



HAL
open science

Les paysages culturels de l'élevage de rennes en Scandinavie face au changement global Une approche multi-scalaire (Laponie suédoise, Sud norvégien)

Romain Courault

► **To cite this version:**

Romain Courault. Les paysages culturels de l'élevage de rennes en Scandinavie face au changement global Une approche multi-scalaire (Laponie suédoise, Sud norvégien). Géographie. Sorbonne Université, 2018. Français. NNT : . tel-03637820

HAL Id: tel-03637820

<https://hal.science/tel-03637820>

Submitted on 11 Apr 2022

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.



SORBONNE UNIVERSITÉ

ÉCOLE DOCTORALE DE GEOGRAPHIE DE PARIS

Laboratoire de recherche Espaces, Nature et Culture

T H È S E

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ SORBONNE UNIVERSITÉ

Discipline : Géographie

Présentée et soutenue par :

Romain COURAULT

le 5 décembre 2018

**Les paysages culturels de l'élevage de rennes en
Scandinavie face au changement global
Une approche multi-scalaire (Laponie suédoise, Sud
norvégien)**

Sous la direction de :

Mme Marianne COHEN – Professeur des Universités, Sorbonne-Université - Faculté des
Lettres

Membres du jury :

M. Frédéric ALEXANDRE – Professeur des Universités, Université Paris-XIII

M. Daniel JOLY – Directeur de Recherche, Université Bourgogne Franche-Comté

Mme Céline CLAUZEL – Maître de Conférence, Paris-Diderot Paris 7

Mme Alexandra LAVRILLIER – Maître de Conférence, Université Versailles-Saint Quentin
en Yvelines

M. Robert WELADJI – Associate Professor, Concordia University



Remerciements

Je tiens avant toute chose à remercier Marianne Cohen, Professeur des Universités à la Faculté des Lettres de Sorbonne-Université. Depuis le programme PATERMED, en passant par la Catalogne jusqu'aux forêts tourbeuses de Laponie suédoise, je vous suis immensément reconnaissant pour tout ce que j'y ai appris, mais aussi pour votre confiance, votre bienveillance et la liberté intellectuelle accordées.

Pour l'examen de ce travail de thèse, je remercie aussi chaleureusement les membres de mon jury, en premier lieu mes rapporteurs MM. Frédéric Alexandre, Professeur des Universités à Paris-XIII et Daniel Joly, Directeur de Recherche à l'Université de Bourgogne Franche-Comté. Mes remerciements également à M. Robert Weladji, Professeur-associé à l'Université de Concordia, Mme Alexandra Lavrillier, Maître de Conférence à l'Université Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines et Mme Céline Clauzel, Maître de Conférence à l'Université Paris-Diderot Paris 7.

Pour leur patience pédagogique, leurs conseils avisés et hautement spécialisés, tout au long de la thèse, je tiens à remercier Mme Josyane Ronchail, Maître de Conférence à l'Université Paris-Diderot Paris 7, Mme Clélia Bilodeau, Maître de Conférence à l'Université Paris-Diderot Paris 7, M. Nicolas Delbart, Maître de Conférence à l'Université Paris-Diderot Paris 7, Mme Sonia Saïd, Chargée d'Etude et de Recherche à l'Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage (ONCFS).

Mes remerciements en direction de l'équipe et des étudiant.e.s du projet ENVEXX, cette aventure dans l'aventure.

Mes remerciements aux membres du laboratoire Espaces, Nature et Culture, particulièrement les doctorant.e.s avec qui j'ai pu passer du temps, rire, discuter, apprendre, collaborer. Mes remerciements aussi vers les membres gestionnaires du laboratoire, qui m'ont permis de partir sur le terrain ou en conférences aussi librement que je le souhaitais.

Il faut remercier le Pôle-Image et à ses membres, où j'ai pu passer du temps à traiter mes données en tout confort et simplicité, faire des réunions à l'arrachée parfois, accueillir des étudiant.e.s en stage, que je remercie également pour leur curiosité.

Mes remerciements au Laboratoire de Géographie Physique de Paris-Diderot Paris 7, dans lequel j'ai pu stocker mes herbiers, mes échantillons de végétaux, et passer du temps à faire de la reconnaissance botanique.

Je tiens à remercier la Station Scientifique d'Abisko, pour son accueil ouvert et feutré, la bibliothèque magnifique donnant vue sur le vert tendre des bouleaux et le bleu profond du lac en contrebas, entre deux relevés floristiques. A mes camarades de chambrée avec qui j'ai pu partager mes repas et discuter dans un anglais japonisant, indien, british, allemand, américain à propos de nos sujets de recherches, de nos bonheurs ou nos malheurs dans la tourbe ou en montagne.

Mes plus grands remerciements aussi au Parlement saami de Kiruna, qui m'a accueilli, écouté et donné ses retours avisés quand ils le pouvaient.

De grands mercis à mes amis, mes proches et ma famille qui m'ont soutenu tout au long de cette entreprise.

Résumé / Abstract

Les paysages culturels de l'élevage de rennes en Scandinavie face au changement global : une approche multi-scalaire (Laponie suédoise, Sud norvégien)

Résumé

Les régions subarctiques font face aux effets interconnectés et pluri-scalaires du changement global (amplification des extrêmes bioclimatiques et intensification dans l'utilisation des sols). Le renne, *Rangifer tarandus* est un grand herbivore qui migre annuellement sur de grands espaces pour ses besoins biologiques. L'ongulé cristallise de nombreux enjeux paysagers pour les pastoralismes saamis. Plusieurs populations de rennes seront étudiées dans un suivi multi-scalaire. Nous évaluons les effets directs du changement global (fragmentation paysagère et changements climatiques) sur les paysages culturels de Scandinavie en lien avec la démographie des rennes. Par la suite, la descente en échelle géographique nous permet de caractériser via satellite et relevés floristiques les effets du changement global sur les paysages végétaux de la communauté montagnarde d'éleveurs Gabna, dans le nord de la Suède. Nous étudions ensuite les comportements migratoires des rennes sauvages norvégiens, pour appréhender les liens entre variabilité bioclimatique et écologie spatiale de l'herbivore. Les résultats principaux rejoignent ceux de la littérature scientifique, appliqués aux espaces étudiés : régionalement, changement des climats et pertes significatives en pâturages ; localement, boréalisation et embroussaillage des paysages migratoires. Les liens forts entre une partie des effets cumulés du changement global et la biogéographie scandinave de *Rangifer tarandus* sont ainsi discutés. L'approche paysagère dans les problématiques environnementales complexes (revendication territoriale) a révélé l'importance de l'éthique dans le dialogue science/minorités.

Mots-clés : Climatologie, biogéographie, pastoralisme saami, changement climatique, fragmentation paysagère, *Rangifer tarandus*

Cultural landscapes of the Scandinavian reindeer herding facing the global change: a multi-scalar approach (Swedish Lapland, southern Norway)

Summary

Subarctic areas are currently facing the inter-related and multi-scalar effects of the global change (bioclimatological extremes amplification, land uses intensification). Reindeer, *Rangifer tarandus* is a corpulent migratory herbivorous specie which migrates annually over large distances to insure its biological needs. The arctic ungulate crystallize numerous landscape issues for the saami pastoralism. Several reindeer populations are studied in a multi-scalar survey. We assess the direct effects of global change (landscape fragmentation and climate changes) on the cultural landscapes of Scandinavia by testing links with reindeer' dynamics of population. Thereafter, we downscale to characterize via remote sensing and floristic surveys the effects of the global change on vegetal landscapes of the Gabna herders' community (northern Sweden). We then study migratory patterns of wild reindeer (Norway) to better understand links between the bio-climatological variability and the arctic ungulate' spatial ecology. Main results converge with scientific literature, applied to our studied cases: specific signal of climate change and land loss regionally, and locally borealization and shrubification of the migratory landscapes. Strong links between a part of the cumulated effects of the global change and the Scandinavian biogeography of *Rangifer tarandus* are then discussed. The landscape approach dealing with the complex environmental issues (land claim) also underlines the meaning of ethics for discussions between sciences and minorities.

Keywords : Climatology, biogeography, saami pastoralism, climate change, landscape fragmentation, *Rangifer tarandus*

Table des matières

REMERCIEMENTS	5
RESUME / ABSTRACT	7
TABLE DES MATIERES.....	9
INTRODUCTION GENERALE.....	13
I - ETAT DES CONNAISSANCES : LE RENNE, ESPECE-SENTINELLE DES EFFETS DU CHANGEMENT GLOBAL DANS LE NORD DE L'EUROPE	22
<i>A - Introduction.....</i>	22
<i>B - Le changement climatique et ses conséquences sur les écosystèmes et leur organisation spatiale</i>	23
<i>C - Le renne, espèce-clé des écosystèmes arctiques et subarctiques</i>	32
<i>D - Le renne, marqueur paysager des paysages de l'élevage semi-nomade en Laponie scandinave</i>	43
<i>E - Conclusion : enjeux méthodologiques et pistes de travail</i>	47
PREMIERE PARTIE : QUANTIFIER LES EFFETS REGIONAUX DU CHANGEMENT GLOBAL SUR LES PAYSAGES CULTURELS DE L'ELEVAGE DE RENNES EN SCANDINAVIE	49
II - LA FRAGMENTATION DES PAYSAGES DE L'ELEVAGE DE RENNES : UNE ETUDE DE CAS EN LAPONIE SUEDOISE.....	50
<i>A - Introduction.....</i>	50
<i>B - Région d'étude, matériel et méthodes</i>	53
<i>C - Résultats</i>	60
<i>D - Interprétation et discussion.....</i>	63
<i>E - Conclusion et perspectives.....</i>	65
TRANSITION ENTRE LE CHAPITRE II ET CHAPITRE III	68
III - CYCLES, TENDANCES ET VARIABILITES DES CLIMATS SUBARCTIQUES, ET LEURS LIENS AVEC LA DEMOGRAPHIE DES CHEPTELS DE RENNES.....	70
<i>A - Introduction.....</i>	70
<i>B - Matériel et méthodes</i>	71
<i>C - Résultats</i>	74
<i>D - Discussion et perspectives</i>	76
TRANSITION ENTRE LE CHAPITRE III ET LE CHAPITRE IV:.....	78
IV - IMPACT DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE SUR LA DEMOGRAPHIE DES RENNES SEMI-DOMESTIQUES DU COMTE DU NORD-BOTNIE : L'INTERET DU CALENDRIER PASTORAL	80
<i>A - Introduction.....</i>	80
<i>B - Traitements géomatiques et statistiques : agrégation des séries chronologiques.....</i>	90
<i>C - Une description plus précise des variables bioclimatiques découpées selon le calendrier pastoral</i>	98

<i>D - Discussion</i>	106
<i>E - Conclusions et perspectives</i>	108
TRANSITION ENTRE LA PREMIERE PARTIE ET LA DEUXIEME PARTIE.....	110
DEUXIEME PARTIE : DYNAMIQUES SPATIO-TEMPORELLES DES PAYSAGES VEGETAUX DE L'ECOTONE	
TÁÏGA – TOUNDRA, UNE APPROCHE PAR LA TELEDETECTION	114
V - SUIVI DE LA VARIABILITE INTERANNUELLE ET DECENNALE DES FORMATIONS VEGETALES DE LA COMMUNAUTE	
D'ELEVEURS GABNA PAR IMAGERIE MODIS 13Q1 ET MISE EN LIEN AVEC LES DYNAMIQUES CLIMATIQUES ET DEMOGRAPHIQUES	
DES RENNES.....	115
<i>A - Introduction</i>	115
<i>B - Matériel</i>	117
<i>C - Méthodes</i>	125
<i>D - Résultats</i>	130
<i>E - Discussion, perspectives et conclusion</i>	145
TRANSITION ENTRE LE CHAPITRE V ET LE CHAPITRE VI	155
VI - SUIVI DIACHRONIQUE DE L'EVOLUTION DES DATES DE DEMARRAGE PHENOLOGIQUE DES PATURAGES SAISONNIERS DE	
LA COMMUNAUTE D'ELEVEURS DE RENNES SEMI-DOMESTIQUES GABNA (COMTE DU NORRBOTTEN, SUEDE).....	157
<i>A - Introduction</i>	157
<i>B - Matériel et méthodes</i>	158
<i>C - Résultats</i>	170
<i>D - Conclusions, discussions et perspectives</i>	179
TRANSITION ENTRE LE CHAPITRE VI ET LE CHAPITRE VII	182
VII - SUIVI DIACHRONIQUE DE L'EVOLUTION DE LA VEGETATION PAR SATELLITE DE MOYENNE RESOLUTION SPATIALE	
(CAPTEUR LANDSAT) DE LA COMMUNAUTE D'ELEVEURS DE RENNES GABNA (COMTE DU NORRBOTTEN, SUEDE)	184
<i>A - Introduction</i>	184
<i>B - Matériel et méthodes</i>	186
<i>C - Résultats</i>	194
<i>D - Discussion, conclusions et perspectives</i>	203
TRANSITION ENTRE LA DEUXIEME PARTIE ET LA TROISIEME PARTIE.....	208
TROISIEME PARTIE : QUANTIFIER ET QUALIFIER LES PAYSAGES VEGETAUX DE L'ELEVAGE DE RENNES	
DU NORD DE LA SCANDINAVIE : PRESENT ET FUTUR	210
VIII - LE TERRAIN EN LAPONIE SUEDOISE : APPROCHE GENERALE, PROTOCOLE DES RELEVES FLORISTIQUES ET MISE EN PLACE	
DES DISCUSSIONS AVEC LES PARTIES-PRENANTES RENCONTREES	211
<i>A - Stratégie d'échantillonnage des relevés floristiques : suivi temporel par satellite, diversité</i>	
<i>paysagère et ressources pastorales</i>	212
<i>B - Les protocoles de relevés floristiques et physiologiques, édaphiques, et radiométriques</i>	223

<i>C - Travailler en biogéographie sur une problématique environnementale nordique : discussions avec les parties – prenantes</i>	241
TRANSITION ENTRE LE CHAPITRE VIII ET LE CHAPITRE IX.....	251
IX - PHYSIONOMIE ET DIVERSITE DES FORMATIONS VEGETALES DE LA COMMUNAUTE GABNA D'ELEVEURS DE DE RENNES (NORRBOTTEN, SUEDE).....	253
<i>A - Introduction</i>	253
<i>B - Physionomie et diversité des relevés floristiques: traitement de données</i>	254
<i>B - Résultats : représentativité spatiale et physionomie des relevés de végétation</i>	274
<i>C - Conclusion et discussion</i>	293
TRANSITION ENTRE LE CHAPITRE IX ET LE CHAPITRE X.....	296
X - VALEUR PASTORALE ACTUELLE DES PAYSAGES VEGETAUX DE LA COMMUNAUTE D'ELEVEURS DE RENNES GABNA ET ESTIMATIONS DES CHANGEMENTS POUR LE FUTUR.....	298
<i>A - Introduction</i>	298
<i>B - Construction des tableaux de valeurs pastorales saisonnières à l'aide des inventaires floristiques</i>	299
<i>C - Les valeurs pastorales saisonnières de la communauté d'éleveurs Gabna</i>	304
<i>D - Les températures attendues à l'horizon 2050 dans l'aire de vèlage des troupeaux de la communauté Gabna : variabilité écologique et altitudinale</i>	312
<i>E - Conclusions et discussion</i>	320
TRANSITION ENTRE LA TROISIEME ET LA QUATRIEME PARTIE	322
QUATRIEME PARTIE : ECOLOGIE SPATIALE DU RENNE (RANGIFER TARANDUS) : SUIVI DES MIGRATIONS DES TROUPEAUX ET VARIABILITES BIOCLIMATIQUES	325
XI - STRUCTURE DES MIGRATIONS HIVERNALES DES RENNES SAUVAGES DU PLATEAU D'HARDANGERVIDDA DANS LE CONTEXTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ACTUEL	326
<i>A - Introduction</i>	326
<i>B - Présentation de la zone d'étude, démarche générale, matériel et méthodes</i>	327
<i>C - Méthodes</i>	332
<i>D - Résultats</i>	333
<i>E - Discussion, conclusion et perspectives</i>	341
TRANSITION ENTRE LE CHAPITRE XI ET LE CHAPITRE XII :	344
XII - VARIABILITE BIOCLIMATIQUE RECENTE ET MIGRATION DES RENNES SAUVAGES DU PLATEAU D'HARDANGERVIDDA (NORVEGE).....	345
<i>A - Introduction</i>	345
<i>B - Matériel et méthodes</i>	346
<i>C - Résultats</i>	353
<i>D - Discussion et conclusion</i>	362
CONCLUSIONS GENERALES	365

LISTE DES FIGURES	373
LISTE DES TABLEAUX.....	378
LISTE DES ANNEXES	382
BIBLIOGRAPHIE	383
ANNEXES	412

Introduction générale

Le dernier rapport spécial du GIEC à destination des décideurs nous le rappelle¹ : « *le réchauffement venant des émissions anthropogéniques [de gaz à effet de serre] de la période préindustrielle [1750] à aujourd'hui persistera pendant des siècles, à des millénaires, et continuera à causer des changements sur le système climatique à long-terme* ».

Cette phrase provenant du rapport spécial d'octobre 2018 examine les effets du réchauffement climatique mondial à +1,5°C comparativement à une élévation de 2°C (réchauffements estimés par rapport à la température de 1750). Cette élévation moyenne de la température du globe sera très probablement atteinte d'ici une vingtaine d'années (2040). Si les effets sur les différents compartiments du système-Terre sont pessimistes (emballement climatique, crise de la biodiversité, risques climatiques accrus), ceux sur les sociétés et les économies sont particulièrement sombres (agriculture et sécurité alimentaire, approvisionnement en eau, maladies émergentes). L'élévation de la température de surface mondiale de +1,5°C semble désormais inévitable, et impacte différemment les continents ou les régions considérées.

Les latitudes polaires et subpolaires, au bilan radiatif naturellement déficitaire, sont justement celles où le changement climatique mondial s'exprime le plus nettement, avec un réchauffement des températures jusqu'à trois fois plus élevé que le réchauffement mondial (IPCC, 2018). Ce dernier rapport, tout juste signé par l'ensemble des gouvernements présents à Incheon (Corée du sud), rappelle que les écosystèmes arctiques présentent des risques disproportionnés de conséquences négatives du changement climatique. L'encadré en discutant dans le rapport fait également figurer les populations locales qui y vivent (tout comme les populations dépendantes de l'agriculture de subsistance, et les littoraux habités). Ceux-ci subissent en effet de plein fouet les effets des changements globaux (climatiques, écosystémiques, socio-économiques). Le changement global se décrit comme « *une trajectoire croissante des altérations et des transformations de la Terre (de la géosphère et de la biosphère) qui soutient la vie telle que nous la connaissons* » (Turner, Roger et al., 1990). Le changement climatique actuel, particulièrement observé et observable dans les régions (sub-) arctiques, telles que la Scandinavie (qui inclut l'ensemble de la péninsule scandinave et les territoires ultra-marins sous sa domination), présente alors un intérêt remarquable dans

¹ http://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_spm_final.pdf

l'étude du changement global sur les socio-écosystèmes adossés à l'agriculture, particulièrement l'élevage de rennes opérés par le dernier peuple premier d'Europe, les Saamis¹.

Ce peuple, à l'origine chasseur-cueilleur, vivant de la chasse du renne, puis de son élevage semi-nomade, est actuellement affecté par les effets inter-reliés du changement global observables dans les paysages culturels lapons (intensification économique et changements climatiques structurels). La culturalité de la Laponie est induite par le symbolisme fort de l'activité d'élevage de renne par les Saami. Ses paysages, marqués par leurs climats extrêmes, leurs grands espaces et leurs historicités atypiques, tendent à brouiller les frontières géographiques traditionnelles entre le domestique et le sauvage, et entre l'espace et le territoire. Ce flou géographique est particulièrement intéressant, au regard de celui des effets du changement global sur les socio-écosystèmes, plus que jamais inséparables. Le concept de paysage peut être défini comme « *traitant des entités physiques, écologiques et géographiques, intégrant tous les patterns et processus humains et naturels [en cause]* » (Naveh, 1987). L'adjonction du qualificatif « culturel » renforce l'expression multi-scalaire des récents changements globaux: « *le paysage culturel embrasse une diversité des manifestations des interactions entre le genre humain et son environnement naturel* » (UNESCO). Par ces éléments de définition, l'approche par le paysage semble être particulièrement fructueuse dans la compréhension des effets du changement global sur les paysages culturels de l'élevage de rennes en Scandinavie. Nous le verrons, les paysages culturels de Laponie se caractérisent par la concentration des pressions environnementales, en particulier depuis le milieu du XXème siècle. Avec le changement et l'irrégularité climatique, combinés à l'accroissement des pressions anthropiques (extraction de matières premières, production d'énergie, tourisme), tous deux induits par le changement global, les forêts de conifères et les toundras du nord de l'Europe sont soumis à des stress et à des perturbations croissantes et intimement inter-reliés (Kivinen, Kumpula et al., 2014). Ces deux manifestations actuelles du changement global en illustrent sa définition, multiforme, multivarié et pluri-scalaire.

¹ Dans cette thèse, « Saami » en tant que personnalité, ou peuple, est nominalisé et adjectivé ; contrairement à la dénomination usuelle « Sâme » ou « Lapon », qui possèdent des charges connotatives historiques fortes

Entre les biomes de taïga et de toundra, le renne migre généralement à l'échelle de la centaine de kilomètres pour s'adapter à la forte variabilité bioclimatique inter-saisonnière. Il est ainsi qualifié d'espèce clé de voûte des socio-écosystèmes subarctiques, mais aussi d'espèce – sentinelle du changement climatique actuel (Tyler, Turi, 2009). Les enjeux paysagers liés à l'élevage semi-nomade de rennes par les Saamis sont rattachés aux pâturages des rennes, qui procurent en abondance les ressources pastorales nécessaires au renne (lichens terricoles, graminoides, etc). Les paysages végétaux, et leur territorialisation, sur lesquels croissent les espèces pâturées sont ainsi capitales pour le pastoralisme saami. Ces grands espaces ont une valeur symbolique forte pour la minorité ethnolinguistique Saamie, et leurs revendications territoriales : la pérennité d'un mode d'élevage extensif respectant les rythmes biologiques et géographiques des troupeaux de rennes migrants sont précisément les éléments qui définissent pour beaucoup la « Saméité », via la pratique du semi-nomadisme. Devant les effets pluri-scalaires et systémiques du changement global, traduit par la concurrence croissante des activités humaines au sein des paysages de l'élevage de rennes, et les effets de du changement climatique actuel sur les paysages subarctiques, de nombreuses questions de recherche surviennent.

Une première série de questions se réfère aux expressions directes du changement global sur les paysages de l'élevage de rennes, mais aussi sur ceux des rennes sauvages, dont les rangs taxonomiques, discutés, sont équivalents (*Rangifer tarandus tarandus*) et semblent importants pour documenter la part sauvage des rennes semi-domestiques. Les effets régionaux à locaux du changement global sont ainsi questionnés : quels sont-ils précisément, vis-à-vis de l'écologie de *Rangifer tarandus* ? Dans quelles mesures le climat et ses changements actuels constituent-ils des facteurs de vulnérabilité sur l'écologie des rennes (démographie, migration) ? Ces questions amènent à interroger sur la capacité de la prise en compte systémique et pluri-scalaire du changement global sur les socio-écosystèmes saamis. L'apport pourra aussi être méthodologique, montrant les liens entre échelles géographiques et temporelles dans une région européenne extrême, sentinelle des effets déjà observés (et ressentis) du changement climatique actuel.

La deuxième série de questions a trait à l'organisation géographique des systèmes pastoraux semi-nomades saamis au sein de l'écotone taïga-toundra. Actuellement, l'accumulation des effets conjugués du changement global (changements climatiques, intensification de l'utilisation des sols), sont de tout ordre, et atteignent en profondeur les systèmes écologiques (le renne, et son environnement) et les systèmes pastoraux (Weladji, Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

2002 ; 2006 ; Tyler, Turi et al., 2007). La question de la répartition géographique, et de l'extension de ces altérations, et ses manifestations sur l'ensemble des systèmes pastoraux saamis (paysages, renne, sociétés) est alors soulevée. L'organisation géographique du pastoralisme saami, en particulier au sein de l'écotone taïga – toundra en Suède, vis-à-vis des facteurs externes de déphasage des systèmes pastoraux, induits par le changement global, sont importants dans l'analyse et la compréhension de la problématique. Ayant pris en compte la répartition large du renne, à l'échelon continental, à travers son caractère particulièrement mobile, mais aussi historiquement celui des populations semi-nomades saamies, ces éléments de compréhension prendront également en compte certaines sous-populations de rennes sauvages.

La dernière série de questions traite de l'évolution à différentes échelles de temps des facteurs bioclimatiques traduisant la part physique et biologique des paysages du renne semi-domestique et sauvage, dans une région nord-européenne où les effets du changement climatique global sont amplifiés (AICA, 2004, IPCC, 2013, 2018). Ces effets, attribuables à la variabilité climatique et à l'évitement aux infrastructures humaines affectent directement ou indirectement les dynamiques de population de Rangifer tarandus L. : régulation thermique, épuisement, effets générationnels, etc (Weladji, 2002 ; 2003 ; 2006 ; Nellemann, 2000 ; Skarin, Åhman, 2014). Plusieurs saisons bioclimatiques ont déjà été identifiées comme capitales, à la fois pour le cycle biologique du renne (survie); mais aussi du point de vue économique et gestionnaire pour les systèmes pastoraux (Weladji, 2002 ; 2003 ; 2006 ; Heikkinen, Kasanen, 2012). Pour l'ensemble des systèmes pastoraux de Laponie, les conditions bioclimatiques de la saison hivernale, longue et contraignante, ont diversement été évoquées, la classant comme une saison « goulot d'étranglement » (Roturier, Roué, 2009 ; Paoli, Weladji, 2018). Les saisonnalités liées à la croissance de la végétation semblent ainsi particulièrement intéressantes à étudier dans ce questionnement plus général des effets du changement global sur les paysages, et sur la résilience de l'élevage de rennes en Scandinavie.

Dans ce contexte, les questions fondamentales de compréhension des effets du changement global sur les paysages de l'élevage de rennes par les éleveurs, et indirectement les Saamis, émergent, et appellent à mettre en discussion les connaissances pastorales locales (notamment représentées par les terminologies descriptives des conditions bioclimatiques, de l'organisation spatio-temporelle des systèmes pastoraux ; Riseth, Tømmervik et al., 2011 ; Fernandez, 1997) et les traditions scientifiques occidentales, notamment géographiques. Ces connaissances écologiques sont particulièrement liées aux dialectes saamis, qui ont développé

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

un riche champ lexical bio-géomorphologique autour de l'élevage de rennes. Comment ces signifiés saussuriens, traduction d'une cosmogonie paysagère, s'organisent-ils dans le temps et dans l'espace ? La pertinence d'un échange entre savoirs scientifiques et systèmes de connaissances pastoraux documenterait les problèmes d'environnement éprouvés régionalement ou localement (Cohen, 2003) et contribuerait à l'émergence de méthodologies co-construites de réflexion sur l'anticipation des effets du changement global actuel et à venir (Saloranta, 2001 ; Lynch et al., 2008, Ronchail et al., 2014). Cette pertinence est à associer à un mouvement de dé-verticalisation des scientifiques vis-à-vis des populations avec lesquelles ils travaillent (ou qu'ils étudient), instrumentalisant les populations ou la connaissance, comme cela a été le cas pour les Saamis. Plus largement, face à « l'insupportable diacrisis Nature – Culture » (Bertrand, 2014), mettre les savoirs géographiques en discussion et en recomposition, ici en essayant de tenir compte des témoins et des acteurs premiers des paysages culturels lapons, semblent constituer des questionnements riches de sens, du point de vue de la résilience des systèmes pastoraux du renne au changement global, mais aussi pour la mise en œuvre d'une déontologie, dans le contexte de post-normal science (Saloranta, 2001).

Ainsi, les hypothèses de travail sont structurées en 3 volets. Celles-ci gagneront en spécificité dans les transitions et les chapitres de la thèse, prenant source dans la littérature scientifique comme dans les discussions eues avec les éleveurs et parties-prenantes agissantes sur l'élevage de rennes.

La première grande hypothèse est celle d'un effet du changement global mesurable à l'échelle régionale et sur le temps long, avec deux sous-hypothèses. La première d'entre elle concerne le lien entre atmosphère, climat, dynamiques végétales et biologiques de *Rangifer tarandus*. Le changement climatique serait déterminé par des changements de circulation atmosphérique, eux-mêmes corrélés avec l'augmentation des températures et des précipitations. Ce changement climatique a des conséquences sur la démographie des rennes, dont le sens restera à déterminer, et des conséquences positives sur la densification de la végétation et l'extension de la végétation ligneuse. La troisième sous-hypothèse fait référence à l'hétérogénéité des effets de la fragmentation paysagère sur les paysages culturels de la migration des rennes des pastoralismes saamis suédois, fragmentation qui est un facteur de la vulnérabilité de cette activité pastorale.

La deuxième grande hypothèse concerne les effets du changement climatique sur le fonctionnement saisonnier des socio-écosystèmes, à l'échelle locale. Là aussi, on peut distinguer deux sous-hypothèses. La première serait que le changement climatique aurait pour conséquence l'allongement de la saison végétative et l'intensification de l'activité photosynthétique lors du démarrage végétatif et du pic phénologique. Ces changements se matérialiseraient également sur la physionomie végétale et la valeur pastorale saisonnière des paysages culturels dans la période actuelle, et dans le futur. La deuxième sous hypothèse est qu'à deux saisons-clé, l'hiver et l'été, le changement climatique, matérialisé par l'irrégularité climatique, a une influence sur le comportement migratoire des rennes.

La troisième hypothèse est d'ordre méthodologique, à savoir que la compréhension des effets du changement global sur les paysages culturels de l'élevage des rennes est améliorée par la prise en compte, dans la conception des variables et de leurs croisements, des savoirs locaux, et des découpages de l'espace et du temps par les éleveurs Saamis. Cette compréhension améliorée se fera dans les travaux de modélisation et de mise en relation statistique, mais également car cette conception du travail permettrait de construire une interaction avec les éleveurs.

La figure I.1 reprend la problématique et la méthodologie générale de travail déployée pour répondre aux questionnements et aux hypothèses évoquées.

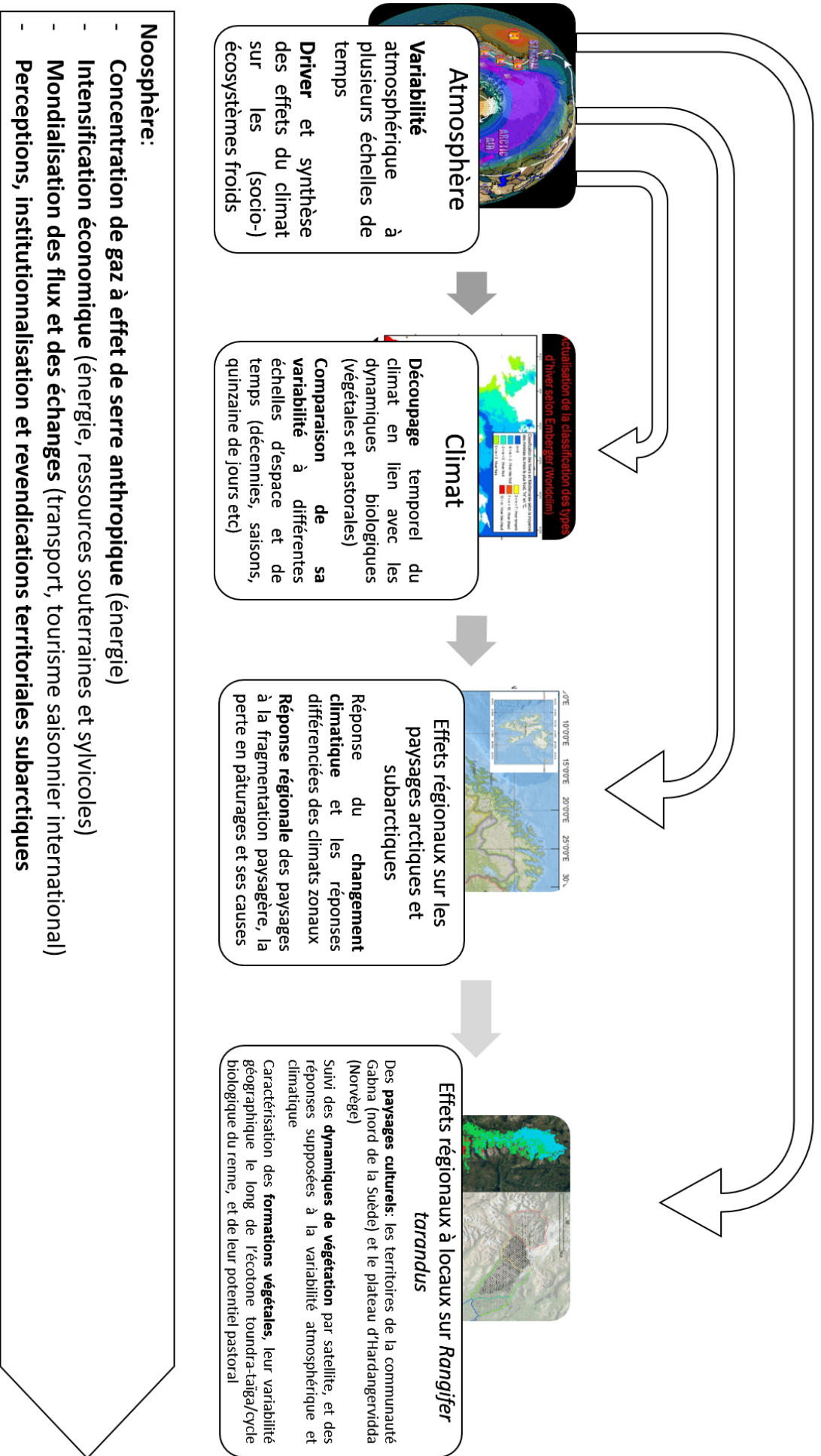


Figure 0-1: Schéma conceptuel de la démarche méthodologique développée dans les travaux de thèse (Réalisation R.Courault, 2018)

L'aspect pluri-scalaire du changement global sur les paysages culturels de l'élevage de rennes sera traité, du point de vue des temporalités atmosphériques et climatiques, principales composantes de ses expressions régionales et locales en Scandinavie. Principalement, le travail s'attache à renseigner des effets et manifestations du changement global, en le définissant régionalement et localement, du point de vue de l'écologie des rennes (sauvages et semi-domestiques) et des dynamiques végétales paysagères qui soutiennent en partie les systèmes pastoraux d'élevage de renne.

Dans une première partie, après une revue fouillée de la littérature (Chapitre 1), nous examinerons tout d'abord les effets de l'intensification de l'occupation des sols sur la fragmentation des paysages, et sa variabilité géographique à l'échelle régionale (Chapitre II). Nous nous attacherons à décrire et à expliquer la variabilité atmosphérique et climatique sur un pas de temps pluri-décennal, et à la mettre en lien avec la variabilité démographique des sous-populations de rennes sauvages et semi-domestiques de différentes régions de Scandinavie (Chapitre III). Le Chapitre IV constituera une première mise à l'épreuve des découpages saisonniers des Saamis pour comprendre la variabilité climatique saisonnière et ses effets sur la démographie des rennes, à l'échelle régionale et sur un pas de temps décennal.

Les trois autres parties nous amèneront à descendre en précision spatiale et à nous intéresser aux effets du changement et de la variabilité climatique à l'échelle locale et sur des dynamiques temporelles pluri-décennales.

Dans la seconde partie, nous étudierons les paysages culturels de la communauté Gabna en mobilisant différents produits de télédétection. Dans le Chapitre V, nous utiliserons des données à haute résolution temporelle (bimensuelles) pour décrire la tendance et la variabilité de l'indice de végétation (NDVI), aux saisons-clef, dans des habitats et des pâturages saisonniers, tels que renseignés par les Saamis. Dans le Chapitre VI, nous déterminerons les dates de verdissement dans les habitats du renne et dans les pâturages saisonniers saamis. Finalement, dans le Chapitre VII, nous regarderons l'évolution géographique de l'indice de végétation NDVI, en lien avec l'évolution des températures.

La diversité spatiale et temporelle de ces formations végétales, dont on aura qualifié les évolutions préalables par satellite, nous permettra dans une troisième partie de discuter des physionomie végétales et des potentiels pastoraux des pâturages saisonniers de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna, en reprenant les inventaires floristiques réalisés in-

situ, et y attribuant des valeurs pastorales prenant en compte les choix alimentaires saisonniers du renne, au regard de la compétition des espèces induite par le réchauffement généralisé des températures. Le chapitre VIII explicitera ainsi les méthodologies employées, tant pour documenter floristiquement les paysages culturels, que dans la construction d'un dialogue avec les Saamis. Les chapitres suivants examineront la physionomie des formations végétales (Chapitre IX) et les valeurs pastorales saisonnières des paysages culturels de la communauté Gabna.

La quatrième et dernière partie traitera de l'écologie spatiale des rennes sauvages du plateau d'Hardangervidda, ayant été historiquement un paysage culturel de l'élevage, en mettant en premier lieu l'accent sur les liens entre variabilités atmosphériques, climatiques et migrations hivernales des rennes (chapitre XI). Après avoir discuté de la migration hivernale, et de l'importance de la prise en compte géographique et pluri-scalaire de la variabilité climatique sur l'écologie des rennes, nous étudierons dans un deuxième temps les choix d'habitats et les densités de rennes sauvages au cours des saisons végétatives, à différents moments clés du cycle biologique du renne (vêlage, reproduction et capitalisation des graisses pour l'hiver). Cette partie nous permettra d'accentuer sur la flexibilité du renne aux contraintes bioclimatiques, et de la remettre en discussion vis-à-vis des systèmes pastoraux soutenus par les paysages culturels de Laponie scandinave (chapitre XII).

I - Etat des connaissances : le renne, espèce-sentinelle des effets du changement global dans le nord de l'Europe

A - Introduction

Le changement global est un concept polysémique. En premier lieu, il était le synonyme anglophone de “*global warming*”, invitant ainsi à nuancer aux échelles régionales l’élévation des températures à la surface du globe terrestre, observée depuis le milieu du XX^{ème} siècle. Le terme de global se réfère à l’échelle de la planète, mais aussi à la dimension systémique de ce changement, qui ne se limite pas au changement climatique, mais interagit avec l’intensification de l’usage des sols. Si le processus d’anthropisation des écosystèmes est multiforme et ancien, il reste possible d’en estimer les degrés, au moins du point de vue de la charge humaine matérielle macroscopique (déforestation, urbanisation, pollution). A l’échelle globale, Tucker et al. (2018) ont ainsi montré comment l’artificialisation croissante des terres limitait la mobilité des mammifères. Les changements globaux peuvent au pluriel désigner ses différentes manifestations sur les écosystèmes, mais aussi sur les socio-systèmes, les deux subissant les conséquences de l’intensification des échanges économiques mondiaux calqués sur des modes de consommation d’énergie, de ressources et d’externalités (rejets) particulièrement élevés (IPCC, 2013).

Le changement global, par nature a-géographique (la Terre? le Monde? son ensemble?), a de nombreux effets régionaux et locaux, dont les conséquences et interrelations sont spécifiques selon les environnements naturels et culturels dans lesquels ses effets s’inscrivent. La régionalisation des effets du changement global est notable dans la sphère agricole. Les activités de pêche, d’élevage, de céréaliculture ou de fruiticulture sont en effet des activités économiques « sentinelles » des effets pluri-scalaires du changement global. Dans les régions arctique et subarctique, ce changement global se traduit par un changement des paysages (densification, hauteur croissante et extension des ligneux en latitude et altitude), et par le développement d’activités économiques nouvelles, les deux conjointement stimulés par l’élévation généralisée des températures (Arnould, 2006 ; UNESCO, 2010 ; Kullman, 2015 ; IPCC, 2013, Lewis et Aitken, 2013, Gascard et al, 2017, Bjorkman et al., 2018). Avant d’aborder ce processus et ses conséquences sur les paysages et les écosystèmes, il convient de caractériser le changement climatique observé dans ces régions, puis leur organisation

biogéographique (première partie). Dans une deuxième partie, nous focaliserons notre analyse sur le renne, et sur les conséquences directes et indirectes du changement global sur cette espèce-clé. Puis dans une troisième partie, nous évoquerons les connaissances sur les pastoralismes saamis.

B - Le changement climatique et ses conséquences sur les écosystèmes et leur organisation spatiale

1) Le changement climatique aux latitudes arctiques et subarctiques

D'après le dernier rapport du GIEC (WG1, 2014) « *chacune des trois dernières décades aura été successivement plus chaude à la surface du globe que toutes les décades depuis 1850* ». Les régions arctiques et subarctiques sont les plus concernées par les effets locaux du réchauffement global des températures (Bokhorst et al., 2012). Il est connu que le réchauffement global actuel est plus prononcé pour les climats polaires, en particulier dans l'hémisphère nord et les régions arctiques et subarctiques (ACIA, 2004, Maynard et al. in Gutman & Reissel, 2011, IPCC, WG1, 2013).

Pour la période 1901-2012, au-delà du cercle polaire en Scandinavie, le réchauffement observé des températures annuelles est supérieur à 1.25°C comparé aux normales (IPCC, WG1, 2013). Les moyennes annuelles de températures sont actuellement en augmentation, mensuellement dues des températures plus douces en hiver, et des températures maximales plus chaudes en été (AICA, 2004). Les températures supérieures à 0°C deviennent ainsi plus fréquentes, faisant diminuer les volumes glaciaires et la couverture neigeuse, donnant l'avantage à la couverture végétale (Fraser, Olthof et al., 2011). Les auteurs citent en particulier l'approfondissement de la couche active du pergélisol et les changements induits dans l'étendue et la magnitude de la fonte (Wrona, Johanson et al. 2016). 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 décennie selon la région considérée (IPCC, 2013). On observe conjointement une transformation de leur nature, les cumuls de neige devenant de plus en plus des cumuls de précipitations.

Le changement climatique actuel a des effets incontestables sur le système climatique global, et en particulier dans le nord de l'Europe (IPCC, 2013). Parmi les composantes du système climatique, les centres d'action atmosphériques et leurs modes de circulations sont ceux qui façonnent le plus le climat régional et local. Ces centres d'action et leur variabilité temporelle et géographique sont notamment observés à travers le concept de téléconnexion,

qui indique le niveau de corrélation statistique entre les caractères climatiques donnés pour deux points du globe (Hurrell, 1995). Parmi les téléconnexions rendant le mieux compte de la variabilité climatique européenne, on trouve l'oscillation nord-atlantique, l'oscillation est-atlantique et l'oscillation scandinave. L'oscillation nord-atlantique (NAO), et sa variabilité dans l'espace et dans le temps se réfèrent à l'intensification des centres de pression atmosphérique entre les latitudes subtropicales et les latitudes polaires européennes (Scaife, Knight et al., 2005 ; Lu & Greatbatch, 2002). On calcule l'indice d'oscillation nord-atlantique (NAO) traditionnellement en prenant la différence normalisée des pressions de surface à Skyykkisholmur (Islande) et Lisbonne (Portugal), du fait de leur proximité aux centres d'action atmosphériques (dépressionnaire en Islande ; anticyclonique au Portugal, en particulier aux Açores).

Les variations de cet indice et les anomalies atmosphériques qui y sont associées expliquent une grande partie de la variabilité des températures de surface hivernales au-delà de la latitude 20°N dans l'ouest eurasiatique (Hurrell, 1995), notamment expliqué par un gradient de températures plus marqué entre les latitudes polaires et les latitudes tropicales (Calas, 2013). Il est ainsi admis que l'indice NAO et sa variation au cours du temps et de l'espace exerce une influence marquée sur les températures, les précipitations et les vents dominants d'Europe occidentale (Comas – Bru & Mac Dermott, 2014). Une phase positive de l'indice NAO se caractérise par l'intensification du minimum dépressionnaire islandais et du maximum anticyclonique açoréen. L'intensification de ces centres de pression est associée à des vents d'ouest plus forts que la normale aux latitudes moyenne en Europe, et l'intensification des tempêtes et de leurs trajectoires dans le nord de l'Europe (Rodwell et al., 1999 in Uvo & Berndtsson, 2002). Cet accroissement du gradient de pression entre Islande et Açores donne ainsi un flux d'air particulièrement perturbé, fréquent au cours des hivers à anomalies positives de NAO. Le flux d'air induit par l'intensification du gradient de pression se dirige ainsi habituellement du sud-ouest vers le nord-est, en particulier en Europe du nord.

Les anomalies positives de NAO sont ainsi souvent associées par des types de temps venteux et pluvieux, avec des températures et des précipitations observées au-dessus des normales en Europe du nord et en particulier en Scandinavie et dans l'ouest de la Norvège (Post et al., 1997 in Ottersen, Planque et al., 2001, Uvo & Berndtsson, 2002 ; Comas- Bru & MacDermott, 2014). Ce mode de variation atmosphérique reste intrinsèque au climat européen, et explique au moins la moitié de la variabilité interannuelle des températures de surface en Europe du nord (Rodwell et al., 1999 in Scaife, Knight et al., 2005). Des conditions

plus chaudes que la normale sont ainsi régulièrement observées en Ecosse et en Scandinavie lors d'une phase positive de l'Oscillation Nord-Atlantique.

Ceci dit, les liens entre l'évolution temporelle des phases positives et négatives de l'oscillation nord-atlantique et l'évolution temporelle du système climatique global induit par les émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropogénique semblent être encore l'objet de débats. Les effets du changement climatique d'origine humaine sont notamment évoqués par Gillett et al. (2000) pour expliquer les tendances observées de l'indice NAO et les conditions climatiques actuelles qui en résultent. Ces tendances temporelles à l'augmentation des valeurs de l'indice de NAO peuvent être imputables à la migration progressive des centres d'action atmosphériques subpolaires (dépression d'Islande) et subtropicaux (anticyclone des Açores) vers l'est du bassin atlantique, notamment induite par d'autres régimes de circulation atmosphériques à l'œuvre en Europe (oscillation Est-Atlantique, oscillation scandinave, Comas-Bru & MacDermott, 2014).

D'ici le milieu du 21^{ème} siècle, l'*Arctic Climate Impact Assessment* a cartographié l'augmentation des températures moyennes hivernales en Norvège. Par décennie et comparé à la moyenne 1961-1990, le réchauffement des températures hivernales probable sera de +0,45°C pour la majorité de la Norvège continentale, en particulier pour les parties montagneuses (ACIA, 2003 in Gutman & Reissel, 2011). Pour le climat futur (2080-2100), si l'on retient le scénario le moins optimiste sur les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre, est prévue une augmentation d'au moins 20% des précipitations par rapport aux volumes moyens au cours de la période 1985-2005 (IPCC, 2013) en particulier sous forme non neigeuse.

2) Ecotone froid en Scandinavie: gradient de latitude et d'altitude

Le changement global touche particulièrement les écotones froids subarctiques, qui trouvent leur définition dans la transition biogéographique circumpolaire entre le biome de taïga et le biome de toundra. Un écotone est "*une zone géographique [plus ou moins] étroite qui se caractérise par un mélange de caractéristiques floristiques et faunistiques entre deux communautés écologiques relativement homogènes, et différentes. Les écotones se manifestent souvent par des gradients entre deux physionomies de formations végétales*" (traduit de l'anglais, Van der Maarel, 1990). De nombreuses expressions des biomes sont décrites dans la littérature, et en montrent la diversité selon l'échelle géographique et écosystémique considérée (Ozenda, 1964, Birot 1965, Elhai, 1968, Le Cœur, Amat et al. 2008, Alexandre et Génin, 2012). Aux latitudes arctiques et subarctiques, ceux-ci se caractérisent par des

contraintes bioclimatiques marquées (le froid), imputable à leur situation zonale à l'échelle de l'hémisphère nord (Wielgolaski, 1997, Andersson 2005). Cette forte relation entre la végétation (en termes de biomasse, de diversité, de thermophilie) et le climat est également utilisée pour améliorer les cartes du climat par grille de points (Nielsen et al. 2013 a et b, Joly et al. 2016).

Ces gradients sont aussi observés en altitude. Les systèmes montagnards subarctiques fennoscandiens (Dahl in Sonesson, Wielgolaski et al., 1975) peuvent être divisés en quatre étages bioclimatiques, le long du gradient d'altitude, au sein de laquelle les formations végétales se succèdent. Un étage subalpin allant jusqu'à 1050 m, où les forêts de conifères, puis plus tard les forêts de bouleaux pubescents sont limitées par la contrainte thermique plus en altitude. Cet étage est borné par la limite de croissance des arbres (*Pinus*, *Betula*). Un étage bas alpin, dominé par landes à *Betula nana*, *Juniperus communis*, et Ericacées (*Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium vitis-idae*) dont la physionomie générale se caractérise par leur faible hauteur, même si les pentes ensoleillées ou les versants bien irrigués peuvent être tachetés de fourrés de saules (*Salix* sp.). Selon l'altitude et la microtopographie, qui dépend de l'intensité de la cryoclastie et de la solifluxion induite par les eaux de fonte, on trouve également des graminées xérophiles, particulièrement appréciées par les rennes, ainsi que des dépressions tourbeuses. La limite de croissance de *Vaccinium myrtillus* délimite l'entrée dans l'étage moyen alpin, approximativement entre 1200 et 1400 mètres d'altitude (Dahl in Sonesson, Wilgolaski et al., 1975). Ces seuils d'altitude dépendent bien entendu de la latitude à laquelle sont réalisées les observations. Sur les sols stables, et plus en altitude, les prairies alpines deviennent plus fréquentes, représentées par la forte présence des poacées, des joncacées et des cypéracées (*Juncus trifidus*, *Carex bigelowii*, *Festuca ovina*). Sur les sommets, la végétation reste clairsemée, et dominée par les communautés de bryophytes (*Dicranaceae*, *Hypnaceae*, *Polytrichaceae* etc), et de lichens foliacées et terricoles (*Cladonia*, *Peltigera*, *Stereocaulon* sp.).

3) Les paysages arctiques et subarctiques et leurs réponses au changement global : boréalisation, verdissement et *shrubification*

Associée à l'augmentation des températures, la fonte généralisée des glaciers, des neiges et du permafrost induit une accélération du cycle hydrologique, impliquant des entrées conséquentes en alluvions et colluvions dans les sols, facilitant ainsi la colonisation et la croissance des végétaux (Epstein, Myers-Smith et al., 2013). Ces changements thermiques et

hydriques se traduisent dans le nord de l'Eurasie par l'augmentation en extension et en biomasse et en hauteur de la flore ligneuse vasculaire (Cornellissen, Callaghan et al., 2001, Väisänen, 2014 ; Bjorkman, Myers-Smith et al. 2018), aux dépens des strates herbacées et muscinales, ressources pastorales vitales pour les troupeaux de rennes. L'abaissement des contraintes thermiques et édaphiques induit une transformation des paysages végétaux en termes de densification et de dissémination en hautes latitudes et hautes altitudes.

Ces processus sont reliés à la boréalisation des écosystèmes de toundra arbustive, un environnement transitionnel important, zonalement et altitudinalement situé entre les forêts de conifère du biome de taïga et les toundras rases. La boréalisation est ici comprise comme étant l'avancée latitudinale et altitudinale des lignes forestières et spécifiques, ainsi que les communautés floristiques et faunistiques associées (Lindbladh, Axelsson et al., 2014). Les concepts de "Verdissement" et de "*Shrubification*" sont souvent invoqués dans les recherches environnementales, pour désigner la tendance générale d'augmentation de biomasse végétale et de remontée de la couverture végétale dans des latitudes polaires et subpolaires, ainsi qu'en altitude (IPCC, 2013); le deuxième concept désignant à l'échelle paysagère l'augmentation en biomasse arborée et arbustive des toundras rases (Myers-Smith et al., 2014). Les toundras ouvertes, rases, ainsi que les pelouses alpines d'altitude sont ainsi affectées par un processus d'embroussaillage (*shrubification*). Ce processus est ici vu comme étant la densification et la colonisation d'espèces ligneuses compétitives, originellement présentes en marge des forêts boréales (Mod & Luoto, 2016).

Les travaux traitant des changements de paysage associés à la tendance au changement climatique s'appuient sur différentes méthodologies : l'exploitation de bases de données floristiques, l'utilisation d'images de télédétection et la répétition de mesures de terrain, en les rapportant aux données climatiques. Parmi les premiers, Bjorkman et al. (2018) ont montré comment la hauteur des végétaux avait augmenté dans la région arctique, conjointement avec le changement de composition floristique induit par l'augmentation des températures, et secondairement des précipitations. D'autres facteurs climatiques semblent importants, comme le vent et la couverture neigeuse qui peuvent protéger les buissons qui la piège et favoriser ainsi leur croissance (Stürm et al., 2001), ou encore l'adoucissement des conditions climatiques hivernales (voir les travaux de Fraser, Olthof et al. 2011, développés ci-après).

Parmi les travaux mobilisant les images de télédétection, Johansen & Karlsen (2005) ont étudié les districts saisonniers des rennes semi-domestiques dans le Finnmark norvégien,

une démarche méthodologique que nous adoptons également dans nos travaux. Utilisant les images LANDSAT MSS et TM pour 1973, 1980, 1987, 1996 et 2000, ainsi que des inventaires de terrains, ils ont caractérisé les unités de végétation des pâturages saisonniers des troupeaux de rennes semi-domestiques. Ils ont montré que les formations végétales riches en lichens terricoles, particulièrement appropriées pour l'alimentation des rennes semi-domestiques avaient substantiellement baissé : ces formations végétales représentaient plus de 36 % de la superficie totale du pâturage d'hiver en 1980, et ne représentent plus que 6,9% en 2000. En même temps, « *les formations végétales sans couverture lichéniques augmentaient proportionnellement* » (Johansen & Karlsen, 2005). Ces changements spécifiques des pâturages riches en lichens terricoles, et plus largement de la couverture végétale ont de forts effets sur la répartition géographique des troupeaux et des individus, sur leur biologie (taux de survie), les systèmes pastoraux (taux de productivité) et les écosystèmes qui les soutient (zones soumises à l'eutrophisation, surpâturage, sur-piétinement). Ces travaux rejoignent ceux de Sandström et al. (2016) qui ont montré la régression de la couverture en lichens depuis les dernières décennies en Laponie suédoise.

D'autres travaux, localisés en Chine ou au Canada, présentent des résultats analogues. Nous en citons deux exemples. Chen, Lu et al. (2015) ont étudié l'évolution de la limite de pousse des arbres dans le nord de la chaîne des Tianshan, en Chine. Ils se sont en particulier intéressés aux stades écologiques induits par la répartition et l'évolution des forêts de pins et de landes. Ces deux paysages végétaux sont respectivement dominés par les genres *Pinus* et *Juniperus*. Ils ont utilisé des images LANDSAT multi-dates (1990, 2001, et 2010) pour évaluer l'abondance la plus probable des végétaux composant chacun des pixels LANDAT, à travers une approche basée sur « l'analyse des mélanges spectraux ». Hormis des doutes concernant l'approche méthodologique, notamment dus à la résolution spatiale Landsat (30m), les auteurs montrent qu'en fonction des conditions topographiques, l'abondance en *Pinus* et *Juniperus* tendait à se densifier au-dessus des limites de pousses spécifiques. Notamment, une augmentation de 18,6% en abondance en *Pinus* est trouvée au-dessus des zones forestières, tandis que l'abondance en *Juniperus* augmente de 15,6% au sommet des paysages de landes.

Frazer, Olthof et al. (2011) ont suivi les différentes formations végétales composant quatre Parcs Nationaux du nord du Canada, de 1984 à 2009. Reprenant les archives LANDSAT TM et LANDSAT ETM, ainsi que des mesures de terrain (relevés météorologiques et floristiques) et de l'imagerie à haute-résolution (satellites SPOT, Romain Courault – « *Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global* » - Thèse de Géographie,

Quickbird et Ikonos), ils ont dans un premier temps évalué la couverture végétale et par la suite quantifié les tendances temporelles d'évolution de deux indices de végétation : indice de verdure et NDVI. Ils ont notamment pu détecter une tendance constante au verdissement de chaque Parc National arctique et subarctique étudié. Une partie conséquente de cette augmentation de ce verdissement serait due aux hivers moins rudes, en particulier l'augmentation des températures au-dessus de 0°C sur la période d'étude (1984-2009).

Certains travaux mettent toutefois en avant une tendance différente. Nordberg, Evertson et al. (2003) ont notamment travaillé sur la quantification des changements (ou des non-changements) de NDVI en utilisant les images LANDSAT TM pour trois dates : 1984, 1994 et 2000. Ils ont qualifié l'intensité de ces changements de couverture NDVI dans les landes sèches des zones montagneuses du comté de Jämtland en Suède. A l'échelle de leur zone d'étude, 17% des communautés de landes sèches ont changé entre 1984 et 2000. L'étude rapporte que la plupart des changements ont eu lieu entre 1994 et 2000, et que les zones de basses altitudes situées au sud du massif sont celles où sont observées les plus fortes « *baisses en couverture végétale haute* » (Nordberg, Evertson et al., 2003). Ce changement dans les paysages végétaux secs et très secs de landes suggère une perte en densité des plantes vasculaires présentant une haute couverture, et une augmentation des zones rocheuses, de sols nus et de branchages secs, selon la réponse spectrale mesurée par NDVI.

Des travaux de terrain ont 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 (Heiskanen, Nilsson, 2008). Ces travaux nous intéressent particulièrement, car nos études à l'échelle locale se situent dans cette partie septentrionale de la Laponie suédoise. La toundra observée présente un faciès broussailleux à arboré, dû à sa position géographique intermédiaire en latitude dans cet écotone spatio-temporel. Ce processus d'embroussaillage (en anglais *shrubification*) 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 (Nilsson, Mäki, et al., 2008). Ce processus tend à réduire la qualité nutritionnelle des pâturages des rennes, même si ceux-ci consomment aussi les pousses de ces arbustes.

Hadenås, Olsson et al. (2011) ont évalué la biomasse et la croissance des arbres, et l'évolution de la limite forestière associée dans l'écotone de forêts de bouleaux pubescents du nord de la Suède. La biomasse arborée, exprimée en tonnes, a été observée dans des parcelles expérimentales, de 1997 à 2010. Ils ont également classifié les formations végétales de chaque parcelle, selon la nomenclature instaurée par le gouvernement suédois, et utilisée pour la carte de végétation nationale. Pour les forêts de bouleaux pubescents déjà existantes, ils ont relevé une augmentation de 19% de leur biomasse. Les « fourrés à bouleaux et bruyères avec mousses », ainsi que les « prairies à herbes rases » sont deux types de formation végétale dont la couverture a augmenté parmi les 61 parcelles étudiées, tandis que la couverture en végétation para-glaciaire semble avoir chuté. Le couvert arbustif a augmenté de 25 à 32,5 % entre 1997 et 2010, en particulier les bouleaux nains, les genévriers et les saules. Le bouleau pubescent et l'évolution de la couverture par sa canopée se caractérisent par une augmentation significative, de 14 à 20,1%. L'augmentation de la disponibilité en minéraux, les températures de sols plus chaudes et l'allongement des saisons végétatives sont notamment cités par les auteurs comme étant des causes explicatives.

4) Effets du changement climatique sur les écosystèmes

A travers l'étude des concepts de boréalisation, de verdissement et de shrubification des paysages, le changement climatique anthropogénique actuel semblent ainsi profondément transformer la structure et les fonctions des écosystèmes arctiques et subarctiques, en particulier les forêts boréales et la toundra arbustive en Fennoscandie. Les effets qu'ont la variabilité atmosphérique et climatique dans le nord de l'Europe sur le fonctionnement des écosystèmes terrestres arctiques et subarctiques sont comparables à ceux étudiés dans le cas des écosystèmes pacifiques et l'Oscillation sud-Pacifique El Nino (ENSO ; Allan et al., 1996 in Ottersen, Planque et al., 2001). Le desserrement de la contrainte thermique dans les régions arctiques et subarctiques a également des conséquences sur les biotopes (la sphère pédologique (Grau, Ninot et al. 2012)), mais aussi les communautés animales des biocénoses : « *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* » (Grau, Ninot, 2012).

La réponse biologique des composantes animales des écosystèmes du nord de l'Europe aux hausses des températures hivernales documenté dans la littérature concerne en particulier les stocks de plancton marin, de poissons, les populations d'amphibiens et d'oiseaux. Les auteurs dénotent en particulier de la précocité des périodes de ponte ou de reproduction fonction de la douceur de l'hiver et/ou du printemps (Myeni et al. 1997 ; Menzel et Fabian, 1999 ; Forchammer et al. 1988 ; in Ottersen, Planque et al., 2001). Les grands herbivores, et les effets du pâturage sur la biomasse de la végétation broutée sont également une des causes évoquées par Frazer, Olthof et al. (2011) pour expliquer l'augmentation du NDVI dans des parcs canadiens, associée au recrutement écologique des arbrisseaux. Dans leur étude, un déclin des hordes de caribous (*Rangifer tarandus*), passant de 800 000 animaux en 1993 à 75 000 en 2010 du Parc National de George-River pourrait être un facteur expliquant la régénération détectée en arbrisseaux, notamment les bouleaux (*Betula*) et les saules (*Salix*).

Ceci souligne les fortes interactions existant entre la réponse de la biomasse végétale détectée et l'herbivorie dans le contexte du changement climatique. Kaarlejärvi et al. (2017) ont également montré, par des études expérimentales, l'atténuation des pertes de diversité végétale, associées au changement climatique, par l'action des herbivores. D'autres travaux suggèrent également que l'élevage extensif des rennes pourrait contribuer à modérer le changement climatique et ses conséquences (Väisänen, Ylänné et al, 2014, Post et Pedersen, 2008). Legagneux et al. (2014) dans leur étude comparative de sept cas de chaîne trophique montrent les effets du climat sur la production primaire de la toundra, les chaînes trophiques et l'intensité des interactions biotiques, en fonction de la taille des herbivores.

Les études cherchant à croiser la phénologie des formations végétales et données faunistiques en mobilisant des données satellitaires sont nombreuses. Outre leur intérêt pour cartographier la répartition des formations végétales à différentes échelles géographiques et temporelles, ces données sont également utiles pour le suivi pluriannuel de la phénologie et de la production primaire (Petorelli, Vik et al., 2011), et de leurs conséquences sur les niveaux trophiques supérieurs tels les herbivores. Ce suivi de la dynamique des écosystèmes peut s'effectuer par l'identification des dates de verdissement (Delbart, Kergoat et al., 2006) pour le démarrage phénologique, ou de dates de jaunissement pour la fin de période, à l'automne. Le NDVI (Indice normalisé de végétation) a par exemple été utilisé pour expliquer les dates moyennes d'arrivée en nidification de l'hirondelle rustique (*Hirundo rustica*) en Algérie, ou le taux de survie des faons de moins d'un an dans l'exemple du renne (Couturier, 2009). Une étude comparative entre la Norvège et la France montre la synchronisation entre les dates de

rut et de vèlage du cerf élaphe *Cervus elaphus* et les dates de jaunissement de la végétation, estimées d'après le NDVI (Petorelli, Vik et al., 2005).

Etant donné que les populations d'êtres vivants sont soumises à la variabilité climatique locale, il semble logique que les valeurs de températures et de précipitations qui y sont observées soient gouvernées par des phénomènes atmosphériques de plus large ampleur géographique (Ottersen, Planque et al., 2001). De façon récurrente, l'indice de NAO est indiqué dans les études en écologie comme une approximation convenable des conditions climatiques locales, en particulier pour les conditions thermiques. Si la part explicative entre les anomalies positives de NAO, liée à des températures plus élevées que la normale et à l'augmentation généralisée des températures induites par le changement climatique et leur intrication, reste encore en débat, les effets de l'augmentation des températures hivernales et printanières sur la flore et la faune du nord de l'Europe sont bien documentés. A l'échelle des quatre dernières décennies, l'augmentation de l'indice de NAO et l'augmentation des températures hivernales et printanières sont souvent associés à des saisons végétatives plus longues en ce qui concerne la flore terrestre arctique et subarctique de l'hémisphère nord (Myeni et al., 1997 ; Menzel & Fabian, 1999).

Une part non négligeable d'études sur les effets de l'oscillation Nord-Atlantique sur la faune, en particulier subarctique, a également porté sur les grands herbivores. Ceux-ci sont notamment représentés par le Cerf commun, mais aussi les rennes sauvages et domestiques (Norvège, Groenland, Canada). Plus que les températures hivernales, c'est la sévérité de l'hiver qui est associé aux réponses biologiques de ces herbivores migrants. Du point de vue de la biologie des ongulés, la sévérité de l'hiver subarctique est principalement représentée par de fortes hauteurs de neige, qui imposent un coût énergétique marqué pour ces ongulés. Ces coûts énergétiques concernent en particulier la locomotion et le pâturage (Hobbs, 1989, Parker et al., 1994 in Ottersen, Planque et al., 2001 ; Weladji & Holland, 2006).

C - Le renne, espèce-clé des écosystèmes arctiques et subarctiques

1) Taxonomie et écologie du renne

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 (Väisanen, 2014), c'est-à-dire :« [Une espèce] dont Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

l'impact sur ses communautés ou son écosystème est disproportionnellement important par rapport à son abondance » (Power, 1996 in Forbes & Kumpula, 2009). Il est en effet admis que le positionnement trophique des herbivores au sein des écosystèmes terrestres constitue un facteur important des dynamiques de végétation à l'échelle globale (Väisänen, 2014). C'est le cas pour *Rangifer tarandus* L., avec le prélèvement de ressources végétales au cours de ses migrations saisonnières à l'échelle de la centaine de kilomètres en Laponie suédoise.

Les populations de rennes sauvages sont aujourd'hui rares dans le nord de la Scandinavie, et cantonnées aux sommets de la chaîne Fennoscandienne, en particulier dans le centre-est de la Norvège (Renne d'Europe, *Rangifer tarandus ssp tarandus*, Panzacchi, Van Moorter et al., 2013) ainsi qu'en Finlande (Renne des forêts eurasiennes, *Rangifer tarandus ssp. fennicus*, Kuntz, 2011). Ces populations sauvages ont en effet été chassées, puis progressivement décimées au cours du XIX^{ème} siècle (Manker, 1954), et leur conservation est actuellement recommandée par les scientifiques (UICN, 2017, classement de l'espèce comme vulnérable). Les 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 du centre et du sud de la Norvège. 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.

Les rennes semi-domestiqués appartiennent également à la sous-espèce *Rangifer tarandus tarandus* L (Renne d'Europe). Présents dans toute l'Eurasie, les troupeaux semi-domestiqués forment un continuum génétique avec le renne sauvage, souvent féralisé dans l'ouest de la Scandinavie (Forbes, Kumpula et al., 2009). Le nombre de sous-espèces de rennes varie selon les auteurs, la différenciation pouvant se faire selon l'écotype, qualifié de toundra, forestier ou montagnard, déterminant la taille de l'aire minimale de survie (Kuntz, 2011; Forbes, Kumpula, 2009).

La réponse adaptative du renne, aux contrastes bioclimatiques saisonniers est géographique de par sa migration saisonnière. Le balancement entre pâturages d'hiver et aires de vèlage estivales s'opère des régions les moins froides en hiver vers les plus fraîches en été, du sud-est vers le nord-ouest (Forbes, Kumpula et al., 2009). L'explication de cette migration à longue distance est biologique : adaptation à la contrainte du froid, et régulation métabolique selon les apports énergétiques disponibles dans les habitats aux différentes

saisons (Klein, 1990). En Suède, les troupeaux de rennes migrent ainsi de l'hiver, dans les forêts de taïga à l'été dans les toundras arbustives de la chaîne montagneuse fennoscandienne. 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. Le mouvement saisonnier des hardes de rennes s'établit entre les formations végétales riches en lichens, principalement représentées dans le biome de taïga, pâturées en hiver, et les formations végétales d'altitude, où la végétation basse de la toundra arbustive fournit un régime estival composé d'herbacées (Forbes & Kumpula, 2009).

Le régime alimentaire de *Rangifer tarandus* L. est principalement composé de lichens fruticuleux qu'il trouve sous la couverture neigeuse (présente de novembre à mai), et qui lui apportent les glucides nécessaires à la survie au froid. En hiver, le renne réduit son appétit mais sa température corporelle est maintenue par la consommation des macro-lichens terricoles et arboricoles riches en glucides (Klein, 1990), seules ressources alimentaires consommables à cette saison. Ces lichens sont abondants sous les couches neigeuses des forêts boréales acidiphiles, où l'herbivore se déplace le moins possible pour économiser son énergie. Le surpâturage et le piétinement des troupeaux confinés dans des pâturages hivernaux peuvent contribuer à la destruction des tapis lichéniques (Suominen et Olofsson, 2000), mais ceci est notamment atténué par le déplacement des troupeaux par les éleveurs, et l'interchangeabilité sociale de certains pâturages (Van der Wal, 2006).

Les régimes printaniers (pousses de saules, bouleaux, poacées), estivaux (cypéracées, prêles, myrtilles) et automnaux (champignons) fournissent en protéines et en sels minéraux (Klein, 1990). La saison estivale, relativement courte, est marquée par différents jalons du cycle biologique et reproductif du renne. Avec l'allongement de la durée du jour, l'équilibre hormonal des rennes se modifie, les rendant avides de jeunes pousses d'herbes et de feuillus riches en protéines (Oldeboer et Ophof, 2011). A la fin du printemps (mi-mai, début juin), les rennes sont amaigris et moins nombreux. Les femelles gestantes se dirigent instinctivement vers leur lieu de naissance pour y mettre bas fin mai. La période estivale permet aux rennes d'accumuler des réserves graisseuses en vue du passage de l'hiver (Danell et al, 2006), et pour

les mâles de préparer la période du rut (début d'automne). La période chaude se caractérise donc par une balance énergétique excédentaire, au contraire de l'hiver où celle-ci est déficitaire (Oldeboer et Ophof, 2011). Hors de l'hiver, et des périodes de marquage ou d'abattage, les interventions des éleveurs sur les déplacements du troupeau restent restreintes et principalement vouées à la facilitation du rassemblement des troupeaux, via la castration de certains mâles et la régulation du sex-ratio (Delaporte et Roué, 1986) (voir encadré n°1, en annexe 1)

Cet herbivore se caractérise notamment par les fortes variations inter-saisonniers de son poids corporel, avec un besoin d'acquérir des ressources abondantes durant l'été et l'automne afin de constituer ses réserves endogènes pour affronter l'hiver. Il est ainsi catégorisé comme étant un herbivore *capital-breeder* (Danell, 2006). Il stocke un nombre important de calories durant les mois où la biomasse végétale disponible le permet : la graisse 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 (Louw, 1993). 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). Les tactiques adoptées par les femelles *capital-breeder* sont un stockage énergétique préalable à la reproduction. En termes 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 (Clutton-Brock, Guinness et al., 1983). Cependant, la reproduction a également des conséquences immédiates pour les individus : la gestation et la lactation représentent un surcoût énergétique (Louw, 1993) pouvant engendrer des modifications des modalités de sélection des ressources chez les femelles reproductrices. Le 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 al. (1982a, 1982b) 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, Ecosse). 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 qui n'élevaient pas de faon.

2) Le changement global, facteur de vulnérabilité du renne

Les écosystèmes arctiques et subarctiques sont particulièrement affectés par les conséquences du changement climatique global actuel (Uboni et al. 2016). *Rangifer tarandus tarandus* L. est une espèce-clé de ces écosystèmes, et son rôle dans les sphères naturelles et culturelles est de plus en plus important et étudié. Avec sa répartition circumpolaire, l'ongulé dit "capital-breeder" migre sur de longues distances entre les biomes de taïga et de toundra. Sa distribution géographique particulière et la sélection de ses habitats écologiques pour le pâturage, la migration et le repos sont importantes dans la structure et le fonctionnement de ces écosystèmes. La capacité de *Rangifer tarandus* à gérer ses besoins alimentaires et ses besoins en espace représentent une opportunité intéressante pour comprendre et faciliter la résilience des socio-écosystèmes arctiques et subarctiques adossés au renne aux effets rapides du changement climatique actuel (Post & Pedersen, 2008). Les températures hivernales plus chaudes, l'accélération du cycle hydrologique, l'augmentation de la fragmentation paysagère et des perturbations anthropiques (visuelles, sonores etc) contribuent à épuiser les populations de rennes, ainsi que les biocénoses auxquels ceux-ci sont associés (Weladji, 2006).

a) Les effets directs du changement climatique sur la démographie du renne

Ces différents constats concernant la sphère climatique peuvent être mis au regard de la migration saisonnière de *Rangifer tarandus* L. 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 constitue un facteur de vulnérabilité prépondérant pour l'accessibilité des rennes aux lichens terricoles, ressource pastorale essentielle pour la survie des troupeaux (Roturier, Roué, 2009). 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 positif de ces conditions climatiques douces et humides sur les femelles gestantes (Coutirer, Côté, et al., 2009). 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 (notamment dû aux températures estivales anormalement chaudes qui favorisent les moustiques, et la dispersion du cheptel et fatigue les jeunes et les biches allaitantes; Weladji & Holand, 2006), avec pour conséquence un rétrécissement de la pyramide des âges. 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 (Tunon & Sjøjag, 2012).

Toutefois, comme c'est le cas pour différents niveaux de la chaîne trophique tel qu'exposé en première partie, les séries temporelles de climatologie locale expliquent mal les dynamiques de population des rennes, que ceux-ci soient sauvages ou semi-domestiques (Weladji, Klein et al., 2002; Aanes, Sæther et al., 2002). Du fait de l'imbrication des échelles d'espace et de temps dans les processus évolutifs des composants des (socio) écosystèmes, il n'y a 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. Les effets de l'indice NAO, et intrinsèquement la sévérité de l'hiver sur les populations d'ongulés peuvent toutefois être discordants, tout comme l'attribution du lien direct entre oscillation nord-atlantique et réponse biologique animale. Les paramètres biologiques étudiés sont principalement représentés par des variables démographiques, et des caractères ayant trait aux dynamiques des populations : notamment les taux de survie, la fécondité ou encore le poids corporel des faons. L'indice de NAO positif reste un facteur explicatif positivement corrélé avec les taux de croissance et le poids des faons in utero de la population de rennes sauvages de Østre Namdal (centre de la Norvège). Ceci dit, les anomalies positives de NAO semblent être délétères au poids et à la croissance des faons (sans distinction de sexe, Weladji & Holland, 2003). A contrario, les taux de croissance des faons sont négativement corrélés avec les cumuls de précipitations hivernales (notamment neige).

b) Les effets directs du changement climatique sur l'écologie du renne

Ces changements profonds des écosystèmes subarctiques, en grande partie dus au réchauffement généralisé des températures, peuvent altérer le cycle biologique des rennes semi-domestiques, ainsi que les apports en pâtures naturelles. Le renne (*Rangifer tarandus*) est un grand herbivore, apprivoisé puis progressivement élevé par le peuple Saami dans la péninsule scandinave depuis des siècles (Forbes & Kumpula, 2009). Les troupeaux de rennes sont semi-domestiques. Cela signifie qu'au-delà des interventions humaines et pastorales sur la biologie et l'écologie du renne, l'ongulé migrateur garde sa grande aire de répartition annuelle (voir plus haut).

Le changement climatique actuel a de nombreux effets directs et indirects sur l'écologie spatiale du renne, et son élevage. Parmi les effets directs, la disponibilité (spatiale et temporelle) en plantes pâturables est la plus citée dans la littérature (Forbes & Kumpula, 2009; Maynard et al. in Gutman & Reissel, 2011; Pape & Löffler, 2011; Uboni, Horstkotte et al., 2016). Celle-ci dépend aussi des propriétés de la couche neigeuse, que les rennes creusent pour trouver leur alimentation au cours de la longue période enneigée. La taille des pattes du renne *Rangifer tarandus*, bien que respectable (entre 1,10 et 1,30 m au garrot) et résultant de l'avantage sélectif d'adaptation aux conditions neigeuses (Klein, 1999), ne leur permettent pas d'évoluer aisément dans des zones fortement enneigées, avec des hauteurs supérieures à environ un mètre de neige. Il en est de même pour le pâturage, où l'excédent de neige constitue un obstacle au creusement jusqu'aux tapis de lichens terricoles fréquemment consommés par les rennes lors de l'hiver (Weladji & Holland, 2006). La densité de la couche neigeuse peut-être défavorable à son creusement du fait de la répétition d'épisodes de fonte-regel, de plus en plus fréquents dans le contexte de réchauffement climatique (Roturier et Roué 2009, Riseth et al 2011).

Les interactions entre les facteurs climatiques, la distribution biogéographique des ressources pastorales au sein de l'écotone régional tundra-taïga, les choix alimentaires de *Rangifer tarandus* L. et sa démographie sont complexes. La baisse de l'approvisionnement en lichens 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 (Cornellissen, Callaghan et al., 2001). 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 physico-chimiques 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.

Les effets du changement climatique se matérialisent aussi sur la migration des rennes. Le caractère géographique est également évoqué, en particulier en ce qui concerne la densité et les choix d'habitats sous conditions météorologiques hivernales difficiles, reconnues comme rattachées aux indices positifs de NAO (Weladji et Holland, 2003 ; Ottersen, Planque et al., 2001 ; Pape & Löffler, 2015). La question de la densité des rennes est liée à celle de la compétition intra-spécifique d'accessibilité et de disponibilité aux ressources pastorales hivernales. Les tapis de lichens terricoles, bien que fréquents dans les massifs forestiers pluri-strates des pineraies boréales, ont une répartition spatiale fortement dépendante de l'architecture forestière (lumière), mais également des conditions topographiques induites par les tourbières au sol (buttes sèches). Cette concentration de la biomasse en lichens de la famille des *Cladoniaceae*, ajouté aux conditions météorologiques hivernales difficiles sous NAO positive (temps doux et neigeux), met les rennes en concurrence. La consommation en biomasse est d'ailleurs d'autant plus importante (et cruciale) que la balance énergétique est déficitaire (thermorégulation, locomotion, etc ; Klein, 1999 ; Weladji et Holland, 2003). Les anomalies positives de NAO se surajoutent ainsi à la compétition interspécifique pour expliquer la variabilité des taux de croissance et de survie de *Rangifer tarandus*.

