

RÉGIMES DE CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE, IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET VARIATION DÉMOGRAPHIQUE DES RENNES DANS LE NORD DE LA SCANDINAVIE

COURAULT R. ⁽¹⁾, COHEN M. ⁽²⁾, RONCHAIL J. ⁽³⁾

(1) UMR 8185 ENeC, Paris IV, Maison de la Recherche, 28 rue Serpente 75006 Paris [romain.courault@paris-sorbonne.fr]

(2) UMR 8185 ENeC, Paris IV, Maison de la Recherche, 28 rue Serpente 75006 Paris [marianne.cohen@paris-sorbonne.fr]

(3) UMR 7159 LOCEAN, Paris VII, Boîte 100-4, place Jussieu, 75252 Paris CEDEX 05 [josyane.ronchail@locean-ipsl.upmc.fr]

Résumé – Afin de mieux comprendre le système climatique en Laponie, et les impacts du changement climatique sur l'élevage traditionnel de rennes, on croise les séries temporelles de quatre indices de circulation atmosphérique avec des données climatiques de districts où l'évolution démographique des cheptels est renseignée. Entre 1950 et 2013, on observe une occurrence plus grande de la NAO + hivernale à partir de 1981, au détriment de l'indice de SCAND. De 1967 à 2013, la tendance générale est au réchauffement, avec augmentation d'occurrence des anomalies positives d'AO et de NAO en hiver, diminution des journées froides et de la profondeur de la neige en automne, favorables aux troupeaux de rennes. Les fluctuations démographiques de rennes sauvages au Svalbard sont positivement corrélées à l'Oscillation Arctique.

Mots-clés : Changement climatique, régimes de circulation atmosphérique, Laponie, Rangifer tarandus L.

Abstract – Atmospheric circulation patterns, impact of climate change and reindeer demographic changes in northern Scandinavia. To better understand the climate system in Lapland and impacts of climate change on traditional reindeer husbandry, we crossed time series of atmospheric circulation indexes with climate data from nearby districts where demographic changes of herds are informed. For 1950-2013, increasing occurrence of the winter NAO is observed from 1981 at the expense of SCAND. From 1967 to 2013, the overall trend is warming with increasing occurrence of positive anomalies of AO and NAO in winter and decreasing in cold days and snow depth in autumn beneficial on reindeer. Population fluctuations of wild reindeer in Svalbard are positively correlated to the Arctic Oscillation.

Keywords: climate change, atmospheric circulation pattern, Lapland, Rangifer tarandus L.

Introduction

Une meilleure compréhension du système climatique dans le nord de la Scandinavie

En Atlantique Nord, le système climatique est principalement piloté par l'Oscillation Nord Atlantique (Stenseth *et al.*, 2003), régime basé sur un indice de différentiel de pression entre les Açores et l'Islande. Cet indice, ainsi que plusieurs autres (Oscillation Arctique : AO, Anticyclone scandinave : SCAND, Oscillation Est-Atlantique/Ouest Russie: EATL/WRUS), synthétisent l'état de l'atmosphère et les mesures associées (pression, températures, etc.) en plusieurs points géographiques (stations). Antoniadou *et al.* (2001) expliquent et prédisent les températures hivernales du centre de l'Angleterre à partir des pressions de surface en Islande.

Proposer des pistes d'explication des dynamiques écologiques subarctiques

Les indices d'oscillations atmosphériques constituent des variables pertinentes pour comprendre la variabilité des paramètres écologiques, notamment la démographie des rennes *Rangifer* sp. (Aanes *et al.*, 2002). Ces herbivores, dont le positionnement trophique est capital pour les toundras arctiques et les forêts boréales (Väisänen, 2014), pourraient constituer une sentinelle bioclimatique précieuse. Dans le cas du renne semi-domestiqué, les anthropologues ont montré que les éleveurs Samis employaient des catégories très précises pour désigner la stratigraphie et la densité de la couche neigeuse, déterminantes pour l'accès des rennes au lichen, principale ressource alimentaire pendant la saison froide (Roturier, Roué 2009 ; Riseth *et al.*, 2010).

