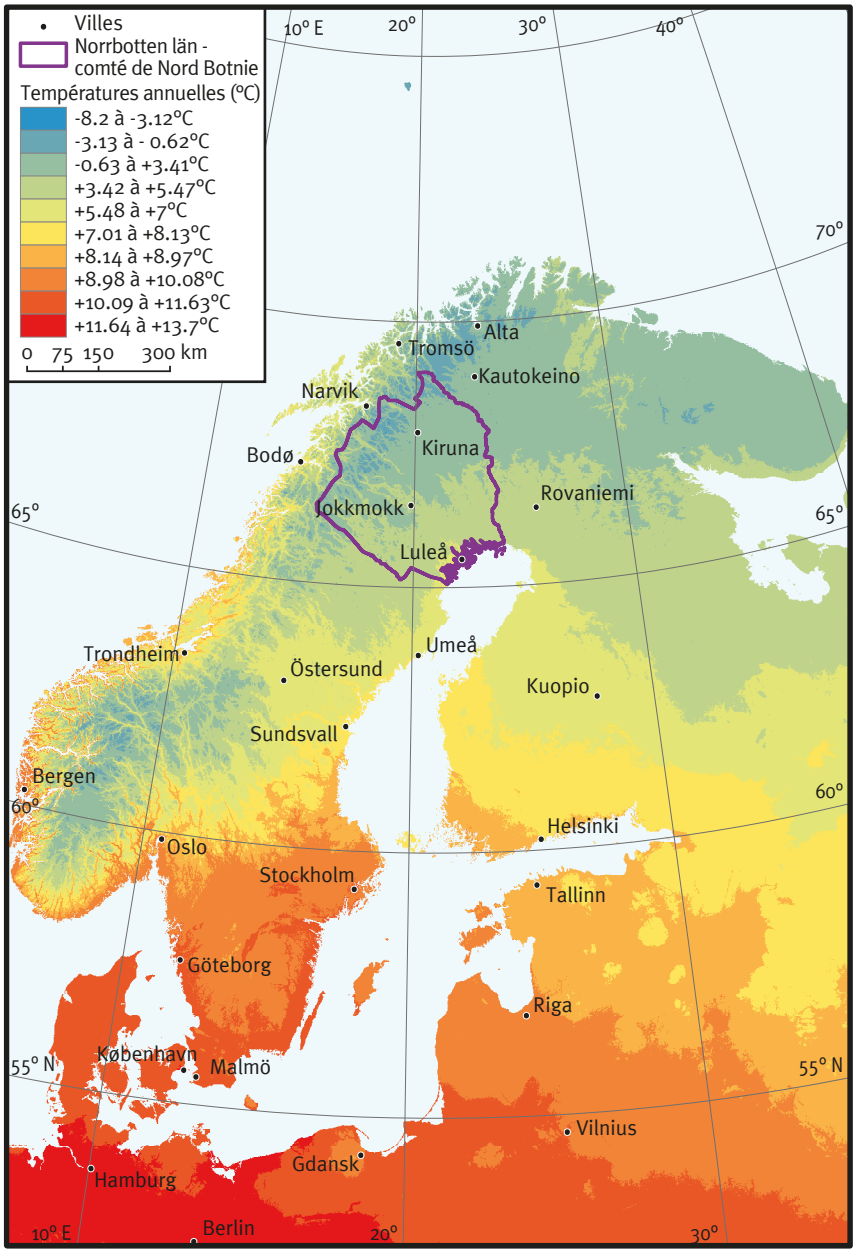
Cette évolution des températures maximales moyennes est à mettre en regard avec celle d'autres paramètres climatiques (températures minimales moyennes ; cumuls de précipitations, épaisseur de neige au sol, etc.). Dans trois stations météorologiques arctiques et subarctiques[37], la modélisation de tendances temporelles linéaires et le calcul de ruptures temporelles dans ces séries ont conjointement montré une tendance linéaire significative au réchauffement et à l'augmentation des précipitations annuelles et saisonnières. Dans la station d'Abisko, la différence modélisée des températures moyennes entre 1967 et 2013 est de + 1,4 °C, tandis que pour les précipitations elle atteint + 50 mm. La périodisation des séries chronologiques des températures et précipitations sur le même pas de temps avait isolé des périodes de rupture marquées, en particulier pour les températures annuelles et hivernales : l'année 1988 séparant pour ces deux paramètres climatiques une période 1967-1987 plus froide que la période 1988-2013[38]. Cette première analyse statistique des séries chronologiques climatiques sur le long terme montre donc, d'une part, la non-linéarité de ces tendances et, d'autre part, les effets du changement climatique, particulièrement notables dès la fin des années 1980 pour le nord de la Scandinavie.

est celle du modèle climatique global calculé par l'Institut Pierre-Simon-Laplace, et repris pour interpolation haute résolution par Robert Hijmans, Susan Cameron, Juan Parra *et al.*, « Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas », *International Journal of Climatology*, vol. 25, n° 15, 2005, p. 1965-1978.

36 Ou Coupled Model Intercomparison Project (« Projet de comparaison des modèles couplés »). Une cinquantaine de modèles climatiques sont comparés, donnant les résultats cartographiques en figures 1a et 1b. Karl E. Taylor, Ronald J. Stouffer et Gerald A. Meehl, « An Overview of CMIP5 and the Experiment Design », *American Meteorological Society*, avril 2012, p. 485-499, en ligne : doi/pdf/10.1175/BAMS-D-11-00094.1

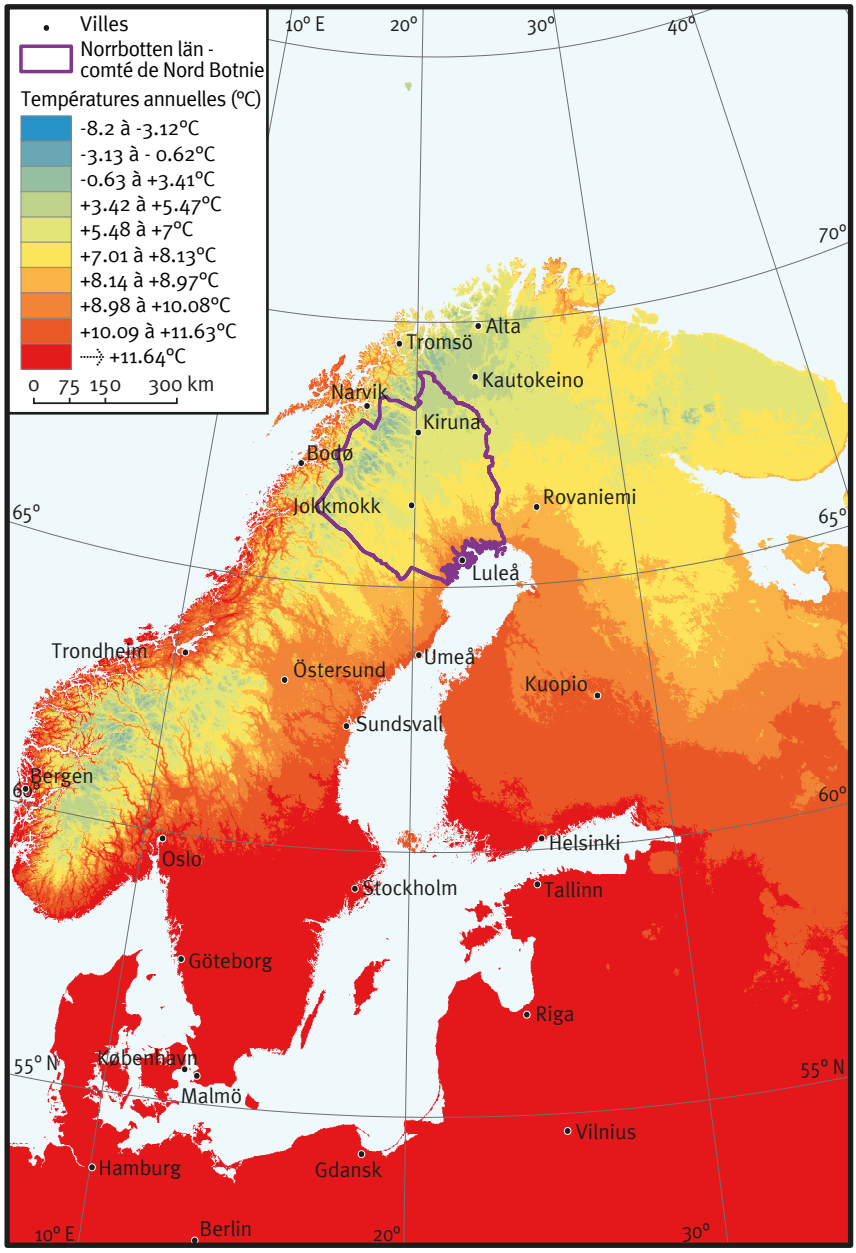
37 Abisko, 67° N, nord Suède ; Cuovddatmohkki, 68° N, Norvège septentrionale ; Barentsburg, 78° N, archipel du Svalbard

38 Romain Courault, Marianne Cohen & Josyane Ronchail, « Régimes de circulation atmosphérique, impact du changement climatique et variation démographique des rennes dans le nord de la Scandinavie », actes du XXVIII[e] colloque de l'Association internationale de Climatologie, université de Liège (Belgique), 1-4 juillet 2015. La station de Barentsburg avait été intégrée dans cette étude incluant la démographie des rennes sauvages de Svalbard.



1 a. Carte des températures moyennes maximales annuelles en Scandinavie (°C), 1950-2000

Sources : worldclim.org, CMIP5, GCM : IPSL, -CM5A-LR, réalisation R. Courault, 2016.



1 b. Carte de projection des moyennes annuelles des températures maximales en Scandinavie (°C), scénario RCP 8.5, 2080-2100

Ces différents constats concernant la sphère climatique peuvent être mis en regard de la migration saisonnière de *Rangifer tarandus* L. (**fig. 2**) et de ses conséquences sur l'organisation du système pastoral saami. La forte variabilité interannuelle des températures et des précipitations de la saison hivernale met en péril les cheptels de rennes : la qualité et la quantité de la couche neigeuse constituent un facteur de vulnérabilité prépondérant pour l'accessibilité des rennes aux lichens terricoles, ressource pastorale essentielle pour la survie des troupeaux[39]. Les processus de fonte-regel et de pluies verglaçantes, provoqués par un radoucissement brutal des températures hivernales, sont en effet souvent invoqués par les éleveurs de rennes comme étant délétères aux cheptels : la neige superficielle fond et se durcit, empêchant les rennes d'accéder aux lichens sous-jacents (notamment *Cladonia rangiferina* L.), le retard de croissance n'étant pas rattrapé en été. Une corrélation positive entre l'oscillation nord-atlantique (NAO) de l'hiver précédant la naissance, et le poids des faons à l'automne, suggère au contraire un effet bénéfique de ces conditions climatiques douces et humides sur les femelles gestantes[40]. En été, fuyant la chaleur et les moustiques, les rennes montent en altitude. Avec le réchauffement, cette montée pourrait être plus précoce, en décalage avec la phénologie de l'ongulé, le choix des espèces floristiques broutées et par conséquent avec les calendriers pastoraux et la gestion du système pastoral.