Toujours dans le cadre de l'écologie spatiale de *Rangifer tarandus* dans les contextes de la variabilité temporelle bioclimatique et soumis à la tendance lourde au changement climatique actuel, Pape & Löffler (2015) ont étudié leurs choix d'habitats écologiques. La définition de ces choix d'habitats écologiques reste assez difficile, étant donné l'étroite relation entre un espace-temps progressif à concevoir pour le suivi de mouvement des ongulés (Cagnacci, Focardi et al., 2011 ; Calenge, 2011), et les variabilités saisonnières bioclimatiques d'une part, variabilités individuelles éthologiques d'autre part, qui sont à même de décrire les choix d'habitats (repos, pâturage, migration, etc).

Les difficultés sont aussi liées aux échelles géographiques de prise en compte des activités des rennes, tout particulièrement la détermination biogéographique et écologique de ces habitats écologiques, qui sont eux aussi dépendants de l'échelle spatiale d'analyse

(biotope, communautés floristiques, Gaillard et al., 2010 in Pape & Löffler, 2015). Les auteurs (Pape & Löffler, 2015) préfèrent ainsi se demander où, quand et pourquoi/pour quoi les rennes bougent. Ils considèrent que l'un des enjeux actuels sur les études des choix d'habitats (en particulier de Rangifer tarandus), est de savoir s'il y a une variation temporelle dans l'utilisation des habitats, et si cette variation concerne un habitat écologique en particulier, et pour quelles raisons. Leur étude sur la saisonnalité annuelle de la sélection d'habitats porte sur un troupeau de rennes semi-domestiques, localisés à une centaine de kilomètres du troupeau de rennes sauvages du plateau d'Hardangervidda. Ils semblent démontrer que les choix inter-saisonniers d'habitats opérés par les rennes représentent une protection contre la variabilité climatique et ses effets sur la biologie des cervidés. Les habitats, ici repris à travers le concept méthodologique de niche (Calenge, 2011), ont été examinés en prenant les variables environnementales conditionnant ces niches écologiques saisonnières (indice NAO, couverture neigeuse, NDVI, vent, topographie etc) et en opérant des analyses statistiques multivariées (Analyse en Composantes Principales). Les résultats montrent qu'à l'échelle de la période d'étude (2009-2013), la sélection d'habitats présente une haute complexité, principalement due à la saisonnalité, à la variabilité climatique annuelle, et aux choix individuel des rennes équipés de GPS. Egalement, les capacités de résilience des rennes sont montrées à travers ces choix d'habitats, qui semblent se renforcer lors de conditions bioclimatiques similaires, pour différentes saisons données. « *Moreover, we found annually reoccurring patterns of habitat selection strength during different seasons that help explain coping capacities of reindeer against climate variability. In contrast with our expectations, we detected a very high inter-annual variability in habitat preferences to be related to governing climate conditions* » (Pape & Löffler, 2015).

c) Les effets indirects du changement global sur l'écologie des rennes

Pour les effets indirects du changement global sur le renne, les perturbations anthropiques, partiellement dues au développement économique de cette marge européenne (Maynard et al. in Gutman & Reissel, 2011) sont aussi reliés à la disponibilité et l'accessibilité des ressources pastorales. Dans ces conditions, l'évolution des formations végétales en termes de répartition et de disponibilité en végétation pâturable (et pâturée) a été, et doit être, suivi dans le temps, et dans l'espace. 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-).

L'extraction minière, les exploitations forestières et énergétiques, ainsi que les réseaux de communication associés se densifient, augmentant la fragmentation d'habitat des rennes et les comportements d'évitement (Tyler, Turi et al., 2007). Les paysages de l'élevage de rennes concentrent un certain nombre d'activités économiques, qui en fonction de la saison pastorale, fragmentent les paysages parcourus par les rennes. L'obstruction des paysages de l'élevage due à la construction, l'exploitation des infrastructures humaines et les activités associées affecte les choix migratoires des rennes (Skarin et Åhman, 2014). La sylviculture moderne, qui couvre 80% des surfaces forestières suédoises (*Swedish Forest Agency*) se traduit par la scarification des sols, une homogénéisation et un rajeunissement des peuplements, néfastes à la croissance des lichens terricoles et arboricoles (Östlund et al., 1997, Widmark, 2006, Roturier, 2007, Roturier, 2011, Kivinen et Kumpula, 2014, Sandström et al, 2016). Elle a des effets directs sur les déplacements des rennes, qui évitent les coupes à blanc et les infrastructures associées (Wolfe et al, 2000). 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'hydro-électricité et l'éolien, implique la construction de barrages hydro-électriques et de champs d'éoliennes. La production d'énergie, notamment renouvelable, entraîne des pertes territoriales pour les cheptels de rennes et les éleveurs, les infrastructures représentant un obstacle matériel et sensoriel (Labba, 2004, Svantesson, 2017). Sous la pression du débat public, les grands ouvrages hydrauliques ont laissé place à de plus petits mais plus nombreux édifices, (Anshelm, 2013). 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). La foresterie intensive, portée par la demande mondiale, a bénéficié des réseaux de transport et fourni des ressources à l'industrie minière. Cette foresterie industrielle perturbe ou détruit les tapis lichéniques dans les pâturages d'hiver, les clôtures contribuant de plus à la fragmentation de l'habitat (Forbes, Kumpula et al., 2009).

Il faut y ajouter la valorisation 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 (Skarin, Åhman; 2014), multiplication des résidences secondaires notamment sur les littoraux ou en bordure des lacs. L'activité touristique entraîne également une baisse significative des surfaces dédiées aux troupeaux (« cabanisation » le long des cours d'eau et des littoraux) ; et intensifient notamment les sources de stress et d'évitement pour le paysage auditif de *Rangifer tarandus* (sports de montagne à pieds ou motorisés en particulier, Nellemann, Vistnes et al, 2010 ; Panzacchi, Van Moorter et al., 2013). Les troupeaux peuvent être fatigués par l'évitement des zones perturbées ou mal nourris sur des pâturages non renouvelés. La Laponie est également entrecoupée de vastes parcs naturels et zones protégées. Le pâturage y est autorisé, alors que d'autres activités y sont limitées réglementairement (exploitation forestière, énergétique et minière). Toutefois, l'activité touristique y est importante et non sans conséquences.

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 (Panzacchi, Van Moorter, et al., 2011). En outre, elles ont des conséquences sur le paysage sonore et le dérangement de l'animal générés par les moteurs ou d'autres bruits provoqués par les activités anthropiques (Panzacchi, Van Moorter et al., 2013). Ceci concerne aussi bien les rennes sauvages que les rennes semi-domestiques, mais des nuances sont à apporter selon la domesticité (habitation aux bruits, à la proximité humaine) et le comportement social et individuel de *Rangifer tarandus* L. (Gill, Norris et al., 2001).

La fragmentation paysagère représente donc, avec le changement climatique, des menaces sérieuses, en particulier pour la survie des populations de rennes sauvages, considérés depuis 2016 comme une espèce vulnérable. (Gunn, IUCN, 2016). Tous ces facteurs contribuent à réduire directement les possibilités d'approvisionnement en ressources fourragères par le renne. Certaines stratégies d'évitement des impacts matériels et physiques des infrastructures humaines et immatériels par les sources de nuisances sonores tendent à déséquilibrer la balance entre hardes et cheptels de rennes et ressources végétales. Les zones les plus évitées par les rennes deviennent celles où la biomasse et les qualités nutritionnelles des végétaux sont les meilleures (Dahle, Reimers et al., 2008). A l'opposé, les pâturages naturels moins touchés par les multiples perturbations anthropiques sont ceux où le

surpâturage et le sur-piétinement sont les plus évidents, du fait de la concentration d'un nombre important de rennes semi-domestiques ou sauvages (Kivinen & Kumpula, 2014; Sandström, Granqvist Pahlén, 2003). 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 d'origine anthropogénique (Tyler, Turi et al., 2007). 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 humaines diverses, elles-mêmes directement et indirectement liées aux effets locaux du changement climatique.

D - Le renne, marqueur paysager des paysages de l'élevage semi-nomade en Laponie scandinave

1) La Laponie, questionnant les concepts d'espace et de territoire

Le statut de domesticité d'une espèce (animale ou végétale) est lié à sa proximité géographique et culturelle au foyer de peuplement humain. S'intéresser à un ongulé semi-domestique tel que le renne suppose de se pencher sur les liens entre sa part sauvage et naturelle, et sa part domestique et culturelle. Comprendre ces liens peut s'opérer par une démarche géographique prenant en compte les défis environnementaux associés à l'élevage semi-nomade de rennes.

La Laponie suédoise correspond aux territoires des communautés d'éleveurs de rennes, situés dans la moitié septentrionale de la Suède, entre 61° et 69° de latitude Nord, dans 4 comtés (Västernorrland, Jämtland, Västerbotten et Norrbotten, figure I.1). Elle fait partie de la « Laponie historique », dont les contours correspondent à l'aire linguistique et aux zones d'élevage des rennes semi-domestiques des populations saamies d'Europe du Nord (Cabouret, 1986, Lundqvist 2003, fig.1), apparus antérieurement à la gestion territoriale étatique (Ojala, 2009).

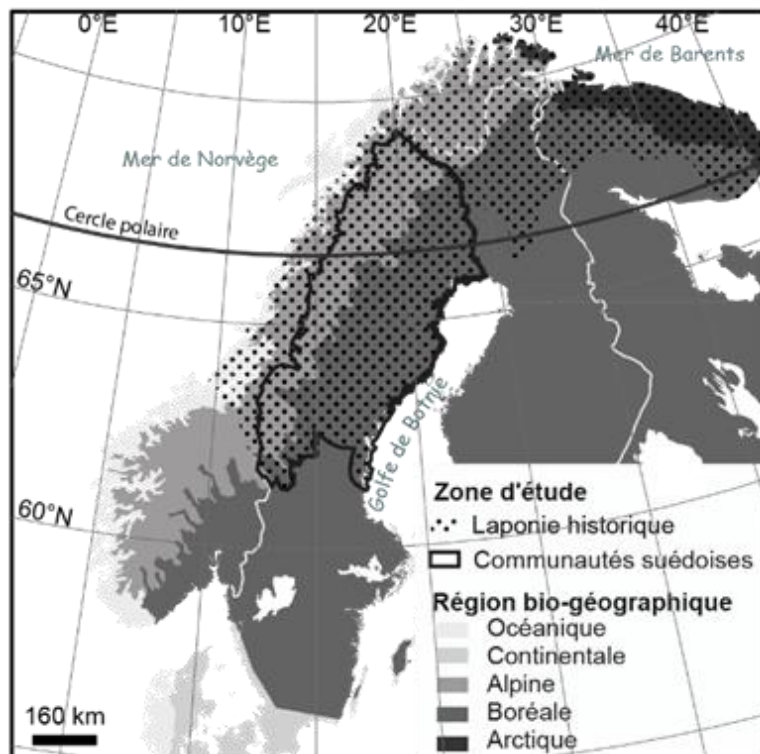


Figure I-1 : Carte de situation de la Laponie suédoise (Sources: E. Charlot, 2015, RenGIS 2.04, 2017, EEA, 2017; Réalisation: G. Duval, 2017, à paraître dans Courault, Duval et Cohen (accepté))

La « Laponie historique » peut avoir deux significations. La première est la province historique de Laponie, en Suède, apparue au XVI^{ème} siècle, mais dont les contours géographiques ne sont tracés qu’au XVIII^{ème} siècle 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. La deuxième signification de la « Laponie historique » est *Sapmi*. Elle correspond 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 (Delaporte, Roué, 1986). Ce particularisme ethnolinguistique régional est désormais associé à une tendance à la revitalisation de l’activité pastorale d’élevage de rennes, entrant en résonance avec les discours transnationaux de droit au territoire et de droit à l’auto-détermination 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 (Hoffmann-Schickel, 2011).

Le processus de semi-domestication s'est opéré sur le temps long, plusieurs jalons marquant l'évolution conjointe des sociétés pastorales saamies, et scandinaves. Les Saamis, considérés comme dernière population autochtone d'Europe, se caractérisent par leur nomadisme dans les sources historiques. Initialement chasseurs-cueilleurs, les modes d'organisation socio-spatiaux laissent croire en une confusion entre territoires humains et animaux. Les pratiques d'élevage s'initient d'abord en accompagnant la migration des troupeaux de rennes sauvages, étalée sur des centaines de kilomètres entre les aires de vèlage et les pâturages d'hiver. Au milieu du « court XXème siècle », l'ethnologue Ernst Manker identifie trois types de gyres de migration (1963). Le premier, « centrifuge », où les déplacements se font depuis un camp central, le deuxième forme un cercle, sur lequel les Saamis forestiers et les rennes se déplacent, et le troisième, la navette, où « le nomadisme des Lapons des montagnes se caractérise par son balancement annuel d'avant [prairies d'altitude, zone de vèlage] en arrière [retour au camp d'hiver, mise en pâture hivernale dans la forêt de conifères] ». Cette catégorisation entre types de communautés est encore utilisée par les autorités régionales suédoises, bien que critiquée par les éleveurs (Svonni, 2010, Manker, op.cit.). Les droits de renniculture ainsi que le degré de contrôle sur les troupeaux de rennes sont différents selon le type de communauté (Svonni, op.cit.) (voir encadré n°2).

Actuellement, la semi-domestication décrit aussi bien le statut biologique et culturel du renne que l'étendue spatiale et temporelle des moments-clés de l'élevage : pendant la saison chaude, les territoires dédiés aux périodes nuptiales et au vèlage se démarquent par le relâchement relatif du contrôle opéré par les éleveurs; tandis que le marquage de faons à la fin du printemps, la séparation et le suivi des troupeaux dans les pâturages d'hiver tendent à concentrer les troupeaux et à intensifier les interventions humaines de contrôle des flux de migration des cheptels.

Le pastoralisme saami contribue à façonner les paysages naturels et culturels à travers l'incomplète domestication du renne (Roué, 2011). En effet, le renne semi-domestiqué constitue une ressource naturelle et culturelle pour les éleveurs appartenant à la communauté ethnolinguistique saamie (Delaporte, Roué, 1986; Roturier, Roué, 2009). Les « Lapons », « Sâmes », ou Saamis ont le statut de minorité nationale ethnique et linguistique dans plusieurs pays (Convention - Cadre UE sur la Protection des minorités nationales, Conseil de l'Europe; Charte Européenne des langues régionales ou minoritaires, 1998).

L'ère industrielle, puis l'ère numérique sont cependant marquées par la rationalisation et la motorisation de ces élevages traditionnels. La politique assimilationniste des Etats scandinaves lisse les différences entre Scandinaves et Saamis, et impose des normes contraignantes à l'activité d'élevage, tandis que celle-ci émerge comme marqueur symbolique identitaire fédérant les cultures saamies et leurs revendications (Hoffmann-Schikel, 2010). 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 Etats scandinaves, en lien avec le changement climatique. Les revendications territoriales et les conflits d'usage autour des terres ancestrales de l'élevage sont nombreux et inter-reliés. On peut en premier lieu évoquer la remontée latitudinale des températures liée au changement climatique, qui a favorisé le développement de nouvelles activités (Tyler, Turi, 2007). Par exemple, le projet EALAT est une initiative menée par les éleveurs de rennes autour du globe « [...] *qui examine le pastoralisme du renne au regard du changement climatique*³ ». La question des relations entre territoires animaux et humains doit donc prendre en compte le contexte d'intensification de l'utilisation des sols, porté par d'autres acteurs que les éleveurs. Parallèlement et paradoxalement, le renne en tant que symbole de la Laponie contribue à nourrir l'imaginaire occidental, à destination du tourisme international (Forbes, Kumpula et al., op.cit.).

2) L'élevage de rennes en Laponie, des systèmes pastoraux flexibles

Ces interrelations posent la question de la place de l'humain au sein de ces régions, en particulier dans le nord-est eurasiatique. Historiquement, le renne a été chassé de manière extensive par les premiers chasseurs-cueilleurs du Paléolithique (Kuntz, 2011). 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 (Forbes & Kumpula, 2009). Actuellement, les populations nomades saamies sont réparties entre la Norvège, la Suède, la Finlande et l'ouest de la Russie (voir encadré n°3, annexe 1).

Le mode d'organisation socio-économique communautaire des éleveurs correspond au « *Sameby* », entité économique et sociale rassemblant plusieurs éleveurs de rennes saamis,

³ <http://reindeerherding.org/projects/ealat/>

dont les frontières géographiques sont variables dans l'espace et dans le temps. Au cours du XXème siècle, l'ethnologue E. Manker (1953) définit trois modèles de « nomadisme lapon », selon la forme des trajectoires de migration saisonnière des rennes : réticulaire dans les régions où la pêche en eau douce était pratiquée en complément, en fuseau le long de vallées glaciaires, ou cyclique dans les grandes étendues forestières. Le nomadisme des éleveurs a ensuite évolué vers un statut de semi-sédentarité (Delaporte et Roué, 1986), pouvant varier selon les écotypes de rennes que chaque communauté a historiquement apprivoisés : faible mobilité annuelle pour les rennes forestiers, grande aire de répartition pour les rennes montagnards (Kuntz, 2011) (voir encadrés n°4, et n°5, annexe 1, l'exemple de la communauté de Gabna).

Les effectifs de rennes semi-domestiques en Suède auraient augmenté de 180 000 en 1950 à 275 000 têtes en 2010 (Uboni et al, 2016, 254.000 en 2017 selon le Parlement Saami⁴). En 1986, l'accident de Tchernobyl a entraîné la contamination et l'abattage de rennes, l'apport de foin et de fourrage d'hiver s'étant accru depuis (Labba, 2004, Tunón et Sjaggo, 2012), une autre cause pouvant être la régression du lichen depuis les années 90 (Sandström et al, 2016). Le nombre maximum de rennes autorisés par communauté est fixé par le conseil administratif du comté de Nord-Botnie (en concertation avec le Parlement Saami et les exploitations d'élevage). Le plafond (141.000 têtes à l'échelle du comté) a toutefois été dépassé 8 années sur 15 entre 1999 et 2013 (Parlement Saami de Suède). Dans les concessions, le nombre de rennes est également juridiquement limité. Les restrictions spatiales liées à la fragmentation du paysage entraînent des coûts accrus de transport des rennes pour contourner les obstacles (Tunón et Sjaggo, 2012) et une moindre prise de poids chez les animaux. La viande est estimée de moindre qualité, tirant les prix de vente vers le bas (Tyler, Turi et al, 2007). Cette moindre qualité est peut-être liée à la distribution compensatoire de foin (Skarin et al, 2016), mal toléré par les rennes (c.o. vétérinaires et représentant du Parlement Saami, *Nordic Conference on Reindeer Husbandry*, Jukkasjärvi, Sweden, 29-31 May 2017).

E - Conclusion : enjeux méthodologiques et pistes de travail

A l'ère de l'information, les "Big Data" constituent une grande part du futur de l'écologie et de la biogéographie (Hampton et al., 2013). Les expertises transdisciplinaires pour les problématiques socio-écologiques s'appuient actuellement sur des analyses

⁴ www.sametinget.se

multifactorielles et pluri-scalaires dans les suivis environnementaux. Grâce aux avancées informatiques actuelles, de grandes quantités de données peuvent ainsi être traitées et calculées, et tendent à l'horizontalité des interactions entre experts, citoyens et institutions (Kambalta et al., 2014). Ceci dit, l'ère des volumes intensifs de données scientifiques nécessite des outils spécifiques pour collecter et centraliser de nombreux jeux de données, souvent hétérogènes. C'est particulièrement le cas pour les problématiques d'élevage et/ou faunistiques, qui interagissent à la fois dans les systèmes culturels et naturels. En plus de l'aspect pluri-scalaire, l'information pluri-temporelle représente une autre problématique, considérant les tendances à moyen-terme du changement climatique et de la perte en biodiversité, qui interagissent avec les dynamiques à plus court termes, tels que la variabilité inter et intra-annuelle. Dans le cadre de l'évaluation d'impacts environnementaux, et en particulier dans les champs de l'écologie animale, il semble requis d'avoir une résolution spatiale d'analyse équivalente entre les facteurs biotiques et abiotiques, pour tenter de décrire, d'expliquer et de prévoir comment une population animale est susceptible de se déplacer dans un étendue géographique limitée.

Compte-tenu de ces enjeux méthodologiques, nous déploierons nos travaux dans quatre directions, qualifier les changements globaux à l'échelle régionale, puis à l'échelle locale, caractériser les changements structurels et fonctionnels de la couverture végétale pâturée par la télédétection et par l'étude de terrain, et enfin tenter de comprendre l'impact de l'irrégularité climatique sur les déplacements des rennes. Notre démarche consistera à référer toutes ces analyses à des découpages de la réalité ayant a priori un sens pour les éleveurs Saamis, avec lesquels nous avons tenté au long de ce travail de doctorat de discuter. Compte-tenu de la très grande abondance de travaux, dont nous n'avons rendu compte que d'une fraction dans ce qui précède, l'ambition de cette thèse est de vérifier en quoi cette approche tentant de croiser le « naturel » et le « culturel » apportera un éclairage complémentaire et peut-être contribuera à quelques conclusions sur la résilience de ces socio-écosystèmes.

Première partie : Quantifier les effets régionaux du changement global sur les paysages culturels de l'élevage de rennes en Scandinavie

II - La fragmentation des paysages de l'élevage de rennes : une étude de cas en Laponie suédoise⁵

A - Introduction

Aux hautes-latitudes européennes, le changement global auquel sont soumis les territoires d'élevage des rennes se traduit par une densification et une remontée en latitude et altitude des ligneux dans les paysages subarctiques, et par le développement d'activités économiques nouvelles, les deux conjointement stimulés par l'élévation généralisée des températures (Arnould, 2006 ; UNESCO, 2010 ; Kullman, 2015 ; IPCC, 2013, Lewis et Aitken, 2013, Gascard et al, 2017). Le développement économique est marqué par l'artificialisation des sols (urbanisation, infrastructures de transport, industrielles et minières) et l'intensification de leur utilisation (AEE, 2011). Les travaux traitant de la vulnérabilité et de la résilience de l'élevage des rennes vis-à-vis du changement global sont nombreux (ex. Tyler et al, 2007, Magga et al, 2009, Heikkinen et al, 2012, Carson et Peterson, 2016), Tyler et al. (2007) ont notamment proposé un cadre général d'analyse à l'échelle de la Laponie scandinave. Dans le contexte de changement climatique, ils considèrent que la multiplication des infrastructures (urbaines, touristiques, énergétique ou de transport) représente un facteur prépondérant de la vulnérabilité de l'élevage de rennes, du fait de la fragmentation des paysages, ce qui a également été confirmé par Löf (2013), selon laquelle ces nouvelles activités et la fragmentation des paysages induite par la reconversion des sols ont davantage d'impact sur l'élevage des rennes en Laponie suédoise que les effets directs du changement climatique.

Le paysage désigne, d'après la Convention de Florence (2000), « *une partie de territoire telle que perçue par les populations, dont le caractère résulte de l'action de facteurs naturels et/ou humains et de leurs interrelations* ». Dans cet article, le concept de paysage est compris comme la mosaïque de différentes occupations du sol plus ou moins étendues (composition) et connectées (configuration), en référence au dialogue établi de longue date entre géographie et écologie du paysage (Forman et Godron, 1986, Marty et al, 2006), notamment dans l'appréhension de la vulnérabilité des activités d'élevage (Cohen et al, 2011).

⁵ Ce chapitre s'inspire très largement de Courault R., Duval G. et Cohen M. (s.p.), « La fragmentation des paysages de l'élevage des rennes. Une étude de cas en Laponie suédoise », à paraître dans *Géocarrefour* (accepté). La présentation du contexte a toutefois été substantiellement allégée, afin de ne pas générer de répétitions avec le chapitre 1 consacré à l'état de l'art. La liste des références est regroupée dans la bibliographie en fin de volume.

La configuration et la composition du paysage permettent, facilitent ou compliquent la présence et la circulation des êtres vivants, humains et non-humains, en fonction de leur perception des obstacles et de zones d'intérêt. Les marqueurs culturels paysagers (toponymes, sites sacrés, etc) et la pérennisation des savoirs locaux constituent le versant immatériel des paysages ; bien que cruciaux dans la compréhension des enjeux territoriaux et socio-politiques de l'élevage de rennes (Cogos et al., 2017), ceux-ci ne sont pas pris en compte dans cette étude sur la fragmentation des paysages matériels de l'élevage de rennes suédois.

La fragmentation des paysages⁶ est généralement invoquée à propos des déplacements de la faune sauvage (Lord et Norton, 1990, Tucker et al, 2018), elle va souvent de pair avec les processus d'artificialisation et d'intensification de l'occupation humaine (Forman et Godron, 1986, AEE, 2011, Tucker et al, 2018). Elle impacte aussi le renne semi-domestique et l'activité d'élevage s'y adossant. En effet, le renne est un herbivore dont la migration s'effectue annuellement à l'échelle de centaines de kilomètres (Skarin et Åhman, 2014). C'est parce que les rennes trouvent des ressources alimentaires à chaque saison dans chaque habitat entre lesquels ils se déplacent qu'il est important de quantifier la fragmentation des paysages. La progressive semi-domestication du renne par les éleveurs Saamis n'a pas supprimé ce trait adaptatif : il permet à l'ongulé d'exploiter la diversité des ressources alimentaires et leur croissance végétative à l'échelle de l'écotone taïga-toundra durant son cycle biologique annuel (Klein, 1990). Plusieurs études, synthétisées dans une méta-analyse rédigée par Skarin et Åhman (2014), ont ainsi été consacrées à l'impact des infrastructures linéaires ou surfaciques sur les déplacements à longue-distance des populations sauvages et semi-domestiques de *Rangifer tarandus* L. en Scandinavie. Les dérangements dus aux sons, aux obstacles, voire aux collisions, induisent des stratégies d'évitement (Vistnes et Nellemann, 2008) et ainsi un accès réduit aux ressources alimentaires, avec des effets amplifiés à certains moments clef du cycle biologique de l'espèce. Les éleveurs de Laponie suédoise, dont le cheptel totalisait 254.000 têtes en 2017, sont sensibilisés à ces enjeux paysagers, d'après le site du Parlement Saami. En Suède, si les Saamis ont un droit exclusif à pratiquer l'élevage des rennes (Tunón et Sjaggo, 2012) et sont reconnus en tant que peuple distinct (Constitution suédoise de 2011), leurs pâturages sont en effet soumis à la gestion étatique (Reindeer Husbandry Act). Les terres ancestrales saamies correspondent actuellement à un simple droit d'utilisation (Strömngren, 2011 ; FAO, 2003).

⁶ Voir la définition de cette notion en chapitre 1.

Cet article traite la question de la vulnérabilité de l'activité d'élevage face aux changements environnementaux à travers le prisme de la fragmentation des paysages en Laponie suédoise, en mobilisant des notions et méthodes généralement utilisées pour étudier la faune sauvage. La présente étude se situe à une échelle spatiale régionale, intermédiaire entre les précédents travaux ayant traité de la fragmentation des paysages de *Rangifer tarandus* L. Ceux-ci ont été menés soit à l'échelle de l'aire de répartition du renne par une méta-analyse (Skarin et Åhman, 2014) soit à celle d'une communauté d'éleveurs (cartographie réalisée par Driedger, 2014) voire aux échelons micro-locaux d'installations touristiques, ou énergétiques par le suivi des animaux (Nellemann et al, 2010 ; Helle et al, 2012 ; Skarin et al, 2016). Cependant, une analyse synthétique de la fragmentation des paysages à l'échelle de l'ensemble des communautés suédoises d'éleveurs de rennes ne semble pas avoir été menée jusqu'à présent. Notre objectif est de cartographier la fragmentation des paysages pastoraux de Laponie suédoise et d'en évaluer l'ampleur selon les habitats écologiques parcourus par les rennes semi-domestiques et les territoires des communautés d'éleveurs adossés à l'élevage. La fragmentation des paysages migratoires des troupeaux de rennes est ici traduite méthodologiquement par l'évitement éthologique théorique de l'ongulé aux différents postes d'occupations humains. Dans ce contexte, nous avons pris en compte les effets des infrastructures sur les déplacements saisonniers d'échelle régionale (>2 km, en années, mois ou décades), correspondant à l'échelle de la région étudiée (Skarin et Åhman, 2014). Nous faisons l'hypothèse qu'en prenant en compte l'intégralité de la Laponie suédoise (figure II.1), la fragmentation paysagère ne se traduirait pas uniformément, et que cette variabilité de la répartition de la fragmentation dépendrait directement ou indirectement de facteurs géographiques et sociaux.

B - Région d'étude, matériel et méthodes

1) La Laponie suédoise, territoire d'un élevage socio-écologiquement flexible et fragmenté par de multiples activités

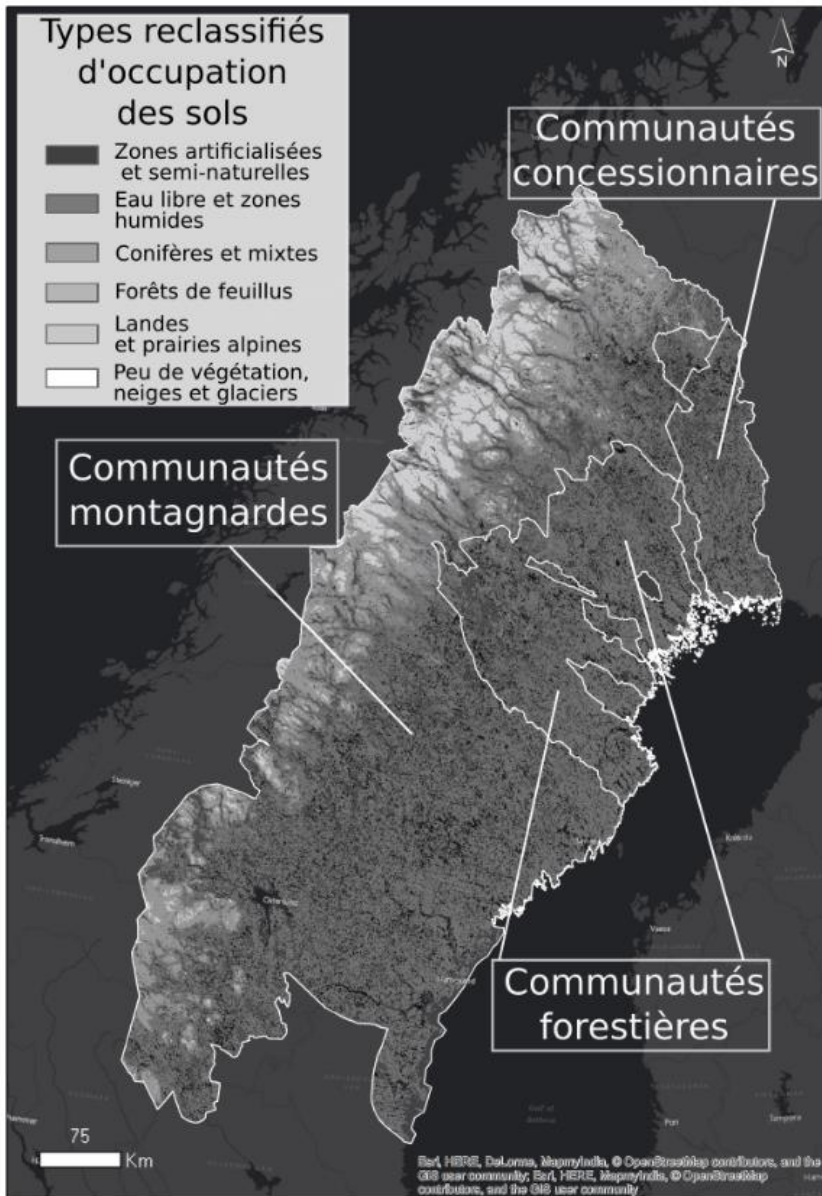


Figure II-1: Types de communautés pastorales et grandes catégories d'utilisation des sols (Sources: Corine Land Cover 2012, EEA, RenGIS 2.0, Réalisation : R. Courault 2017)

La Laponie suédoise correspond historiquement aux territoires des communautés saamies (élevant les rennes, les chassant, ou pêcheurs), au sein de l'écotone entre les régions biogéographiques boréale et alpine (figure II.1). Le renne semi-domestique exploite cet écotone où il se déplace saisonnièrement, depuis les forêts boréales exploitées en hiver pour leurs lichens terricoles et épiphytes, vers les piedmonts et les versants de la chaîne fennoscandienne en été. Les territoires des éleveurs de rennes, sur lesquels ces derniers n'ont pas de droit de propriété, sont également le lieu de nombreuses autres activités, foresterie, exploitation minière et énergétique, tourisme, associées avec des infrastructures surfaciques et linéaires⁷, qui contribuent à fragmenter les paysages.

⁷ Le contexte biogéographique et culturel de la Laponie suédoise est cartographié et décrit plus amplement dans le chapitre 1. Un encadré est consacré à la définition de la Laponie en annexe 1. De même, un panorama des activités économiques autres que l'élevage y est dressé.

2) Type de communauté d'éleveurs, spatialisation de leurs activités et démographie des cheptels

Le mode d'organisation de l'élevage de rennes semi-domestiques a varié dans l'espace et dans le temps (chapitre 1). Actuellement, les contours des communautés d'éleveurs sont formalisés dans une base de données géographique en accès libre (RenGis 2.03) initiée par les universitaires suédois, les représentants politiques des éleveurs de rennes (Parlement Saami), les forestiers nationaux et privés, ainsi que les compagnies minières de la région (figure II.1). Outre la délimitation figée des territoires, qui semble éloignée de la culture saamie (c.o. éleveurs du Parlement Saami), chaque communauté est catégorisée selon trois modalités. Les communautés peuvent ainsi être montagnardes, forestières ou concessionnaires. Dans les sameby montagnardes (N=33 ; 81% de la superficie totale ; source RenGis 2.03), les rennes se déplacent entre la forêt boréale (dans certains cas jusqu'au littoral) pendant l'hiver, et les landes et pelouses de la chaîne fennoscandienne au cours de l'été (figure II.1). Dans les sameby forestières (N=10 ; 12% de la superficie totale), les rennes se déplacent dans la forêt boréale, entre le littoral en hiver et la limite nord-ouest du domaine en été (figure II.1). Le troisième type de communauté est représenté par les éleveurs concessionnaires (8 Koncession, 7% des surfaces), situé dans la forêt boréale jouxtant la frontière finlandaise. Ces concessions sont régies par un statut juridique particulier négocié pour les éleveurs de rennes non-saamis. Les éleveurs ont un nombre limité de rennes et de pâtures clôturées, dont ils sont propriétaires fonciers (Tunón et Sjaggo, 2012).

Les entités spatiales de la base de données géographique Rengis 2.0 nous semblent être une simplification des modes traditionnels du « nomadisme lapon » décrits par l'anthropologue Manker (1953). Alors que le système d'élevage semi-nomade de rennes et les territoires associés font figure d'emblèmes culturels et politiques marquant les paysages (Korsmo, 1987, Hoffmann-Schickel, 2010 ; Cogos et al., 2017), dans un contexte de diminution voire de perte de pâturages (Maggia et al, 2009, Heikkinen et al, 2012, Löf 2013, Carson et Peterson, 2016), le mode actuel de pastoralisme tend à ressembler de plus en plus à de la renniculture. Certains éleveurs sont réticents à évoquer leurs pratiques actuelles (géographiques, agronomiques, technologiques, politiques) qu'ils perçoivent comme éloignées de la culture saamie (c.o. éleveurs du Parlement Saami). De plus, cette base de données géographique telle qu'elle existe actuellement (RenGis 2.0, 2017) tend à figer le partage de l'espace entre parties prenantes, négligeant les dynamiques bioclimatiques inter-saisonniers et interannuelles régionales, et la flexibilité pastorale associées à celles-ci (c.o.

éleveur du Parlement Saami, c.o. NOVA/IRSAE PhD Course « *Connecting science and local communities in Rangifer research* », 10-15 August 2015, Enafors, Sweden).

Les effectifs de rennes du comté de Nord-Botnie ont augmenté entre 1999 et 2005, avant de se stabiliser jusqu'en 2013 (cheptel des sameby), voire de diminuer dans les territoires concessionnaires (chapitre 3, Courault et Cohen, 2015). Cette évolution s'inscrit dans une tendance à la hausse des effectifs observée à l'échelle de la Suède entre 1950 et 2010 par Uboni et al (2016). Le nombre maximum de rennes autorisés par communauté est fixé par le conseil administratif du comté de Nord-Botnie (en concertation avec le Parlement Saami et les exploitations d'élevage). Le plafond (141.000 têtes à l'échelle du comté) a toutefois été dépassé 8 années sur 15 entre 1999 et 2013 (Chapitre 3, Courault et Cohen, 2015). Les restrictions spatiales liées à la fragmentation du paysage entraînent des coûts accrus de transport des rennes pour contourner les obstacles (Tunón et Sjaggo, 2012) et une moindre prise de poids chez les animaux. La viande est estimée de moindre qualité, tirant les prix de vente vers le bas (Tyler et al, 2007). Cette moindre qualité est peut-être liée à la distribution compensatoire de foin (Skarin et al, 2016), mal toléré par les rennes (c.o. vétérinaires et représentant du Parlement Saami, *Nordic Conference on Reindeer Husbandry*, Jukkasjärvi, Sweden, 29-31 May 2017). L'étude ci-présente sur la fragmentation des paysages de l'élevage suédois de rennes permettra de mieux comprendre les intrications entre pertes d'habitats supposés, communautés d'éleveurs de rennes touchées et démographie des rennes semi-domestiques.

3) Matériel et méthodes

Pour étudier la fragmentation des paysages, nous avons utilisé différentes données, se référant à l'occupation des sols, aux voies de communication et aux contours des zones protégées et des territoires des communautés d'éleveurs. Ces données ont été intégrées dans une base de données géographique et traitées par des méthodes géomatiques et statistiques afin de calculer le taux de fragmentation des paysages, et d'évaluer le rôle de différents facteurs potentiellement explicatifs.

Le programme européen Corine Land Cover⁸ est une base de données sur l'occupation du sol. Le millésime 2012 en format vectoriel est utilisé pour déterminer l'occupation du sol dans les entités spatiales testées ici. La géométrie des vecteurs des millésimes 2000, 2006 et

⁸ <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>

2012 n'étant pas comparable, la fragmentation des paysages en tant que processus temporel n'a pas été abordée dans cette étude. Différentes catégories d'occupation du sol sont distinguées par Corine Land Cover, dont certaines correspondent aux habitats du renne (forêts de résineux, mixtes et de feuillus, landes et bruyères, pelouses). La carte Corine Land Cover a aussi été utilisée pour identifier des surfaces exploitées pour la sylviculture, à défaut de disposer d'une carte des coupes à blanc. La catégorie « forêts et végétation arbustive en mutation », localisée dans le domaine de la forêt boréale, hors des zones protégées (elle n'y représente que 0,8% des surfaces d'après des calculs réalisés avec le SIG en croisant la carte CLC et les cartes des aires protégées, voir sources dans les références) a été interprétée comme des plantations de résineux en croissance ou des coupes à blanc en cours de repousse. La carte des changements 2006-2012 a conforté cette interprétation, 99% des changements se produisant à partir de cette catégorie vers les forêts de résineux (plantations en croissance) ou inversement (coupes à blanc, Source CLC 2006-2012). Cette catégorie de forêts de résineux représente en 2012 près de 82% des surfaces semi-naturelles exploitées et artificialisées de la région d'études (forestières, agricoles, urbaines et industrielles, en noir sur la figure II.1), ainsi que 98% des surfaces semi-naturelles exploitées (forestières et agricoles, CLC 2012). La carte Corine Land Cover 2012 a également été utilisée pour sélectionner les surfaces artificialisées provoquant un dérangement potentiel pour les rennes, bien que la taille de l'unité minimale cartographiée (25 ha) exclue les petites surfaces artificialisées. Ces dernières correspondent notamment à des chalets dispersés, déconnectés des surfaces urbaines et à de petites structures énergétiques isolées, omises dans les millésimes et dans les cartes de changement Corine Land Cover (Robert, 2016), bien que leur effet de dérangement sur les rennes soit notable (Nellemann et al, 2010).

La base DIVA-GIS⁹ met à disposition les réseaux routier et ferré. Les cartes des zones protégées et du site Unesco sont disponibles respectivement sur le site de l'Agence Européenne de l'Environnement¹⁰ et sur le portail de données européennes¹¹. Les contours des communautés d'éleveurs et leurs attributs (noms, type) sont téléchargeables sur le site du Parlement Saami suédois (base RenGis 2.0⁴). Nous avons évoqué plus haut les limites de cette cartographie, liées notamment aux conditions de sa réalisation. Une fois ces données intégrées dans une base de données géographiques, un premier croisement a consisté à calculer la

⁹ www.diva-gis.org

¹⁰ <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps>

¹¹ <https://www.europeandataportal.eu>

composition paysagère au sein des territoires des communautés d'éleveurs, *Sameby* et *Koncession*. La typologie de la composition paysagère (tableau II.1) permet de vérifier par la suite les liens entre composition et fragmentation des paysages.

Une étape préalable au calcul du taux de fragmentation des paysages consiste à déterminer l'étendue de la zone perturbée par les infrastructures linéaires ou surfaciques gênant les déplacements des rennes semi-domestiques. Nous avons pour cela utilisé l'état de l'art de Skarin et Åhman (2014) et retenu les valeurs moyennées de distance de zone perturbée indiquées dans des travaux récents concernant les rennes semi-domestiques, en fonction des résultats du suivi des déplacements de populations. D'après ces auteurs, ces valeurs sont inférieures à celles affectant les rennes sauvages ou les caribous canadiens utilisées dans l'étude de Driedger (2014). Les infrastructures routières génèrent des zones perturbant le comportement de 0 à 1km de large (Lundqvist, 2007), jusqu'à 1,5 km pour les routes principales (Anttonen, et al, 2011). Les surfaces bâties et habitées, les chalets dispersés et les lignes à haute tension génèrent à la fois des obstacles et des dérangements jusqu'à 4 km de distance (Helle et al, 2012 ; Vistnes et Nellemann, 2001). Nous avons estimé que le dérangement engendré par les autres surfaces artificialisées (industrielles, énergétiques, minières, aéroports) est comparable à celui des surfaces habitées, des lignes à haute tension et des quartiers de chalets, et celui des voies ferrées aux routes principales, compte tenu du type de train et de la morphologie des voies.

Tableau II-1 : Types de composition paysagère dans les territoires des communautés d'éleveurs d'après la classification ascendante hiérarchique (CAH). Les pourcentages correspondent aux barycentres des classes de la CAH (Sources : CLC 2012, RenGIS 2.0)

Composition paysagère en %	Types de composition paysagère dans les territoires des communautés d'éleveurs				
	Forestier humide très exploité	Forestier humide exploité	Forestier sec exploité	Montagnard forestier exploité	Alpin-forestier peu exploité
Forêts de conifères et mixtes	17,2	48,1	62,8	31,5	22,6
Surfaces exploitées par la foresterie et l'agriculture	31,8	15,5	13,3	12,7	4,5
Habitats de piedmont et d'altitude	2,5	2,6	5,6	32	54,4

Zones humides	29,3	27,5	9,7	14,5	10,3
Eau libre	15,4	5,0	6,6	8,3	6,4

Une étape préalable au calcul du taux de fragmentation des paysages consiste à déterminer l'étendue de la zone perturbée par les infrastructures linéaires ou surfaciques gênant les déplacements des rennes semi-domestiques. Nous avons pour cela utilisé l'état de l'art de Skarin et Åhman (2014) et retenu les valeurs de distance de zones perturbées indiquées dans des travaux récents concernant les rennes semi-domestiques, selon la généralisation de leurs résultats du suivi des déplacements de populations. D'après ces auteurs, ces valeurs sont inférieures à celles affectant les rennes sauvages ou les caribous canadiens utilisées dans l'étude de Driedger (2014). Les infrastructures routières génèrent des zones perturbant le comportement de 0 à 1 km de large (Lundqvist, 2007), jusqu'à 1,5 km pour les routes principales (Anttonen et al, 2011). Les surfaces bâties et habitées, les chalets dispersés et les lignes à haute tension génèrent à la fois des obstacles et des dérangements portant à 4 km de distance (Helle et al, 2012 ; Vistnes et Nellemann, 2001). Nous avons estimé que le dérangement engendré par les autres surfaces artificialisées (industrielles, énergétiques, minières, aéroports) était comparable à celui des surfaces habitées, des lignes à haute tension et des quartiers de chalets, et celui des voies ferrées aux routes principales, compte tenu du type de train et de la morphologie des voies.

Une première étape consiste à cartographier les éléments fragmentant les paysages, puis à déterminer les habitats des rennes les plus affectés par ce processus. Pour cela, avec le logiciel Arcgis 10.4, chaque objet (linéaire ou surfacique) est sélectionné et une zone tampon lui est appliquée. L'intersection avec la carte Corine Land Cover 2012 permet de déterminer les habitats les plus et les moins fragmentés. L'occupation du sol dans le quart des polygones les plus petits (les plus fragmentés) et dans le quart des polygones les plus grands (les moins fragmentés) permet d'établir une table de contingence afin de vérifier par le test du χ^2 les relations d'indépendance entre habitats et intensité de la fragmentation. Une deuxième étape vise à affiner le diagnostic de la fragmentation des paysages au niveau des communautés d'éleveurs, afin d'identifier leurs facteurs de vulnérabilité en fonction de leur localisation. Le pourcentage de surface non fragmentée est calculé pour les territoires des différentes communautés d'éleveurs saamies et concessionnaires. Différents descripteurs sont par la suite sélectionnés en fonction de l'état de l'art, de la disponibilité des données et de nos premiers résultats (tableau II.1, figure II.2). Les différentes hypothèses testées concernant les facteurs de la fragmentation sont les suivantes : le type de communauté d'éleveurs, la composition du

paysage, la densité d'infrastructures et les nœuds routiers, la proximité au littoral, le pourcentage de zones protégées. Les relations des descripteurs avec le pourcentage de surface non fragmentée sont finalement testées statistiquement (tests de corrélation pour les variables quantitatives et tests non-paramétriques pour les variables qualitatives).

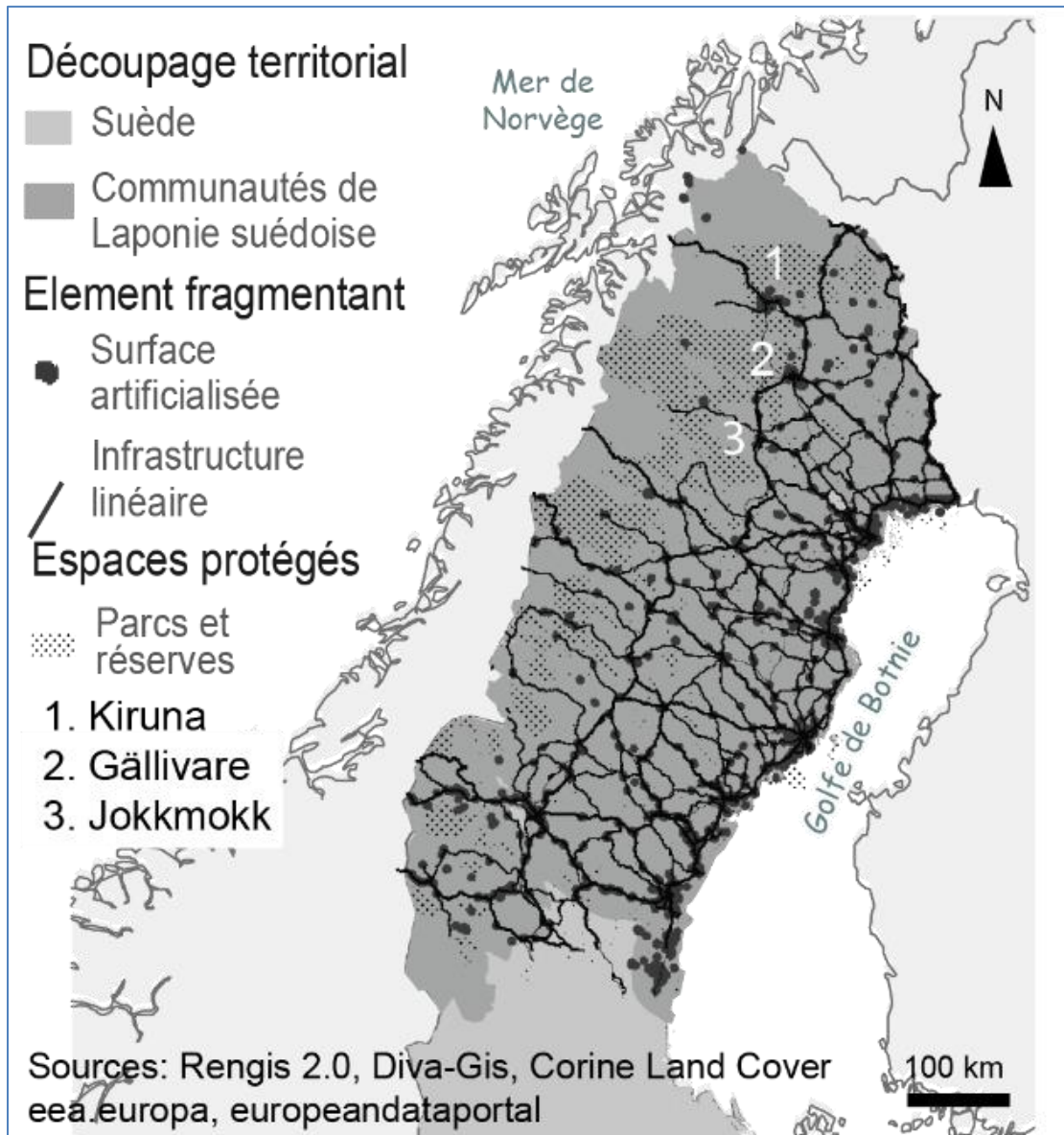


Figure II-2 : Eléments fragmentant les territoires de Laponie suédoise (Réalisation: G. Duval, 2017)

C - Résultats

1) La fragmentation des paysages de l'élevage

Les éléments fragmentant les paysages de l'élevage de Laponie suédoise sont i) les surfaces artificialisées, urbaines ou industrielles, particulièrement concentrées sur le littoral du Golfe de Botnie, ii) les infrastructures linéaires de transport terrestre, iii) les nœuds associant surfaces urbaines, minières et éléments linéaires (ex. Gällivare, Kiruna et Jokkmokk, figure II.2). En revanche, les espaces protégés, qui représentent 15% de la surface, ont peut-être modéré cette fragmentation, compte-tenu de leur date de création au début du 20^{ème} siècle. Toutefois, certaines zones protégées sont cernées de zones artificialisées et d'infrastructures de transport, suggérant une fragmentation importante à leur périphérie. (Figure II.2).

La relation de dépendance entre l'occupation du sol et les situations de très forte ou très faible fragmentation a été testée par le χ^2 , hautement significatif ($p < 0,0001$). Les habitats plus affectés qu'attendu par la fragmentation sont les forêts de conifères et les moins touchés sont les habitats de piedmont et d'altitude : forêts de feuillus, landes et broussailles, pelouses naturelles et végétation clairsemée (tableau II.2). Ce constat est affiné ci-dessous par l'analyse prenant en compte la fragmentation des territoires des différentes communautés d'éleveurs.

Tableau II-2 : Occupation du sol en % dans les polygones correspondant au quart des surfaces les plus et les moins fragmentées du territoire de Laponie suédoise (en gris clair, combinaison surreprésentée, en gris foncé combinaison sous-représentée, d'après le test du χ^2 , $p < 0,0001$) (Sources : CLC 2012, DIVA-GIS, Skarin et Åhman, 2014)

Occupation du sol en 2012 selon Corine Land Cover	25% des surfaces	
	les plus fragmentées	les moins fragmentées
Forêt de conifères	70	38
Forêt mixte	6	5
Forêt de feuillus	3	9
Forêt et végétation arbustive en mutation	9	8
Surface agricole hétérogène	1	0
Surface agricole	2	2
Tourbières	7	11
Landes et bruyères	2	17
Végétation clairsemée	0	6
Rochers	0	3
Pelouses naturelles	0	1
Total	100	100

2) Les communautés saamies face à l'enjeu de la fragmentation de leurs paysages

La part des paysages des territoires d'élevage sans zone de perturbation varie très fortement, entre 58 et 94,5%, selon les communautés d'éleveurs. Le pourcentage d'aires protégées contribue à expliquer le taux de surfaces non fragmentées ($r=0,430$, $p=0,002$) mais

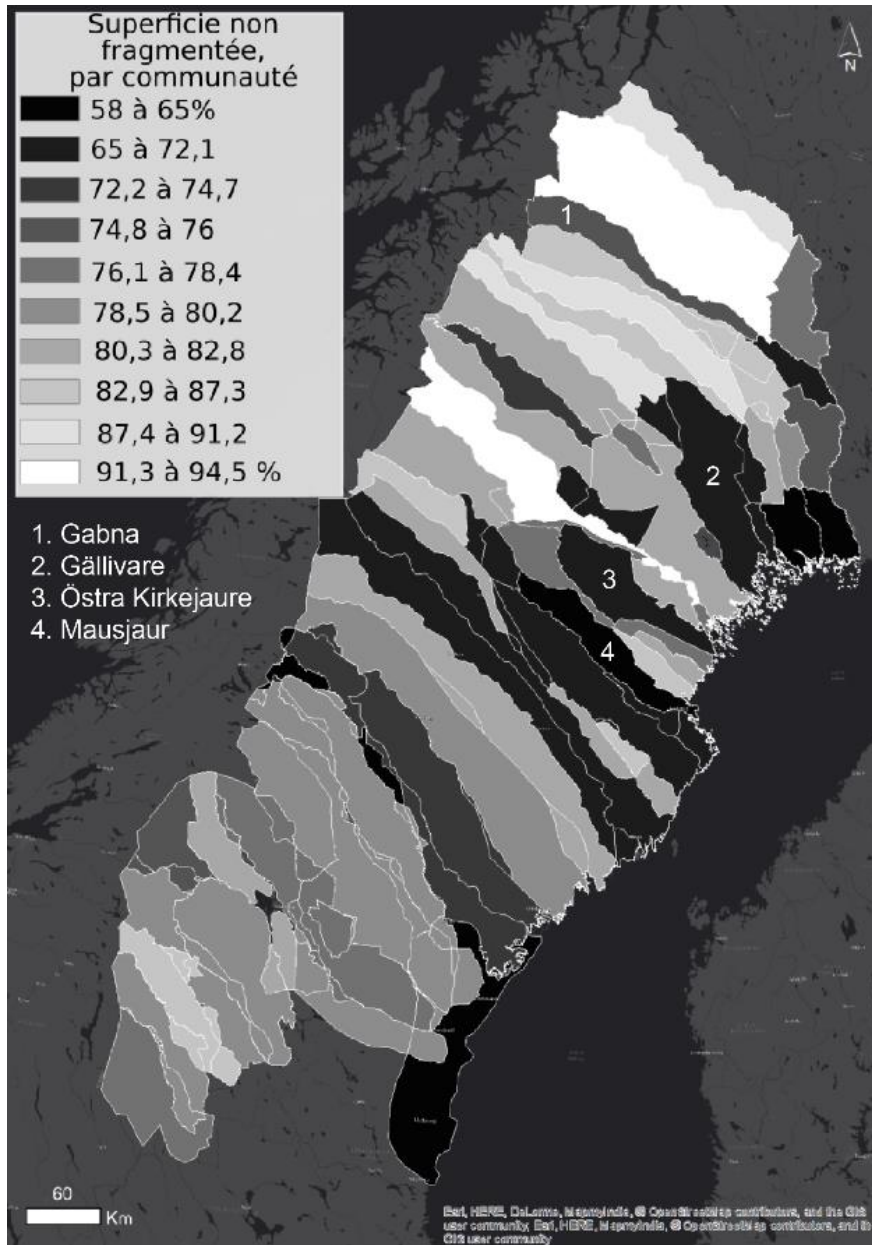


Figure II-3 : Pourcentages de superficies de paysages non fragmentées par communauté d'éleveurs (Sources: RenGIS 2.0, Sametinget, Réalisation: R.Courault 2017)

l'influence favorable de ce facteur est moindre qu'attendue d'après nos hypothèses. En revanche, l'intensité de l'exploitation forestière et agricole, évaluée par le pourcentage de surfaces de forêts et végétation arbustive en mutation et de surfaces agricoles, est négativement et très significativement liée avec le taux de territoires non fragmentés ($r=-0,609$, $p<0,0001$). Ces résultats montrent donc une nette hiérarchisation de l'influence de ces variables (foresterie, agriculture versus espaces protégés) sur la fragmentation des paysages.

Lorsque les descripteurs sont qualitatifs, on calcule les pourcentages moyens de surfaces non fragmentées selon les différentes modalités et l'on vérifie par un test statistique

si ces moyennes sont significativement différentes (tableau II.3). Le taux moyen d'espaces non fragmentés est ainsi de 65,8 % dans les paysages forestiers humides très exploités (tableau II.3, figure II.3 : *sameby* forestières de Mausjaur et Östra Kikkejaure), et de 86,9% dans les paysages peu exploités étendus sur l'ensemble de l'écotone boréal-alpin. L'écart, de près de 18 points entre ces deux types de compositions de paysages, est très significatif ($p=0,0005$, tableau II.3). La présence d'infrastructures de transport ou de littoral joue un rôle encore plus significatif, alors que l'influence du type de communautés, de l'urbanisation ou des surfaces industrielles est moindre qu'attendue d'après nos hypothèses. La présence de nœuds routiers autour des zones urbaines et minières (figure II.2) a un effet notable dans le *sameby* de Gabna. Le taux de surfaces non fragmentées (75%) y est bien moindre que le taux attendu selon la composition de ses paysages (86,9%, figure II.3). En revanche, cet effet est beaucoup moins net dans le cas de Gällivare (*sameby* de Cearru) et de Jokkmokk (*sameby* de Sirges).

Tableau II-3 : Taux moyen d'espaces non fragmentés, par ordre croissant et selon les modalités de variables sociales, géographiques et paysagères, tests non paramétriques utilisés et leur significativité. (Sources CAH, Corine Land Cover 2012, RenGis 2.0³ ; réalisation M. Cohen, 2017). La p-value est un taux indiquant le risque d'erreur des résultats, plus il est faible, plus le test est significatif.

Modalités de variables	Moyenne	p-value	Test
Paysage forestier très exploité	65,8	0,0005	Kruskall-Wallis
Présence_tissu urbain continu	71,6	0,001	Mann-Whitney
Concessionnaire, <i>Sameby</i> forestière	74,2	0,001	
Présence_Littoral	74,5	0,0005	
Présence_Grandes routes, aéroport	75,2	0,0003	
Paysages forestiers exploités	77,2	0,0005	Kruskall-Wallis
Présence_Industries	77,5	0,01	Mann-Whitney
Absence_tissu urbain continu	80,7	0,001	
<i>Sameby</i> Montagnarde	81,7	0,001	
Absence_Littoral	83,1	0,0005	
Absence_Gdes routes, aéroport	83,4	0,0003	
Absence_Industries	85,3	0,01	
Paysage alpin-forestier peu exploité	86,9	0,0005	Kruskall-Wallis

D - *Interprétation et discussion*

Alors que leur apport est d'avantage documenté pour la faune sauvage, les concepts et méthodes de l'écologie du paysage se sont avérés judicieux pour l'étude de la fragmentation des paysages suédois de l'élevage de rennes semi-domestiques. Notre étude apporte des éléments nouveaux sur la géographie de la fragmentation des paysages à l'échelle régionale et la hiérarchisation des facteurs pouvant l'expliquer directement ou indirectement. Elle ouvre quelques pistes de réflexion sur ses conséquences socio-économiques pour l'activité d'élevage.

Si la fragmentation des paysages est considérée comme l'un des facteurs de vulnérabilité de l'élevage des rennes (Tyler et al. 2007), notre étude a montré qu'elle affecte très inégalement les habitats écologiques (tableau II.2) et les différentes communautés d'éleveurs de rennes en Laponie suédoise (figure II.3). Ce premier constat n'est pas neutre dans le contexte de revendications territoriales portées par les Saamis (Magga et al, 2009, Heikkinen et al, 2012, Löf 2013, Carson et Peterson, 2016) et de l'importance de l'activité d'élevage comme marqueur culturel (Korsmo, 1987, Hoffmann-Schickel, 2010, Cogos et al. 2017).

La fragmentation préférentielle des forêts de résineux démontrée par notre étude (tableau II.2) affecte l'ensemble du territoire et du calendrier pastoral des *sameby* forestières. Dans les communautés concessionnaires, cette contrainte est probablement moindre, les rennes étant parqués et pouvant plus aisément être nourris avec des compléments alimentaires, ces pratiques de complémentation ayant notamment été signalées par Tunón et Sjaggo (2012). D'après nos résultats (tableau II.2), les *sameby* montagnardes bénéficieront, au moins pendant la belle saison dédiée à la reproduction d'espaces montagnards peu fragmentés, contrairement aux pâturages hivernaux situés dans les forêts de résineux.

La présente étude montre également que les infrastructures de transport, la sylviculture et la présence d'habitats littoraux contribuent le plus à la fragmentation paysagère des territoires communautaires de l'élevage (§ 3.2, tableau II.3). Les infrastructures de transport et l'exploitation forestière étaient certes mentionnées dans la littérature (Skarin et Åhman, 2014, Bechet et al, 2017, Wolfe et al, 2000), mais notre étude a démontré que ces facteurs directs sont les plus significatifs statistiquement dans le jeu de variables testées ici. La présence ou l'absence d'habitats littoraux n'est qu'indirectement mentionnée dans la littérature (le littoral est anciennement urbanisé d'après Cabouret, 1986), et malgré cela, nos résultats la désignent

comme un facteur significatif de fragmentation (tableau II.3). C'est à la fois un facteur indirect, de par la concentration de zones bâties et d'infrastructures de transport sur le littoral et direct du fait du dessin complexe du trait de côte et des nombreuses îles du Golfe de Botnie.

Nos résultats montrent que d'autres facteurs ont en revanche un rôle moindre qu'attendu d'après la littérature : l'organisation sociale en types de communauté, le taux de zones protégées, l'urbanisation, les installations industrielles et les nœuds routiers (§3.2, tableau II.3). L'hypothèse d'un effet direct de la gestion pastorale en parcelles clôturées sur la fragmentation du paysage dans les communautés concessionnaires est invalidée, le taux moyen de surface non fragmentée y étant analogue à celui des *sameby* forestières (tableau II.3). Ceci suggère en retour que les *sameby* forestières subissent la même fragmentation obligeant les rennes forestiers (moins mobiles selon Klein, 1990), à contourner des obstacles, sans que les éleveurs bénéficient des mêmes facilités de gestion que les concessionnaires (régime de propriété et complémentation alimentaire décrits par Tunón et Sjaggo, 2012). En revanche, la fragmentation varie assez significativement entre les *sameby* forestières et les *sameby* montagnardes (tableau II.3). Ces dernières, étendues sur les quatre cinquièmes des surfaces de Laponie suédoise, bénéficient de pâturages d'intersaisons et d'été peu fragmentés (tableau II.3) et stratégiques pour le cycle biologique du renne, avantages majorés par la mobilité supérieure des rennes montagnards.

Concernant l'urbanisation et les installations énergétiques, nos résultats indiquent qu'il s'agit de facteurs assez voire peu significatifs (tableau II.3) contrairement à la littérature (Nellemann et al, 2010 ; Helle et al, 2012 ; Skarin et al, 2016, Skarin et Åhman, 2014). Il en est de même pour l'effet des zones protégées, moins favorable qu'attendu (§3.2), du fait des infrastructures importantes générées en périphérie, comme l'a montré la carte des éléments fragmentant (figure II.3). Ces résultats mitigés peuvent s'expliquer par le caractère indirect de certains facteurs, par des effets de compensation (favorable dans les aires protégées, défavorable à leur périphérie), et par la qualité insuffisante des données pour prendre en compte l'urbanisation diffuse et les petites installations énergétiques.

Enfin, la présence de nœuds routiers autour des zones urbaines et minières est un facteur péjorant la fragmentation dans un cas sur trois, celui du *sameby* de Gabna (§3.2). Alors que Driedger (2014) avait évalué le niveau de fragmentation du territoire de cette communauté comme important, notre étude comparative montre que cette situation est atypique (figure II.3). La fragmentation paysagère plus importante qu'attendue s'explique par

la coprésence de la ville de Kiruna (18.000 habitants en 2017¹²), d'un aéroport international et de la plus grande mine de fer souterraine du monde¹³. Ces infrastructures sont concentrées dans les territoires forestiers d'hiver (Source : RenGis 2.0³), période pendant laquelle les rennes peu mobiles d'après Klein (1990) sont perturbés par la présence d'obstacles et de bruit d'après Nellemann et al (2000). La double voie (route E10 et chemin de fer), construite le long du thalweg et se poursuivant jusqu'en Norvège¹³, constitue également une barrière potentielle pour les déplacements des rennes, qui empruntent également les vallées glaciaires pour monter jusqu'à leurs habitats estivaux ou les redescendre à l'automne (Source : RenGis 2.0³). Le déplacement de la ville de Kiruna, à 5 km en direction du nord-ouest (pour éviter un effondrement dû à l'extraction minière) va encore étendre la zone perturbée. Le *samerby* de Gabna constitue donc un contre-exemple de territoire s'étendant sur l'ensemble de l'écotone forêt boréale-landes et pelouses d'altitude, et malgré tout fragmenté car cumulant divers désavantages : parc naturel restreint (17% de la surface), présence de grandes infrastructures de transport et d'une zone d'extraction minière.

Quelques données complémentaires apportent un éclairage sur les conséquences socio-économiques de la fragmentation des paysages. Ainsi, la stabilisation des cheptels observée entre 2005 et 2013 dans les *samerby* du comté de Nord-Botnie, et leur diminution dans les *Koncession* (d'après Courault et Cohen, 2015, chapitre 3) pourraient constituer des réponses indirectes à la fragmentation des paysages qui se répercute sur l'économie de l'élevage (coûts de transport pour contourner les obstacles et d'apport de foin, signalés par Tunón et Sjaggo, 2012, Löf, 2013 et Skarin et al, 2016), d'autant plus que le prix de la viande était à la baisse pendant cette période¹⁴. L'augmentation du taux de femelles des troupeaux des *samerby* de Nord-Botnie (d'après Courault et Cohen, 2015, chapitre 3) permettrait de concentrer et donc de déplacer plus facilement le troupeau.

E - *Conclusion et perspectives*

Notre étude, en s'appuyant sur les notions de l'écologie du paysage et sur une méthodologie adaptée à la qualité des données disponibles, a montré que la fragmentation des paysages variait selon les habitats et les communautés d'éleveurs de rennes, tout en hiérarchisant le rôle direct et indirect d'un certain nombre de facteurs explicatifs. La

¹² <http://www.kiruna.se/Kommun/Kommun-politik/Kommunfakta/>

¹³ www.sgu.se

¹⁴ www.samer.se

variabilité spatiale de la fragmentation et la hiérarchisation de ses causes constituent des résultats nouveaux apportés par notre étude.

Les perspectives d'amélioration de ce travail sont nombreuses, via l'intégration d'autres facteurs dans l'analyse géographique. Cette intégration passe par l'acquisition et le traitement de jeux de données supplémentaires, notamment la couverture en lichens pâturables (Sandström et al. 2016) qui constitue un autre paramètre de la vulnérabilité de l'élevage de rennes aux effets locaux du changement global. D'autres améliorations supposeraient de disposer de nouvelles données afin d'améliorer la résolution spatiale de Corine Land Cover, insuffisante pour appréhender les composantes locales des paysages. Nous pouvons en particulier citer le bâti dispersé et les clôtures des parcelles forestières qui ont un effet direct sur les déplacements, et qui pourraient être détectés par une analyse orientée-objet, sur des images haute-résolution (missions SPOT 6-7). Une exploitation plus poussée de la base RenGis 2.0³ est également envisageable (prise en compte des trajectoires des rennes, des pâturages saisonniers pour intégrer l'impact des promeneurs selon la saison dans les aires protégées, en croisant les bases Rengis et DivaGis), malgré le caractère non dynamique de ces informations. Des données temporelles détaillées par communautés sur les effectifs et l'abattage des rennes nous permettraient de préciser les éventuelles conséquences économiques de la fragmentation inégale des paysages.

A l'heure où des interrogations émergent sur l'impact écologique et éthique de l'élevage (Ayats et al, 2018), cette analyse géographique de la fragmentation des paysages de l'élevage semi-domestique des rennes en Laponie suédoise montre la vulnérabilité mais aussi la résilience d'un système d'élevage valorisant les ressources naturelles d'un paysage diversifié et porteur d'identité culturelle face au changement global (Tyler et al, 2007, Lewis et Aitken, 2013). Outre les perspectives d'approfondissement, la diffusion de nos résultats et leur discussion au Parlement Saami affinaient nos interprétations quant à l'impact de cette fragmentation sur l'économie de l'élevage et le mode de vie des éleveurs. La forme retenue serait celle d'un dialogue réflexif, déjà expérimenté lors de précédentes sessions de diffusion de nos résultats (Chenorkian et Roberts eds, 2014 ; Mitchell et al, 2015). La discussion pourrait notamment porter sur les possibilités de coopération au projet d'infrastructure verte auquel participe le Parlement Saami¹⁵ afin de prendre en compte les besoins spécifiques actuels des éleveurs, ainsi que des autres acteurs (humains, non-humains, immatériels et

¹⁵ <https://www.sametinget.se/gron-infrastruktur>

matériels). L'important travail de conciliation entre forestiers et éleveurs entamé depuis les années 2000 (Widmark, 2006, Roturier, 2011, Cannobio, 2014) pourrait constituer une source d'inspiration.

Remerciements :

La présente étude fait suite au projet Envexx, Enseignement par l'expérience dans les milieux extrêmes, soutenu par le PIA Sorbonne Université. Nous remercions les étudiants de Licence de Géographie et Aménagement ayant participé aux traitements géomatiques préliminaires qui ont guidé la méthodologie appliquée dans ce travail. Nous sommes également très reconnaissants aux relecteurs pour leurs suggestions d'amélioration du manuscrit.

Transition entre le chapitre II et chapitre III

Le chapitre précédent traitait des aspects régionaux et locaux les plus visibles du changement global, ici représenté par la fragmentation et la perte en habitats écologiques des troupeaux de rennes semi-domestiques en Laponie suédoise. Le premier constat dans la quantification des superficies d'habitats écologiques supposément perdus par la fragmentation des paysages et de l'évitement théorique par les troupeaux de rennes est représenté par son hétérogénéité géographique, à l'échelle locale comme celle des communautés d'éleveurs suédois. Le deuxième constat montre la contribution statistique élevée de certains types d'occupation des sols humains, en particulier les voies de transport, la sylviculture et les villes littorales. Les aires naturelles placées sous protection juridique, principalement localisées dans les zones montagneuses de Suède semblent avoir un pouvoir protecteur relativement limité, du fait de la concentration des activités humaines autour de celles-ci. Ainsi, en fonction du type de communauté d'éleveurs de rennes suédois (montagnarde, forestière, concessionnaire), et leur localisation régionale, la géographie locale de la perte en pâturage varie grandement. Les communautés du nord-ouest de la Suède, notamment la communauté Gabna, sont particulièrement affectées par le processus de fragmentation, du fait de la concentration de nombreux enjeux paysagers en leur sein (protection environnementale, exploitation minière, énergétique, foresterie).

Cette approche matérielle des paysages de l'élevage de rennes semi-domestiques, montre les conséquences immédiates de la fragmentation sur leurs modes migratoires annuels et partiels et la quantité et la disponibilité en pâturages naturels. Les stratégies d'évitement, théorisées par la littérature dans les chapitres précédents, sont particulièrement contraignantes pour les rennes semi-domestiques. Celui-ci se caractérise effectivement par son cycle métabolique saisonnier particulièrement variable selon les conditions bioclimatiques, généralement excédentaire en été et déficitaire en hiver. Ces conditions bioclimatiques, en particulier atmosphériques et météorologiques semblent quant à elles marquées par leur inconstance géographique et temporelle, tout particulièrement dans le contexte du changement climatique actuel. Celui-ci se traduit par l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre, et donne à l'Homme une responsabilité dans le forçage radiatif en intensification depuis

la Révolution Industrielle occidentale. Le chapitre 3 cherche donc à mieux comprendre la variabilité atmosphérique et climatique du siècle dernier dans le nord de l'Europe (Laponies suédoises, norvégiennes et Spitzberg), pour ensuite caractériser les liens pouvant exister entre tendances temporelles et démographies des troupeaux de rennes (sauvages et semi-domestiques) de différents paysages nordiques.

III - Cycles, tendances et variabilités des climats subarctiques, et leurs liens avec la démographie des cheptels de rennes¹⁶

A - Introduction

1) 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.

2) 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, Tømmervik 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

¹⁶ Source de ce chapitre : Courault R., Cohen M., Ronchail J., 2015. Régimes de circulation atmosphérique, impact du changement climatique et variation démographique des rennes dans le nord de la Scandinavie, Actes du *XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, article ref. 019, pp. 123-128, Liège, 1-4 juillet 2015, Laboratoire de Climatologie et topoclimatologie de l'Université de Liège/AIC, URL : http://www.climato.be/aic/colloques/actes/ACTES_AIC2015/2%20Climatologie%20appliquée/019-COURAULT-123-128.pdf

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).

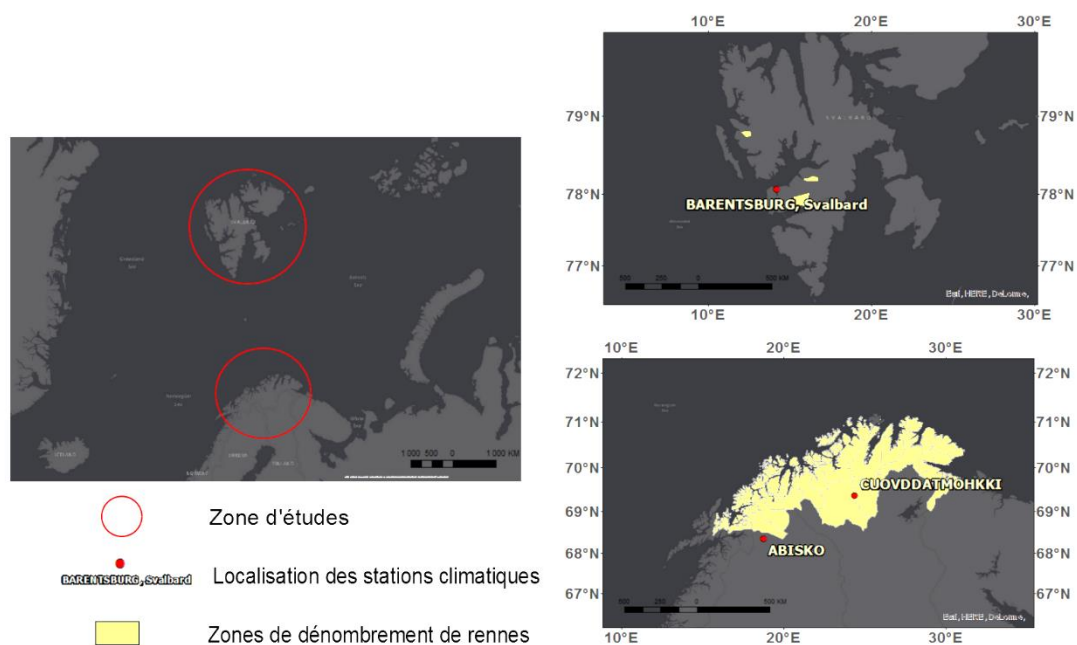


Figure III-1 : Localisation des zones d'étude (stations météorologiques, zones de dénombrement des rennes, sources : NOAA-NCDC ; abds.is ; ssb.no)

B - Matériel et méthodes

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 III.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).

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/statistikkbanken>). 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 III.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).

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 III-2 : Traitements statistiques opérés sur les séries temporelles climatiques et écologiques

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 (figure III.2).