Au regard de ces constats, deux hypothèses sont formulées. La première concerne la tendance au réchauffement et à l'augmentation des précipitations dans le nord de la Scandinavie sous l'impact du changement climatique global et de l'occurrence croissante

d'anomalies positives de NAO. Une deuxième hypothèse a trait à l'impact de ces changements sur la couche neigeuse et sur les effectifs de populations de rennes sauvages en Norvège continentale et insulaire. Une première partie s'attache à décrire les ruptures temporelles et les tendances des données atmosphériques et climatiques de températures et de précipitations dans trois stations météorologiques de Norvège et de Suède. On vérifiera par la suite les liens existants entre les données climatiques, dont celles concernant la couche neigeuse, les indices de circulation atmosphérique et les effectifs de rennes pour deux grandes régions de Norvège : l'île de Svalbard (vallées de migration) et la Laponie norvégienne (pâtures de printemps du Finnmark et de Troms).

1. Matériel et méthodes

1.1. Indices de circulation atmosphérique et données climatiques

Les données de quatre indices de circulation atmosphérique (AO, NAO, SCAND, EATL/WRUS) sont disponibles de 1950 à 2013 (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data>). Les indices NAO, SCAND, et EATL/WRUS sont trois « modèles de téléconnexion de première importance affectant l'Eurasie tout au long de l'année », car ils structurent la circulation atmosphérique à l'échelle de l'Eurasie (Barnston & Livezey, 1987). L'indice OA est une vue hémisphérique de la circulation atmosphérique (ou paradigme annulaire, Ambaum *et al.*, 2003). Les anomalies positives d'AO et de NAO se manifestent en Europe du nord par des températures et précipitations plus élevées que la moyenne, en particulier en hiver. L'anomalie positive de SCAND se manifeste par un fort blocage des cellules anticycloniques en Scandinavie, tandis qu'un indice positif d'EATL/WRUS traduit des pressions plus faibles que la moyenne en Europe orientale.

Trois stations climatiques ont été choisies de façon à disposer de séries temporelles comparables (1967-2013) dans les régions où des données de comptages de rennes sont disponibles (figure 1). Nous avons utilisé les données mensuelles de températures et de précipitations, ainsi que des données journalières de profondeurs de neige et de températures. Nous avons déterminé le nombre de journées où les températures sont inférieures à -5°C , à l'échelle de l'année et des saisons météorologiques. Ces températures froides sont favorables à la constitution d'une couche de neige sèche, de densité moyenne et homogène que les rennes peuvent fouiller avec leur museau pour atteindre le lichen (Ferland, 1968 ; Riseth *et al.*, 2010).

1.2. Données de comptages de rennes

Les effectifs annuels de rennes sont renseignés entre 1979 et 1999 au Svalbard (<https://www.abds.is>), et entre 1999 et 2011 en Laponie norvégienne (<https://www.ssb.no/statistikbanken>).

Les dénombrements de *Rangifer tarandus tarandus* L. sont déclarés au printemps par les éleveurs de Norvège continentale. Pour les hardes de rennes du Spitzberg (*Rangifer tarandus platyrhynchus* Vrolik, 1829), le suivi démographique a été réalisé dans trois vallées du Svalbard (figure 1). Afin de mieux prendre en compte la réponse biologique du renne aux aléas climatiques des automnes et hivers précédents, les effectifs ont été décalés d'un an pour les analyses bivariées. L'utilisation de séries statistiques sur l'état de la couche neigeuse et les effectifs de rennes permet de mieux comprendre l'impact de l'irrégularité climatique sur l'élevage de rennes. Ces données sont utilisées ici de préférence aux données sur la perception des saisons hivernales par les éleveurs de rennes Samis, provenant d'enquêtes anthropologiques réalisées par Marie Roué, Adèle de Palaminy (MNHN) et Samuel Roturier

(AgroParisTech), que nous avons précédemment comparées à une modélisation graphique de données climatiques (Courault *et al.*, 2014).

1.3. Méthodologies employées

Les calculs de tendances temporelles et les tests de rupture sont appliqués aux données d'indices atmosphériques et climatiques pour détecter les changements intervenus depuis les années 50-60 jusqu'à aujourd'hui. Les matrices de corrélation de Pearson visent à détecter les liens existants entre variables climatiques et indices atmosphériques, puis sur des périodes plus courtes entre ces variables et les effectifs de rennes d'après les comptages (tableau 1).