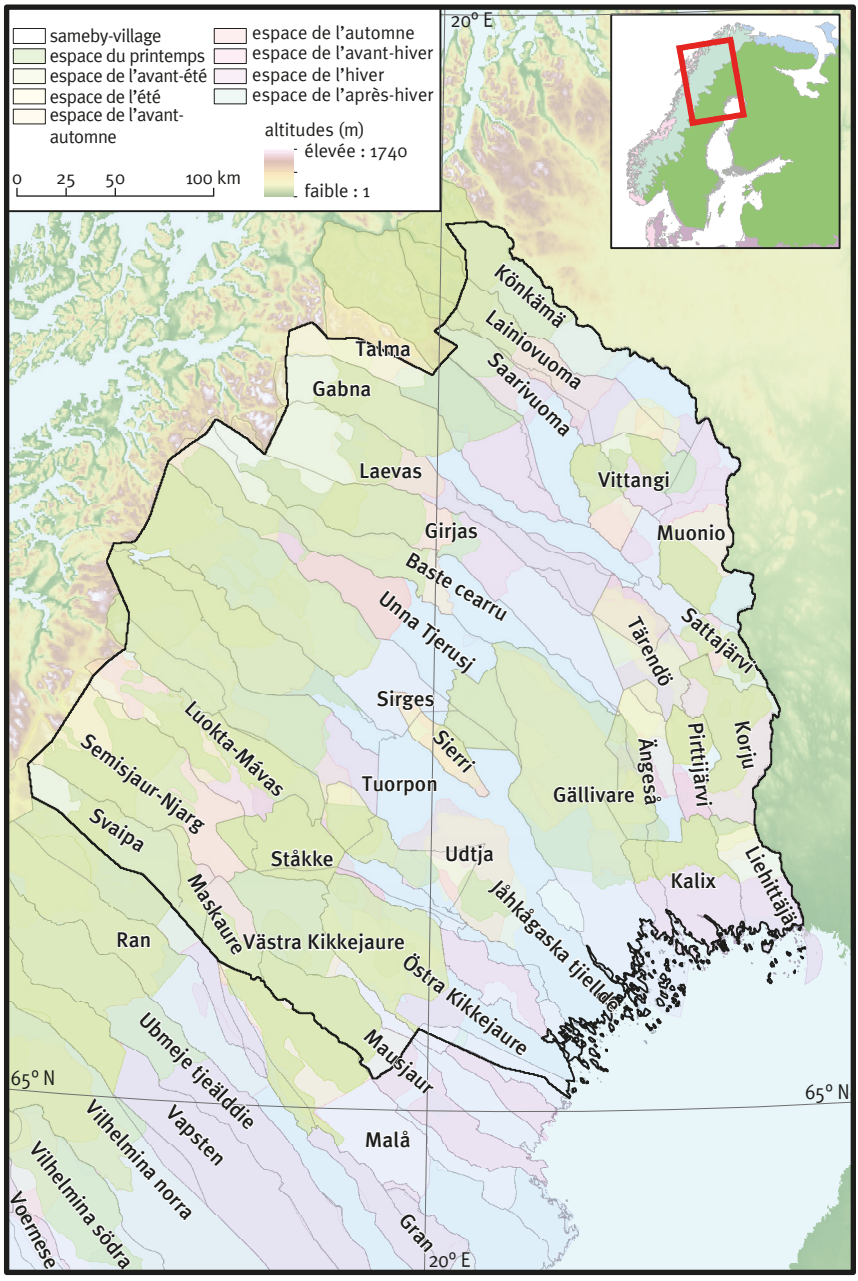
Plus généralement, les impacts directs du climat sur la biologie de *Rangifer tarandus* L. sont nombreux. Il est admis que des températures estivales anormalement chaudes fragilisent les faons nouvellement nés et augmentent les taux de mortalité l'hiver suivant, avec pour conséquence un rétrécissement de la base de la pyramide des âges[41]. Inversement, des mois printaniers et estivaux anormalement froids et pluvieux ralentissent la montée en alpage, modifient la sélection des habitats écologiques au cours de la migration et ainsi le stockage calorique des rennes[42]. Toutefois, les séries temporelles de climatologie locale expliquent mal les dynamiques de population des rennes, que ceux-ci soient

39 Samuel Roturier & Marie Roué, « Of Forest, Snow and Lichen: Sámi Reindeer Herders' Knowledge of Winter Pastures in Northern Sweden », art. cit.

40 Serge Couturier, Steeve Côté & Robert Otto, « Variation in Calf Body Mass in Migratory Caribou: the Role of Habitat, Climate, and Movements », *Journal of Mammalogy*, vol. 90, n° 2, 2009, p. 442-452.

41 Robert Weladji & Øystein Holand, « Influences of Large-Scale Climatic Variability on Reindeer Population Dynamics: Implications for Reindeer Husbandry in Norway », *Climate Research*, vol. 32, n° 2, p. 119-127, en ligne : https://spectrum.library.concordia.ca/7602/1/Weladji_ClimateResearch2006.pdf. Les températures anormalement chaudes favorisent les moustiques et la dispersion du cheptel, fatiguant les jeunes et leurs mères allaitantes.

42 Håkan Tunón & Brita Stina Sjaggo, *Ajddo – reflektioner kring biologisk mångfald i renarnas spår*, Uppsala/ Kiruna, Sametinget/Centrum för biologisk mångfald, 2012.



2. Villages d'éleveurs et territoires saisonniers des cheptels de rennes du nord de la Suède

Sources : Saami Parliement, diva-gis.com, réalisation R. Courault, 2016.

sauvages ou semi-domestiques[43]. Les échelles d'espace et de temps entrant en compte dans les processus évolutifs des composants des (socio)écosystèmes sont imbriquées. De ce fait, il n'existe pas de lien direct entre variabilité climatique locale et dynamique des populations d'une seule composante de cet écosystème – en l'occurrence le renne semi-domestiqué. Il paraît donc plus efficace de modéliser et donc de prédire l'évolution d'une population de *Rangifer tarandus* L. par les indices atmosphériques régionaux. Ceux-ci synthétisent l'intensité et la récurrence des centres d'action atmosphériques continentaux – et régionaux – associés avec des types de temps[44]. Par exemple, la NAO est un mode de circulation atmosphérique fréquent en Europe, lié au différentiel de pression entre les Açores (représentatif des hautes pressions subtropicales de l'anticyclone des Açores) et la dépression centrée sur l'Islande. On associe un différentiel de pression exacerbé à une anomalie positive de NAO, se traduisant par des vents de surface orientés au sud-ouest, donnant un temps anormalement doux et humide dans la moitié nord de l'Europe[45]. C'est l'inverse pour les anomalies négatives de NAO : les centres de pressions subtropicaux et subpolaires sont affaiblis, avec pour conséquence un type de temps plutôt anticyclonique en Europe du Nord, plus froid et sec que la moyenne.

LE CHOIX ALIMENTAIRE DES RENNES RESTREINT PAR LE VERDISSEMENT DE L'ARCTIQUE

Les impacts indirects du climat sur les dynamiques de population de rennes sont notamment représentés par la disponibilité saisonnière des ressources fourragères prélevées, et leur accessibilité (horizontale – nombre de rennes dans un territoire pastoral donné selon le contexte météorologique – et verticale – qualité, quantité et disponibilité des ressources végétales, aériennes en été ou sous la couche de neige en hiver). Les interactions entre les facteurs climatiques, la distribution biogéographique des ressources pastorales au sein de l'écotone régional toundra-taïga, les choix alimentaires de *Rangifer tarandus* L. et sa démographie sont complexes. La baisse de l'approvisionnement en lichens

43 Robert Weladji, David Klein, Øystein Holand *et al.*, « Comparative Response of *Rangifer tarandus* and Other Northern Ungulates to Climatic Variability », *Rangifer*, vol. 22, n° 1, 2002, p. 33-50 ; Ronny Aanes, Bernt-Erik Sæther, Fiona Smith *et al.*, « The Arctic Oscillation Predicts Effects of Climate Change in Two Trophic Levels in a High-Arctic Ecosystem », *Ecology Letters*, vol. 5, n° 3, 2002, p. 445-453 ; Romain Courault *et al.*, « Régimes de circulation atmosphérique, impact du changement climatique et variation démographique des rennes dans le nord de la Scandinavie », art. cit.

44 Niels C. Stenseth, Geir Ottersen, James W. Hurrell *et al.*, « Studying Climate Effects on Ecology Through the Use of Climate Indices: The North Atlantic Oscillation, *El Nino* Southern Oscillation and Beyond », *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, vol. 270, n° 1529, 2003, p. 2087-2096.

45 James W. Hurell, « Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation », *Science*, vol. 269, n° 5224, 1995, p. 676-679.

terricoles, composant une grande partie du régime annuel de l'ongulé, peut en partie être expliquée par l'augmentation en biomasse et en répartition en plantes vasculaires à l'échelle de l'Eurasie, corollaire du réchauffement climatique[46]. Toujours à l'échelle eurasienne, les dates de démarrage phénologique des forêts caducifoliées du biome de taïga ont tendance à être de plus en plus précoces : les températures printanières arrivent plus tôt dans l'année, induisant ainsi le réveil végétatif des forêts de feuillus[47]. Le desserrement de la contrainte thermique dans les régions arctiques et subarctiques a également des conséquences sur la sphère pédologique. Selon un article publié en 2012,

> les changements dans l'écotone subarctique ne pouvaient simplement être prédits en ne prenant en compte que le changement des régimes de températures […] Ces interactions complexes avaient besoin d'être plus amplement examinées, pas uniquement du point de vue des strates arborées et arbustives, mais en considérant aussi les herbivores, ainsi que les interactions entre réchauffement et disponibilité pédologique en nutriments[48].

Non seulement les ressources herbacées et lichéniques constitutives du régime alimentaire des rennes sont menacées par la modification des successions écologiques induites par la remontée en latitude des températures, mais les modifications physicochimiques des sols sont aussi un facteur d'appauvrissement en biomasse disponible pour les troupeaux de rennes semi-domestiqués. On peut se demander si cet appauvrissement a un impact sur les temps de résidence des rennes dans leurs habitats écologiques préférentiels, et indirectement sur leurs dynamiques de population.

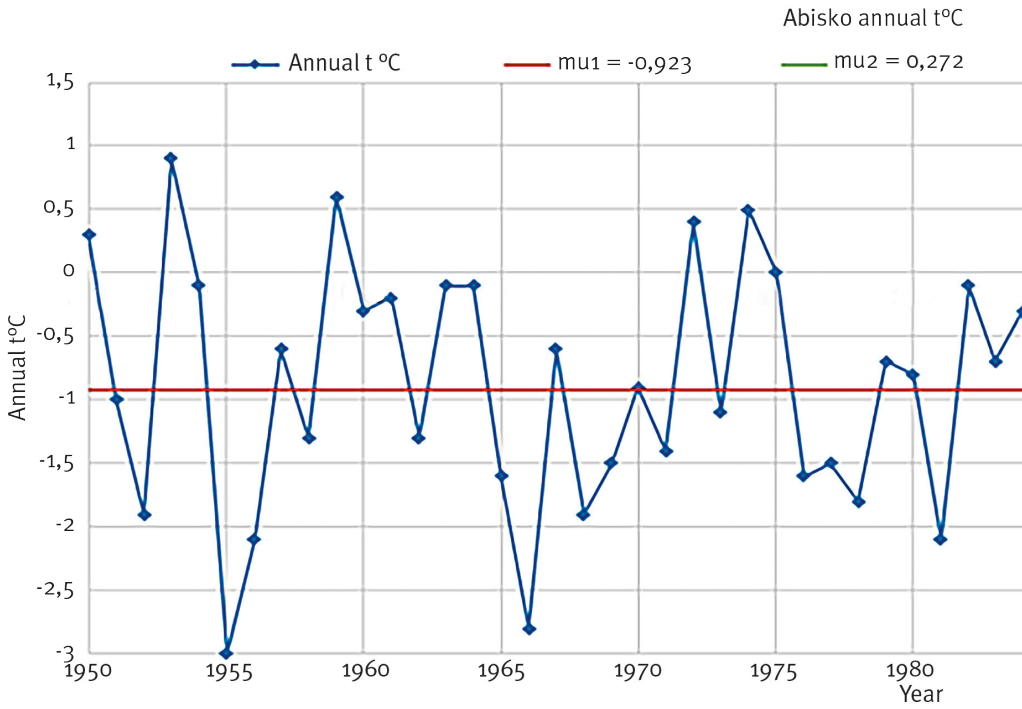
Le cas d'étude du comté de Nord-Botnie en Suède

Le comté du Norrbotten, délimité en bleu dans les **figures 1a** & **1b**, est l'une des régions administratives les plus septentrionales de l'Union européenne, s'étendant entre le golfe de Botnie et la chaîne fennoscandienne. Le comté fait face actuellement à l'exacerbation des enjeux territoriaux, dans le contexte du changement climatique marqué et de l'ouverture de nouvelles voies maritimes dans l'océan Arctique. Au cours de la période 1950-2000, les températures moyennes maximales y étaient comprises entre – 8,2 °C pour les sommets du

46 Hans Cornelissen *et al.*, « Global Change and Arctic Ecosystems: is Lichen Decline a Function of Increases in Vascular plant Biomass? », *Journal of Ecology*, vol. 89, n° 6, 2001, p. 984-994.