C - Résultats

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 III.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 III.2). 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 III-1 : 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	1981-2013	p-value
		288.6 mm	338.7 mm	0.006
NAO	Hiver	-0.294	+0.329	< 0.0001
		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 III-2 : 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	Cuovddatmoh-kki	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					

2) Liens entre indices de circulation atmosphérique, variables climatiques locales et démographie de *Rangifer sp.*

Le tableau III.3 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 III-3 : 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_T abisko	DJF_P abisko	DJF_T cuovd	An_Abisko_NBday Tmax<-5	Nov_Abisko_moy_prof_neige
AO_an	1	<u>0,698</u>	<u>0,701</u>	0,510	-0,430	0,041	-0,037	0,364	0,524	<u>0,609</u>	0,394	<u>-0,679</u>	0,044
AO_DJF	<u>0,698</u>	1	0,488	<u>0,813</u>	<u>-0,599</u>	0,222	0,139	0,421	0,698	<u>0,581</u>	<u>0,582</u>	<u>-0,631</u>	0,071
NAO_an	<u>0,701</u>	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	<u>0,813</u>	0,384	1	-0,470	0,151	0,093	0,227	0,646	0,281	<u>0,567</u>	-0,544	0,203
SCAND_DJF	-0,430	<u>-0,599</u>	-0,334	-0,470	1	-0,245	-0,280	-0,266	-0,189	<u>-0,605</u>	0,009	0,472	0,084
SCAND_SON	0,041	0,222	-0,013	0,151	-0,245	1	<u>0,550</u>	0,107	0,098	0,166	0,069	-0,493	-0,457
SCAND_Novembre	-0,037	0,139	-0,043	0,093	-0,280	<u>0,550</u>	1	-0,045	-0,141	0,109	-0,157	-0,338	<u>-0,681</u>
EATL_WRUS_DJF	0,364	0,421	0,243	0,227	-0,266	0,107	-0,045	1	0,425	<u>0,581</u>	0,169	-0,307	0,104
DJF_Tabisko	0,524	<u>0,698</u>	0,259	<u>0,646</u>	-0,189	0,098	-0,141	0,425	1	0,462	<u>0,895</u>	<u>-0,525</u>	0,194
DJF_Pabisko	<u>0,609</u>	<u>0,581</u>	0,357	0,281	<u>-0,605</u>	0,166	0,109	<u>0,581</u>	0	1	0,216	-0,352	-0,102
DJF_Tcuovd	0,394	<u>0,582</u>	0,185	<u>0,567</u>	0,009	0,069	-0,157	0,169	<u>0,895</u>	0,216	1	-0,478	0,273
An_Abisko_NBdayTmax<-5	<u>-0,679</u>	<u>-0,631</u>	-0,505	-0,544	0,472	-0,493	-0,338	-0,307	<u>-0,525</u>	-0,352	-0,478	1	0,151
Nov_Abisko_AVERAGEsnwd	0,044	0,071	0,049	0,203	0,084	-0,457	<u>-0,681</u>	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).

D - 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-domestiques (*Rangifer tarandus* L.) et de calculer les moyennes climatiques selon un découpage temporel adapté aux calendriers pastoraux.

Transition entre le chapitre III et le chapitre IV:

Le chapitre précédent, de nature exploratoire, a montré plusieurs expressions locales et régionales du changement global, ici représenté par le changement climatique sur le pas de temps des dernières décennies : de 1950 à 2013 pour le pas de temps le plus long des indices d'oscillations atmosphériques étudiés ; de 1967 à 2013 pour le pas de temps des séries temporelles de précipitations et de températures observées dans trois stations météorologiques de l'Extrême-Nord et du Nord de l'Europe ; de 1979 à 2011 pour la réponse démographique supposée des cheptels de rennes sauvages et domestiques à ces conditions climatiques. Concernant la variabilité temporelle des caractères atmosphériques et climatiques, leur évolution est non-linéaire, ce qu'ont traduit les tests de rupture temporelle de Pettitt. Ces résultats indiquent un changement de régime atmosphérique et climatique dans l'est de l'Atlantique nord, en particulier à partir des années 1980. Les tests de rupture, tout comme les tests de tendances signalent, pour la majorité des caractères climatiques étudiés en station (températures, précipitations), des augmentations significatives, en particulier pour les températures annuelles à la fin des années 1980. En hiver, le gradient thermique zonal est particulièrement marqué et l'évolution positive des séries temporelles atmosphériques et des séries climatiques semble conjointe. Ce « sursaut » du climat régional a des effets conséquents sur les écosystèmes arctiques et subarctiques, en particulier sur les effectifs annuels de rennes sauvages et domestiques. La modélisation d'une variable climatique signifiante pour les éleveurs de rennes, traduisant des conditions de neige favorables à l'accessibilité en pâturages hivernaux (nombre de jours avec température maximales inférieures à -5°C en hiver) a montré son intérêt, correspondant à des types de temps et de circulation atmosphérique hivernales particulières. Les effectifs démographiques de rennes sauvages semblent favorisés par le desserrement de la contrainte thermique, alors que le réchauffement a des effets variables pour les rennes semi-domestiques.

Le chapitre suivant poursuit les investigations sur le lien entre variabilité climatique et démographie des rennes, en nous concentrant sur le comté suédois de Nord-Botnie où sont élevés des rennes semi-domestiques. Il traite d'un aspect central de la gestion des troupeaux de rennes semi-domestiques en Laponie suédoise: le calendrier pastoral. Reprenant quelques méthodes expérimentées dans le chapitre précédent, celui-ci cherche à lier la variabilité atmosphérique et climatique régionale aux cheptels du nord de la Suède (région de Nord-

Botnie), tout en comparant les performances explicatives des découpages temporels saisonniers locaux vis-à-vis des découpages temporels saisonniers « traditionnellement » utilisés en climatologie et en météorologie. Comme dans le chapitre précédent, mais avec une grille de lecture pastorale des saisons, nous cherchons ici à identifier des types de temps les plus à mêmes de peser sur la variabilité démographique des cheptels de rennes semi-domestiques du Norbotten, dont la communauté d'éleveurs Gabna fait partie.

IV - Impact de la variabilité climatique sur la démographie des rennes semi-domestiques du comté du Nord-Botnie : l'intérêt du calendrier pastoral ¹⁷

A - Introduction

Le rapport à destination des décideurs, émis par le Groupe de Travail 2 du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC) en 2014, souligne l'importance de la prise en compte des connaissances et savoirs « traditionnels¹⁸ » 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 cohérente¹⁹.* »

Sans discuter de l'héritage postcolonial des terminologies employées, le 2ème Groupe de Travail du GIEC distingue les savoirs scientifiques disciplinaires, d'autres systèmes de connaissances. Reprenant cette dichotomie, 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 découper l'année en quatre saisons météorologiques calculés lors des solstices et des équinoxes. L'autre mode de découpage est représenté par le calendrier pastoral exprimé en langue saamie, dont on suppose qu'il est en partie basé 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

¹⁷ Ce chapitre s'inspire très largement d'une contribution à ouvrage, à paraître en 2019. Courault R., Cohen M., Said S., Ronchail J., s.p., Impacts de la variabilité climatique sur la démographie des rennes en Laponie suédoise : de l'intérêt du calendrier pastoral, in Giusti C. et al. (Ed), Milieux critiques et extrêmes face au changement climatique, Paris, SUP.

¹⁸ TEK en anglais, *Traditional Ecological Knowledges*

¹⁹ Traduction anglais-français d'un passage de la page 27 du Rapport du Deuxième Groupe de Travail « Impacts, Adaptation et Vulnérabilité »; (WR 2, IPCC, 2014)

Romain Courault – « *Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global* » - Thèse de Géographie,

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 climatique²⁰. Pour cela, nous proposons une approche en échelles spatio-temporelles 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.

1) Contextualiser dans le temps et dans l'espace les effets du climat sur les populations de rennes

Le parti-pris de ce chapitre est une descente progressive des échelles spatiales et temporelles d'analyse (*downscaling*), depuis l'échelle 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.

2) Le renne, espèce-clef des écosystèmes arctiques et pilier de l'élevage semi-nomade

Rangifer tarandus L. est considéré par la communauté scientifique comme une espèce-clé de ces écosystèmes (Väisänen, 2014), c'est-à-dire : « [Une espèce] dont l'impact sur ses communautés ou son écosystème est disproportionnellement important par rapport à son abondance » (Power et al., 1996 in Forbes, Kumpula et al., 2009). C'est principalement son statut d'herbivore *capital-breeder* migrant sur de grands espaces (centaine de kilomètres) pour optimiser ses apports nutritifs au long de chaque saison (lui conférant un régime alimentaire diversifié) qui expliquent

²⁰ Ces interactions ne distinguent que peu les rennes sauvages et semi-domestiques de Scandinavie, où sont présents deux sous-espèces de *Rangifer tarandus* L. *Rangifer tarandus tarandus* L. 1758, Renne d'Europe, est le renne sauvage et semi-domestique de la péninsule fennoscandienne et *Rangifer tarandus fennicus* Lönnerberg, 1909, le renne sauvage de Carélie (Kuntz, 2011).

conjointement son rôle capital dans le fonctionnement des écosystèmes arctiques, subarctiques et boréaux (Louw, 1993 ; Danell, 2006). Des explications plus détaillées sur les modes migratoires et plus largement l'écologie de *Rangifer tarandus* L. sont données en chapitre I.

3) Les paysages de l'élevage de rennes menacés par les changements globaux

Les manifestations régionales du changement global sont non seulement environnementales, mais aussi sociales et culturelles. Ce défi qui concerne en premier lieu les populations locales est ainsi résumé par Tyler et al. (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.* » (Tyler, Turi, 2007). Les effets systémiques du changement global sur la fragmentation paysagère et les populations de rennes (éthologiques, écologiques, démographiques) sont notamment évoquées dans les chapitres I et II.

4) Le changement climatique en Scandinavie et ses effets sur l'écologie de *Rangifer tarandus* L.

a) Les tendances du changement climatique et leurs signaux régionaux à locaux

Les figures IV.1a et IV.1b cartographient les moyennes annuelles de températures maximales en Scandinavie, telles qu'elles étaient observées durant la période 1950-2000 (figure IV.1 a), et telles qu'elles sont projetées pour la période 2080-2100 selon le scénario le plus pessimiste du GIEC²¹ (figure IV.1b ; source : worldclim.org ; CMIP 5²²). 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.

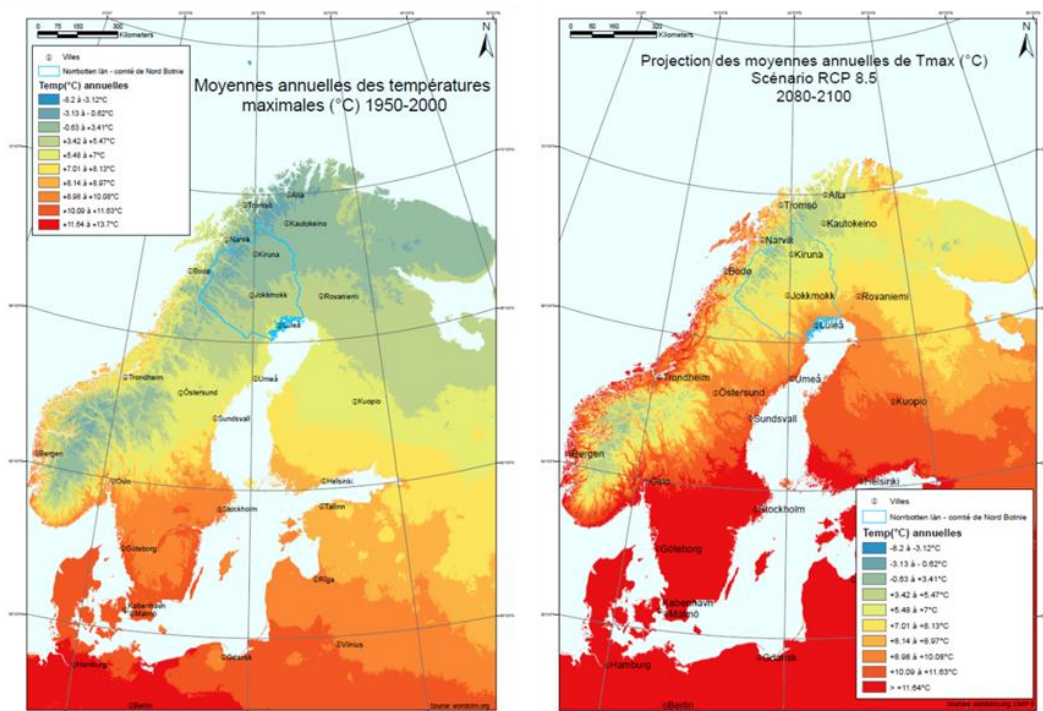


Figure IV-1a et IV-1b : Carte des températures moyennes maximales annuelles en Scandinavie a) 1950-2000 (à gauche) ; b) 2080-2100 (à droite). Sources: worldclim.org, CMIP5, GCM: IPSL, -CM5A-LR, Réalisation R. Courault, 2016

²¹ Avec une projection d'élévation des températures globales de l'ordre de 8,5 °C d'ici 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 est celle du modèle climatique global calculé par l'Institut Pierre-Simon Laplace, et repris pour interpolation haute résolution (Hijmans, Cameron et al., 2005)

²² Ou *Coupled Model Intercomparison Project* (Projet de comparaison des modèles couplés). Une cinquantaine de modèles climatiques sont comparés, donnant les résultats cartographiques en figure IV.1a et 1b (Taylor, Stouffer et al., 2012)

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 (Abisko, 67°N, nord Suède ; Cuovddatmohkki, 68°N Norvège septentrionale ; Barentsburg, 78°N, Archipel du Svalbard), 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 (Courault et al., 2015, chapitre 3). 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.

b) Effets directs du climat sur les dynamiques de population de *Rangifer tarandus* L.

Ces différents constats concernant la sphère climatique peuvent être mis au regard de la migration saisonnière de *Rangifer tarandus* L. (figure IV.2) et de ses conséquences sur l’organisation du système pastoral saami (Roturier, Roué, 2009). Comme mentionné dans le chapitre préliminaire, ses effets sur la géographie de la migration des rennes semi-domestiques et leurs dynamiques de population sont directs et indirects : pour les effets directs, on peut citer la thermorégulation des rennes, en toutes saisons (chaudes ou froides)

qui concentre, relâche la densité des rennes et les fatigue ; englacement et perte en accessibilité des pâturages hivernaux

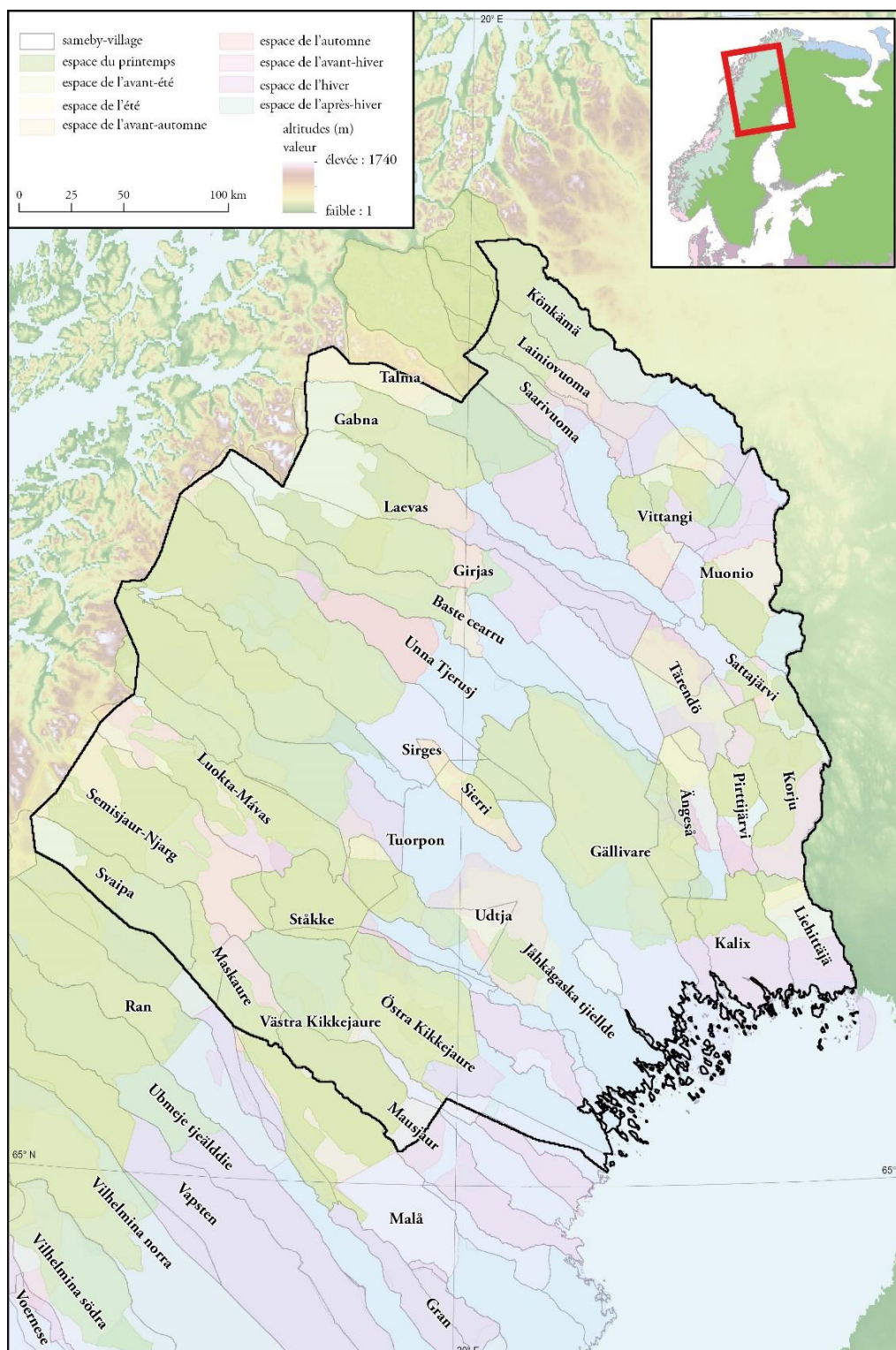


Figure IV-2 : Villages d'éleveurs et territoires saisonniers des cheptels de rennes du nord de la Suède. Sources : Saami Parliement, diva-gis.com, réalisation R. Courault, 2016

en hiver (représentés en bleu-violet en figure IV.2). Une partie substantielle de la variabilité bioclimatique des écosystèmes subarctiques peut être synthétisée par la variabilité atmosphérique, représentée ici par les indices d'oscillation atmosphériques et le lien avec les variables biologiques de *Rangifer tarandus* L. (taille, poids, sex-ratio, effectifs, etc). En chapitre I, on trouvera une analyse plus détaillée des effets de la variabilité bioclimatique et du changement climatique actuel sur l'écologie et la répartition dans le temps et dans l'espace des troupeaux de rennes. Pour les effets indirects, qui sont traités dans le paragraphe suivant, on peut évoquer la synchronisation entre le démarrage phénologique des plantes vasculaires (Poacées ; Cyperacées ; quelques ligneux) et les migrations printanières (en vert, figure IV.2).

c) Le choix alimentaire des rennes restreint par le verdissement de l'Arctique

Le verdissement de l'Arctique, conséquence directe du changement climatique actuel sur les paysages végétaux des écosystèmes arctiques et subarctiques, peut se résumer par l'augmentation en biomasse arborée et arbustive, ainsi que par la colonisation d'espèces (herbacées, ou ligneuses pour les plantes vasculaires) compétitives venues du sud, ou d'altitudes plus basses. Ses effets sur les choix et la disponibilité alimentaire de *Rangifer tarandus* L. sont notamment évoqués dans le chapitre I. La baisse en biomasse pâturable, ainsi que les déséquilibres géographiques entre pâturages sur- et sous- pâturés, associés à des conditions climatiques marquées, ont une incidence directe ou indirecte sur la réponse démographique des troupeaux de rennes semi-domestiques.

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

Le comté de Nord-Botnie, délimité en bleu dans les figures IV.1a et IV.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 $-8,2^{\circ}\text{C}$ pour les sommets du nord-ouest de la région et $+7^{\circ}\text{C}$ dans le sud-est, relativement tempéré par l'influence maritime du golfe de Botnie (figure IV.1a). La projection cartographique pour 2080-2100 (figure IV.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 20^{ème} siècle. Le gradient latitudinal s'efface progressivement,

alors que subsiste un gradient altitudinal, largement diminué comparativement à la période précédente. Localement, la tendance linéaire tracée pour la station météorologique d'Abisko entre 1967 et 2013 avait montré une augmentation de $+1.75^{\circ}\text{C}$, le temps expliquant 27% de la variance des températures moyennes annuelles avec un degré de certitude assez élevé ($p\text{-value} < 0,05$). 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 (figure IV.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 $+0.27^{\circ}\text{C}$. 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.

Figure IV-3: Test de rupture appliqué aux $T^{\circ}\text{C}$ annuelles à Abisko (1950-2013; Abisko Research Station, méthode de Pettitt), Réalisation : R. Courault, 2015



Du point de vue biogéographique, le comté de Nord-Botnie 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 (figure IV.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 (Heiskanen et al., 2008). La toundra observée présente un faciès broussailleux à arboré, dû à sa position géographique intermédiaire en latitude dans cet écotone spatio-temporel (figure IV.4). La nature et les effets de l'embroussaillage sur la biologie de *Rangifer tarandus* L. sont notamment expliqués dans les chapitres introductifs, et les parties traitant de cet effet du changement climatique actuel sur les ressources pastorales des rennes semi-domestiques.

Au regard des changements bioclimatiques observés 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 atmosphériques sont-elles susceptibles de rendre compte, voire d'expliquer les effets du climat sur les dynamiques de population des rennes semi-domestiqués du comté de Nord-Botnie ? Cette période commençant après deux changements importants de circulation atmosphérique et de types de temps associés à la fin des années 70 et 80, comment caractériser la variabilité bioclimatique interannuelle et inter-saisonnière ? 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 ?

B - Traitements géomatiques et statistiques : agrégation des séries chronologiques

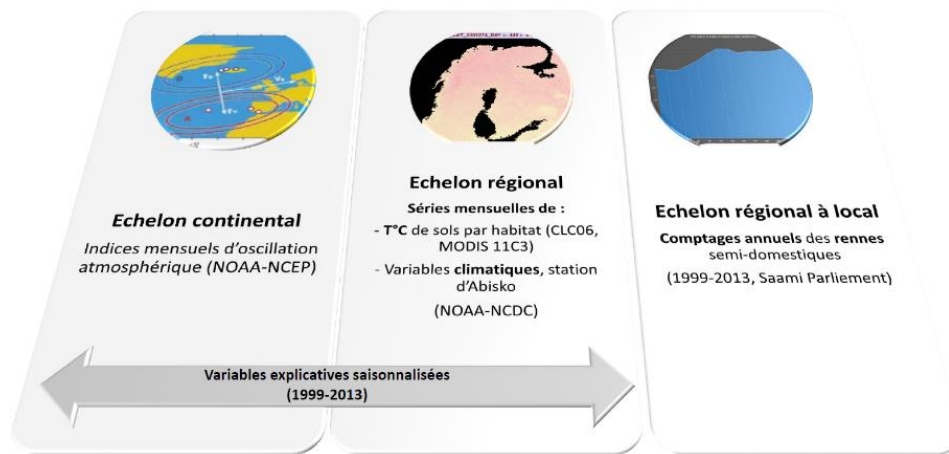


Figure IV-5 : Démarche méthodologique générale (Réalisation : R.Courault, 2016)

La figure IV.5 illustre notre démarche générale. A 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.

1) Matériel :

Notre objectif est d'observer à différentes échelles d'espace et de temps des contextes bioclimatiques significatifs pour la démographie des cheptels de rennes du comté de Nord-Botnie (figure IV.5 et tableau IV.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 portails web des institutions les proposant (tableau IV.1). Les données de télédétection et de géomatique sont les produits MODIS 11C3 du capteur Terra, exprimant l'émissivité des sols en degrés Kelvin (tableau IV.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. Les données se caractérisent par une résolution journalière, ou mensuelle. On teste ici plusieurs anomalies de circulation atmosphériques régionaux, 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 de 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 en termes d'habitats écologiques du renne. Certaines catégories sont particulièrement intéressantes pour la reconstitution des réserves grasses en été (prairies d'altitude, zones faiblement végétalisées) et la reproduction du renne aux intersaisons (landes et bruyères).

La démographie annuelle des rennes de deux grands cheptels représente le dernier jeu de données. Celles-ci sont issues du Parlement Saami, et sont disponibles sur son site web. 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 de 1 ans), 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.

Tableau IV-1 : Description des données 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 de 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)	Tmin-Tmax (°C), P° (mm), Épaisseurs de neige (mm)	Catégories d'occupation de sols (niveau 3)	Nombre de : Faons <1ans - Femelles - Mâles - Total
Variable utilisée	Emissivité 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/ Tmin>0°C, Nombre de jours/an Tmax>0°C		

Deux cheptels sont dénombrés, ceux de la sous-région de Nord-Botnie (en bleu sur la figure IV.6), où les communautés saamies sont dites « montagnardes » ou « forestières », et les décomptes de la Concession Pastorale, proche de la Finlande, où les communautés saamies 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 annuelle non différenciée pour les communautés d'éleveurs appartenant à la Concession Pastorale (Tunon, Sjaggo, 2012).

A l'échelle de la période de données disponible (1999-2013), les deux grands troupeaux décomptés présentent des ordres de grandeurs 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 » (figure IV.6) sont 10 fois moins nombreux (12600 têtes en 1999), ils augmentent jusqu'à 14 600 en 2005 avant de décroître progressivement jusqu'à 10 600 en 2013. A 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). Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

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 », le nombre de têtes restant compris entre 8 000 et 10 000 têtes.

Enfin, l'organisation temporelle des calendriers saamis et occidentaux constitue le dernier jeu de données, qui conditionnera l'agrégation saisonnière des séries chronologiques précédentes. Les mois calendaires sont représentés dans le tableau IV.2 à titre indicatif. Ils nous servent en premier lieu à décrire l'attribution des mois à l'intérieur des saisons : 3 mois pour chacune des 4 saisons dans le calendrier climatique occidental par exemple. Pour le calendrier pastoral saami, exprimé en Saami du Nord (Tunon, Sjaggo, 2012, annexe 2), les 12 mois se répartissent un peu moins régulièrement, avec des pleines saisons et des saisons de transition. On remarque la longueur de l'automne tardif (*Tjaktja*) et de la pleine saison hivernale (*Dálvve*) qui durent respectivement 2 et 4 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 *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*).



Figure IV-6 : Statut des troupeaux décomptés et station météorologique d'étude. Sources : sametinget.se, AEE, diva-gis.org, Réalisation : R. Courault, 2016

Hormis pour l'été tardif (*Tjaktjagisse*, en août), les trois autres saisons transitoires se superposent temporellement aux pleines saisons, en particulier l'hiver tardif et le printemps tardif (*Gidádálvve* et *Gidágisse*, tableau IV.2). Ce constat est important, car l'agrégation des

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie, Sorbonne-Université-2018

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 (Riseth, Tømmervik, 2011) est décrite par les éleveurs Saamis comme déterminant dans l'établissement d'une couche neigeuse de bonne qualité, pouvant être creusée par les rennes au cours de l'hiver.

Tableau IV-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	<i>Juovlamánnu</i> (<i>Juovllat</i> : « Noël »)	Hiver	<i>Dálvve</i>	<i>Čak čad álvve</i>
Janvier	<i>Odđajagimánnu</i> (<i>Odđajahki</i> : « Nouvel An »)			
Février	<i>Guovvamánnu</i>			
Mars	<i>Njukčamánnu</i> (<i>Njukča</i> : « le Cygne »)	Printemps	<i>Gidá</i>	<i>Gidádálvve</i>
Avril	<i>Cuoŋo mánnu</i> (<i>Cuoŋo</i> : « la Congère », « Croûte de neige »)			
Mai	<i>Miesse mánnu</i> (<i>Miesta</i> : « le Buisson »)			
Juin	<i>Geasse mánnu</i>	Eté	<i>Giesse</i>	<i>Gidágiesse</i>
Juillet	<i>Suoidne mánnu</i> (<i>Suoidni</i> : « Le Foin, l'Herbe »)			
Août	<i>Borge mánnu</i>			
Septembre	<i>Čakča mánnu</i>	Automne	<i>Čakča</i>	<i>Čakčagiesse</i>
Octobre	<i>Golggot mánnu</i>			
Novembre	<i>Skábma mánnu</i> (<i>Skáb</i> : « La Nuit arctique »)			

2) 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 IV.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 Nord-Botnie. 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 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'embroussaillage ou de densification des habitats faiblement végétalisés (glaciers, roches nues, prairies alpines, etc).



Figure IV-7 : Méthodologie d'extraction de séries temporelles de températures en surface de sol issues des images MODIS 11C3

Le rééchantillonnage de la carte Corine Land Cover sur les propriétés géométriques (projection, résolution spatiale) de l'imagerie MODIS constitue 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 (figure IV.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 (figure IV.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. Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

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.

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 (cartographie en figure IV.6), les valeurs des indices de circulation atmosphériques 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).

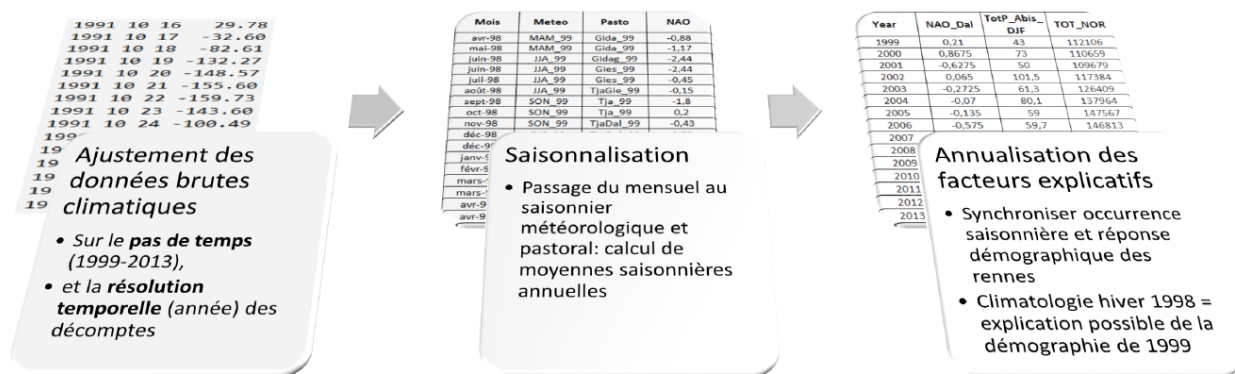


Figure IV-8 : Agrégation saisonnière des séries temporelles de données climatiques et atmosphériques

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 (tableau IV.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 (tableau IV.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 (Uboni, Horstkotte et al., 2016). 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 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 rangs 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 (Stenseth, Ottersen, et al., 2003).

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 satellite, 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 χ^2 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. A titre complémentaire, nous avons analysé les données d'abattage des rennes, afin de vérifier leurs relations avec différents facteurs (effectifs des rennes, variables climatiques, économie, observations de prédateurs). Ces variables ayant une distribution normale, nous avons utilisé le test de corrélation de Bravais-Pearson et la corrélation linéaire multiple.

C - 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.

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

La figure IV.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 (figures IV.9a et 9b, 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).

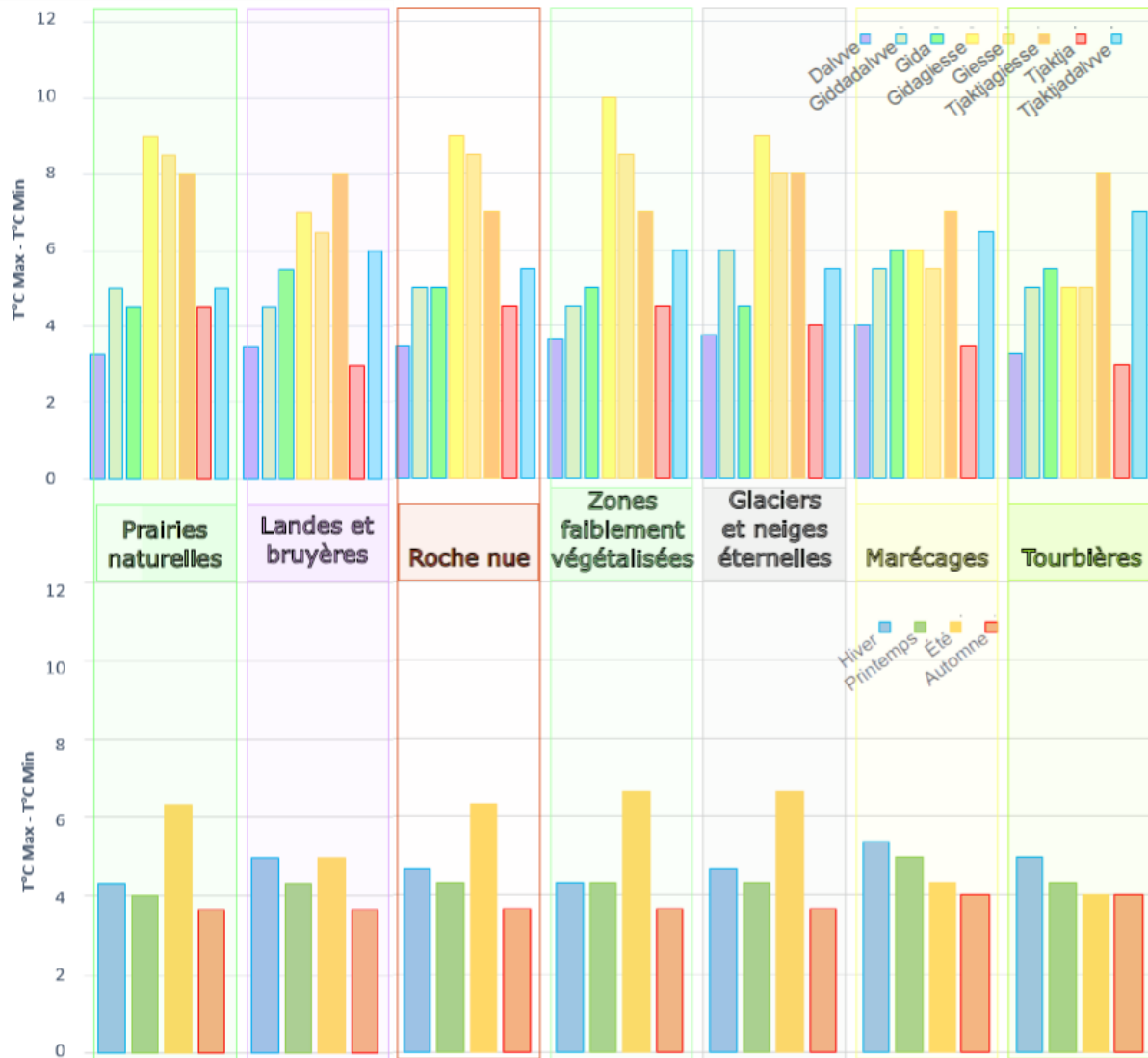


Figure IV-9 : Variabilité des températures de sols dans différents habitats du Comté de Nord-Botnie, a) selon les saisons pastorales b) selon les saisons météorologiques. Sources MODIS 11A2 ; CLC 06 ; Réalisation : R. Courault (2016)

Les deux découpages saisonniers rendent compte de la forte variabilité intra-annuelle du bilan radiatif. A 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 (figure IV.9).

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 (Jun-Jul-Aug) du calendrier météorologique, ou le plein été pastoral (*Giessa*). 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, Ericacées, prairies d'herbacées...), procurant aux rennes 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 IV.9), 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. A 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 ($<5^{\circ}\text{C}$, figure IV.9). La précision du découpage saisonnier pastoral affine la caractérisation du régime thermique inter et intra-saisonnier des habitats écologiques où le renne pâture. Les pâturages et les saisons estivales du calendrier pastoral sont ceux où 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.

2) 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 IV.3 compare les performances des tests de corrélation par rangs de Spearman, en fonction de l'agrégation selon le calendrier météorologique ou pastoral (partie gauche du tableau IV.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 significatifs²³ entre les caractères climatiques et les observations démographiques. Les performances des variables calculées à l'échelle de l'année sont négligeables (1 seule corrélation significative sur 48 couples de variables).

²³ Selon la table des corrélations de Spearman, dépendant du nombre d'observations de l'échantillon (ici 15 années)

Tableau IV-3 : Nombre de corrélations significatives entre la démographie des rennes, les découpages temporels et les variables climatiques. Sources : Saami Parlement, 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

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 IV.3) que les séries temporelles décrivant différents facteurs climatiques locaux (6 corrélations, tableau IV.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 de Nord-Botnie (n=13). Cette différence n'est toutefois pas significative d'après le test du χ^2 ($p>0,05$). 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.

3) Remettre en contexte anomalies de circulation, types de temps associés et cycle biologique de *Rangifer tarandus* L.

Les variables saisonnalisées présentant une corrélation significative avec plus de 3 sous-catégories de population de rennes sont présentés dans le tableau IV.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-Atlantique et Est-Atlantique/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 *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 ($p < 0,0001$) suggère 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 IV.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. Ces anomalies correspondent à des conditions atmosphériques localement stables, anticycloniques et froides.

Tableau IV-4 : Matrice des corrélations entre les variables saisonnalisées et les comptages de rennes. En gras : $p < 0,05$; gras souligné : $p < 0,001$. NAO « Oscillation nord-atlantique » ; EA/WR « Oscillation est-Atlantique ouest-Russe, SCAND « Oscillation Scandinave » ; Giesse « pleine saison estivale » ; Čakčagiesse « début d'automne ». Sources : Saami Parlement, NCDP (NOAA), NCDC (NOAA) ; Réalisation : R. Courault (2016)

Variables	NAO_Jun-Jul-Aug	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	<u>-0,845</u>
Mâles – Nord-Botnie	0,214	-0,375	0,222	0,529	<u>-0,892</u>
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	<u>-0,849</u>

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 modèle retiennent les deux variables, ils expliquent davantage de variance (r^2 ajusté = 0,472), mais sont moins significatifs ($p = 0,009$).

D - Discussion

La variabilité temporelle des cheptels est importante au cours de notre période d'étude. Les conditions climatiques saisonnières modulent en effet le sex-ratio lors du vêlage (Weladji, Holand et al., 2002). 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 (Delaporte, Roué, 1986).

C'est dans les habitats écologiques constituant les pâturages des mois d'été, selon le calendrier pastoral et la biologie de *Rangifer tarandus* L. (Klein, 1990), 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 (Tyler, Turi, 2007). 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 (Roturier, Roué, 2009).

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 Sami, ainsi que d'après la littérature (Fernandez, 1997), les rennes sont encore couverts par leur pelage d'été, ce qui les rend vulnérables à des conditions froides et humides. 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 de températures caractérisant cette période de l'année (Tunon, Sjaggio, 2012). 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 ; de la gestation des femelles qui les suit, et durant la descente du piémont en direction du Golfe de Botnie pour l'hiver

(Forbes, Kumpula et al., 2009 ; Weladji, Holland et al., 2002). 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 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). Les insectes piqueurs (moustiques, mouches) voient également leur pleine activité reproductive en juillet (Hagemoen & Reimers, 2002). Ces insectes, vecteurs de pathogènes pour l'ongulé, obligent ce dernier à monter en altitude et à marcher face au vent dominant pour éviter ces désagréments (Kuntz, 2011). 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 (automne secs et froids) et la démographie des rennes, elles sont en cohérence 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 (Riseth, Tømmervik et al., 2010).

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 (10 fois plus d'individus pour la sous-région Nord-Botnie) vient nuancer les interprétations. De plus, les catégories (mâles, femelles, faons) présentent des évolutions temporelles différenciées, complexifiant 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 pourraient expliquer le faible nombre de corrélations entre les 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'été²⁴. 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 (Tunon, Sjaggo, 2012). Quant aux meilleures corrélations climat/démographie des rennes obtenues en utilisant les indices atmosphériques, elles confirment les résultats observés pour d'autres variables (Ericacée, *Cassiope tetragona*, et rennes de l'archipel du Svalbard, Aanes, Saether et al., 2002 ; *Rangifer tarandus platyrhynchus* L. ; cheptels semi-domestiques du nord de la Norvège, Courault, Cohen et al., 2015).

E - *Conclusions et perspectives*

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

²⁴ 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*, 3(43), 2015

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 (Courault, Delbart et al., 2015). Des données topographiques permettraient de calculer 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). Des décomptes plus précis temporellement, à l'échelle d'une communauté, 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'habitation aux effets de la fragmentation des paysages de migration saisonnière des rennes. L'apport en fourrages externes pour pallier au manque d'apports naturels en hiver, l'évitement des ouvrages construits trop bruyants, le contournement des barrages hydro-électriques (évoqués dans le chapitre 2), la montée en alpage des rennes par camion, sont autant d'exemples de facteurs indirects à prendre en compte pour nuancer contextuellement les causalités entre séries temporelles climatiques et démographie des rennes semi-domestiqués. 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.

Transition entre la première partie et la deuxième partie

Cette première partie discutait des phénomènes régionaux et locaux signant des effets les plus directement décelables du changement global en Scandinavie : fragmentation paysagère et changement climatique. L'étude sur la fragmentation des paysages s'est portée à l'échelle de l'ensemble des territoires communautaires d'éleveurs de rennes de Laponie suédoise, tandis que les deux études suivantes avaient une approche emboîtée comparative spatiale et temporelle : effets de la variabilité atmosphérique continentale et climatique régionale sur deux sous-espèces de *Rangifer tarandus* réparties entre Spitzberg, comtés nordiques norvégiens et suédois; performances explicatives des découpages temporels selon les saisons astronomiques et les saisons pastorales.

Le processus de fragmentation des paysages de l'élevage de rennes a notamment été défini des points de vue matériels (pertes en pâturages) et immatériels (évitements théoriques des rennes aux infrastructures humaines). L'étude a démontré la sensibilité générale des territoires communautaires suédois, avec des disparités géographiques entre fragmentation littorale et intérieure. Les habitats écologiques les plus intensément fragmentés sont les forêts de conifères, tandis qu'à l'inverse les habitats typiquement montagnards (landes, pelouses) se caractérisaient par leur faible fragmentation. Les facteurs explicatifs ayant contribué à la perte en surfaces et/ou à l'évitement des troupeaux de rennes ont été hiérarchisés, et dénotent du fort impact de la foresterie intensive sur les paysages de l'élevage de rennes. Les mines et l'urbanisation ont cependant joué un rôle moins important que prévu pour expliquer la fragmentation paysagère des habitats, ou des territoires communautaires. En outre, la fragmentation des territoires des communautés d'éleveurs de rennes ne peut être directement attribué au type de communauté, rejetant l'hypothèse de pertes paysagères plus importantes pour les communautés forestières. Leur géographie, particulièrement complexe pourrait être la cause du rejet de cette hypothèse, étant donné la forte diversité paysagère des systèmes pastoraux forestiers, montagnards ou concessionnaires. Ces différents résultats, en particulier le poids relativement important de la sylviculture et de la valorisation agricole dans le contexte de changement climatique actuel, appellent à mieux comprendre ces changements climatiques, en liaison avec l'expression continentale du système climatique (circulation atmosphérique) et réponse écologique des rennes.

Pour les chapitre II et III, l'approche emboîtée et multi-scalaire entre évolution atmosphérique, climatique récente et dynamiques de population de différentes sous-populations de rennes a en premier lieu montré les évolutions tendanciennes, et par seuils des phénomènes climatiques étudiés. L'un des résultats les plus probants étant représenté par l'augmentation tendanciellement importante de la phase positive de l'Oscillation nord-atlantique en saison hivernale, avec une périodisation délimitant clairement 1950-1980 de 1981-2013. La conséquence directe de ce changement de régime atmosphérique hivernal est représentée par l'augmentation substantielle des cumuls de précipitations dans le nord de la Suède (Abisko), avec cette même périodisation. Ceci dit, l'élévation des températures est particulièrement importante, et dénote d'un seuil plus tardif, l'année 1988 marquant une élévation moyenne de +1,1°C sur les températures moyennes jusqu'en 2013. Ces changements de régimes climatiques (thermiques et pluviométriques) ont été décrits pour l'ensemble des stations étudiées, avec l'élévation généralisée des températures saisonnières et annuelles, et le réchauffement récent particulièrement remarquable pour la station de Barentsburg (Svalbard), confirmant l'effet d'amplification du réchauffement global en Arctique. Ces changements de régimes climatiques ont notamment été étudiés dans le cadre de la compréhension de la réponse biologique des sous-populations de rennes des trois régions. Si les périodes de comptages étaient différentes et rendaient la comparaison difficile (déphasage entre les séries temporelles climatiques, leur évolution et celles des trois sous-populations étudiées), le but recherché était de hiérarchiser et factoriser les relations atmosphère/climat/démographie de *Rangifer tarandus*. Les résultats ont insisté sur la contribution hivernale de la variabilité atmosphérique sur les populations suivies. Ceux-ci ont également mis en lumière des réponses démographiques différenciées en fonction du type de téléconnexion testées, du contexte climatique local exprimant la circulation atmosphérique, et au sein duquel les rennes évoluent : les hordes de rennes sauvages du Spitzberg semblaient être favorisées par les anomalies positives d'Oscillation Arctique, tandis que les cheptels norvégiens répondant négativement aux anomalies positives d'Oscillation nord-atlantique.

Ces résultats préliminaires ont amorcé les premières interrogations sur les liens entre atmosphère, climat et démographie des rennes, et les saisonnalités pouvant structurer la réponse biologique des troupeaux de rennes aux aléas climatiques naturels. La part culturelle restait cependant relativement inexplorée, et amorce le chapitre IV. Pour ceci, la question du découpage temporel du cycle biologique annuel des rennes a été interrogée : le calendrier astronomique traditionnellement utilisé en climatologie, et relativement universel pouvait-il

être statistiquement plus explicatif que le calendrier pastoral des éleveurs de rennes ? Assez logiquement, le découpage temporel des saisons du calendrier pastoral semble mieux correspondre aux variations démographiques des cheptels de rennes de la région du Norrbotten. Le nombre de saisons pastorale étant plus important que les quatre saisons astronomiques, elles ont notamment permis de décrire plus précisément les températures de surface des habitats écologiques de la région ; et d'augmenter le nombre de corrélations entre démographie des cheptels et variabilité atmosphérique et climatique. Du point de vue climatique, les saisons étant les plus à même de décrire une partie de la variabilité des cheptels du comté Norrbotten sont principalement hivernales et automnales. En l'état actuel des choses, la recherche de relations franches et directes entre réponse démographique, climatologie régionale et circulation atmosphérique reste à approfondir. De même, la part économique et sociale dans l'explication de la variabilité des cheptels de rennes semi-domestiques doit être envisagée. La présentation de ces résultats à l'occasion d'une réunion au Parlement Sami suédois (Kiruna) a notamment révélé l'intérêt des parties prenantes sur la prise en compte des savoirs locaux, en l'occurrence ici les saisons pastorales dans les recherches de modèles environnementaux de compréhension des conséquences du changement global. De même, ces résultats principalement explorés en début de doctorat, confirment l'intérêt d'étudier et d'interagir plus en détails avec la communauté d'éleveurs de rennes Gabna. Sa situation particulièrement nordique, dans un contexte environnemental complexe (voir chapitre 1), l'organisation de cette communauté montagnarde entre les marges nord de la forêt boréale, et les toundras d'altitude de la chaîne fennoscandienne interroge sur les enjeux auxquels celle-ci fait face. Celle-ci accueille également au sein de ses territoires la station scientifique d'Abisko, et le Parlement Saami de Suède, à Kiruna.

Nous l'avons vu, les conséquences du changement global peuvent être directes, ou indirectes sur les dynamiques de population des rennes semi-domestiques. Celles-ci influencent également les dynamiques paysagères, qui portent les troupeaux de rennes semi-domestiques. Dans cette deuxième partie, l'intérêt porte sur les dynamiques paysagères à l'œuvre et ayant ses propres réponses biologiques aux effets des changements globaux, en premier lieu l'élévation des températures soulevées dans cette première partie. Ce desserrement de la contrainte thermique est notamment évoqué dans la littérature comme principal composante dans le processus de verdissement de l'Arctique et de ses marges méridionales : boréalisation des écosystème, embroussaillage, colonisation et densification d'essences et d'espèces végétales plus thermophile. La question se pose prioritairement au

sein de la région d'étude, représentée par les territoires de l'élevage de rennes semi-domestiques de la communauté Gabna. Cette communauté montagnarde semble, nous l'avons vu, cumuler beaucoup d'effets directs et indirects du changement global au sein de ses territoires pastoraux : prospection minière, foresterie intensive, mouvements biogéographiques des continuums floristiques au long de ses paysages boréo-alpins sont autant d'enjeux environnementaux que l'imagerie satellite semble autoriser à suivre, dans le temps comme dans l'espace. Ces suivis s'intéressent en particulier aux effets des changements atmosphériques et climatiques sur la phénologie des formations végétales (et leur évolution temporelle propre pour deux moments clés de la phénologie) de différents pâturages saisonniers de la communauté ; et posent en bout de course la question du lien entre dynamiques bioclimatiques et démographique des cheptels de la région Norrbotten (chapitre V). Dans un deuxième temps, la question de la synchronisation de la migration annuelle des rennes semi-domestiques de la communauté Gabna avec les démarrages phénologiques au sein des différentes unités pastorales sera abordée. On cherche notamment à mieux comprendre, caractériser et décrire l'avancée progressive des dates de démarrages phénologiques au sein des pâturages saisonniers, éventuellement conjointe avec l'avancée théorique des troupeaux de rennes semi-domestiques en direction de l'aire de vèlage, sur les sommets fennoscandiens. La deuxième partie sera clôturée par le chapitre VII, qui discutera de l'avancée géographique progressive des formations végétales, via un suivi par satellite de moyenne résolution (Landsat), au sein des pâturages saisonniers et de différentes unités pastorales à fort intérêt pour les éleveurs de rennes Gabna au sein de leurs territoires.

,

Deuxième partie : Dynamiques spatio-temporelles des paysages végétaux de l'écotone taïga – toundra, une approche par la télédétection

V - Suivi de la variabilité interannuelle et décennale des formations végétales de la communauté d'éleveurs Gabna par imagerie MODIS 13Q1 et mise en lien avec les dynamiques climatiques et démographiques des rennes

A - Introduction

Les chapitres III et IV de la première partie montraient l'intrication entre variabilité atmosphérique, climatique et démographique à l'échelle régionale, outre les effets de l'intensification de l'usage des terres sur les habitats écologiques des rennes (chapitre II). Ces résultats ont notamment souligné l'importance du desserrement de la contrainte thermique, pour les températures annuelles en particulier (chapitre III). Des liens avec la démographie des hordes et troupeaux de rennes ont été démontrés, et dénotent de réponses biologiques différentes selon la sous-population de *Rangifer* et la fenêtre temporelle considérés (ssp *platyrhynchus* à Svalbard, ssp *tarandus* dans le Finnmark norvégien et la région du Norrbotten en Suède). Les conditions climatiques hivernales (indices NAO+, hauteurs de neige plus importantes) affectaient les hordes de rennes sauvages du Spitzberg et certains cheptels semi-domestiques de Norvège. Pour les rennes semi-domestiques de la région Norrbotten, les conditions climatiques des saisons chaudes du calendrier pastoral (été, automne) semblaient affecter les effectifs de rennes (chapitre IV). Les auteurs lient conditions climatiques, accessibilité et disponibilité de la végétation pâturable et écologie du renne (Fauchald, Park et al., 2017). Avec le desserrement généralisé de la contrainte thermique (en particulier depuis la fin des années 1980, chapitre II), les questionnements sur la probable augmentation de la densité végétale au cours de cette période émergent, de même que leurs liens avec les dynamiques de population des rennes semi-domestiques de la région Nord-Botnie.

Dans ce chapitre, une étude exploratoire vérifiera l'hypothèse de liens entre indices de circulation atmosphérique, variabilité bioclimatique régionale et variabilité de la réponse biologique des rennes au cours des premières années du XXI^{ème} siècle, ici transcrite à travers les décomptes démographiques des cheptels de rennes semi-domestiques du comté de Nord-Botnie. En effet, Fauchald et al. (2017) ont montré les liens causaux entre variabilité climatique (et atmosphérique), biomasse de la végétation printanière et estivale et caractères démographiques de *Rangifer tarandus* (caribou). Bjorkman et al. (2018) insistent sur la prise

en compte du facteur humidité en complément des températures pour expliquer les changements de traits fonctionnels de la végétation arctique (notamment l'augmentation de sa hauteur).

Pour caractériser la variabilité bioclimatique, nous allons exploiter une série de données de télédétection, à haute résolution temporelle (bimensuelle) et disponibles pendant une période de temps deux fois moins longue que précédemment (2000-2017). La disponibilité de ces données a dicté l'étendue de la période étudiée, dont l'intérêt réside aussi dans le fait qu'elle est postérieure à la rupture observée à la fin du 20ème siècle dans les séries temporelles climatiques (Chapitre II). L'intérêt des données MODIS pour le suivi et la compréhension des changements environnementaux a été démontré par de nombreux auteurs, en particulier dans des régions à climat fortement contrasté saisonnièrement (Beck, Atzberger et al., 2006 ; Bokhorst, Tømmervik et al., 2012). L'utilisation d'indices de végétation, tels que le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) est un moyen utile pour comprendre la réponse des écosystèmes à la variabilité climatique locale, et à la tendance lourde du changement climatique actuel (Petorelli, Vik et al., 2005). Dans les écosystèmes de toundra, des relations significatives ont été démontrées entre les mesures opérées par NDVI et la biomasse végétale rencontrée sur le terrain (Walker et al., 2012 in Epstein, Myers-Smith, et al. 2013).

Dans un premier temps, nous vérifierons s'il existe une tendance temporelle de cet indice au cours de la période d'étude indépendamment des fluctuations saisonnières (test de Mann-Kendall), et grâce à la cartographie des résultats nous vérifierons dans quel type d'occupation du sol et de pâturage saisonnier ces tendances temporelles sont les plus significatives au sein du territoire de la communauté de Gabna.

Dans un deuxième temps, nous testerons, sur un échantillon de surfaces, les tendances à l'augmentation de l'indice NDVI dans les principaux habitats saisonniers exploités par les rennes, en nous concentrant sur deux saisons clef du cycle biologique de l'espèce, à savoir le début du printemps et le plein été (Klein, 1990 ; Forbes et Kumpula, 2009). Beck, Atzberger et al. (2006) ont notamment travaillé sur l'amélioration du suivi par NDVI-MODIS des formations végétales en haute-latitude et suggèrent d'établir le suivi interannuel des valeurs de NDVI lors de la dernière quinzaine de mai. Nous utiliserons le découpage en saisons pastorales des éleveurs Saami (Tunon, Sjaggo et al., 2012), dont le Chapitre IV a démontré

l'intérêt à la fois pour caractériser l'irrégularité climatique et pour comprendre ses relations avec la démographie des rennes.

Nous comparerons pour finir les tendances observées sur l'indice NDVI avec les données climatiques, atmosphériques et la démographie des rennes. L'intérêt des données atmosphériques pour la compréhension de la variabilité des systèmes écologiques a été démontré, (Stenseth, Ottersen et al., 2003 ; Petorelli, Vik et al., 2005, 2011, Bjorkman, Myers-Smith et al., 2018) et vérifié à propos des relations entre irrégularité climatique et démographie des rennes, en particulier les rennes sauvages du Svalbard dans le chapitre III. Pour les séries climatiques, la seule variable prise en compte est celle des températures moyennes, étant donné son potentiel explicatif dans les dynamiques interannuelles de végétation (Amat (eds), 1996) et plus largement sur le fonctionnement des écosystèmes (Legagneux et al., 2014). La démographie des rennes sera renseignée par les décomptes démographiques des cheptels de rennes semi-domestiques du comté de Nord-Botnie.

B - *Matériel*

Pour réaliser cette étude, nous allons donc exploiter les données de télédétection MODIS-NDVI, les données Corine Land Cover sur l'occupation des sols et des données atmosphériques et climatiques, disponibles depuis le début du XXI^{ème} siècle. L'ensemble de ces données vont être intersectées avec l'extension géographique du territoire de la communauté Gabna, à l'exception des données climatiques de la station d'Abisko et des données démographiques de rennes qui concernent l'ensemble des communautés d'éleveurs du Comté de Nord-Botnie (à l'exception des Concessions, voir le chapitre IV). Le tableau V.1 détaille les sources exploitées, et leurs caractéristiques géométriques et géographiques.

Tableau V-1 : Description des données et métadonnées de l'étude

Types de jeux de données	Source	Période étudiée	Extension géographique	Résolution temporelle	Résolution spatiale	Unité de mesure et type de variable	Système géodésique entrant
Séries temporelles de NDVI	Earth Data NASA Ipdaac server (https://e4ftl01.cr.usgs.gov/)	2000-2017	Extension de la communauté Gabna (xmin : 712080 ; ymin : 5076124 ; xmax :	Bimensuelle	250 m	Indice	WGS84-34N

Couverture des sols	Corine Land Cover 2006 (https://land.cornic.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012?tab=download)	2006	741632 ; ymax : 5132578)	-	100 m Surface minimale des polygones 25 ha	Classes de couverture/occupation des sols	ETRS89 / LAEA
Séries temporelles climatiques	NCDC – NOAA (https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/)	2000-2017	Abisko	Mensuelle	-	Températures moyennes (°C)	-
Séries temporelles atmosphériques	NOAA-NCEP (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml)	2000-2017	-	Mensuelle	-	Indice NAO	-
Séries temporelles démographiques de rennes	Parlement saami (https://www.sametingsaami.se/statistik/)	2001-2017	Régionale	Annuelle (comptages de décembre à mars)	-	Nombre de rennes total, mâles, femelles, faons	-

1) Acquisition et extraction du signal NDVI

Le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) est “*un indice basé sur la détection de la végétation qui est fortement corrélé avec la production primaire nette de la végétation en surface*” (Petorelli, Vik et al., 2005).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Les séries chronologiques MODIS ont été automatiquement téléchargées, et prétraitées en utilisant le package « MODISstsp » du logiciel R, librement téléchargeable (Busetto & Ranghetti, 2016). Les données MODIS, issues du satellite Terra se caractérisent par leur disponibilité de 2000 à 2017, et leur répétitivité bimensuelle. Chaque quinzaine, la meilleure image est sélectionnée, la date indiquée dans les données MODIS correspond au début de la quinzaine, mais pas forcément à la date de l’image acquise. De plus, dans notre région d’étude, les données sont indisponibles pendant la période de la nuit polaire, nous ne disposons ainsi que de 18 quinzaines au lieu de 24. Elles ont une résolution spatiale de 250 mètres, et une extension géographique large (une tuile MODIS a une extension de 10° en latitude et en longitude, soit 111 km à l’Equateur). Le package se connecte automatiquement sur les serveurs NASA Ipdaac (Earth Data), et permet le téléchargement les données NDVI MODIS-13Q1, pré-calculées et rééchelonnées de -1 à +1.

Le package MODISrsp permet également d'importer des données polygonales afin d'acquies les séries temporelles NDVI selon l'extension maximale en latitude et en longitude de la zone à étudier, ici le territoire de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna (tableau V.1). Le système de projection (ou de coordonnées) peut être spécifié, autorisant le package à transformer géographiquement les séries temporelles MODIS, soit en choisissant directement le système de référence, soit par le biais du système de référence importé avec la donnée de découpage de la région d'étude, dans notre cas il s'agit de UTM WGS84-32 N.

Une fois les données téléchargées, le répertoire distingue plusieurs jeux de données : les images MODIS de NDVI, enregistrées au format GeoTIFF, ainsi qu'un répertoire « Time series », contenant un fichier superposant numériquement la série temporelle à l'échelle de la région d'étude intervenant dans le découpage et le mosaïquage automatique opéré par le package. Ce fichier est directement importable et manipulable avec le logiciel R, et contient les valeurs de NDVI par quinzaine de jours, de 2000 à 2017 pour tous les pixels composant la zone d'étude.

La deuxième grande étape est l'extraction des valeurs bimensuelles de NDVI tout au long de la série temporelle acquise via MODISrsp. Dans un premier temps, c'est l'ensemble de la région d'étude (tableau V.1) dont nous étudierons les tendances temporelles de Mann-Kendall pour tous les pixels MODIS la composant, pour laquelle la significativité a également été testée. Nous cartographierons ensuite ces deux résultats (tests de tendance de Mann-Kendall et significativité à l'échelle de la région d'études, voir § méthodes). La réalisation de la deuxième étape du travail, à savoir l'étude de l'évolution des valeurs de NDVI dans les habitats saisonniers des rennes semi-domestiques, est plus délicate. Pour cela, il est nécessaire d'obtenir des séries temporelles par classe d'habitats, en l'occurrence issues de la cartographie des couvertures de sols Corine Land Cover (tableau V.1). Nous avons sélectionné le millésime 2006, intermédiaire entre le début de la période d'étude (2000) et sa fin (2017). En important une cartographie d'occupation des sols, en format shapefile, le package MODISrsp calcule les valeurs de NDVI d'après une nomenclature traduisant différentes couvertures ou occupations de sols (catégories chiffrées, ou alphanumérique). Il ne permet cependant pas de moyennier le NDVI bimensuel pour plusieurs polygones appartenant à la même catégorie d'occupation des sols. Or, dans la communauté d'éleveurs de rennes Gabna, de nombreux polygones se caractérisent par leur appartenance à la même catégorie d'occupation des sols. On procède donc dans un premier temps à la sélection des couvertures de sols et des habitats pour lesquels on souhaite obtenir une série temporelle de NDVI (tableau V.2). Les

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

occupations des sols de type artificialisé sont supprimées, tandis que l'on conserve certaines couvertures de sols non végétalisés (polygones de roches nues, de glaciers, de zone en eau), afin de s'assurer de la cohérence de l'échantillonnage.

Tableau V-2 : Sélection des échantillons de couvertures de sols végétalisés et non végétalisés (Corine Land Cover 2006) pour l'extraction des séries temporelles MODIS 13Q1, source : Corine Land Cover 2006, Agence Européenne de l'Environnement, Réalisation : R.Courault

Code Corine Land Cover	Nomenclature	Superficie de l'échantillon (en km²)
23	Forêts de feuillus	4,3
24	Forêts de conifères	3,2
25	Forêts mixtes	7,1
26	Pâturages et prairies naturelles	5,3
27	Landes et bruyères	1,8
29	Forêts et végétation arbustive en mutation	5
31	Roches nues	4,2
32	Végétation clairsemée	2,2
34	Glaciers et neiges éternelles	1,8
36	Tourbières	3,9
41	Plans d'eau	3

L'échantillonnage des polygones pour chaque occupation des sols est réalisé selon différents critères, afin de s'assurer de la représentativité de chaque polygone par rapport aux surfaces dont le NDVI sera extrait. Les premiers critères se réfèrent à la géométrie des polygones et à leur superficie respective. En effet, les pixels des images MODIS (taille 250m de côté, soit 1/16^{ème} de km²) ont une résolution spatiale bien plus grossière que les contours des polygones de la carte Corine Land Cover (pixel de 100 m de côté, soit 1/100^{ème} de km²)²⁵. Cette différence de géométrie fait que les pixels MODIS sont susceptibles d'être peu bruités par les couvertures et occupations de sols voisines. Dans la mesure du possible, les polygones Corine Land Cover, qui décrivent chacun une couverture de sol spécifique (tableau V.2), ont été choisis pour leur forme géométrique relativement compacte. Ceux présentant un dessin trop complexe, avec une géométrie irrégulière, ne sont pas sélectionnés. La superficie est également un critère géométrique important, afin d'optimiser la représentativité spatiale des couvertures de sols dont on souhaite suivre l'évolution temporelle du NDVI. Etant donné qu'un pixel MODIS a une résolution spatiale de 250 m, une superficie comprise entre 1,5 km²

²⁵ Même s'il faut garder en mémoire que la taille minimale de zone cartographiée dans la carte Corine Land Cover (25 ha, soit ¼ de km²) n'est que quatre fois supérieure à la taille du pixel MODIS (6,25 ha).

et 5 km², correspondant à 24 à 80 pixels MODIS, et ayant une forme régulière semble un bon compromis.

La deuxième grande catégorie de critères de sélection des polygones de couverture de sols concerne la représentation de la diversité paysagère de l'écotone taïga – toundra caractérisant le territoire de la communauté d'éleveurs de rennes semi-domestiques Gabna et où se déploie la migration saisonnière des rennes, une diversité essentielle pour ce système d'élevage (Mårell & Edenius, 2005). Les zones spatialement représentatives des forêts de conifères situées dans les pâturages hivernaux sont alors préférentiellement choisies, plutôt qu'un patch de forêts de conifères isolé en montagne et entouré de formations végétales basses. On sélectionne ainsi régulièrement les polygones selon le changement progressif des formations végétales au fur et à mesure que l'on avance vers le nord-ouest, en direction des sommets de la chaîne fennoscandienne, et des pâturages estivaux associés (figure V.1). Une fois ces deux catégories de critères appliquées (taille, forme, localisation le long du gradient bioclimatique d'altitude et des pâturages saisonniers), on soumet les polygones sélectionnés à validation, certains se localisant à proximité ou au sein de zones où des relevés de terrains ont été effectués (partie III, chapitre IX, en particulier points paysagers), nous permettant de vérifier la cohérence de la catégorie du polygone Corine Land Cover vis-à-vis de la couverture réelle des sols échantillonnés. Egalement, la sélection des couvertures de sols, listée dans le tableau V.2, est validée par la reconnaissance visuelle via imagerie satellite fine (fond de carte « Imagerie aérienne » d'ArcMap, Google Earth, figure V.1). Une ultime validation est également opérée par la suite dans cette étude, s'assurant de la cohérence des couvertures de sols selon leur réponse spectrale dans le rouge et le proche-infrarouge, en particulier au cœur de la saison végétative (pic phénologique). Les surfaces couvertes de végétation seront ainsi caractérisées par des indices NDVI généralement supérieurs à 0,2 (Gandhi, Parthiban, 2015) ; tandis que les surfaces non végétalisées (roche, eau, glace) seront très probablement caractérisées par un NDVI négatif, ou inférieur à 0,2 (tableau V.2). Nous examinerons dans la discussion la représentativité de cet échantillonnage particulièrement contraint, par rapport aux tendances interannuelles du NDVI de ces différents habitats observés sur l'ensemble de leur extension spatiale dans le territoire de la communauté Gabna.

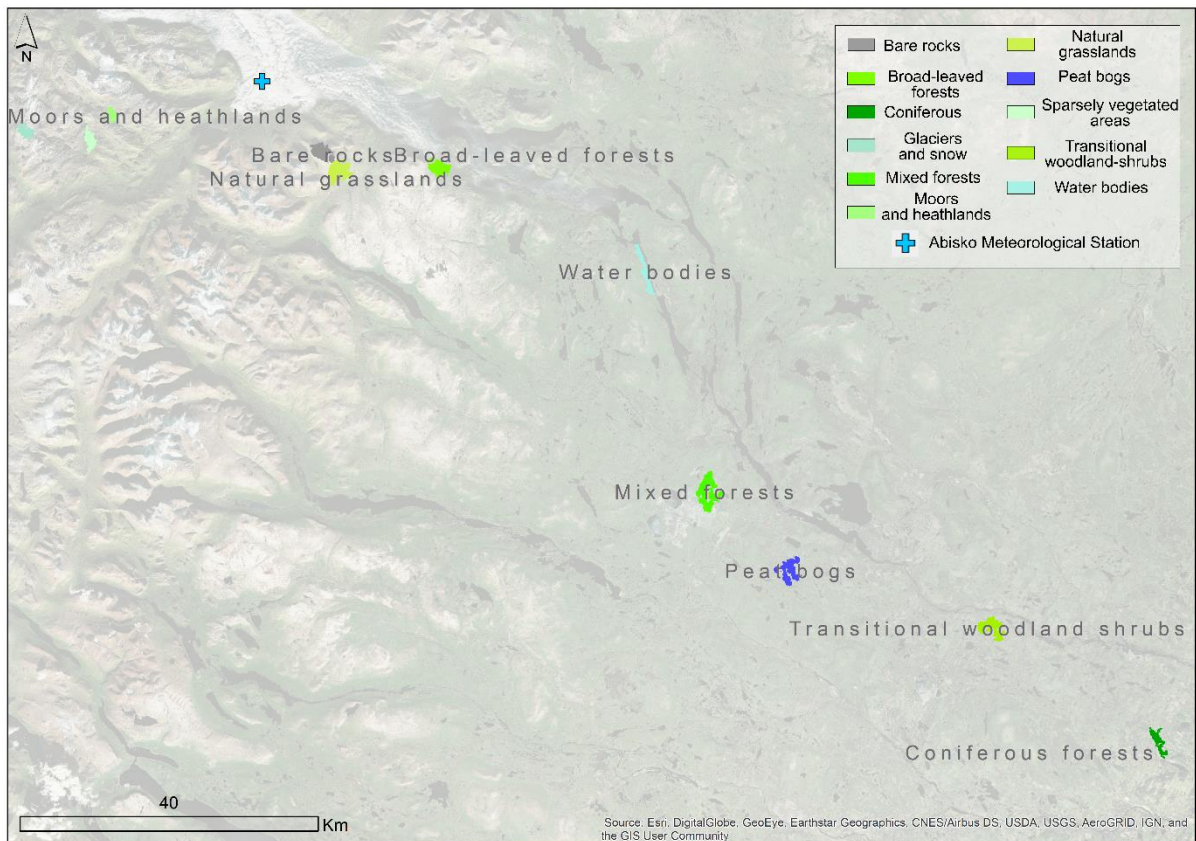


Figure V-1 : Cartographie de la distribution des échantillons de couvertures de sols végétalisés et non végétalisés à l'échelle de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna, et localisation de la station météorologique d'Abisko (source : Corine Land Cover 2006, Abisko Research Station, ArcGIS Basemap, réalisation R. Courault, 2018)

Une fois la sélection des polygones de couverture de sols opérée, on importe les échantillons sur R-Studio et on les soumet à l'analyse de la variabilité du NDVI MODIS-13Q1. Les séries temporelles sont calculées et exportées par le package MODISstsp, qui donne en sortie un fichier tabulaire facilement traitable sous Excel, avec en colonnes les catégories Corine Land cover et en ligne, chaque quinzaine de la période d'étude, identifié par la date du début de la quinzaine. Les observations correspondent à la valeur moyenne du NDVI des pixels formant l'échantillon de catégorie d'habitat ou d'occupation des sols.

Il est alors possible d'opérer des traitements statistiques pour décrire la variabilité du NDVI pour chaque occupation de sol échantillonnée. Pour se faire, deux sous-jeux de données principaux sont utilisés, en fonction des objectifs de recherche et des contraintes liées à l'hétérogénéité temporelle des données. Le premier sous-jeu de données a trait à la variabilité interannuelle de l'ensemble des échantillons (incluant des échantillons d'occupation des sols non végétalisés « contrôle », tels que l'échantillon de glacier et de neige éternelle, celui de

roche nue, tableau V.2). La moyenne annuelle du NDVI est calculée pour chaque échantillon étudié pour vérifier la hiérarchie attendue des valeurs du NDVI entre les différentes occupations du sol. Le deuxième sous-jeu de données concerne les échantillons d'habitats végétalisés. Il s'intéresse à deux périodes clés dans le cycle biologique annuel du renne et des paysages végétaux de l'écotone toundra-taïga : la fin du printemps (correspondant au vêlage, à la débâcle et au démarrage phénologique amorcé de la plupart des formations végétales) et le milieu de l'été (moment optimal de reconstitution des masses grasses avant les périodes de rut et de l'oestrus, voir chapitre I, pic phénologique de la plupart des formations végétales). Selon ces critères, on choisit ainsi systématiquement les données de la dernière quinzaine de mai, de 2000 à 2017. La deuxième quinzaine de juillet est également sélectionnée pour l'étude. Celle-ci se rapporte au pic phénologique de la plupart des végétaux sur la période à l'échelle de la région de Nord-Botnie (données temporelles SPOT-VGT du portail PROBA-V MEP, <https://proba-v-mep.esa.int/applications/time-series-viewer/app/app.html>). Elle signe également le déplacement des troupeaux de rennes semi-domestiques dans les pâturages estivaux en haute-montagne. On sélectionne alors les données des dernières quinzaines de juillet entre 2000 et 2017. Ces deux données saisonnières de NDVI qui varient en fonction de l'année et de l'échantillon considéré, seront ensuite soumises à des analyses statistiques uni-, bi- ou multivariées.

2) Acquisition et prétraitement des séries temporelles de NAO, de températures et démographiques

Les séries temporelles d'Oscillation Nord-Atlantique de 2000 à 2017 ont été acquises sur le portail NOAA-NCEP (tableau V.1). Leur résolution temporelle est de l'ordre du mois. Peu de prétraitements ont été nécessaires, si ce n'est leur importation sur un tableur Excel (fichier d'origine en *.txt) et le calcul de moyennes saisonnières selon le calendrier pastoral saami (voir chapitre IV). Les saisons qui nous intéressent ici sont celles ayant précédé ou sont contemporaines de la période de croissance végétative annuelle des habitats écologiques échantillonnés et dont le NDVI bimensuel 2000-2017 avait été préalablement extrait. On s'intéresse ainsi aux conditions atmosphériques hivernales précédant le démarrage phénologique des formations végétales que l'on étudie (fin mai) et celles qui précèdent le pic phénologique, qui survient généralement fin juillet, d'après les séries temporelles régionales 2000-2017 SPOT-VGT (<https://proba-v-mep.esa.int/applications/time-series-viewer/app/app.html>). Les saisons pastorales semblent plus adéquates que les saisons météorologiques, puisqu'elles décrivent avec plus de finesse les dynamiques bioclimatiques

propres à l'élevage de rennes en Laponie suédoise (voir chapitre IV). On opte ainsi pour les pleines saisons Dàlvve (hiver, de décembre à mars inclus), Giddà (printemps, d'avril à mai inclus) et Giesse (été, de juin à juillet inclus), puisque celles-ci ont l'avantage de ne pas comprendre plusieurs fois le même mois du calendrier grégorien, comme c'est le cas avec les saisons pastorales intermédiaires (voir chapitre IV). On calcule ainsi les moyennes de l'indice NAO (pré-calculées par la NOAA sur la normale 1981-2010) pour chacune des années de l'étude (2000 à 2017), à l'échelle des trois saisons pastorales précédant la période végétative annuelle. Les mois de décembre qui précèdent chaque année sont pris en compte (décembre 1999 pour la saison hivernale Dàlvve de 2000).

Les séries temporelles mensuelles de températures moyennes de la station synoptique d'Abisko sont acquises sur le portail NCDC de la NOAA (figure V.1), pour la période étudiée de 2000 à 2017. Une seule station climatique est prise en compte dans cette étude exploratoire (figure V.1), du fait de la représentativité régionale de la station météorologique d'Abisko, et afin de ne pas multiplier le nombre de variables explicatives redondantes dans les analyses statistiques. Une fois les données choisies, acquises puis importées sous tableur, les moyennes saisonnières de Dàlvve (hiver), Gità (printemps) et Giesse (été) sont calculées pour chaque année, sur le même mode que le calcul de moyennes opéré sur les données d'indice NAO.

Les séries temporelles de démographie de rennes sont obtenues sur le portail du Parlement Saami suédois (tableau V.1). Leur résolution temporelle est annuelle, les données démographiques téléchargées concernent la période étudiée (2000-2017). La démographie annuelle des troupeaux de rennes semi-domestiques est celle du comté de Nord-Botnie, excluant les communautés d'éleveurs non-saamis de la zone concessionnaire (voir chapitres II et IV). Les décomptes de rennes semi-domestiques sont opérés par les éleveurs des différentes communautés saamies du comté des mois de décembre de l'année n-1 à mars de l'année n (voir chapitre IV). Ces dénombrements distinguent les mâles, les femelles et les faons, et le total de rennes constituant le décompte démographique annuel. Comme dans les chapitres III et IV, pour procéder aux analyses statistiques, nous prenons en compte le décalage temporel entre les décomptes démographiques de l'année en cours et les variables bioclimatiques explicatives (NDVI, températures, indice NAO). Lors de la réalisation des analyses statistiques (bivariées et multivariées), nous avons pris soin de faire correspondre les conditions bioclimatiques de l'année précédant le comptage des rennes semi-domestiques. Les données annuelles de la démographie des rennes de l'année 2001 sont placées avec les données bioclimatiques saisonnières de l'année 2000. Les quatre catégories démographiques

(mâles, femelles, faons, total) sont ainsi prises en compte dans l'analyse, et ajoutées au sous-jeu de données étudié.

Malgré toutes nos précautions méthodologiques, notre étude reste exploratoire du fait des différences d'échelle entre les jeux de données (local à régional pour la variabilité du NDVI et les données de températures, régional à continental pour la variabilité atmosphérique et la démographie des rennes). Nous ne disposons pas de données démographiques des rennes à l'échelle de la communauté Gabna, et faisons l'hypothèse que les effectifs y varient dans le même sens que dans l'ensemble des troupeaux des communautés saamies du Comté de Nord-Botnie. Nous avons pourtant observé une variabilité de la fragmentation des paysages selon les communautés d'éleveurs du Comté de Nord-Botnie qui pourrait jouer un rôle dans les variations d'effectifs des troupeaux (chapitre II). La communauté Gabna était ainsi plus affectée le processus de fragmentation des paysages qu'attendu pour une communauté montagnarde, compte-tenu de l'existence de grandes infrastructures de transport et minières.

C - Méthodes

Les méthodes de description et d'explication statistiques comportent deux volets principaux.

Le premier volet a trait aux variabilités et aux tendances temporelles de l'évolution du NDVI entre 2000 et 2017, à l'échelle du territoire communautaire. Nous utiliserons le test de tendance de Mann-Kendall, dans deux variantes, pour détecter une tendance à l'augmentation du NDVI au cours de la période d'étude sans prendre en compte la saisonnalité. Pour le deuxième jeu de données sur un échantillon de pixels, nous calculerons d'abord la moyenne annuelle du NDVI par habitat, afin de vérifier la qualité de notre échantillonnage et puis analyserons la variabilité interannuelle du NDVI dans ces différents habitats à deux périodes clef du cycle phénologique.

Le deuxième volet s'attache à comparer ces évolutions avec celles d'une part du climat et de la circulation atmosphérique au cours de l'hiver précédent la saison végétative, et du printemps et de l'été contemporains à l'activité végétative, d'autre part de la démographie des rennes. Pour cela, nous avons recours à une comparaison des dates de pics phénologiques et des variables climatiques, puis au calcul de matrices de corrélations et enfin à l'analyse par régression linéaire multiple.

1) Variabilité interannuelle du NDVI régionale, par classe d'habitat et par saisons

La variabilité interannuelle du NDVI telle que captée par l'imagerie MODIS est analysée à deux échelles spatio-temporelles, l'ensemble du territoire de la communauté et de la période d'étude, et les échantillons de pixels de chaque type d'occupation du sol, à l'échelle de l'année et à deux saisons clef du cycle phénologique.