Tableau 1. Traitements statistiques opérés sur les séries temporelles climatiques et écologiques.

Séries chronologiques	Traitements statistiques		
Indices de circulation atmosphérique (annuels, saisonniers, mensuels)	1950-2013 : Tests de rupture (Pettitt) 1967-2013 : Calcul de tendances linéaires	1967-2013 : Matrice de corrélation (Pearson)	1979-1999; 1999-2011 Matrice de corrélation (Pearson)
Variables climatiques locales (annuelles, saisonnières, mensuelles, journalières)	1950-2013 (station d'Abisko) : Tests de rupture (Pettitt) 1967-2013 : Calcul de tendances linéaires		
Effectifs de rennes (<i>Rangifer</i> sp.)			

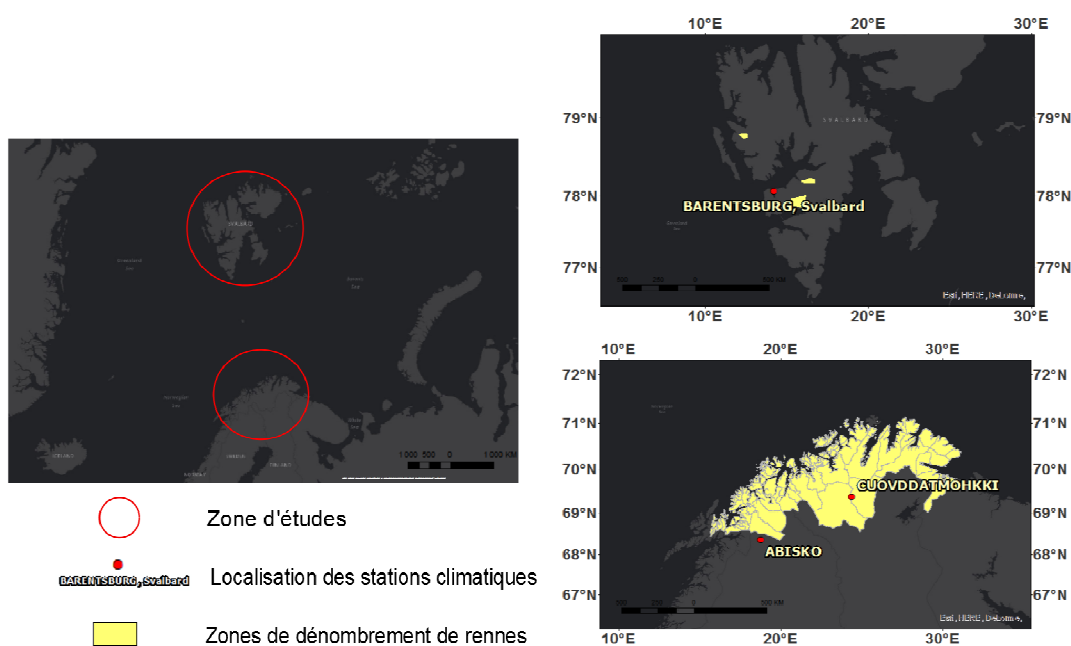


Figure 1. Localisation des zones d'étude (stations météorologiques, zones de dénombrement de rennes). Sources: ESRI, Diva-gis.com, abds.is

2. Résultats

2.1. Périodisation des variables atmosphériques et climatiques

Plusieurs intervalles sont délimités entre 1950 et 2013 par les tests de rupture dans la station d'Abisko. Les ruptures se produisent dès le début des années 80 pour les précipitations et les indices d'oscillations climatiques, plus tardivement pour les températures, à la fin des

années 80 (tableau 2). Les températures hivernales sont moins froides après 1989, et les anomalies hivernales positives d'AO et de NAO plus intenses.