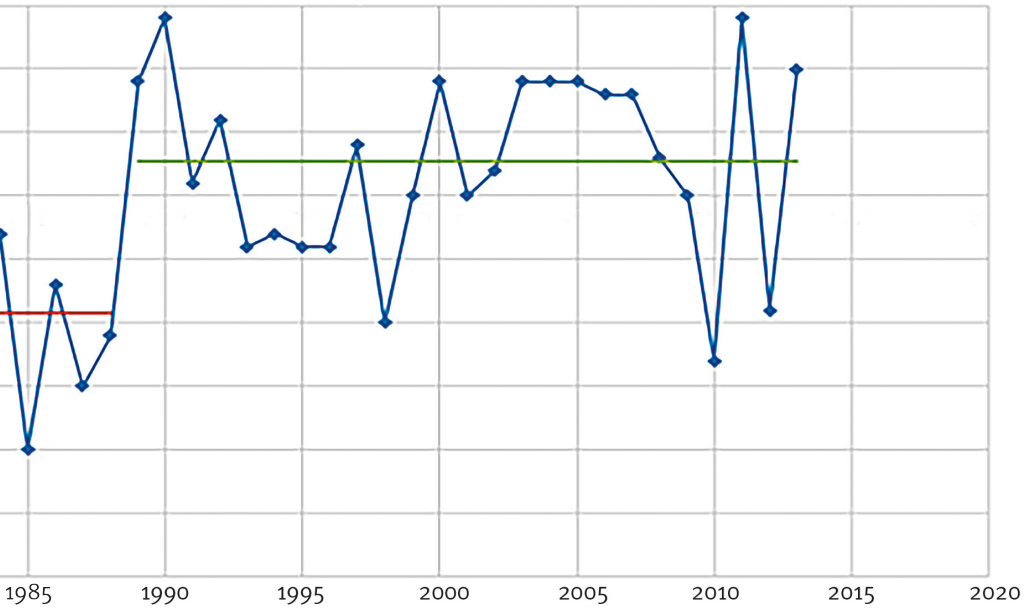
47 Nicolas Delbart, Laurant Kergoat, Thuy Le Toan *et al.*, « Determination of Phenological Dates in Boreal Regions Using Normalized Difference Water Index », *Remote Sensing of Environment*, vol. 97, n° 1, 2005, p. 26-38.

48 Oriol Grau, Josep M. Ninot., José M. Blanco-Moreno *et al.*, « Shrub-tree Interactions and Environmental Changes Drive Treeline Dynamics in the Subarctic », *Oikos*, vol. 121, n° 10, 2012, p. 1680-1690.



3. Test de rupture appliqué aux températures annuelles à Abisko (1950-2013 ; Abisko Research Station, méthode de Pettitt)
Réalisation : R. Courault, 2015

nord-ouest de la région et + 7 °C dans le sud-est, relativement tempéré par l'influence maritime du golfe de Botnie (**fig. 1a**). La projection cartographique pour 2080-2100 (**fig. 1b**) prévoit une remontée flagrante des isothermes : les rives nord du golfe de Botnie connaîtraient ainsi les mêmes températures maximales que celles observées à Stockholm pendant la deuxième moitié du XX^e^ siècle. Le gradient latitudinal s'efface progressivement, alors que subsiste un gradient altitudinal, largement diminué si on le compare à la période précédente. Localement, la tendance linéaire tracée pour la station météorologique d'Abisko entre 1967 et 2013 avait montré une augmentation de + 1,75 °C, le temps expliquant 27 % de la variance des températures moyennes annuelles avec un degré de certitude assez élevé (p-value < 0,05). Sur un pas de temps un peu plus long (1950-2013), les tests de ruptures calculés pour les températures moyennes annuelles distinguent clairement une interruption entre deux périodes (**fig. 3**). La période 1950-1988 se démarque statistiquement avec une température moyenne de – 0,92 °C, de la période 1989-2013, où les moyennes annuelles d'Abisko atteignent + 0,27 °C. Celles-ci se caractérisent ainsi par des moyennes annuelles plus chaudes, réchauffement dont l'intensité est particulièrement notable à partir de la fin des années 1980.

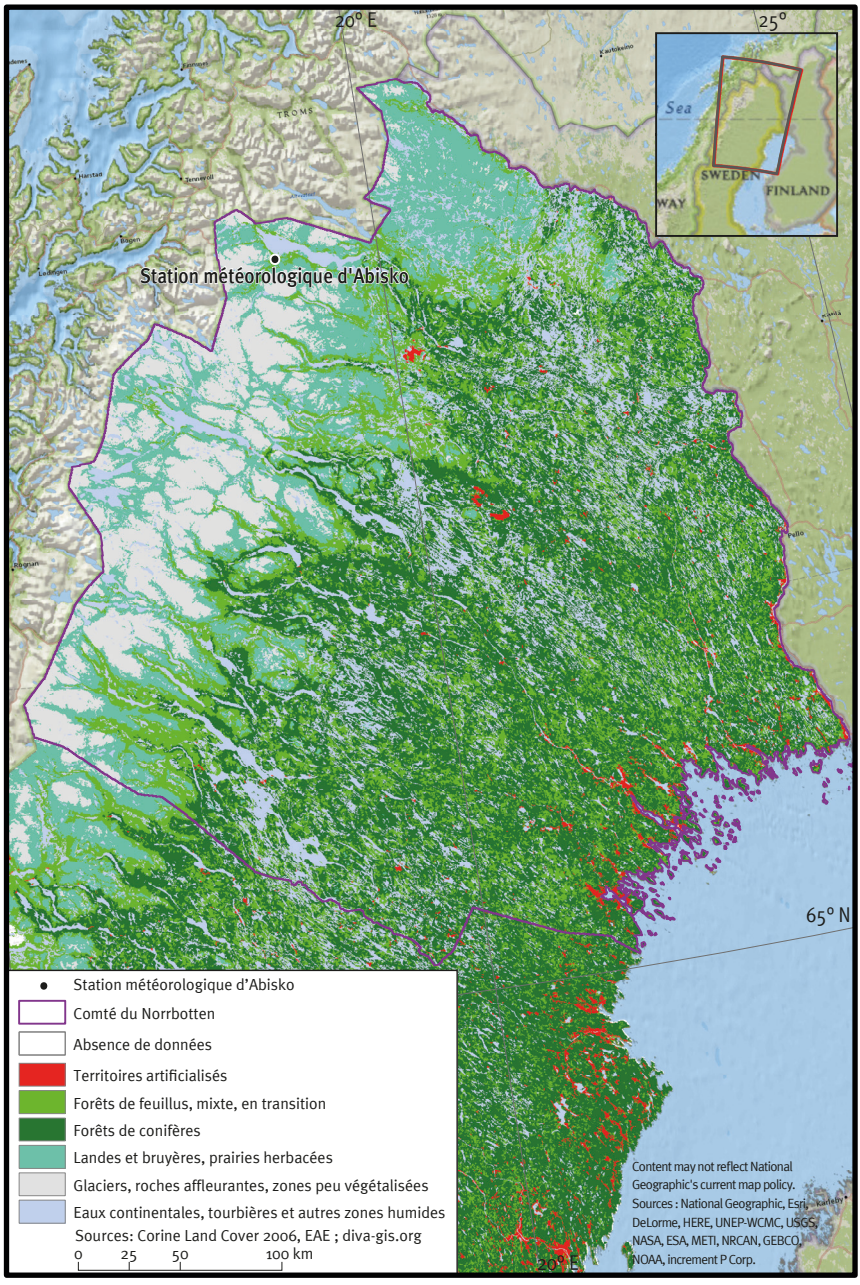


Du point de vue biogéographique, le comté du Norrbotten est en situation d'écotone entre les forêts de conifères caractéristiques du biome de la taïga et la végétation de toundra, située un peu plus au nord et à l'ouest (**fig. 4**). Les travaux récents ont notamment observé la remontée altitudinale et latitudinale des strates arborescentes et arborées, en particulier dans le comté de Nord-Botnie, les piémonts de la chaîne fennoscandienne et la région d'Abisko[49]. La toundra observée présente un faciès broussailleux à arboré, dû à sa position géographique intermédiaire en latitude dans cet écotone spatiotemporel (**fig. 4**). Ce processus d'embroussaillement[50] concerne spécifiquement l'avancée sur les hauts de versant du genévrier (*Juniperus nana* L.), du saule glauque (*Salix glauca* L.) et du bouleau nain (*Betula nana* L.). Ce constat a été en particulier établi pour différents faciès de végétation composant l'écotone toundra-taïga du parc naturel d'Abisko, à l'échelle de transects et de placettes systématiquement photographiés entre 1976 et 2004[51]. Ce processus tend à réduire la qualité nutritionnelle des pâturages des rennes, même si ces derniers consomment aussi les pousses de ces arbustes. Au regard des changements bioclimatiques observés

49 Janne Heiskanen, Björn Nilsson, Ann-Helen Mäki *et al.*, « Aerial Photo Interpretation for Change Detection of Treeline Ecotones in the Swedish Mountains », *Arbetsrapport*, n° 242, 2008, en ligne : https://pub.epsilon.slu.se/9220/1/Arbetsrapport_242.pdf

50 En anglais, « *shrubification* ».

51 *Ibid.*



4. Les biomes du nord de la Suède et la station synoptique d'Abisko

Sources : AEE, Abisko Research Station, diva-gis.org ; réalisation : R. Courault, 2016.

aux échelons continentaux, régionaux et locaux, plusieurs interrogations subsistent. Sur un pas de temps pluriannuel (1999-2013), en partie contraint par la disponibilité des données démographiques des cheptels de *Rangifer*, les séries temporelles climatiques et les anomalies de circulation atmosphérique sont-elles susceptibles de nous éclairer, voire d'expliquer, les effets du climat sur les dynamiques de population des rennes semi-domestiqués du comté de Norrbotten ? Cette période commençant après deux changements importants de circulation atmosphérique et de types de temps associés à la fin des années 1970 et 1980[52], comment caractériser la variabilité bioclimatique interannuelle et intersaisonnière ? Dans quelle mesure l'agrégation des variables temporelles bioclimatiques selon deux systèmes de découpages saisonniers (météorologique d'une part, pastoral d'autre part) nous permet une certaine complémentarité dans l'interprétation des liens entre sphère atmosphérique, biologique et anthropique à ces échelles plus fines ?

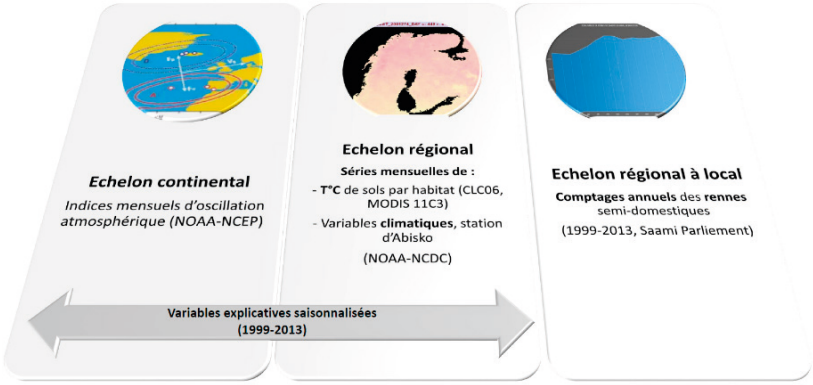
TRAITEMENTS GÉOMATIQUES ET STATISTIQUES : AGRÉGATION DES SÉRIES CHRONOLOGIQUES

À l'échelle pluriannuelle (1999-2013), on tente d'identifier des contextes bioclimatiques pouvant structurer la démographie de *Rangifer tarandus* L. On mesure dans un premier temps la variabilité climatique, en particulier des températures de surface de sols pour différents habitats écologiques, à l'interface entre atmosphère et biosphère. Dans un second temps, on opère des tests de corrélation de Spearman afin d'observer des liens statistiques entre indices atmosphériques régionaux, climatiques, et dynamiques de population récente de deux cheptels de rennes du comté de Nord-Botnie. Pour les deux étapes de l'étude, on saisonnalise les variables en utilisant les saisons météorologiques d'une part, et les saisons pastorales saamies d'autre part.