Pour vérifier l'existence de tendances temporelles, on utilise le test non-paramétrique de Mann-Kendall. Ce test donne deux grandes catégories de résultats : le Tau de Kendall, et la significativité de celui-ci au regard du nombre d'individus composant l'échantillon. On applique la méthode de Gavrilov et al. (2016) dans l'interprétation des résultats de tests de tendances de Mann-Kendall. Selon la valeur de la p-value, on accorde une significativité plus ou moins importante au Tau de Mann-Kendall, et à l'acceptation ou au rejet de l'hypothèse H_0 qui en résulte (H_0 = la série de données ne comporte pas de tendance, H_{1+} = tendance à l'augmentation, H_{1-} = tendance à la diminution). La catégorisation de l'intensité de la relation linéaire dépend ainsi de quatre intervalles de confiance qui sont :

La p-value résultante est inférieure au 5% de l'intervalle de confiance ; la tendance temporelle est hautement significative

La p-value résultante est comprise entre 5 et 30 % de l'intervalle de confiance : la tendance temporelle est modérément significative

La p-value résultante est comprise entre 30 et 50 % ; la tendance est faiblement significative

La p-value résultante est supérieure à 50% : aucune significativité ne peut être attribuée à la tendance.

Pour l'analyse de l'ensemble de la période et du territoire de la communauté de Gabna, nous utilisons donc le test de tendance de Mann-Kendall avec saisonnalité, test non paramétrique qui permet de détecter des tendances évolutives interannuelles, sans tenir compte de la variabilité inter-saisonnière. À l'échelle régionale, l'objectif est de réaliser une carte des valeurs du test, indiquant des tendances significatives positives ou négatives. Pour cela, on applique le test de Mann-Kendall, désaisonnalisé (packages *Kendall* et *Remote*) à l'ensemble des pixels de la région d'étude sur la série temporelle de 17 années (18 quinzaines). En utilisant les fonctions de désaisonnalisation sous R, on précise la longueur spécifique de la période étudiée (18 quinzaines au lieu de 24 habituellement du fait de la nuit polaire). Le package *Kendall* nous permet également de réaliser une deuxième carte avec la significativité de chaque pixel de la région d'étude, pour lesquels le test de Mann-Kendall

désaisonnalisé est préalablement calculé. On réalise finalement un habillage cartographique discrétisant les valeurs du Tau de Kendall (par des gammes de couleur allant du rouge (valeurs négatives) au vert (valeurs positives), et les valeurs de p-values significatives par des teintes allant du jaune (faiblement significatif $>0,1$) au rouge (hautement significatif $<0,001$).

A l'échelle des échantillons de types d'occupation du sol, l'ensemble des catégories d'occupation du sol (excepté les milieux artificialisés) est pris en compte dans l'analyse, l'objectif étant non seulement de caractériser la variabilité de la réponse de NDVI des formations végétales échantillonnées par la cartographie de couverture des sols Corine Land Cover ; mais également de procéder à une vérification sur le bien-fondé et la représentativité des échantillons de catégories d'occupation de sols. Pour cela, on calcule les valeurs moyennes de NDVI par type d'occupation du sol, pour s'assurer de la cohérence entre les valeurs de NDVI et la réponse spectrale théorique des formations végétales et par contraste, à la réponse spectrale théorique des occupations de sols non végétales préalablement échantillonnées (glaciers et neiges éternelles, zone d'eau libre, roches nues). A l'échelle de l'ensemble des habitats précédemment inventoriés, et de 2000 à 2017, on dénombre dans un premier temps la quantité de valeurs de NDVI MODIS 13Q1 qui présentent un NDVI supérieur à un indice de 0,2. Ceci nous permet de décrire la longueur de la période végétative, ici exprimée en nombre de quinzaines de mois, à l'échelle de l'ensemble des habitats écologiques des troupeaux de rennes préalablement échantillonnés.

Dans un deuxième temps, on limite l'analyse aux échantillons de types d'occupation des sols Corine Land Cover correspondant aux habitats du renne : végétation clairsemée, pelouses et prairies naturelles, landes et bruyères, zones de végétation arbustive et arborée en mutation, forêts de feuillus, de conifères et mixtes. On reporte la date de la quinzaine de mois où les valeurs de NDVI sont les plus élevées, indicatrices du pic phénologique de l'ensemble des habitats. Ces deux procédés (nombre de quinzaines de jours avec NDVI $>0,2$ et quinzaine de mois avec NDVI maximum) sont répétés pour chaque habitat considéré dans l'étude, et résumés au sein d'un tableau décrivant annuellement les deux paramètres, de 2000 à 2017. On calcule pour chaque habitat et pour chaque quinzaine clef du cycle phénologique le test de tendance de Mann-Kendall. Dans une visée comparative, les valeurs de l'indice NAO et de températures moyennes saisonniers (Dàlvve, hiver : décembre à mars inclus ; Gidà, printemps : avril à mai inclus ; Giesse ; été : juin à juillet inclus) sont également indiquées dans le tableau récapitulatif.

Une fois la variabilité interannuelle du NDVI caractérisée, il est intéressant d'étudier la présence d'éventuelles tendances temporelles des variables climatiques et atmosphériques, pour les saisons sélectionnées et les saisons les précédant. On vérifie l'hypothèse d'une tendance d'élévation généralisée des indices de NAO, de températures saisonnières et de valeurs de NDVI, toutes formations végétales/habitats écologiques de *Rangifer tarandus* confondues. On cherche ainsi à savoir si ces valeurs augmentent avec le temps, dans un pas de temps relativement court, contraint par la disponibilité en imagerie satellite fiable et temporellement cohérente, ici MODIS 13Q1. Un modèle linéaire simple croisant le temps (facteur explicatif de la tendance) avec les valeurs de NDVI par habitat, ou les indices NAO et les températures moyennes saisonnières (facteurs expliqués) pourrait être facilement mis en œuvre, mais sa fiabilité serait discutable compte-tenu du faible nombre d'individus statistiques (18, couvrant la période de 2000 à 2017). Avec un échantillon aussi restreint et dont l'évolution temporelle ne paraît pas saisonnière ou cyclique (voir tests de rupture de Pettitt, chapitre III), les tests de tendance de Mann-Kendall sont préférables, nous permettant de nous assurer de l'existence ou non d'une tendance temporelle, et son signe (tendance à l'augmentation, ou à la diminution).

On attribue alors le niveau de significativité du test de tendance de Mann-Kendall pour chacune des séries de NDVI, pour deux sous-jeux de données : les valeurs de NDVI par habitat pour la deuxième quinzaine de mai (vêlage des femelles, sortie de dormance des végétaux) et pour la deuxième quinzaine de juillet (période de repos et d'accumulation des graisses, pic phénologique des paysages végétaux constituant le comté de Nord-Botnie). Par la suite, on trace les relations linéaires temps-NDVI pour les habitats écologiques dont les tests de tendance de Mann-Kendall présentent une significativité statistique élevée (p-value inférieure à 0,05). Ces tendances linéaires simples sont modélisées, et on note pour chacune le pourcentage de variance exprimée par le facteur explicatif temporel sur l'évolution positive ou négative des valeurs de NDVI de la dernière quinzaine de mai, et la dernière quinzaine de juillet des habitats. Enfin, on calcule le différentiel entre le début (2000) et la fin (2017) du modèle linéaire simple calculé pour chaque habitat écologique dont les tests de Mann-Kendall et l'interprétation de l'intervalle de confiance ont confirmé un effet du temps sur la variabilité interannuelle du NDVI. De tels calculs de tendances et de rupture ont déjà été réalisés dans d'autres chapitres (III, IV et VII) pour des pas de temps plus longs, les mêmes opérations sont réalisées pour les valeurs saisonnières de l'indice NAO et de températures moyennes, dans une visée comparative.

2) Matrices de corrélations de Spearman entre variables bioclimatiques, climatiques et atmosphériques

Après avoir caractérisé la variabilité interannuelle bioclimatique et ses éventuelles tendances temporelles à l'augmentation ou à la diminution, on procède à la mise en lien statistique des variables bioclimatiques, climatiques et atmosphériques entre elles. L'enjeu est ici de comprendre les liens statistiques pouvant exister entre la variabilité atmosphérique, climatique, et biologique (NDVI et démographie des cheptels de rennes semi-domestiques) au cours des deux saisons-clef du cycle biologique. Les matrices de corrélations concernent les valeurs de NDVI annuelle de la dernière quinzaine de mai pour chaque habitat écologique des troupeaux de rennes, en y ajoutant également l'habitat de tourbières. Toujours à l'échelle de la période 2000-2017, nous avons également ajouté les séries temporelles de NAO et de températures saisonnières (Dàlvve, hiver : décembre à mars inclus ; Giddà, printemps : avril à mai inclus ; Giesse ; été : juin à juillet inclus). Pour les liens entre l'hypothèse liant la variabilité bioclimatique explicative (NAO et températures saisonnières, valeurs de NDVI des habitats écologiques de la dernière quinzaine de mai et la dernière quinzaine de juin) et la réponse biologique des rennes semi-domestiques éventuellement reliée, à travers les décomptes démographiques annuels des quatre catégories de rennes du comté Nord-Botnie (mâles, femelles, faons, total), une deuxième matrice de corrélations par rangs de Spearman est calculée. Celle-ci présente la particularité d'avoir un individu statistique (une année) en moins, du fait du décalage pris en compte entre la variabilité bioclimatique des saisons qui précèdent le comptage annuel de rennes. Cette matrice de corrélation prend ainsi un jeu de donnée légèrement tronqué, où l'année démographique 2001 est reliée aux conditions atmosphériques, climatiques et phénologiques des saisons saamies (Dàlvve, Giddà, Giesse) de l'année 2000. Par conséquent, étant donné la non-disponibilité du NDVI MODIS 13Q1 en 1999, l'année démographique 2000 n'a pu être prise en compte. Les séries temporelles bioclimatiques rentrant dans l'analyse s'échelonnent ainsi de 2001 à 2017.

Etant donné que les séries temporelles ne sont ni saisonnières, ni cycliques, et ne présentent donc pas a priori de distribution normale, on calcule une matrice de corrélation par rangs de Spearman. Par l'attribution de coefficients à l'échelle de chaque série temporelle, on s'assure ainsi du lien statistique entre deux variables, qu'il soit linéaire, polynomial ou autre. Un tableau récapitulatif est ensuite dressé, et liste l'ensemble des coefficients de corrélations par rangs de Spearman qui présentent une p-value inférieure à 0,05 et dont la corrélation est robuste ($r > 0,4$).

3) Analyse par régression linéaire multiple

La méthode par régression linéaire multiple permet de prendre en compte plusieurs variables quantitatives, potentiellement explicatives sur une variable quantitative à expliquer, à condition que cette dernière ait une distribution normale. A partir du nombre de variables prises en compte, un modèle linéaire est alors calculé et ses performances explicatives sont testées. On obtient ainsi la contribution totale du modèle linéaire résultant qui décrit la variabilité statistique du caractère expliqué, tout comme la part de contribution de chaque variable explicative entrée dans le calcul. Les variables explicatives dont l'information statistique serait redondante, ou inutile dans la contribution du modèle sont également indiquées. Cette méthode d'analyse multivariée a été utilisée pour cette étude dans le cadre de l'hypothèse de l'explication de la variabilité démographique annuelle de rennes semi-domestiques du comté Nord-Botnie par les facteurs bioclimatiques des saisons précédant les moments de comptage des cheptels. Sous Xlstat, on précise ainsi dans un premier temps la variable explicative que l'on souhaite tester. Il s'agit ici, par an, du nombre total de rennes semi-domestiques, du nombre de mâles, de femelles et de faons, dont la distribution est normale. Pour les variables explicatives, nous avons spécifié les années, les valeurs de NDVI de la dernière quinzaine de mai de l'année précédant les comptages pour les habitats écologiques (zones de végétation clairsemée, pâturages et prairies naturelles, landes et bruyères, tourbières, forêts de feuillus, forêts mixtes, forêts de conifères), ainsi que les valeurs de l'indice NAO et de températures moyennes des saisons précédant le comptage démographique (saisons Dàlvve, hiver ; Giddà, printemps ; Giesse, été). Dans l'analyse statistique Xlstat, on demande un maximum de cinq variables explicatives à prendre en compte dans la régression linéaire des décomptes démographiques. On ne spécifie pas de modèle linéaire a priori, et on laisse le logiciel calculer et choisir le nombre et le type de variables explicatives dont le modèle sortant est le plus performant. On demande également au logiciel de valider le modèle théorique choisi sur les observations réelles de la démographie des cheptels, afin de s'assurer des performances explicatives des variables incorporées dans celui-ci.

D - *Résultats*

Les résultats de ces analyses sont présentés par étape. Dans un premier temps, on présentera la cartographie des résultats du test de Mann-Kendall avec saisonnalité sur l'ensemble du territoire de la communauté Gabna. Puis avant de présenter les résultats par

type de couverture de sol, on vérifiera la cohérence des échantillons de couverture de sols utilisés pour l'extraction des valeurs bimensuelles de NDVI MODIS 13Q1. Au moyen de la variabilité interannuelle du NDVI moyen de chaque échantillon, nous pourrions aisément saisir les années particulièrement marquée par un NDVI moyen fort, et celles marquées par un NDVI moyen faible. Deuxièmement, nous comparerons ces variations du NDVI et de paramètres décrivant la période de végétation et son intensité maximale annuelle avec les variables atmosphériques (NAO) et climatiques (températures) calculés pour les saisons qui précèdent ou sont contemporaines de la dynamique de croissance des différentes formations végétales échantillonnées. Par la suite, nous nous attacherons à examiner les résultats de calculs de tendances temporelles, validées ou non par la méthode de Mann-Kendall et de discuter des modèles linéaires tracés pour les variables bioclimatiques (NDVI par habitat, NAO et températures) dont la tendance temporelle est avérée. Nous analyserons également les résultats issus des calculs de matrice de corrélation de Spearman entre les différentes variables bioclimatiques (NDVI, NAO, températures et démographie des cheptels). Enfin, nous aborderons les premiers résultats de modélisation linéaire, donnant un aperçu particulièrement intéressant des différentes variables explicatives utilisées pour modéliser la réponse démographique des cheptels de rennes semi-domestiques à la variabilité bioclimatique (NDVI par habitat, indice NAO, températures).

1) Cartographie des tendances évolutives interannuelles du NDVI à l'échelle du territoire de la communauté Gabna

La cartographie des tendances évolutives du NDVI à l'échelle du territoire de la communauté Gabna se lit à travers deux cartes : l'une exprime les valeurs du Tau du test de Mann-Kendall, négatives lorsque le NDVI tend à diminuer au cours de la période d'étude, positives dans le cas contraire (figure V.2). La figure V.3 indique la significativité de la tendance exprimée par le test (p -values $< 0,1$). Dans chacune de ces cartes, les contours de la communauté Gabna sont indiqués par un trait blanc. La comparaison visuelle avec la carte de l'occupation du sol et des contours des pâturages saisonniers (figure V.4) permet de vérifier quels habitats et périodes du calendrier pastoral sont affectés par ces tendances.

L'indice Tau de Mann-Kendall indique une tendance à la diminution interannuelle des valeurs du NDVI au cours de la période dans la chaîne fennoscandienne située au nord-ouest du territoire communautaire Gabna, plus modérée dans le plateau situé au nord-est (hors des contours de la communauté), et par places dans la zone située au sud-est, occupée par la forêt

boréale (figure V.4). La forme allongée des zones où la tendance est négative dans la chaîne fennoscandienne suggère que le NDVI aurait diminué dans le fond des hautes vallées occupées par des formations herbacées et de landes pâturées en été. Les formes en tâches dans le sud-est du territoire correspondent à des zones urbaines et minières (Kiruna, Svapavaara). La figure V.3 indique que ces tendances sont hautement significatives. Dans les noyaux urbains, la densification du bâti et la régression des espaces verts urbains pourraient expliquer cette tendance. Nous reviendrons dans la discussion sur l'interprétation à donner à la tendance à la diminution du NDVI au cours de la période dans les hautes vallées couvertes de pelouses et des landes.

Au contraire, la tendance est à l'augmentation du NDVI dans le reste du territoire de la communauté Gabna. Mais cette tendance n'est nette et significative que lorsque l'on se trouve entre la ville de Svapavaara et celle de Vettasjärvi, dans un secteur dominé par les forêts de résineux, mixte et les forêts et végétation arbustive en mutation (coupes forestières et plantations en croissance), situé au centre des pâturages d'hiver de la communauté Gabna. La tendance est moins nette et significative dans les parties nord-ouest et sud-est des pâturages hivernaux, où les forêts exploitées (coupes et de plantations en croissance, catégorie CLC Forêts et végétation arbustive en mutation) sont très faiblement représentées. À l'extrême sud-est du territoire de la communauté, abondent les tourbières, alors qu'au nord-ouest des pâturages hivernaux, entre Kiruna et Svapavaara, se mêlent forêts de feuillus, mixtes et de résineux.

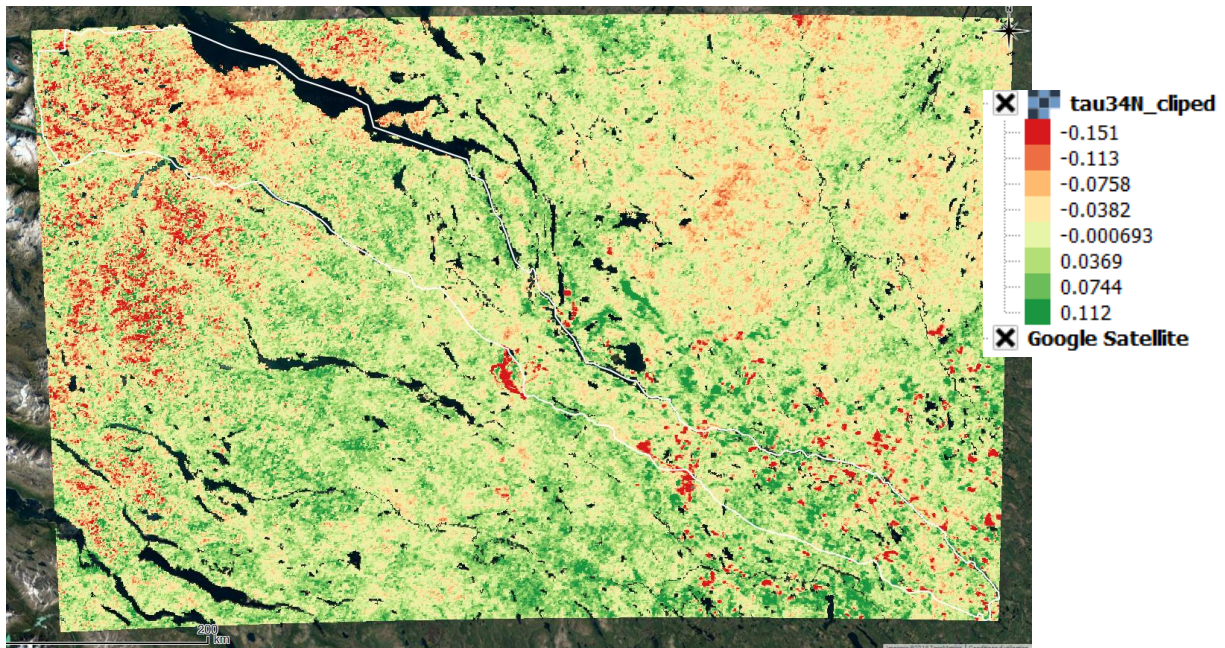


Figure V-2 : Valeur du test de tendance désaisonnalisé de Mann-Kendall (2000-2017) pour le NDVI des pixels MODIS 13Q1 de la région d'étude. Les contours blancs distinguent les frontières de la communauté d'éleveurs Gabna, réalisation R. Courault (2018)

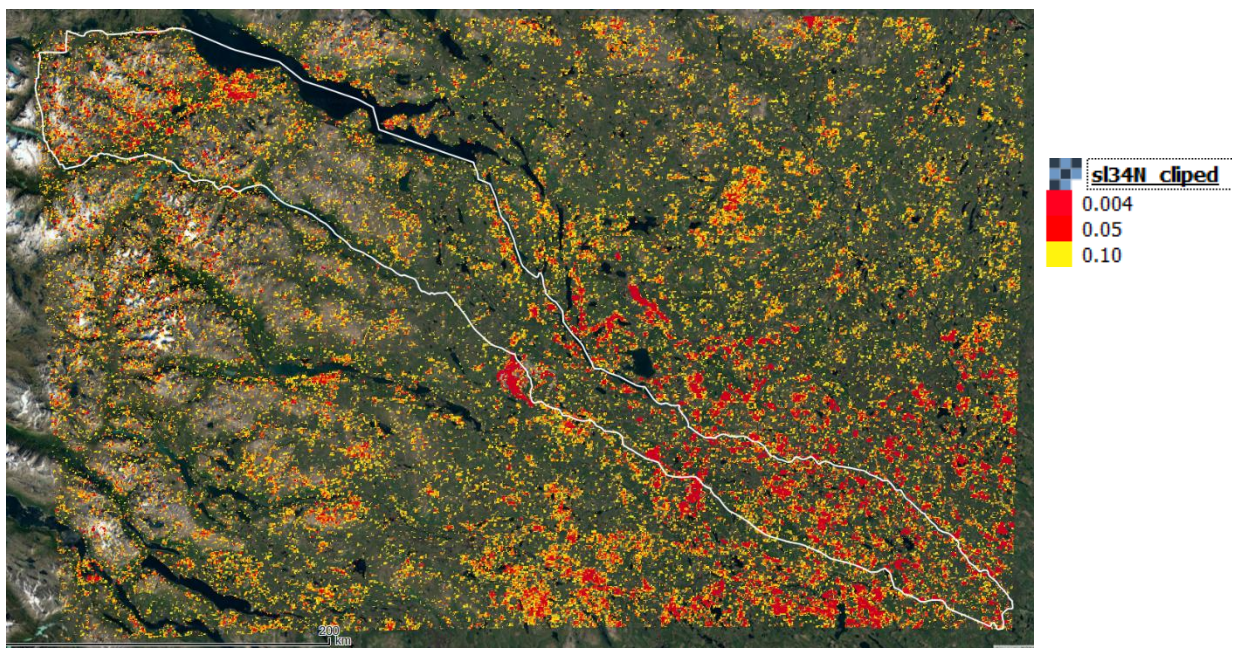


Figure V-3 : P-values associées aux tests de tendance de Mann-Kendall désaisonnalisé. En jaune sont représentés les pixels dont les p-values associées sont comprises entre 0,1 et 0,05. En rouge, les pixels pour lesquels la p-value est inférieure à 0,05 (significativité forte du test de tendance), Réalisation R. Courault (2018)

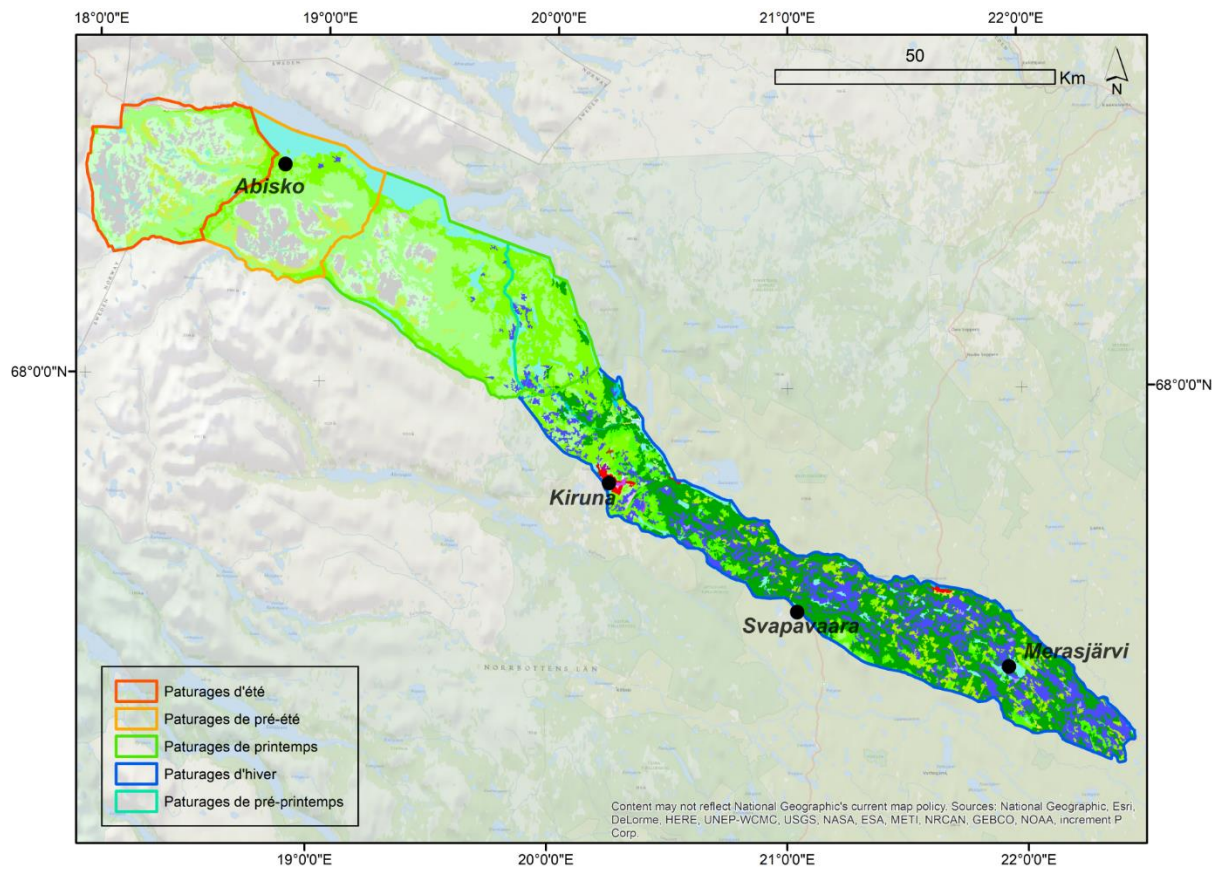


Figure V-4 : Carte des occupations de sols de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna et des pâturages saisonniers (source : AEE, CLC12 ; RenGIS 2.0, réalisation : R.Courault, 2018)

2) Une variabilité interannuelle bioclimatique marquée des habitats écologiques de *Rangifer tarandus*, et cohérence des échantillons utilisés pour l'extraction des séries temporelles de NDVI MODIS 13Q1

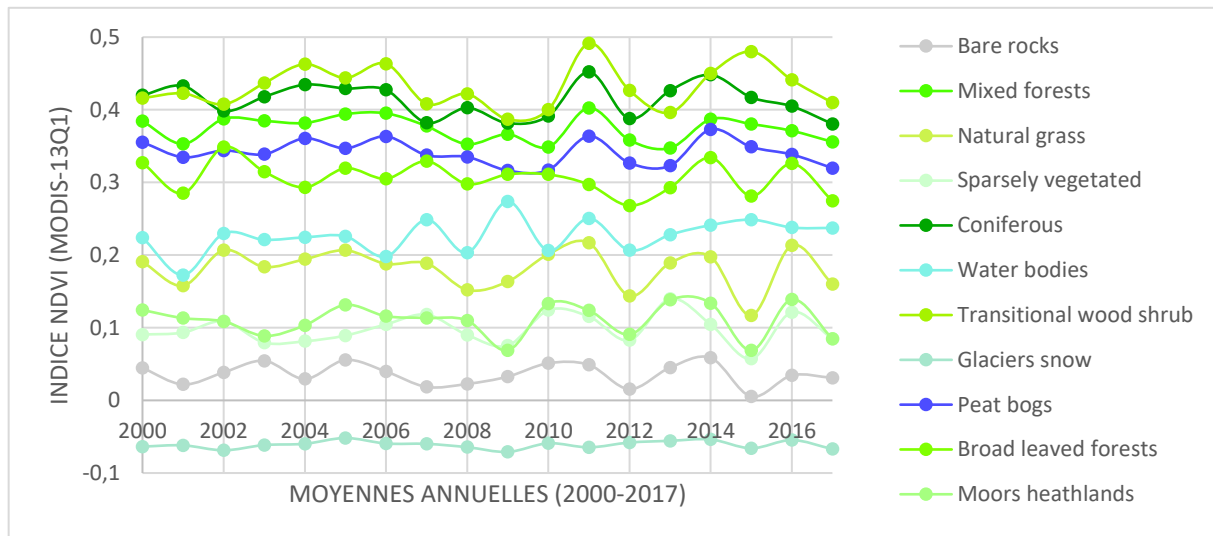


Figure V-5 : Représentation graphique du NDVI moyen annuel des échantillons d'habitats/couvertures de sols non végétalisés utilisés pour l'extraction du NDVI MODIS 13Q1, entre 2000 et 2017 (Sources : USGS, Corine Land Cover, réalisation : R. Courault, 2018)

La figure V.5 présente les valeurs annuelles moyennes de NDVI, par couverture de sol au cours de la période 2000-2017. La moyenne de NDVI par couverture de sol a été calculée pour toutes les quinze semaines de la période d'étude. Elle permet de vérifier de la cohérence de notre procédure d'échantillonnage et de la conformité des gammes de valeurs selon le type d'occupation du sol. Le NDVI moyen, par habitat et par couverture de sols non végétalisés, s'échelonne grossièrement de -0,1 à +0,5. Les habitats et couvertures de sols non végétalisés sont représentés dans le graphique dans des couleurs analogues à celles de la sémiologie graphique de Corine Land Cover.

La variabilité inter-habitats est particulièrement forte : les échantillons de formations végétales ligneuses hautes et denses (forêts) présentent les indices moyens de NDVI les plus élevés. Les zones à végétation arbustive et arborée de transition (correspondant à des coupes forestières ou à des plantations en croissance, Chapitre II) et les conifères présentent les valeurs de NDVI les plus hautes, généralement supérieures à +0,4 au long de la période d'étude. Les échantillons de forêts mixtes, de feuillus et de tourbières se caractérisent par un NDVI compris entre +0,25 et +0,4. Ensuite, les échantillons de zones lacustres et de prairies et pâturages naturels se caractérisent par un NDVI variant grossièrement de +0,1 à +0,25. Les échantillons de landes et bruyères, et de zones faiblement végétalisées s'échelonnent de +0,05

à +0,15. L'échantillon de roche nue s'individualise avec un NDVI moyen compris entre 0 et +0,05, tout comme celui de glacier et de neiges éternelles, dont le NDVI moyen reste négatif et stable tout au long de la période d'études.

Le gradient bioclimatique semble ainsi relativement bien décrit par les échantillons des différentes classes de couvertures de sols, en particulier au regard des valeurs différentes entre zones de contrôle (zones sans végétation telles que les glaciers, les zones de roches nues) et zones décrivant des formations végétales ligneuses hautes (forêts de conifères, mixtes et zones de transition). L'échantillon de zone en eau libre semble biaisé par sa situation géographique, au bord d'une forêt de feuillus. Dans le détail, certains échantillons ne semblent pas être particulièrement représentatifs d'après leur NDVI interannuel moyen, c'est particulièrement le cas de l'échantillon de Landes et de bruyères, que les valeurs de NDVI et la situation géographique locale décrivent comme en limite de pousse des Ericacées, proche de la bande altitudinale subalpine des prairies et pâturages naturels et des zones faiblement végétalisées. Ces trois catégories présentent de plus la même cinétique en termes de variabilité interannuelle du NDVI moyen, et ces résultats tendent à décrire la mosaïque paysagère particulièrement complexe observée en altitude, et étroitement dépendante de la topoclimatologie (orientation des versants) entre les landes à Ericacées, les prairies alpines et les zones principalement dominées par les mousses et les lichens.

Si l'on observe la variabilité interannuelle des valeurs du NDVI dans les habitats végétalisés, on observe une cohérence de leurs réponses en 2011 où les valeurs sont plus élevées pour l'ensemble des habitats. Les autres années, les réponses sont variables, et en particulier pour les habitats d'altitude, dont les valeurs de NDVI sont influencées par la présence ou la fonte de neige. On remarque d'ailleurs une relative cohérence entre la variabilité interannuelle du NDVI des surfaces de neige et de glaciers et celle des zones faiblement végétalisées, des pelouses et des landes d'altitude, ce qui tendrait à confirmer l'importance de la présence de la neige perturbant le signal du NDVI dans ces habitats d'altitude.

Tableau V-3 : Tableau récapitulatif de différents paramètres annuels issus des séries temporelles de NDVI et des variables atmosphériques et climatiques: Dégradé de vert : représentation des données de date moyenne de pic NDVI par colonne du plus tardif (blanc) au plus précoce (vert). Cellules rouge et bleu : observations (années) atmosphériques ou climatiques supérieures à la moyenne 2000-2017 (rouge), inférieures à la moyenne de la période d'étude (bleu).

Sources : Corine Land Cover 2006, MODIS 13Q1, NOAA, Abisko Meteorological Station, Swedish saami parlement ; Réalisation R.Courault (2018).

Année	Tous habitats: Nombre de quinzaies avec données NDVI >0,2	Tous habitats : Date moyenne du pic NDVI	Habitat Végétation clairsemée		Habitat Pelouses et pâturages naturels		Habitat Landes et bruyères		Habitat Végétation arbustive et broussailleuse en mutation		Habitat Forêts de feuillus		Habitat Forêts mixtes		Habitat Forêts de conifères		NAO Dalvve (décembre à mars)	NAO Gidà (avril-mai)	NAO Giesse (juin-juillet)	T°C Dalvve (décembre à mars)	T°C Gidà (avril-mai)	T°C Giesse (juin-juillet)
			Nombre quinzaie NDVI >0,2	Date Quinzaine NDVI	Nombre quinzaie NDVI >0,2	Date Quinzaine max NDVI	Nombre quinzaie NDVI >0,2	Date Quinzaine max NDVI	Nombre quinzaie NDVI >0,2	Date Quinzaine max NDVI	Nombre quinzaie NDVI >0,2	Date Quinzaine max NDVI	Nombre quinzaie NDVI >0,2	Date Quinzaine max NDVI	Nombre quinzaie NDVI >0,2	Date Quinzaine max NDVI						
2000	10	27-juil.	5	29-sept.	7	27-juil.	7	27-juil.	11	27-juil.	10	11-juil.	10	27-juil.	11	27-juil.	0,8675	0,67	-0,36	-10,3	1,3	11,1
2001	8	13-août	4	12-juil.	6	13-août	6	12-juil.	12	26-juin	9	28-juil.	11	28-juil.	12	27-juil.	-0,6275	-0,06	-0,055	-7,2	1,1	10,2
2002	10	28-juil.	6	28-juil.	7	12-juil.	6	13-août	11	28-juil.	10	12-juil.	11	12-juil.	10	28-juil.	0,065	0,495	0,67	-9,8	0,5	11,2
2003	9	28-juil.	4	13-août	6	28-juil.	4	28-juil.	12	28-juil.	10	28-juil.	10	28-juil.	11	28-juil.	-0,2725	-0,14	0,2	-8,4	3,8	12,9
2004	10	27-juil.	3	28-août	7	27-juil.	6	12-août	12	27-juil.	10	12-août	12	27-juil.	12	11-juil.	-0,07	0,67	0,285	-8,9	2,2	12,4
2005	11	29-août	6	28-juil.	8	28-juil.	5	28-juil.	12	12-juil.	9	12-juil.	11	12-juil.	11	12-juil.	-0,135	-0,79	-0,11	-8,3	2,9	11,1
2006	9	12-juil.	5	28-juil.	7	12-juil.	6	28-juil.	12	12-juil.	10	12-juil.	11	28-juil.	11	13-août	-0,575	0,095	1,04	-7,4	1,9	11,9
2007	10	28-juil.	6	13-août	8	28-juil.	5	28-juil.	11	13-août	9	13-août	11	28-juil.	11	26-juin	0,2575	0,35	-0,78	-9,0	2,7	10,3
2008	9	27-juil.	5	27-juil.	6	27-juil.	6	27-juil.	12	27-juil.	10	27-juil.	9	27-juil.	10	11-juil.	0,205	-1,43	-1,165	-7,9	1,9	11,4
2009	10	28-juil.	5	13-août	6	12-juil.	4	13-août	12	12-juil.	9	28-juil.	10	28-juil.	10	28-juil.	-0,265	0,625	-1,51	-6,5	0,7	10,7
2010	9	12-juil.	6	13-août	8	12-juil.	6	28-août	10	12-juil.	9	28-juil.	10	12-juil.	10	12-juil.	-1,925	-1,13	-0,455	-8,9	2,6	10,4
2011	9	28-juil.	5	13-août	8	28-juil.	6	28-juil.	13	28-juil.	8	28-juil.	12	28-juil.	13	12-juil.	-0,685	1,27	-1,23	-11,3	1,9	9,4
2012	9	28-août	5	12-août	6	12-août	4	12-août	11	27-juil.	9	12-août	9	27-juil.	10	11-juil.	1,0175	-0,21	-1,77	-11,0	2,9	12,3
2013	10	27-juil.	5	28-juil.	7	12-juil.	7	28-juil.	11	26-juin	10	28-juil.	10	12-juil.	10	12-juil.	-0,7725	0,59	0,765	-8,1	-0,1	9,3
2014	9	28-juil.	5	13-août	6	12-juil.	5	28-juil.	11	28-juil.	9	12-juil.	11	28-juil.	11	28-juil.	0,5325	-0,305	-0,23	-10,1	2,9	11,9
2015	8	13-août	4	29-août	5	13-août	4	13-août	11	28-juil.	8	13-août	9	28-juil.	10	28-juil.	1,3425	0,415	-1,45	-8,0	1,3	12,7
2016	10	12-août	6	28-juil.	8	27-juil.	7	12-août	11	11-juil.	10	27-juil.	10	12-août	12	11-juil.	0,835	-0,205	-0,925	-7,5	1,8	9,2
2017	8	13-août	5	30-sept.	6	29-août	6	14-sept.	10	27-juil.	8	12-juil.	9	13-août	10	12-juil.	0,365	0,01	0,815	-7,8	3,1	10,8

Le tableau V.3 présente les caractères interannuels de variation du NDVI, tous habitats confondus (après suppression des couvertures de sols non végétalisées), ainsi que les variables atmosphériques et climatiques (NAO et températures moyennes) saisonnières. Pour les valeurs de NDVI, deux paramètres principaux sont quantifiés. Le premier paramètre est le nombre de quinzaines avec un NDVI supérieur à 0,2 ; nous permettant d'approximer la longueur de la saison végétative par an. Le deuxième paramètre est représenté par la date moyenne (quinzaine de jours) pour laquelle le NDVI maximum annuel est enregistré, s'apparentant au pic phénologique annuel.

A l'échelle de tous les habitats, le nombre de quinzaines de jours avec un NDVI supérieur à +0,2 varie de 8 (2015, 2017) à 11 (2005). La période phénologique s'étale donc en moyenne entre 4 et 5,5 mois. Pour la date moyenne de pic de NDVI, celle-ci s'étale de la première quinzaine de juillet (12 juillet 2010) à la dernière semaine d'août (29 août 2005). Le maximum de NDVI se caractérise ainsi dans le temps par son irrégularité entre début juillet et fin août. Cette irrégularité dans le maximum de NDVI se retrouve pour certains habitats écologiques en particulier pour les habitats d'altitude (habitats de végétation clairsemée, de prairies et pâturages naturels, landes et bruyères), dont le NDVI peut être minoré par la présence de neige fondante en début d'été, et dans une moindre mesure pour les formations végétales ligneuses hautes (de la première quinzaine de juillet à la première quinzaine d'août). La distinction entre formations végétales ligneuses basses (landes et bruyères) voire herbacées et formations végétales ligneuses hautes est perceptible par la longueur de la saison végétative : longueur particulièrement courte pour les premières (de 3 quinzaines, soit 1 mois et demi à 6 quinzaines, soit 4 mois pour les habitats de Végétation clairsemée) ; plus longue et plus stable en comparaison interannuelle pour les formations végétales ligneuses hautes (de 8 à 10 quinzaines pour les Forêts de feuillus, de 10 à 13 pour les Conifères), ce qui est un résultat attendu et validant notre échantillonnage. De façon générale, la longueur de la saison végétative ne semble pas liée à une précocité ou une tardivité particulière dans le pic de NDVI de la dernière quinzaine de juillet.

Il en est de même pour l'examen comparatif entre les indices saisonniers de NAO, les températures et les deux paramètres calculés autour du NDVI. Celui-ci dessine à grands traits les liens pouvant être opérés entre variabilité climatique et variabilité dans la réponse NDVI de la végétation. Les relations ne semblent toutefois pas très nettes. Cet indice rend en effet compte de l'ensemble des conditions climatiques, températures et pluies, à une échelle

géographique plus vaste que les données de la station synoptique d'Abisko. Les calculs de corrélation nous aideront peut-être à y voir plus clair.

3) Tests de tendance de Mann-Kendall et modèles linéaires

Tableau V-4 : Tableau récapitulatif de la significativité des tests de tendance de Mann-Kendall, niveaux de confiance, et valeurs exprimées par la régression linéaire simple entre la période d'étude et l'évolution des valeurs de NDVI par échantillon d'habitat végétalisé pour la dernière quinzaine de mai (démarrage phénologique) et la dernière quinzaine de juillet (pic phénologique). Source : MODIS 13Q1, Corine Land Cover, Réalisation : R. Courault (2018)

NDVI par habitats	NDVI dernière quinzaine de mai				NDVI dernière quinzaine de juillet			
	p-value test Mann-Kendall	Niveau de confiance tendance	Magnitude de la tendance linéaire (indice de NDVI)	Variance exprimée par modèle linéaire temps/NDVI	p-value test Mann-Kendall	Niveau de confiance tendance	Magnitude de la tendance linéaire (indice de NDVI)	Variance exprimée par modèle linéaire temps/NDVI
Végétation clairsemée	0,343	Bas	0	-	0,733	Nul	0	-
Pelouses et pâturages naturels	0,677	Nul	0	-	0,211	Modéré	-0,07	0,12
Landes et bruyères	0,541	Nul	0	-	0,57	Nul	0	-
Végétation arbustive/broussailleuse en transition	0,075	Modéré	+ 0,04	0,07	0,017	Elevé	+ 0,08	0,12
Tourbières	0,97	Nul	0	-	0,924	Nul	0	-
Forêts de feuillus	0,029	Elevé	-0,2	0,16	0,161	Modéré	-0,06	0,09
Forêts mixtes	0,426	Bas	0	-	0,211	Modéré	+ 0,08	0,16
Forêts de conifères	0,52	Nul	0	-	1	Nul	0	-

Le test de tendance de Mann-Kendall a été calculé sans prise en compte de la saisonnalité. Pour le NDVI de la dernière quinzaine de mai, la majorité des tendances temporelles ne sont pas significatives, à l'exception de l'habitat de forêt de feuillus (tableau V.4), qui présente une tendance temporelle significativement négative, avec 16% de sa variabilité statistique expliquée par l'évolution temporelle 2000 à 2017, et une baisse modélisée particulièrement forte de -0,2 entre le début et la fin de la période. L'échantillon de végétation arbustive ou broussailleuse en transition a une évolution temporelle peu significative et positive, avec une évolution modélisée entre 2000 et 2017 de +0,04 d'indice NDVI.

En ce qui concerne l'évolution temporelle des valeurs de NDVI par échantillon d'habitat pour le pic de NDVI (dernière quinzaine de juillet), on observe dans la moitié des cas des tendances significatives modérées ou élevées. Comme précédemment, les signes des tendances temporelles modérément ou hautement significatives sont antagonistes. Ceci pourrait s'expliquer car la quinzaine choisie ne correspond pas toujours bien au pic phénologique (tableau V.3). Deux tendances temporelles sont négatives (NDVI de l'échantillon de pelouses et pâturages naturels ; NDVI de l'échantillon de forêts de feuillus), avec une magnitude (différence entre la fin et le début du modèle linéaire temporel) relativement faible (respectivement -0,07 et -0,06). Pour les évolutions temporelles positives significatives (modérées et élevées) de valeur de NDVI, les échantillons de végétation arbustive ou broussailleuse en mutation et de forêts mixtes présentent également une magnitude assez peu marquée, de l'ordre de +0,08 pour ces deux habitats.

Tableau V-5 : Tableau récapitulatif de la significativité des tests de tendance de Mann-Kendall, l'interprétation des intervalles de confiance, et valeurs exprimées par la régression linéaire simple entre la période d'étude et les variables atmosphériques et climatiques saisonnières (Source : NOAA, Abisko Meteorological Station, Swedish Saami Parliament, Réalisation : R. Courault (2018))

Variable atmosphérique/climatique	p-value test Mann-Kendall	Niveau de confiance tendance	Magnitude de la tendance linéaire (NAO-°C)	Variance exprimée par modèle linéaire temps/NAO-T°C
NAO Dàlvve	0,384	Bas	0	-
NAO Giddà	0,027	Elevé	-0,18	0,005
NAO Giesse	0,07	Modéré	-0,76	0,07
T°C Dàlvve	0,472	Bas	0	-
T°C Giddà	0,57	Nul	0	-
T°C Giesse	0,384	Bas	0	-

En ce qui concerne l'évolution temporelle des indices NAO et des températures saisonnières sur le pas de temps étudié (2000-2017), deux tendances sont significatives (niveau de confiance élevé pour la NAO de Giddà, printanière, modéré pour la NAO de Giesse, estivale, tableau V.5). Les deux indices saisonniers de NAO tendent à baisser avec le temps, -0,18 de valeur d'indice de NAO pour la saison pastorale printanière, -0,76 pour la saison pastorale estivale (temps plus sec et chaud que la normale). Les variances exprimées par le modèle linéaire entre les années et les valeurs de NAO et les températures moyennes sont particulièrement faibles.

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

4) Liens entre variabilité du NDVI et variabilité de l'indice NAO et des températures régionales

Avant d'examiner les liens statistiques entre valeurs du NDVI, indices climatiques et températures, il convient au préalable de mieux comprendre les conditions thermiques associées aux anomalies des indices atmosphériques, en étudiant les liens statistiques entre ces deux séries de données. Il existe une corrélation significative et négative entre la NAO de printemps (Gidà, avril à mai) et les températures moyennes de cette saison. Les valeurs élevées de l'indice NAO moyenné en avril-mai s'associent à des températures relativement basses. Aucune corrélation significative n'est trouvée entre l'indice NAO d'hiver (Dàlvve) et les températures moyennes caractérisant cette saison (tableau V.6). Il en est de même pour la saison estivale, où aucun lien statistique suffisamment significatif et robuste n'a été détecté.

Tableau V-6 : Matrice de corrélation par rangs de Spearman entre les variables atmosphériques (indice NAO) et les variables climatiques (températures) en fonction des saisons pastorales saamies étudiées (Réalisation : R. Courault, 2018)

Variables atmosphériques/climatiques	Tmoy Dàlvve (Dec-Mar)	Tmoy Gidà (Avr-Mai)	Tmoy Giesse (Jun-Jul)
NAO Dàlvve (Dec-Mar)	-	-	-
NAO Gidà (Avr-Mai)	-	-0,525	-
NAO Giesse (Jun-Jul)	-	-	-

NDVI habitats écologiques rennes	Corrélations significatives (p<0,05) pour le NDVI de la dernière quinzaine de mai				Corrélations significatives (p<0,05) pour le NDVI de la dernière quinzaine de juillet					
	NAO Dàlvve (Dec-Mar)	NAO Gidà (Avr-Mai)	Tmoy Dàlvve (Dec-Mar)	Tmoy Gidà (Avr-Mai)	NAO Dàlvve (Dec-Mar)	NAO Gidà (Avr-Mai)	NAO Giesse (Jun-Jul)	Tmoy Dàlvve (Dec-Mar)	Tmoy Gidà (Avr-Mai)	Tmoy Giesse (Jun-Jul)
Végétation clairsemée	-0,624	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pelouses et pâturages naturels	-0,626	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Landes et bruyères	-0,519	-	+ 0,48	-	-	-	-	-0,486	-	-
Végétation arbustive/broussailleuse en transition	-	-	-	-	+ 0,585	-	-	-	-	-
Tourbières	-	-	-	-	-	-	-0,476	-	-	-
Forêts de feuillus	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Forêts mixtes	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Forêts de conifères	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau V-7 : Extrait de la matrice de corrélations par rangs de Spearman entre variables atmosphériques et NDVI échantillons d'habitats écologiques, lors du démarrage et du pic phénologiques. Les corrélations indiquées sont supérieures à $r=0,4$ et fortement significatives ($p < 0,05$). Réalisation R. Courault (2018)

Après avoir caractérisé la variabilité interannuelle du NDVI par échantillon, de la longueur de la période phénologique et de la quinzaine où est observé le pic phénologique (NDVI maximum), ainsi que la part contributive du temps dans les tendances bioclimatiques, nous nous intéressons ici aux liens statistiques pouvant exister entre les différentes variables testées (indices NDVI de la dernière quinzaine de mai et de juillet pour les échantillons d'habitat, NAO et températures saisonnières, démographie des cheptels de rennes semi-domestiques). Le tableau V.7 récapitule la matrice de corrélation calculée entre les variables de NDVI et les variables atmosphériques et climatiques.

Les corrélations par rangs de Spearman indiquées sont celles présentant une forte significativité et une valeur supérieure à 0,4. Malheureusement, aucune corrélation significative n'est observée entre les valeurs du NDVI et les paramètres climatiques au printemps, seule saison où les indices atmosphériques étaient corrélés avec les températures. Pour les valeurs de NDVI en début de croissance végétative (dernière quinzaine de mai), l'indice d'oscillation Nord-Atlantique d'hiver (Dàlvve, de décembre à mars) est négativement et significativement corrélé avec le NDVI des échantillons d'habitats d'altitude (Végétation clairsemée, de Pelouses et de pâturages naturels, ainsi que de Landes et bruyères). Un indice NAO élevé en hiver est généralement associé à un indice NDVI faible pour ces trois habitats. Le NDVI des Landes et bruyères est positivement et significativement corrélé avec les températures hivernales, signifiant que les températures hivernales élevées sont associées à des indices de NDVI élevés en début de saison végétative élevés. Lors du pic phénologique théorique (partie droite du tableau V.7), on observe une corrélation positive entre le NDVI des coupes et jeunes plantations forestières (forêts et végétation arbustive en mutation) avec l'indice NAO d'hiver, et des corrélations négatives entre le NDVI des Landes et bruyères et les températures hivernales et des Tourbières et le NAO de Giesse (juin-juillet). Dans le cas des Landes et bruyères, le signal est opposé à celui des valeurs de NDVI de fin mai : les températures élevées de la saison Dàlvve (décembre à mars) sont associées à des valeurs de NDVI faibles à la fin juillet.

En ce qui concerne la variabilité statistique de la démographie des cheptels de rennes semi-domestiques, une seule corrélation par rangs de Spearman est significative et robuste. Elle concerne le lien entre le nombre de femelles et les années ($r = +0,787$). Cela signifie que l'évolution temporelle des cheptels est fortement corrélée avec l'augmentation du nombre de rennes femelles, déjà observé dans le chapitre IV. Aucune autre corrélation significative et

robuste n'est trouvée, que cela soit pour le lien bivarié entre les catégories démographiques de rennes semi-domestiques (mâles, femelles, faons, total) et les valeurs de NDVI de fin mai, celles de fin juillet, ou même avec les indices de NAO et les températures moyennées selon les saisons pastorales des années précédant les comptages.

5) Liens entre variabilité biologique (démographie des rennes semi-domestiques, NDVI) et climatique (NAO, températures)

Tableau V-8 : Tableau récapitulatif de la variance statistique exprimée par les Modèles de régression linéaire multiples pour décrire, expliquer et prédire la variabilité démographique des quatre catégories de rennes semi-domestiques (mâles, femelles, faons, total cheptels), ainsi que des variables bioclimatiques contribuant statistiquement dans les modèles (réalisation R. Courault (2018)).

Variable démographique de rennes (+1 an)	Variabilité statistique exprimée par le modèle de régression linéaire multiple (%)	Variables explicatives	Variable non contributive	Variable la plus contributive
Faons	64	NDVI Forêts mixtes; NDVI Végétation clairesemée; NDVI Tourbières; NDVI Landes et bruyères	NAO Dàlvve (Dec-Mar)	NDVI Tourbières
Femelles	91	Années; NDVI Conifères; NDVI Tourbières; Tmoy Gidà (Avr-Mai)	NAO Giesse (Jun-Jul)	Tmoy Gidà (Avr-Mai)
Mâles	70	NDVI Forêts mixtes; NDVI Tourbières; NAO Dàlvve (Dec-Mar); Tmoy Gidà (Avr-Mai)	NDVI Landes et bruyères	NDVI Tourbières
Total	78	NDVI Conifères; Tourbières; Tmoy Gidà (Avr-Mai)	Années	NDVI Tourbières

Ce paragraphe tente de mettre statistiquement en lien les variables démographiques des rennes semi-domestiques (mâles, femelles, faons, total) et les variables bioclimatiques (valeurs de NAO pour les habitats échantillonnés de fin mai et de fin juillet, indices NAO et températures pour trois saisons pastorales précédant les comptages démographiques). La recherche de liens statistiques était opéré selon une méthodologie bivariée, basée sur le calcul de corrélations par rang de Spearman. Hormis l'évolution temporelle positive du nombre de femelles dans les cheptels, aucune corrélation suffisamment robuste et significative ne nous donnait d'indications sur la part explicative des variables bioclimatiques testées dans l'étude

dans la variabilité démographique des rennes semi-domestiques. Ce paragraphe a donc pour objectif principal de rechercher de liens statistiques entre la variabilité bioclimatique sur un pas de temps court et l'évolution démographique des cheptels de rennes semi-domestiques. Une approche multivariée par modèle de régression linéaire a ainsi été mise en place, reprenant les variables démographiques des rennes comme facteur dépendant des facteurs explicatifs bioclimatiques dont on suppose la part contributive. Le tableau V.8 synthétise l'ensemble des résultats de l'analyse statistique menée de modélisation linéaire multiple. Les variables bioclimatiques de démarrage végétatif (valeurs de NDVI par habitat échantillonné de la dernière quinzaine de mai) ont été prises en compte, une année avant le décompte annuel des rennes semi-domestiques. L'analyse portera ici sur le détail des catégories démographiques testées, avant de s'intéresser à l'échelon plus généraliste de l'ensemble de la population de rennes semi-domestiques décompté. La première remarque concerne la variabilité statistique de la variable dépendante (catégories démographiques) exprimée par les modèles de régression linéaire multiples. La grande majorité de cette variabilité statistique semble exprimée par les modèles linéaires : 64% de celle des faons, 91 % de celle des femelles, 78 % pour le total des rennes décomptés annuellement. Ces chiffres particulièrement élevés semblent valider les modèles de régression linéaires choisis par le logiciel (la méthode du R^2 ajusté est le plus performant) et le choix des variables explicatives testées.

Ceci dit au regard de l'ensemble des catégories démographiques de rennes modélisées, les variables explicatives entrant dans les modèles de régression linéaire multiple recourent une grande variété de facteurs bioclimatiques invoqués, que cela soit les valeurs de NDVI des habitats, les valeurs d'indices saisonniers NAO, les températures moyennes saisonnières ou les années. Cette diversité des facteurs semble suggérer deux choses : soit chaque catégorie de rennes est particulièrement sensible aux facteurs bioclimatiques rentrant dans les différents modèles (hypothèse biologique et éthologique), soit les facteurs explicatifs testés ne sont pas suffisamment précis, ou mal calibrés, pour que quelques facteurs bioclimatiques structurants ressortent structurants de l'ensemble des modèles de régression linéaire. Cependant, quelques régularités sont notables : les valeurs de NDVI de la dernière quinzaine de mai pour l'échantillon d'habitat de Tourbières se retrouvent dans l'ensemble des catégories démographiques modélisées par régression linéaire multiple. Cet habitat, et la variation de son indice NDVI au début du démarrage phénologique semble être le plus structurant dans les modèles (colonne de droite du tableau V.8), cette variable la plus contributive se retrouvant

pour les catégories de faons, de mâles et le total des cheptels. Son indice de NDVI, particulièrement élevé notamment dû à la saturation du NDVI vis-à-vis de la croissance des herbacées, pourrait confirmer l'influence positive de la strate herbacée au démarrage phénologique sur la démographie des cheptels, en particulier des faons et des mâles.

En outre, les températures moyennes de printemps (Giddà) contribuent aux modèles de régression multiple des effectifs de femelles, des mâles et du total de rennes semi-domestiques. Cette variable de températures moyennes printanière est la plus contributive pour la variable démographique des rennes femelles modélisée. Les conditions thermiques de printemps, en particulier d'avril à mai (fin de la gestation) semblent ainsi particulièrement affecter la démographie des femelles. La forte valeur du r^2 obtenue pour les femelles est toutefois largement due à l'influence de la variable Année, qui dépend probablement de déterminants liés à l'évolution des systèmes d'élevage dans un territoire de plus en plus fragmenté et contraint (voir Chapitres II et IV).

Les valeurs saisonnières de l'indice NAO sont particulièrement peu explicatives, au regard de l'analyse de régression linéaire multiple opérée. Les indices NAO d'hiver (Dàlvve) et d'été (Giesse) ne sont pas sélectionnées dans les modèles concernant les catégories démographiques modélisées des faons et des femelles. Une explication plausible pourrait être l'influence a priori nulle, pour les faons, de l'indice NAO hivernal qui précède de près de deux ans leur naissance, puis leur comptage : l'indice NAO hivernal de décembre 2000 à mars 2001 ne peut pas expliquer les dénombrements de faons opérés de décembre 2001 à mars 2002. Pour les mâles, l'indice de NAO d'hiver contribue en revanche à expliquer la modélisation de catégorie démographique.

Pour le modèle linéaire multiple modélisant le total des rennes semi-domestiques dénombrés, deux variables de valeurs de NDVI de dernière quinzaine de mai contribuent au modèle (tableau V.8). Il s'agit du NDVI des Conifères, et celui des habitats de Tourbières. Les températures moyennes printanières contribuent également à expliquer la variabilité statistique de l'ensemble de la population de rennes semi-domestiques dénombrés par les éleveurs.

E - *Discussion, perspectives et conclusion*

A l'échelle de l'ensemble des résultats de la présente étude, les liens entre atmosphère, climat, dynamiques interannuelles de végétation et démographie des rennes semblent se

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

confirmer, à travers différents traitements géomatiques et statistiques (figure V.5), comme le suggèrent les travaux de Fauchald et al (2017).

1) Tendances observées à l'échelle de la période et pour l'ensemble du territoire

Dans les hautes vallées pâturées en été, la tendance négative et significative du NDVI pourrait correspondre à une régression de la couverture végétale des hautes vallées ou à une saturation en eau des sols. La tendance significative à l'augmentation du NDVI observée au cours de la période d'étude dans la partie centrale des pâturages hivernaux pourrait être liée à une productivité plus importante des forêts de résineux, pouvant être liée conjointement au desserrement de la contrainte thermique (partie 2) et à l'intensification de la sylviculture. Nous y reviendrons dans la discussion générale, car ces deux tendances ont été également observées à l'échelle de l'échantillon d'habitat, ce résultat est donc particulièrement significatif.

2) NDVI et échantillonnage des habitats pour l'extraction des séries temporelles via le package MODISsp

L'échantillonnage des séries temporelles à travers le choix de polygones de couverture de sols Corine Land Cover 2006 jugés représentatifs s'est avéré particulièrement riche d'enseignements quant à la variabilité spatiale, et temporelle des formations végétales que nous avons traitées. La prise en compte de couverture de sols « contrôle » a en partie confirmé le bien-fondé de la prise en compte d'échantillons restreints en superficie, mais l'analyse du NDVI moyen interannuel serait plus performant si l'on pouvait tester plusieurs échantillons, voire même d'améliorer le code du progiciel R MODISsp (Busetto & Ranghetti, 2017) dans le but d'extraire les séries temporelles issues de la télédétection à l'échelle de plusieurs polygones ayant la même couverture de sols. Dans une perspective d'amélioration de l'échantillonnage des catégories d'occupation de sols entrant dans le processus d'extraction MODIS, une classification dirigée à échelle spatiale fine (imagerie Sentinel), assortie d'une matrice de confusion, améliorerait grandement le choix des formations végétales dont la réponse spectrale vis-à-vis du rouge et du proche infrarouge (NDVI) serait assurée et confirmée par des mesures in situ, en particulier l'utilisation de spectro-radiomètres.

3) Une forte variabilité temporelle et spatiale des valeurs de NDVI

L'analyse du NDVI moyen interannuel, ainsi que du nombre de quinzaines avec un NDVI >0.2, décrivant l'activité végétative et de la quinzaine de NDVI maximum suggère une forte hétérogénéité spatiale et interannuelle de la végétation. Ces résultats confirment ceux de Parviainen, Luoto et Heikkinen (2010) dans leur étude de l'hétérogénéité spatiale de la richesse floristique dans le nord de la Finlande, et de la part explicative du NDVI Landsat dans la détection, la répartition et la quantification de la richesse en familles de plantes. Westergaard-Nielsen, Lund et al. (2013) ont aussi montré que la somme des températures de la saison végétative, les précipitations du mois de juillet et le NDVI constituaient conjointement le meilleur prédicteur de la diversité des plantes vasculaires du Svalbard. Selon Mårell & Edenius (2005), cette hétérogénéité permet un nourrissage sélectif des rennes de la communauté Gabna.

A l'échelle spatiale plus grossière du NDVI MODIS 13Q1, l'hétérogénéité spatiale transparait notamment au travers le décompte de quinzaines de jours NDVI MODIS ayant un NDVI >0.2. Pour la même année, la période phénologique des formations végétales échantillonnées varie grandement, selon les habitats. Cette variation interannuelle semble d'autant plus importante que la formation végétale échantillonnée est constituée de végétaux avec un cycle de vie saisonnier marqué. C'est le cas pour les échantillons de Pâturages et prairies naturelles (entre 2,5 et 4 mois de période végétative entre 2000 et 2016), et de Landes et bruyères (entre 2 et 3,5 mois). Ce résultat rejoindrait les conclusions d'Eastman et al. (2013) quant à l'évolution entre 1982 et 2011 de différents paramètres NDVI des formations végétales de prairies et de végétation ligneuse basse, caractérisées par une tendance à une amplitude saisonnière croissante des valeurs de NDVI. La prise en compte de la variabilité saisonnière du NDVI de différents échantillons de formations végétales au regard de leurs tendances temporelles, a ainsi amélioré la compréhension des dynamiques de végétation et leur évolution temporelle sous l'influence du réchauffement climatique observé et ses effets sur les habitats écologiques de *Rangifer tarandus*.

4) Tendances temporelles des valeurs de NDVI en début et au milieu de la saison végétative dans le nord de la Scandinavie dans les échantillons d'habitat

Les tendances temporelles du NDVI lors du démarrage et du pic végétatif (dernière quinzaine de mai, dernière quinzaine de juillet) ne sont pas significatives d'après les tests de Mann-Kendall pour la plupart des habitats échantillonnés. Toutefois, ce résultat est peut-être lié à la variabilité des dates de démarrage végétatif (voir également le chapitre VII) et de pic phénologique, selon les années et les formations végétales. Les seules tendances significatives étaient observées dans les forêts de feuillus et dans les forêts et végétation arbustive en mutation, à la fois lors du démarrage végétatif et lors du pic phénologique. Dans les forêts de feuillus, cette tendance à la baisse pourrait s'expliquer par les attaques de la chenille *Epirrita autumnata* qui ont touché les bouleaux de montagne pour deux saisons estivales au cours de la période suivie (Olsson, Lindström, 2016), ce qui a pu affaiblir les arbres, retarder leur démarrage voire les défeuiller en partie, et amoindrir leur pic phénologique. Les forêts et végétation arbustive en mutation correspondent à des coupes forestières ou des plantations en croissance, à plus haute productivité végétale qu'une formation forestière mature, pouvant expliquer un démarrage végétatif précoce, d'autant qu'elles sont situées à plus basses altitudes et latitudes, de même qu'un pic phénologique élevé, productivité qui serait stimulée par la tendance au réchauffement.

Quant à la tendance négative du NDVI des pelouses et prairies naturelles pendant le pic phénologique, on peut proposer deux explications alternatives voire complémentaires : la baisse du NDVI pourrait être due à une diminution de la couverture végétale liée à une augmentation de la pression de pâturage, ou à une présence de neige fondante perturbant le signal du NDVI. La première hypothèse s'appuierait sur l'argument d'une tendance à la hausse des effectifs de rennes au cours de la période 1999-2013, ceux-ci sont passés à l'échelle du comté de Nord-Botnie de 112 000 têtes en 1999 à 147 600 en 2005 puis sont restés relativement stables (>140 000) jusqu'en 2013 (chapitre 4). L'augmentation de la proportion de femelles pendant cette période pourrait limiter la mobilité des troupeaux sur les versants, et les concentrer dans les fonds de vallées, qui seraient plus intensément pâturés (Mårell, 2006 ; Pape, Löffler, 2012). Une seconde hypothèse ferait référence à une perturbation du signal du NDVI en présence d'eau de fonte des glaciers et de la neige au cœur, se produisant jusqu'au cœur de l'été avec le réchauffement climatique. Cette eau de

fonte s'écoulerait le long des versants et se concentrerait dans les fonds de vallée. La présence d'espèces hygrophiles (*Eriophorum* et *Carex*) a d'ailleurs été notée dans plusieurs relevés de terrain que nous avons réalisés dans ces vallées (voir partie 3). L'étude de l'évolution d'indices d'humidité NDWI et de la bande QA de MODIS indiquant l'occupation du sol et sa probabilité permettraient aussi de vérifier cette hypothèse.

La tendance temporelle à la baisse du NDVI à la fin des mois de mai et juillet de la végétation arborée semble confirmer les études réalisées sur l'évolution régionalisée et continentale du NDVI et de la biomasse ligneuse, en particulier au nord de la Scandinavie (modèles GIMMS NDVI : De Bruin, De Wit et al., 2011 ; mais aussi Eastman, Sangermano et al., 2013). En particulier, la non significativité de la tendance temporelle des valeurs de NDVI de la dernière quinzaine de mai, qui caractérise l'échantillon de Forêt de conifères, semble corroborer les observations contradictoires concernant les dates de démarrage phénologiques des pixels de forêts de conifères de Laponie suédoise : tendances à la stabilité ou à une légère anticipation des dates de démarrage phénologique d'après le suivi par satellite, tendance à la stabilité ou à la tardivité pour les modèles prédictifs d'évolution phénologique (Delbart, Picard et al., 2008). Ces résultats contrastés sembleraient invalider l'hypothèse d'une augmentation de la biomasse végétale, traduite par l'indice NDVI et ses dynamiques temporelles, pouvant potentiellement être une conséquence du réchauffement des températures depuis plusieurs décennies dans la région (chapitres III et IV).

3) Comparaison entre les résultats obtenus aux deux échelles spatio-temporelles et évaluation de la représentativité spatiale des échantillons

Certaines tendances sont observées aux deux échelles spatio-temporelles, l'ensemble de la période et du territoire de la communauté Gabna, et l'échantillon d'habitats en début et lors du pic de la saison végétative, alors que d'autres divergent ce qui en réduit la portée, voire questionne la qualité de l'échantillonnage.

Ces divergences peuvent être minimales et explicables, cas par exemple des pelouses d'altitude, dont le NDVI ne montre une tendance négative que lors du pic phénologique, tendance en cohérence avec celle observée dans les hautes vallées de la chaîne fennoscandienne à l'échelle interannuelle. L'absence de tendance lors du démarrage végétatif s'explique par le décalage phénologique en altitude, le démarrage étant plus tardif dans ces pelouses que la quinzaine que nous avons choisie. En revanche, la tendance négative de la

valeur du NDVI des forêts de feuillus n'a pas été observée à l'échelle de l'ensemble de la période et du territoire de la communauté Gabna dans les forêts de feuillus alors qu'elle l'est sur l'échantillon. Une comparaison visuelle de la carte de tendance et de celle de l'échantillonnage suggère que l'échantillonnage de cet habitat est localisé dans un secteur concerné par cette tendance à la baisse, alors que ce n'est pas le cas pour une large part de la zone occupée par la forêt de feuillus. Or d'après nos observations de terrain, les attaques de chenilles ne sont pas généralisées, la défoliation est observée par patches, et il se pourrait que la zone échantillonnée ait été particulièrement atteinte par les attaques de chenilles.

Si l'on compare la tendance positive observée dans les forêts et végétation arbustive en mutation aux deux échelles spatio-temporelles, elle est plus significative d'après l'analyse menée pour l'ensemble de la période et du territoire que pour l'échantillon. Elle avait été observée dans un secteur, situé au sud-est où les forêts et végétation arbustive en mutation étaient bien représentées aux côtés des forêts de résineux et mixtes. La tendance est donc atténuée en début de saison végétative par rapport à une approche sur l'ensemble de la période. En revanche, la tendance observée à l'échelle régionale concorde avec celle de l'échantillon pendant le pic phénologique.

5) Tendances temporelles des variables atmosphériques et climatiques, et leurs liens avec les variables phénologiques et démographiques

Seuls les indices NAO de printemps (Giddà) et d'été (Giesse) montrent une tendance significative à la diminution avec le temps (respectivement -0,18 et -0,76 modélisés entre 2000 et 2016). Ces résultats sont cohérents avec les changements récents de valeurs de NAO montrés par Hanna, Cropper et al. (2014). Si les pas de temps diffèrent légèrement (2000-2017 dans notre étude et 1991-2013 dans la leur), les tendances temporelles à la baisse de l'indice NAO de printemps et d'été que nous avons observées sont confirmées dans cette étude (respectivement -0,49 et -1,54). Pour la saison estivale, et dans une moindre mesure la saison printanière, les auteurs expliquent cette baisse de l'indice de NAO par l'apparition plus fréquente d'un anticyclone de blocage sur le Groenland et l'est de l'Amérique du Nord en été, dirigeant par conséquent le courant jet polaire dans une orientation plus méridienne, alors que celui-ci avait auparavant une direction zonale (plus marquée en hiver, mais également présente en été). La cause invoquée pourrait être la fonte plus précoce des surfaces maritimes englacées de l'Arctique au printemps, imputable au changement climatique actuel, résultant

en des géopotentiels plus élevés au Groenland et en la modification de la direction du jet polaire (Hanna, Crooper et al., 2014).

Ceci dit, à l'échelle de la période d'étude (2000-2016), les tendances à la baisse des indices NAO estivaux ne semblent pas reliées à une tendance temporelle à la hausse (ou à la baisse) des températures moyennes saisonnières de la station météorologique d'Abisko. L'analyse par coefficients par rangs de Spearman a néanmoins montré le lien relativement robuste entre l'indice NAO de Giddà (printemps, avril à mai) et les températures moyennes de cette saison. Une saison printanière présentant un indice de NAO élevé est généralement associée à des températures moyennes basses. Les corrélations par rangs de Spearman entre le NDVI et les variables climatiques ont montré la prééminence du rôle de l'hiver (Dàlvve, décembre à mars), en particulier l'influence négative de l'indice NAO hivernal sur le NDVI des échantillons d'habitats végétalisés d'altitude (Végétation clairsemée, Pelouses et pâturages naturels, Landes et bruyères) au cours de la dernière semaine de mai, antérieure au début de saison phénologique. Ceci pourrait s'expliquer par la fonte de la neige, persistante tardivement par plaques en altitude au moins jusque fin mai. Ces résultats ne sont qu'en apparence contradictoires avec ceux de Li, Fan et al. (2016) obtenus à l'échelle de l'Eurasie, selon lesquels les indices hivernaux de NAO sont positivement corrélés avec la croissance des végétaux, notamment du fait de moindres profondeurs de neige lorsque l'oscillation nord-atlantique est positive (temps doux et humide), impliquant lors de la fonte de la neige un albédo restreint et une contrainte thermique moindre pouvant faciliter la croissance végétative. Ceci dit les résultats de ces auteurs font référence à la période de végétation active, dont le démarrage peut être différé vis-à-vis du suivi effectué ici sur la deuxième quinzaine de mai. Ils rejoignent ceux de Fraser, Olthof et al. (2011) qui ont montré le rôle de la fréquence accrue des températures hivernales au-dessus de 0° dans le verdissement observé dans des parcs naturels canadiens entre 1984 et 2009, évalué entre autres par l'indice NDVI.

La dernière approche nous a permis de tester les liens entre variabilité atmosphérique, climatique, phénologique et la réponse démographique des rennes semi-domestiques du comté Nord-Botnie, malgré la différence d'échelle spatiale entre les données analysées. La figure V.6 en représente synthétiquement les résultats. Les modèles de régression linéaire calculés ont en particulier quantifié la contribution des variables explicatives invoquées dans la retranscription de la variabilité démographique des rennes mâles, femelles, faons et des totaux annuels de cheptels. Pour les femelles, et les mâles, l'influence des températures

printanières avait déjà été soulignée par Paoli et al (2018). Les températures élevées en Avril-Mai (saison Giddà des éleveurs saamis, figure V.4) amélioreraient les conditions physiques des rennes, en particulier des femelles en gestation (thermorégulation), et la fonte précoce de la neige aurait un effet positif sur l'accessibilité aux pâtures, en particulier aux lichens et aux bourgeons de bouleau nain (Paoli, Weladji et al., 2018), et sur la qualité nutritionnelle de *Betula nana* L., *Eriophorum angustifolium* L., *Rumex acetosa* L., *Vaccinium myrtillus* L. (Mårell 2006), , espèces consommables dès le début du printemps (Lefrère, 2003). L'influence des valeurs de NDVI pour l'échantillon de tourbières semble particulièrement importante pour expliquer la variabilité des classes démographiques de rennes mâles, de faons, et le total des cheptels. La richesse en Joncacées et en Cypéracées de ces habitats, et la variabilité interannuelle forte de cet habitat en début de saison phénologique (ici dernière quinzaine de mai) pourrait expliquer son influence statistique notable dans les modèles de régression linéaire multiple. Mårell (2006) a en effet montré l'importance pour les rennes

d'accéder à des habitats comportant une biomasse importante, particulièrement en début de saison végétative avec le changement de métabolisme aiguisant l'appétit des rennes (Klein, 1990).

Ceci dit, comme souligné plus haut dans la partie Résultats, il semblerait que les variables explicatives invoquées et contributrices aux différents modèles de régression linéaires soient trop nombreuses pour comprendre l'enchaînement des parts de contributions de chacune d'entre elles dans le modèle, en particulier les valeurs de NDVI par habitat. Une simplification, passant par le choix de variables plus précises, autoriserait à rendre les modèles de régression linéaire multiples plus robustes. Également la prise en compte des précipitations et des hauteurs de neige semble manquer particulièrement, à la fois pour la compréhension des liens entre atmosphère et neige, mais aussi pour mieux connaître l'influence de la neige sur le signal NDVI lors de sa fonte printanière, sur la croissance de la végétation, mais également sur la variabilité démographique de *Rangifer tarandus*. Le facteur

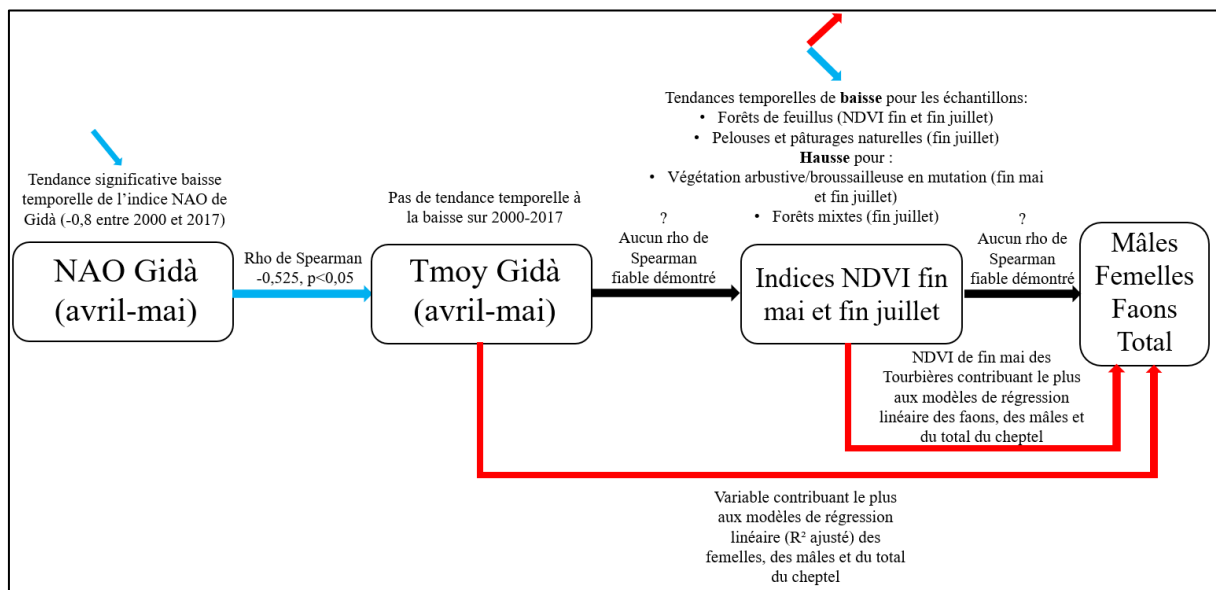


Figure V-6 : Diagramme de l'enchaînement des facteurs testés dans l'étude. Les boîtes représentent les facteurs explicatifs/expliqués. Les flèches bleues et rouge obliques signifient la présence ou non d'une tendance temporelle pour les facteurs testés, et son éventuelle augmentation/diminution. Les flèches bleues et rouges droites concernent les résultats des corrélations par rangs de Spearman, et des modèles de régression linéaire multiples. (Réalisation R.Courault, 2018)

humidité est également important, en complément de la prise en compte des températures, dans la compréhension des changements, de la variabilité et de la diversité de la végétation des écosystèmes arctiques (Bjorkman, Myers-Smith et al. 2018). Toujours dans l'amélioration de la robustesse des modèles de régression multiple, la question temporelle semble importante, car elle est sous-jacente à la compréhension de la résilience des systèmes d'élevage de rennes semi-domestiques aux effets passés, présents et futur du changement climatique actuel. Pour le présent, et mieux asseoir les prévisions futures, les statisticiens préconisent de désaisonnaliser les données temporelles pour enlever tout effet saisonnier pouvant influencer sur un modèle présentant une robustesse faussement importante.