Les tendances les plus marquées au cours de la période 1967-2013 sont observées pour les indices EATL/WRUS annuel et automnal et SCAND annuel. Les indices annuels et hivernaux de SCAND tendent à diminuer avec le temps, alors que l'Oscillation Arctique tend à augmenter quelle que soit la saison (indices annuels, automnaux, hivernaux). Les anomalies annuelles et automnales de NAO tendent à diminuer, alors que c'est l'inverse pour la saison hivernale, approchant les +0.5 en fin de tendance temporelle (tableau 3). Les variables les mieux corrélées avec le temps sont les températures annuelles dans les trois stations, ainsi que les températures hivernales et les précipitations annuelles à Cuovddatmohkki. L'augmentation des températures moyennes annuelles s'accroît à mesure qu'augmente la latitude, suggérant un gradient nord-sud dans l'intensité du réchauffement climatique. Les précipitations annuelles augmentent à Abisko et Cuovddatmohkki (respectivement +69 et +96 mm), alors qu'elles diminuent de 40 mm à Barentsburg (Svalbard).

Tableau 2. Test de Pettitt et p-values associées pour les indices de circulation et les variables climatiques de la station d'Abisko (1950-2013)

Variable	Période	1950-1988	1988-2013	p-value
T°C moy	Année	-0.923°C	+0.272°C	< 0.0001
	Hiver	-10.99°C	-8.744°C	<0.002
P (mm)	Année	1950-1980 288.6 mm	1981-2013 338.7 mm	p-value 0.006
	NAO	Hiver	-0.294	+0.329
1950-1982			1983-2013	p-value
AO	Année	-0.274	+0.016	0.012
		1950-1987	1988-2013	p-value
AO	Hiver	-0.642	+0.064	0.017
		1950-1978	1979-2013	p-value
SCAND	Année	+0.307	-0.003	< 0.0001

Tableau 3. Tendances temporelles linéaires des indices atmosphériques et des variables climatiques annuelles et saisonnières

Période	Indices	R ²	Δ1967-2013	Station	T°C		P (mm)	
					R ²	Δ1967-2013	R ²	Δ1967-2013
Année	NAO	0.0146	-0.16	Abisko	0.273	+1.75°C	0.098	+69.27 mm
D-J-F		0.0403	+0.498		0.085	+2.41°C	0.014	+4 mm
S-O-N		-0.025	-0.37		0.185	+1.84°C	0.028	+15.1 mm
Année	AO	0.0059	+0.11	Cuovddatmohkki	0.237	+2.26°C	0.142	+95.7 mm
D-J-F		0.0088	+0.38		0.075	+2.46°C	0.109	+19.4 mm
S-O-N		0.0031	+0.10		0.219	+3°C	0.021	+15.7 mm
Année	SCAND	0.1057	-0.37	Barentsburg	0.428	+3.6°C	0.015	-39.7 mm
D-J-F		0.0108	-0.24		0.339	+6.89°C	8 ^E -05	-1.65 mm
S-O-N		0.0052	+0.15		0.088	+2.3°C	0.008	+16.1 mm
Année	EATL/WRUS	0.1557	-0.51					
D-J-F		0.0002	+0.03					
S-O-N		0.1242	-0.79					

2.2. Liens entre indices de circulation atmosphérique, variables climatiques locales et démographie de Rangifer sp.

Le tableau 4 présente les coefficients de corrélation entre variables climatiques, indices atmosphériques et effectifs de rennes. Les fortes corrélations entre les indices AO et NAO suggèrent une forte correspondance entre ces deux indices de circulation atmosphérique. La

corrélation négative entre AO d'hiver et SCAND hivernal traduirait l'existence de deux types de circulation atmosphérique antagonistes structurant les saisons hivernales européennes. Les précipitations hivernales d'Abisko sont positivement corrélées avec l'indice hivernal d'AO et négative avec SCAND hivernal. Une anomalie positive d'AO est tendanciellement associée à des précipitations hivernales importantes, contrairement à l'anomalie scandinave positive.

Parmi les variables climatiques construites pour comprendre l'effet du climat sur les rennes, le nombre de jours où la température est suffisamment froide pour que la couche neigeuse soit plus facilement exploitable par les rennes est négativement corrélé avec l'indice AO annuel et hivernal. La tendance à l'augmentation de l'indice AO est donc bien associée à des conditions climatiques moins favorables à la couche neigeuse. Il en est de même pour les profondeurs de neige et l'indice SCAND en novembre, mois où s'établit la première couche de neige. Elle est importante pour le reste de la saison hivernale, selon les éleveurs (Riseth *et al.* 2010).