Matériel

Notre objectif est d'observer à différentes échelles d'espace et de temps des contextes bioclimatiques signifiants pour la démographie des cheptels de rennes du comté de Nord-Botnie (**fig. 5** et **tableau 1**). L'approche par échelles emboîtées intègre la comparaison entre deux calendriers dans l'observation et l'explication des dynamiques de population de *Rangifer tarandus* L. Toutes les données utilisées sont en accès libre sur les sites Internet des institutions les proposant (**tableau 1**).

52 Romain Courault *et al.*, « Régimes de circulation atmosphérique, impact du changement climatique et variation démographique des rennes dans le nord de la Scandinavie », art. cit.



5. Démarche méthodologique générale
(Réalisation : R. Courault, 2016)

Les données de télédétection et de géomatique sont les produits MODIS 11C3 du capteur Terra, exprimant l'émissivité des sols en degrés Kelvin (**tableau 1**). La période de retour est 2000-2010, pour une répétitivité bimensuelle de la donnée, à une résolution spatiale de 10 km, couvrant à la base tout l'hémisphère nord. Les indices de circulation atmosphérique régionaux sont issus de la NCEP-NOAA, les séries disponibles s'étalant de 1950 à 2015.

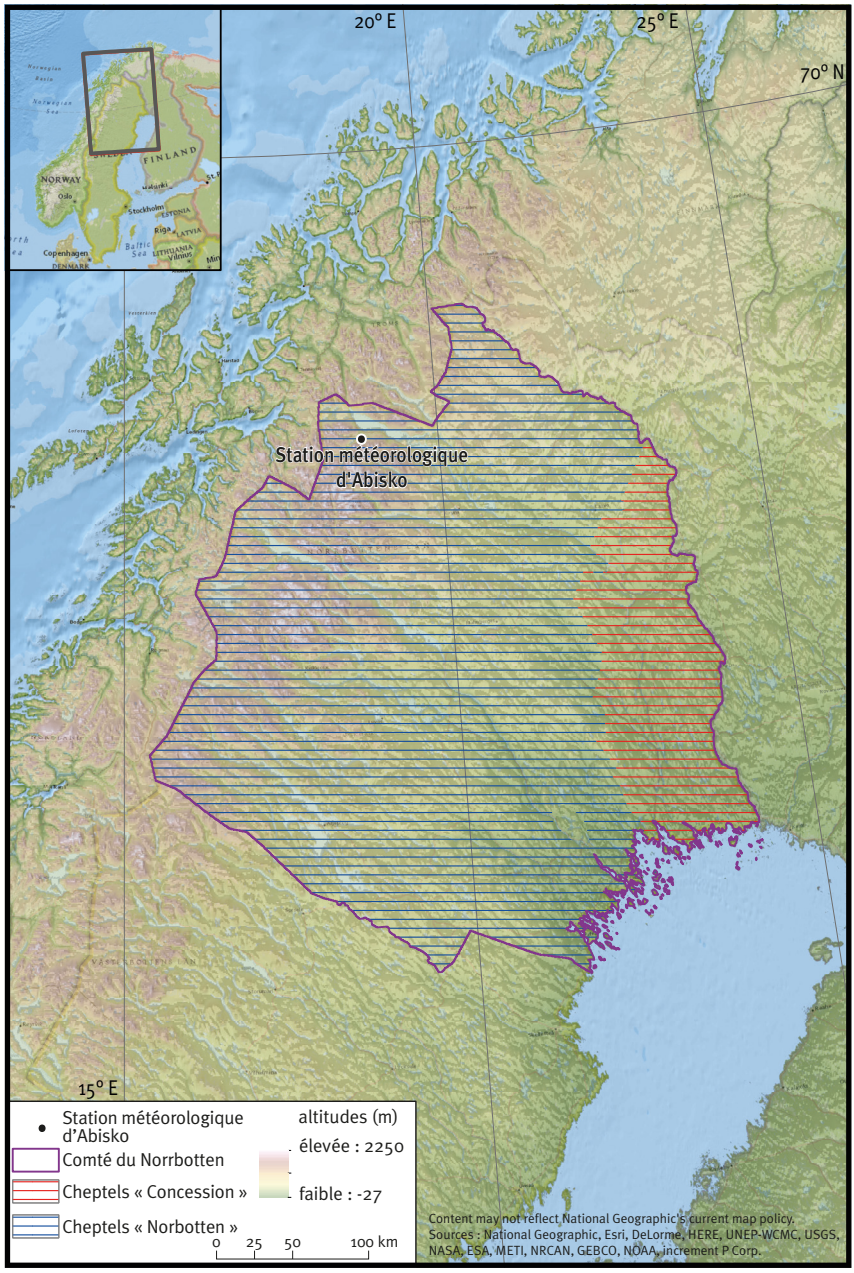
Tableau 1. Métadonnées utilisées dans l'étude

Type de donnée	Température de surface des sols	Indices de circulation atmosphérique	Climatologie locale	Habitats écologiques	Démographie des rennes
Source	USGS-MODIS 11A2	NCNCEP-NOAA	NCDC-NOAA	Corine Land Cover – Agence européenne pour l'environnement	Parlement saami (Sametinget)
Pas de temps	2000-2010	1950-2015	1950-2013	2006	1999-2013
Résolution temporelle	15 jours	Journalier	Journalier	~ 5 ans	Annuel
Résolution spatiale	10 km	~Continental/régional (Eurasie)	~ Régional/local (synoptique)	100 m ~continental (Europe)	Comté Nord-Botnie, Concession agricole ~ Régional/local
Unité	T° K	Index (pas d'unité)	T° min-T° max (°C) P° (mm) Épaisseurs de neige (mm)	Catégories d'occupation de sols (niveau 3)	Nombre de : Faons < 1 an – Femelles – Mâles – Total
Variable utilisée	Émissivité des sols	Oscillation nord-atlantique (NAO) ; Oscillation est-atlantique/Ouest-Russe (EA-WR) ; indice de blocage scandinave (SCAND) ; variance explicative mondiale (Expl. Var.)	Nombre de jours/ T° min > 0 °C Nombre de jours/an T° max > 0 °C		

Les données se caractérisent par une résolution journalière, ou mensuelle. On teste ici plusieurs anomalies de circulation atmosphériques régionales, d'une étendue géographique globale à continentale (variance explicative mondiale, NAO, EATL-WRUS) ou régionale : indice de blocage scandinave (SCAND). Un troisième jeu de données se matérialise par différentes séries chronologiques brutes et prétraitées, s'échelonnant de 1950 à 2013, pour la station météorologique d'Abisko (NCDC-NOAA). Ces séries chronologiques journalières concernent en particulier les moyennes de températures et les totaux de précipitations journaliers, ainsi que le décompte du nombre de journées supérieures à 0 °C en température minimale ou maximale.

Le Corine Land Cover 2006 est également utilisé, en lien avec les données temporelles de températures de sols issues de la télédétection. Cette donnée géomatique, en format raster, a été obtenue sur le site de l'Agence européenne pour l'environnement. Ce millésime a été choisi car il se situe au milieu de la période étudiée. L'occupation biophysique des sols est cartographiée avec une résolution spatiale de 100 m (taille du « pixel »), la taille minimale des surfaces cartographiées étant de 25 ha (soit 0,25 km²). La carte de l'occupation du sol Corine Land Cover 2006 est interprétée quant aux habitats écologiques du renne. Certaines catégories sont particulièrement intéressantes pour la reconstitution des réserves graisseuses en été (prairies d'altitude, zones faiblement végétalisées) et la reproduction du renne aux intersaisons (landes et bruyères).

Le dernier jeu de données décrit la démographie annuelle des rennes de deux grands cheptels représente. Ces données ont été produites par le Parlement saami et sont disponibles sur son site Internet. Le pas de temps est de 1999-2013, avec une résolution temporelle annuelle. En termes statistiques, les séries temporelles disponibles dénombrent les faons (rennes de moins d'un an), les femelles, les mâles, ainsi que leurs totaux. Le décompte correspond à l'effectif minimum de l'année. Il est opéré à la fin de la période d'abattage, qui a lieu de novembre à mars, et avant le vêlage en mai. Deux cheptels sont dénombrés, ceux de la sous-région de Nord-Botnie (**fig. 6**, en bleu), où les communautés saamies sont dites montagnardes ou forestières, et les décomptes de la Concession pastorale, proche de la Finlande, où les communautés sont qualifiées de concessionnaires, ou franchisées (sous-région « Concession », en rouge sur la carte). Des droits différents de renniculture y sont attribués comparativement aux cheptels décomptés à l'extérieur de cette sous-région. Dans la Concession, les éleveurs ont un nombre limité de rennes et de pâtures dont ils sont propriétaires fonciers. La gestion saisonnière des pâtures estivales et hivernales (droits de pâturage) des territoires pastoraux des communautés gérées par le Parlement saami (cheptels des comtés de Nord-Botnie, Västerbotten, Jämtland) laisse place à une gestion



6. Statut des troupeaux décomptés et station météorologique d'études

Sources : sametinget.se, AEE, diva-gis.org ; réalisation : R. Courault, 2016.

annuelle non différenciée pour les communautés d'éleveurs appartenant à la Concession pastorale[53].

À l'échelle de la période de données disponible (1999-2013), les deux grands troupeaux décomptés présentent des ordres de grandeur et des évolutions différenciés. Les rennes de la sous-région Nord-Botnie passent de 112 000 têtes en 1999 à 147 600 en 2005 puis restent relativement stables (> 140 000) jusqu'en 2013. Les cheptels décomptés pour la sous-région « Concession » (**fig. 6**) sont dix fois moins nombreux (12 600 têtes en 1999), ils augmentent jusqu'à 14 600 en 2005 avant de décroître progressivement jusqu'à 10 600 en 2013. À l'intérieur de ces deux grands cheptels, les femelles sont de 6,5 à 7,5 fois plus nombreuses que les mâles, le ratio femelles/faons se situant entre 2,5 et 3 (chiffres moyens). Pour la sous-région de décompte « Nord-Botnie », les effectifs de femelles augmentent notablement, de 75 000 en 1999 à près de 99 000 en 2013, et sont bien corrélés avec l'année ($r = 0{,}968$, $p < 0{,}0001$). Les mâles semblent favorisés dans les choix d'abattage, comme le montrent les corrélations positives entre le nombre de rennes abattus et les décomptes de mâles ($r = 0{,}597$, $p = 0{,}015$). *A contrario*, il n'y a pas de tendance à l'augmentation du nombre de femelles de la sous-région « Concession », ce dernier restant compris entre 8 000 et 10 000 têtes.

Enfin, le dernier jeu de données concerne l'organisation temporelle des calendriers saamis et occidentaux, qui conditionnera l'agrégation saisonnière des séries chronologiques précédentes. Les mois calendaires sont représentés dans le **tableau 2** à titre indicatif.