Transition entre le chapitre V et le chapitre VI

Le chapitre précédent avait traité de la variabilité interannuelle et décennale des formations végétales des territoires de la communauté de Gabna. L'étude cherchait notamment à caractériser la variabilité temporelle des formations végétales, à travers l'exploitation de l'imagerie MODIS, à répétitivité temporelle forte. Après la caractérisation de la variabilité temporelle et spatiale du NDVI, nous avons également mis en lien ces séries temporelles avec les facteurs explicatifs le plus souvent rencontrés dans la littérature : indices de circulation atmosphérique et climatologie locale. Enfin, l'ensemble de ces facteurs (atmosphère, climat, phénologie) temporels ont été l'objet de modélisation statistique pour tenter d'expliquer la variabilité démographique des rennes de la région suédoise du Norrbotten. Les analyses se sont concentrées sur deux périodes-clés de l'élevage de rennes et de la phénologie des plantes (fin mai et fin juillet), qui a été opérée sur plusieurs niveaux : calculs de tests de tendance de Mann-Kendall à l'échelle de l'ensemble de la région d'étude, extraction et examen de la variabilité spatiale et temporelle du NDVI pour les habitats écologiques sélectionnés, tests de tendance des valeurs de NDVI sur l'échantillon, mise en lien avec la variabilité atmosphérique, climatique et démographique.

Les résultats sont d'ordre cartographiques et numériques. Pour la première partie, les valeurs de tests de tendance ont montré un déphasage marqué entre l'est et l'ouest du territoire de la communauté Gabna. Les pâturages d'hiver ont montré les tests de tendance les plus significatifs, et les plus hétérogènes du point de vue du signe de la tendance calculée. L'analyse temporelle cartographique de l'évolution du NDVI démontre en effet de grandes zones profondément marquées par l'augmentation intense du NDVI, ou au contraire des baisses intenses de l'indice.

Les résultats cartographiques de cette partie des territoires de la communauté Gabna confirment ainsi les constats opérés précédemment d'intensification récente (2000-2017) de fragmentation écopaysagère : urbanisation et prospection/exploitation minière pour les zones où le NDVI a significativement décliné, foresterie intensive pour les parcelles forestières des pâturages d'hiver où le NDVI a significativement augmenté avec le temps. En ce qui concerne l'ouest de la zone, les patterns géographiques sont moins marqués, et les tests de tendance NDVI dévoilent la forte hétérogénéité géographique des situations topoclimatiques de

montagne. De manière générale, les pentes et les sommets des grandes unités topographiques sont marquées par des tendances temporelles significativement en baisse des valeurs de NDVI.

Le deuxième volet de l'étude a mis en lumière la variabilité bioclimatique interannuelle marquée pour les séries temporelles de NDVI. Cette forte variabilité s'est notamment traduite par des écarts importants en comparaison interannuelle, ainsi qu'entre les différents habitats écologiques étudiés. La troisième partie a en partie confirmé les constats opérés précédemment, portant en particulier sur les tendances à la baisse, ou à l'augmentation temporelle du NDVI sur la période d'études (2000-2017). Les quelques formations végétales échantillonnées ont montré des NDVI tendancielle à la baisse pour les forêts de Bouleaux (dernière quinzaine de mai); et des NDVI significativement en augmentation pour les catégories signant l'exploitation sylvicole (dernière quinzaine de juillet).

En ce qui concerne les liens entre variabilité atmosphérique, climatique et phénologique, l'importance de la saison hivernale saami (Dàlvve, décembre à mars) est soulignée par le nombre de corrélations significatives, entre l'indice d'oscillation NAO et les formations végétales d'altitude (végétation clairsemée ; pelouses et pâturages naturels, landes et bruyères), des indices NAO élevés étant associés à des indices NDVI faibles. Enfin, le modèle linéaire multiple entre variables atmosphériques, climatiques, phénologiques et démographique a notamment souligné le poids important de la saison printanière (NDVI et températures moyennes) dans la démographie des cheptels, en particulier pour les rennes femelles.

Si le lien entre synchronisation de la phénologie des plantes et migration saisonnière des troupeaux de rennes est indirectement abordée dans le chapitre précédant, le chapitre VI traitera plus spécifiquement de cet aspect. Il traitera également de manière plus précise de l'évolution des dates de démarrage phénologique, en s'appuyant sur un jeu de données satellite adapté à une reconnaissance fiable de l'éveil de la végétation au printemps. Nous aborderons en particulier la description des liens entre organisation pastorale du cycle biologique annuel des rennes semi-domestiques de la communauté Gabna et démarrage phénologique, dans le contexte du changement climatique actuel.

VI - Suivi diachronique de l'évolution des dates de démarrage phénologique des pâturages saisonniers de la communauté d'éleveurs de rennes semi-domestiques Gabna (comté du Norrbotten, Suède)

A - Introduction

Dans ce chapitre, nous nous interrogeons sur l'irrégularité de la date du démarrage phénologique de la végétation, lors de la remontée des rennes vers leurs pâturages estivaux, dans le contexte du changement climatique et d'intensification des activités humaines caractérisant la dernière décennie. Cette irrégularité peut entraîner un risque de désynchronisation entre les besoins alimentaires et les ressources pastorales disponibles aux saisons-clef du cycle biologique du renne (saison chaude). Celles-ci, découpées selon le mode pastoral (fortement dépendant du mode d'organisation communautaire, social et biologique), sont liées à la reconstitution des masses graisseuses et particulièrement importantes dans les dynamiques de population des cheptels (Courault, Cohen et al., 2015, chapitre IV).

Etant donné que le synchronisme entre le démarrage de la feuillaison et la migration des cheptels de rennes est évoquée dans la littérature (Forbes, Kumpula et al., 2009), on souhaite la caractériser à différentes échelles d'analyse ayant du sens pour les éleveurs de la communauté Gabna. Pour cela, les séries temporelles par satellite seront mobilisées pour déterminer les dates de démarrage de verdissement de la végétation dans les habitats écologiques du renne. Ces premières sources d'informations géographiques bio-géophysiques seront croisées avec une base de données géographiques co-construite par les éleveurs de rennes Saamis (RenGIS 2.0, *Swedish Saami Parliament, Lanstryrelssen*) qui spatialise les contours des pâturages saisonniers et les trajectoires des rennes. Les questions principales sont ici représentées par la synchronisation, et sa variabilité interannuelle, entre la date d'entrée dans les pâturages saisonniers théoriquement fixe d'après la base de données RenGIS 2.0 et le démarrage phénologique de la végétation chlorophyllienne. Ce démarrage phénologique (comme d'ailleurs la gradation spatio-temporelle des pâturages de la communauté) est censée être plus précoce au sud-est de la communauté d'éleveurs (pâturages d'hiver), et tardive dans les vallées glaciaires des monts fennoscandiens, au nord-ouest (pâturages d'été), en fonction de la dureté du climat arctique (Cornellissen et al., 2001). On

cherche ici à mieux connaître la synchronisation éventuelle entre le démarrage des premières plantes vasculaires et la transhumance des troupeaux de rennes semi-domestiques de la communauté Gabna.

La connaissance des saisons de pâturage et des trajectoires migratrices des rennes lors de la montée en estive vers les aires de vèlage nous est apportée par les éleveurs des systèmes pastoraux semi-nomades de renniculture. Il est reconnu que la prise en compte des connaissances locales (en particulier linguistiques) contribue à une meilleure compréhension des effets du changement climatique sur le pastoralisme saami (Riseth, Tømmervik et al., 2010; Roturier, Roué et al., 2009). C'est le cas des paramètres thermiques de la qualité de la neige ou des découpages temporels du cycle migratoire (Courault et al., 2015a, 2016b). Dans le présent article, nous le vérifierons à travers « *l'identification et la délimitation des pâturages importants [...] par les 'experts locaux', e.g. les éleveurs de rennes locaux qui avaient la connaissance la plus grande sur chacune des zones d'intérêt* » (Sandström et al., 2003). Johansen & Karlsen (2005) ont également, dans leur étude diachronique par télédétection, comparé les changements de pourcentage de surface occupé par les communautés végétales plus ou moins riches en lichens, en fonction du découpage en pâturages saisonniers par les éleveurs de rennes du Finnmark norvégien. Quant aux trajectoires, elles ne sont pas issues d'observations naturalistes (comptages, suivi GPS) des cheptels, mais sont dessinées par les éleveurs et propriétaires de troupeaux en concertation avec d'autres parties prenantes. Ces informations ne résultent pas d'enquêtes personnelles mais sont disponibles sur les sites web des régions suédoises où l'élevage de rennes est présent, ainsi que celui du Parlement Saami (organe politico-administratif suédois de représentation des intérêts des Saamis). Difficilement matérialisées (et matérialisables) sur le terrain (quelques clôtures), ces données correspondent à un modèle politiquement orienté de l'organisation géographique et sociale réelle des systèmes pastoraux des Saamis de Suède (voir chapitre II, à propos du contexte dans lequel ces données ont été produites).

B - Matériel et méthodes

Pour vérifier la synchronisation entre la phénologie de la végétation et la migration saisonnière des rennes, trois types de données sont mobilisées : les séries temporelles de dates de verdissement d'après les images satellite, la cartographie de l'utilisation du sol Corine Land Cover permettant de localiser les habitats écologiques du renne, et les contours des

pâturages et des trajectoires de rennes élaborés par les éleveurs. Ci-après nous décrivons ces données et retraçons les étapes des analyses réalisées.

1) Données utilisées et pré-traitements

Le tableau VI.1 recense les données géographiques mobilisées pour la recherche de facteurs précisant et caractérisant les dates de début de verdissement (1999-2013) issues des données du capteur télédétection SPOT-VGT suivant la méthode décrite dans Delbart, Kergoat et al. (2005).

Tableau VI-1 : Séries temporelles, données spatiales acquises et métadonnées associées

INDEX/TYPE DONNEE	SOURCE	PAS DE TEMPS	RESOLUTION SPATIALE	RESOLUTION TEMPORELLE
Rasters Démarrage verdissement SPOT-VGT	N. Delbart (2005)	1999-2013	1000m	Annuel (dates démarrage)
Amplitude Min-Max SPOT-VGT	N. Delbart (2005)	1999-2013	1000m	Annuel
Raster MNT	http://gdem.ersdac.jpacesystems.or.jp/	-	30 m	-
Raster Corine Land Cover 2006	European Environmental Agency	1990-2012	100 m	6 ans
Vecteurs (polygones) Pâturages saisonniers communauté éleveurs	Reindeer Husbandry Plan / Swedish Saami Parliament / Norrbotten County Board http://www.lansstyrelsen.se	-	Communauté	-
Vecteurs (linéaires) Trajectoires pastorales communauté éleveurs	Reindeer Husbandry Plan / Swedish Saami Parliament / Norrbotten County Board http://www.lansstyrelsen.se	-	Communauté	-

Les dates de verdissement, exprimées en jours calendaires, sont issues du traitement du signal de l'indice NDWI (*Normalized Difference Water Index*), utilisé de préférence au NDVI. En effet, du fait de la remontée des températures au printemps, la fonte de la neige est synchronisée avec la feuillaison de la végétation chlorophyllienne. Ces deux changements de surface interagissent fortement en particulier dans le domaine des infrarouges, et augmentent le signal NDVI sans capacité de les distinguer l'un de l'autre (Delbart, Kergoat et al., 2005).

Les amplitudes de réponse NDWI sont utilisées dans l'étude pour sélectionner les données les plus pertinentes. Elles correspondent à la différence entre la valeur du NDWI lors de la date de la fonte de la neige, et celle lors du verdissement maximal (pic) de la végétation. Une amplitude NDWI élevée est fortement liée à un pixel dominé par de la végétation chlorophyllienne. Cette valeur d'amplitude permet d'éliminer les pixels où on suspecte une confusion radiométrique entre végétation chlorophyllienne, fonte de la neige et présence d'eau libre. On s'assure ainsi de ne garder que les pixels très certainement dominés par la végétation ligneuse, qu'elle soit feuillue ou résineuse (Delbart, Kergoat, et al., 2005).

La cartographie de l'occupation du sol Corine Land Cover de 2006 est utilisée pour spatialiser les habitats écologiques du renne. Cette année est intermédiaire à notre période d'étude, la résolution choisie est la plus fine (100 mètres), pour minimiser les artefacts dus au croisement avec les séries temporelles de dates de démarrage phénologique. Ces données ont été utilisées dans la phase de sélection des données satellitaires, pour éliminer les habitats sans végétation ligneuse, puis pour calculer les dates de démarrage végétatif, détaillées par habitat, aux différentes échelles de l'étude. Toutes ces données, d'extension mondiale, européenne ou régionale, ont été découpées aux différents niveaux d'étude et projetés dans le système WGS84/UTM 34N.

Les deux derniers jeux de données sont élaborés par le *Reindeer Husbandry Plan*. Ce programme met en relation l'ensemble des communautés suédoises d'éleveurs de rennes, le *Regional Forestry Board*, et l'Université suédoise des Sciences Agricoles (SLU). Le *Reindeer Husbandry Plan* a trois missions principales (Sandström, Pahlén et al., 2003). La mission première consiste en la délimitation des zones d'intérêt pastoral, selon la communauté d'appartenance des pâturages à rennes, leur saisonnalité, et/ou leur importance biologique : zones de reproduction, d'allaitement (Driedger, 2014, RenGIS, 2017). En effet, « *du fait de l'extensivité des migrations de rennes, [les éleveurs] ont été obligés de diviser spatialement et temporellement les pâturages* » (Sandström, Pahlén et al., 2003). Les trajectoires linéaires, représentant le balancement migratoire entre pâtures d'été et d'hiver, sont dessinées par les éleveurs selon leur connaissance du terrain et de leurs troupeaux, prenant ainsi en compte la topographie (fonds de vallées), la localisation des lacs gelés d'hiver, ou encore la répartition des zones humides et des enclos aux intersaisons (Svonni, 2010). Elles sont ensuite reprises et intégrées dans les bases de données en prenant en compte les autres occupations du sol à enjeux économiques forts (telles que l'exploitation minière, l'hydroélectricité, les champs

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

d'éoliennes). A travers la mise en place d'une base de données géographique, la frontiérisation des espaces dédiés à l'élevage est le résultat de la recherche d'un consensus, plus ou moins artificiel, entre les acteurs administratifs et économiques (inter-) nationaux et les éleveurs Samis. Les deux autres objectifs du *Reindeer Husbandry Plan* inventorient les différents territoires pastoraux selon leur fonction biologique, économique et quantifient les impacts cumulés des activités humaines sur les cheptels de rennes.

Tableau VI-2 : Choix et dénomination des entités spatiales des pâturages saisonniers. Les cellules fusionnées de la colonne de droite correspondent aux entités spatiales ayant exactement les mêmes contours

Découpage en 8 saisons pastorales en suédois	Les saisons pastorales Samies	4 entités spatiales significantes de la migration hiver-été
Hiver (<i>Vinter</i>)	Dec-mars : Dalvve	Pâturage d'hiver (~4545 km ² ; figure VI.2)
« Printemps-hiver » (<i>Varvinter</i>)	Mars-avril : Giddadalvve	
Printemps (<i>Var</i>)	Avril-mai : Gidda	Pâturage de printemps (~4558 km ² ; figure VI.2)
« Début d'automne » (<i>Forhost</i>)	Aout : Tjaktjagiesse	
Automne (<i>Host</i>)	Sept-Oct : Tjaktja	
« Début d'hiver » (<i>Forvinter</i>)	Nov-Dec : Tjaktjadalvve	
Début d'été (<i>Forsommar</i>)	Juin : GiddaGiesse	Pâturage de début d'été (~3365 km ² , figure VI.2)
Été (<i>Sommar</i>)	Juin-juillet : Giesse	Pâturage d'été (~1846 km ² , figure VI.2)

L'examen des jeux de données issus du *Reindeer Husbandry Plan* laisse apparaître des zones de recouvrement entre territoires communautaires (voire nationaux), et à l'intérieur de chacun, entre territoires saisonniers. Le site du Parlement Saami (organe politico-administratif suédois de représentation des intérêts des Saamis) précise que ces contours sont indicatifs. Le recouvrement de certains territoires entre les communautés d'éleveurs peut s'expliquer par leur difficile découpage spatial, dans un système pastoral usuellement flexible (Mårell & Edenius, 2005, Mårell 2006). Ceci rejoint les travaux des anthropologues sur une gestion territoriale « non frontiérisée » (Roué, 2011 ; Brännlund & Axelsson, 2011). Il en est de même pour le recouvrement partiel des territoires pastoraux saisonniers inter-communautaires. Ce recouvrement s'explique notamment par une gestion humaine non-fixiste des troupeaux de rennes, dont la migration gyroïre annuelle se caractérise en trois temps : montée en estive, vèlage, descente hivernale. D'autre part, les normes édictées par le *Reindeer Husbandry Plan* impliquent la déclaration formelle de 8 pâturages saisonniers. Or ces derniers sont flottants dans le temps (selon l'avancée de la saison végétative) et dans l'espace (selon la

localisation du troupeau, celui du système d'élevage et de l'organisation socio-spatiale contextuelle) pour optimiser l'adaptabilité des troupeaux aux aléas climatiques et à la disponibilité en ressources végétales. Ainsi, dans la communauté Gabna (figure VI.1, tableau VI.2), les limites entre territoires saisonniers peuvent être confondues dans des entités spatiales se superposant ou s'intersectant entre elles. Nous retenons dans notre étude 4 des huit pâturages saisonniers, correspondant aux saisons de la migration remontante, de l'hiver vers l'été, depuis les forêts de résineux au sud-est jusque vers les zones de toundra arbustive d'altitude au nord-ouest (tableau VI.2). Cette sélection de saisons s'explique par l'objet de notre étude, la date de démarrage phénologique de la végétation, qui ne se produit dans ce climat froid qu'à la sortie du printemps.

Les trajectoires de migration des cheptels déclarées par les éleveurs des différentes communautés saamies suédoises constituent le dernier jeu de données. Correspondant techniquement à des poly-lignes, elles décrivent la trajectoire pastorale de migration optimale, à amplitude annuelle. Géographiquement, aucune largeur n'est spécifiée, donnant au jeu de donnée vectoriel une trajectoire linéaire représentative de la gyre annuelle des cheptels officiellement présents sur le territoire communautaire. Ici, le flux linéaire des trajectoires est considérée comme la position moyenne des troupeaux montant en estive ou redescendant pour l'hiver, , en gardant à l'esprit que ces trajectoires sont le résultat d'un compromis entre les intérêts divergents des parties prenantes (éleveurs, exploitants miniers et forestiers)..

2) Présentation de la zone d'étude

Notre zone d'étude se situe principalement en Laponie suédoise, mais son extension n'obéit pas aux frontières administratives classiques, elle est déterminée par la division de l'espace opérée par les éleveurs de rennes Saamis.

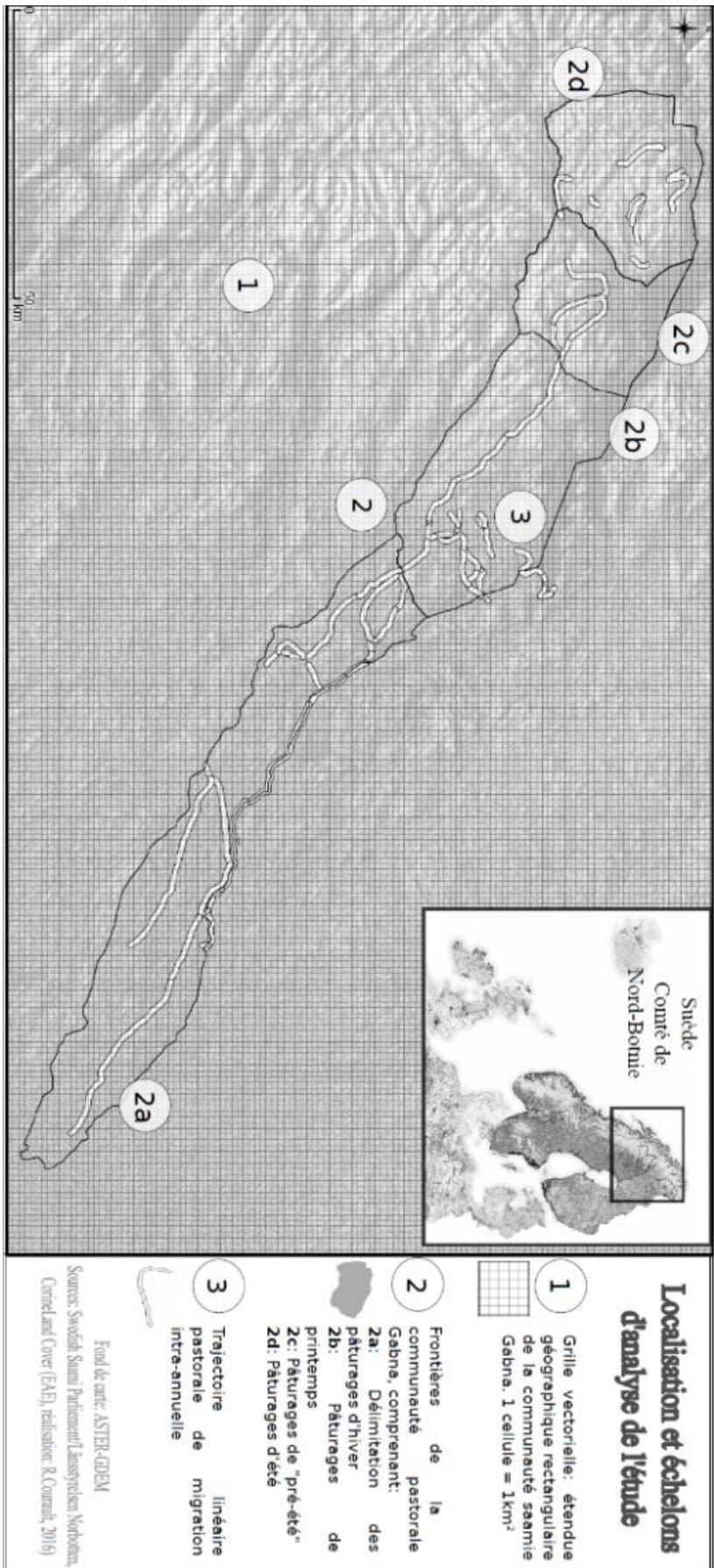


Figure VI-1 : Localisation et présentation des niveaux de découpages géostatistiques (réalisation: R. Courault, 2016)

Cette présentation insistera sur la logique des emboitements d'échelles auxquelles l'étude a été menée, elle permettra de caractériser finement l'organisation spatiale de ces différents niveaux d'analyse et de poursuivre notre analyse critique des données.

Le 1^{er} niveau correspondant à l'étendue géographique régionale de l'étude, dont le découpage de forme rectangulaire est opéré autour des limites de la communauté Gabna. Ce premier niveau scalaire d'analyse inclut ainsi une partie des territoires officiels des autres communautés. Au sein de cet ensemble régional se déploient différents gradients topographiques (chaîne fennoscandienne), thermiques et phénologiques au long de l'écotone taïga-toundra (respectivement du sud-est vers le nord-ouest, entre 66 et 69° de latitude Nord).

D'après le Parlement Saami, les éleveurs Gabna « *ont leur village annuel [åreruntmarker] au sein de la municipalité de Kiruna* » (*samtinget.se*). *L'aire totale de la communauté est de 3666 km², s'étirant de la pointe sud-est de l'emprise communale de Kiruna jusqu'aux confins norvégiens, à l'extrémité nord-ouest* » (figure VI.1). Onze entreprises d'élevage sont déclarées officiellement, produisent et écoulent sur le marché de la viande et les sous-produits du renne (lait, artisanat). Le conseil administratif du comté de Norrbotten (en concertation avec le Parlement Saami et les entreprises d'élevage) fixe le nombre maximum de rennes autorisés par communauté. Pour Gabna, le seuil est de 6500 têtes en début d'hiver (taille maximale annuelle de la population, après les naissances), il est de 141 000 à l'échelle de la région Norrbotten.

Le 2^{ème} niveau correspond à la délimitation communautaire des 4 pâturages saisonniers qui caractérisent la remontée vers l'estive des troupeaux de rennes, selon les critères exposés plus haut. Les pâturages d'hiver sont répartis entre les communes de Kiruna et de Pajala.

Le 3^{ème} niveau est celui de la trajectoire pastorale annuelle, longue de 200 km en longitude. La trajectoire pastorale n'atteint pas les extrémités du territoire, et son tracé reste complexe et hiérarchisé, bien qu'orienté du sud-est vers le nord-ouest. Cette orientation correspond d'une part à celle de la structure géomorphologique et hydrographique d'une part, et d'autre part à la direction des vents dominants de nord-ouest, que les rennes femelles prennent de face pour remonter à la belle-saison vers les zones de vèlage où elles sont nées (Tyler, Turi, et al., 2007).

Les trajectoires hivernales de migration présentent les plus grandes longueurs comparativement aux trois autres saisons (figure VI.1, 2 a). D'après le croisement entre les

occupations de sol Corine Land Cover et le flux migratoire linéaire de la communauté Gabna, ce dernier traverse majoritairement les plans ou les cours d'eau gelés (sur 87,5 km de longueur), garantissant des parcours relativement commodes au cœur de l'hiver. Les forêts de conifères, où les rennes peuvent pâturer les lichens arbusculeux et épiphytes, représentent la deuxième grande catégorie parcourue par la trajectoire pastorale cognitive d'hiver (longueur totale: 68,8 km). Des zones artificielles sont également traversées par les trajectoires hivernales (« tissu urbain discontinu », ou « aéroport »). Dans les parties centrales et nord, la trajectoire hivernale évite les zones humides, ce qui pourrait correspondre à une zone parcourue un peu plus tardivement, au moment où l'amincissement des couches de glace constitue un risque de noyade ou de mort subite en masse des rennes, souvent rapporté par les éleveurs. De plus en plus anastomosée, la trajectoire traverse des formations forestières variées.

Dans les pâturages d'intersaisons (VI.1 ; 2b), la trajectoire principale, située au sud du territoire Gabna est connectée avec une série de petits trajets fragmentés, pouvant correspondre à ceux empruntés pendant la période de rut. On y trouve essentiellement des landes à Ericacées, saules et bouleaux nains, ou des bétulaies (respectivement sur 47 et 43 km de longueur).

Dans les pâturages de début d'été (2c, figure VI.1), utilisés pendant la période suivant le vèlage (qui a lieu à la fin du mois de mai), les faons sont marqués aux oreilles avant que les troupeaux ne se dispersent dans les pâturages d'été. La trajectoire se divise en 3 branches, et correspondent à la topographie de la Porte Lapone, une vallée glaciaire en auge et site sacré saami d'après les informateurs locaux et nos observations de terrain. Pour cette partie de l'année, les trajectoires pastorales traversent des landes à Ericacées (39 km au total), associées à des prairies (sur 4,6 km de longueur).

La trajectoire est fragmentée dans le territoire de plein été, ceci pouvant s'expliquer par le comportement spatial du troupeau cherchant à éviter les moustiques en remontant des fonds de vallées riches en ressources pastorales, occupés par des landes (24 km de trajectoire), des pelouses (12 km), plus rarement des forêts de feuillus, vers les versants plus frais et venteux, avec des zones de végétation éparse (11,5 km) et des zones rocheuses (1,9 km).

3) Traitements des données

a) Analyse de variance et sélection du jeu de données régional pour les traitements ultérieurs

Après l'importation et la transformation des données primaires dans un projet SIG commun, une deuxième phase de prétraitements correspond à la création d'une grille vecteur (figure VI.1). Cette approche par points de grille cale l'étendue géographique et la résolution spatiale sur les séries temporelles des dates de démarrage de verdissement. A la suite de la création de la grille vecteur, les différentes données thématiques sont échantillonnées selon le centroïde de chaque cellule de la grille (données thématiques : tableaux VI.2 et VI.3, représentation de la grille d'analyse en figure VI.1 et VI.3). Le maillage, à l'échelle du kilomètre, facilite les traitements statistiques ultérieurs sur tableur. L'importation (via les coordonnées X-Y ou les identifiants SIG préexistants) permet également de cartographier les nouvelles données spatiales continues. Les différences de résolution entre la grille SPOTVEG et les cartes thématiques peuvent représenter une limite, toutefois celle-ci est compensée par le très grand nombre d'informations (149.630 pixels). Cette quantité représente d'ailleurs une limitation technique (temps de calcul, plantage des calculs) pour la mise en œuvre de traitements plus élaborés que la sélection des informations thématiques aux centroïdes des pixels SPOTVEG (par exemple un calcul de moyenne de la pente, ou un calcul de la proportion de surface occupée par les différentes occupations du sol). De plus, nous avons réalisé pour une autre étude une comparaison entre les résultats de la répartition des types d'occupation du sol aux centroïdes des mailles de grille et en calculant la proportion de chaque occupation du sol dans les mailles de la grille. La différence de résultat était très faible, bien inférieure à 5% (voir chapitre XI).

Tableau VI-3 : Récapitulatif des prétraitements d'extraction des descripteurs à partir d'une grille vecteur

Etape 1 : génération d'une grille vecteur + centroïdes de polygones
A partir de la résolution spatiale SPOT-VGT (1 km ² ; WGS84 34N)
Etape 2 : ajout et extraction des valeurs attributaires
Ajout et extraction des valeurs attributaires : latitude, longitude, altitude (ASTER-GDEM), orientation des pentes, habitats écologiques CLC06, dates annuelles de démarrage NDWI (SPOT-VGT), amplitudes NDWI (SPOT-VGT)
Etape 3 : import de la table attributaire sur tableur
Tris pour ensuite calculs d'analyses ANOVA, indice ACHI, moyennes, écarts absolus, écarts-type Tri et sélection des observations selon les habitats écologiques CLC 06 (arborés/non-arborés) et 2 seuils d'amplitude NDWI (SPOT-VGT) : pixels > 0,1 et >0,2

Une fois les prétraitements SIG opérés (étapes 1 et 2, tableau VI.3), les 149 630 pixels de la grille vecteur sont triés selon deux critères, d'une part le type de formation végétale, d'autre part les amplitudes de valeurs de l'indice NDWI. Le but est ici de sélectionner, à travers les amplitudes NDWI SPOT-VGT, les pixels/observations présentant des dates de démarrage de verdissement de la végétation très sûrement liées au démarrage végétatif des formations végétales. Des analyses de variance sont réalisées pour tester l'hypothèse d'explicativité des catégories d'habitat Corine Land Cover sur la variance des amplitudes NDWI pour deux seuils : amplitude $> 0,1$ et $> 0,2$. Le suivi des dates de démarrage de verdissement basé sur le NDWI n'est en effet significatif que pour les formations végétales présentant une biomasse conséquente, dominées par les strates arborées et arborescentes (habitats de forêts de feuillus caducs, de conifères, mixtes, landes et broussailles). Pour ces formations végétales, le démarrage phénologique correspond physiquement à un verdissement, qui se traduit par une brusque augmentation de l'indice. La pertinence de la sélection selon les valeurs d'amplitude de verdissement NDWI (basés sur les travaux de N. Delbart, Kergoat et al. (2006) a ainsi été testée sur six jeux de données/seuils distincts (tableau VI.4).

Tableau VI-4 : Jeux de données testés pour la part explicative des habitats Corine Land Cover sur les distributions d'amplitudes NDWI et effectifs pour les observations/pixels renseignés

Jeu de données	Effectif
Matrice générale, toutes catégories CLC confondues	149629
Pixels avec amplitude NDWI $>0,1$, toutes catégories CLC confondues	113405
Pixels avec amplitude NDWI $>0,2$, toutes catégories CLC confondues	70033
Matrice générale, uniquement catégories CLC arbustives et arborées (codes 23-24-25-27-29)	102893
Pixels avec amplitude NDWI $>0,1$, uniquement catégories CLC arbustives et arborées	87174
Pixels avec amplitude NDWI $>0,2$, uniquement catégories CLC arbustives et arborées	52157

Une analyse des relations entre les amplitudes NDWI (facteur à expliquer) et d'une part les catégories d'occupation du sol, aux différents niveaux de seuil d'amplitude (facteur explicatif) est réalisée par ANOVA, après vérification de la normalité des distributions d'amplitudes NDWI, et de leur homoscedasticité. Les catégories Corine Land Cover

expliquent significativement la variance des amplitudes NDWI. Une deuxième hypothèse concerne le lien entre amplitude forte de l'indice et la bonne détection du démarrage printannier de la végétation chlorophyllienne. Les jeux de données caractérisés par des amplitudes NDWI $\geq 0,2$ expliquent significativement la variance propre à chaque catégorie CLC ($r^2=0,251$; $p<0,0001$). En effet, ce seuil signifie « [...] que la détection n'est pas affectée par un bruit induit par des variations [de signal NDWI lié à la couverture végétale du pixel détecté ; de fonte ; de surinterprétation liée à l'estimation de la date de démarrage de verdissement du pixel SPOT-VGT]. » (Delbart, Kergoat et al., 2006). Ce résultat est confirmé par le calcul de l'écart-type des dates de démarrage végétatif par habitat et selon le niveau de seuil retenu, réalisé à titre d'exemple pour l'année 2001. L'écart-type diminue lorsque le seuil augmente de 0,1 à 0,2, et il est le plus faible pour les catégories CLC correspondant aux formations végétales ligneuses. Ces tests comparatifs entre jeux de données selon la première échelle d'analyse de l'étude permettent de sélectionner le jeu de données géostatistique le plus à même de correspondre aux dates de démarrage de verdissement. Ce dernier ne concerne donc que les pixels de végétation chlorophyllienne, arborée ou arbustive : forêts caducifoliées (23), de conifères (24), ou mixtes (24), landes et broussailles (27) ou forêts et végétation arbustive en mutation (29), à des seuils d'amplitude $\geq 0 ; 2$ (dernière ligne du tableau VI.4).

b) Valeurs centrales, paramètres de dispersion et matrice de corrélation

Le tableau VI.5 récapitule les traitements statistiques opérés à chaque niveau d'analyse, mis à part le premier traitement à l'échelle de la grille vecteur (explicité ci-dessus). L'indice de dureté du climat arctique est calculé pour chaque cellule de la grille. Cet indice, appelé ACHI (*Arctic Climate Harshness Index*), a notamment été proposé par Cornellissen et al. (2001) pour sa valeur prédictive à échelle régionale sur la concurrence entre les espèces végétales vasculaires et les strates muscinales (mousses, lichens) caractéristiques du biome de la toundra. Son calcul est relativement simple :

$$ACHI = (Latitude - 70) + \left(\frac{Altitude}{100}\right)$$

Tableau VI-5 : Liste des traitements effectués selon les échelons géographiques étudiés

Echelle grille vecteur	1- Matrice de corrélations (Spearman) sur variables : lat., long., orientation, altitude, indice ACHI, moyenne 2000-2013 dates de
-------------------------------	---

	démarrage de verdissement, Amplitudes NDWI 2- Valeurs centrales et de dispersion des dates de démarrage par habitat Max-Min_SPOT-VGT>0,1 , (2000-2013)
Echelle territoires saisonniers	1- Profils temporels des moy de dates de démarrage par habitat et par pâturage 2- Valeurs centrales et dispersion des dates de démarrage par habitat et par pâturage saisonnier
Echelle trajectoire pastorale	1- Valeurs centrales et de dispersion des dates de démarrage par habitat 2- Cartographie des moyennes de dates de verdissement par pixel de la trajectoire

A l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude, une matrice de corrélation est calculée entre les dates de démarrage de verdissement SPOT-VGT et différentes variables biophysiques : latitude, longitude, orientation, altitude, indice de dureté du climat arctique ACHI. Etant donné l'hétérogénéité des variables on préfère utiliser les coefficients de corrélation par rangs de Spearman plutôt que ceux de Bravais-Pearson. Un résumé statistique des dates de verdissement 2000-2013 est ensuite calculé pour chaque habitat écologique. Nous présenterons les valeurs centrales (moyenne, médiane) et les écart-types pour caractériser à échelle régionale les différences inter-habitats de dates de verdissement.

L'opération est répétée aux deux autres échelles d'analyse : pâturages saisonniers de la communauté Gabna et trajectoires pastorales des troupeaux telles que déclarées dans le *Reindeer Husbandry Plan*. La variabilité temporelle interannuelle sera appréhendée à travers l'extraction des profils temporels interannuels des habitats écologiques arbustifs et arborés composant les pâturages saisonniers. Malgré la brièveté de la période d'étude (2000-2013), nous vérifierons si des tendances temporelles linéaires peuvent être mises en évidence, dans le sens d'une précocité ou d'une tardivité croissante des dates de verdissement. Enfin, nous proposerons également un résumé statistique de la variabilité des dates de verdissement des cellules de la grille composant les trajectoires pastorales, représentatif de l'échelon local d'analyse. Nous aurons alors un aperçu de la continuité spatiale et temporelle au long du gradient altitudinal et biogéographique, et pourrons caractériser la synchronisation entre montée en estive des cheptels de rennes semi-domestiqués de la communauté Gabna et la montée en feuillaison des séries végétales vasculaires ligneuses. Le propos sera renforcé par la cartographie des moyennes de dates de verdissement pour chaque cellule composant les trajectoires pastorales.

C - Résultats

1) L'échelle régionale et ses caractéristiques topoclimatiques

a) Les dates de démarrage de verdissement respectant la répartition altitudinale des habitats écologiques ligneux

Le tableau VI.6 récapitule les valeurs centrales et les paramètres de dispersion des dates de verdissement pour les différents habitats écologiques où la végétation arborée et arbustive est dominante, au nombre de 5 à l'échelle régionale. Les paramètres centraux varient selon le type d'habitat écologique et les associations végétales les composant. Les occupations du sol caractérisant la forêt boréale (forêts et végétation arbustive en mutation, forêts de conifères, forêts mixtes feuillus-résineux) présentent les valeurs centrales les plus précoces, avec des dates moyennes et médianes de verdissement comprises entre les jours 153 et 154 (début du mois de juin).

La date moyenne de démarrage pour les « forêts de feuillus » (23) est plus tardive (158^{ème} jour), étant donné la disparition progressive des forêts de conifères en montant en altitude et en latitude au profit des forêts de bouleaux (*Betula pubescens ssp. pubescens*, *B. pubescens ssp. tortuosa*). Enfin, les habitats d'altitude sont les plus tardifs (landes et broussailles associant des espèces caducifoliées, comme *Betula nana*, et des Ericacées sempervirentes), avec en moyenne une semaine de retard sur les habitats écologiques forestiers, situés aux plus basses altitude et latitude.

Les moyennes et les médianes, arrondies à l'unité, sont proches avec un différentiel maximal d'une journée, en particulier pour les forêts mixtes (25). La dispersion des données est plus marquée pour les forêts de feuillus, dont les cortèges floristiques varient selon la altitudinale et hydrotopographique. A l'échelle régionale de la communauté d'éleveurs de rennes, la distribution des dates de démarrage de verdissement semble ainsi suivre le gradient altitudinal.

Tableau VI-6 : Valeurs centrales et écart-types arrondis des dates moyennes de verdissement par habitat écologique (échelle régionale)

Habitats CLC06 (code)	Moyenne 2000-2013 par habitat (chiffre arrondi à l'unité)	Médiane (chiffre arrondi à l'unité)	Ecart-type
Landes et broussailles (27)	159	159	5

Forêts de feuillus (23)	158	158	6
Forêts de conifères (24)	154	154	5
Forêts mixtes (25)	154	155	5
Forêt, végétation arbustive en mutation (29)	153	153	5

b) Variables topoclimatiques explicatives et dates moyennes de verdissement 2000-2013

Le tableau VI.7 résume la matrice de corrélations de Spearman calculée à l'échelle régionale, sur le jeu de données incluant les cellules d'habitats forestiers et arborescents, avec une amplitude NDWI $\geq 0,2$. On remarque de prime abord la haute significativité des coefficients de corrélation. Seulement six d'entre eux présentent des p-values non significatives, tous les autres ayant un risque d'erreur inférieur à 0,0001. Le grand nombre d'observations (voir tableau VI.3) et de variables, ainsi que la nature discrète de certaines variables permettent d'expliquer cette remière constatation. La plus forte corrélation est observée entre l'altitude et l'indice de climat arctique (ACHI) qui en dérive (+0,9), ce qui était prévisible, puis entre la « moyenne 2000-2013 des dates de démarrage de verdissement », l'indice ACHI et l'altitude (+0,79 et +0,76, respectivement). A cette échelle régionale d'analyse, le gradient altitudinal constituerait ainsi un résumé statistiquement acceptable de la répartition des dates de démarrages de verdissement, nous permettant ainsi de considérer l'indice de dureté du climat arctique (ACHI) comme superflu dans l'explication du phénomène.

*Tableau VI-7 : Matrice de corrélation de Spearman sur le jeu de données « ampli_NDWI > 0,2 » ; ACHI : Arctic Climate Harshness Index ; * p-value <0.0001*

	Latitude	Longitude	Orientation	Altitude	ACHI	Moy 00-13 dates démarrage (jours)	Amplitudes NDWI dates de démarrages
Latitude	1	0,005	0,001	-0,438*	-0,348*	-0,447*	0,042*
Longitude	0,005	1	0,004	0,070*	0,455*	0,272*	0,221*
Orientation	0,001	0,004	1	0,012*	0,015*	-0,006	0,001
Altitude	-0,438*	0,070*	0,012*	1	0,904*	0,758*	-0,053*

ACHI	-0,348*	0,455*	0,015*	0,904*	1	0,791*	0,026*
Moy 00-13 dates de démarrage (jours)	-0,447*	0,272*	-0,006	0,758*	0,791*	1	-0,167*
Amplitudes NDWI dates de démarrage	0,042*	0,221*	0,001	-0,053*	0,026*	-0,167*	1

2) L'échelon infrarégional des pâturages saisonniers : forte variabilité interannuelle et tendance à la précocité des dates de verdissement ?

a) Des moyennes zonales respectant le gradient altitudinal

Le tableau VI.8 présente les moyennes de dates de démarrage selon les habitats écologiques à dominante arborée et arborescente qui composent les 4 pâturages saisonniers étudiés. On remarque l'absence de certains habitats selon le pâturage saisonnier considéré. Seul le pâturage d'hiver regroupe toutes les catégories forestières et buissonnantes étudiées, du fait de son étendue géographique et écologique (~4545 km²).

Au regard des valeurs moyennes par pâturage saisonnier, on retrouve en partie le gradient de précocité déjà souligné à l'échelle régionale : les pâturages hivernaux, en marge nord du biome de taïga, présentent les dates de verdissement les plus précoces, tous habitats écologiques confondus. Les formations végétales –et indirectement les ressources pastorales– succédant à la période de vèlage et précédant le rut automnal démarrent plus tardivement, par comparaison avec les dates de verdissement des pâturages hivernaux. Dans les pâturages de début d'été, la position topographique des forêts de feuillus à basse altitude, dans des vallées abritées et à proximité des plans d'eau pourrait expliquer leur date de démarrage plus précoce que celle observées dans les pâturages d'été. Les relevés botaniques de terrain ont notamment révélé la présence d'espèces mesothermophiles, à aire de répartition européenne ou eurasiatique (*Alchilea millefolium*, *Filipendula ulmaria*, *Melampyrum pratense*, *M. sylvaticum*, *Paris quadrifolia*, *Sorbus aucuparia*) voire l'abondance de ces espèces (*Trollius europaeus*). Ces espèces sont également mentionnées dans la base de données floristiques de la SLU dans l'ensemble des vallées de la région. Le décalage se produit en sens inverse pour les landes localisées sur des bas de versants et démarrant plus tôt dans les pâturages d'été que dans ceux de printemps, où elles sont localisées sur des plateaux exposés au vent dominant.

Les dates de démarrage les plus tardives correspondent sur le terrain aux pelouses d'altitude, qui ont été éliminées de l'analyse.

Tableau VI-8 : Moyennes 2000-2013 des dates de démarrage phénologique des habitats écologiques composant les différents pâturages saisonniers de la communauté Gabna

	Forêts de feuillus (23)	Forêts de conifères (24)	Forêts mélangées (25)	Landes et broussailles (27)	Forêt et végétation arbustive en mutation (29)
Pâturage d'hiver	155	153	154	155	152
Pâturage de printemps	160	162	161	169	Non concerné
Pâturage de pré-été	158	Non concerné	Non concerné	160	Non concerné
Pâturage d'été	160	Non concerné	Non concerné	163	Non concerné

b) Une forte variabilité interannuelle et inter-habitats, mais des tendances temporelles peu marquées

La figure VI.2 représente en abscisse les années concernées par le suivi des dates de démarrage, et en ordonnée les dates de démarrage de verdissement. Les observations sont agrégées selon les catégories d'habitats de forêts et de landes composant les quatre pâturages saisonniers. Dans les pâturages hivernaux, la variabilité inter-habitats reste faible, à l'exception de l'année 2011 où le décalage phénologique est fort, entre le 139^{ème} jour (pixels de l'habitat « Végétation arbustive en mutation »), et le 155^{ème} pour les landes et broussailles. En revanche, la variabilité interannuelle pour chaque est particulièrement élevée, avec une amplitude d'environ 15 jours, voire 20 jours pour les forêts de conifères, entre l'année la plus précoce (2011), et l'année de démarrage végétatif la plus tardive (2005).

Dans les pâturages de printemps, on observe un retard phénologique d'une dizaine de jours des habitats de landes, par rapport aux habitats forestiers. Ces derniers verdissent entre

le 150^{ème} et le 167^{ème} jour, c'est-à-dire au cours de la première quinzaine de juin, alors que d'après l'organisation saisonnière des pâturages, les cheptels arrivent dans celui de printemps au 91^{ème} jour, pour le quitter au 151^{ème} jour (fin mai). Trois années sur 14, les rennes quittent ce pâturage au moment du démarrage végétatif de la canopée des arbres. On peut faire l'hypothèse qu'ils consomment les jeunes pousses herbacées, les bourgeons et jeunes feuilles d'arbustes caducifoliés ayant poussé en sous-bois, avant le débouillage des feuilles. Toutefois, 5 années sur 14, le débouillage des feuilles de ligneux se produit 15 à 16 jours après le départ des rennes, et l'on peut douter que les pousses herbacées aient été suffisantes.

Dans les pâturages de pré-été, fréquentés au mois de juin, entre le 152^{ème} et le 181^{ème} jour, incluant la période de vèlage, les dates de démarrage varient peu en fonction des habitats, mais très fortement selon les années, jusqu'à 40 jours de différence entre l'année la plus précoce (2002-146^{ème} jour) et la plus tardive (2000 : 165-168^{ème} jour). La quantité de pousses herbacées et de bourgeons précédant la foliaison de la canopée semblent donc variables en fonction de l'occupation du sol et de l'année, obligeant les rennes à se déplacer aléatoirement chaque année à la recherche de jeunes pousses, pendant une période délicate de leur cycle biologique (vèlage, et début de reconstitution des ressources grasses).

Dans les pâturages d'été, fréquentés théoriquement à partir du jour 152, mais plus probablement après la mi-juin et le marquage des faons, c'est-à-dire entre le 166^{ème} et le 212^{ème} jour (mi-juin à fin juillet) ; on observe un décalage phénologique d'environ 5 à 10 jours entre les forêts de feuillus et les landes 9 années sur 14, alors que le démarrage végétatif est synchrone les 5 autres années. Si l'on tient compte du démarrage plus précoce des pousses herbacées et des bourgeons d'arbustes que celui de leur couverture forestière, le verdissement des forêts serait trop précoce 6 années sur 14, mais 3 années sur 6, cela est compensé par un démarrage plus tardif des landes. Bien que nous n'ayons pas pu calculer les dates de démarrage des pelouses situées en altitude, elles constituent un réservoir de ressources appétissantes pour la fin de la période. Les rennes doivent donc se déplacer en altitude pendant cette période afin d'accompagner le décalage phénologique des différents habitats.

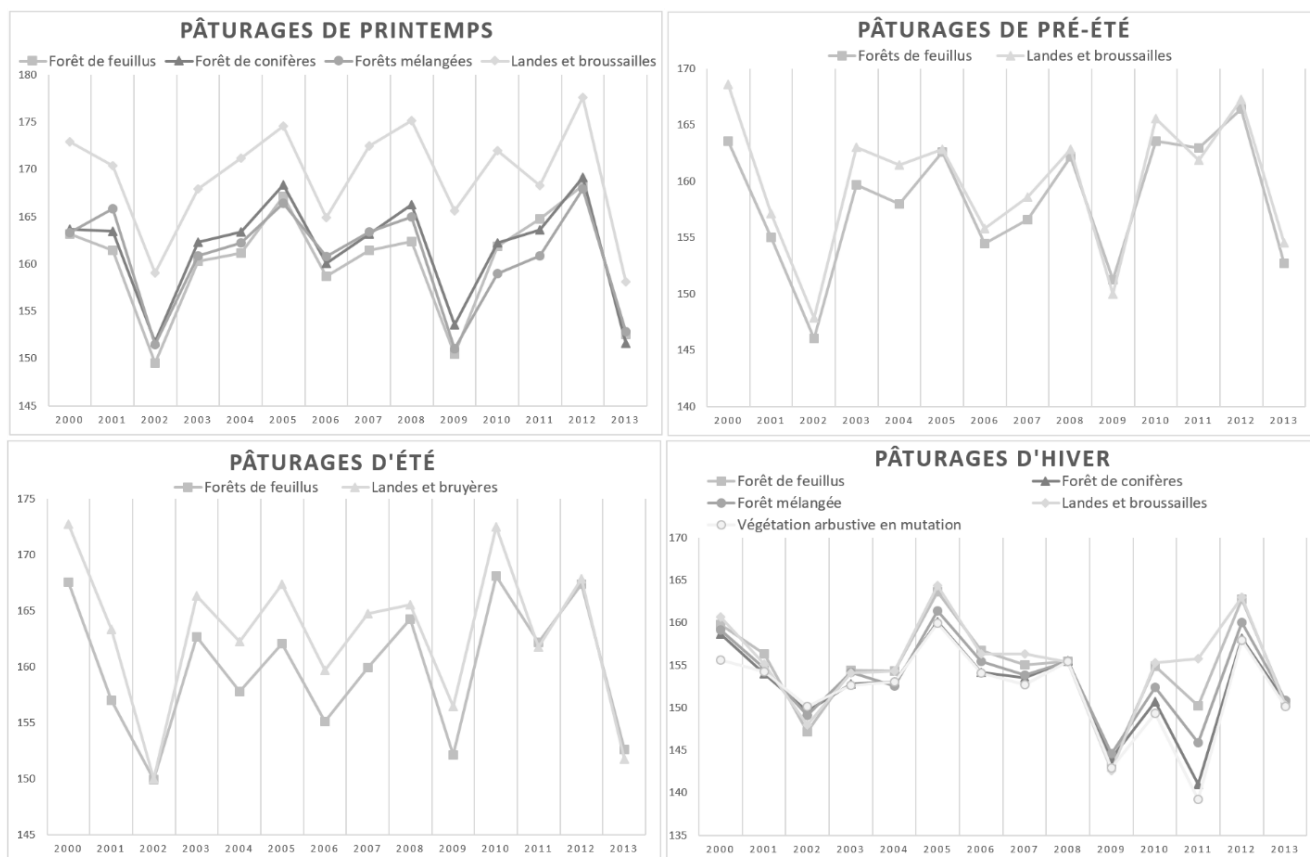


Figure VI-2 : Profils temporels des moyennes de jours de démarrages de verdissement par classe d'habitats des pâturages saisonniers

Lors de missions de terrain, nous avons observé à la mi-juin 2016 que la strate herbacée et les bouleaux nains sous forêt de bouleaux pubescents (dans des relevés situés entre 448 et 544 m d'altitude) étaient déjà bien développés, alors que les arbres n'étaient pas encore totalement feuillés. Dans les landes et les clairières, les bouleaux nains étaient déjà entièrement feuillés, et cette espèce fait partie des rares espèces ligneuses à être apettante pour les rennes. En revanche, dans les zones d'altitude (1048m), la neige était encore présente par plaques, les jeunes pousses peu visibles, les bouleaux nains particulièrement petits et rabougris. En juillet 2015, la végétation d'altitude, landes et pelouses, était en plein développement végétatif, et la plupart des espèces avaient atteint le stade de la floraison. Il serait intéressant de confronter ces observations de terrain aux données satellitaires de la même année. Cette analyse montre donc qu'il y a généralement une assez bonne synchronisation, mais qu'un nombre non négligeable d'années, elle serait moins optimale.

Dans le but de détecter une éventuelle tendance à la précocité des dates de démarrage de verdissement, et malgré le nombre restreint d'observations annuelles pour cette série

temporelle (2000-2013), les coefficients directeurs des modèles linéaires sont calculés, à chaque échelle de l'étude. Aucun modèle linéaire n'est significatif, du fait de la faiblesse du nombre d'individus statistiques (14). A l'échelle du pâturage d'hiver, la tendance linéaire pour les habitats de forêts de conifères est la plus marquée, avec un coefficient directeur de 0,46. Ces résultats, bien que statistiquement non significatifs (p -value > 0,05), suggèrent une tendance temporelle à la précocité des dates de démarrage de verdissement des formations végétales ligneuses, en particulier pour le pâturage d'hiver et les forêts de conifères qui la caractérisent.

3) Des trajectoires pastorales se démarquant par leur progressivité spatiale et temporelle selon les dates moyennes de verdissement

a) Caractérisation du résumé statistique par habitat écologique

Après les analyses aux échelles régionales et intermédiaires, nous présenterons ici les résultats ayant trait aux observations de la grille vecteur contenant le tracé des trajectoires de migration annuelle des cheptels de rennes semi-domestiqués de la communauté d'éleveurs Gabna. Le tableau VI.9 résume statistiquement les jours de verdissement selon l'habitat écologique concerné à l'échelle des trajectoires pastorales. On y retrouve une fois de plus la gradation altitudinale progressive, rétroactivement due à la contrainte thermique et à la répartition des habitats écologiques au long de ce gradient. Les catégories de forêt et végétation arbustive en mutation et de forêts de conifères sont en moyenne plus précoces que les landes et broussailles, traduisant l'opposition entre les habitats écologiques d'altitude et les habitats de taïga.

Tableau VI-9 : Valeurs centrales et écart-types de la série temporelle 2000-2013 des moyennes de dates de démarrage par habitat écologique pour les trajectoires pastorales de la communauté Gabna

	Moyenne 2000-2013 par habitat	Médiane	Ecart-type
Landes et broussailles (27)	159	160	6
Forêts de feuillus (23)	157	158	5
Forêts de conifères (24)	154	154	5
Forêts mixtes (25)	154	154	5
Forêt, végétation arbustive en mutation (29)	153	152	5

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

La comparaison entre les dates moyennes de verdissement obtenues à l'échelle régionale et le long de la trajectoire montre que la trajectoire pastorale reprend la gradation progressive des dates de démarrage de verdissement observé dans l'ensemble de la zone : en moyenne jour 153 pour la végétation arbustive en mutation, contre le jour 159 pour la catégorie de landes et broussailles (tableau VI.9 et VI.6). Les moyennes et médianes par habitat sont décalées d'une journée. Pour les deux premiers habitats, majoritairement situés dans les pâturages printaniers ou estivaux d'altitude, la moyenne est inférieure à la médiane, dénotant une distribution où sont sur-représentée les dates de démarrages tardifs. La synchronicité entre l'arrivée des cheptels et le démarrage végétatif semble globalement respectée. Ceci dit pour les pâturages d'altitude la consommation des herbaées expliquerait cette relative sur-représentation des dates de démarrage tardives pour les forêts de feuillus et landes.

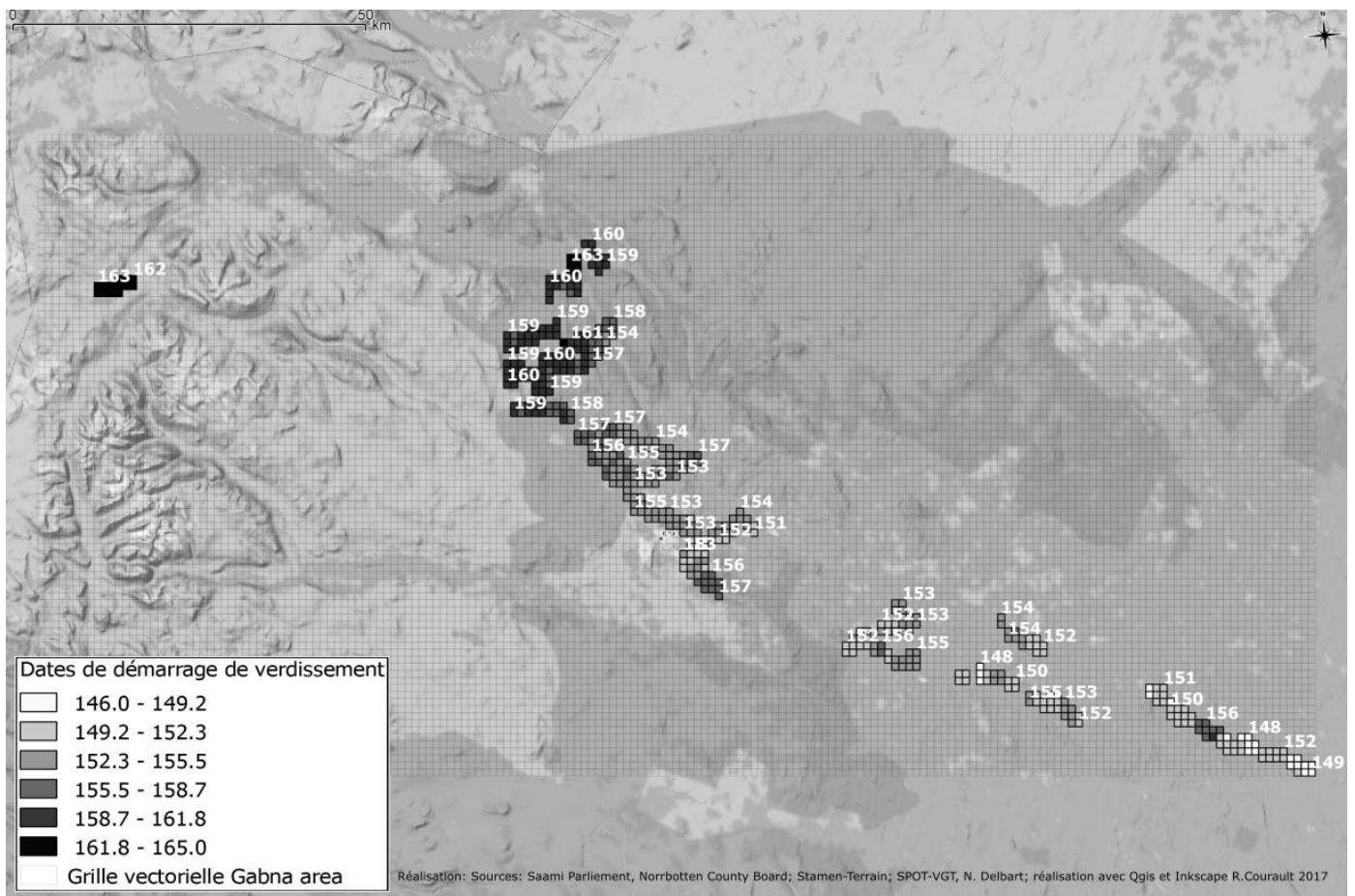


Figure VI-3 : Cartographie de la moyenne 2000-2013 de dates de démarrages phénologiques par groupe de cellules composant la trajectoire pastorale de migration annuelle Gabna (Réalisation R. Courault, 2017)

b) Représentation cartographique des dates de verdissement pour les trajectoires pastorales

La figure VI.3 propose une cartographie des dates moyennes 2000-2013 de démarrage phénologique par cellule (du jeu de données où l'amplitude NDWI est $>0,2$) composant les trajectoires pastorales. Elle illustre les résultats des différents traitements statistiques : l'extrémité sud-est des trajectoires est associée à des dates moyennes de démarrages phénologiques inférieures à 149 (début-juin), tandis que l'extrémité nord-ouest, représentant l'apogée estivale de la gyre migratoire présente des dates moyennes proches de 165 (mi-juin). Une quinzaine de jours sépare ainsi le démarrage de verdissement des formations végétales d'hiver comparativement au démarrage des formations végétales d'été en altitude.

La discrétisation en 6 classes souligner l'augmentation conjointe de l'altitude et des jours de démarrage de verdissement. Elle renforce ainsi le constat de la synchronisation entre la localisation des cheptels sur les pâturages saisonniers et le démarrage phénologique des espèces végétales vasculaires prioritairement consommées par les ongulés au cours de la

saison végétative disponible (Poacées, jeunes pousses de Bouleaux). La visualisation de la trajectoire sur le MNT confirme nos hypothèses sur la mobilité des rennes le long des versants des pâturages d'été, ainsi que sur les limites de l'indice de verdissement, qui traduit assez mal l'émission de jeunes pousses herbacées, des bourgeons et de débourrage des arbustes au début du printemps.

D - Conclusions, discussions et perspectives

Les premières conclusions ont une forte dimension méthodologique. A échelle régionale, la sélection du jeu de données, basée sur les amplitudes NDWI, a confirmé l'hypothèse de départ du lien entre distributions d'amplitude NDWI et les habitats écologiques forestiers et arborescents (Corine Land Cover). La génération d'une grille vecteur s'est avérée une option intéressante pour la constitution d'une base de donnée majoritairement composée de données raster, et la mise en traitement statistique de données temporelles. Le nombre élevé d'observations constitue un avantage certain, et l'export facile de la table attributaire sur un logiciel de type tableur rend flexible le choix des calculs statistiques à mettre en place. Une perspective intéressante serait le développement sous SIG d'outils permettant de rendre automatiques certains prétraitements (génération de grille vecteur régionale, des centroïdes de polygones associés, d'extraction et d'élimination des valeurs aberrantes). Cependant, l'échantillonnage standardisées de données matricielles particulièrement hétérogènes du point de vue de leur résolution spatiale mérite d'être plus amplement exploré, du point de vue de l'erreur statistique générée et imputable à ce biais. Si une partie de ce biais statistique a été réduit dans la quatrième partie (chapitre XI), une recherche (bibliographique, mais aussi statistique) plus poussée permettra de mieux asseoir cette méthodologie de croisement de données raster dynamiques et statiques, et ainsi d'améliorer la compréhension de la réponse des systèmes (socio-) écologiques aux effets des changements globaux étudiés. En effet, la taille minimale des aires cartographiées par Corine Land Cover est quatre fois moindre que la taille du pixel SPOTVEG. Le MNT à haute résolution (30 m) a été préféré à un MNT plus grossier (à 1 km) pour éviter la non concordance entre les pixels de MNT et SPOTVEG, qui risquait de générer une erreur systématique.

Thématiquement, nos résultats ont confirmé des hypothèses fortes, comme la matérialisation par notre jeu de variables des gradients thermiques observés dans notre zone

d'étude. L'analyse multi-échelle des dates de verdissement (SPOT-VGT) et ses descripteurs potentiels a mis en évidence le gradient altitudinal particulièrement prégnant dans cette interface entre les biomes de taïga et de toundra (Forbes, Kumpula, et al., 2009). L'intérêt des indices de végétation, souligné par maints auteurs, (Bokhorst, Tømmervik et al., 2012; Couturier, Côté et al., 2009; Delbart, Kergoat et al., 2005 ; Petorelli, Vik et al., 2005, 2011), a ainsi été confirmé pour l'approche fonctionnelle des gradients thermiques.

On a pu vérifier la bonne synchronisation d'ensemble entre pâturages saisonniers, trajectoires pastorales cognitives et avancée progressive des dates de verdissement au fur et à mesure de la montée en estive, rejoignant les travaux de Forbes, Kumpula et al. (2009), constat nuancé par la forte variabilité inter-annuelle. Toutefois, les indices de végétation ont aussi montré leurs limites pour déterminer la date d'émission des pousses herbacées et du débouillage des feuilles des buissons et arbustes caducifoliés, a fortiori lorsqu'ils se trouvent en sous-strate. Ceci alors que nous avons montré le lien entre le NDVI lors du démarrage végétatif des tourbières et les effectifs de rennes (Chapitre V). Mårell et Ball (2002) ont observé la sélection par les rennes femelles d'habitats contenant une forte biomasse en bouleaux et saules et la forte valeur nutritionnelle de *Betula nana* L., *Eriophorum angustifolium* L., *Rumex acetosa* L., et *Vaccinium myrtillus* L. en début de période végétative (Mårell 2006). Contrairement aux travaux de Delbart, Kelgoat et al. (2005), menés dans l'ensemble du biome de la taïga eurasiatique, aucune tendance significative à la précocité croissante des dates de verdissement n'a pu être démontrée pour notre région d'étude.

Pour finir, les trajectoires pastorales ne reflètent que très indirectement les déplacements réels de *Rangifer tarandus*, étant reconstituées, après recherche d'un accord avec les parties prenantes représentant les activités occupant le même espace que l'élevage des rennes (voir aussi Chapitres 1 et 2), et l'observation des processus de semi-domestication (rassemblements des troupeaux en intersaison, utilisation des camions, hélicoptères, etc...). La variabilité interannuelle de la disponibilité des ressources végétales, détectée dans la présente étude est non seulement compensée par les pratiques d'élevage, mais aussi par une adaptation du comportement spatial et alimentaire des cheptels à l'irrégularité des dates de démarrage végétatif. Brännlund et Axelsson (2011) ont montré que l'utilisation flexible de zones de pâturages parmi les communautés étudiées était la stratégie d'adaptation historiquement utilisée par les éleveurs Saamis, face aux changements géohistoriques ayant lieu au cours du XIX^{ème} siècle en Laponie suédoise (colonisation et limitation de l'accès aux

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

pâturages). Pour la période actuelle, Mårell & Edenius (2005) montrent que l'hétérogénéité spatiale forte des paysages de la communauté de Gabna (en situation de double écotone, latitudinal et altitudinal) est associée à un comportement de nourrissage sélectif de la part des rennes. Ils insistent sur la nécessité de conserver des paysages ayant une distribution spatiale continue à l'échelle de la communauté, cette variabilité paysagère « douce » permettant de nombreux choix d'habitat. Ceci est relativement contradictoire avec la fixation de contours de pâturages saisonniers dans la base de données géographique RenGIS 2.0, à laquelle les éleveurs de rennes Saamis ont dû se plier (chapitre II). Il serait intéressant de mener quelques entretiens auprès des acteurs locaux portant spécifiquement sur le comportement spatial du renne pendant la période végétative afin de comprendre l'ajustement du système pastoral pour les années se démarquant par leur tardivité ou précocité. L'exploitation des traces GPS des cheptels nous autoriserait à souligner le lien entre dates de démarrage, choix d'habitats et régime alimentaire des ongulés, comme cela a déjà été expérimenté dans d'autres études (Courault, Francllet et al., 2017, chapitre XII ; Skarin, Danell et al., 2008). Enfin, la détermination du décalage phénologique entre la pousse de la strate herbacée et arbustive, et le verdissement de la canopée pourrait s'appuyer sur la recherche de seuils thermiques (en degré jour, comme cela a été fait dans l'archipel du Svalbard par Joly, Arnesen et al., 2016). On pourrait ainsi caractériser le comportement migratoire des cheptels de rennes d'après différents facteurs (extrinsèques : climat, météo, Homme ; intrinsèques : accessibilité et disponibilité en ressources végétales).

Transition entre le chapitre VI et le chapitre VII

Le chapitre précédent caractérisait la variabilité spatio-temporelle des dates de démarrage de verdissement de pixels SPOT-VGT (Delbart, Kelgoat, 2006). Celles-ci semblait effectivement respecter la répartition latitudinale et altitudinale des formations végétales ligneuses à l'échelle des territoires de la communauté d'éleveurs Gabna. La variabilité temporelle dans les dates de verdissement sur la période d'étude renforçait le constat de l'organisation biogéographique des paysages constitutifs de la communauté Gabna : des forêts de conifères au sud-est ayant des dates de démarrage de verdissement plus précoces que les prairies d'altitudes du nord-ouest des pâturages estivaux de la communauté. Ce constat, adossé à la cartographie des dates de verdissement à l'échelle des flux migratoires des troupeaux de rennes Gabna, en partie déclarés et cartographiés par les éleveurs, renforçait celui de l'optimisation biogéographique et climatique annuelle dans la migration saisonnière des cheptels : globalement, la progressive montée en transhumance des rennes semi-domestique semble bien s'associer à l'avancée progressive des dates de démarrages de verdissement. A l'échelle interne des pâturages saisonniers, la concordance entre dates d'arrivées théoriques des cheptels, basés sur le calendrier pastoral, a notamment montré la forte variabilité spatiale des dates de démarrage pour les pâturages d'hiver. L'examen des tendances temporelles (2000-2013) ne signaient cependant pas d'évolution significative à la tardivité ou à la précocité de ces dates de verdissement entre le début et la fin de la période d'études.

Le chapitre suivant évalue également l'évolution temporelle de sous-produits d'images satellite. Au regard des derniers chapitres, les paysages végétaux soumis fortement à la variabilité bioclimatique interannuelle, sont affectés différemment du point de vue de leur évolution temporelle : évolution positive particulièrement marquée dans les paysages de forêts de conifères (foresterie) ; évolution négative particulièrement bruitée dans les landes arbustives et les prairies des pâturages d'été. L'examen des dates de démarrage de verdissement, doublement examinée dans les chapitres V et VI, souligne l'hétérogénéité de la réponse temporelle végétale au changement climatique actuel : forêts de Bouleaux dont le NDVI semble baisser avec le temps ; zones de végétation en mutation (sylviculture) en augmentation. A l'aide du suivi diachronique de l'évolution spatiale du NDVI à résolution

spatiale moyenne (Landsat), le chapitre VII suivant cherchera à approfondir ces réponses biologiques différenciées. Le suivi des superficies de différentes unités pastorales (pâturages saisonniers et aires de vèlage par exemple) permettra de quantifier et de cartographier plus finement l'évolution spatiale et temporelle de ce double écotone latitudinal / altitudinal. Nous pourrons ainsi identifier des unités pastorales où la (re)conquête végétale éventuellement décelée par l'examen diachronique Landsat pourrait être quantitativement importante, et signifiante pour la migration et les ressources pastorales végétales de *Rangifer tarandus*.

VII - Suivi diachronique de l'évolution de la végétation par satellite de moyenne résolution spatiale (capteur LANDSAT) de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna (comté du Norrbotten, Suède)

A - Introduction

Les chapitres précédents ont montré la variabilité temporelle de la réponse phénologique des paysages végétaux de la communauté Gabna d'éleveurs de rennes semi-domestiques, à travers le suivi de deux indices de végétation (NDVI, NDWI). Ces indices se caractérisaient par leur forte répétitivité temporelle, et une résolution spatiale modérée (de l'ordre de la centaine de mètres). Ici, les sous-scènes issues des missions successives Landsat au cours d'une période de 30 ans et avec une résolution spatiale plus fine (pixel de 30 m de côté) nous servent à représenter au sein des limites de la communauté Gabna l'évolution temporelle du NDVI, exprimant celle de la biomasse et de l'activité chlorophyllienne des végétaux composant les paysages de ce système pastoral. La situation d'écotone spatio-temporel dans laquelle la communauté de Gabna a évolué ces dernières années est, nous l'avons vu, intéressante quant à l'identification de la réponse des formations végétales vis-à-vis des changements globaux (fragmentation paysagère des pâturages d'hiver, Chapitre 2 ; augmentation de la biomasse arborescente et arborée pour les topo-climats des pâturages de saisons chaudes, Chapitre V). Les effets quantifiés du changement climatique actuel sur les écosystèmes subarctiques et arctiques, les communautés végétales et en particulier les ressources pastorales de *Rangifer tarandus* L., sont notamment évoqués dans le chapitre introductif. Contrairement aux tests de tendance de Mann-Kendall opérés dans le chapitre V, il s'agit ici de tenter de rendre compte de l'évolution spatiale des végétaux chlorophylliens à l'échelle de la communauté. Au vu de l'augmentation des températures annuelles marquée dans la région depuis la fin des années 1980 (Chapitre III), on pose l'hypothèse que les superficies de différents territoires saisonniers et d'intérêt pastoral important de la communauté Gabna ont un indice de végétation NDVI (discriminant un état de surface végétal : couvert herbacée, ligneux bas, ligneux hauts) en augmentation avec le temps. Notre période d'étude commence justement en 1990, soit immédiatement après la rupture observée dans les séries temporelles de températures (Chapitre III) et termine en 2017. On suppose que

les valeurs de NDVI supérieures à certains seuils augmenteront en superficie pour l'ensemble des pâturages et zones à intérêt pastoral.

Trois volets sont ainsi développés au long de cette étude. Le premier cherche à solidifier la discrimination du couvert végétal, décrite couramment en biogéographie et en écologie : formations végétales dominées par un couvert d'herbacées (prairies alpines), couvert de ligneux – bas (landes), couvert de ligneux – hauts (forêts de Bouleaux, toundra arborée ; forêts de Pins et d'Épicéas). Les seuils de NDVI Landsat ont été déterminés grâce à l'accès en accès libre aux bases de données *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF) et s'appuient sur les observations de présence, ou d'absence d'espèces floristiques indicatrices des formations végétales, observées par les chercheurs suédois sur les pâturages de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna. Chen, Lu et al. (2015) ont pour leur part utilisé les images Landsat pour estimer l'augmentation de l'abondance de *Pinus* et *Juniperus* dans la chaîne des Tianshan, en Chine entre 1990 et 2010. Une fois ce point méthodologique effectué, le deuxième volet de cette étude cherche à quantifier l'évolution temporelle des superficies de différents seuils de NDVI (dont on aura au préalable recherché la représentativité des stades écologiques) pour les pâturages saisonniers, l'aire de vêlage et de rut/oestrus notamment délimités par les éleveurs de rennes de la communauté Gabna. Enfin, nous essaierons dans une troisième partie de l'étude de mieux saisir l'évolution des températures mensuelles, qui sont structurantes dans la dissémination et la croissance en hauteur des végétaux, trait dont Bjorkman et al. (2018) ont montré les liens avec le réchauffement climatique à l'échelle de l'Arctique. Différents tests statistiques temporels, déjà éprouvés en première partie, nous permettront de caractériser l'évolution des températures mensuelles de la station d'Abisko sur le pas de temps de la prise d'images satellites Landsat (1990-2017). La discussion des résultats tentera de mettre en lien l'évolution des températures à différents moments-clés de la phénologie des formations végétales, notamment évoquées dans les chapitres précédents (démarrage, pic, mais également évolution des températures hivernales pendant la dormance de la végétation).

B - Matériel et méthodes

La démarche générale est présentée dans la figure VII.1 ci-dessous. Ce modèle conceptuel distingue trois grandes catégories de données, traitements et résultats. Les métadonnées liées aux différents jeux de données exploités dans cette étude sont disponibles dans le tableau VII.1.

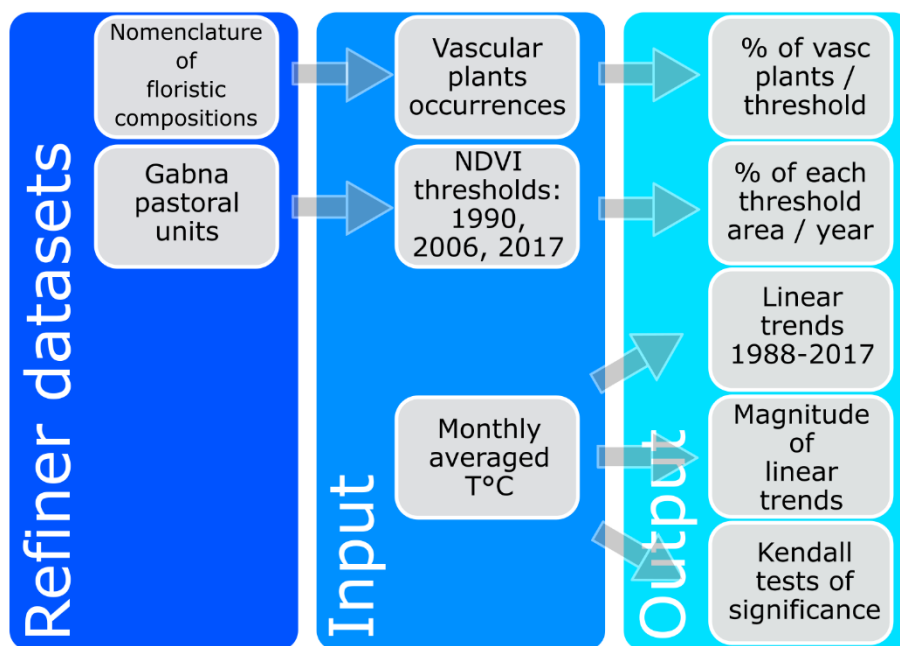


Figure VII-1: Modèle conceptuel de présentation de la démarche générale opérée pour la présente étude (Réalisation: R. Courault, 2018)

La démarche générale est présentée dans la figure VII.1. Ce modèle conceptuel distingue trois grandes catégories de données, traitements et résultats. Les métadonnées liées aux différents jeux de données exploités dans cette étude sont disponibles dans la tableau VII.1. Les unités pastorales de la communauté d'éleveurs de rennes semi-domestiques Gabna représentent le point de départ de cette étude qui porte sur l'évolution du diachronique du NDVI Landsat à plusieurs échelles, et par extension de la densification et de la remontée en altitude du couvert végétal. La nomenclature suédoise des formations végétales nous a servi à identifier et sélectionner les végétaux représentatifs de la physionomie des formations végétales de la zone d'étude. A partir de ces données entrantes (données floristiques, imagerie Landsat), différents seuils de NDVI sont testés. Les présences d'espèces floristiques représentatives sont quantifiées pour chacun des seuils de NDVI. On évalue également les

superficies d'évolution temporelle des seuils de NDVI utilisés. Conjointement avec le suivi diachronique du NDVI Landsat à l'échelle de la communauté Gabna, les moyennes mensuelles de températures de surface sont prises en compte dans l'étude. Trois méthodologies statistiques ont pu être menées sur les températures, notamment la régression linéaire simple, l'amplitude entre la température la plus faible et la plus forte exprimée par le modèle linéaire temporel, et enfin la significativité de ces tendances avec le facteur explicatif temporel présumé.