Tableau 4. Echantillon des matrices de corrélations entre variables atmosphériques, climatiques locales, et démographie du renne. « DJF » : décembre-janvier-février ; « DJF_Tcuovd » : moyenne hivernale T°C à Cuovddatmohkki ; « DFJ_Pabisko » : cumuls hivernaux de précipitations (mm) à Abisko ; « An_Abisko_NBdayTmax<-5 » : Nombre de journées par an où la T°C maxi est inférieure à -5°C à Abisko

	AO_an	AO_DJF	NAO_an	NAO_DJF	SCAND_DJF	SCAND_SON	SCAND_Novembre	EATL_WRUS_DJF	DJF_Tabisko	DJF_Pabisko	DJF_Tcuovd	An_Abisko_NBdayTmax<-5	Nov_Abisko_moy_prof_neige
AO_an	1	0,698	0,701	0,510	-0,430	0,041	-0,037	0,364	0,524	0,609	0,394	-0,679	0,044
AO_DJF	0,698	1	0,488	0,813	-0,599	0,222	0,139	0,421	0,698	0,581	0,582	-0,631	0,071
NAO_an	0,701	0,488	1	0,384	-0,334	-0,013	-0,043	0,243	0,259	0,357	0,185	-0,505	0,049
NAO_DJF	0,510	0,813	0,384	1	-0,470	0,151	0,093	0,227	0,646	0,281	0,567	-0,544	0,203
SCAND_DJF	-0,430	-0,599	-0,334	-0,470	1	-0,245	-0,280	-0,266	-0,189	-0,605	0,009	0,472	0,084
SCAND_SON	0,041	0,222	-0,013	0,151	-0,245	1	0,550	0,107	0,098	0,166	0,069	-0,493	-0,457
SCAND_Novembre	-0,037	0,139	-0,043	0,093	-0,280	0,550	1	-0,045	-0,141	0,109	-0,157	-0,338	-0,681
EATL_WRUS_DJF	0,364	0,421	0,243	0,227	-0,266	0,107	-0,045	1	0,425	0,581	0,169	-0,307	0,104
DJF_Tabisko	0,524	0,698	0,259	0,646	-0,189	0,098	-0,141	0,425	1	0,462	0,895	-0,525	0,194
DJF_Pabisko	0,609	0,581	0,357	0,281	-0,605	0,166	0,109	0,581	0	1	0,216	-0,352	-0,102
DJF_Tcuovd	0,394	0,582	0,185	0,567	0,009	0,069	-0,157	0,169	0,895	0,216	1	-0,478	0,273
An_Abisko_NBdayTmax<-5	-0,679	-0,631	-0,505	-0,544	0,472	-0,493	-0,338	-0,307	-0,525	-0,352	-0,478	1	0,151
Nov_Abisko_AVERAGEsnwd	0,044	0,071	0,049	0,203	0,084	-0,457	-0,681	0,104	0,194	-0,102	0,273	0,151	1

p-value ≤ 0,0001

p-value ≤ 0,05

Les effectifs de rennes de Svalbard sont positivement corrélés avec les anomalies positives d'AO d'hiver ($r = 0,486$, $p = 0,030$) et EATL/WRUS d'hiver ($r = 0,515$, $p = 0,020$). Concernant les rennes de Norvège, on observe des corrélations entre la NAO d'hiver et les effectifs de rennes dans seulement deux districts : Polmak / Varanger ($r = -0,593$; p -value = 0,033) et Vest-Finmark ($r = -0,580$, p -value = 0,038).

Discussion et perspectives

Les tendances linéaires calculées confirment la plupart des observations déjà réalisées. Il est en effet admis que les occurrences de NAO sont plus élevées après les années 90 (Hurrell, 1995 ; Antoniadou *et al.*, 2001). Les tests de rupture montrent le rôle de charnière joué par l'année 1979 : « Une transition particulièrement abrupte s'est produite au cours de l'hiver 1979-1980, vers des phases positives récurrentes, l'atmosphère restant bloqué dans ce mode [NAO] jusqu'à l'hiver 1994-1995 » (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml>).