Tableau 2 : Saisons calendaires saamis et « occidentaux »
(Sources : Parlement saami [Sametinget] ; dictionnaire FREELANG, Deverrière, 2009, et Institut de linguistique finlandais)

Mois calendaires français	Mois calendaires saami	Saisons météorologiques	Pleines saisons pastorales	Saisons pastorales transitoires
Décembre	*Juovlamánnu* (*Juovllat* : « Noël »)	Hiver	*Dálvve*	*Čak čad álvve*
Janvier	*Ođđajagimánnu* (*Ođđajahki* : « Nouvel An »)			
Février	*Guovvamánnu*			
Mars	*Njukčamánnu* (*Njukča* : « le Cygne »)	Printemps		*Gidádálvve*
Avril	*Cuoŋo mánnu* (*Cuoŋo* : « la Congère », « Croûte de neige »)		*Gidá*	
Mai	*Miesse mánnu* (*Miesta* : « le Buisson »)			
Juin	*Geasse mánnu*	Été	*Giesse*	*Gidágiesse*
Juillet	*Suoidne mánnu* (*Suoidni* : « Le Foin, l'Herbe »)			
Août	*Borge mánnu*			*Čakčagiesse*
Septembre	*Čakča mánnu*	Automne	*Čakča*	
Octobre	*Golggot mánnu*			
Novembre	*Skábma mánnu* (*Skáb* : « La Nuit arctique »)			*Čak čad álvve*

53 Håkan Tunón & Brita Stina Sjaggo, *Ajddo – reflektioner kring biologisk mångfald i renarnas spår*, *op. cit.*

Ils nous servent en premier lieu à décrire l'attribution des mois à l'intérieur des saisons : trois mois pour chacune des quatre saisons dans le calendrier climatique occidental par exemple. Pour le calendrier pastoral saami, exprimé en saami du Nord[54], les douze mois se répartissent un peu moins régulièrement, avec des pleines saisons et des saisons de transition. On remarque la longueur de l'automne tardif (Čakča *[Tjaktja]*) et de la pleine saison hivernale (*Dálvve*) qui durent respectivement deux et quatre mois d'après le calendrier pastoral. Il faut également noter que certains mois peuvent recouper deux saisons, c'est notamment le cas pour décembre (à la fois Čakčadalvve *[Tjaktjadálvve]* – automne tardif – et *Dálvve* – plein hiver) ; les mois printaniers de mars et avril constituent une saison transitoire (*Gidádálvve*) et sont respectivement rattachés à l'hiver (*Dálvve*) et au printemps (*Gidá*). Hormis pour l'été tardif (Čakčagiesse *[Tjaktjagiesse]*, en août), les trois autres saisons transitoires se superposent temporellement aux pleines saisons, en particulier l'hiver tardif et le printemps tardif (*Gidádálvve* et *Gidágiesse*, **tableau 2**). Ce constat est important, car l'agrégation des séries temporelles traite d'une manière égale les pleines saisons et les saisons transitoires, impliquant la surreprésentation statistique de plusieurs mois. Nous avons également calculé les variables climatiques et atmosphériques du mois de novembre qui, selon des travaux réalisés par des anthropologues, est considéré par les Saamis comme déterminant dans l'établissement d'une couche neigeuse de bonne qualité, pouvant être creusée par les rennes au cours de l'hiver[55].

Méthodes de traitement des données

Une première étape de l'étude s'attache à comparer la variabilité inter-saisonnière et inter-habitats des températures de surface du sol au cours de l'ensemble de la période d'étude, selon que l'on prend en compte le calendrier météorologique ou le calendrier pastoral. La **figure 7** détaille la méthode d'extraction des profils temporels de températures bimensuelles de surface des sols, à l'échelle du comté du Nord-Botnie, que nous avons utilisée. Au préalable, les images satellites MODIS 11C3 (2000-2010) centrées sur le nord de la Suède, sont découpées en fonction des limites du comté de Norrbotten. On convertit ensuite le système de coordonnées des données MODIS, vers celui utilisé pour la carte de l'occupation du sol Corine Land Cover 2006. Puis la calculatrice raster permet l'extraction des profils temporels de températures de sol dans des catégories d'occupation des sols correspondant aux habitats

54 *Ibid.*

55 Jan Åge, Riseth, Hans Tømmervik, Elina Helander-Renvall *et al.*, « Sámi Traditional Ecological Knowledge as a Guide to Science: Snow, Ice and Reindeer Pasture Facing Climate Change », *Polar Record*, vol. 47, n° 3, 2011, p. 202-217.

7. Méthodologie d'extraction de séries temporelles de températures en surface de sol, issues des images MODIS 11C3

préférentiels du renne et des catégories de « contrôle » : glaciers, névés et neiges permanentes ; roches nues ; zones humides par exemple. Ces habitats dits de contrôle nous servent à vérifier la cohérence du rééchantillonnage des pixels des habitats écologiques Corine Land Cover 2006 sur ceux des températures de sol MODIS 11C1. On valide ainsi l'extraction des profils temporels selon leur occupation du sol en vérifiant qu'il n'existe pas de confusion entre les catégories sélectionnées, notamment du fait de la perte importante en résolution spatiale des habitats écologiques Corine Land Cover. En outre, ces catégories restent informatives quant à l'évolution régionale des températures de sols pour la période donnée (2000-2010), particulièrement sur d'éventuels signaux d'embroussaillement ou de densification des habitats faiblement végétalisés (glaciers, roches nues, prairies alpines, etc.).

Le rééchantillonnage de la carte Corine Land Cover sur les propriétés géométriques (projection, résolution spatiale) de l'imagerie MODIS est la dernière étape avant la création des profils temporels. Cette opération consiste à faire correspondre la projection et la résolution spatiale du Corine Land Cover reclassifié sur celles qui caractérisent l'imagerie MODIS (**fig. 7**). Deux images superposables sont obtenues, géométriquement équivalentes, nous permettant d'extraire les valeurs bimensuelles de températures de sols par habitat écologique sélectionné. L'exportation des données spatialisées de températures de sols vers un tableur permet de convertir les données exprimées en degrés Kelvin vers les degrés Celsius (**fig. 8**) et par la suite de saisonnaliser les données bimensuelles selon les calendriers météorologiques et pastoraux. Pour finir, on comparera la variabilité des températures du sol aux différentes saisons pendant cette période, selon le type de calendrier. Les séries statistiques étant de taille limitée, nous avons préféré caractériser cette variabilité climatique par la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale des températures du sol au cours de la période, plutôt que par le calcul de l'écart-type.

8. Agrégation saisonnière des séries temporelles de données climatiques et atmosphériques

Une deuxième étape de l'étude a pour but d'analyser les séries chronologiques de trois catégories de variables : les comptages annuels de rennes dans deux sous-régions (voir la cartographie en **fig. 6**), les valeurs des indices de circulation atmosphérique à échelle régionale à continentale ; et les variables climatiques, principalement représentées par les températures et les précipitations, dont l'épaisseur du manteau neigeux, de la station météorologique d'Abisko (68° 21' N, 18° 48' E). Dans un premier temps, on sélectionne les données concernées par la période 1999-2013, pas de temps commun à la majorité des jeux de données exploitées (voir le **tableau 1**). Les données climatiques et atmosphériques journalières sont agrégées (calcul de la moyenne ou des totaux) à l'échelle mensuelle, puis saisonnière selon les découpages temporels météorologiques et pastoraux, et enfin à l'échelle annuelle. On prend par exemple les températures moyennes journalières des mois de septembre-octobre-novembre 2000 pour obtenir la valeur moyenne agrégée de l'automne météorologique 2000. Le processus est répété pour chaque variable atmosphérique ou climatique locale selon le découpage en saisons météorologiques ou pastorales (voir le **tableau 2**). L'agrégation saisonnière prend en compte le décalage existant entre les séries chronologiques climatiques et celles de la démographie du renne. Les décomptes des cheptels ont lieu à la fin de la période d'abattage hivernal (de septembre à mars), quand les populations annuelles sont à leur minimum, après l'hiver et avant le vêlage. Nous avons retenu comme date de référence le mois de mars, utilisé pour les décomptes de rennes à l'échelle de la Scandinavie[56]. L'agrégation des variables atmosphériques et climatiques de l'année biologique est ensuite opérée pour l'année précédant le comptage. Par exemple, l'individu statistique « 2000 » est décrit par les décomptes de rennes de mars 2000 et les variables climatiques calculées au cours de la période précédant cette date (d'avril 1999 à mars 2000). On obtient

56 Alessia Uboni, Tim Horstkotte, Elina Kaarlejärvi *et al.*, « Long-Term Trends and Role of Climate in the Population Dynamics of Eurasian Reindeer », *Plos One*, vol. 11, n° 6, 2016.

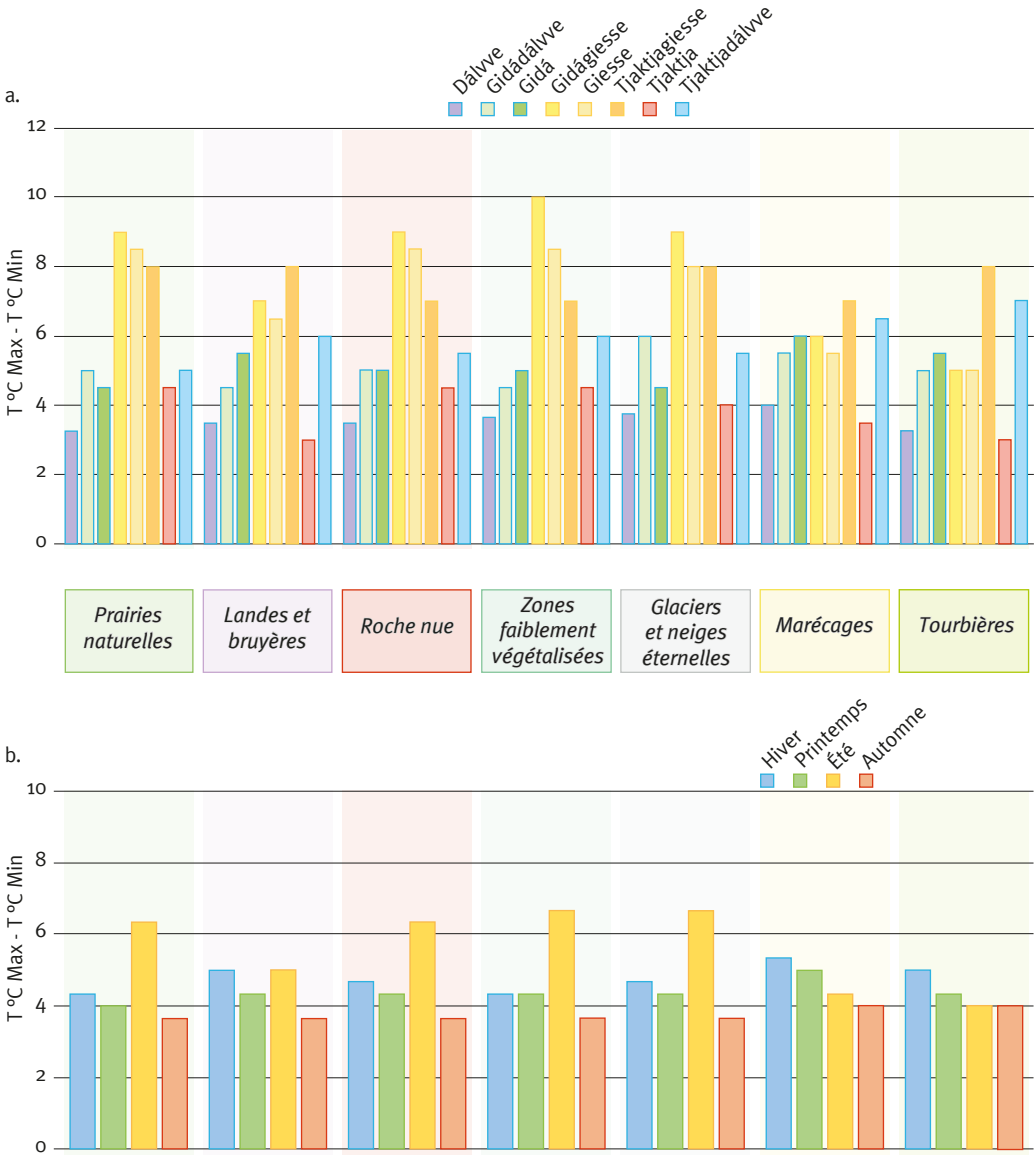
donc 72 variables climatiques et atmosphériques, annuelles et saisonnalisées, en plus des 8 variables annuelles de démographie des cheptels. Ces 80 variables sont soumises au test de corrélation par rang de Spearman. Contrairement au coefficient de corrélation de Bravais-Pearson, la méthodologie par rangs nous permet de nous affranchir de la non-stationnarité et la non-linéarité de certaines variables démographiques, atmosphériques ou climatiques[57].