Tableau VII-1 : Métadonnées des jeux de données utilisés au cours de l'étude

Type de données	Source	Format	Période temporelle	Résolution spatiale ou thématique
Informations géographiques sur l'élevage de rennes suédois	Parlement saami suédois (https://www.sametinget.se/111684)	Polygone – shapefile	2012	Communauté Gabna; pâtures saisonnières ; aires de vèlage, de rut et de repos
Couverture des sols	Agence Européenne de l'Environnement (https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover)	Raster	2006	100 m
Indice de végétation -NDVI	USGS (https://earthexplorer.usgs.gov)	Raster	15 juillet 1990 - 27 juillet 2006 - 25 juillet 2017	30 m
Températures moyennes mensuelles (°C)	NCDC – NOAA (https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/)	CSV	1988-2017	Station météorologique d'Abisko
Occurrence d'espèces végétales clés de voûte	Global Biodiversity Information Facility (https://www.gbif.org/dataset/search)	CSV	1968-2016	Extension large de la communauté Gabna (longitude = 18.1 – 22.1 ; latitude = 67.4 – 68.5)
Répartition des formations végétales	GSD Lantmäteriet; Swedish Land Survey (https://www.geodata.se)	Polygon - shapefile	2008	Comté du Norrbotten (code #BD) and zones montagneuses (tile #2)

a) Données pastorales

Les jeux de données pastorales sont issus du projet RenGIS 2.0, disponible sur les sites web des comtés suédois (*Länsstyrelserna*) et du Parlement saami suédois (*Sametinget*). Le projet rassemble de nombreuses informations géographiques sur l'élevage de rennes suédois. Ces informations sont ici représentées par les limites de la communauté étudiée, les pâturages saisonniers et des zones délimitées par les éleveurs, représentant des moments précis de la biologie des troupeaux de rennes (vêlage, repos, rut). Les données sont exportables en couches shapefiles à partir du logiciel RenGIS 2.0, et transformée en projection cartographique WGS84-UTM 34N pour le projet SIG réunissant d'autres jeux de données environnementaux. L'étude utilise à la fois Quantum GIS 2.18 et ArcMap 10.4. Sur les huit pâturages saisonniers qui composent la communauté Gabna, les pâturages d'intersaison se distinguent par la même forme, et la même extension géographique (figure VII.2). Ainsi, dans les analyses ultérieures de l'étude, les pâturages de printemps représenteront également les pâturages de pré-hiver, de pré automne et d'automne.

b) Données raster

Les images Landsat sont téléchargées sur le portail Earth-Explorer mis à disposition par l'USGS. Trois dates ont été choisies : le 15 juillet 1990 ; le 27 juillet 2006 et le 25 juillet 2017. Deux capteurs Landsat sont ainsi exploités, selon la période d'acquisition des images : Landsat 5 TM (pour les images de juillet 1990 et 2006) et Landsat 8 OLI pour juillet 2017. Ces années ont été choisies pour détecter les changements de couverts végétaux sur plus de 10 ans, ainsi que du fait de la disponibilité d'images Landsat de qualité (couverture nuageuse). Les mois de Juillet sont pris de façon préférentielle car la majorité des pics phénologiques annuels des paysages végétaux de cette région subarctique s'opère ce mois-ci. En effet, selon les séries temporelles SPOT-VGT (2000-2017) et à l'échelle du comté du Norrbotten, sur les dix-sept saisons végétatives détectées par le satellite, douze ont lieu en juillet. Les cinq autres pics se situent en août (<https://proba-v-mep.esa.int/applications/time-series-viewer/app/app.html>).

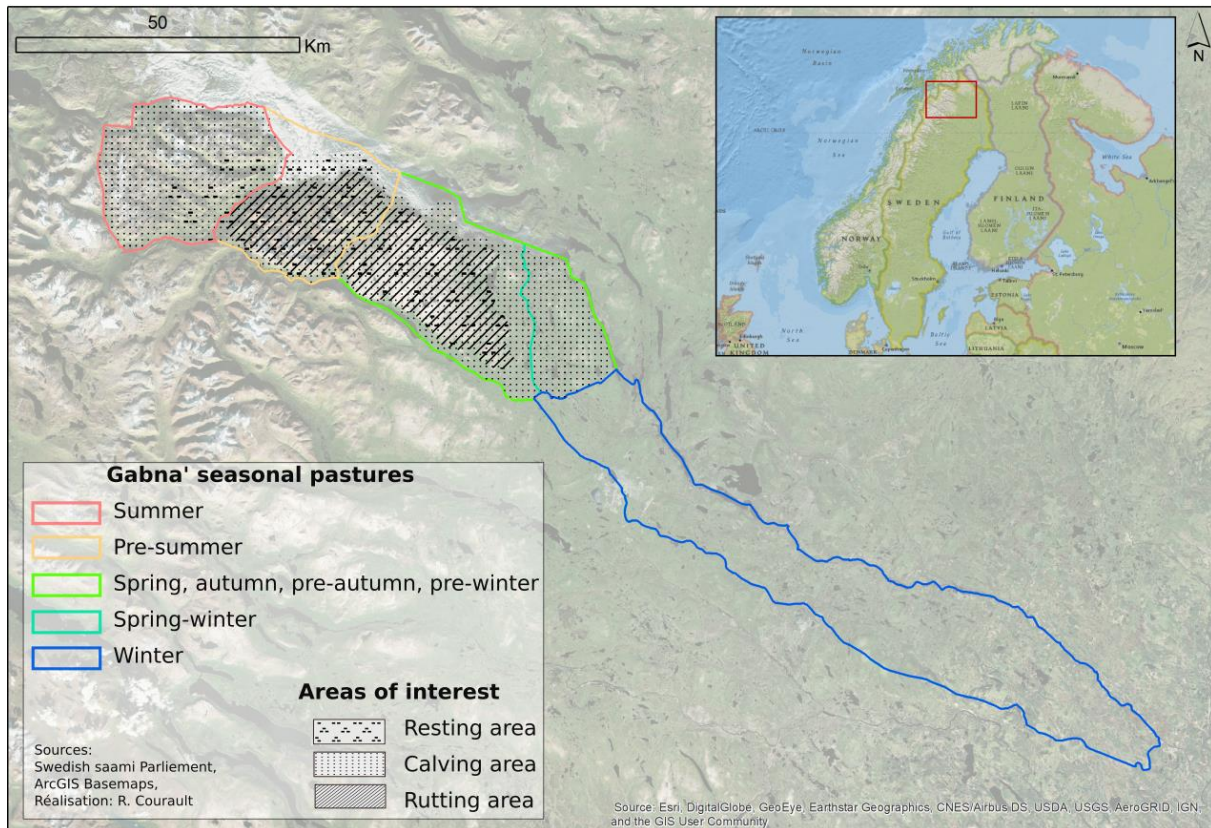


Figure VII-2: Cartographie des unités pastorales de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna étudiée: saisons pastorales et zones à intérêt pastoral (Réalisation R.Courault 2018)

Les données Landsat Surface Reflectance, Level-2 Science Products ont ainsi été téléchargées sur ces modalités. Comparé aux images Landsat exprimées en comptes numériques (fonds *Landsat Archives*), les réflectances sont ici privilégiées pour mieux évaluer et quantifier les changements de couverture végétale éventuellement détectés par ces images corrigées (*Landsat Users Guide*).

Une seule tuile Landsat a été téléchargée pour ces trois dates (1990, 2006, 2017). Celle-ci (WRS 2: path 197; row 002) a été choisie pour son extension raisonnable, qui couvre 77 % de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna. Même si la tuile sélectionnée ne couvre pas la totalité de l'étendue de la communauté Gabna (figure VII.2), nous avons fait le choix de ne pas télécharger d'autres jeux de données Landsat, du fait de dates non pertinentes, ainsi que de la haute couverture nuageuse souvent retrouvée pour ces images d'été, rendant difficile le mosaïquage éventuel et les prétraitements associés à l'échelle de l'ensemble des tuiles Landsat. Ainsi la perte en superficie (884,4 km²) résultant de ce choix doit être prise en compte, entre l'aire de la dalle Landsat (WRS 2 : path 197 ; row 002) couvrant la majeure partie de l'étendue de la communauté Gabna effectivement étudiée (2904 km²) et la superficie

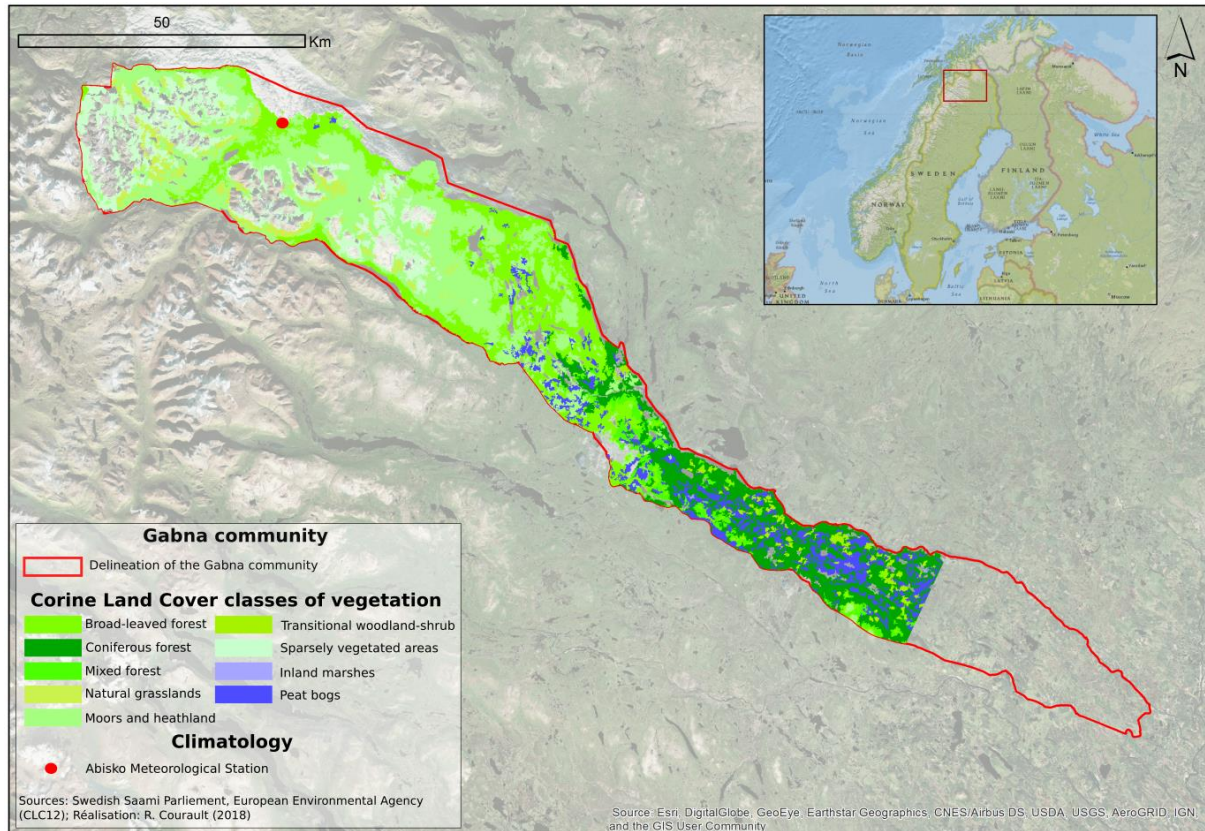
totale de celle-ci (3785,5 km²). Cette perte implique une part substantielle des pâturages d'hiver, avec 904,9 km² étudiés contre 1570,9 km² de surface totale effective.

Une fois les images acquises, celles-ci sont rééchantillonnées pour convertir les valeurs de pixels brutes en des réflectances exploitables (*Landsat Users Guide*). Deuxièmement, pour améliorer la discrimination de la végétation et éviter le bruit spectral dû à d'autres types de surfaces (eau de fonte, surfaces artificielles, etc), un masque est appliqué sur les jeux de données Landsat en utilisant la classification des habitats et occupation des sols Corine Land Cover 2006. Ainsi, nous éliminons les pixels qui sont potentiellement caractérisés par la réponse spectrale des surfaces en eau, en neige ou glace, ainsi que par les infrastructures humaines. Ceci nous autorise à comparer avec une relative équivalence l'évolution diachronique des territoires saisonniers et les zones à intérêts particuliers de la communauté d'éleveurs de rennes (figure VII.2). Troisièmement, les images prétraitées sont découpées trois fois pour correspondre avec les trois échelles de l'analyse : la communauté Gabna, ses pâturages saisonniers et les zones d'intérêt.

Les données vectorielles pastorales RenGIS 2.0 sont ainsi utilisées pour réaliser ce découpage des canaux Landsat de 1990, 2006 et 2017. On obtient ainsi un sous-jeu de données Landsat par unité pastorale. Après le rééchantillonnage, le masquage et le découpage des jeux de données Landsat, l'indice NDVI est calculé en utilisant les bandes spectrales correspondant au rouge et au proche infra-rouge des produits Landsat TM (jeux de données de 1990 et de 2006) et des produits issus de Landsat OLI/TIRS (jeux de données 2017). La formule du NDVI est appliquée via la calculatrice raster de Qgis 2.18 pour chacune des dates et chacune des zones/échelles d'étude : la partie couverte par l'imagerie Landsat de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna, les pâturages saisonniers Gabna (hiver, printemps-hiver, printemps, pré-été, été), et les zones d'intérêt pastoral (aires de vèlage, de rut et de repos). Une reclassification des images traitées en utilisant la Calculatrice Raster nous autorise à calculer les trois seuils de NDVI étudiés, par unité pastorale considérée. Ces seuils constituent une approximation des strates de végétation telles que captées par Landsat: strate herbacée (seuil de NDVI > 0.15), strate arbustive (seuil de NDVI >0.5) et strate arborée (seuil de NDVI >0.7). Le premier seuil (NDVI >0.15) est sélectionné car même les pixels caractérisés par une faible fraction de végétation sont représentés. En dessous de ce seuil, l'indice NDVI ne semble pas refléter les surfaces végétalisées, et traduit plutôt les natures de surfaces couvertes de roches ou de sols nus, de neige et d'eau (Gandhi, Parthiban et al., 2015).

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

Figure VII-3 : Présentation générale de la zone d'étude: contours de la communauté d'éleveurs de rennes semi-domestiques, formations végétales associées, et localisation de la station météorologique d'Abisko. La figure présente également la "coupure" des données raster induite par la position de l'unique dalle Landsat étudiée (WRS 2: path 197; row 002)



c) Données climatiques

Les jeux de données climatiques sont issus du portail NOAA-NCDC. Excel 2016, et Xlstat ont été utilisés pour les différentes approches statistiques. Les séries temporelles de températures moyennes mensuelles proviennent de la station d'Abisko (figure VII.3), et concernent la période 1987 à 2017. La station météorologique d'Abisko a été choisie du fait de sa représentativité spatiale dans la représentation du climat régional (station synoptique) et par la haute couverture des séries temporelles de températures et de pluies (plus de 99% de données sur la période 1987-2017). Les températures mensuelles acquises permettront de confronter les résultats contextuels de l'évolution spatiale des seuils de NDVI Landsat, aux écarts absolus et aux normales mensuelles au cours de la saison de croissance végétative, en particulier au printemps.

Une fois acquises, les séries temporelles sont converties en système d'unités métriques (degrés Fahrenheit vers degrés Celsius). Dû aux manques de données temporelles rencontrés pour l'année 1987, nous avons décidé de ne pas prendre en compte cette année spécifique. Pour la série temporelle 1988-2017, les températures mensuelles sont moyennées par année, et à l'échelle de la période entière. Cette méthode est utilisée pour confronter les résultats contextuels issus de l'exploitation du NDVI aux normales climatiques, et aux écarts éventuels aux cours des trois saisons de croissance (1990, 2006 et 2017), en particulier au cours du printemps.

Pour les tendances temporelles, les températures mensuelles de 1988 à 2018 ont été soumises à trois analyses statistiques : tendance linéaire brute, par l'utilisation de la régression linéaire entre température et années ; magnitude des tendances et tests de significativité de tendance de Mann-Kendall. Les tendances linéaires indiquent le signe (positif, négatif, pas de tendance) et l'intensité de la relation (variance exprimée) entre les températures mensuelles et les années de 1988 à 2017.

Les magnitudes de tendances sont représentées par la différence, exprimée en degrés Celsius, entre le début et la fin de chaque modèle linéaire mensuel. Le test de significativité de tendance de Mann-Kendall est un test non-paramétrique. Il est ici appliqué pour confirmer la significativité des tendances linéaires brutes préalablement calculées. Concernant l'interprétation de la significativité des résultats du test en fonction de la valeur du p, nous renvoyons le lecteur au Chapitre V dans lequel ce point a été largement développé.

d) Données floristiques

Les données floristiques sont issues du portail *Global Biodiversity Information Facility*. De 1961 à 2017, des relevés de végétation ont été menés entre autres par l'Université suédoise des Sciences Agricoles et déposés dans le *Swedish Species Observation System*. La sélection géographique des données floristiques a été faite sur le portail du GBIF, à partir d'un rectangle correspondant à l'étendue large de la communauté Gabna, en latitude et en longitude (tableau VII.1). La présence des végétaux vasculaires et non-vasculaires a été enregistrée, ainsi que leurs coordonnées géographiques précises.

Pour cette présente étude, les espèces végétales comptabilisées ont été choisies sur des critères de représentativité écologique, qu'elles soient caractérisées par leur canopée large (espèces arborées) et/ou leur forte occurrence (espèces arbustives, buissonnantes et

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

herbacées). Pour ce faire, nous avons utilisé la carte de végétation nationale suédoise (source : *Läntmateriet*) et la nomenclature décrite pour sélectionner les espèces végétales dites clé de voûte de la plupart des formations végétales au long de l'écotone taïga – toundra et du gradient altitudinal (figure VII.3).

Des sommets fennoscandiens aux forêts de conifères de basses altitudes composant la communauté d'éleveurs de rennes Gabna, ces formations végétales sont principalement représentées par les zones faiblement végétalisées, des prairies alpines, des landes plus ou moins sèches, des forêts de bouleaux pubescents et des forêts de résineux (*Swedish Land Survey Vegetation Map*, premiers et seconds niveaux de la nomenclature). Dans les formations arborées, nous avons retenu les espèces arborées clef-de-voûte ; la sélection a été élargie à un plus grand nombre d'espèces dans les zones faiblement végétalisées de haute altitude (*Ranunculus acris*, *Viola biflora*, *Antoxanthum odoratum*) ainsi que pour les espèces herbacées des prairies alpines (*Agrostis capillaris*, *Festuca ovina*, *Deschampsia flexuosa*, *Nardus stricta*, *Carex atrofusca*). Toutefois, certaines de ces espèces ne sont pas exclusives des communautés végétales d'altitude, et peuvent être observées en sous-bois d'après nos observations de terrain.

La répartition ponctuelle des espèces sélectionnées dans la base de données GBIF est ensuite intersectée avec les unités pastorales étudiées afin de les croiser avec les seuils de NDVI. Nous cherchons ici à vérifier si les seuils de NDVI sont suffisamment fiables pour exprimer la dynamique des formations végétales entre les seuils bas, médians et hauts de NDVI et les espèces clés-de-voûtes. En particulier, nous quantifierons le pourcentage de présence de chaque espèce rencontrée sur le terrain selon l'appartenance de chaque groupe d'espèces à un des seuils de NDVI.

Par exemple, nous sélectionnons les *Pinus sylvestris* et les *Picea abies*, représentatif des forêts de résineux caractérisant le paysage végétal de la taïga, qui ont été catalogués sur le terrain, et nous voyons si la totalité, la plupart ou aucun des conifères enregistrés sont présents dans la carte de seuil de NDVI supérieur à un indice de +0.7. ArcGIS a été utilisé pour intersecter le shapefile *Pinus-Picea* avec les seuils de NDVI vectorisés pour chaque année du suivi, et ce à l'échelle de la communauté Gabna. Nous calculons ensuite le ratio *Pinus – Picea* présent, dans et hors de la zone où le NDVI est supérieur à +0.5. Pour chaque seuil de NDVI, et pour chaque formation végétale, on moyenne les pourcentages pour minimiser les effets

temporels et contextuels entre les NDVI de juillet de la période d'étude (1990, 2006 et 2017) et les périodes variables où les données floristiques ont été acquises (de 1961 à 2016).

C - Résultats

1) Croisement entre signaux NDVI et les relevés floristiques à l'échelle de la communauté Gabna

Tableau VII-2 : Pourcentages d'occurrence des plantes vasculaires représentatives des formations végétales les plus présentes à l'échelle de la communauté d'éleveurs de rennes étudiée. Le tableau récapitule les pourcentages de présence de chacune des espèces, agrégées en formation végétale au sein de chacun des seuils de valeur NDVI testé. Ces présences par seuils sont ici moyennées entre les trois années d'étude (1990, 2006 et 2017) (Réalisation R. Courault, 2018)

Formation végétale	Espèces floristiques rencontrées	% d'occurrence à l'intérieur des cartes de seuil NDVI		
		NDVI >0.15	NDVI >0.5	NDVI >0.7
Végétation clairsemée	<i>Racunuculus acris</i> , <i>Viola biflora</i> , <i>Antoxanthum odoratum</i> (N= 149)	95,3	74,3	42,3
Prairies alpines	<i>Agrostis capillaris</i> , <i>Festuca ovina</i> , <i>Deschampsia flexuosa</i> , <i>Nardus stricta</i> , <i>Carex atrofusca</i> (N= 63)	96,3	79	44
Landes et bruyères	<i>Betula nana</i> , <i>Empetrum nigrum</i> , <i>Vaccinium vitis-idea</i> (N= 312)	96	81	42
Forêts de bouleaux	<i>Betula pubescens</i> sp (N= 72)	97	86,3	56
Forêts de conifères	<i>Pinus sylvestris</i> , <i>Picea abies</i> (N = 35)	100	96	59

Le tableau VII.2 présente les pourcentage d'espèces rencontrées pour les formations végétales les plus représentatives de la communauté Gabna, par carte de seuil de NDVI. Les données présentées ont été moyennées pour les seuils de NDVI des trois années suivies (1990, 2006, 2017). Du haut en bas du tableau VII.2, les formations végétales gagnent en hauteur et en densité. Ceci est également suggéré par les pourcentages, qui augmentent progressivement de la formation de végétation clairsemée aux forêts de conifères : 95,3% des espèces appartenant à la catégorie de végétation clairsemée sont présentes pour les cartes de NDVI

>0.15, tandis que l'intégralité des Pins et des Epicéas sont inclus dans ce seuil de NDVI (100%).

D'un autre côté, les cartes de NDVI >0.7 contiennent entre 42 et 44 % des espèces floristiques enregistrées représentatives des strates arbustives et herbacées (végétation clairsemée, prairies alpines, landes et bruyères). Toujours pour ce seuil de NDVI >0.7, plus de 56% des espèces constitutives de la strate arborée (forêts de conifères et de bouleaux) sont dénombrées. Même si un pourcentage relativement bas d'arbres est trouvé pour le seuil de NDVI le plus élevé (>0.7), ces résultats semblent consolider la capacité du signal NDVI calculé par Landsat à détecter les changements de couverts végétaux, en particulier dans la distinction entre limites géographiques des formations végétales à physionomie herbacée, arbustive ou arborée. D'autres méthodes amélioreraient ces résultats pour confirmer les liens entre seuil de NDVI bas, moyen et haut et les dynamiques temporelles de la stratification de la végétation (herbacées, arbustive, arborée), notamment la prise en compte du taux de recouvrement des espèces ligneuses formant la canopée.

2) Evolution diachronique des seuils de NDVI

a) Echelle de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna

Tableau VII-3 : Pourcentages de superficies de terrain de la communauté d'éleveurs de rennes semi-domestiques Gabna compris dans les seuils de NDVI calculés pour les trois années du suivi diachronique (Réalisation R. Courault, 2018)

Date	Communauté d'éleveurs Gabna
Superficie avec NDVI > 0.15 (%)	
1990	86,1
2006	93
2017	88,7
Superficie avec NDVI > 0.5 (%)	
1990	68,7
2006	73,2
2017	74,4
Superficie avec NDVI > 0.7 (%)	
1990	33,5

2006	40,4
2017	56,1
Superficie totale de la communauté (km²)	2904

Le tableau VII.3 résume les superficies pour chacun des seuils de NDVI, exprimées en pourcentages. En première approximation, ces informations spatiales et temporelles sur les seuils de NDVI nous donnent une indication fiable sur les formations végétales présentes au sein de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna, tel que la présence et l'extension des herbacées, arbustes et arbres. Comme nous pouvons le voir, plus le seuil de NDVI est bas (NDVI >0.15) plus la superficie prise en compte dans le pourcentage est élevée : en 2006 par exemple, plus de 93% de la surface totale de la communauté d'éleveurs de rennes présente un pixel de NDVI > 0.15. Inversement, le seuil de NDVI le plus élevé (>0.7) a des pourcentages de surface relativement bas (33.5 % de la communauté Gabna en 1990, soit 973 km²).

En ce qui concerne les changements temporels au sein des seuils de NDVI, deux tendances sont notables. La première tendance est l'augmentation du taux de couverture des superficies ayant un signal NDVI supérieur à +0.5 et +0.7 (tableau VII.3). Tout au long des années étudiées, les superficies augmentent graduellement : entre 1990 et 2017, + 5,7 % pour les superficies avec NDVI > 0.5; + 22,6 % celles avec NDVI >0.7. Traduit en valeurs absolues, les pixels présentant un NDVI >0.7 ont augmenté de 656 km² entre 1990 et 2017 (sur une aire totale de 2904 km²). La deuxième tendance attrait à la non détection de l'augmentation des superficies de NDVI >0.15.

b) Pâturages saisonniers et zones d'intérêt pastoral

Période	Zones à intérêt pastoral			Pâturages saisonniers				
	Vêlage	Rut	Repos	Eté	Pré-été	Printemps, pré-automne, automne	Printemps-hiver	Hiver
Superficies avec NDVI > 0.15 (%)								
1990-2006	10,9	10,7	12,5	35,0	25,6	5,6	0,0	0,0
2006-2017	-4,1	-2,4	-6,9	-20,8	-13,6	-1,4	-0,1	-0,1
1990-2017	6,4	8,0	4,7	6,9	8,5	4,1	-0,1	-0,1
Superficies avec NDVI > 0.5 (%)								
1990-2006	13,2	11,9	10,8	39,4	21,8	5,2	1,0	1,1
2006-2017	7,6	13,9	2,4	-12,7	-4,1	6,3	0,5	0,5

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

1990-2017	21,8	27,4	13,5	21,6	16,7	11,8	1,6	1,7
Superficies avec NDVI > 0.7 (%)								
1990-2006	28,7	38,5	12,7	38,7	29,7	8,5	21,7	29,4
2006-2017	47,9	85,3	37,5	3,9	22,0	44,0	39,5	39,9
1990-2017	90,4	156,6	55,0	44,1	58,2	56,2	69,7	81,1

Tableau VII-4 : Evolution en pourcentage des superficies de pâturages saisonniers et des zones à intérêt pastoral de la communauté d'éleveurs de rennes semi-domestiques Gabna compris dans les seuils de NDVI calculés pour les trois années du suivi diachronique (Réalisation R. Courault, 2018)

Le tableau VII.4 quantifie les changements de seuils de NDVI détectés pour les pâturages saisonniers et les zones d'intérêt pastoral (vêlage, rut et repos des rennes).

Minimum, maximum, et tendances observées

Comme attendu, les valeurs de NDVI sont conformes avec la répartition des formations végétales au long des écotones zonaux et altitudinaux caractérisant la communauté d'éleveurs de rennes Gabna. Les pâturages d'hiver et de printemps-hiver, principalement dominés par les forêts de conifères, présentent les plus hautes valeurs de NDVI au long des trois années d'étude. D'autre part, les aires de vêlage et de rut sont principalement dominées par de la végétation clairsemée, ou des prairies alpines et donnent les valeurs de NDVI les plus faibles (tableau VII.4 et figure VII.2).

Tous seuils confondus, les pâturages saisonniers dont les surfaces de NDVI augmentent tendanciellement sont ceux d'hiver et de printemps-hiver (respectivement 42,6 et 39% de la superficie totale ayant un NDVI augmentant). Les pâturages d'altitude, tels que les pâturages d'été et de pré-été semblent être moins impactées (respectivement 15,7 et 22,2%). Pour les zones à intérêt pastoral, au moins 25 % des surfaces présentent un NDVI en augmentation, à l'échelle des trois seuils. Les aires de vêlage, de rut et de repos présentent une augmentation totale du NDVI respectivement de 25,8 %; 31,8% et 34,8%.

NDVI > 0.15

L'évolution temporelle est très variable entre les 8 unités pastorales étudiées, ainsi qu'entre les trois années d'évolution. L'augmentation la plus forte est observée entre 1990 et 2006 dans les pâturages d'été et de pré-été (de 25,6 à 35%) et dans une moindre mesure dans

les zones d'intérêt pastoral (de 10,7 à 12,5). Ces zones montrent une évolution inversée, avec la diminution des surfaces faiblement végétalisées entre 2006 et 2017, particulièrement forte dans les pâturages d'été (-20%). Au cours de la période, la proportion des superficies au-dessus du seuil de NDVI >0,15 des pâturages d'hiver et des saisons intermédiaires reste élevée et presque stable.

NDVI > 0.5

En ce qui concerne les superficies avec un NDVI >0.5, la plupart des unités pastorales présentent une augmentation progressive, excepté pour les pâturages d'hiver et de pré-hiver. Seuls les pâturages d'été et de pré-été présentent les mêmes changements : la proportion de superficies avec un NDVI >0.5 augmente entre 1990-2006 avant de baisser en 2017. La zone de rut des rennes est l'unité pastorale qui présente l'évolution la plus forte des superficies avec un NDVI >0.5, augmentant de 27,4 % sur la période 1990-2017.

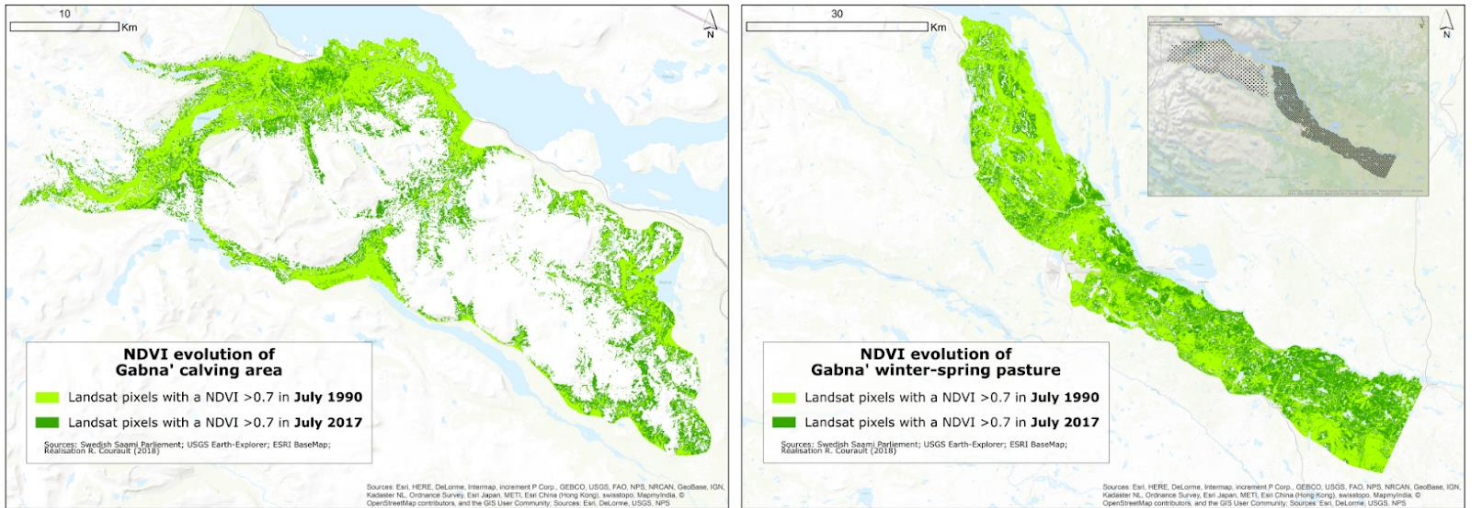


Figure VII-4 : Cartographies de l'évolution du seuil de NDVI >0.7 entre 1990 et 2017 pour deux unités pastorales de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna : aire de vèlage à gauche et pâturage dit de printemps-hiver à droite. (Réalisation R. Courault)

NDVI > 0.7

Parmi toutes les unités pastorales, les superficies présentant un NDVI >0.7 sont graduellement en augmentation entre 1990, 2006, et 2017. La figure VII.4 cartographie l'évolution des superficies de NDVI >0,7 pour deux unités pastorales. Le choix des unités pastorales cartographiées est fait soit sur le critère de l'augmentation importante des superficies de NDVI > 0,7 (pâturages de printemps-hiver), soit car il s'agit d'une unité sensible du point de vue de la gestion pastorale par les éleveurs (aire de vèlage, à gauche de la figure VII.4). Pour augmenter de façon appréciable le confort de visualisation des changements, l'évolution des superficies de NDVI >0.7 entre 1990 et 2017 est cartographiée. L'aire de vèlage, située entre les sommets de la chaîne fennoscandienne (~2000m d'altitude) et la rive droite du lac Törnetraske (200 m d'altitude), la répartition du NDVI >0.7 reste principalement limitée aux rives du lac, aux combes et aux valls progressivement érodés par la fonte et l'écoulement de l'eau, là où la contrainte thermique reste faible. Cette faible contrainte se traduit floristiquement par la présence d'espèces méso-thermophiles (Chapitre VI). Généralement, entre 1990 et 2017, la végétation semble simultanément se densifier et s'étendre à l'ouest, et les parties orientales de la zone d'étude : par exemple la large vallée glaciaire en auge de l'Abiskojaure.

En ce qui concerne les pâturages de printemps-hiver, les changements de superficies >0.7 entre 1990 et 2017 est tout à fait remarquable. Près de la moitié de la superficie totale de l'unité pastorale est sujette à une extension de la végétation, particulièrement le long de la rivière Torne, sur les marges nord-centrales du pâturage. Les patches forestiers du sud de la

zone en 1990 se densifient, tandis que les parties septentrionales des pâturages de printemps-hiver présentent une extension de leurs forêts. Les tourbières forestières au sud-est du pâturage semblent montrer des superficies de NDVI >0,7 également en augmentation (figure VII.4, partie de droite).

3) Analyse des conditions thermiques mensuelles entre 1988 et 2017 et leurs liens avec les résultats du NDVI

a) Écarts à la normale des températures mensuelles pour les années d'études du NDVI

Tableau VII-5 : Tableau récapitulatif des écarts mensuels aux normales de la période d'étude (1988-2017) pour les trois années dont on a étudié l'évolution des surfaces en NDVI (1990, 2006 et 2017). En gris sont figurés les mois de période végétative (Réalisation R. Courault, 2018)

Mois précédant et suivant les années étudiées	1989-1990 (°C)	2005-2006 (°C)	2016-2017 (°C)	Normale (°C) 1988-2017
Novembre	-1,1	+1	+1,6	-4,6
Décembre	-1	+2,7	+2,5	-7
Janvier	-0,8	+3,4	+4,1	-9,9
Février	+5,9	+1	+0,4	-10
Mars	+1,7	-5	+0,9	-6,7
Avril	+1,5	+1,3	-2,3	-1,3
Mai	-0,4	+1,3	-2,5	+4
Juin	+0,8	-0,25	-0,1	+9,25
Juillet	+0,2	-0,9	-0,6	+12,4
Août	+0,9	+2,1	-0,7	+10,9
Septembre	-0,6	+0,5	-0,2	+6,4
Octobre	+1,4	-1,9	-0,2	+0,7

Le tableau VII.5 montre les écarts de températures pour les trois années précédemment analysées pour le NDVI (1990, 2006, 2017). Les moyennes mensuelles de températures sont plus douces et les écarts mensuels comparés aux normales 1988-2017 plus importants pour 1990 et 2006 (respectivement 7 mois plus chauds pour 1989-1990 et 8 pour 2005-2006), alors qu'elles sont plutôt froides pour 2017 (5 mois plus chauds que la normale pour 2016-2017).

Les mois d'hiver précédant les saisons de croissance végétative (mai à septembre), les écarts de températures hivernales (janvier et février) sont les plus élevés de la série : janvier en ce qui concerne les saisons de croissance 2006 et 2017 (respectivement + 3.4 et + 4.1 °C) ; février pour 1990 (+5,9 °C d'écart pour la moyenne mensuelle de février 1990, comparée à la normale de février 1988-2017). Inversement, on observe des écarts négatifs de températures printanières et estivales en 2017. Les plus basses valeurs d'écarts sont rencontrées en mars 2006 (- 5 °C) et mai 2017 (- 2.5 °C).

Pour les trois années, les mois de juin et de juillet sont relativement stables comparé aux normales. La croissance de la végétation peut être perturbée par les hautes ou les basses moyennes de températures mensuelles, tout particulièrement dans la deuxième partie de l'hiver (janvier et février), pouvant ainsi expliquer la densification et l'extension de la végétation, et ainsi des superficies de NDVI en augmentation.

b) Tendances temporelles mensuelles de températures sur la série temporelle 1988-2017

Tableau VII-6 : Tableau récapitulatif de l'évolution linéaire supposée des températures moyennes mensuelles de la station météorologique d'Abisko au cours de la période 19988-2017. Le tableau comporte le signe d'évolution du modèle linéaire calculé (positif, négatif, aucune évolution) ; la variance expliquant les effets du temps sur les températures mensuelles étudiées, ; ainsi que la magnitude de la tendance, exprimée en °C, qui permet de quantifier l'évolution modélisée des températures (R. Courault, 2018)

Mois	Signe de la tendance 1990-2017	Variance exprimée	Magnitude de la tendance (°C)
Janvier	Négatif	0.07	-3,1
Février	Négatif	0	-0,2
Mars	Positif	0.04	+1,7
Avril	Positif	0.10	+1,8
Mai	Positif	0.20	+2,1
Juin	Négatif	0	-0,5
Juillet	Positif	0.8	+1,6
Août	Positif	0.6	+1,2
Septembre	Positif	0.23	+2,1
Octobre	Positif	0	+0,5

Novembre	Positif	0.06	+2
Décembre	Positif	0	+0,6

Sur la période 1988-2017, neuf tendances positives sont détectées (tableau VII.6). Janvier, février et juin se caractérisent par des tendances négatives : les températures mensuelles semblent être en baisse au fur et à mesure que l'on avance dans la période étudiée. En ce qui concerne les magnitudes de tendances (différence entre le début et la fin du modèle linéaire), les valeurs positives les plus élevées sont trouvées pour le printemps : +1,7°C entre 1988 et 2017 pour mars; +1,8°C pour avril; +2,1°C pour mai ; ainsi que pour les mois de juillet (+1,6°C) et de septembre (+2,1°C). Les valeurs négatives sont trouvées pour janvier (-3,1°C) et pour juin (-0,5°C).

c) Confirmation des tendances par les p-values de coefficients de Mann-Kendall

Tableau VII-7 : Tableau des résultats des tests de Mann-Kendall calculé pour les températures mensuelles moyennes de la station météorologique d'Abisko sur la période 1988 – 2017. Le tableau présente la p-value de chaque coefficient de Mann-Kendall calculé, et le niveau de confiance associé en fonction de quatre intervalles de confiance (Réalisation : R. Courault, 2018)

Mois	P-value du Tau de Kendall	Niveau de confiance
Janvier	0,05	Elevé
Février	1	Pas de confiance
Mars	0,392	Bas
Avril	0,134	Modéré
Mai	0,035	Elevé
Juin	0,568	Pas de confiance
Juillet	0,253	Modéré
Août	0,205	Modéré
Septembre	0,019	Elevé
Octobre	0,630	Pas de confiance
Novembre	0,391	Bas
Décembre	0,605	Pas de confiance

La table VII.7 quantifie et qualifie le degré de confiance des tendances linéaires mensuelles (1988-2017). Ces degrés de confiance, selon les mois considérés, sont hétérogènes. Les niveaux de confiance les plus hauts sont trouvés pour janvier, mai et septembre. Les niveaux les plus bas sont constatés pour février, mars, juin, octobre et décembre.

D - Discussion, conclusions et perspectives

a) Synchronisation entre la présence des espèces floristiques clé de voûte et les seuils de NDVI

L'approche méthodologique choisie n'est peut-être pas suffisamment développée. La quantification des pourcentages de présence d'espèces floristiques clé de voûte pour chaque seuil de NDVI pourrait être renforcée par des tests statistiques plus poussés (ANOVA, tests d'hypothèses de Kruskal-Wallis). Également, une analyse via télédétection plus élaborée pourrait être mise en place. Par exemple, une matrice de confusion des pixels, mélangeant des classes issues d'analyses supervisées de réponse spectrale et l'exploitation de relevés floristiques prenant en compte les occurrences d'espèces comme la physiologie de la végétation. Les jeux de données floristiques GBIF possèdent l'avantage certain d'une large couverture spatiale. Ceci dit la contrepartie est représentée par la désuétude de certains relevés floristiques et la répartition des points de relevés, parfois biaisée par l'accessibilité géographique de certains terrains (densité de points de relevés forte proche des chemins de randonnées d'Abisko, en zone montagnarde par exemple). Elles pourraient être complétées pour la période actuelle par nos relevés de terrain qui, s'ils ne sont pas très nombreux (chapitre VIII), ont été réalisés entre 2015 et 2017, et permettent de calculer le taux de recouvrement végétal « vu du ciel », dont on peut raisonnablement penser qu'il soit bien corrélé avec le NDVI.

Le décalage radiométrique entre les capteurs Landsat Thematic Mapper (1990, 2006) et OLI-TIRS (2017) peut également être invoqué. Les bandes spectrales de LANDSAT 5 (Thematic Mapper) pour les bandes rouges et proche infrarouges s'échelonnent respectivement de 0,63 μm à 0,69 μm pour le rouge, de 0,76 à 0,9 μm pour le proche infrarouge. Pour Landsat 8 OLI-TIRS, les fenêtres spectrales sont plus réduites. Elles se situent entre 0,63 et 0,68 μm pour la bande rouge, et entre 0,845 et 0,885 μm pour la bande du proche infrarouge. Les bandes plus fines de LANDSAT 8 comparées aux bandes plus larges de LANDSAT 5

pourrait expliquer le décalage de détection de la végétation, et donc les superficies, dans la détection des couverts végétaux, et leur évolution dans le temps. C'est particulièrement remarquable pour le seuil de NDVI > 0.7 et ses bonnes performances pour détecter toutes les formations végétales testées, incluant les formations à végétation clairsemée et herbacées, tandis que l'on s'attendait à ne détecter que les arbres bien développés.

b) Evolution diachronique des formations végétales de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna

Les études antérieures traitant de l'évolution de la répartition de la végétation des zones arctiques, subarctiques et montagneuses insistaient déjà sur l'expansion notable du couvert végétal arboré et arbustif (en termes de couverture de canopée, de biomasse, ou de superficies de changements de couvert végétal), aux dépens des formations végétales herbacées ou faiblement végétalisées (voir chapitre I). De façon générale, le verdissement des régions arctiques et subarctiques se confirme également à l'échelle de la communauté d'éleveurs de rennes semi-domestiques Gabna et les unités pastorales qui la constituent. La boréalisation semble en particulier concerner les pâturages saisonniers déjà en partie dominés par les paysages végétaux de forêts de conifères. Les unités pastorales localisées dans le domaine de la toundra (arbustive ou rase), semblent soumises au processus d'embroussaillage/shrubification, entre les années 1990, 2006 et 2017, comme le montre la diminution des surfaces à NDVI faible et l'augmentation de celles à NDVI fort. En effet, sur les piedmonts de la chaîne fennoscandienne à proximité d'Abisko, les bouleaux de montagne sont en cours de densification (Rundqvist, Hedenås et al., 2011, entre 1977 et 2009) et leur biomasse tendrait à augmenter (Hedenås, Holsson et al. 2011, entre 1997 et 2010).

L'évolution notable en superficies du seuil de NDVI > 0.7 pourrait être due à plusieurs facteurs explicatifs. Pour les forêts de pins et d'épicéas qui caractérisent les pâturages d'hiver et de printemps-hiver, l'intensification de la foresterie commerciale au cours de la période d'étude doit être soulignée. Pour l'ensemble des propriétaires forestiers (publics, privés, propriétaires individuels), les surfaces plantées à visée sylvicole ont augmenté rapidement au cours de la période 2004-2017. D'après les données de l'Agence Forestière suédoise, le comté du Norrbotten, où se situe la communauté d'éleveurs de rennes semi-domestiques Gabna, a vu ses superficies de zones plantées passer de 118 km² (2004) à 155 km² en 2017 (<https://www.skogsstyrelsen.se/en/statistics/>).

Certaines zones sont à la fois comptées parmi les pâturages d'hiver, et parmi les pâturages de printemps-hiver. Cette superposition des superficies comptées pourrait augmenter artificiellement les chiffres. Une solution serait de travailler uniquement sur les unités pastorales délimitées indépendamment les unes des autres, ou de ne prendre en compte uniquement les zones dédiées à une seule unité pastorale.

Les pâturages d'hiver, incomplets, du fait du manque de données satellite LANDSAT, pourraient être complétés en reprenant les fonds de l'USGS et en prétraitant les données mosaïquées pour rendre comparable le suivi diachronique du couvert végétal. La répartition végétale et la phénologie des plantes à échelle fine, tel que les facteurs topographiques (inclinaison des pentes, orientation) doit être évoquée pour cette région subarctique où l'angle solaire reste bas (Pape et Löffler, 2011). La topographie et son analyse liée à l'augmentation des surfaces végétalisées pourrait être incluse dans les résultats présentés dans cette étude pour expliquer plus finement l'évolution diachronique du NDVI.

c) Facteurs explicatifs climatiques

Les températures mensuelles de la station météorologique d'Abisko ont montré une augmentation généralisée au fil de l'avancée de la période d'études (1988-2017). Le calcul des tendances linéaires a montré que, en fonction de la confiance accordée à celles-ci, les mois hors-gel, où les températures sont généralement au-dessus de 0°C, se caractérisent par des températures en augmentation en fonction de l'avancée du temps. Ceci est particulièrement vrai pour les mois de mai et septembre.

La croissance végétative est perturbée par les variations fortes de températures diurnes, aux échelles saisonnière et annuelle, en particulier en hiver et au printemps. La réduction des effets du gel sur la végétation, en particulier pendant la deuxième partie de l'hiver (Février), pourrait expliquer la densification et la colonisation de la végétation, et ainsi l'augmentation des superficies de NDVI au-dessus du seuil de NDVI >0,7. Pour ce seuil, la tendance est à l'augmentation des superficies pour tous les pâturages. si l'on considère l'ensemble de la période. En effet, il a été montré que la moindre couverture de neige en hiver, et par conséquent sa fonte rapide, pouvait favoriser la croissance et l'extension spatiale de la végétation (Li, Fan et al., 2016), de même que l'augmentation de fréquence des températures hors gel (Fraser, Olthof et al., 2011). Nous avons également observé l'influence des températures hivernales dans le Chapitre V.

Les zones de haute altitude sont sensibles à la tendance au réchauffement tout au long de l'année, y compris en été, tandis que dans les pâturages de basse altitude, la principale contrainte thermique survient en hiver. En effet, dans les pâturages d'hiver situés dans le domaine forestier boréal, les températures estivales restent probablement supérieures au seuil bioclimatique correspondant aux pins (température supérieure à 10 ° C pendant plus d'un mois ; Birot, 1967 ; Alexandre et Génin, 2012).

Pendant toute la période d'études, les signaux de tendance positive d'évolution des températures mensuelles pendant dix mois sur douze (dont huit mois où la tendance est significative à divers degrés) pourraient expliquer le pourcentage croissant de surfaces végétalisées. Ce phénomène d'augmentation des superficies a été observé dans toutes les zones d'intérêt et dans les pâturages d'été et d'avant-été, y compris l'hiver et la saison intermédiaire, lorsque le seuil NDVI est le plus élevé (> 0,7). Ces résultats confirment que la tendance au réchauffement a un impact positif sur la croissance de la végétation, ce qui est cohérent avec les conclusions des autres auteurs (Fauchald, Tommervik, 2017 ; De Jong, De Bruin, 2011 ; Eastman, Sangermano et al., 2013). A cette échelle temporelle, les résultats sont beaucoup plus nets que pour la période récente (2000-2017) étudiée dans les chapitres V et VI.

L'augmentation positive et hautement significative des températures au début et à la fin de la saison de croissance (mai et septembre) suggère que l'augmentation des superficies végétalisées est liée à l'allongement de la durée de la période de végétation. La courte durée de la période chaude (1 mois ou moins) a longtemps été considérée comme la principale contrainte au développement des arbres dans la toundra et dans les prairies alpines (Birot, 1967). Actuellement, les bouleaux des montagnes (*Betula pubescens* ssp. *tortuosa*) occupent de vastes superficies du piémont de la chaîne fennoscandienne, nous l'avons observé jusqu'à 560 mètres d'altitude dans la zone de mise bas de la communauté de Gabna (Grau, Ninot, 2012 ; Heiskanen, Nilsson et al., 2008) où sa densité a fortement augmenté depuis la fin des années 90 (Rundqvist et al., 2011, Hedenås et al. 2011). Pour conclure ce point de la discussion, le réchauffement futur devrait avoir un impact sur la couverture végétale et la productivité, comme nous l'avons observé ici au cours des 30 dernières années. Par exemple, dans l'aire de mise bas de la communauté de Gabna, les températures simulées en mai-juin devraient atteindre 10 ° C au milieu du siècle, selon le scénario 8.5 et dans les habitats de basse altitude (Courault, Cohen., 2017, Chapitre X). Présentement recouverts de tourbières,

de forêts de bouleaux de montagne ou de landes, ces zones en réchauffement pourraient devenir propices à la colonisation du pin sylvestre, situé à 80 kilomètres au sud.

Pour conclure ce point de la discussion, le réchauffement futur devrait avoir un impact sur la couverture végétale et la productivité, comme nous l'avons observé ici au cours des 30 dernières années. Par exemple, dans l'aire de mise bas de la communauté de Gabna, les températures simulées en mai-juin devraient atteindre 10 ° C au milieu du siècle, selon le scénario 8.5 et dans les habitats de basse altitude (Courault, Cohen., 2017). Présentement recouverts de tourbières, de forêts de bouleaux de montagne ou de landes, ces zones en réchauffement pourraient devenir propice à la colonisation du pin sylvestre, situé à 80 kilomètres au sud.

Des pistes d'amélioration permettraient d'être plus spécifiques pour les liens entre températures et dynamiques des couverts végétaux. En particulier, le calcul des degrés-jours permettrait de gagner en précision biologiquement afin de tracer des pistes explicatives sur l'avancée/la reculée des seuils de NDVI, en particulier pour le seuil de NDVI >0.15 (strate herbacée) et celui de 0.7 (strate arborée). Pour l'hiver, il a été particulièrement souligné que la contrainte du froid inhibait la croissance végétative et par extension la densification et la colonisation des formations végétales arborées et arborescentes (référence). Le dénombrement du nombre de jours de gel, de la longueur en jours des périodes de redoux en hiver permettrait de constater effectivement l'effet du gel (et du dégel) sur le NDVI capté par l'imagerie Landsat. Enfin, vu la répartition longitudinale de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna, il aurait également été intéressant d'acquérir des données issues de stations météorologiques localisées dans les paysages de forêts de conifères. Le gain en précision climatique et géographique améliorerait la compréhension, et l'établissement de facteurs explicatifs climatiques sur l'évolution de la végétation.

Transition entre la deuxième partie et la troisième partie

La deuxième partie s'est concentrée sur le suivi d'un des effets du changement global, représenté par la densification et la remontée en altitude et en latitude des formations végétales et des espèces ligneuses. De nombreux résultats ont été produits, et sont de différents ordres. Le premier ordre concerne la réponse des écosystèmes subarctiques au changement global, représenté ici par les paysages végétaux des territoires de la communauté d'éleveurs Gabna. Nous l'avons vu précédemment, l'étude des paysages de la communauté Gabna concentre de nombreux enjeux environnementaux et sociaux liés au changement global (conflits d'usage des sols, fragmentation paysagère, réponse des formations végétales au desserrement marqué de la contrainte thermique, dans le contexte géographique sensible d'écotone froid boréo-alpin). Ainsi, l'évolution spatialisée du NDVI sur une fenêtre temporelle relativement longue (30 ans) a permis de mettre en lumière le grignotement important des formations végétales arborées et arborescentes vis-à-vis de formations végétales plus basses et initialement soumises à des contraintes thermiques empêchant le développement de stades écologiques plus complexes (landes, forêts). Ce grignotement peut schématiquement être résumé en trois tendances géographiques, déjà évoquées précédemment, et à retravailler plus en profondeur : densification particulièrement marquée de la strate arborée dans les forêts de conifères, intensément gérée par l'Homme pour la production de bois ; avancée de la *tree-line* forestière approximée au long des derniers kilomètres de pâturages hivernaux et de pré-printemps ; remontées spectaculaires des limites de croissance approximant l'avancée en altitude des landes, et dans une moindre mesure des prairies alpines.

Le deuxième ordre attire à la variabilité temporelle forte des indices de végétation au long des périodes récentes étudiées. Les tendances temporelles dénotent de réponses différentes des formations végétales constituant les territoires de la communauté d'éleveurs : les forêts de conifères sont marquées par des évolutions temporelles très fortes du NDVI dans le temps, tandis que les communautés végétales alpines se distinguent par leur hétérogénéité au regard de leur évolution temporelle, mais généralement en baisse en particulier dans les forêts de Bouleaux riveraines des pâturages estivaux orientaux. La situation originale de

l'interface biogéographique entre taïga et toundra montre quant à elle une évolution significative, dans l'espace et dans le temps, du NDVI. Confirmée par l'évolution des températures régionales, ceci semble traduire l'avancée progressive des forêts de conifères en marge du biome de taïga ; et de la densification forestière des Bouleaux pubescents.

Ces différents constats appellent à une remobilisation des connaissances sur l'organisation spatiale des pâturages saisonniers, et leur extension au long des écotones zonaux (taïga, toundra) et altitudinaux (taïga ; toundra arborée ; toundra arbustive et rase). Cette remobilisation passera par l'examen sur le terrain de la diversité des paysages migratoires des cheptels de rennes de la communauté Gabna, et la réalisation de relevés floristique mettant en lien signal satellite et design du protocole de terrain. Par les terrains floristiques, on cherche dans ce travail de thèse à mieux caractériser la physionomie et la diversité des paysages végétaux de la communauté d'éleveurs de rennes semi-domestiques Gabna ; à lier physionomie végétale et réponse satellite des zones échantillonnées sur le terrain ; à caractériser le potentiel pastoral des différents pâturages saisonniers de la communauté Gabna. Le contexte du changement global, de ses effets sur les paysages et le système pastoral d'éleveurs de rennes Gabna sont au cœur de la méthodologie de recherche articulant suivi de la fragmentation, atmosphérique, climatique, phénologique et démographique. Ces terrains réalisés dans le nord de la région Norrbotten, au sein des territoires de la communauté Gabna, ont également été l'occasion de prendre contact et de communiquer avec les principaux intéressés : les éleveurs de rennes et les institutions les représentant (Parlement saami), ainsi que les scientifiques travaillant sur les questions socio-environnementales particulièrement délicates de l'élevage de rennes face au changement global.

Troisième partie : Quantifier et qualifier les paysages végétaux de l'élevage de rennes du nord de la Scandinavie : présent et futur

VIII - Le terrain en Laponie suédoise : approche générale, protocole des relevés floristiques et mise en place des discussions avec les parties-prenantes rencontrées

Dans les chapitres précédents, nous avons exploité les produits de télédétection, les bases de données climatiques, paysagères, floristiques, de démographie des rennes en les croisant avec celles concernant l'organisation spatiale et saisonnière des systèmes d'élevage. Cette démarche consistait à référer notre analyse des effets du changement global, intégrant le changement climatique et l'intensification de l'occupation du sol, à des découpages spatiaux et temporels ayant du sens par rapport à l'activité d'élevage. Elle s'inscrivait dans la perspective générale du doctorat, considérant les paysages de l'écotone toundra-taïga comme des paysages culturels de l'élevage des rennes. Nous sommes parvenus à certains résultats, et les observations de terrain ont permis d'apporter des arguments en termes d'interprétation, voire de discussion. Ces observations de terrain sont de deux ordres, des relevés floristiques et la réalisation de séances de discussion avec les parties prenantes. L'objectif général des relevés floristiques de terrain est de renseigner avec précision les formations végétales afin de caractériser leur intérêt et leur usage pastoral par les rennes et de comprendre leurs relations avec les images satellitaires, les conditions climatiques actuelles, et leurs éventuels changements futurs. Les discussions avec les parties prenantes avaient pour objectif de restituer les avancées de nos recherches aux éleveurs Saamis, ainsi qu'à la communauté scientifique suédoise et scandinave, et de mieux comprendre, contextualiser et interpréter nos résultats à la lumière de ces discussions.

Les deux types d'observations se rejoignent du fait de la cooccurrence des terrains en Suède pour les relevés floristiques, une meilleure compréhension du pastoralisme saami, et les échanges avec différentes parties-prenantes autour de cette problématique environnementale. Le choix du terrain a permis de cumuler plusieurs avantages. Travailler dans la commune la plus septentrionale de Suède, Kiruna, a du sens lorsque l'on s'intéresse à l'impact du changement climatique. Y était située la station climatique d'Abisko, dont nous avons pu évaluer l'intérêt et la représentativité. Nous avons pu bénéficier de l'accueil de la station scientifique d'Abisko qui est aussi une structure d'hébergement de la communauté scientifique internationale s'intéressant aux environnements arctiques. Sa situation dans le

parc national d'Abisko et sur le territoire de la communauté d'éleveurs de rennes de Gabna constituaient une opportunité particulièrement intéressante. L'étude de la fragmentation des paysages avait montré que le territoire de cette communauté était particulièrement intéressant, car au cœur d'enjeux environnementaux complexes. Enfin, la ville de Kiruna abrite le siège du Parlement Sami, auprès duquel nous avons présenté notre projet de doctorat et ses avancées successives.

Dans ce qui suit, nous présenterons dans un premier temps la stratégie d'échantillonnage, de collecte des d'analyse des relevés floristiques, puis nous exposerons la méthodologie que nous avons construite pas à pas d'un dialogue réflexif avec les éleveurs Saamis.

A - Stratégie d'échantillonnage des relevés floristiques : suivi temporel par satellite, diversité paysagère et ressources pastorales

1) Objectifs généraux des relevés de terrain : pastoralisme et réponse directes et indirectes des formations végétales au changement climatique actuel

La démarche générale d'échantillonnage des relevés de végétation s'est fondée sur le postulat d'une transition des paysages de l'élevage de rennes semi-domestiques de la communauté Gabna, dont le territoire est orienté du nord-ouest (pâturages d'été) au sud-est (pâturages d'hiver, figures VII.2 et VIII.3). Cette transition correspond d'une part à un double gradient bioclimatique, d'autre part à l'inscription de l'activité d'élevage dans ces paysages que nous qualifions de culturels, et finalement à sa nature spatio-temporelle qui pose en retour la question de la résilience actuelle et future des systèmes d'élevage.

Le premier gradient bioclimatique est zonal, et est représenté par l'écotone entre les paysages végétaux de forêts boréales de résineux et la forêt de plus en plus discontinue de bouleaux, au fur et à mesure que l'on se déplace en latitude vers le nord. La forêt boréale est caractérisée par la hauteur de la stratification des formations végétales, la dominance des essences résineuses, et la présence particulièrement marquée de sols tourbeux, de lichens terricoles et épiphytes, ressources appétentes et digestibles par les rennes. En direction du nord-ouest, ces paysages de conifères se dé-densifient puis disparaissent peu à peu du fait de températures estivales insuffisamment importantes pour permettre aux pommes de pin d'éclater et de diffuser leurs graines (Sømme, 1960). Dans les trouées et sous couvert forestier

acidiphile apparaissent les premiers saules et bouleaux pubescents, dont l'importance quantitative augmente conjointement à la diminution progressive latitudinale (et longitudinale/altitudinale) des conifères, trop contraints par la fraîcheur estivale. Les formations végétales de cette partie de l'écotone taïga-toundra sont alors marquées par la toundra arbustive, qui se caractérise par la dominance, et la hauteur des bouleaux pubescents (Ozenda, 1964, Sonesson, Wielgolaski et al., 1975, Wiegolaski Ed. 1997, Andersson Ed. 2005). Selon la direction (septentrionale, occidentale) et les conditions topo-climatiques, la délimitation de cette partie de l'écotone taïga-toundra varie. Le deuxième gradient est altitudinal, les paysages végétaux arborés, puis arborescents, herbacés et muscinaux se succèdent en écailles et forment des mosaïques en fonction des conditions altitudinales et topo-climatiques. Cet écotone est une variante montagnarde de l'écotone taïga-toundra classiquement décrit (Ozenda, 1964), et sa particularité, dans le contexte du réchauffement climatique, est d'être un écotone spatio-temporel. Ces deux gradients, zonal et altitudinal, ont constitué les principaux stratificateurs de notre stratégie d'échantillonnage de relevés floristiques opérés tout au long de la thèse.

Finalement, un troisième stratificateur structure l'espace de la communauté Gabna, c'est l'utilisation saisonnière des parcours et les trajectoires préférentielles suivies par les troupeaux de rennes lors de leurs migrations saisonnières. La saison d'utilisation des parcours est un élément important afin de comprendre l'intérêt pastoral de la végétation en fonction de sa composition et de sa structure floristique. En effet, dans un contexte marqué par de forts contrastes saisonniers, les espèces végétales ne sont pâturables qu'à certaines saisons (à l'exception des lichens, notamment *Cladonia rangiferina*, Lefrère, 2003).

Dans les communautés montagnardes, dont fait partie Gabna, les paysages forestiers sont le lieu de pâturage hivernal des rennes, qui y trouvent des lichens sous la couche neigeuse, une ressource essentielle à leur survie qui a fortement diminué au cours des dernières décennies (Sandström et al. 2016) alors que la couche de neige elle-même devenait de plus en plus difficile à creuser avec les épisodes de fonte-regel (Roturier et Roué 2009, Riseth et al. 2011). Nos précédents chapitres ont montré d'une part leur forte fragmentation (Chapitre II) et les changements dans leur fonctionnement photosynthétique saisonnier, leur biomasse et leur productivité (Chapitres V, VI et VII). En cela, ce gradient devient transition. L'utilisation des pâturages, les enclos et les trajectoires des troupeaux constituent un élément structurant de l'espace important dans la partie forestière de la communauté.

Les paysages situés le long du gradient altitudinal sont caractérisés par la présence de ressources pastorales cruciales dans le régime alimentaire de *Rangifer tarandus*, sélectionnées par les rennes semi-domestiques à des moments clés de leurs cycles biologiques : successivement vèlage, parades nuptiales, rut puis mélange entre mâles et femelles et reproduction (Klein, 1990 ; Lefrère, 2003). Ces ressources pastorales ont une physionomie principalement arbustive (*Betula nana*, *B. pubescens* ssp. *tortuosa*), buissonnante (divers *Salix*, *Empetrum*) et herbacée (certaines Cypéracées, Joncacées et Poacées). Dans cette partie montagnarde, les trajectoires sont discontinues et contribuent moins à la structuration de l'espace que le gradient altitudinal ou les effets d'exposition, qui vont guider principalement la stratégie d'échantillonnage dans cette partie du territoire pâturée pendant la saison estivale. Les toundras arbustives à *Betula pubescens tortuosa*, qui occupent les piedmonts de la chaîne fennoscandienne se sont densifiées au cours des années (Hadenås, Olsson et al. 2011), et bien que les rejets bas de cette espèce soit consommables par les rennes (Lefrère, 2003), ce changement a peut-être un impact sur les ressources pastorales. L'augmentation de la biomasse et de la productivité concerne l'ensemble des paysages organisés le long du gradient altitudinal, comme l'a montré la comparaison du NDVI (Chapitre VII) sur une période postérieure à la rupture des séries climatiques de température (Chapitre III).

Ces deux gradients biogéographiques latitudinal et altitudinal, et l'organisation spatio-temporelle des pâturages sont donc les principaux stratificateurs de la stratégie d'échantillonnage tout au long de la thèse. Plusieurs jeux de données et informations extraites de la littérature scientifique ont tout au long des travaux de terrain nourri l'approche d'échantillonnage, afin de rendre compte au mieux des conditions biogéographiques et pastorales de la communauté d'éleveurs avec laquelle le travail de terrain, et plus largement le travail de thèse s'est opéré. En effet, si « *la stratégie d'échantillonnage, et la chaîne de traitements succédant au terrain sont hautement dépendants de la démarche scientifique que l'on souhaite entreprendre* (Bouzillé, 2014) », il a également été nécessaire de pouvoir comprendre le terrain en biogéographie « à distance », passant par l'utilisation de données de télédétection et de géomatique. Ces données confirment l'hypothèse d'une transition entre biomes et transition altitudinale au sein des territoires de la communauté d'éleveurs de rennes. Ainsi les données d'occupation des sols Corine Land Cover, associées à un Modèle Numérique de Terrain, ainsi que de séries temporelles de suivi satellite par MODIS 13Q1 et

Landsat ont constitué le jeu de données utilisé avant, pendant et après les trois campagnes de relevés et mesures de terrain en biogéographie réalisés au cours de la thèse (figure VIII.1).

La figure VIII.1 illustre la démarche générale de terrain opérée en amont. Deux principales composantes sont ici visibles, à travers le gradient de couleur et la grille maillant la cartographie. Le gradient de couleur du vert au violet exprime les valeurs de réflectance dans le proche infrarouge (NIR, bande 5) des surfaces d'une partie de scène Landsat 8 (juillet 2017) correspondant à l'ouest du territoire de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna. Les deux extrêmes y sont ici visibles, les pixels verts foncé, avec une valeur supérieure à 1,

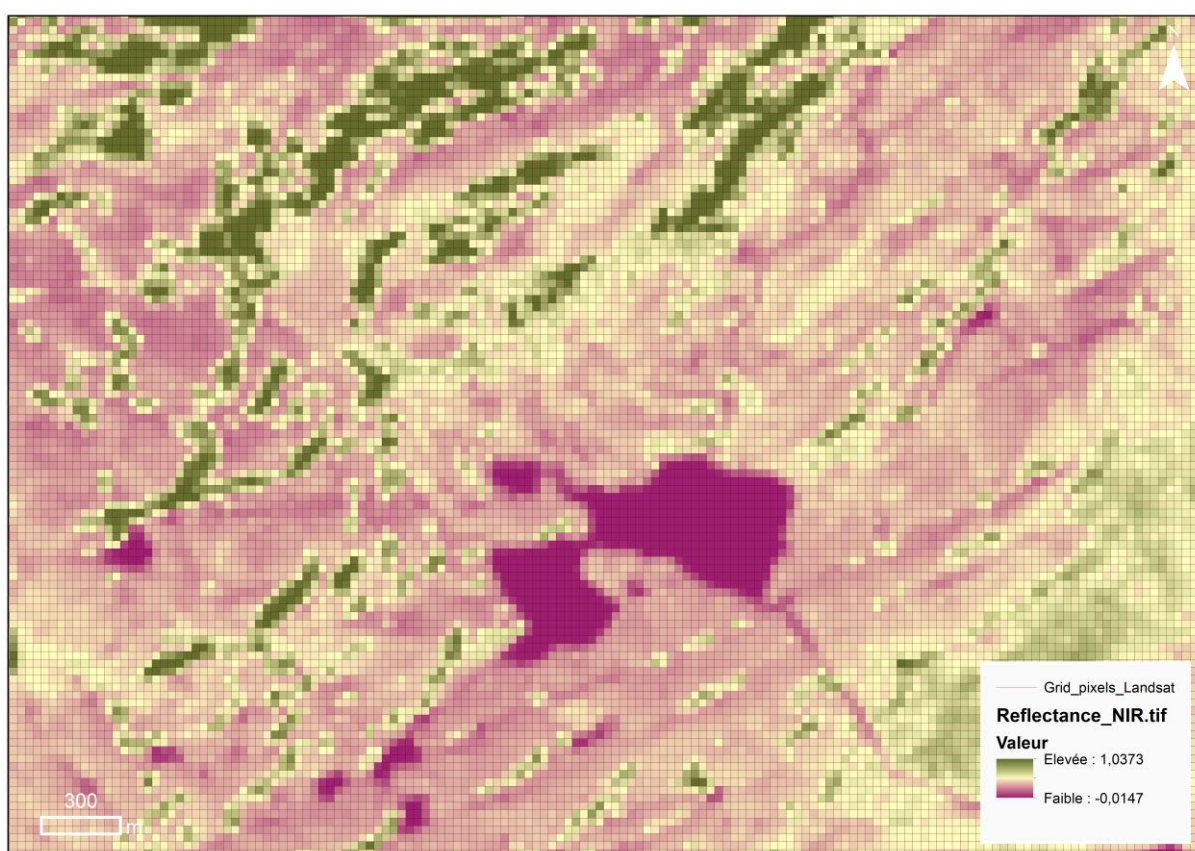


Figure VIII-1 : Extrait de la bande proche-infrarouge d'une sous-scène Landsat entrant dans la stratégie d'échantillonnage et le design des relevés floristiques par transect (Réalisation R. Courault, 2018)

représentant les surfaces dont la phytomasse est a priori la plus importante, car réfléchissant en particulier dans ce canal Landsat. Les pixels violets foncé ont des valeurs négatives et absorbent cette bande « proche infrarouge » du spectre électromagnétique. Elles sont représentatives des surfaces en eau, visibles au centre de la figure. Entre ces deux pôles négatifs et positifs, les valeurs intermédiaires sont représentatives de surfaces mixtes, dont la

fraction entre eau, végétation, sols et roches peut varier grandement. L'exploration de cette fraction, tout comme la structure et la composition végétale d'une partie de ces pixels à l'échelle de l'intégralité des pâturages saisonniers de la communauté d'éleveurs Gabna sont alors les objectifs principaux du terrain de recherche en biogéographie. Les pixels constituant le maillage souligné dans la figure VIII.1 constitue l'unité de base des relevés floristiques.

2) Une démarche orientée sur le potentiel pastoral des formations végétales échantillonnées, et leurs tendances évolutives spatiales et temporelles

Le territoire de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna s'étend des forêts acidiphiles du domaine de la forêt boréale jusqu'aux toundras des contreforts occidentaux de la chaîne fennoscandienne (encart de localisation, figure VIII.2). Le territoire de la communauté, tel que représenté par la base de données RenGIS 2.0, est ainsi constitué de pâturages saisonniers. Ces pâturages zonaux suivent l'orientation générale du balancement saisonnier entre saison estivale et saison hivernale, nécessaire à la satisfaction des besoins biologiques des troupeaux de rennes semi-domestiques (énergie, reproduction). Une partie de ces pâturages saisonniers est reprise dans les figures VIII.2 et VIII.3.

Pour illustrer ce lien entre les formations végétales et les besoins alimentaires des rennes au cours de l'année, nous avons construit deux profils de végétation le long de la trajectoire migratoire principale déclarée par les éleveurs et disponible dans la base de données géographiques RenGIS 2.0. A partir de l'ensemble des trajectoires migratoires disponibles pour la communauté Gabna, la trajectoire centrale a été choisie et individualisée sous SIG. Cette trajectoire principale, non rectiligne, a ainsi été prise comme point de départ pour la réalisation de deux tronçons linéaires, correspondant à une première trajectoire moyenne et rectilignes, orienté vers l'ouest-nord-ouest, et une deuxième trajectoire de direction nord-ouest (cartographies des figures VIII.2 et VIII.3).

A partir de ces deux tronçons, et à l'aide du Modèle Numérique de Terrain ASTER – GDEM et de la cartographie d'occupation des sols Corine Land Cover 2012, nous avons pu tracer deux profils de végétation, à l'aide des logiciels GRASS (fonction r.profile) et R. Ceux-ci décrivent la montée progressive des troupeaux de rennes Gabna vers le nord-ouest du territoire communautaire, au fur et à mesure de l'avancée de l'année bioclimatique, puis leur redescente en direction des pâturages d'hiver (sud-est) une fois la belle saison passée.

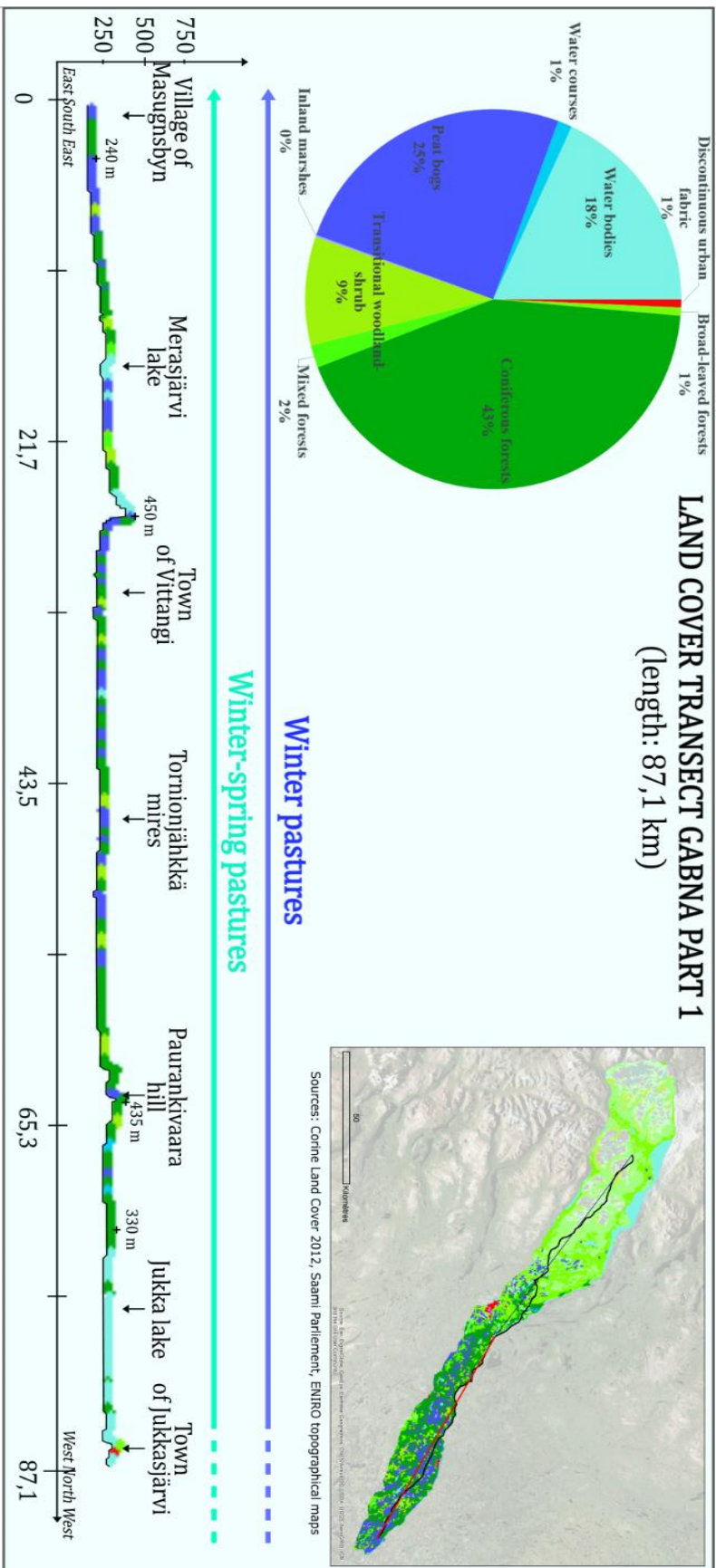


Figure VIII-2 : Tronçon nord-ouest du profil de végétation réalisé à partir de la trajectoire migratoire principale des rennes semi-domestiques de la communauté Gabna (source: RenGIS 2.0; Corine Land Cover; Réalisée sous Grass GIS et R. R. Courault (2018))

LAND COVER TRANSECT GABNA PART 2
 (length: 84,8 km)

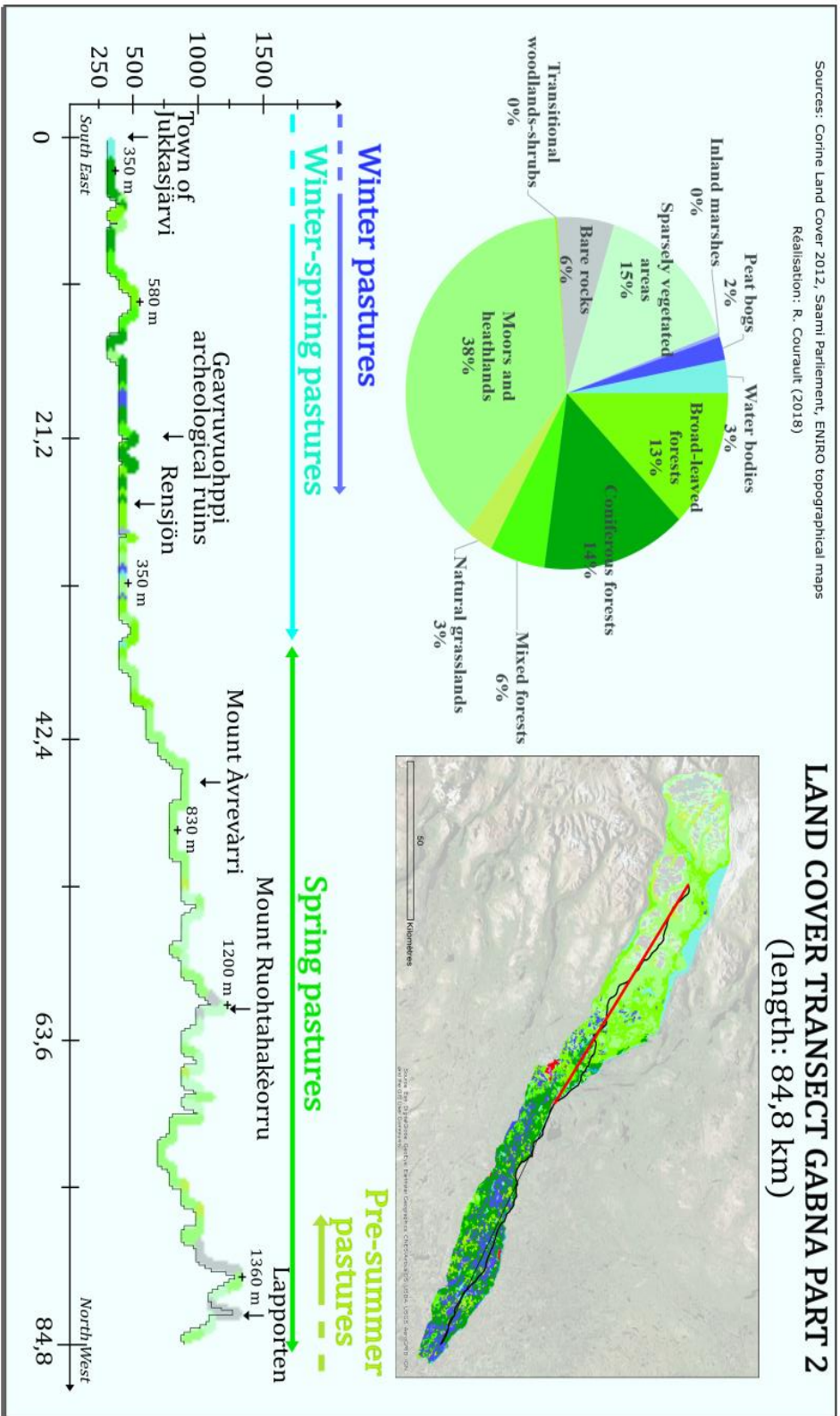


Figure VIII-3. Tronçon nord-ouest du profil de végétation réalisé à partir de la trajectoire migratoire principale des rennes semi-domestiques de la communauté Gabna (source: RenGIS 2.0; Corine Land Cover; Réalisée sous Grass GIS et R, R. Courault (2018))

Une partie des trajectoires migratoires, telles que présentées par la base de données géographiques RenGIS 2.0, n'a pas été prise en compte dans la réalisation des profils. Il s'agit principalement de trajectoires secondaires, parties intégrantes du réseau de trajets migratoires cartographiés par la communauté Gabna. Certains tronçons de trajectoires migratoires sont également partagés avec les communautés frontalières, en particulier la communauté/sameby de Talma, qui longe la frontière nord de la communauté Gabna. D'autres sont des ramifications de la trajectoire principale, représentées par des tronçons secondaires, tertiaires, ou même des fragments discontinus de trajectoires, ceux-ci étant disjoints et particulièrement éclatés au sein des territoires saisonniers d'été (migrations partielles d'été). C'est pour cette raison (séparation géographique entre le réseau de trajectoires et ces fragments) que les pâturages d'été et une partie des pâturages de pré-été sont absents de la figure VIII-2. La discontinuité des trajectoires estivales témoigne ainsi de l'extensivité de la gestion des troupeaux pendant la saison estivale, pendant laquelle les rennes semi-domestiques sont laissés en liberté se déplacer en fonction de leurs besoins.