Les résultats de notre étude confirment l'analyse d'Aanes *et al.* (2002) : l'AO semble être un meilleur prédicteur de l'évolution démographique des rennes sauvages que la NAO. Nos résultats suggèrent une meilleure correspondance entre variables écologiques (effectifs démographiques de rennes) et indices atmosphériques de large échelle, plutôt qu'avec les variables climatiques locales. Ceci avait déjà été démontré par Aanes *et al.* (2002) et par

Stenseth *et al.* (2003). Ces résultats préliminaires posent la question des répercussions du climat sur le positionnement trophique de deux sous-espèces de *Rangifer*. Les troupeaux de rennes sauvages du Spitzberg seraient favorisés par des indices positifs d'AO, associé à des températures plus douces, suggérant que le desserrement de la contrainte thermique hivernale leur serait favorable à ces latitudes. Pour les rennes semi-domestiques, les oscillations hivernales semblent au contraire défavorables aux cheptels, mais ceci n'est vérifié que dans deux districts.

Des périodes de dénombrement de rennes plus longues seraient utiles pour vérifier ces premiers résultats. Une perspective pourrait être de créer un indice régional expliquant, voire prédisant une partie de la variabilité démographique des rennes semi-domestiqués (*Rangifer tarandus* L.) et de calculer les moyennes climatiques selon un découpage temporel adapté aux calendriers pastoraux.

Références bibliographiques

- Aanes R., Sæther B. E., Smith F. M., Cooper E. J., Wookey P. A., Øritsland N. A., 2002 : The Arctic Oscillation predicts effects of climate change in two trophic levels in a high-arctic ecosystem. *Ecology Letters*, **5**(3), 445-453.
- Ambaum M. H., Hoskins B. J., Stephenson D. B., 2001 : Arctic oscillation or North Atlantic oscillation? *J. of Climate*, **14**(16), 3495-3507.
- Antoniadou T., Besse P., Fougères A. L., Le Gall C., Stephenson D. B., 2001 : L'Oscillation Atlantique Nord (NAO) et son influence sur le climat européen. *Revue de statistique appliquée*, **49**(3), 39-60.
- Barnston A.G., Livezey R.E., 1987 : Classification, seasonality, and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1083-1126.
- Courault R., Roué M., Cohen M., Palaminy A. De, Roturier S., 2014 : *Anomalie de circulation atmosphérique sur le climat en Laponie suédoise, perception des variabilités par les éleveurs de rennes Saami, et sélection d'années-types pour un suivi par indice de végétation*. Communication à l'atelier Climat et Impacts, GEOPS/LSCE/IPSL, 17-18 novembre, Université Paris XI.
- Ferland M., 1968 : Les régimes de température accompagnant les chutes de neige. *Cahiers de géographie du Québec*, **12**(25), 145-152.
- Hurrell J. W., 1995 : Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, **269**(5224), 676-679.
- Riseth J.A., Tømmervik H., Helander-Renvall E., Labba, N., Johansson C., Malnes E., Bjerke J.W., Jonsson C., Pohjola V., Sarri L.-E., Schanche A., Callaghan T.V., 2010 : Sámi traditional ecological knowledge as a guide to science: snow, ice and reindeer pasture facing climate change. *Polar Record*, **47**(03), 202-217.
- Roturier S., Roué M., 2009 : Of forest, snow and lichen: Sámi reindeer knowledge of winter pastures in northern Sweden. *Forest Ecology and Management*, **258**, 1960-1967.
- Stenseth N. C., Ottersen G., Hurrell J. W., Mysterud A., Lima M., Chan K. S., Ådlandsvik B., 2003 : Studying climate effects on ecology through the use of climate indices: the North Atlantic Oscillation, El Nino Southern Oscillation and beyond. *Proc. Royal Soc. London B: Biological Sciences*, **270**(1529), 2087-2096.
- Väisänen M., 2014 : "Ecosystem-level consequences of climate warming in tundra under differing grazing pressures by reindeer", *Acta Univ. Oul.*, A 645, University Oulu Graduate School; University of Oulu, Faculty of Science, Dep. of Biology; University of Lapland, Arctic Centre.