La non-stationnarité de certaines séries chronologiques signifie que celles-ci n'ont pas une distribution statistique gaussienne, ou symétrique. Si le coefficient de corrélation linéaire de Bravais-Pearson mesure l'intensité du lien linéaire entre deux variables statistiques à distribution normale, les coefficients de corrélation par rangs (Spearman ; Kendall) nous affranchissent de certaines des contraintes statistiques liées à la non-stationnarité des données environnementales. En discrétisant ces données temporelles continues, de natures et unités différentes (indices de circulation atmosphérique, variables climatiques locales, sous-produits d'images satellites, comptages annuels de rennes), les coefficients de corrélations par rangs décèlent plus facilement un lien monotone (qu'il soit linéaire, polynomial, etc.), à l'échelle pluriannuelle (1999-2013). Un test du Khi² est finalement appliqué afin de tester l'hypothèse d'indépendance entre le nombre de coefficients de corrélation et le type de découpage saisonnier d'une part, et de variables (climatiques ou atmosphériques) d'autre part. À titre complémentaire, nous avons analysé les données d'abattage des rennes, afin de vérifier leurs relations avec différents facteurs (effectifs des rennes, variables climatiques, économies, observations de prédateurs). Ces variables ayant une distribution normale, nous avons utilisé le test de corrélation de Bravais-Pearson et la corrélation linéaire multiple.

UNE DESCRIPTION PLUS PRÉCISE DES VARIABLES BIOCLIMATIQUES DÉCOUPÉES SELON LE CALENDRIER PASTORAL

Les résultats décrits ici sont décomposés en trois sous-parties. Une première analyse concerne la variabilité saisonnière moyenne des températures de surface des sols pour le comté du Nord-Botnie selon différents habitats écologiques et les deux calendriers saisonniers. Après avoir établi le lien entre les températures à la surface du sol et les températures de l'air, on s'intéressera au nombre de corrélations entre variables atmosphériques et climatiques saisonnalisées et décomptes annuels de rennes semi-domestiqués pour deux sous-régions pastorales du comté de Nord-Botnie. Finalement, nous proposerons une analyse de ces corrélations.

57 Niels Stenseth, Geir Ottersen, James Hurrell *et al.*, « Studying Climate Effects on Ecology Through the use of Climate Indices », art. cit.



9. Variabilité des températures de sols dans différents habitats du comté de Nord-Botnie

a. Selon les saisons pastorales
b. Selon les saisons météorologiques

Sources : MODIS 11A2 ; CLC 06 ; réalisation : R. Courault (2016).

Distribution saisonnière de la variabilité des températures de surface des sols à l'échelle du comté de Nord-Botnie

La **figure 9** représente la variabilité des températures de surface du sol au cours de la période 2000-2010 en fonction des habitats écologiques (axe horizontal) et du découpage calendaire pastoral ou météorologique (**fig. 9a** et **b**, respectivement). L'échelle de l'axe vertical est identique pour les deux séries d'histogrammes. Pour chaque habitat, les saisons sont exprimées par des plages de couleur allant du violet-bleu (hiver et saisons hivernales du calendrier pastoral) au rouge (période automnale).

Les deux découpages saisonniers rendent compte de la forte variabilité intra-annuelle du bilan radiatif. À la latitude du comté de Nord-Botnie (entre 65° et 69° N), le rayonnement solaire est quasi continu au solstice d'été, devenant progressivement nul lors de la nuit arctique hivernale. Le différentiel interannuel des températures de surface des sols est faible pendant les mois d'hiver et d'automne : les températures diurnes et nocturnes sont proches et basses, il n'y a pas d'échauffement journalier. C'est notable pour le découpage des températures de surface des sols selon les saisons du calendrier pastoral, où la saison *Dálvve* (plein hiver, de décembre à mars) présente des différentiels de températures de sols inférieurs à 4 °C dans tous les habitats (**fig. 9a**).

Le faible écart des températures de sols pour les mois froids s'oppose aux grands écarts interannuels de températures moyennes de surface du sol caractérisant les mois chauds. C'est particulièrement visible pour la saison estivale (juin-juillet-août) du calendrier météorologique, ou le plein été pastoral (*Giesse*). Ici, le différentiel important de températures de surface peut s'expliquer par les possibilités d'échauffement différentes selon la nébulosité, les précipitations convectives des années de la période d'étude. Les températures de surface du sol (restant généralement supérieures à 10 °C) permettent la croissance végétative et la floraison de la végétation alpine (landes à saules, éricacées, prairies d'herbacées…), procurant aux rennes qui pâturent en été des ressources caloriques intéressantes.

La variabilité entre les habitats écologiques semble être dépendante de leur distribution géographique et de la densité de végétation qu'ils représentent. Le différentiel de températures de surface des sols est plus important dans les habitats dont la couverture végétale est faible (cas des « zones faiblement végétalisées ») où il atteint 10 °C aux saisons estivales du calendrier pastoral (**figure 9a**), ainsi que des zones de « glaciers et neiges éternelles », les zones de roches nues et les prairies naturelles, où la variabilité interannuelle atteint 9 °C. À l'opposé, les habitats caractérisés par une couverture végétale plus continue et une biomasse plus importante, et/ou par la présence d'eau en surface (landes et bruyères, tourbières, zones humides) se caractérisent par des différentiels de températures de surface des sols plus faibles. Ainsi, plus on est proche de l'été

boréal, plus les températures de surface varient, restant conditionnées par la localisation des habitats écologiques (altitude, longitude), ainsi que par leur nature biophysique (inertie thermique plus importante pour les habitats à dominante végétale ou aquatique notamment).

La comparaison entre le découpage saisonnier météorologique et le découpage pastoral nous avait montré une précision plus importante des saisons pastorales, deux fois plus nombreuses que les saisons météorologiques classiques. Hormis pour la saison estivale, les différentiels de températures de surface agrégés selon les quatre saisons météorologiques ont tendance à être peu marqués à l'intérieur du même habitat écologique, en particulier pour les landes, les marécages et les tourbières (< 5 °C, **fig. 9b**). La précision du découpage saisonnier pastoral affine la caractérisation du régime thermique inter et intra-saisonnier des habitats écologiques où pâture le renne. C'est lors des pâturages et des saisons estivales du calendrier pastoral que les variations de températures de surface des sols sont les plus fortes (de 8 à 10 °C). Les conditions de croissance de l'herbe sont donc très variables pendant ces saisons stratégiques pour la reconstitution des réserves graisseuses du renne.

En conclusion, la nature biogéographique des habitats et le régime thermique annuel sont deux facteurs structurant la variabilité thermique interannuelle. Cette variabilité est plus forte pour les saisons chaudes, dans les habitats écologiques estivaux et selon le découpage saisonnier pastoral. Les corrélations très fortes entre les moyennes de températures à la surface des sols et les moyennes de températures de l'air pour la station d'Abisko (> 0,9 ; p-value = 0,0001 pour tous les habitats) permettent de restreindre le nombre de variables bioclimatiques testées dans la deuxième partie de l'étude.

Les effectifs de rennes semi-domestiques influencés par la variabilité du climat

La recherche de relations dépendantes entre variables démographiques et variables climatologiques saisonnalisées constitue le deuxième volet de cette étude. Le **tableau 3** permet de comparer les performances des tests de corrélation par rang de Spearman, en fonction de l'agrégation selon le calendrier météorologique ou pastoral (partie gauche du tableau 3), du choix entre les variables climatologiques ou atmosphériques (partie droite) et des catégories de rennes (âge, sexe, localisation, lignes du tableau). Les coefficients de corrélation comptabilisés pour estimer cette performance sont supérieurs à r = 0,4 avec une p-value inférieure à 0,05, exprimant ainsi des liens significatifs entre les caractères climatiques et les observations démographiques[58]. Les performances

58 Selon la table des corrélations de Spearman, dépendant du nombre d'observations de l'échantillon (ici 15 années).

Tableau 3. Nombre de corrélations significatives entre la démographie des rennes, les découpages temporels et les variables climatiques
Sources : Parlement saami, NCEP (NOAA), NCDC (NOAA) ; réalisation : R. Courault (2016)

	Variables saisons météorologiques	Variables saisons pastorales	Indices d'oscillations atmosphériques	Variables climatiques locales
Femelles – Nord-Botnie	2	4	6	0
Faons – Nord-Botnie	0	2	1	1
Mâles – Nord-Botnie	0	3	2	1
Total – Nord-Botnie	1	1	2	0
Femelles – Concession	1	1	2	0
Faons – Concession	4	5	6	3
Mâles – Concession	2	3	4	1
Total – Concession	0	2	2	0
Total corrélations significatives	10	21	25	6

des variables calculées à l'échelle de l'année sont négligeables (une seule corrélation significative sur 48 couples de variables).

Rôle du type de calendrier – Pour l'ensemble des 62 variables saisonnières (climatiques et atmosphériques) et des 8 variables démographiques dont les liens ont été testés, 10 corrélations sont significatives entre les variables agrégées selon le calendrier météorologique et la démographie des rennes, alors que c'est le cas de 21 avec les variables agrégées selon le calendrier pastoral local. Cette surreprésentation n'est toutefois pas significative après examen par le test du Khi². Elle s'explique en effet par le nombre plus important de saisons agrégées selon le calendrier pastoral (8 saisons pour le calendrier pastoral saami ; contre 4 saisons équitablement réparties pour le calendrier météorologique).

Rôle des indices de circulation atmosphériques – Les indices de circulation présentent un nombre de relations significatives quatre fois plus important (25 corrélations, **tableau 3**) que les séries temporelles décrivant différents facteurs climatiques locaux (6 corrélations, tableau 3). Cette surreprésentation est significative d'après le test du Khi² ($p = 0{,}004$).

Rôle des territoires pastoraux – Les populations de rennes décomptées dans la concession pastorale présentent, toutes catégories confondues, un nombre plus important de corrélations significatives ($n = 18$) par rapport à celles du Norrbotten ($n = 13$). Cette différence n'est toutefois pas significative d'après le test du Khi² ($p > 0{,}05$). Il en est de même pour les catégories démographiques, dont on sait d'après le test qu'on ne peut significativement les discriminer selon leur réponse statistique aux variables climatiques.

Les variables saisonnalisées présentant une corrélation significative avec plus de trois sous-catégories de population de rennes sont présentées dans le **tableau 4**. Cela ne concerne que les indices de circulation atmosphérique saisonnalisés, et pas les variables climatiques locales. Sur les 5 variables saisonnalisées en colonne, on en comptabilise 3 calculées selon le découpage pastoral saami. Les oscillations nord-atlantiques et est-atlantiques/ouest-Russie sont plus fréquemment corrélées avec les effectifs de rennes que l'indice de blocage scandinave. Du point de vue saisonnier, seules les saisons estivales et automnales sont représentées : juin-juillet-août ; septembre-octobre-novembre ainsi que *Giesse* (plein été) et Čakčagiesse *[tjaktjagiesse]* (été tardif). Pour les deux sous-régions, les périodes estivales et automnales semblent donc importantes pour au moins 3 sous-effectifs de rennes semi-domestiqués.

La variable « EATL/WRUS_ Čakčagiesse » est statistiquement corrélée avec 6 des 8 sous-catégories démographiques. La robustesse des coefficients de corrélations ($-0{,}6 > r < -0{,}9$) et leur significativité ($p < 0{,}0001$) suggèrent l'importance de cette saison pastorale de fin d'été dans les dynamiques de population de *Rangifer*. Les corrélations sont négatives : plus l'anomalie d'oscillation est-atlantique/ouest-Russe est négative (conditions météorologiques locales plus chaudes que la moyenne), plus les populations de rennes augmentent. Il existe aussi, de façon cohérente, une corrélation positive ($r = 0{,}57$) entre les effectifs de mâles de la sous-région pastorale Nord-Botnie (les mieux corrélés à l'anomalie négative de EATL/WRUS) et les températures moyennes en août. Le signe opposé est rencontré pour les corrélations relatives à la variable « EATL/WRUS_ *Giesse* », signifiant que pour les sous-catégories concernées (rennes mâles de la sous-région Nord-Botnie ; mâles et total du cheptel de la sous-région Concession), les conditions chaudes associées aux anomalies négatives d'oscillation est-atlantique/ouest-Russie de plein été (*Giesse*) sont ici défavorables aux troupeaux.

Pour finir, l'indice de blocage scandinave en saison automnale (**tableau 4**) est significativement et négativement corrélé avec le total des effectifs de rennes de la sous-région Nord-Botnie et avec les effectifs de femelles des deux cheptels : les fortes anomalies positives de cet indice sont associées à des décomptes annuels en fléchissement.