Ces deux tronçons représentés en figure VIII.2 et VIII.3, et la succession des couvertures de sols évoquée par les profils, illustrent la diversité paysagère au long des paysages migratoires. Pâturages d'hiver et de printemps-hiver sont marqués par des altitudes inférieures à 500 mètres, où la migration alterne entre tourbières gelées, épinettes et lacs gelés. Ainsi 43% du paysage du premier tronçon (figure VIII.2) est constitué de forêts de conifères, 25 % d'habitats de tourbières, le reste étant partagé entre les zones englacées (cours et plans d'eau), les forêts mélangeant conifères et feuillus ainsi que les zones de forêt et végétation arbustive en mutation (correspondant à des coupes forestières ou des plantations en croissance). Le deuxième tronçon (figure VIII.3) se démarque par un différentiel d'altitude deux fois plus important (1100 mètres contre 500 mètres pour le tronçon 1). Ce tronçon présente également une composition paysagère plus diversifiée, notamment due au gradient bioclimatique altitudinal plus marqué (-1,1°C tous les 100 mètres, Christopherson, 2012). Ainsi, 38 % des couvertures de sols le long du profil sont des landes et bruyères. Les pierriers d'altitude, faiblement végétalisés, ou totalement rocheux, totalisent 21 % de la composition paysagère du profil. Les forêts de conifères et de feuillus représentent respectivement 13 et 14%.

Ces deux profils ne représentent qu'un échantillon linéaire restreint de la diversité paysagère de la communauté d'éleveurs Gabna, mais justifient la démarche d'échantillonnage

de terrain floristique entreprise lors des missions de terrain. La recherche de représentativité a ainsi plusieurs dimensions : représentativité des formations végétales et de leur distribution géographique, au long du continuum biogéographique entre forêts de conifères et toundra et du gradient altitudinal ; mais aussi représentativité des paysages pastoraux, en prenant en compte les pâturages saisonniers et des marqueurs paysagers de l'élevage de rennes (enclos, etc) au sein desquels les troupeaux de rennes sont triés et parqués à certaines époques du calendrier pastoral (marquage des faons, abattage des mâles). Une dimension est également à ajouter, liée à la problématique du changement global, en particulier des effets directs et indirects du changement climatique anthropogénique présent et futur sur les paysages végétaux et les ressources pastorales de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna (écotone spatio-temporel, paysages culturels en « transition »).

Il s'agit ainsi de faire correspondre les séries chronologiques acquises par deux grandes classes de satellites proposant des banques d'image des trois ou quatre dernières décennies (Landsat, résolution spatiale 30 m², répétitivité temporelle faible ; MODIS – Terra, résolution temporelle 250m², répétitivité temporelle bimensuelle) avec des relevés floristiques in-situ. Cette correspondance entre imageries satellite et relevés floristiques de terrain passe alors par la quantification de la réponse supposée de la végétation à l'indice NDVI, et le lien entre NDVI mesuré par satellite, biomasse et type de formations végétales présentes sur le terrain (approximés par la description de la stratification, densité, diversité, fréquences spécifiques). La correspondance entre NDVI et relevés de terrain est à la fois spatiale et temporelle : le but recherché reste l'approximation d'une partie des paysages végétaux présents (notamment en mesurant la force des liens entre réponse spatiale du NDVI et répartition des formations végétales échantillonnées) avant de les conjuguer avec la répartition des températures moyennes actuelles, puis dans le futur (proche et lointain) selon les prévisions des modèles climatiques. A partir de ces éléments, et du recul méthodologique (satellite, terrain) et thématique (climatologie, écologie et biogéographie) opéré, la démarche nous autorisera à inférer certains ordres de grandeurs quant au futur potentiel paysager et pastoral des territoires saisonniers de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna.

L'échantillonnage, ainsi que la conception du protocole de relevés de terrain qui ont suivi, se sont donc calés sur ces différents objectifs et dimensions (gradient bioclimatique, importance de la topographie, liens entre NDVI, relevés, températures présentes et futures). La question du pastoralisme, vue à travers la disponibilité des ressources végétales pâturables

des troupeaux de rennes semi-domestiques d'après les découpages temporels saisonniers saamis, est centrale dans le montage du protocole. Il semble alors essentiel de se concentrer sur les végétaux pâturables, selon leur appétibilité et leur digestibilité par les rennes semi-domestiques, d'après la littérature scientifique. Malgré tout, l'unique prise en compte de l'absence ou la présence exhaustive des végétaux pâturables semble insuffisante pour une comparaison inter-saisonnière des relevés de terrain. En effet, la prise en compte des autres espèces floristiques, et leurs relations interspécifiques, sont particulièrement utiles pour la prise en compte du potentiel pastoral des paysages végétaux et des formations végétales que l'on souhaite échantillonner. Ces informations floristiques générales ont aussi montré leur intérêt pour l'interprétation des résultats obtenus à partir des images de télédétection (Partie II). Une liste exhaustive d'espèces floristiques est alors recueillie dans le protocole de relevés. Celle-ci prendra en compte, lors des observations, l'intégralité des plantes vasculaires visibles. Pour les espèces non vasculaires, les critères de discrimination des rangs taxonomiques (familles, genres, espèces) sont plus complexes comparativement aux végétaux vasculaires. A travers les questions du potentiel pastoral et de la compétition interspécifique, il semblait important de prendre en compte la plupart des mousses et des lichens effectivement pâturés par les rennes, ainsi que ceux restant des indicateurs forts des milieux échantillonnés et observés. De plus, les moyens matériels, la documentation disponible (flores nordiques des lichens : Ahti, 1999 ; des plantes vasculaires : Mossberg & Stenberg, 2003) et le temps mis en œuvre pour la reconnaissance botanique des végétaux échantillonnés ont également contribué aux choix que nous avons effectués sur le terrain : les genres et les espèces les plus facilement reconnaissables d'espèces non vasculaires étant souvent les espèces les plus souvent broutées par les rennes, où celles les plus quantitativement retrouvées dans les tapis de mousses ou les buttes à sphaignes.

Au-delà de la présence et de l'absence des différentes espèces végétales, et du dressage d'un tableau exhaustif par station de relevé, nous permettant de qualifier la composition floristique de chacune des stations, la mise en place d'un protocole a permis de cerner plus finement le potentiel pastoral, et l'abondance de chaque espèce floristique pour chaque relevé. La quantification de l'abondance passe par son approximation via la fréquence, autrement dit la contribution de chaque espèce au sein du relevé. Cette technique, principalement inspirée de la méthode de terrain et de traitement de données proposée par Daget et Poissonnet (1972), est expliquée dans les parties suivantes.

La question de l'absence, de la présence, de la fréquence voire de la biomasse des ressources pastorales appréciées par les rennes selon la localisation du relevé floristique au sein d'un pâturage saisonnier restent étroitement liées à la détection des surfaces végétalisées par imagerie satellite. Ceci à condition que ces végétaux constituent le toit de la végétation et soient suffisamment couvrants pour être détectés par le satellite. Ces couverts végétaux, au-delà de l'échelle du relevé floristique et de l'observation de terrain, ont leurs propres caractéristiques biologiques, optiques et physiques.

B - Les protocoles de relevés floristiques et physiologiques, édaphiques, et radiométriques

1) Le matériel et les fiches de terrain pour les relevés d'inventaires floristiques, physiologiques, et de facteurs abiotiques

Le matériel de terrain a été photographié, en figure VIII.4. Selon les conditions, il se compose du Trimble GPS, d'un GPS Garmin, d'un double décimètre, d'aiguilles en cuivre, de drapeaux, d'un mètre de charpentier, d'une ou plusieurs flores suédoises et françaises, des herbiers réalisés lors des relevés précédents, du carnet de terrain, d'un stylo, d'un pH-mètre, d'un spectro-radiomètre, d'un luxmètre, de sachets d'échantillon, de marqueur, et de nourriture, tente, sac de couchage, si plusieurs relevés sont prévus lors de la même sortie de

terrain.

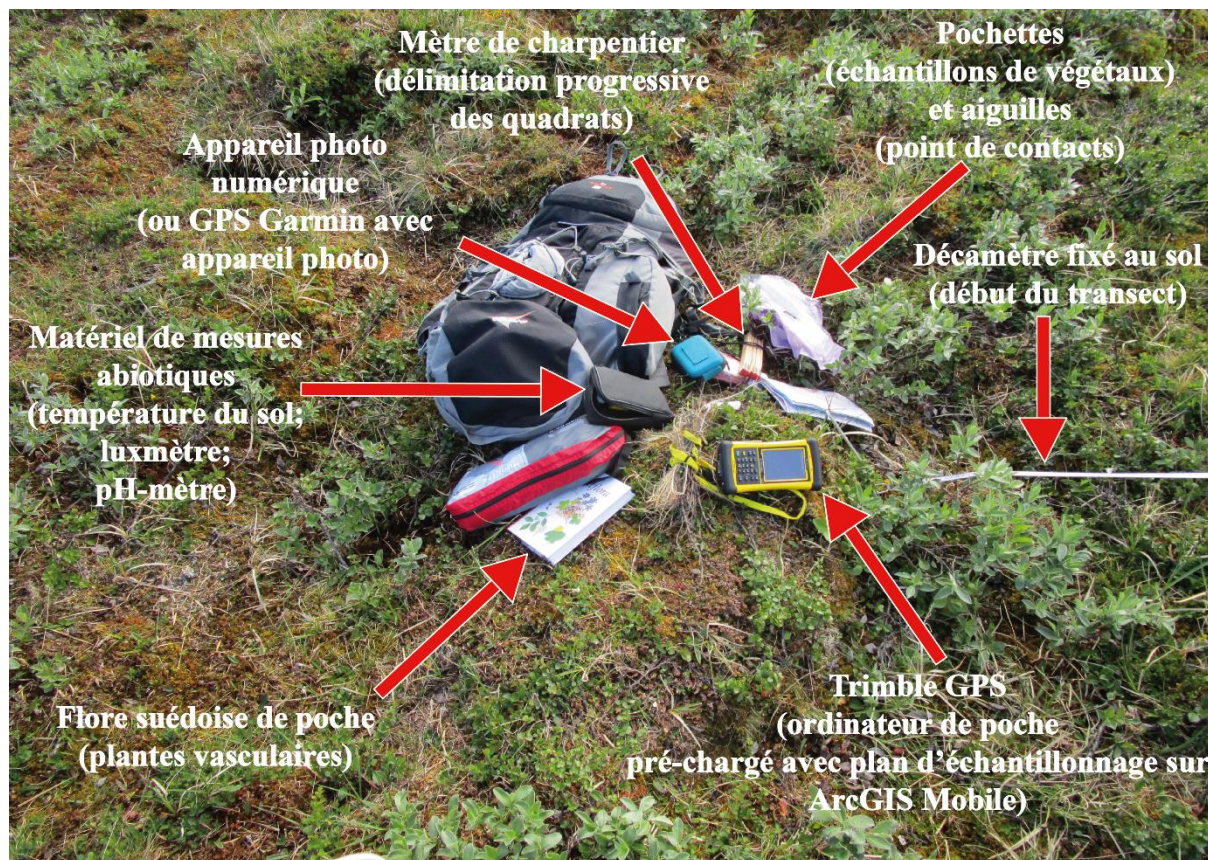


Figure VIII-4: Photographie de terrain centralisant la majeure partie du matériel utilisé pour les relevés floristiques et les mesures abiotiques (Crédits: R. Courault, 2015)

L'installation du matériel de mesures, en particulier le double-décamètre (50 m) est la première étape. Les drapeaux peuvent être utilisés pour délimiter le transect de 42 mètres, et pour stabiliser le décimètre (figures VIII.4 et VIII.5). L'installation du double décimètre est déterminée à priori par le choix préalable d'un pixel Landsat représentatif des stratificateurs d'échantillonnage : situation au centre d'un polygone CLC, altitude, autres paramètres type NDVI, proximité à la trajectoire (dans les pâturages autres qu'estivaux). Une fois sur le terrain, le pixel est recherché avec le Trimble et l'on essaie de respecter ce choix préalable (sauf difficulté exceptionnelle d'accessibilité). Ensuite se pose la question de l'emplacement de la diagonale de 42 mètres, deux choix étant possibles, la diagonale représentant au mieux la diversité végétale de la station est choisie¹. Une fois le transect matérialisé, nous établissons la fiche de terrain pour le relevé floristique : date, heure, nom donné au relevé, altitude,

¹ Dans le cadre du projet Envexx, 3 pixels ont été étudiés, et chacun par deux diagonales disposées en croix, voir figure 12 et sous-partie 6

orientation du transect, coordonnées GPS de début et de fin du transect, remarques sur les conditions météorologiques, sur l'environnement immédiat et la physionomie du relevé (traces de broutage, présence et répartition de l'eau, éboulis etc ; figure VIII.6). Des photographies sont également prises du relevé, avec différentes focales (décamètre, site), avec un appareil numérique ou un appareil avec géoréférencement.

Un exemple de fiche de terrain est présent en figure VIII.6. Après la complétion des métadonnées du relevé de végétation, quelques lignes du tableau de relevés sont utilisées pour les variables environnementales au long de chaque quadrat composant le transect (42 m, soit 42 m² échantillonnés par quadrat d'1 m²). Le mètre de charpentier, plié en deux ou posé en croix perpendiculairement au décamètre délimite physiquement les quarante-deux quadrats effectués tout au long du transect (figure VIII.5). Outre son adéquation avec la géométrie de l'image Landsat, la surface échantillonnée s'approche d'un taux de 5% conseillé par Frontier (1983). En outre, le calcul des fréquences d'espèces s'appuie sur une base statistique assez



Figure VIII-5: Photographie du matériel de terrain une fois l'inventaire floristique initié. Au premier plan: le démarrage du transect, avec le mètre de charpentier servant à délimiter les quadrats. Crédits R. Courault 2016

solide ($n > 30$). La détermination de la contribution des espèces au biovolume sera affinée par d'autres protocoles décrits plus loin.

Une première sous-partie a trait aux mesures géophysiques, systématiquement réalisées au premier quadrat (Q1), au quadrat intermédiaire du transect (Q21) ainsi qu'au dernier quadrat (Q42). Les mesures géophysiques, ou abiotiques, sont représentées par la température du sol

et sa fraction d'eau, estimée en pourcents (matériel de jardinage), le pH du sol, ainsi que la luminosité (luxmètre). Celles-ci ont été appliquées lors de la première mission de terrain, en 2015. Pendant le projet Envexx, les géochimistes (encadrants et étudiants) ont pu utiliser du matériel prêté par le laboratoire METIS (Sorbonne – Université, Faculté des Sciences) pour mesurer la température du sol, la fraction humide (exprimée en pourcent) et le pH des sols superficiels (et profonds), et de vérifier les mesures de terrain au laboratoire de la station d'Abisko. En raison du matériel défaillant (thermomètre et humidimètre cassés) la troisième

mission de terrain (juillet et août 2016) les mesures de température des sols et d'humidité (en %), ainsi que de pH n'ont pu être réalisées pour l'ensemble de ces relevés, en tout cas pas de façon comparable (appareils différents, étalonnage peu concluant etc, mesures prises de façon partielle pendant les relevés floristiques etc).

Egalement dans la figure VIII.6, une deuxième sous-partie a trait aux états de surface propres à chaque quadrat. Les variables environnementales, en deuxième partie de tableau, représentent les états de surface (eau, sol, roche nue) mais aussi ce qui a trait aux interactions éventuelles de la végétation avec la faune, tout particulièrement les fèces reconnus comme émises par des cervidés (rennes ou élans), ainsi que les traces de broutage. Si plusieurs interactions sont observées, celles-ci sont dénombrées : plusieurs traces de broutage remarquées dans le quadrat observé sont comptées et reportées. Il en va de même pour les fèces. Pour les autres états de surface du sol décrit par quadrat (butte, micro-dépression, caillou, rochers, eau etc), les présences sont uniquement reportées dans la fiche de relevés.

Après avoir rempli le tableau de métadonnées, et réalisé les mesures abiotiques en début, milieu et fin de transect de relevé de végétation, on procède à l'inventaire floristique, représenté par l'observation des points de contact et des présences des végétaux (vasculaires, bryophytes, lichens). Le premier mètre carré (Q1) est en général le plus long, puisqu'il correspond à la (re) découverte des espèces végétales à inventorier et à lister. Après la mise au point botanique faite à Q1, on commence systématiquement par le dénombrement complet par

points de contact. Au début de chaque quadrat (le côté le plus proche du point 0, soit le début du transect), l'aiguille nous permet de compter le nombre de parties végétatives des végétaux rencontrés la touchant, feuilles, tiges, fleurs, mousses. Cette méthode a notamment été mise en place par Bruce Lévy (1933) et Riepma et al. (1963) afin d'obtenir une quantité précise du nombre de parties végétatives des plantes touchant le point de contact. Cette quantité permet de pondérer la liste floristique (diversité spécifique) par la fréquence des contacts de chaque espèce répertoriée (Daget et Poissonet, 1969 et 1971, réédité en 2010, <https://umr-selmet.cirad.fr/FichiersComplementaires/Prairies%20et%20paturages.pdf>). Ces auteurs considèrent que le cumul des contacts est une approximation du biovolume de la végétation herbacée, et en pondérant la

Relevé:	NJ1060								
Date, heure	17/7/2015 11H45								
GPS début N	7585736								
GPS début E	405074								
GPS fin N	7585698								
GPS fin E	405083								
Altitude	Amont/début transect: 1060; Aval/fin transect: 1047								
Orientation	NE=>SW								
Remarque	Débouché moraine/vallée glaciaire. Lac rond en face. Grassland								
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	
Mesures	T° sol								
	Teneur en eau en %								
	pH								
	Luxmètre	260 lux							
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	
Etat surface du sol	Humus								
	Crottes								
	butte								
	micro-depressiom								
	caillou, rocher				x				
	mousse>=5cm								
	Eau								
Espèces		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	
	Arctostaphylos alpinus								
	Arctostaphylos uva-ursi	x	x	2	x	x	x	1	
	Astragalus alpinus ssp arcticus		x		x				
	Betula nana	x	x	x	x	x	x	1	
	Betula pubescens ssp. czecerepanovii								
	Bistorta vivipara	x	x	x	x	x	x	x	
	Brassicacée								
	Carex atrofusca								
	Carex bigelowii ssp. rigida	x	x	x	x	3	x	x	

Figure VIII-6: Exemple de fiche de relevé floristique (partie inventaire) numérisé et habillé pour description et explications auprès des étudiants de Licence du projet Envexx (Sorbonne-Université), Réalisation R. Courault (2018)

contribution des espèces avec leur valeur pastorale et avec le taux de recouvrement herbacé, ils proposent une formule de calcul de la valeur pastorale (voir plus bas). Ces auteurs considèrent aussi qu'un minimum de 33 points de sondage est nécessaire afin que l'intervalle de confiance de la méthode soit acceptable, notre dispositif de 42 points de sondage est donc au-dessus de ce seuil de fiabilité.

Pour les tapis de mousses, le dénombrement complet des contacts peut être particulièrement difficile, tout comme une estimation du nombre de contacts des tissus. Les tapis de mousses rencontrés dépassant 5 centimètres d'épaisseur sont ainsi quantifiés en termes de profondeur (en centimètres), et non en tant que nombre de contacts comme pour les végétaux vasculaires. En revanche, un comptage très soigneux est opéré pour les lichens arbusculeux et pour les plantes herbacées.

Ainsi, un nombre inscrit en colonne spécifie pour chacun des quadrats la quantité de contacts observés, ou estimés (mousses). Les lignes sont remplies au fur et à mesure que l'on note des espèces floristiques (plantes vasculaires, mousses, ou lichens) touchant l'aiguille du point de contact.

La deuxième étape de réalisation des quadrats est représentée par la notification de la présence des espèces floristiques (vasculaires, bryophytes, lichens), après avoir compté le nombre de contacts. Contrairement à la méthode des contacts-aiguilles, le recensement ne se limite pas aux strates basses (de hauteur inférieure ou égale à 40 cm, soit la longueur de l'aiguille de cuivre permettant d'échantillonner), mais inclut aussi les espèces ligneuses des strates supérieures surplombant la strate herbacée. La présence de chacune des espèces rencontrées au sein d'un quadrat est notée sur le tableau de relevé au moyen d'une croix (X, figure VIII.6). Une ligne représentant une espèce, il n'est pas nécessaire de remplir une autre ligne si la même espèce est rencontrée plusieurs fois au long des 42 quadrats constituant le transect (42 quadrats, soit 42 colonnes).

2) La reconnaissance botanique et la constitution d'herbiers

La reconnaissance botanique étant difficile, les espèces non reconnues sur le terrain ont été échantillonnées, au moyen de sacs sur lesquels ont été notés : jour du relevé ; nom du relevé ; numéro du quadrat de l'échantillon. Parfois, les conditions difficiles (froid, pluie etc) n'autoriseraient que difficilement la création d'un sac par quadrat. Pour ces cas précis, le sac d'échantillon pouvait comporter uniquement le nom du relevé et la date de l'échantillonnage.

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

Ceux-ci sont représentés par les plantes vasculaires (en particulier les Poacées, Cypéracées et Joncacées, dont la reconnaissance précise ne pouvait se faire que calmement au laboratoire, au moyen de loupes), de même que les mousses, les lichens terricoles (crustacés, foliacés et arbusculeux) et épiphytes.

Quadrat par quadrat, les échantillons non reconnus sont surnommés ; avant d'être mis en sac et échantillonnés pour reconnaissance ultérieure. Les surnoms, constitutifs des lignes tout comme les espèces directement reconnues sur le terrain, représentent en général le genre ou la famille de plantes dont on suppose l'appartenance de l'échantillon, additionné de critères morphologiques particulièrement marquants (couleur, texture, morphologie etc). Ces échantillons de végétaux sont ensuite reconnus au niveau spécifique, voire sous-spécifique pour les espèces à intérêt pastoral (*Empetrum nigrum* ssp *hermaphroditum*) et environnemental (*Betula pubescens* ssp.*tortuosa*). Ils constituent donc une ligne supplémentaire, au même niveau que les individus rencontrés sur le terrain mais directement reconnus, n'ayant pas nécessité d'échantillonnage.

Les sacs d'échantillons sont par la suite conservés dans le sac de randonnée, puis stockés dans les salles réfrigérées de la station scientifique d'Abisko, en vue d'une conservation plus longue. Des sessions de reconnaissance botanique étaient ainsi mise en place régulièrement au long de l'avancée des mois de terrain afin de reconnaître les échantillons de plantes vasculaires, mousses et lichens au niveau spécifique. Cette reconnaissance botanique a été réalisée à l'aide des flores (suédoises, mais aussi françaises¹), de loupe de botanistes, et de microscopes si besoin. Les échantillons reconnus, répertoriés au préalable sur le terrain et dans le carnet, sont alors corrigés dans le carnet de relevés et apparaissent dans des feuillets spécifiques dédiés à la reconnaissance végétale et à la correction puis la digitalisation des relevés floristiques bruts. Enfin, toujours dans les locaux de la station scientifique d'Abisko, les végétaux échantillonnés et reconnus sont mis en herbier provisoire (ou en boîte, en ce qui concerne les bryophytes et les lichens) pour les dernières vérifications une fois rentré à Paris.

¹ Flores nordiques des lichens : Ahti, 1999 ; des plantes vasculaires : Mossberg & Stenberg, 2003. Flores françaises : Rameau, Mansion et al., 1993 ; Streeter, 2011 ; Fitter, 1991 ; Coste, 1906 ; pour les flores écossaises, la plupart des mousses et certains lichens y sont répertoriés, Flora Europaea (Tutin et al., 2001).

Les herbiers de travail (figure VIII.7) se sont montrés particulièrement judicieux et pratiques à emmener (en conditions sèches), en particulier sur les terrains ayant suivi la première mission de 2015. Un herbier représente une mission de terrain (soit trois herbiers principaux correspondant aux trois missions de terrain : première année de doctorat (été 2015, terrain réalisé sous la supervision de Marianne Cohen) ; projet Envexx (juin 2016 ; supervisé par Marianne Cohen, Alain Rabeaute, Marie Alexis, Romain Courault et avec l'aide de trente étudiants en géographie et en sciences de la Terre de Sorbonne-Université) ; mission de terrain de la deuxième année de doctorat (juin à août 2016 ; sous la supervision de Marianne Cohen pour les premiers jours de relevés faits dans les pineraies de la région de Kiruna). Chaque herbier, matérialisé par un classeur ou un porte-vue, reprennent donc une des missions de terrain effectuées, et se subdivise en relevés floristiques réalisés. Les compartiments des porte-documents représentent ainsi les relevés floristiques. Un compartiment est alors composé de feuillets, où les végétaux échantillonnés sont alors collés (scotch) après avoir été séchés entre deux feuilles de papier journal, répertoriés et reconnus en termes botaniques (espèce, sous-espèce ; à défaut genre ou famille). Chaque feuillet est annoté selon le nom du relevé floristique en question et le jour de l'échantillonnage.



Figure VIII-7: Photographie des feuillets d'échantillons de végétaux herbacés, particulièrement utile pour la reconnaissance végétale et la correction des identifications d'espèces post-terrain. Crédits: R. Courault, 2018

3) Le relevé physionomique : méthode de l'Intercept Cover et fiche de terrain associée

La méthode par *Intercept Cover* a été décrite la première fois par Canfield en 1941 ([http://www.webpages.uidaho.edu/veg_measure/Modules/Lessons/Module%208\(Cover\)/8_4_Lines.htm](http://www.webpages.uidaho.edu/veg_measure/Modules/Lessons/Module%208(Cover)/8_4_Lines.htm)). Celle-ci consiste à quantifier le recouvrement (canopée) de chaque arbre, arbuste ou herbe intersectant sa canopée avec le linéaire du décimètre (figure VIII.8). Par espèce, et par individu, on obtient ainsi la part de recouvrement de chacun : on additionne l'unité de longueur (mètre, centimètres) des végétaux dont les parties aériennes de hauteur égale ou supérieure à 0,5 m surplombent et intersectent le transect. On divise par la suite la somme des longueurs recouvertes par individus et/ou par espèce par la totalité de la longueur du transect et on multiplie par 100 pour obtenir le taux de recouvrement. La méthode par Intercept Cover permet de construire des pyramides structurales utiles pour caractériser les formations végétales précédemment mesurées du point de vue de leur biodiversité et leur phytosociologie (Bertrand, 1966).

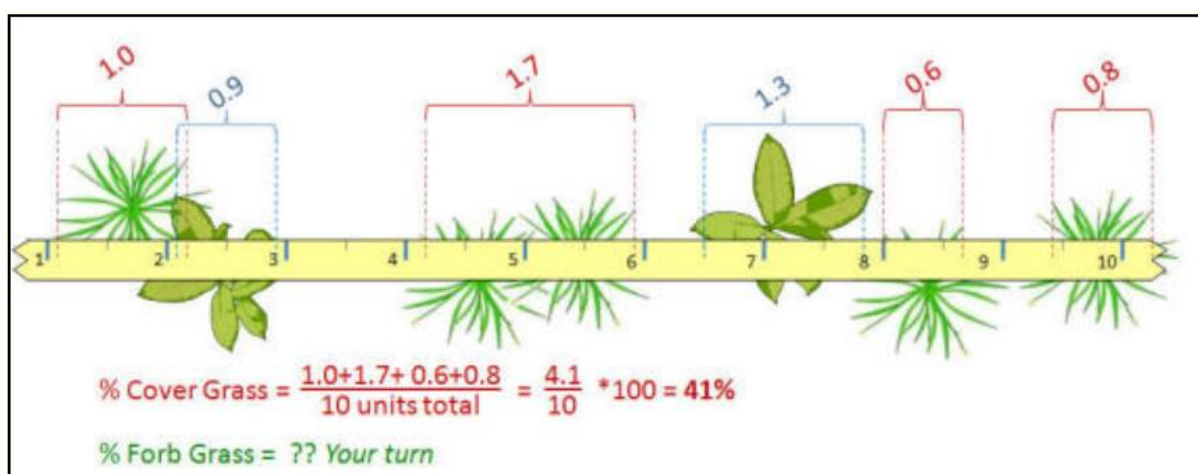


Figure VIII-8: Exemple illustré de la méthode par Intercept Cover (source: University of Idaho, voir lien URL ci-dessous)

Avant d'appliquer cette méthode, il est cependant nécessaire de prendre en compte la physionomie générale des formations végétales préalablement mesurées par les relevés par points de contact, absence/présence et facteurs abiotiques. La réalisation d'un dispositif Intercept Cover est ainsi peu pertinent dans un milieu de type prairie alpine, dont la stratification est particulièrement basse.

En pratique sur les terrains lapons, plusieurs formations végétales ont été identifiées selon leur physionomie pour la réalisation des Intercept Cover au long des transects d'inventaires floristiques de la strate herbacée. Ces physionomies végétales sont comprises ici comme étant une stratification plus ou moins complexe et hétérogène, en particulier des espèces ligneuses et de leur mélange éventuel (Ericacées, Salicacées, Betulacées, Pinacées). Les sites de relevés, choisis pour leur représentativité paysagère, peuvent être situés en situation d'écotone (ex. entre tourbière et lisière de toundra haute à Bouleaux pubescents) ou dans une formation végétale marquée par son homogénéité verticale (les forêts de Pins sylvestre par exemple). La prise en compte d'un seuil de hauteur pour la réalisation de l'Intercept Cover est ainsi importante. Le premier seuil de hauteur correspond à celui retenu en général pour la strate herbacée, dont les végétaux se caractérisant par une taille inférieure de 50 cm de hauteur. Ceux-ci sont comptabilisés dans le relevé floristique par points de

De Q0 à 42			
Essence	Hauteur m	Début m	Fin m
Betula nana	0,6	0,3	0,4
Rhododendron tomentosum	0,7	2,3	2,4
Pinus sylvestris	5	4,3	5,2
Pinus sylvestris	8	5,7	8,9
Betula nana	0,55	7,1	7,4
Pinus sylvestris	9,5	10,65	10,9
Rhododendron tomentosum	0,5	18,8	19,5
Rhododendron tomentosum	0,5	19,4	19,45
Rhododendron tomentosum	0,65	21,5	21,7
Pinus sylvestris	5,5	23,4	25,5
Pinus sylvestris	6,5	25,5	28,2
Picea abies	1,35	29,7	30,5
Pinus sylvestris	10	32,7	35
Pinus sylvestris	8	34,9	35,5
Betula nana	0,8	34,1	34,65
Betula nana	0,8	34,1	34,25
Pinus sylvestris	0,7	34,6	34,9
Betula nana	1	35,5	24014
Betula nana	0,6	36	36,15
Betula pubescens	5	36,4	39,15
Pinus sylvestris	9	37,3	39,2
Salix phylicifolia	0,7	38,4	38,7

Figure VIII-9: Exemple de relevé par Intercept Cover numérisé. En colonne, les espèces végétales rencontrés, la hauteur, le début et la fin de la projection de la couronne sur le transect. Les lignes représentent les individus. Réalisation: R. Courault (2018)

contact avec les aiguilles (40 à 50 cm de longueur) et absence/présence, avec généralement la non-application de la méthode de l'Intercept Cover. Les formations végétales marquées par la hauteur de leur végétation (forêts, landes hautes à bouleaux hydrophiles etc) concernent le deuxième type de formation végétale. Celle-ci se démarque par une physionomie haute, où la stratification de la végétation peut dépasser le mètre.

Par conséquent, les formations végétales dont la physionomie est basse (généralement stratification démarrant à 0,5 mètre, dénotant de l'absence de phanérophytes matures), telles que les landes à Ericacées, les pelouses alpines ou les tourbières, ont été relevés sur la base des points de contact et absence/présence, mais n'ont pas bénéficié de la méthode de l'Intercept Cover. On appliquait ainsi aux formations végétales dont les individus pouvaient dépasser les 50 cm à 1 mètre conjointement la méthode des relevés floristiques par

points de contact et absence/présence mais aussi la méthode par Intercept Cover. La figure VIII.9 est un extrait de tableau de relevé par Intercept Cover, réalisé en lisière d'une Pîneraie tourbeuse exploitée (environs de Vittangi, comté du Nord-Botnie, Suède). Après avoir choisi d'opérer un Intercept Cover sur la base de la stratification des formations végétales, plusieurs informations sont nécessaires. La première d'entre elle concerne l'identification de l'espèce à laquelle l'individu comptabilisé appartient. L'écorce, les feuilles ou les aiguilles permettent d'identifier facilement et de renseigner dans le cas des résineux. Dans le cas des bouleaux pubescents, nous nous sommes appuyés sur les critères de la Flora Europae (Tutin et al., 2001) et sur les cartes de répartition des flores suédoises (Mossberg et Stenberg, 2003) pour différencier les deux sous-espèces (*pubescens* et *tortuosa*). La deuxième information nécessaire concerne la hauteur de l'individu. Si sa hauteur est inférieure à deux mètres, on mesure directement l'individu croisant le transect à l'aide du mètre de charpentier. Pour les phanérophytes dépassant les deux mètres, il a été nécessaire d'estimer leur hauteur. Selon les conditions et la possibilité d'éloignement à l'individu dont on doit mesurer la hauteur, celle-ci a été quantifiée à l'aide de la méthode de la croix de bûcheron. A l'aide d'un bâton dont on connaît la longueur et que l'on tient à perpendiculaire au sol, à hauteur de poitrine, on s'éloigne du point B (centre de l'arbre) jusqu'à ce que la totalité de la longueur du bâton recouvre la totalité de la hauteur de l'arbre (point C). La distance entre point B et point C correspond approximativement à la hauteur de l'arbre que l'on inventorie dans l'Intercept Cover.

Une fois cette deuxième information notée, on s'intéresse à la couverture de la canopée de l'individu qui croise le décimètre du relevé de végétation (figure VIII.9). Des premiers rameaux aux derniers qui recouvrent le décimètre, on note le début et la fin mesurés par le décimètre. Par exemple, pour la première ligne de la figure VIII.9, les branches du Bouleau nain démarrent à 30 cm après le début du transect, pour ne recouvrir que 10 centimètres de celui-ci (fin de l'Intercept à 0,4m). Dans le cas où le Bouleau serait pluricaule (*cas du Betula pubescens ssp. tortuosa*) et se caractériserait par « plusieurs » débuts et fins au long du transect, on décompte le même individu autant de fois que la canopée de ses brins croise la ligne du décimètre. Cette méthode conduit toutefois à une certaine surestimation du recouvrement (ex. relevé NJU490) qui peut ensuite être corrigée, en agrégeant les brins de la cépée.

4) Les points paysagers

Des points paysagers ont été mis en place en complémentarité avec les relevés floristiques. Les choix de localisation sont dépendants de la stratégie d'échantillonnage (environnement immédiat d'un relevé de végétation, ou nécessité de combler un manque d'information dans une combinaison de stratificateurs non renseignée par un relevé floristique), ou de choix personnels sur la représentativité du paysage que l'on a souhaité observer et décrire (Meddour, 2011). La description de ce point géoréférencé (coordonnées GPS) et paysager (physionomie et composition) est plus rapide et plus simple à mettre en place qu'un inventaire floristique le long d'un transect. Une fois les coordonnées GPS et l'altitude acquises, nous avons examiné et estimé les taux de couverture selon la stratification de la végétation d'après les seuils de hauteurs communément admises : on détermine la strate arborée pour les végétaux supérieurs à 2 mètres, la strate arborescente pour les végétaux compris entre 2 et 50 centimètres, la strate herbacée pour la végétation érigée et/ou vasculaire de hauteur inférieure à 50 cm, et enfin la strate muscinale pour les tapis de bryophytes et les lichens (Emberger et Godron [1968]1983). En pratique, un point paysager s'applique à une distance de 10 mètres autour de l'observateur. C'est à l'intérieur de ce cercle de 5 mètres de rayon que l'on identifie les différentes strates de végétation et leur composition (espèces dominantes) et que l'on saisit ensuite dans la base de données. La composition floristique dénombre les espèces, tandis que la couverture de chaque espèce estimée en pourcentages, par grand seuil de hauteur de strate de végétation. Nous obtenons ainsi les pourcentages de recouvrement (estimés) pour chaque espèce végétale observée présente dans chacune des strates. Ces relevés ont permis d'augmenter le nombre d'observations, mais les prétraitements de ces données de première main n'ont pour l'instant pas permis de les exploiter pour le calcul des valeurs pastorales ou pour la réalisation d'analyses multivariées. En revanche, ils ont pu apporter des informations utiles pour échantillonner ou interpréter les images satellites (Partie 2).

5) Les relevés radiométriques

Opérés à la fin de chaque relevé floristique (protocole de l'inventaire floristique par transect, protocole de l'Intercept Cover), ces relevés radiométriques ont été réalisés lors de la mission de terrain de juillet-août 2016. Marc Robin (Université de Nantes, UMR Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique), par l'intermédiaire de Denis Mercier (Sorbonne

– Université, Faculté des Lettres, UMR Espaces, Nature et Culture) nous a prêté un spectromètre (figure VIII.10). Fabriqué par Ocean Optics, le spectromètre Jaz-S est (modérément) utilisable par une seule personne. Sa résolution optique varie de 0.3 à 10 nm, pour une gamme de longueurs d'onde allant de 348 à 1039 nm (<https://oceanoptics.com/product/jaz-spectrometer/>). L'appareil de mesure est rattaché à un connecteur de type fibre optique afin de viser et de mesurer la réflectance des végétaux à échelle locale à micro-locale. Le protocole de mesures par réflectance relative nécessite d'étalonner l'appareil entre chacune des prises de réflectance en utilisant le spectralon (petit appareil blanc, à gauche de la figure VIII.10). Deux séries de mesures sont alors réalisées



Figure VIII-10: Photographie du spectromètre Jaz-S (Oceanoptics) et de son spectralon blanc pour l'étalonnage entre chaque prise de mesure radiométrique. Crédits: R. Courault 2016

pour chaque relevé floristique, à partir de la réception du spectromètre via colis à la station scientifique d'Abisko (début juillet 2016). Ces deux séries de mesures s'intéressent à l'échelle locale de la réflectance (prise de réflectance à hauteur d'homme pour les quadrats 1, 21 et 42), mais aussi à la réflectance spécifique (prise de mesure directe sur les parties aériennes des végétaux notés comme étant les plus fréquents, mais aussi les plus couvrants au long du relevé précédant l'utilisation du spectromètre Jaz : feuilles, tiges). Les mesures de réflectance s'enregistrent directement sur l'appareil. L'unique difficulté consiste à « saisir » le numéro du fichier d'enregistrement qui s'affiche pour le rattacher, sur le carnet de terrain, au quadrat ou à l'espèce végétale dont on vient d'enregistrer la réflectance. Par la suite, les séries de fichiers (enregistrés en *.jaz sur la carte SD du spectromètre) sont exportés sur ordinateur pour être stockés, et traités puis convertis par tableur Excel. Pour ce travail de thèse, les mesures radiométriques n'ont pour l'instant pas été utilisées.

pour chaque relevé floristique, à partir de la réception du spectromètre via colis à la station scientifique d'Abisko (début juillet 2016). Ces deux séries de mesures s'intéressent à l'échelle locale de la réflectance (prise de réflectance à hauteur d'homme pour les quadrats 1, 21 et 42), mais aussi à la réflectance spécifique (prise de mesure directe sur les parties aériennes des végétaux notés comme étant les plus fréquents, mais aussi les plus couvrants au long du relevé précédant l'utilisation du spectromètre Jaz : feuilles, tiges). Les

6) Récapitulatif des protocoles, et distinction des approches de terrain des missions de doctorat et de la mission Envexx

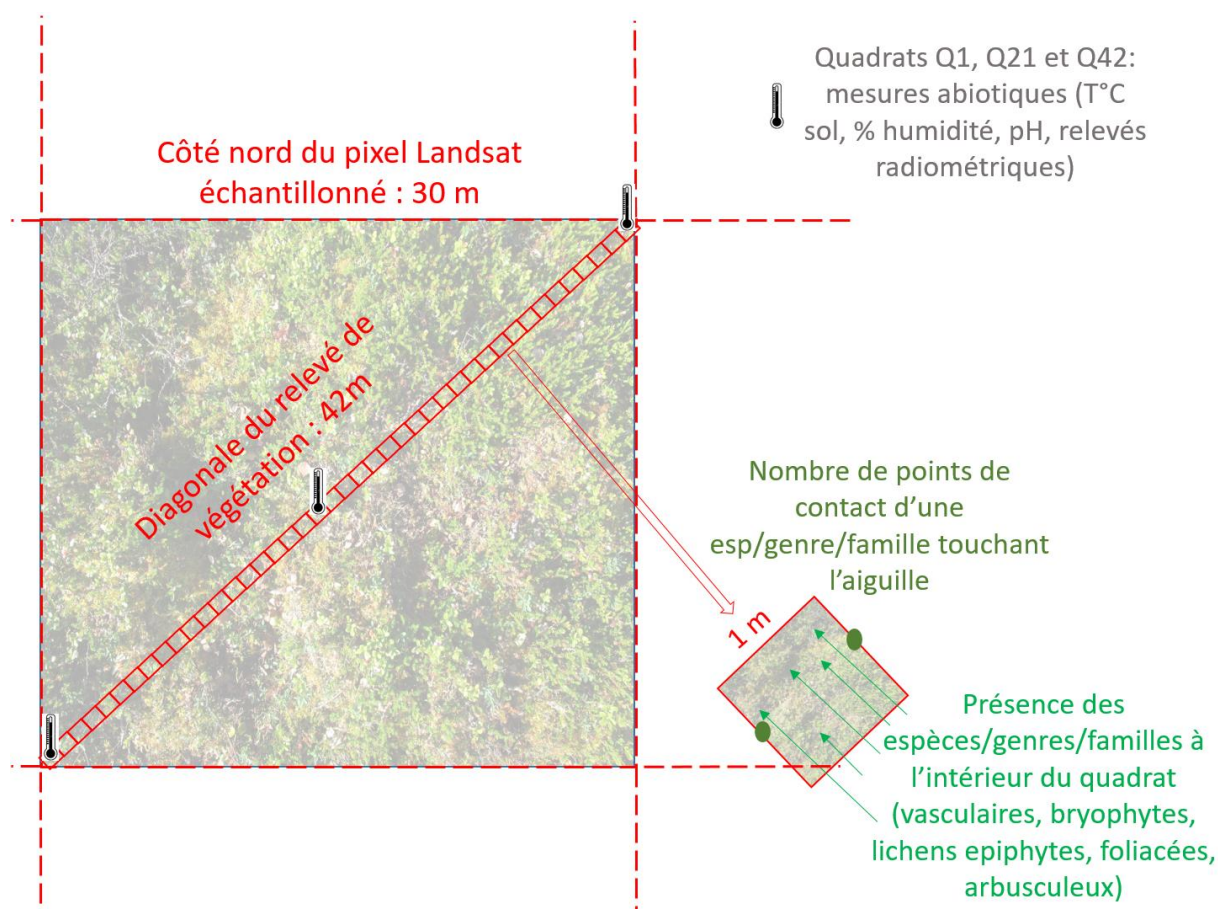


Figure VIII-11: Schéma récapitulatif du protocole de mesures biotiques et abiotiques effectuées lors des inventaires floristiques (Réalisation R.Courault, 2018). La stratification de la végétation n'étant pas représentée ici, la méthode de l'Intercept Cover n'apparaît donc pas.

La figure VIII.11 récapitule le protocole des relevés de terrain en biogéographie effectués tout au long du doctorat. La couleur rouge est associée à la variable spatiale : le maillage Landsat étant représenté en tirets, tandis que l'inventaire floristique par la méthode du transect et des quadrats associés qui reprennent une diagonale de pixel (42 m²) sont dessinés en traits pleins. La couleur verte du schéma symbolise la variabilité floristique : en vert foncé, le dénombrement des parties végétatives des espèces via les points de contact ; en vert clair l'absence/présence des espèces floristiques vasculaires et non-vasculaires par quadrat. La couleur grise est associée aux relevés abiotiques et optiques effectués : prise de température des sols, pourcentage d'humidité, pH, relevés par radiomètre. Les thermomètres représentent la prise de mesure opérée en début, milieu et fin de transect.

Trois éléments importants n'ont pas été présentés dans la figure VIII.11, afin d'en faciliter la lecture et de mieux appréhender la démarche générale. Le premier élément a trait à la dimension verticale de la physionomie des formations végétales (ligneuses hautes, basses, herbacées) échantillonnées, en particulier par l'application du protocole de l'Intercept Cover. La verticalité (estimation de la hauteur de la végétation) n'est pas représentée, mais la variabilité géographique horizontale de la stratification de la végétation l'est, à travers la représentation du transect, schématisé en rouge. La mise en place du protocole de l'Intercept Cover et ses détails sont expliqués plus en profondeur dans la sous-partie 3, ci-dessus. Le deuxième élément non schématisé est la mise en place des points paysagers, dont la méthodologie et le protocole effectué sur le terrain sont plus simples, et plus rapides à mettre en œuvre que la méthodologie par relevés floristiques « complets » (inventaire, physionomie et mesures abiotiques). Comme expliqué dans la sous-partie 4, les points paysagers représentent une petite portion du paysage échantillonné, qu'on estime à 10 m² autour du point observé. La stratification de la végétation y est notée, en approximant le pourcentage de couverture autour de l'observateur, et les espèces dominantes à chaque étage.

Le protocole Envexx (Sorbonne-Université, Collège des Licences), mobilisant une trentaine d'étudiants de deuxième année de Licence, n'est également pas représenté dans la figure VIII.11. La plupart des caractéristiques de la méthodologie de terrain initiale, présentées au long de cette partie, sont conservées. Le protocole Envexx apporte un niveau de complexité supplémentaire, à travers l'exploration des liens entre variabilité spatiale du NDVI à des résolutions spatiales plus grossières : habitats écologiques Corine Land Cover (pixel de 100 m²) et séries temporelles MODIS (pixel de ~250 m² à l'Equateur) en réalisant 6 transects de végétation par site. Un protocole de biogéosciences plus poussé en termes d'analyse de sol (géochimie et éléments traces métalliques) est également monté avec l'équipe de biogéochimistes de l'UMR Métis (Sorbonne-Université, Faculté des Sciences). Un troisième protocole est également mis en place, et concerne la partie Imagerie du programme d'Enseignement sur projets du Collège des Licences de Sorbonne-Université. Celle-ci se concentre sur le montage d'un drone et d'un capteur photographique dans le domaine de l'infrarouge et du visible. Ce capteur photographique, et les protocoles de terrain et de traitement d'image adossés ont deux objectifs principaux. Le premier objectif est représenté par le prototype d'un drone multi-spectral open-source et à bas coût spécialisé dans la détection des surfaces de végétation chlorophyllienne. Cet objectif a pu être en partie mené à

bien grâce au soutien du FabLab de Sorbonne-Université et de son équipe, ainsi que des étudiant.e.s de Licence et de Master ayant participé à ce sous-projet.

Le deuxième objectif du drone équipé d'un capteur photographique multi-spectral et de la réalisation de 6 transects par site est lié à la mesure de l'hétérogénéité spatiale de la réponse de la végétation, telle qu'enregistrée par le satellite MODIS, observée sur les terrains floristiques et photographiée dans le domaine du visible et dans le proche-infrarouge par le capteur du drone multi spectral Envexx. La question reste intimement liée à la problématique de départ du travail de thèse, mais assortie par des niveaux d'analyse, et des thématiques explorées légèrement différentes. Il s'agit de savoir si, à distance, le traitement d'images satellite, en particulier le signal du NDVI, suffit à approximer la variabilité spatiale (cortèges floristiques ; physionomie et stratification des formations végétales) et temporelle (stade phénologique, en particulier pic phénologique estival, les terrains floristiques ayant tous eu lieu, sans exception, au cœur de l'été arctique). En d'autres termes, l'équipe Envexx cherchait à savoir si la réponse NDVI de quelques pixels LANDSAT, correspondant



Figure VIII-12: Design des relevés floristiques Envexx (SU): deux transects par 3 pixels Landsat, en grappe (Réalisation: H. Potier, 2017)

approximativement à un pixel MODIS (sites) peut être approximée par la réponse NDVI Landsat (parcelles), à des résolutions spatiales intermédiaires : dalles d'images prises avec les caméras Raspberry infrarouge et visible du drone; inventaires floristiques par quadrats le long de transects et points de relevés géochimiques.

La figure VIII.12 illustre le design du protocole Envexx, permettant ainsi de le distinguer du protocole propre au travail de doctorat. Plusieurs sites ont été sélectionnés au préalable, pour leur représentativité paysagère le long du gradient d'altitude entre la station scientifique d'Abisko (360 mètres d'altitudes, forêts de Bouleaux pubescents et tourbières, au bord du lac Torneträske) et le mont Njulla (1200 mètres, végétation clairsemée, prairies alpines). Chaque site (252 m² de transect au total par site) est composé de trois pixels Landsat échantillonnés par l'équipe Envexx. Chaque pixel Landsat, de 30 m de côté est composé de deux transects mimant les deux diagonales, soit 84m². Le design des transects, et l'approche par diagonale dans les pixels Landsat de même que le protocole des relevés (relevé linéaire herbacé,

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

quadrats, intercept cover) reste similaire aux relevés de terrain du doctorat, détaillés dans les parties de ce chapitre. Le doublement des diagonales, et l'approche de l'échantillonnage des habitats Corine Land Cover (et des pixels LANDSAT et MODIS) par cohorte de trois séries de relevés de terrain (en blanc, figure VIII.12) constituent les spécificités du projet Envexx, du point de vue de l'effort d'échantillonnage interne aux sites d'étude. Au total, 27 transects de 42 m² ont été réalisés sur 5 sites (le premier site d'apprentissage de la méthode a été étudié par 3 transects de 42 m², afin d'optimiser l'encadrement des étudiants peu expérimentés). Toutefois, la figure illustre aussi les difficultés de calage géographique entre les coordonnées géographiques des pixels LANDSAT déterminées préalablement et la localisation sur le terrain, dont il faut tenir compte pour le rapprochement entre résultats de terrain et réponse spectrale enregistrée par le satellite.

La reconnaissance des taxons botaniques par les étudiants et l'ensemble de l'équipe Envexx a été simplifiée pour des raisons pédagogiques et de saison un peu précoce des relevés. L'équipe Envexx étant constitué d'enseignants-chercheurs encadrants (géographes, géologues et géochimistes) mais surtout d'étudiants de deuxième année de Licence (en Géographie, Faculté des Lettres de Sorbonne-Université ; en Géosciences, faculté des Sciences de Sorbonne-Université), certaines simplifications ont été apportées en ce qui concerne la reconnaissance botanique. Il a ainsi été demandé aux étudiants de discriminer au rang taxonomique de la Famille botanique les taxons les plus difficiles à discriminer a priori : certaines plantes herbacées, mais aussi les mousses et lichens terricoles. Les espèces appartenant aux familles de Cyperacées, Joncacées, et des Poacées ont ainsi été rapportées à ce rang taxonomique, à travers l'utilisation de planches descriptives et de flores de poche. Pendant les soirées suivant le terrain, ainsi qu'après le retour en France, les échantillons de plantes conservés en herbier par les étudiants du projet Envexx ont été repris pour décrire plus précisément les cortèges floristiques étudiés pendant le projet Envexx, et en particulier la valeur pastorale des relevés floristiques, en ce qui concerne les troupeaux de rennes semi-domestiques de la communauté Gabna, au sein de laquelle les sites de terrain du projet Envexx ont eu lieu. L'homogénéisation des niveaux de reconnaissance végétale, en aval des terrains Envexx a une visée comparative, notamment avec les relevés floristiques des deux missions de terrain du doctorat.

Pour ce travail de thèse, les données floristiques sont uniquement utilisées, tandis que les analyses pédologiques en géochimie, notamment mises en place en amont

(échantillonnage), pendant (carottages) et après le terrain (analyses en laboratoire) par l'équipe de géochimistes de l'UMR METIS (Sorbonne-Université, Faculté des Sciences), ne sont pas prises en compte dans les analyses dérivant de la problématique du doctorat.

Pour simplifier, les deux protocoles de relevés de terrain par transect (doctorat et Envexx) sont complémentaires : le premier, au niveau scalaire plus fin de Landsat, s'essaie à refléter la diversité paysagère au long des pâturages saisonniers de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna. Le deuxième protocole (Envexx), se caractérise par une résolution spatiale plus importante (approchant la taille du pixel MODIS), et la structure de l'échantillonnage se concentre sur le gradient altitudinal bioclimatique au sein des pâturages estivaux.

Les protocoles floristiques de terrain mis en œuvre peuvent être regroupés selon les trois principales thématiques traitées dans ce travail : la physionomie des formations végétales et leur variabilité géographique le long de l'écotone taïga-toundra et du gradient bioclimatique altitudinal, les inventaires floristiques et la détermination des valeurs pastorales des rennes semi-domestiques, et finalement prise en compte des liens entre les variabilités spatiales différenciées de l'indice de végétation NDVI lors du pic phénologique et celle des formations végétales échantillonnées. Les relevés abiotiques, bien qu'autorisant à mieux rendre compte des relations inter- et intra-spécifiques des végétaux et de leurs biotopes ne sont pas traités dans le travail. Il en est de même des relevés radiométriques, dont le dépouillement, le traitement et la stratégie de mise en lien avec les informations biogéographiques multi-scalaires (images satellites, relevés floristiques), ne correspondaient pas avec la temporalité courte du doctorat. Avant un dernier paragraphe portant sur le cheminement des relations avec les parties – prenantes de l'élevage de rennes en Suède, les chapitres suivants traiteront ainsi des trois volets floristiques évoqués ci-dessus : caractérisation des formations végétales à travers l'analyse des spectres physionomiques ; description du potentiel pastoral des formations végétales échantillonnées, et un essai de simulation de l'augmentation des températures dans l'aire de vèlage, que nous interpréterons et discuterons à la lumière des connaissances quant à la physionomie végétale et le potentiel pastoral.

C - Travailler en biogéographie sur une problématique environnementale nordique : discussions avec les parties – prenantes

1) L'approche par le paysage : la prise en compte prudente et transparente de la complexité environnementale ?

Les terrains en Laponie suédoise, ont été l'occasion d'interagir avec les parties – prenantes qui pensent et agissent au sein des systèmes pastoraux de l'élevage de rennes semi-domestiques. Ces parties-prenantes sont en premier lieu représentées par les Saamis, qui sont les premiers à avoir et à pouvoir élever des rennes en Suède (voir chapitre 1). Ces rencontres et discussions ont permis d'éclaircir et d'approfondir les connaissances sur les systèmes pastoraux centrés autour du renne. Celles-ci ont été nouées tout au long de la thèse de doctorat, auprès des éleveurs de rennes, mais également vis-à-vis de représentants de la sphère scientifique suédoise, internationale (norvégienne, russe, canadienne), sans oublier la sphère touristique.

Les premiers jalons de l'expérience de mise en dialogue réflexif prennent initialement source dans le cadre du stage de recherche en Master 2, réalisé au laboratoire d'Eco-anthropologie au Muséum National d'Histoire Naturelle sous la direction de Marie Roué et Marianne Cohen dans le cadre de l'ANR BRISK (« *Bringing Indigenous and Scientific Knowledge about Global Change in the Arctic*¹ »). Le travail de recherche en Master se concentrait sur les terrains hivernaux des communautés saamies suédoises et norvégiennes avec lesquelles les anthropologues du MNHN travaillaient. La continuité de ce travail a été l'objet du premier terrain en Laponie, où un cycle de séminaires sur le boréalisme (Briens et al., 2014)² avait été organisé par les universités Paris-Sorbonne, Stockholm University et Linköpings Universitet et le MNHN. Cela avait été l'occasion de visiter le site UNESCO Lapponia et le musée ethnologique saami (Ajtte Museum), ainsi que la station scientifique d'Abisko, où se déroulait la majorité du séminaire. Plus largement, ce premier terrain a été l'occasion de confirmer le parti pris au long du stage de master, représenté par la prise en compte des savoirs locaux (ou traditionnels, ou autochtones) dans les problématiques environnementales (Roué in Chernokian, Robert (eds), 2014). En effet, après un cursus en géographie environnementale laissant une large part à l'étude des relations entre

¹ <http://www.agence-nationale-recherche.fr/Projet-ANR-12-SENV-0005>

² <http://www.kylhammar.eu/userfiles/file/Pdf/bor%C3%A9alisme.pdf>

environnement et sociétés avec une grille de lecture mettant l'accent sur le concept géographique de paysage (Bertrand & Dollfus, 1973 ; Berque, 1994, Luginbuhl 2012), il semblait assez évident, dans le contexte actuel de changement global, de « *sortir de la vision d'une nature sans l'Homme* » (Roué in Chernokian, Robert (eds), 2014). Ce constat, qui m'a amené à qualifier de « culturels » les paysages que j'étudie dans ma thèse entraine aussi en résonance avec la conception des Samis, pour lesquels les paysages naturels ou la nature n'ont guère de sens (Chartier, 2014, Gadelli et Roué 2015).

L'approche par la sémantique et l'interprétation anthropologique des savoirs locaux autour de désignation de phénomènes naturels aura permis d'outrepasser dans un premier temps l'éloignement au terrain de recherche, en exploitant notamment les glossaires et les dictionnaires de langues saamis. Ce premier terrain, et les suivants ont par la suite particulièrement changé les perspectives : au-delà de l'aspect sémantique et de l'intercompréhension puis la traduction et l'éventuelle modélisation de mots faisant a priori sens aux acteurs locaux (Riseth, Tømmervik et al., 2011) pour des problématiques environnementales lourdes, le positionnement du chercheur dans un contexte culturel différent est particulièrement délicat (Cours doctoral d'août 2015 ; « *Connecting sciences and local communities in Rangifer research¹* », NOVA-IRSAE-NJK-SLU, voir annexe 7). De plus, si ce sujet de thèse reste ouvert aux approches issues de la géographie sociale : thématiques de légitimité territoriale, économique, anthropologie de la conservation, et pouvant mobiliser des questionnaires, des entretiens semi-directifs, de l'observation participante, le terrain s'orientait principalement en biogéographie par la réalisation de relevés floristiques, rendant plus difficile les possibilités de monter un protocole de recherches en environnement axé sur la composante humaine. Enfin, les aspects éthiques liés à la relation historiquement complexe entre les Saamis et les scientifiques (pour des raisons historiques et coloniales : Cocq in Andersson, 2013 ; pour des raisons plus actuelles, et gestionnaires : Heikkinen, Kasanen et al., 2012) appellait à une certaine prudence sur les approches pour le traitement du sujet, et les interactions à avoir avec les parties-prenantes. L'IPBES (« *Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services* ») rappelle notamment les aspects éthiques intimement liés aux recherches environnementales (Diaz, Demissew et al., 2015). Ceux-ci sont transparents dans la nécessité d'une transparence envers les

¹ https://irsae.no/wp-content/uploads/2015/04/NOVA-IRSAE-Rangifer-PhD-course_flyer1.pdf

populations concernées, et tout particulièrement les éleveurs de rennes de la communauté Gabna.

Trois problématiques vis-à-vis des échanges avec les éleveurs de rennes sont à distinguer : la première est représentée par la position de demande extérieure vis-à-vis des populations locales et de leurs systèmes de savoirs. Ceux-ci sont notamment sollicités pour répondre aux questionnements émanant d'un chercheur étranger¹, que ses recherches soient légitimes à leur égard, ou non (Cours doctoral d'août 2015 ; « *Connecting sciences and local communities in Rangifer research* », NOVA-IRSAE-NJK-SLU). La deuxième problématique porte sur la transparence nécessaire auprès des éleveurs de rennes. Cette question de la transparence est l'un des 7 principes d'intégrité scientifique, notamment cités par le CNRS² et insistant sur la « communication » et la « responsabilité dans un travail collectif ». La troisième problématique est plus globale et traite de la place de la science dans une société pastorale en mutation (sociale, environnementale, institutionnelle), dans le double contexte de science post-normale et de prise en compte des effets du changement global (Saloranta, 2001). Ces problématiques, avec les expériences acquises au fur et à mesure des terrains de recherches dans le cadre du doctorat ont été particulièrement utiles pour la mise en place d'un dialogue réflexif avec les éleveurs de rennes, qui a tenté d'allier prudence, transparence et économie dans ce travail sur l'élevage de rennes en Laponie scandinave, lors de sessions du Parlement Sami comme à distance (discussions par mail).

C'est dans cette configuration d'enjeux que nous avons essayé de construire une démarche de dialogue et d'échange avec les éleveurs, que nous avons dénommée « dialogue réflexif ». Le dialogue réflexif peut se définir comme un processus de médiation, permettant une introspection interactive entre deux participants, initialement utilisé pour identifier et résoudre des conflits identitaires dans le cadre de négociation ou de la résolution de conflits

¹ Ces questionnements, dont une partie pourrait être trouvés dans la littérature, porteraient en particulier sur le calendrier saami (est-il le même partout ? Si non, quelles différences formelles ? Différences en pratique entre éleveurs et propriétaires?), l'impact des variables économiques sur la biologie du renne (la féminisation des troupeaux de rennes est-il le corollaire de sa domestication ? Est-ce que la domestication renforce, à court ou à long terme, la résilience de l'élevage de rennes aux effets du changement global ?) Les idées de « résilience » et de socio-écosystème » sont-elles exprimées par des mots en Saami ? ou encore des questions d'affinements sur la valeur pastorale saisonnière de certaines plantes à haute valeur fourragère, ou la (re)découverte d'autres.

² <http://www.cnrs.fr/comets/spip.php?article183>

(Rothman, 2007). Il s'inscrit dans le cadre de l'action-recherche, où le rôle du chercheur est celui d'un médiateur du processus de recherche (Barbier, 1996).

Ce travail de « médiation » a ainsi lieu, de façon générale, aussi bien auprès des Saamis éleveurs de rennes dans le cadre des discussions faites, auprès des scientifiques internationaux, rencontrés sur les terrains suédois et plus ou moins sur les questions de recherche environnementale en relation avec les éleveurs. Les paragraphes suivants, ainsi que les annexes 2, 7 et 8 constitueront des éléments de réflexion et de discussion de la construction de cette mise en dialogue réflexif ainsi que des opportunités et contraintes liées à l'action-recherche, ceci auprès des acteurs locaux rencontrés.

2) Le dialogue-réflexif : l'informel et l'imprévisible

Le choix de la communauté Gabna comme partenaire et sujet d'étude s'est fait de plus en plus précis au début de la thèse, tout comme la prise en compte de la part non domestiquée des rennes scandinaves (en partie à travers l'exploration des comportements migratoires des rennes sauvages du plateau d'Hardangervidda). Une partie conséquente du travail de thèse a été consacrée à la présentation et à la discussion des travaux de recherche prévus, ou déjà effectués. Ces diverses occasions ont été trouvées aussi bien auprès des représentants du Parlement saami que des scientifiques suédois, saamis, norvégiens et allemands rencontrés, et ont pu transmettre des informations, de la littérature scientifique, du matériel géographique (cartes, données numériques) ou tout simplement des conseils. Cette partie est également guidée par le souhait plus qu'important de collaboration scientifique (et éthique), à la fois pour répondre conjointement à des questions de recherche parfois divergentes sur thématique de l'élevage de rennes; mais aussi pour se défaire de l'impression d'exploitation exogène d'une problématique que certains ont pu avoir considéré comme endogène (c'est-à-dire spécifiquement scandinave, à explorer, à diriger et à "régler" par les Scandinaves).

Avec l'impression plus ou moins légitime d'être outsider, pour beaucoup basée sur la barrière linguistique et le besoin crucial de monter un réseau de personnes-ressources à même de pouvoir interagir, réfléchir et recevoir les questionnements, et le manque de temps nécessaire, il m'a semblé peu indiqué de monter un protocole d'entretiens semi-directifs, ou de questionnaires, pouvant répondre à une partie des questions soulevées lors de la modélisation et la tentative de mise en lien de données atmosphériques, météorologiques, satellite, géomatiques et floristiques. Cette orientation résultait aussi du manque de

disponibilité des éleveurs Saamis pour la réalisation d'enquêtes, et de la recherche d'un positionnement scientifique original par rapport aux travaux des anthropologues, en terme de méthodes, de terrain et d'objet.

La recherche effectuée n'étant ni purement sociale, ni purement géophysique, mais environnementale, une des obligations en tant que chercheur semblant être dirigée vers la nécessité de légitimer les recherches auprès d'un groupe de personnes spécifiques, les éleveurs de rennes, qui vivaient concrètement les effets régionaux et locaux du changement global étudiés. Plus simplement, il semblait « naturel » de tenir informé et de rendre ces recherches « utiles » auprès de ce groupe de personnes avec lesquelles des liens scientifiques ont pu être tissés. En particulier, le plus urgent lors du deuxième terrain lapon (saison estivale 2015), semblait être de rencontrer les représentants politiques du Parlement saami, facilement identifiable et atteignable, du fait de l'institution publique qu'ils représentaient. Par la suite, l'école d'été d'une semaine, organisée en août 2015 par B. Åhman « *Connecting sciences and local communities in Rangifer research* » (SLU, NOVA/IRSAE), rassemblant une dizaine de doctorants en sciences environnementales, dont une partie étaient Saamis (anthropologie, sociologie, géographie, sciences vétérinaires, éthologie) a permis de mieux saisir la complexité de ces questions environnementales, et d'obtenir des informations précises sur des sujets variés sur l'élevage de rennes et les cultures subarctiques, touchant de plus ou moins loin la problématique de cette thèse (voir annexe 7).

Dans ces conditions, continuer les terrains et nourrir les liens noués devenait important, et expliquent l'approche initiée par des entretiens au Parlement saami ou par mail auprès des personnes semblaient être les plus concernés (membres de la communauté Gabna), mais aussi pour mieux rendre compte et tenter de mieux comprendre les liens entre climat et suivi de la végétation par satellite, densification et l'extension des végétaux arborés et arborescents; également pour saisir l'intrication des liens entre acteurs locaux, nationaux, internationaux. Cet ensemble d'éléments a permis de mettre en place un dialogue réflexif dans des situations de « chercheur-trouveur », « chercheur-demandeur », sur les terrains estivaux ou hivernaux au Parlement saami de Kiruna.

Le cas du processus de fonte-regel, lors du terrain hivernal réalisé en décembre 2016 a montré que le mode du dialogue réflexif pouvait également passer par des déconvenues. Ce terrain était initialement prévu pour négocier avec les contacts au Parlement saami de l'acquisition de données télémétriques, ayant pu remarquer à de nombreuses reprises lors du

terrain estival précédent, en réalisant des relevés floristiques dans la région d'Abisko (pâturages de pré-été), des rennes de la communauté Gabna équipés de colliers GPS. Des négociations avec les éleveurs semblaient envisageables. Une convention juridique avait été montée, traduite et vérifiée par un spécialiste du droit de l'environnement, de nombreux résultats de traitements de données télémétriques et environnementales sur les troupeaux norvégiens de rennes sauvages d'Hardangervidda avaient été transmis aux membres du Parlement saami, une attestation sur l'honneur insistant sur l'envie et le soin de ne prendre en compte que la variabilité environnementale, bioclimatique dans l'explication éventuelle des mouvements et des choix d'habitats des rennes de la communauté Gabna. Cependant ces négociations hivernales ont coupé court pour plusieurs raisons, la première était contextuelle, représentée par les énormes plaques de glace observables dans les rues de la ville de Kiruna et qui laissaient présager du piteux état des pâturages d'hiver dans les forêts de Pins et d'Épicéas à proximité. Ce phénomène de redoux était d'une intensité et d'une longueur importantes, en plein solstice d'hiver (températures maximales supérieures à 0°C du 14 au 20 décembre 2016, dont une pointe 9°C, dans les jours où la nuit arctique est la plus sombre). Pour y faire face, certains éleveurs transportaient leurs rennes en bétailière jusque dans les pâturages d'été, ce qui montrait les limites des données GPS censées refléter les mouvements spontanés des rennes, et ce qui rendait les éleveurs peu disponibles (Courault, in Moriniaux 2017).

La deuxième raison est d'ordre plus structurel. Si le dialogue réflexif a principalement été construit avec des membres du Parlement Saami de Suède, il semble toutefois avoir une réputation équivoque auprès des éleveurs de rennes d'une part, mais des Saamis non-éleveurs de rennes également (annexes 7 et 8). Cette équivocité est en effet induite par le sentiment d'intrusion des autorités suédoises dans la gestion des affaires pastorales saamies (le Parlement saami est une antenne du ministère suédois de l'agriculture¹), mais également par ce qui semble représenter une cristallisation de la « Saméité », en particulier sur la question de la langue et de sa descendance supposée pour être reconnu comme « Saami » aux yeux de la loi suédoise. En effet, « *Selon la loi du Parlement sâme (Sametingslagen) (SFS 1992 :1442), est considéré comme Sâme toute personne qui se dit Sâme et qui pratique ou a pratiqué la langue sâme dans sa famille, ou dont les parents et les grands-parents pratiquent, ou ont pratiqué le sâme chez eux, ou toute personne ayant un parent qui est, ou a été inscrit sur le*

¹ <http://www.samer.se>

registre électoral du Parlement sâme »¹. Ce rapport à la Saméité, et à ce que cela suppose (« *Lapps shall be lapps* », Andersson (eds.), 2013, en termes d'interférences avec la sphère scientifique environnementale internationale, revendication territoriale) est notamment abordé en annexes 7 et 8, lors de la rencontre fortuite d'un Suédois aux origines multiples reconverti en « *musher* », conduisant les touristes en traineau à chiens dans un circuit autour de Kiruna. Avec un peu de recul, cette discussion montre combien l'économie (celle du renne, celle de la mine de Kiruna, celle de la science, ou du tourisme) cristallisent les tensions environnementales en Laponie, et peuvent parfois faire des recherches environnementales un enjeu politique fort.

3) Les étapes du dialogue réflexif

Ces enjeux politiques sont visibles au Parlement saami de Suède, visité à plusieurs reprises. Plusieurs séquences peuvent être résumées : la première, en août 2015, et après les premiers relevés floristiques dans la région d'Abisko, est marquée par la prise de contacts, l'exposé de mes thématiques de recherche, de la méthodologie de terrain en biogéographie, et du souhait émis de les tenir informés des activités de recherche menées et des résultats discutant de leur région. Cette première réunion a également été l'occasion de renforcer la légitimité du travail de sur le terrain d'Abisko, appartenant à la communauté d'éleveurs de rennes Gabna.

Les séquences qui suivent (été 2016, hiver 2016-2017, printemps 2017) ont été entrecoupées d'échanges par mail. Les échanges en direct ont toujours été plus riches en réactions et en réponses. La mise en place a finalement été spontanée, et consistait à envoyer un powerpoint en amont, résumant les activités du semestre passé (résultats de doctorat publiés ou non, encadrement d'étudiants français sur des sujets connexes, projet Envexx...) et présenté de façon informelle au cours des entrevues. Les discussions et réactions pouvaient arriver au cours de l'exposé, soit directement pendant la présentation, soit à la fin. Au final, assez peu de notes ont été exploitables à la suite de ces réunions au Parlement saami, car il était particulièrement compliqué de discuter, écouter et écrire en même temps. Cependant, une partie conséquente des orientations et des tentatives de ce travail de recherche sont issues

¹ https://www.coe.int/t/dg4/education/minlang/Report/PeriodicalReports/SwedenPR2_fr.pdf

d'éléments tirés de ces dialogues. En particulier, l'accueil favorable réservé par les Saamis à notre utilisation du calendrier pastoral pour caractériser la variabilité climatique, nous a incité à poursuivre dans cette voie, en utilisant le plus largement possible les catégories spatiales et temporelles saamies dans notre appréhension de l'espace et du temps. Toutefois, ces références peuvent aussi receler une part d'ambiguïté, comme nous l'avons compris à l'étape suivante.

La conférence « *Nordic Conference on Reindeer Husbandry Research*¹ », organisée par B. Åhman et l'Université suédoise des sciences agricoles (SLU), qui s'est tenue en mai 2017 à Jukkasjärvi, à quelques kilomètres de Kiruna, a été l'occasion de remettre en œuvre le dialogue réflexif auprès des parties-prenantes saamies. Celle-ci réunissait un consortium de scientifiques scandinaves, finlandais, russes, canadiens, dont beaucoup étaient issus des sciences exactes (génétique, sciences vétérinaires, écologie) et une partie des sciences sociales (sociologie, ethnologie). Quelques Saamis étaient invités, et en premier lieu une personne chargée de représenter le Parlement saami suédois, éleveur de rennes, ainsi que des anthropologues ou directeurs de musées d'ethnologie saamis.

Les résultats du chapitre X, concernant en particulier la cartographie des températures mensuelles attendues en 2050 pour l'aire de vèlage de la communauté d'éleveurs Gabna y ont notamment été présentés. La discussion a ici eu lieu à la suite de la communication orale, avec les scientifiques présents, et le représentant du Parlement saami. Les questions avaient trait à l'utilisation de la base de données RenGIS 2.0, qui ne représente que le cliché à un instant « t » des territoires communautaires et non une portion d'espace stable dans le temps, et rendaient difficile la réalisation de projections de températures. Ces éléments de dialogue rejoignaient évidemment la littérature sur le sujet, et s'expliquaient par la flexibilité des systèmes pastoraux suédois vis-à-vis de territoires saisonniers en recomposition et en revendication constante, ainsi que des arrangements coutumiers familiaux d'accès aux ressources territoriales (Delaporte, Roué, 1986 ; Brännlund, Axelsson et al., 2011). Ce dialogue réflexif nous a permis de prendre du recul critique par rapport à l'utilisation de cette base de données, résultant en partie d'une négociation politique avec les autres parties

1

https://www.researchgate.net/publication/320885991_3rd_Nordic_Conference_on_Reindeer_Husbandry_Research_-_Reindeer_husbandry_in_a_Globalizing_North_-_resilience_adaptations_and_pathways_for_actions

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

prenantes du territoire (exploitants miniers et forestiers notamment), et à questionner certains des résultats que nous avons obtenus en utilisant ce découpage spatial (notamment Chapitre VI).