Tableau 4. Matrice des corrélations entre les variables saisonnalisées et les comptages de rennes

Variables	NAO_juin-juil.-août	SCAND_sep.-oct.-nov.	NAO_*Giesse*	EATL/WRUS_*Giesse*	EATL/WRUS_ Čakčagiesse
Femelles – Nord-Botnie	**– 0,632**	**– 0,6**	**– 0,543**	0,018	– 0,252
Faons – Nord-Botnie	0,121	– 0,375	0,209	0,221	***– 0,845***
Mâles – Nord-Botnie	0,214	– 0,375	0,222	0,529	***– 0,892***
Total – Nord-Botnie	– 0,346	**– 0,589**	– 0,257	– 0,018	– 0,466
Femelles – Concession	– 0,021	**– 0,589**	0,068	0,361	**– 0,785**
Faons – Concession	**0,743**	– 0,004	**0,733**	0,504	**– 0,742**
Mâles – Concession	**0,536**	– 0,079	**0,615**	**0,571**	**– 0,668**
Total – Concession	0,246	– 0,464	0,268	**0,546**	***– 0,849***

En gras : p < 0,05 ; gras italique : p < 0,001. NAO, « oscillation nord-atlantique » ; EA/WR,« oscillation est-atlantique/ouest-Russe » ; SCAND, « Oscillation scandinave » ; Giesse, « pleine saison estivale » ; Čakčagiesse, « début d'automne ».
Sources : Parlement saami, NCDP (NOAA), NCDC (NOAA) ; réalisation : R. Courault (2016)

Ces anomalies correspondent à des conditions atmosphériques localement stables, anticycloniques et froides. Les effectifs de rennes abattus sont corrélés à la fois à la variable « EATL/WRUS_ Čakčagiesse » ($r = -0{,}637$, $p = 0{,}011$) et plus significativement au prix subventionné de la viande de renne ($r = 0{,}701$, $p = 0{,}004$), les deux variables explicatives étant négativement corrélées ($r = -0{,}653$, $p = 0{,}008$). Les modèles de régression linéaire multiple (pas à pas, ascendant, descendant) dont le p du test de Fisher est le plus faible ($p = 0{,}004$) sélectionnent seulement la variable prix subventionné (r^2 ajusté = 0,452), les résidus normalisés positifs les plus importants du modèle concernent les années 2005 (1,75) et 2006 (2,19), où les abattages et les effectifs sont les plus importants de la période. Les régressions linéaires sans sélection de modèles retiennent les deux variables, elles expliquent davantage de variance (r^2 ajusté = 0,472), mais sont moins significatives ($p = 0{,}009$).

DISCUSSION

La variabilité temporelle des cheptels est importante au cours de notre période d'étude. Les conditions climatiques saisonnières modulent en effet le sexe-ratio lors du vêlage[59]. Dans notre cas d'étude, sur la période de comptage disponible, le ratio de femelles augmente pour les troupeaux à comportement migratoire des communautés saamies de Nord-Botnie, mais pas pour ceux de la Concession. Outre les effets de la variabilité climatique, cela pourrait être lié à une recherche de contrôle de la domesticité des troupeaux, les mâles ayant tendance à disperser les cheptels, rendant la gestion pastorale plus difficile[60].

59 Robert Weladji & Øystein Holand, « Influences of Large-Scale Climatic Variability on Reindeer Population Dynamics », art. cit.

60 Yves Delaporte & Marie Michèle Roué, *Une communauté d'éleveurs de rennes*, *op. cit.*

C'est dans les habitats écologiques constituant les pâturages des mois d'été, selon le calendrier pastoral et la biologie de *Rangifer tarandus* L.[61], que l'on observe la plus forte variabilité des températures au sol. Les conditions de pousse de l'herbe et par conséquent de reconstitution des réserves graisseuses des rennes pendant la saison estivale sont donc très variables pendant notre période d'étude, contribuant à expliquer les variations démographiques des populations de rennes et les difficultés rencontrées par les éleveurs saamis[62]. La relative stabilité des températures de surface en hiver observées pendant la période d'étude peut néanmoins masquer une variabilité de la qualité de la couche neigeuse, importante pour la survie des rennes[63].

Les très fortes corrélations observées entre la démographie des rennes et les conditions climatiques de la fin de la période estivale s'expliquent car celle-ci est cruciale pour la reconstitution des réserves énergétiques des rennes semi-domestiqués, en particulier pour la croissance des faons et leur résistance aux conditions hivernales difficiles. D'après les échanges que nous avons eus avec les éleveurs saamis, lors des restitutions annuelles de nos résultats au Parlement saami, les rennes sont encore couverts par leur pelage d'été, ce qui les rend vulnérables à des conditions froides et humides. Ceci est confirmé par la littérature[64]. La forte variabilité des températures de sols pour cette saison, déjà évoquée, fragilise ainsi les rennes, pas encore phénologiquement/biologiquement parés pour les chutes soudaines du thermomètre caractérisant cette période de l'année[65]. En outre, l'arrivée de la période du rut automnal demande une forte disponibilité en ressources herbacées et en champignons. Le stockage adipeux est nécessaire, notamment lors de la mise en concurrence entre les mâles ; au cours des parades nuptiales ; pendant la gestation des femelles qui les suit, et durant la descente du piémont en direction du golfe de Botnie pour l'hiver[66]. Bien que les effectifs abattus soient corrélés avec les effectifs de rennes et avec l'anomalie climatique de fin d'été, ce sont essentiellement les variations des prix subventionnés qui expliquent leur variance. Des enquêtes complémentaires seraient toutefois utiles afin de démêler le rôle du climat de

61 David Klein, « Variation in Quality of Caribou and Reindeer Forage Plants Associated with Season, Plant Part, and Phenology », *Rangifer*, vol. 10, n° 3, 1990, p. 123-130.

62 Nicholas Tyler, Johan Mathis Turi, Monica Sundset, Kirsti Bull *et al.*, « Saami Reindeer Pastoralism Under Climate Change: Applying a Generalized Framework for Vulnerability Studies to a Sub-Arctic Social-Ecological System », art. cit.

63 Samuel Roturier & Marie Roué, « Of Forest, Snow and Lichen », art. cit.

64 Jocelyne Fernandez, *Parlons lapon. Les Sames, langue et culture*, Paris, L'Harmattan, 1997.

65 Håkan Tunón & Brita Stina Sjaggo, *Ajddo – reflektioner kring biologisk mångfald i renarnas spår*, *op. cit.*

66 Bruce Forbes & Timo Kumpula, « The Ecological Role and Geography Of Reindeer (*Rangifer tarandus*) in Northern Eurasia », art. cit. ; Robert Weladji & Øystein Holand, « Influences of Large-Scale Climatic Variability on Reindeer Population Dynamics », art. cit.

fin d'été et des stratégies économiques d'abattage, qui semblent interagir lors des années de maximum démographique.

L'inversion de la corrélation pour le même indice de circulation atmosphérique entre deux saisons pastorales voisines (plein été, juin-juillet, été tardif, août) illustre une certaine complexité des dynamiques environnementales. L'avancée ou le retard des rennes dans leur déplacement et l'exploitation des pâturages de plein été (saulaies, landes, prairies alpines…), est dépendante de la disponibilité (biomasse disponible), la phénologie et la qualité des espèces fourragères (qualités nutritionnelles et digestibilité des herbacées et des jeunes pousses de bouleaux). La pleine activité reproductive des insectes piqueurs (moustiques, mouches) a également lieu en juillet[67]. Ces insectes, vecteurs d'agents pathogènes pour l'ongulé, obligent ce dernier à monter en altitude et à marcher face au vent dominant pour éviter les désagréments[68]. Les conditions plus fraîches et plus sèches que la normale durant la phase positive d'est-atlantique/ouest-Russe, favorable aux cheptels pour le plein été (juin-juillet), pourraient par exemple avoir une influence sur les cycles saisonniers des insectes. Quant aux corrélations négatives entre l'indice de blocage scandinave (automnes secs et froids) et la démographie des rennes, elles sont cohérentes avec l'effet défavorable de ces conditions climatiques sur la quantité et la qualité des premières couches neigeuses annuelles, conditionnant l'accessibilité aux lichens sous-jacents pendant l'hiver suivant[69].

Des réserves sont toutefois à émettre à propos des variables saisonnalisées présentant des corrélations de signes opposés avec les populations de rennes. Premièrement, la taille absolue des deux populations totales (10 fois plus d'individus pour la sous-région Norrbotten) vient nuancer les interprétations. De plus, les catégories (mâles, femelles, faons) présentent des évolutions temporelles différenciées, ce qui complexifie les liens entre natalité et mortalité, directement imputables à la variabilité atmosphérique et climatique. Troisièmement, des modes de gestion divergents (espace plus restreint pour les cheptels de la concession, apports artificiels en foin l'hiver, etc.) pourraient expliquer les réponses biologiques opposées à l'aléa climatique en plein été. Ces pratiques pastorales justifieraient le faible nombre de corrélations entre les

67 Rolf I. Hagemoen & Eiger Reimers, « Reindeer Summer activity Pattern in Relation to Weather and Insect Harassment », *Journal of Animal Ecology*, vol. 71, n° 5, 2002, p. 883-892.

68 Delphine Kuntz, *Ostéométrie et migration(s) du renne (*Rangifer tarandus*) dans le Sud-Ouest de la France au cours du dernier Pléniglaciaire et du Tardiglaciaire (21500-13000 cal BP)*, *op. cit.*

69 Jan Åge, Riseth, Hans Tømmervik, Elina Helander-Renvall *et al.*, « Sámi Traditional Ecological Knowledge as a Guide to Science: Snow, Ice and Reindeer Pasture Facing Climate Change », art. cit.

décomptes et les variables climatiques, sans que nous puissions exclure le rôle de l'imprécision des dates de comptage dans les données sources. En outre, les indices de circulation atmosphérique EATL/WRUS et de NAO se caractérisent par leurs faibles occurrences au cours des mois d'été[70]. L'apparition inhabituelle de ces régimes de circulation atmosphérique aurait alors une incidence sur les cheptels au cours du plein été ou de l'été tardif.

Pour finir, soulignons que les meilleures corrélations entre climat et démographie des rennes, obtenues en découpant le calendrier selon les saisons pastorales, sont en cohérence avec la définition de ces saisons. Les saisons saamies sont décrites en fonction du cycle biologique du renne, du cycle phénologique des ressources pastorales, dont les éleveurs ont une connaissance fine, ainsi que de l'organisation sociale liée à l'élevage[71]. Quant aux meilleures corrélations climat/démographie des rennes obtenues en utilisant les indices atmosphériques, elles confirment les résultats observés pour d'autres variables (Éricacée, *Cassiope tetragona*, et rennes de l'archipel du Svalbard[72], *Rangifer tarandus platyrhynchus* L. ; cheptels semi-domestiques du nord de la Norvège[73]).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette première approche par échelles spatiales et temporelles emboîtées a montré dans un premier temps que la variabilité interannuelle des températures du sol est plus importante en saison estivale et dans les habitats estivaux, particulièrement lorsque l'on retient le découpage en saisons saamies. Dans un deuxième temps, les températures au sol dans les différents habitats à l'échelle régionale sont corrélées avec les températures de surface de la station d'Abisko. Enfin, les variations des effectifs des cheptels de rennes du comté de Nord-Botnie sont significativement liées aux anomalies positives et négatives des indices régionaux atmosphériques estivaux et automnaux. Les corrélations les plus élevées et significatives sont là encore obtenues en découpant le calendrier selon les saisons saamies. Ces résultats suggèrent une sensibilité marquée des

70 En particulier pour l'indice est-atlantique/ouest-Russe, voir Michel Mesquita, Kjell Erikstad *et al.*, « There is More to Climate than the North Atlantic Oscillation: a New Perspective from Climate Dynamics to Explain the Variability in Population Growth Rates of a Long-lived Seabird », *Frontiers in Ecology and Evolution*, vol. 3, n° 43, 2015, p. 1-14, en ligne : https://doi.org/10.3389/fevo.2015.00043

71 Håkan Tunón & Brita Stina Sjaggo, *Ajddo – reflektioner kring biologisk mångfald i renarnas spår*, *op. cit.*

72 Ronny Aanes, Bernt-Erik Sæther, Fiona Smith *et al.*, « The Arctic Oscillation Predicts Effects of Climate Change in Two Trophic Levels in a High-arctic Ecosystem », art. cit.

73 Romain Courault *et al.*, « Régimes de circulation atmosphérique, impact du changement climatique et variation démographique des rennes dans le nord de la Scandinavie », art. cit.

troupeaux de rennes aux saisons relativement anormales du point de vue de la circulation atmosphérique.

Toutefois, le pas de temps relativement court (1999-2013) mériterait d'être allongé, pour une prospection plus longue des tendances, cycles et variabilités entre séries chronologiques bioclimatiques et démographie des cheptels. Le forçage externe lié au changement climatique est mieux visible sur les séries temporelles atmosphériques et climatiques, à échelle pluri-décennale. Des décomptes de rennes sur de plus longues périodes seraient donc nécessaires pour vérifier ces premiers résultats. Une méta-analyse de la littérature scientifique mettant en lien occurrences des régimes de circulation atmosphérique, types de temps saisonniers régionaux et effets environnementaux dans le nord de l'Europe pourrait nous aider à mieux comprendre les interrelations entre facteurs directs et indirects dans l'écologie de *Rangifer tarandus* L.

D'autres données sur la phénologie des formations végétales permettraient d'identifier et d'expliquer plus clairement les liens entre variabilité climatique, cycle migratoire et variabilité démographique des cheptels semi-domestiqués[74]. Des données topographiques autoriseraient le calcul d'un indice de sensibilité topo-climatique aux processus de fonte-regel pouvant influencer l'accessibilité verticale des ressources fourragères hivernales selon les conditions d'enneigement. Cette étude devrait aussi être étendue aux habitats hivernaux du renne (forêts de résineux, non intégrées dans cette étude). À l'échelle d'une communauté, des décomptes plus précis sur le plan temporel permettraient de renforcer nos conclusions quant aux liens entre climat hivernal et décomptes de rennes.

Enfin, la composante humaine du système pastoral d'élevage de rennes semi-domestiqués en Scandinavie ouvre des perspectives particulièrement intéressantes. Le processus de domestication concerne autant la gestion pastorale directe par les éleveurs et les autorités suédoises que les questions d'habituation aux effets de la fragmentation des paysages de migration saisonnière des rennes. Un travail de terrain alliant relevés de végétation, discussions avec les scientifiques, gestionnaires et éleveurs de rennes permettra ainsi d'alimenter la réflexion commune autour de la vulnérabilité et de la résilience du système pastoral, et de la pérennisation de cette espèce clé des écosystèmes subarctiques.

74 Romain Courault, Nicolas Delbart & Marianne Cohen, « Suivi phénologique de la végétation des régions subarctiques scandinaves : des réponses contrastées au changement climatique », communication lors de la journée « Variabilité et changement climatique : impacts sur les sociétés », université Paris-Diderot– Association Internationale de Climatologie – COP21/CMP11, 13 octobre 2015.

VERSION ABRÉGÉE FRANÇAISE

IMPACTS DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE SUR LA DÉMOGRAPHIE DES RENNES EN LAPONIE SUÉDOISE : DE L'INTÉRÊT DU CALENDRIER PASTORAL

Le renne semi-domestiqué (*Rangifer tarandus* L.) constitue une ressource naturelle et culturelle pour les éleveurs saamis. En Laponie suédoise, l'activité pastorale, traditionnellement semi-nomade, s'effectue entre les pâturages d'altitude estivaux et les paysages de forêts boréales en hiver. Ce système d'élevage est de plus en plus menacé par le changement climatique qui modifie l'accessibilité et la disponibilité des ressources végétales et perturbe les migrations saisonnières et la démographie des rennes semi-domestiques. On s'interroge ici sur les temporalités climatiques ayant une incidence sur les habitats écologiques et sur les effectifs démographiques annuels des troupeaux de rennes. Pour cela, on compare deux types de découpage saisonnier : celui en quatre saisons météorologiques utilisé en climatologie et les saisons pastorales usitées par les éleveurs de rennes saamis (Saami Parliement). Parallèlement, on compare l'intérêt des variables climatiques locales et des indices atmosphériques régionaux pour évaluer l'impact de la variabilité climatique sur la démographie des rennes. La période d'étude 1999-2013 est choisie du fait de la disponibilité des sources, ainsi que sa postériorité à une rupture statistique des types de temps régionaux et locaux observée en 1988 (1950-2013).

Dans un premier temps, on caractérise la variabilité temporelle des températures de surface des sols (MODIS) pour différents habitats écologiques de la région de Nord-Botnie (Suède, CLC 2006). Le découpage temporel en saisons pastorales rend mieux compte de l'irrégularité des températures de surface des sols des habitats écologiques de Rangifer tarandus L., que le découpage en quatre saisons météorologiques. On effectue ensuite des tests de corrélation (type Spearman) entre indices atmosphériques régionaux (NOAA-NCEP), climatologie locale (station d'Abisko, NOAA-NCDC, 1998-2013) et comptages annuels de deux grands cheptels du comté Nord-Botnie distinguant faons, mâles et femelles (1999-2013, Saami Parliement). Les conditions climatiques de fin d'été, saison pastorale correspondant à une période de repos et de reconstitution des réserves énergétiques de l'ongulé, sont les mieux corrélées avec les effectifs de rennes ; elles sont en effet déterminantes pour l'ongulé capitalisant les ressources énergétiques pour sa survie et sa reproduction (« capital-breeder »). Les variables atmosphériques sont également plus souvent et mieux corrélées avec la démographie des rennes comparativement aux variables climatiques. Les effectifs abattus sont corrélés avec les décomptes de rennes, mais dépendent préférentiellement des prix subventionnés de la viande.

Le calendrier pastoral saami permet donc de bien appréhender l'irrégularité climatique et son impact sur la démographie des rennes. Quant à l'effet de l'irrégularité climatique il est mieux démontré en utilisant des variables synthétiques d'échelle régionale que des variables locales.

LONG ABSTRACT

IMPACTS OF CLIMATE VARIABILITY ON REINDEER DEMOGRAPHICS IN SWEDISH LAPLAND: THE METHODOLOGICAL RELEVANCE OF THE PASTORAL CALENDAR.

The semi-domesticated reindeer (*Rangifer tarandus* L.) is a natural and cultural resource for Saami herders. The pastoral activity in Swedish Lapland is traditionally semi-nomadic, and takes place between the summer mountain pastures and boreal forest landscape in winter. This breeding system is increasingly threatened by climate change, altering the accessibility and availability of plant resources and disrupting seasonal migration and demography of semi-domesticated reindeer. This study is focussed on the effect of climate time scales on ecological habitats and on the annual demography of reindeer herds. Two types of time slicing are compared: the four season's weather used in climatology, and the pastoral seasons used by Saami reindeer herders (Saami Parliement). Meanwhile, the advantages of local climatic variables are compared to regional atmospheric indices, in an effort to determine of the impact of climate variability on the demography of reindeer. The study focus on the 1999-2013 period, in regards to the availability of sources, and because it is later to a statistical breakdown of regional and local weather types observed in 1988 (1950-2013).

First, we characterize the temporal variability of land surface temperatures (MODIS) for different ecological habitats of the North Bothnia region (Sweden, CLC 2006). Time slicing in pastoral seasons better reflects the irregularity of land surface temperatures of the *Rangifer tarandus* L.'s ecological habitats, than the four weather seasons. Correlation tests are then performed (Spearman type) between regional atmospheric indices (NOAA-NCEP), local climatology (Abisko station, NOAA-NCDC, 1998-2013) and annual headcounts of two large herds of Norrbotten County, distinguishing fawns, male and female (1999-2013, Saami Parliement). Climatic conditions of late summer, the pastoral season being to a period of rest and regeneration of the ungulate species, correlate with reindeer population the best; they are indeed crucial to the ungulate species to capitalize energy resources for its survival and reproduction ("capital-breeder"). Atmospheric variables are more frequently and better correlated with the demography of reindeer compared to climatic variables. The number of killed reindeer is correlated with annual headcounts, but it also depends from the subsidized price of the meat.

The Saami pastoral calendar allows a clear view of the climatic irregularity and of its impact on the demography of reindeer. The effects of climate irregularity is shown more clearly when using synthetic variables on a regional scale than local variables.

TABLE DES MATIÈRES

Milieux extrêmes et critiques face au changement climatique.
Climats, Territoires, Environnement
Marianne Cohen & Christian Giusti 9

Encadré. Climat : étymologie, signification locale et questions autour d'un mot 14

PREMIÈRE PARTIE
MILIEUX CRITIQUES ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

Hydrologie et production agricole dans le nord-ouest de l'Amazonie
Josyane Ronchail, Tatiana Schor, Jhan Carlo Espinoza, Manon Sabot, Heitor Pinheiro, Percy Gomez, Guillaume Drapeau, Véronique Michot, Naziano Filizola, Jean-Loup Guyot, Benjamin Sultan, Jean-Michel Martinez 27

Changement climatique et viticulture
Hervé Quénol 57

Perception des aléas côtiers. Le cas de la société insulaire oléronaise (France)
David Chionne 79

Utilité d'un diagnostic systémique pour appréhender l'adaptabilité d'un système territorial : application à la Camargue sous la menace de la montée des eaux
Sophie Liziard & Christine Voiron-Canicio 105

DEUXIÈME PARTIE
MILIEUX EXTRÊMES ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

Changements climatiques et agriculture :
impacts et adaptation en Afrique de l'Ouest
Benjamin Sultan, Richard Lalou, Laurent Kergoat, Bénédicte Gastineau & Théo Vischel ... 139

Impacts de la variabilité climatique sur la démographie des rennes en Laponie suédoise : de l'intérêt du calendrier pastoral
Romain Courault, Marianne Cohen, Sonia Saïd & Josyane Ronchail 155

Modélisation de l'impact du changement climatique sur trois aires de distribution végétales dans le Mercantour
Matthieu Vignal & Julien Andrieu 195

TROISIÈME PARTIE
LONGUE DURÉE QUATERNAIRE

Occupations humaines et dynamiques environnementales du Paléolithique à l'âge du bronze, secteur d'Adam, sultanat d'Oman. Conséquences régionales de la variation du signal hydroclimatique sur le long terme
Tara Beuzen-Waller, Guillaume Gernez, Jessica Giraud, Stéphane Desruelles, Anaïs Marrast, Stéphanie Bonilauri, Marion Lemée, Amir Beshkani, Julien Guery, Raphaël Hautefort & Éric Fouache 225

Conclusion
Laurence Eymard 271

APPENDICE

Changement climatique et ressource en eau en Himalaya. Enquêtes auprès de villageois dans quatre unités géographiques du bassin de la Koshi, Népal
Olivia Aubriot, Joëlle Smadja, Ornella Puschiasis, Thierry Duplan, Juliette Grimaldi, Mickaël Hugonnet & Pauline Buchheit 273

Rôle du climat et de l'agriculture dans l'étiologie de la maladie de Kawasaki
Joseph Boyard-Micheau, Xavier Rodó, Roger Curcoll, Joan Ballester & Josep Anton Morgui 274

Changement climatique et occupation humaine en Arabie du Sud au cours du Quaternaire récent
Anne-Marie Lézine 275

Reconstitution des interactions entre l'évolution climatique et l'anthropisation de la vallée d'Ambato (nord-ouest de l'Argentine) depuis 2000 ans
Bernarda Marconetto 276

L'impact des crises hydroclimatiques passées sur la gestion de l'eau en zones urbaines : le cas de Marseille aux XVIII^e^ et XIX^e^ siècles
Nicolas Maughan 277

L'observatoire lyonnais du climat : premiers retours sur une approche pluridisciplinaire d'adaptation au changement climatique
Dominique Soto, Florent Renard, Emmanuel Thimonier-Rouzet, Frédéric Kuznik, Luce Ponsar, Corinne Hooge, Lionel Soulhac, Christina Aschan-Leygonie, Alain Brisson, Ph. Mary & D. Saulnier 278