La figure VIII.13 illustre en particulier l'instabilité des territoires communautaires, avec les frontières de la communauté Gabna telles qu'elles étaient établies en 2016, et celles actuellement déclarées par le Parlement saami en 2018¹. Deux choses sont notables : en premier lieu la suppression de la partie norvégienne de la communauté, à l'extrémité des pâturages saisonniers estivaux. Les frontières de la communauté Gabna apparaissent désormais comme concordantes avec les frontières internationales. La deuxième modification majeure à l'examen de la figure VIII.13 concerne les pâturages d'hiver, à l'extrémité sud-est. La communauté semble avoir agrandi ses superficies pour cette saison pastorale particulièrement importante pour les troupeaux de rennes. Un autre facteur pouvant expliquer cette extension hivernale des pâturages pourrait être liée à l'augmentation progressive des cheptels de rennes semi-domestiques à l'échelle de la région Nord-Botnie (chapitre IV) et à la fragmentation des habitats forestiers (chapitre II).

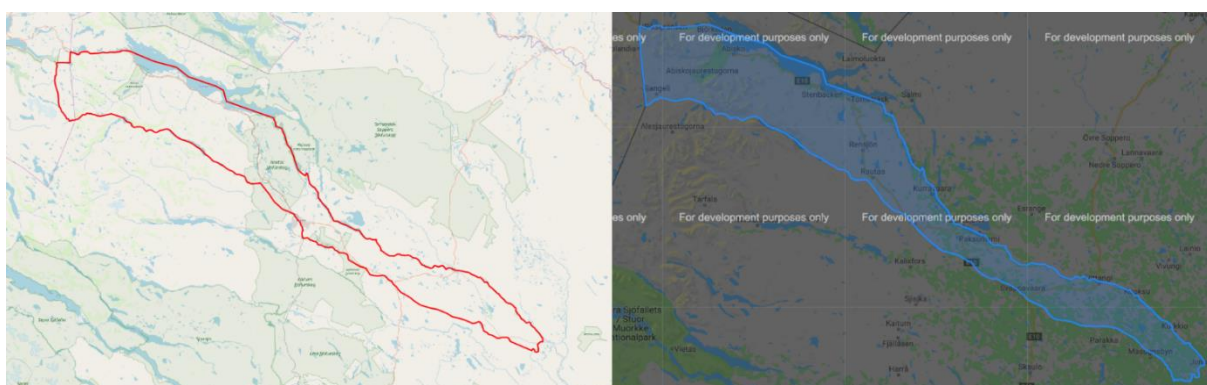


Figure VIII.13 : Contours de la communauté Gabna en 2016 et 2018, d'après la base Rengis 2.0

Au final, ce dialogue réflexif, à travers sa construction, sa mise en œuvre et les difficultés rencontrées sur un terrain particulièrement sensible et difficile, a été riche d'enseignements. Il nous a guidé dans la construction d'une méthodologie permettant d'appréhender des paysages culturels en transition. Il procède davantage d'une démarche que d'une recherche proprement dite, ce qui explique que nous ne pouvons y consacrer un chapitre de résultats. Il nous aiguillonne plutôt dans l'interprétation et les discussions de nos

¹ <https://www.sametinget.se/8382>

résultats. Nous espérons qu'il a constitué un apport intéressant pour les Saamis, que nous remercions pour leur disponibilité et leur qualité d'écoute. Une bonne partie des résultats obtenus dans la dernière phase de notre doctorat n'a pas encore été présentée au Parlement Sami, et le sera postérieurement au dépôt du manuscrit de doctorat. Nous tirerons les enseignements des étapes antérieures pour concevoir ce moment d'échange d'une façon qui soit profitable aux deux parties, en sélectionnant les résultats les plus à même d'intéresser les éleveurs et de susciter des interactions et des échanges, et peut être y puiserons-nous des éléments de réponse aux questions ayant émergé de nos travaux.

Transition entre le chapitre VIII et le chapitre IX

Le chapitre VIII spécifiait le contexte et les protocoles de relevés de terrain en biogéographie effectués dans les territoires de la communauté d'éleveurs Gabna. Trois grands types de relevés ont été effectués sur une stratégie d'échantillonnage mêlant différents agents stratificateurs : environnementaux (topographie, diversité paysagère) et sociaux (éléments géographiques d'organisation du système pastoral Gabna évoluant au long des pâturages saisonniers). Ces trois grands types de relevés ont été l'objet de trois protocoles ayant pu évoluer au fur et à mesure de l'avancée dans la thèse. Ceux-ci sont précisément détaillés dans le chapitre précédent, et s'intéressent à la diversité paysagère, physionomique et pastorale dans la recherche d'interactions entre changement climatique et réponse biologique des paysages végétaux des territoires de la communauté : densification, colonisation et concurrence entre les formations végétales supportant les pâturages saisonniers des troupeaux de rennes semi-domestiques. Ainsi pour les protocoles, l'accent a été mis sur l'optimisation de la prise de mesures, biotiques, abiotiques et optiques. Certaines restent à exploiter, comme les mesures radiométriques à différentes échelles (formation végétales, espèces floristiques), qui traduisent l'ensemble de la démarche de terrain du point de vue méthodologique de suivi des socio-écosystèmes subarctiques froids au changement climatique, via l'analyse des séries temporelles satellites et climatiques (parties I et II).

Un protocole d'un autre type a également été pensé et nourri au long du travail de doctorat, et concerne les interactions avec une partie des acteurs locaux qui contribuent à façonner les systèmes pastoraux du renne et les paysages culturels les soutenant. Ce protocole est représenté par l'élaboration d'un dialogue réflexif avec les éleveurs, représenté par la mise en consultation, et en discussion constante des résultats de la thèse ayant progressivement été produits. Le chapitre VIII a été l'occasion d'exposer en détail ce protocole, et de soulever la part éthique indispensable des recherches en environnement dans un contexte de revendication sociale et territoriale fort qui s'inscrit dans celui, plus large, des effets conjugués du changement global sur les systèmes pastoraux.

Le chapitre suivant traitera de la physionomie et de la diversité des formations végétales échantillonnées au sein des territoires de la communauté Gabna. Nous évoquerons dans un premier temps la question de la représentativité spatiale de l'échantillonnage de

relevés, particulièrement décisive dans le contexte géographique de transitions biogéographiques fortes (écotone taïga-toundra et gradient altitudinal) dans lequel s'inscrivent les pâturages saisonniers de la communauté Gabna. Nous décrirons ainsi dans une analyse comparative les formations végétales échantillonnées sur le terrain, en comparant notamment les spectres biologiques tracés sur différentes approches de traitement du protocole de mesure de l'Intercept Cover. Nous analyserons le spectre biologique des formations végétales d'altitude dominées par une strate basse (herbacée). Enfin, le chapitre IX sera l'occasion d'esquisser des liens entre la variabilité géographique de la réponse NDVI des formations végétales, déjà caractérisée en partie II par l'imagerie MODIS et l'imagerie Landsat, avec les couvertures végétales des strates arborées et arbustives, et la prise en compte des ligneux-bas composant la strate herbacée. La stratification de la végétation, en particulier ligneuse, est en effet particulièrement intéressante dans la caractérisation de l'évolution écologique et géographique des formations végétales, soumis aux effets du changement global : foresterie industrielle, densification des ligneux. Ce chapitre IX sera ainsi une transition particulièrement importante avec les chapitres suivants, en particulier celui traitant de la valeur pastorale estimée des relevés floristiques et de la simulation des effets du changement climatique dans l'aire de vèlage de la communauté Gabna (chapitre X).

IX - Physionomie et diversité des formations végétales de la communauté Gabna d'éleveurs de rennes (Norrbotten, Suède)

A - Introduction

L'objectif de cette deuxième partie est de mieux caractériser les formations végétales rencontrées sur le terrain, du point de vue de leur physionomie : hauteurs et stratification de la végétation, composition en grands groupes de plantes (ligneuses, non-ligneuses, non-vasculaires). Cette caractérisation d'abord physionomique des formations végétales échantillonnées nous autorisera à discuter des liens entre physionomie de la végétation décrite, et de l'indice de végétation NDVI tels que capté par les satellites Landsat et MODIS en 2006 et en 2017 pour les pixels dont les inventaires floristiques sont renseignés. Cette méthodologie par l'approche physionomique de la végétation (stratification des formations végétales) semble la plus indiquée pour la problématique plus générale de caractérisation des changements bioclimatiques, et en particulier de compétition entre végétaux des strates herbacées, arborescentes et arborées (Maliniemi, Kapfer et al., 2018 ; Fauchald, Park et al, 2017) dans le cadre de l'avancée généralisée, en altitude et en latitude des paysages végétaux décrivant les biomes de forêts boréales et de toundras (arborée, arbustive). De plus, cette approche physionomique rejoint l'approche par traits fonctionnels de réponse de la végétation au changement climatique. C'est en effet essentiellement le trait de la hauteur des végétaux présents en divers lieux de l'Arctique qui a le mieux caractérisé, selon Bjorkman et al. (2018) les effets du changement climatique dans cette région.

Le chapitre précédent indique l'orientation des campagnes de relevés de terrain, du point de vue des objectifs généraux, du design général des protocoles et ses détails. Ces objectifs sont multiples : 1°) l'analyse à plusieurs échelles géographiques de la réponse de différentes formations végétales au long du-double gradient bioclimatique (écotone taïga-toundra ; gradient altitudinal) et pastoral (saisonnalités de l'élevage de rennes semi-domestiques au long de ce gradient, montée en estive et redescentes vers les pâturages hivernaux) vis-à-vis du changement climatique actuel (abaissement de la contrainte thermique observée depuis la fin des années 80, voir chapitre III). Les effets de l'abaissement de la contrainte thermique sont notamment observables à travers la physionomie de la végétation,

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

mais également par la composition floristique et le spectre biologique, d'après les taux de recouvrement des ligneux et les contributions spécifiques au biovolume herbacé le long des transects de relevés (nous reviendrons sur cette terminologie plus loin). 2°) L'analyse de la valeur pastorale saisonnière des formations végétales échantillonnées et étudiées via la méthode par transect, en prenant en compte de la consommation saisonnière des espèces par les rennes semi-domestiques de Laponie Scandinave. 3°) La simulation des effets du changement climatique sur la zone de vêlage de la communauté Gabna, et les liens que l'on peut établir avec les paysages et les valeurs pastorales futures.

B - Physionomie et diversité des relevés floristiques: traitement de données

1) La représentativité spatiale de l'échantillonnage des relevés de terrain (missions de doctorat et mission Envexx confondues)

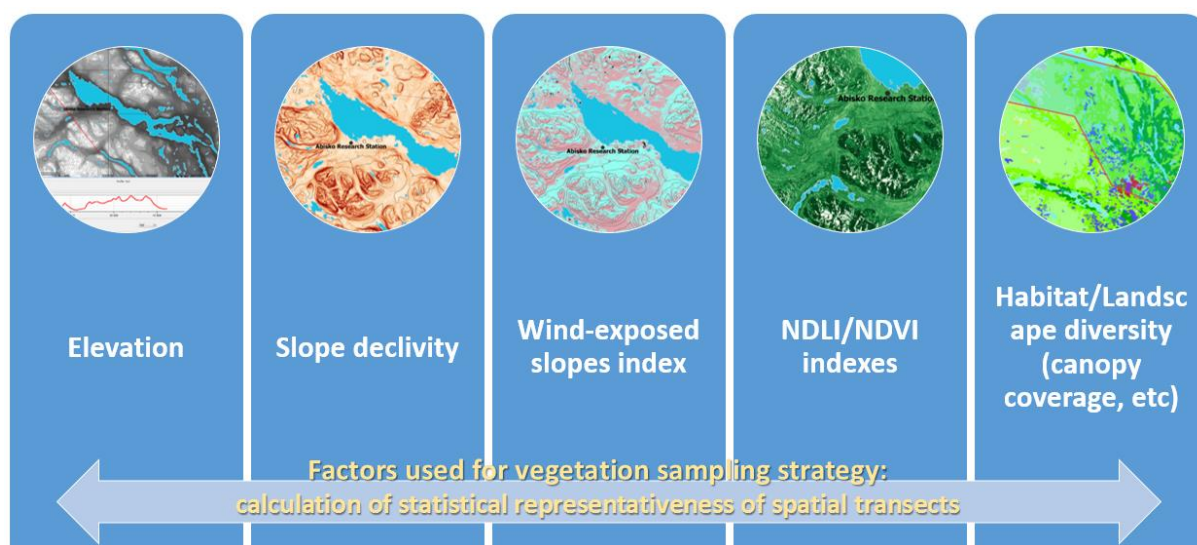


Figure IX-1 : Représentation schématique des facteurs pris en compte dans la stratégie d'échantillonnage des relevés floristiques. Dans l'idéal, une cartographie synthétisant ces facteurs, et ceux discutés au long du chapitre, aurait amélioré le déploiement sur le terrain (Réalisation R. Courault, 2015)

L'échantillonnage vise à rendre compte de l'organisation spatiale des formations végétales le long de gradients biogéographiques, zonaux et altitudinaux, évoqués plus haut (figure IX.1). Celui-ci (en amont comme en aval) doit pouvoir prendre en compte les contraintes temporelles (quelques semaines estivales, pendant deux années), financières et

humaines (travail de terrain solitaire dans le cas des deux missions de doctorat : dangerosité, fatigue, biais observateur, mais aussi flexibilité et distances parcourues plus grandes; contrairement au travail effectué en groupe conséquent pour le projet Envexx : temps de relevés de terrain moins longs, mais logistique plus importante, centralisation et correction des données de terrain également importante, biais inter-observateurs). Les facteurs descriptifs et explicatifs sont ainsi pris en compte dans la comparaison entre les surfaces échantillonnées pour les relevés floristiques (relevés par transects et observations paysagères ; exprimés en nombre d'observations/individus géostatistiques, mais aussi en superficies échantillonnées) et les facteurs externes pris en compte en amont et en aval des terrains floristiques : surfaces d'habitats écologiques (Corine Land Cover), surfaces topographiques renseignées (altitudes, orientation des pentes), et surfaces de NDVI (en pixels Landsat, et en valeur de NDVI). Cette prise en compte s'opère par le montage d'un Système d'Informations Géographiques, en amont et renseigné, complété en aval au cours des traitements statistiques de relevés floristiques (transects, points paysagers).

Pour évaluer la représentativité spatiale de l'échantillonnage des relevés de terrain, plusieurs opérations de quantification ont été menées, et sont dépendantes des unités spatiales considérées. La figure IX.1 (présentée lors d'une communication à l'occasion du *PhD-course NOVA IRSAE « Connecting Sciences and Local Communities in Rangifer Research*, en Suède centrale, mi-août 2015) reprend une partie des descripteurs entrant en compte dans la stratégie d'échantillonnage : zonation des pâturages saisonniers des troupeaux de rennes semi-domestiques de la communauté d'éleveurs Gabna, dalle Landsat (pour le NDVI), altitudes et sous-produits du MNT (orientations des pentes).

La figure XI.2 cartographie ainsi l'ensemble des relevés floristiques réalisés (inventaires floristiques et/ou points paysagers) et leur distribution le long des pâturages saisonniers de l'élevage de rennes semi-domestiques Gabna. Celle-ci met en exergue la volonté de couvrir le plus largement possible le territoire de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna, et ses territoires saisonniers (représentés en linéaire de couleur, figure IX.2).

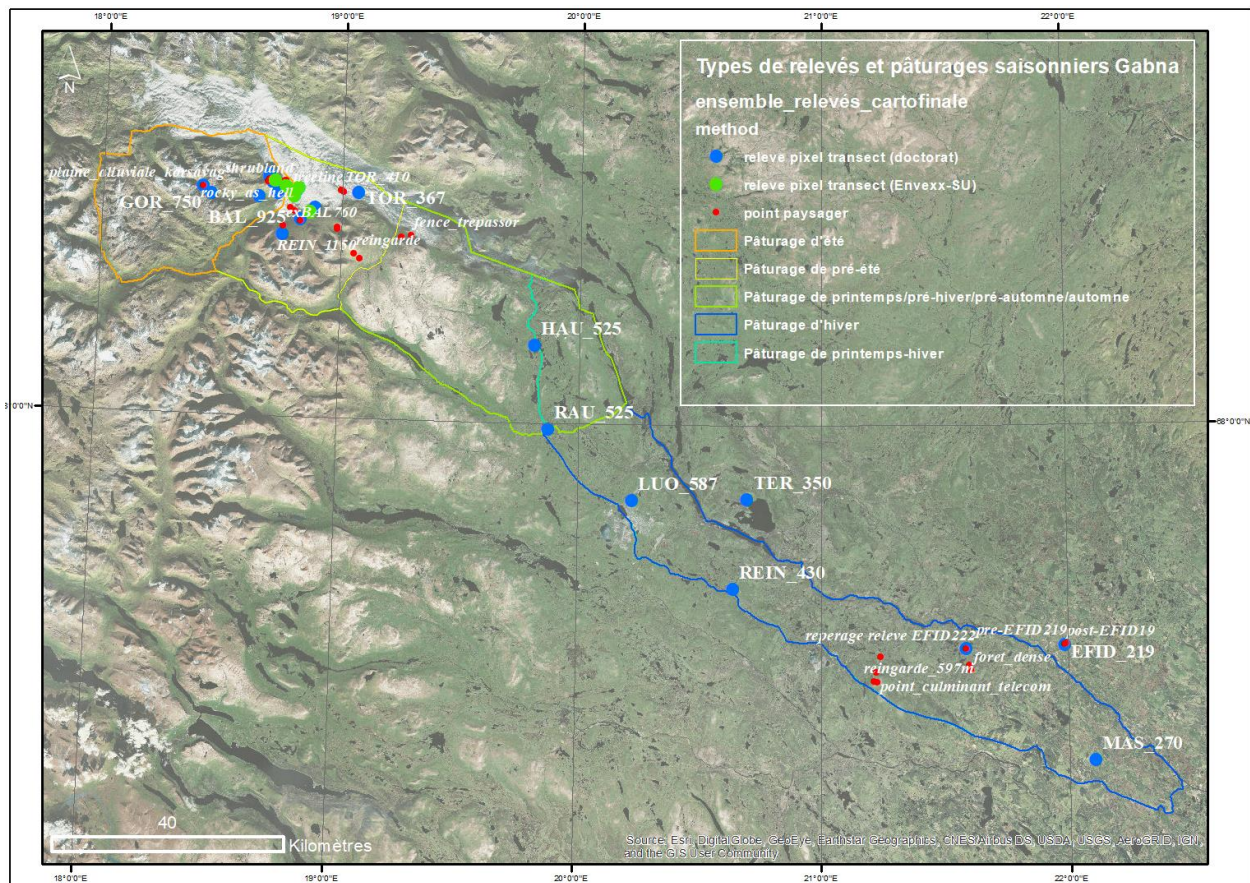


Figure IX-2 : Cartographie des relevés de terrain réalisés au long du doctorat, et à l'aide des étudiant.e.s participant au projet Envexx – SU, et de la zonation des pâturages saisonniers de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna (Réalisation, R. Courault, 2018)

Cette couverture s'est opérée sur les facteurs environnementaux et leurs gradients respectifs, cités en figure XI.1 (indice de végétation NDVI, descripteurs topographiques, habitats écologiques Corine Land Cover 2012). Ces facteurs ne sauraient toutefois s'affranchir de la variable humaine, ayant trait en particulier au système pastoral de l'élevage de rennes semi-domestiques. La prise en compte de ces variables humaines est multiple, puisque celle-ci a également concerné les marqueurs paysagers de l'élevage de rennes, en particulier les *reingarde* (corrals à rennes), qui parsèment les trajectoires de rennes et sont mentionnés sur les cartes topographiques de la région de Kiruna et d'Abisko. La présence de corrals à renne, ainsi que l'information géographique de migration des rennes (RenGIS 2.0 ; *Swedish Saami Parliament*) sont ainsi des facteurs supplémentaires pris en compte dans la stratégie d'échantillonnage, en particulier dans les pâturages autres qu'estivaux. L'ensemble de ces facteurs, récapitulés dans le tableau IX.1 auraient pu faire l'objet d'une quantification, à la résolution spatiale Landsat (30m²), d'une carte de potentiel d'échantillonnage pour optimiser le choix final de réalisation des relevés de terrain et de points paysagers. L'essai réalisé sur le logiciel Matlab ayant préconisé un plan d'échantillonnage ne tenant pas compte

des contraintes de temps, nous avons choisi une méthode d'échantillonnage stratifié optimum (Frontier, 1983).

Tableau IX-1 : Critères d'échantillonnage stratifié optimum

Facteurs environnementaux	Facteurs humains	Facteurs paysagers mixtes	Contraintes et opportunités
Altitude	Proximité d'un corral à rennes	Diversité paysagère Corine Land Cover 2012	Relevés floristiques absence/présence SLU (gbif.org)
Orientation des pentes	Proximité d'un chemin migratoire de rennes (RenGIS 2.0, <i>Saami Parliament</i>)	Saisonnalité (climatique, pastorale, ...)	Localisation, éloignement (à la station scientifique d'Abisko ; à l'auberge de jeunesse de Kiruna)
Valeur de NDVI			

Dans ces conditions, on cherche dans un premier temps à connaître la représentativité spatiale des données de terrain, toutes missions confondues. Un premier calcul à l'échelle de la grille Landsat est ainsi mis en place (WRS 2: colonne : 197, ligne : 002). La deuxième série de calculs concerne la superficie totale de la communauté d'éleveurs de rennes semi-domestiques Gabna, l'objectif étant de suivre, à l'aide des relevés de terrain effectués, la physionomie des formations végétales et leur répartition présente, ainsi que de formuler des hypothèses quant à la répartition future des paysages végétaux, formations végétales et ressources pastorales auxquelles s'adossent les éleveurs de rennes semi-domestiques.

On calcule les superficies occupées par les catégories thématiques : couverture des sols Corine Land Cover, discrétisation des altitudes et de l'orientation des pentes, ceci à chaque échelle d'analyse étudiée : grille Landsat, communauté d'éleveurs de rennes Gabna. Pour la carte Corine Land Cover, nous avons ajouté une colonne "Superficie" à la table attributaire initiale du fichier vectoriel (résolution spatiale des contours : 100 m). Le calcul de superficie par catégorie thématique pour chaque entité géographique est effectué sous ArcMap. La table attributaire, renseignée par les superficies en kilomètres carrés pour chaque entité spatiale composant les deux échelles d'analyse, est alors exportée en format *.txt afin d'exploiter le tableau de données sous tableur. Une fois importé sous Excel, une table de contingence récapitule les superficies exprimées en kilomètres carrés par catégorie de couverture de sol Corine Land Cover. Ici, les utilisations de sols et les habitats écologiques non continentaux et / ou non-végétalisés ne sont pas pris en compte, notre objectif de recherche étant focalisé sur les paysages végétaux de la migration des rennes semi-domestiques de la communauté Gabna.

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

Ainsi, seules les forêts de feuillus, les forêts de conifères, les forêts mélangeant feuillus et conifères, les végétation arbustive et forêts en mutation, les tourbières, les landes et bruyères, les prairies d'altitude, les zones faiblement végétalisées sont prises en compte dans l'analyse. Toutes les autres superficies dénombrées représentant les couvertures ou utilisations humaines des sols de la cartographie Corine Land Cover sont supprimées du tableau pour ne quantifier que les superficies qui concernent les habitats écologiques à enjeu pastoral des troupeaux de *Rangifer tarandus* de la communauté Gabna.

Une fois le tri des données effectué, un calcul de pourcentages est ensuite appliqué, sur le total des superficies prises en compte pour les deux unités spatiales considérées (grille Landsat: 21 141 km²; communauté Gabna : 3187 km², voir partie Résultats). Au final, un pourcentage par catégorie d'habitat écologique permet de comparer les superficies échantillonnées sur le terrain vis-à-vis des superficies d'habitats écologiques dénombrées via la carte Corine Land Cover 2012. Pour ce qui est des données topographiques (altitudes, orientation et inclinaison des pentes), la comparaison des superficies suppose de discrétiser ces variables continues, ou qualitatives ordinales. La discrétisation des seuils d'altitude s'opère selon les travaux de Dahl et al. (1975), qui décrit précisément l'organisation en étages bioclimatiques altitudinaux des paysages végétaux subarctiques, et selon nos propres observations de terrain. On décide ainsi de découper les valeurs d'altitude en trois grandes classes, chacune séparée de 450 à 500 mètres, entre la plaine et les piémonts de résineux au sud-est de la région, et les sommets fennoscandiens. Une fois les discrétisations décidées, on vectorise les fichiers matriciels d'altitude, d'orientation et de pente (MNT), puis on y ajoute la superficie de chaque entité polygonale en attribut, avant d'importer les données sous tableur Excel. Par la suite, une discrétisation est opérée pour rendre compte des superficies par classe d'altitude, par classe d'orientation et par classe de pente. Celles-ci sont reprises dans le tableau X.2 ci-dessous.

Tableau IX-2 : Discrétisation des variables d'altitude, d'orientation et de pente

Altitudes (m)	Orientation (degrés)	Pente (degrés)
1 à 450 m	Nord (315-44°)	0 à 10 °
451 à 900 m	Est (45 à 134 °)	11 à 20 °
901 à 1500	Sud (135 à 224 degrés)	21 à 32 °

m	Ouest (225 à 314 °)	
---	---------------------	--

Pour les relevés de terrain, les différentes observations paysagères et relevés floristiques sont toutes prises en compte. A l'aide des coordonnées GPS des observations paysagères et des relevés floristiques, ceux-ci ont pu être rentrés dans la base de données, et correspondent, pour cette analyse, à une répartition ponctuelle des protocoles opérés conjointement sur le terrain, ainsi qu'à leur superficie réelle (42m² pour les relevés de terrain par transect) et théorique (10m² autour de l'observateur pour les relevés par points d'observation paysager). La couche de points qui décrit la localisation des relevés est alors échantillonnée avec les catégories d'habitats du fichier Corine Land Cover, les valeurs d'altitude, d'orientation des pentes et d'inclinaison dérivées du MNT ASTER-GDEM. La table attributaire, qui réunit l'intégralité des points de relevés (70 au total, liste et caractéristiques des relevés floristiques en annexe 3), est exportée puis les pourcentages d'appartenance des différents points sont calculés prenant en compte le total des points échantillonnés et relevés, pour les catégories d'habitat, les catégories d'altitude, d'orientation et d'inclinaison. Les valeurs absolues de superficie sont également prises en compte ; à titre indicatif : la superficie des deux échelles d'analyse (fenêtre Landsat et communautés d'éleveurs de rennes, auxquelles sont retranchées les zones anthropisées, en eau et les sommets) restant conséquentes et sans commune mesure comparativement aux relevés de terrain effectués sur deux saisons estivales.

Enfin, les tableaux de chaque fenêtre d'espace considérée (grille Landsat, communauté d'éleveurs de rennes Gabna, relevés de terrain) sont assemblés et on compare les superficies des facteurs bio-géo-physiques structurants (topographie : altitude et orientation) à ces échelles régionales que l'on a prises en compte pour décrire et expliquer la répartition des formations végétales dans le temps présent. Une représentation graphique par camemberts rend alors compte des superficies des classes de facteurs (habitat CLC, altitude, etc) entrant dans l'analyse et abordés dans la stratégie d'échantillonnage des relevés de terrain. Au regard de la comparaison en valeurs absolues et relatives des superficies totales renseignées pour les facteurs bio-géo-physiques structurants, on peut donc savoir si les données de terrain nous permettent ou non de généraliser à ces échelles.

2) La description comparative des formations végétales échantillonnées

a) Formations végétales ligneuses-hautes et ligneuses basses et herbacées: attribution des types biologiques de Raunkiaer, calcul des taux de recouvrement par strate et représentation graphique

La formation végétale se définit comme : « [...] un ensemble de végétaux, qui peuvent appartenir à des espèces différentes mais qui présentent, pour la plupart, des caractères convergents dans leurs formes, et, parfois, dans leurs comportements » (Emberger et Godron, 1968, dans Daget, Poissonet, 2010, <https://umr-selmet.cirad.fr/FichiersComplementaires/Prairies%20et%20paturages.pdf>). De façon générale, les formations générales sont caractérisées par leur hauteur dominante et la physionomie de la formation végétale (ligneuse ou non). Les formations végétales ligneuses hautes sont celles où le recouvrement de la végétation de plus de deux mètres de hauteur est supérieure à 50%. Les formations végétales ligneuses basses se caractérisent par un recouvrement des ligneux hauts inférieur à 25%, ligneux bas plus de 10%, et recouvrement de la végétation herbacée (inférieure à 50 cm) inférieure à 10%.



Figure IX-3 : Photo de lisière forestière en toundra arbustive (Abisko). (crédits : Courault, 2015)

La classification en types biologiques a été proposée par Raunkiaer, écologue danois, en 1912, pour caractériser les réponses des végétaux par rapport à la contrainte thermique. En fonction de la position en hauteur des parties aériennes végétatives (bourgeons ou systèmes racinaires dans le cas des plantes annuelles ou bisannuelles), le type biologique reflète l'adaptation sur le temps long aux phyto-climats des espèces floristiques. Les types biologiques sont également un bon moyen de capturer les temporalités plus courtes, liées aux successions de végétations, et aux perturbations humaines et/ou naturelles, si on les combine avec la méthode des pyramides structurales de végétation (Bertrand, 1966).



Figure IX-4 : Landes rase sèche à Ericacées (crédits : Courault, 2016)

Raunkiaer distinguait à l'origine une stratification verticale de la végétation, selon la position des méristèmes de croissance pour différents seuils de hauteurs, et selon quelques critères physiologiques :

Les Phanérophytes (figure IX.3), « [...] les bourgeons dormants sur branches se projettent librement dans l'air ; ce sont les arbres et les arbustes. » (Smith, 1913). Plusieurs sous-catégories sont différenciées par Raunkiaer (1905, 1908) : les Mégaphanérophytes, dont la hauteur dépasse 30 mètres à l'âge adulte; les Mésophanérophytes dont la hauteur varie de 8 <à 30 mètres, les Microphanérophytes pour les hauteurs comprises entre 2 et 8 mètres, et enfin les Nanophanérophytes pour les arbustes, inférieurs à 2 mètres mais supérieurs à 50 centimètres.



Figure IX-5 : Photographie de la strate herbacée en sous-bois clair de toundra arbustive (crédits : Courault, 2016)

Les Chaméphytes (figure IX.4) comportent 4 sous-catégories, selon la pérennité de l'appareil végétatif au long de l'année climatique, son apparence, ou sa position vis-à-vis du sol (« Actif », « Passif », « suffrutescent », « en coussinet »). La hauteur des méristèmes de croissance, facteur discriminant de premier ordre, est généralement comprise entre 25 et 50 cm.



Figure IX-6 : Pseudo-prairie à buttes à Sphaignes (palses) dans des sols saturés en eau. (Crédits : étudiant.e.s Envexx)

Les Hémicryptophytes (figure IX.5 et IX.6), dont les « bourgeons dormants son situés dans la partie superficielle du sol, juste au-dessus de la surface, les parties aériennes sont

herbacées et meurent lors de la saison critique, formant une protection pour les bourgeons racinaires » (Smith, 1913). Ce type biologique se caractérise donc par sa proximité au sol, et un système végétatif peu ou pas lignifié.

Les Cryptophytes, dont les parties dormantes sont enfouies sous terre lors de la saison contraignante, contrairement aux autres types biologiques où s'individualisent un système racinaire et un système végétatif aérien en contact avec l'air ambiant. C'est ici le système racinaire qui assure la levée de dormance une fois la contrainte climatique saisonnière passée (hiver, ou sécheresse). Ces systèmes racinaires concentrent la plupart des fonctions végétatives et de reproduction (sexuée ou non) de la plante, se matérialisant en bulbes ou en tubercules. En reconnaissance terrain, la hauteur de la plante considérée doit être pondérée par le système racinaire afin d'éviter la confusion entre Hémicryptophytes et Cryptophytes (Smith, 1913).

Les Thérophytes sont « les plantes de la saison favorable, vivant sous forme de graines au cours de la saison contraignante ; représentant ainsi les plantes annuelles » (Smith, 2013). Parmi ces plantes annuelles, deux sous-catégories sont retenues par l'auteur : les plantes annuelles à floraison estivale, et celles dont la levée de dormance puis la floraison s'opère au cours de l'hiver. Ces types ne sont pas représentés dans la région d'étude.

Les plantes non vasculaires (MUSCI, SPHAGNACEAE and HEPATICAE, FUNGI, ALGAE, International Code of Nomenclature of algae, fungi and plants, 2012) constituent un embranchement différent des plantes vasculaires (SPERMATOPHYTA and PTERIDOPHYTA), dont certains groupes représentent un type biologique ayant ici son importance dans la caractérisation des phyto-climats. Bien que s'éloignant quelque peu de la classification des types biologiques stricte de Raunkiaer, deux sous-catégories sont ici distinguées selon les questions posées au préalable des campagnes de terrain (ressources pastorales de *Rangifer tarandus* et leur diversité; modification attendue des phyto-climats et des formations végétales associées sous l'effet de l'abaissement de la contrainte thermique observée et attendue). La première catégorie de plantes non vasculaires regroupe les mousses (MUSCI et SPHAGNACEAE), lichens et champignons (FUNGI) rencontrés au long des relevés floristiques. Constituants du tapis muscinal, premier stade des successions végétales, ces espèces ont une hauteur au sol variable, selon le bain bioclimatique (exemple des paises de forêts de Pins sylvestres, où les buttes à sphaignes dépassent parfois le mètre d'épaisseur). Ces espèces non

vasculaires sont ici appelés terricoles, dans la mesure où les colonies de mousses, lichens et de champignons sont situées directement au-dessus du sol. Cette première sous-catégorie se distingue de la deuxième, mousses et lichens, non-vasculaires épiphytes situés en hauteur, accrochés aux branches des Phanérophytes ou poussant le long de leurs troncs.

Le protocole de terrain est précisé dans le chapitre VIII. Les relevés par transect associent trois méthodologies : la première basée sur le comptage des points de contact des espèces herbacées et des parties basses des espèces ligneuses aux intersections entre les quadrats de 1m² et le décamètre, la seconde basée sur la présence des espèces herbacées et ligneuses dans les quadrats, la troisième (Intercept Cover) s'intéressant spécifiquement aux strates arbustives et arborées (dont les hauteurs dépassent respectivement 50 centimètres et 2 mètres).

A partir des relevés par transects, l'intérêt premier est représenté par la caractérisation des formations végétales qui ont été étudiées au fur et à mesure des campagnes de terrain. Celles-ci composent les paysages végétaux de l'élevage de renne, et sont soumises à la haute variabilité bioclimatique. Cette variabilité bioclimatique et l'adaptation progressive des formations végétales transparaissent à travers l'établissement de spectres biologiques. Ce type d'analyse des formations végétales est proposé par Ernst Raunkiaer (1912), alors que George Bertrand (1966) propose une représentation de la structure verticale des formations végétales. La première s'appuie sur la classification des espèces végétales selon la typologie de Raunkiaer, le spectre biologique rendant compte de la part respective occupée par les espèces appartenant aux différents types, ceci permettant d'apprécier l'intensité de la contrainte thermique. La seconde rend compte de la structure verticale de la végétation. Elle s'appuie sur le recouvrement des végétaux regroupés selon la hauteur qu'ils atteignent non pas théoriquement à l'âge adulte (cas par exemple de la classification interne des Phanérophytes), mais sur la hauteur observée lors du relevé de terrain. Les résultats exprimés graphiquement sous forme de pyramide végétale structurale permettent d'apprécier visuellement la stratification verticale de la formation végétale, ainsi que la régénération des peuplements ligneux. Un peuplement à l'équilibre est indiqué par un taux de recouvrement équivalent des différentes strates de hauteur, correspondant aux classes d'âge d'une espèce donnée.

Sur notre terrain, nous avons jugé intéressant de croiser ces différentes méthodes de représentation et de construire des spectres biologiques tenant compte, notamment pour les

ligneux, de la hauteur observée des individus pour déterminer leur appartenance aux types biologiques. La très grande variabilité de la hauteur des bouleaux pubescents, espèce rattachée à la classe des méga-phanérophytes, ôte en effet de l'intérêt aux spectres biologiques classiques, qui rendent ainsi assez mal compte des gradients biogéographiques. Ceci d'autant que cette espèce est représentée sur notre terrain par deux sous espèces, le bouleau pubescent (*Betula pubescens pubescens*), pouvant atteindre de belles hauteurs dans la forêt boréale, et le bouleau de montagne (*Betula pubescens ssp tortuosa*). Ce dernier s'étend jusque sur les piedmonts de la chaîne fennoscandienne en présentant un port chétif et arbustif, significatif des conditions bioclimatiques de la « tree-line », mais également de la conquête des versants par ce même bouleau dans le contexte du changement climatique (chapitre 1). En annexe 4b des spectres biologiques par taxons, établie à partir des relevés de la mission Envexx, montre que si on constate une disparition des Méga-phanérophytes (représentés exclusivement par le bouleau de montagne) au-delà d'un certain seuil d'altitude, les effets du gradient altitudinal ne sont pas très faciles à distinguer.

Pour établir les spectres biologiques_hauteur de la végétation ligneuse, on utilise les données de terrain recueillies par la méthode de l'Intercept Cover sur l'extension des couronnes des ligneux supérieurs à 0,5 m le long du décamètre (relevés par transect, cartographie en figure VIII.2), reportées sur tableur Excel pour calculer l'extension en longueur de la canopée (exprimée en mètre), On attribue alors à chaque individu arborescent, ou arboré de plus de 50 centimètres répertorié dans une classe de hauteur, un type biologique par hauteur de la classification de Raunkiaer en fonction de la concordance entre la hauteur atteinte par l'individu et l'intervalle de hauteurs qualifiant le type biologique de Raunkiaer . Les pourcentages cumulés par types biologiques_hauteur sont alors calculés, on parle de taux de recouvrement des types biologiques_hauteur. Le calcul peut être ramené à 100, dans ce cas, on parlera de spectre biologique_hauteur. Si cette prise en compte de la hauteur des végétaux retrouve aujourd'hui tout son intérêt, notre méthodologie diffère de celle de Bjorkman et al. (2018) qui considèrent pour chaque taxon, sa hauteur maximale adulte, alors que nous reclassons les individus ligneux selon leur hauteur observée dans des catégories préétablies de types biologiques.

Une autre représentation est celle du spectre biologique classique de Raunkiaer, selon la classification des taxons en types biologiques, ce que nous désignons ci-après comme type biologique_taxon et spectre biologique_taxon (Sources : Flores suédoises et Base Catminat),

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

tout en tenant compte de la contribution des espèces au biovolume. Ce spectre biologique_taxon a été calculé pour la strate herbacée, sur une base 100, à partir des comptages de points-contact des taxons à l'intersection entre les 42 quadrats et le décamètre. Pour chaque taxon, la contribution au biovolume, exprimée en pourcentage, est calculée en rapportant le nombre de contacts-aiguille du taxon au nombre total de contacts, multiplié par 100. Les taxa sont rattachés aux types biologiques, et leurs contributions au biovolume additionnées. L'on parle ici de spectre biologique_taxon du biovolume de la strate herbacée.

Trois catégories de spectres biologiques seront proposées dans la partie Résultats, dépendant de la méthode de calcul et des données considérées (strates supérieures à 50 cm ou strates herbacées et muscinales) : un premier spectre biologique s'intéressant à la strate herbacée (végétaux inférieurs à 50 centimètres de hauteur) ; le deuxième et le troisième type de spectre biologique s'intéressant aux végétaux dépassant les 50 centimètres pour les relevés floristiques par transect qui ont cette caractéristique (et dont la méthode de l'Intercept Cover est appliquée). Pour ces relevés floristiques par transect où les strates arborées et arborescentes sont présentes (forêts de bouleaux, landes et bruyères plus ou moins érigées, tourbières en reboisement sur leurs marges), les spectres biologiques se subdivisent en deux sous-catégories : une première catégorie a trait aux pourcentages de couverture des types biologiques supérieurs (nano- ; micro- ; méso- ; méga- Phanérophytes ; voir chapitre précédent) calculés sur le total de la longueur d'espace considérée (les 42 mètres du transect). La deuxième catégorie de spectre biologique calculé pour les formations ligneuses hautes, basses et mixtes dont la végétation peut excéder 50 centimètres reprend le pourcentage de couverture des types biologiques supérieurs, cette fois-ci rapporté au nombre d'individus d'espèces arborées et arborescentes rencontrées. Pour la première sous-catégorie, les pourcentages peuvent dépasser les 100% de couverture à l'échelle du transect, en cas de surreprésentation horizontale d'un type biologique supérieur (d'une strate) sur d'autres. Pour la deuxième catégorie, les pourcentages restent rapportés au nombre d'individus, classés selon leur hauteur.

Un premier spectre biologique, dit classique, est calculé d'après le nombre de contacts par point-échantillon associé à chaque quadrat composant le transect de 42 m². Celui-ci s'intéresse à un spectre biologique théorique, dans la mesure où les types biologiques sont attribués en fonction de la hauteur des bourgeons de l'espèce en question, et non de sa taille observée sur le terrain. A partir de la liste floristique dressée par le relevé, on attribue dans un

premier temps le type biologique auquel appartient chaque espèce dénombrée et/ou dont on a observé la présence. Les dénombrements par points de contact, supérieurs ou égaux à 1 donnent une approximation suffisante de la contribution au biovolume (terme employé par Daget et Poissonnet, 2010) des espèces floristiques rencontrées sur le terrain. Une fois que les types biologiques de Raunkiaer ont été attribués pour chaque espèce, on totalise chaque contact supérieur ou égal à 1 par type biologique (Phanérophyte, Chaméphyte, Hémicryptophyte, Géophyte, espèces non vasculaires terricoles et épiphytes) pour chaque quadrat. On additionne par la suite le nombre de contacts par type biologique calculé pour chaque quadrat, nous donnant le total de types biologiques présents/dénombrés à l'échelle du transect. Ce total calculé à l'échelle du transect est alors transformé en pourcentage, nous donnant la part relative de chaque type biologique par transect de relevé floristique, et nous autorisant à comparer les spectres biologiques entre les relevés par transects effectués. Les spectres biologiques réalisés ici sont donc enrichis par une information physionomique, puisqu'ils prennent en compte le biovolume des espèces appartenant aux types biologiques, mais ils ne tiennent compte que des observations réalisées dans les 50 premiers centimètres depuis la surface du sol.

Une deuxième série de spectres biologiques ne prend en compte que la strate arborée (supérieure à deux mètres) et la strate arbustive (comprise généralement entre 50 cm et 2 mètres) et rend mieux compte de la structure verticale. Le protocole par Intercept Cover donnait quatre informations principales : les individus par espèce (dépassant la strate arbustive), leur hauteur estimée par la technique de la croix du bûcheron, le centimètre où la canopée de l'individu rencontre le double-décamètre (début, sur le total des 42 mètres du transect), le centimètre où la canopée n'est plus rencontrée par le double-décamètre (fin, sur le total des 42 mètres du transect). A partir de ces informations de terrain, l'extension de la canopée le long du transect/double-décamètre a été calculée, en soustrayant la mesure de fin de canopée avec la mesure de début de canopée, par individu végétal. En fonction de la hauteur observée de chaque individu, le type biologique_hauteur de Raunkiaer a été attribué. Les seuils d'attribution des sous-classes des phanérophytes (nano-, micro-, méso-, méga-phanérophytes) sont calqués sur le découpage proposé par P. Julve (2018, <https://www.tela-botanica.org/thematiques/phytosociologie/#synusiale>).

- Inférieur à 2 mètres : Chaméphyte

- De 2 à 4 mètres de hauteur : Nano-phanérophyte

- De 4,1 à 8 mètres : Micro-phanérophyte
- De 8,1 à 16 mètres : Méso-phanérophyte
- Au-delà de 16 mètres : Méga-phanérophyte

Une fois l'attribution d'un type biologique selon la hauteur des individus observés, on procède au calcul des spectres biologiques_hauteur, distinguant deux sous-catégories exploitées dans ce travail. Deux méthodes de traitement des pourcentages de couverture par sous-classe de pseudo-Phanérophyte sont appliquées. On s'intéresse dans un premier temps à la structure de la formation végétale entre les Phanérophytes comptabilisés par individus. Dans ce cas, on totalise le nombre d'individus appartenant selon leur hauteur à une sous-classe de Phanérophyte, rapportée au nombre total d'individus inventorié. On obtient alors une information synthétique des types biologiques_hauteur rencontrés sur le terrain. Cette information croît proportionnellement au fur et à mesure de l'addition de fréquences par sous-type de Phanérophyte_hauteur, totalisant toujours 100%.

Pour finir, on s'intéresse à la variabilité interne au transect, c'est-à-dire calculée à partir de la longueur de la canopée de chaque sous-type de Phanérophyte_hauteur rencontré. On totalise alors les longueurs (en mètres) de chaque sous-type présent rapporté à la longueur totale de la mesure (le transect, soit 42 mètres). Le total de la longueur des différents pseudo-types biologiques peut alors dépasser les 42 mètres initiaux, décrivant l'éventuelle surreprésentation en longueur de canopée de certains types biologiques sur d'autres, et la complexité de la stratification et de l'enchevêtrement des végétaux, moins bien représentés à l'échelle du relevé.

Une fois les calculs des taux de contribution spécifique, de fréquence et de recouvrement effectué pour les trois types de spectres biologiques (le type « Herbacées_taxon », le type « stratification verticale des Phanérophytes_hauteur », le type « stratification horizontale des Phanérophytes_hauteur »), les tableaux de données traitées sont rassemblés en un fichier, qui rassemble tous les spectres biologiques et leurs variantes calculés. On représente graphiquement ces spectres en diagrammes en bâtons, afin de faciliter la comparaison entre les relevés floristiques. Trois séries de diagrammes en bâton sont ainsi représentées, correspondant aux trois types de spectres biologiques. Les données sont triées par ordre décroissant selon le spectre biologique considéré : phanérophytes, chaméphytes, hémicryptophytes, non-vasculaires terricoles et épiphytes, géophytes; pour les spectres

biologiques des strates herbacées, qui concernent l'intégralité des relevés par transect. Pour les relevés floristiques se caractérisant par une stratification plus complexe (ligneux hauts ou bas ; auxquels la méthode par Intercept Cover est appliquée) les spectres biologiques par sous-types de pseudo-Phanérophytes sont triés par l'ordre d'importance des pourcentages de couverture des Mégaphanérophytes, puis des Mésophanérophytes, Micro- et pour finir Nanophanérophytes.

Enfin, les graphiques de spectres biologiques sont assortis de l'appellation des formations végétales par la carte de végétation suédoise, traduite en français et présent en annexe (*GSD Lantmäteriet, Swedish Land Survey, 2012*). Cette donnée a été acquise au cours du terrain de relevés floristiques, à l'été 2015 à la station scientifique d'Abisko. Ces données étant soumises à une licence payante pour le grand public, mais gratuites pour les enseignant.e.s et les étudiant.e.s inscrits en Suède, il a fallu l'intervention et l'accord d'une collègue suédoise pour pouvoir les télécharger. Chaque point de relevé de terrain a été échantillonné au préalable selon leur appartenance à une catégorie de formation végétale telle que dénommée, et décrite par le Service d'Information Géographique suédois et les universitaires associés (*GSD Lantmäteriet*). Deux niveaux scalaires sont disponibles sur les fichiers téléchargés en donnée vectorielle (*shapefile*) : les types de formations végétales principales (à 1 :50 000), et les compléments de formations végétales, originellement disponibles à 1 :20 000. Lors de l'échantillonnage des catégories de formation végétales suédoises, l'attention a été portée sur l'éventualité d'une formation végétale complémentaire, ou additionnelle, et dénotant d'un milieu hétérogène du point de vue des formations végétales : mosaïques de landes et de prairies en situation de transition altitudinale, par exemple. Egalement, les relevés floristiques dont la situation géographique intersectait, ou touchait plusieurs catégories de formations végétales suédoises se caractérisent également par une formation végétale principale et une formation végétale secondaire, rapportées sur les spectres biologiques. Les dénominations des formations végétales, ainsi que leur description (physionomie, composition floristique principale, situation topographique, humidité, etc) sont également traduites en français, afin d'enrichir l'analyse des spectres biologiques pour les formations végétales échantillonnées sur le terrain.

b) Analyse de la physionomie de la strate herbacée : quantification des contributions au biovolume selon le type de feuillage des végétaux

On cherche ici à représenter plus finement la physionomie des formations végétales échantillonnées : bien que la classification des végétaux par types biologiques de Raunkiaer soit informative sur les conditions phyto-climatiques au long du double gradient taïga-toundra et altitudinal, celle par type de feuillage permet de mieux saisir les différents groupes végétaux en sous-strate: plantes ligneuses à feuilles caduques ; plantes ligneuses à feuilles sempervirentes, plantes vasculaires non-ligneuses, plantes non vasculaires (mousses et sphaignes, lichens).

Dans un objectif de suivi diachronique des formations végétales échantillonnées, cette classification des groupes végétaux par relevés floristiques opérée par transects permettra de suivre temporellement les processus liés à l'augmentation des températures, principalement représenté par l'augmentation du pourcentage en plantes ligneuses basses sempervirentes ou caduques (embroussaillement). Ainsi, la méthodologie énoncée dans les paragraphes précédents est réappliquée : attribution des grandes catégories descriptives du feuillage des espèces rencontrées sur les différents relevés, avec calcul de total du recouvrement de chaque catégorie vis-à-vis du recouvrement total. La base de données Tela-Botanica (<https://www.tela-botanica.org/>) est notamment utilisée pour attribuer à chaque espèce son appartenance aux catégories basées sur le type de feuillage.

On distingue ainsi dans un premier temps les végétaux vasculaires des végétaux non-vasculaires. Les végétaux non-vasculaires sont classifiés selon deux sous-types : mousses (Musci et Sphaignaceae) et lichens (Fungi). Les végétaux vasculaires (Spermatophyta et Pteridophyta) sont eux caractérisés selon l'appareil végétatif, en particulier les parties aériennes: tiges et persistance du feuillage au long de l'année. Le premier critère est représenté par la présence de lignine dans la tige : on distingue ainsi les végétaux vasculaires ligneux à feuilles persistantes ; les végétaux vasculaires ligneux à feuilles caduques (dont les feuilles tombent à l'automne). Si les tiges ne sont pas ligneuses, les végétaux vasculaires peuvent appartenir à deux grandes catégories : végétaux non ligneux de type phorbe (parties aériennes non-ligneuses ; pouvant être annuelles, cas non représenté dans la région étudiée, ou pérennes) ; végétaux non ligneux de type Graminoïdes (Poacées ; Cyperacées ; Joncacées ; https://plants.usda.gov/growth_habits_def.html). C'est la variation des pourcentages de ces

catégories qui nous permettra de distinguer les différentes formations végétales échantillonnées, notamment représentées par les habitats écologiques Corine Land Cover dans la stratégie d'échantillonnage. Schématiquement, un taux important de végétaux vasculaires sempervirents pourra notamment être indicateur des relevés opérés en habitat de landes, tandis que les relevés initialement réalisés sur la catégorie d'habitats « Pelouses et prairies alpines » auront une part de végétaux vasculaires non ligneux (Graminoïdes ; Phorbes) comparativement plus important que ceux des « Landes ». De plus, l'orientation pastorale des relevés demande de mieux comprendre les interactions entre ces différents végétaux, dont le potentiel pastoral varie (voir chapitre suivant).

Le tableau suivant (tableau IX.3) récapitule, à l'échelle annuelle, les pourcentages de chaque grande catégorie de végétaux. Celui-ci, repris à partir du tableau d'espèces végétales traduit par Lefrère (2003), et disponible en norvégien dans la Flore norvégienne des Pâturages à Rennes (Fora i Reinbetland, 1997) donne une bonne idée des ressources végétales naturelles consommées par le renne semi-domestique tout au long de l'année. Dans cette sous-partie, on cherche ainsi à mieux caractériser, du point de vue de leur potentiel pastoral, les formations végétales échantillonnées sur la base des habitats écologiques Corine Land Cover (2012). Le tableau 3 donne une indication du régime annuel des rennes semi-domestiqués de Laponie scandinave : les mousses sont exclues de leur régime alimentaire, tandis que les végétaux à feuillage persistant sont peu nombreux à présenter un intérêt alimentaire (*Empetrum nigrum hermaphroditum*). Graduellement, les végétaux ligneux à feuillage caduc représentent un huitième des espèces végétales pâturées par les rennes (quelques Saules, Bouleaux, *Vaccinium myrtillus*, *V. uliginosum*; principalement au printemps pour les parties les plus tendres, Lefrère, 2003, Forbes, Kumpula, 2009). Si les lichens terricoles constituent moins de 20% de la diversité des espèces broutées par *Rangifer tarandus* (tableau IX.3), ils représentent une partie importante de la biomasse totale prélevée par les troupeaux (Klein, 1990). Ceux-ci sont principalement représentés par les lichens terricoles (Cladoniacées), mais aussi quelques lichens épiphytes croissant sur les branches de conifères (Parméliacées, en particulier le genre *Bryoria*) et un genre pionnier de lichen crustacé, dont les thalles sont dressés (*Stereocaulon*). Les plantes herbacées non graminoides représentent près du tiers du nombre d'espèces végétales broutées par les rennes semi-domestiques : Apiacées, Asteracées, espèces hygrophiles riveraines des forêts de bouleaux (genres *Angelica*, *Saussurea*), plantes herbacées des prés humides et mégaphorbiaies sur les rives des plaines alluviales glaciaires (*Cicerbita* ;

Filipendula). Ces plantes sont principalement consommées en saison chaude, lorsque la température est suffisamment élevée pour désinhiber leur croissance végétative (Lefrère, 2003). Enfin, les Graminoïdes représentent près de 40 % de la diversité d'espèces végétales broutées par les rennes, à l'échelle de l'année. Parmi elles, la moitié se compose de Cyperacées (11/22 Graminoïdes), plus d'un tiers de Poacées, et le restant de Joncacées.

Tableau IX-3 : Nombre d'espèces végétales broutées par les Rennes, selon leur type de feuillage (Source : Lefrère, 2003 ; Telabotanica)

Type de feuillage	Nombre d'espèces comptabilisées	Pourcentage sur total espèces broutées par <i>Rangifer tarandus</i>
Evergreen / Feuillage persistant	1	1,8
Deciduous / Caducifoliés	7	12,5
Forbs / Phorbes (Herbacées non graminoides)	16	28,6
Graminoids / Graminoïdes	22	39,3
Mosses / Mousses	0	0
Lichens	10	17,9

Ces regroupements d'espèces végétales broutées par les rennes semi-domestiques permettront ainsi la comparaison avec les types de feuillages présents pour les relevés, regroupés en fonction des habitats écologiques échantillonnés sur le terrain. Cette partie introduira aux enjeux principaux évoqués précédemment : la valeur pastorale des formations végétales rencontrées tout au long des terrains, et la question de la réponse des cortèges floristiques au changement climatique ; conditions plus chaudes et plus humides que les normales (élévation généralisée des températures, cumuls de neige hivernaux en augmentation), modifiant ainsi structurellement les conditions de biotopes qui facilitent, ou contraignent la dispersion et la croissance des végétaux, tout particulièrement ceux broutés par *Rangifer tarandus* (Maliniemi, Kapfer, 2018).

c) Le NDVI comme approximation des physionomies de formations végétales échantillonnées ?

L'analyse par physionomie de formations végétales, soit via la classification des espèces rencontrées dans les relevés par transect des types biologiques (approche par phyto-

climats) soit via la classification des espèces rencontrées par type de feuillage, donnera un aperçu fiable de l'organisation des végétaux par strates, et comparativement par type de milieu échantillonné. Dans ce paragraphe, la question principale est de savoir si l'échantillonnage des relevés de terrain, dont la stratégie d'échantillonnage reprend initialement le maillage des images satellites Landsat (pixels de 30 m² ; transects reprenant la diagonale des pixels échantillonnés ; voir chapitre VIII) peuvent être approximés par les valeurs de NDVI qui les caractérisent, en situation de pic phénologique pour cette région (voir deuxième partie).

L'approche emboîtée et les hypothèses envisagées, à savoir un lien entre les réponses NDVI MODIS et Landsat et la quantification des taux de recouvrement et fréquence des ligneux, sont dans ce contexte relativement simples. Les relevés floristiques (inventaires) sont ajoutés dans la base de données SIG, à partir des coordonnées GPS du centre de chaque pixel effectivement relevé sur le terrain. On échantillonne alors les valeurs raster des NDVI préalablement calculés pour les images MODIS (2000-2017) et Landsat (1990 ; 2006 et 2017). Les valeurs de NDVI qui nous intéressent sont sélectionnées au préalable : pour MODIS, la dernière quinzaine des mois de juillet 2006 et 2017 sont échantillonnées. Pour Landsat, les NDVI de juillet 2006 et juillet 2017 sont ajoutées à la table attributaire (métadonnées des images en chapitre VII, partie 2). On obtient alors une base de données ponctuelle (coordonnées GPS, en WGS84-UTM 34 N des inventaires floristiques et observations paysagères) alliant les codes des relevés floristiques, quelques descripteurs (pourcentages de ligneux bas; habitats écologiques Corine Land Cover) avec les valeurs de NDVI telles que détectées par les satellites MODIS – Terra et Landsat pour les fins des mois de juillet des années 2006 et 2017.

Par la suite, on ajoute les fréquences de la végétation ligneuse, ici représentée par l'addition des catégories d'espèces ligneuses caduques et sempervirentes. Les taux de recouvrement de phanérophytes relevés en strate herbacées sont également ajoutés. On obtient ainsi un tableau récapitulatif pour chaque ligne (inventaire floristique) les différents caractères testés dans cette étude : habitat Corine Land Cover d'appartenance ; valeur de NDVI MODIS pour les dernières semaines de juillet 2006 et juillet 2017 ; valeurs de NDVI Landsat pour juillet 2006 et juillet 2017 ; et enfin le pourcentage cumulé de couverture herbacée ligneuse (végétaux caducs et sempervirents) et le pourcentage de phanérophytes (ligneux hauts). On moyenne par la suite les valeurs de NDVI des mois de juillet 2006 et 2017, en fonction de

l'origine des valeurs : MODIS 2006 et 2017 et moyenne Landsat 2006 et 2017. Un test de corrélation par rangs de Spearman est opéré entre les valeurs de NDVI moyennés par nature d'image satellite et les pourcentages cumulés de recouvrement en végétation ligneuse. Un test de distribution (T de Student) permettra également de voir si les distributions de NDVI moyen (pour juillet 2006 et 2017), et celle des descripteurs de la physionomie des formations végétales ont une évolution similaire ou non.

B - Résultats : représentativité spatiale et physionomie des relevés de végétation

Cette sous-partie s'attache à discuter de la représentativité spatiale des relevés de terrain, que ceux-ci soient détaillés (inventaires floristiques par transects) ou effectués de manière plus rapide sur le terrain (observations paysagères). Une première partie décrira les paramètres géométriques, et numéraires de comparaison entre superficies échantillonnées sur le terrain et superficies totales de deux unités spatiales d'analyse : la sous-scène Landsat 8 (WRS 2: path 197; row 002, dont l'étendue correspond également aux images acquises pour juillet 1990 et juillet 2006, voir métadonnées en partie II), et l'intérieur de la communauté d'éleveurs de rennes semi-domestiques Gabna. Une deuxième sous-partie décrira les autres facteurs descriptifs et explicatifs initialement pris en compte en amont et en aval de la stratégie d'échantillonnage de ces relevés, qui visent à mieux comprendre les interactions entre changements climatiques (tendance et franchissement de seuils pluri-décennaux à l'élévation des températures annuelles, changements climatiques saisonniers), réponses temporelles et spatiales des couverts végétaux approximés par imageries satellites (MODIS 13Q1, SPOT – VGT, Landsat, partie II) et adaptabilité des pâturages saisonniers de la communauté d'éleveurs de rennes semi-domestiques Gabna aux changements bioclimatiques. Les facteurs étudiés pour la représentativité spatiale des relevés floristiques sont pour l'instant limités à des descripteurs statiques, ou dont la dynamique reste relativement longue : topographie et habitats écologiques cartographiés par Corine Land Cover. Une fois avoir discuté de la représentativité spatiale (géométrique, thématique) des relevés de végétation, une deuxième partie décrira les résultats traitants de la physionomie des formations végétales échantillonnées. Celles-ci sont caractérisées par deux grandes nomenclatures cartographiées : les habitats écologiques Corine Land Cover, et les formations végétales décrites par les services nationaux suédois (*Swedish Vegetation Map*, 2012).

1) Vers une représentativité spatiale relativement satisfaisante, mais pouvant être améliorée

Le tableau IX.4 reprend les principales caractéristiques géométriques des superficies totales étudiées, vis-à-vis des superficies échantillonnées. Plusieurs critères ont ici été évalués, et sont exprimés en superficies absolues (km^2 ; m^2), relatives (pourcentages), ou en nombre de relevés (inventaire floristique et points paysagers confondus). Les lignes détaillent les observations en fonction des habitats écologiques Corine Land Cover au sein desquels les relevés floristiques ont été effectués. Les deux premières colonnes donnent les superficies en fonction de l'unité spatiale de l'analyse, ici l'intérieur de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna. Les deux colonnes suivantes donnent les superficies selon l'aire totale donnée par la sous-scène Landsat (sans distinction frontalière, voir partie 2 pour les métadonnées). Les trois dernières colonnes (à droite du tableau IX.4) indiquent les superficies absolues, et relatives, calculées pour les relevés floristiques (inventaires floristiques de 42m^2 et observations paysagères de 10m^2 , dont le nombre est entre parenthèses). En comparant les colonnes, on perçoit la faible représentativité géométrique des relevés floristiques, que ça soit pour la surface totale de la sous-scène Landsat ; ou encore à l'intérieur des contours cartographiés de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna. Pour les relevés, les unités sont indiquées en mètres carré (m^2), tandis que les unités des superficies Landsat et Gabna sont exprimées en kilomètres carré (km^2).

Tableau IX-4 : Tableau récapitulatif des superficies d'habitats écologiques CLC à différentes échelles d'études : de gauche à droite, communauté Gabna, sous-scène Landsat et relevés de terrain (nombre et superficie échantillonnée sur le terrain)

Habitat CLC	Superficie totale dans le territoire Gabna (km ²)	Part de la superficie dans le territoire Gabna (%)	Superficie totale dalle Landsat (km ²)	Part de la superficie dans la dalle Landsat	Nombre de relevés de terrain par habitat ; transects (points paysagers) : total	Part dans l'échantillon (%)	Superficie échantillonnée, en m ² ; Transects (points paysagers) : total
Forêts de feuillus	543	17	4648	22	16 transects (14 points paysagers) : 30	42,8	672 (140) : 812
Forêt de conifères	659	21	1169	6	4 (5) : 9	12,8	168 (50) : 218
Forêts mélangées	122	4	512	2	0	0	0
Prairies naturelles	118	4	679	3	3(4) : 7	10	126 (40) : 166
Landes et bruyères	851	27	6327	30	12(7) : 19	27,1	504 (70) : 574
Bois et végétation arbustive en mutation	120	4	336	2	0(1) : 1	1,4	0(10) : 10
Zones faiblement végétalisées	346	11	4288	20	1(1) : 2	2,8	42(10) : 52
Tourbières	427	13	3180	15	0(2) : 2	2,8	0(20) : 20
Total	3187 km ²	100%	21141 km ²	100 %	70 relevés	100	1852 m ²

Pour la représentativité des relevés floristiques en fonction des habitats écologiques Corine Land Cover, le tableau IX.4 et la figure IX.7 esquissent les premiers résultats, à l'échelle de la communauté Gabna ou de la sous-scène Landsat. Un peu moins de la moitié des relevés (42,8%, soit 43 relevés sur 70) a été réalisée au sein de forêts de feuillus (principalement des formations végétales hautes à *Betula pubescens*), alors que cette occupation du sol ne représente que 17% de la surface de la communauté Gabna, il y a donc

eu sur-échantillonnage de cette catégorie. Un tiers (27,1%) est représenté dans la catégorie des Landes et bruyères (formations végétales à Saulaies, en zone humide et en lisière forestière: *Salix sp* ; mais aussi Landes à Ericacées : Callune, *Empetrum nigrum hermaphroditum*, *Vaccinium vitis-idae*, 27/70, Swedish Vegetation Map, 2012). Ce taux d'échantillonnage est cohérent avec le pourcentage occupé par cette catégorie dans le territoire de la communauté Gabna. Le reste est distribué selon les autres habitats écologiques Corine Land Cover composant les paysages végétaux de la communauté d'éleveurs Gabna, et de la sous-scène Landsat : forêts de conifères (Pins sylvestre, Epicéas ; 12,8% des relevés floristiques), au sud-est des zones d'études ; forêts mélangeants essences caduques et sempervirentes (principalement localisée en interface entre la forêt boréale et le piémont, voir inventaires floristiques du chapitre VIII), tourbières (particulièrement présentes dans cette marge nord de la forêt boréale, à l'échelle de l'Eurasie ; mais aussi de façon plus localisée en altitude, ou le long des cours d'eau, chapitre VIII, composées de laïches et de linaigrettes pour la végétation vasculaire immergée, mais surtout de plantes non vasculaires), prairies alpines (dont la composition floristique est particulièrement variable selon l'exposition des pentes : genres *Deschampsia*, *Poa*, *Antoxanthum*, *Ranunculus* etc, Swedish Vegetation Map). Parmi ces catégories Corine land Cover, la plupart ont été sous-échantillonnées à l'exception des pelouses d'altitude qui elles ont été sur-échantillonnées. Les aspects intrinsèques au terrain en biogéographie sont alors à prendre en compte, en particulier les distances et temps de marche d'approche et de temps nécessaire pour effectuer des relevés au sein des habitats écologiques d'altitude, en respectant les autres facteurs de prise en compte de la stratégie d'échantillonnage : parcours pastoraux et pâturages saisonniers.

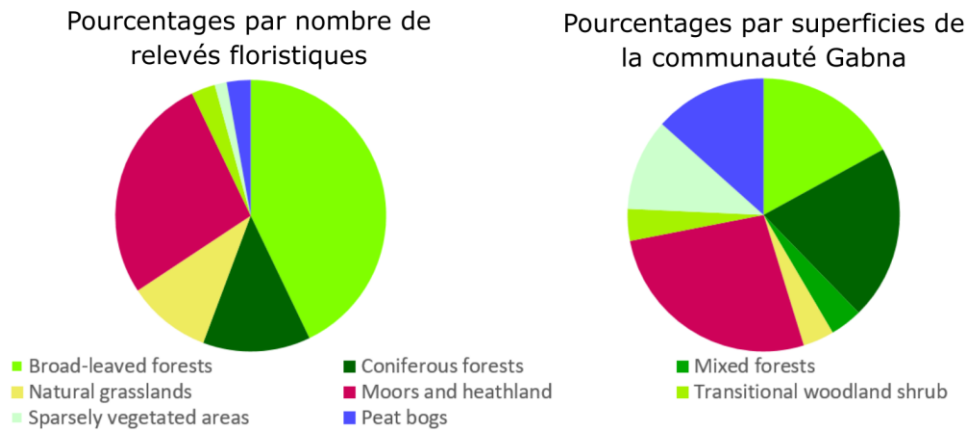


Figure IX-7 : Camembert de pourcentages d'occupation de sols CLC comparant le nombre de relevés floristiques par catégories aux superficies de catégories à l'échelle de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna

Quant aux modèles explicatifs du gradient bioclimatique altitudinal et de la topographie structurant la distribution géographique des formations végétales (Ozenda, 1964), les tableaux IX.5a et 5b montrent que l'effort d'échantillonnage a été relativement bien distribué par tranche d'altitude et d'orientations des pentes par comparaison avec leur distribution dans le territoire de la communauté Gabna et de pente (tableau IX.5).

Tableau IX-5 : Répartition des classes d'orientation des pentes et d'altitude dans le territoire de la communauté Gabna et dans l'échantillon de relevés floristiques et paysagers

Orientation des pentes en degré			Altitude en mètres		
Classes	% Gabna	% relevés	Classes	% Gabna	% relevés
Nord (315-44)	31,6	54,3	1-450	49,6	45,7
Est (45-134)	35,6	34,3	451-900	37,5	40
Sud (135-224)	16,8	7,1	901-1500	14,9	14,3
Ouest (225-314)	15,9	4,3			
Total	100	100	Total	100	100

Dans le détail, le nombre de relevés réalisés à basse altitude (inférieure ou égale à 450 mètres) est à peine inférieur à la superficie donnée pour la communauté d'éleveurs de rennes Gabna (respectivement 46 et 50 %). La tranche d'altitudes intermédiaires (entre 451 et 900 mètres) se caractérise par une légère surreprésentation des relevés floristiques. L'examen de la

figure IX.7, en partie A, peut expliquer en partie ces constats : la majorité des relevés ont été réalisés à des altitudes moyennes, autour de la station scientifique d'Abisko. A contrario, les altitudes plus basses (de 1 à 450 mètres) sont majoritairement représentées dans les plateaux du sud-est de la région d'étude qui ont été moins échantillonnés (Kiruna, Jukkasjärvi, figure IX.7). En ce qui concerne l'orientation des pentes, les relevés floristiques ont été majoritairement réalisés sur des pentes orientées au nord (54,3%) et à l'est (34,3%). Les versants orientés au sud et à l'ouest, peu représentés dans le territoire de la communauté Gabna (1/3 des surfaces) ont été sous-échantillonnés dans nos relevés (11%, soit 3 fois moins dans l'échantillon que dans le territoire étudié).

Ces résultats rapides semblent conforter la stratégie d'échantillonnage sur des critères comparatifs, en particulier sur la fréquence des habitats écologiques, et les classes d'altitude. La représentativité spatiale reste insuffisante du point de vue géométrique, exprimé en superficies absolues. L'augmentation du nombre de relevés, et/ou l'inclusion de données floristiques disponibles, tout au long des pâturages saisonniers de la communauté d'éleveurs Gabna pourrait améliorer sensiblement les résultats sur ce point précis. D'autres variables pourraient également être pris en compte pour améliorer cette étude: la quantification du nombre de relevés par pâturages saisonniers de la communauté d'éleveurs (en visant l'équitabilité) ; la prise en compte mathématique de la distance aux routes migratoires des rennes, telles que déclarées par les éleveurs sont notamment des possibilités d'amélioration de cette étude. La représentativité spatiale et paysagère est en effet particulièrement importante pour caractériser à différentes échelles les paysages végétaux : échelle régionale de représentativité (unité spatiale d'analyse, ici représentée par les frontières de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna) ; mais également échelon local pour la prise en compte de la variabilité floristique selon des critères explicatifs environnementaux (altitude, orientation des pentes, sens du vent dominant, Pape, Löffler et al., 2013). Cette représentativité à double échelle permettrait ainsi de consolider les résultats issus des analyses suivantes, en particulier les liens entre physionomie des formations végétales et réponse multi-spectrale des pixels échantillonnés sur le terrain ; mais également quant à la variabilité locale et saisonnière des ressources pastorales consommées par les rennes au sein des huit pâturages saisonniers déclarés par les éleveurs de rennes semi-domestiques de la communauté Gabna.

2) La diversité des formations végétales, organisée selon les gradients zonal et altitudinal

Les paragraphes précédents s'attachaient à asseoir la stratégie d'échantillonnage opérée au sein des pâturages saisonniers de la communauté d'éleveurs Gabna, dont l'organisation géographique et temporelle correspond à l'adaptabilité des rennes et du système pastoral adossé à la forte variabilité bioclimatique (saisonnière, annuelle, décennale). Ce paragraphe s'attachera à décrire les formations végétales relevées du point de vue de leur physionomie : stratification, espèces végétales dominantes, ainsi que les conditions de milieu. Deux méthodologies sont ici appliquées, selon les protocoles menés sur le terrain lors des relevés floristiques par transect (voir chapitre VIII et rappel dans le paragraphe 1 du chapitre IX). La première méthodologie s'appuie sur les inventaires floristiques exhaustifs (présences et contacts) opérés en strate herbacée (végétaux inférieurs à 50 cm) et sur le protocole Intercept Cover, lorsque les formations végétales échantillonnées présentaient des hauteurs de végétation (arbustive et arborée) supérieures à 50 cm. A partir de ces deux données acquises le long des terrains de doctorat, et grâce au programme Envexx (SU, Collège des Licences), les taxons observés étaient rattachés à un type biologique, décrit par Raunkiaer, selon l'espèce végétale (strate herbacée), et sa hauteur (strates arborées et arborescentes). Les calculs de contributions spécifiques au biovolume, de fréquence et de taux de recouvrement des individus ligneux classés par hauteur issus de cette méthodologie permettent de comparer finement les relevés de végétation opérés le long des pâturages des rennes semi-domestiques de la communauté Gabna. La deuxième méthodologie reprend la méthode du calcul des contributions spécifiques au biovolume, ici exclusivement pour les végétaux observés en strate herbacée (inventaire floristique exhaustif). Les présences de taxons sont reprises en fonction du type de feuillage de chaque végétal rencontré : persistant, caduc, non-ligneux, mousses, lichens. La description physionomique selon la classification de Raunkiaer et ses types biologiques via les spectres biologiques, approchés par l'appartenance des taxons au type ou par l'appartenance des individus aux classes de hauteur des types, permettront d'obtenir comparativement des informations sur les phytoclimats, et plus largement sur les peuplements végétaux échantillonnés (Rougerie, 1988). Etant donné l'appétence particulière de *Rangifer tarandus* pour les Graminées et les lichens, l'approche par les groupes végétaux, classifiés selon le type de feuillage, nous indiquera plus précisément les conditions pastorales à l'œuvre pour les relevés de végétation réalisés. L'analyse conjointe de ces deux modes

d'expression et de représentation de données floristiques permettra de poser les premières hypothèses de compétition entre strates de végétation, et de modification éventuelle de la valeur pastorale des relevés de végétation (chapitre X).

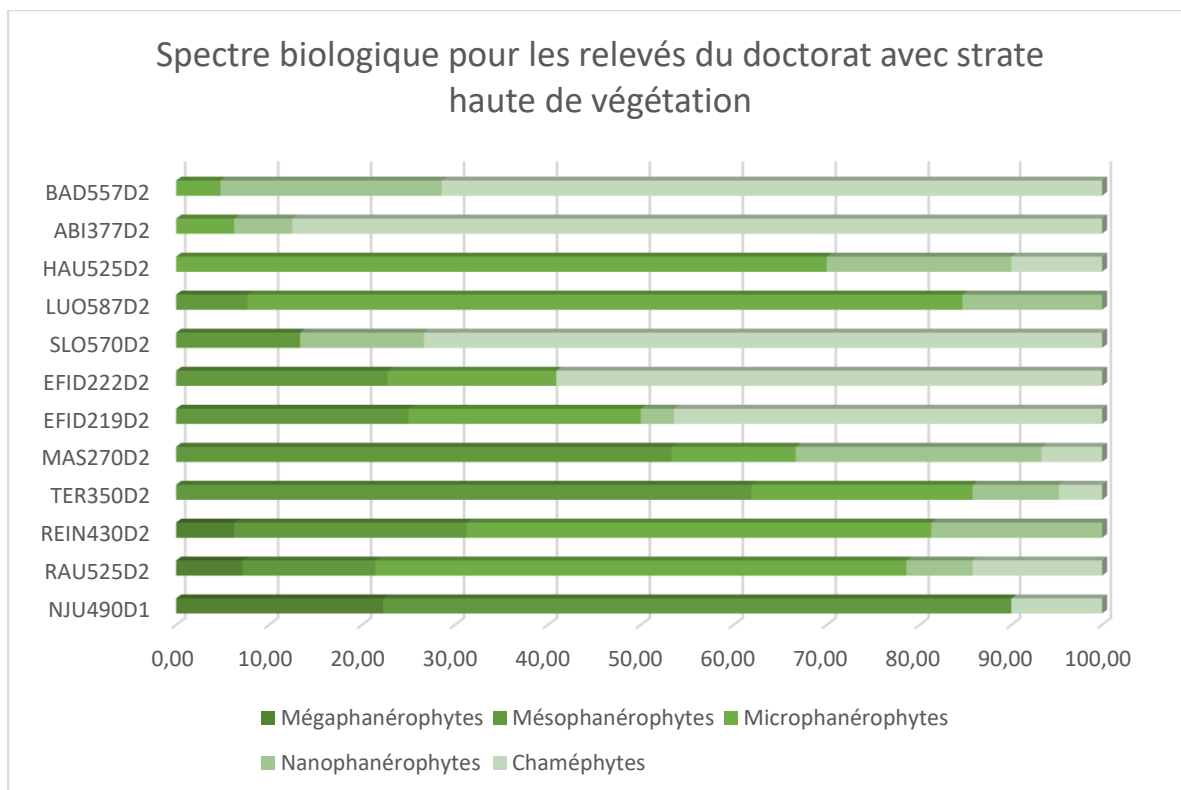


Figure IX-8 : Spectre biologique pour les relevés du doctorat avec strate haute de végétation

La figure IX.8 représente les spectres biologiques, pour les strates arborées et arborescentes, des relevés de végétation où la méthode par Intercept Cover a été appliquée. Les spectres biologiques additionnels (basés sur les taux de recouvrement le long des transects, et ceux construits pour les strates herbacées) sont disponibles en annexe 4. Egalement en annexe 3, un tableau récapitule la localisation des relevés floristiques (inventaires) du doctorat et du projet Envexx selon leur appartenance aux catégories d'occupation de sols Corine Land Cover 2012 et celle des formations végétales principales de la carte de végétation suédoise (*Swedish Land Survey, Lanstryrelssen, 2012*). Ces formations végétales sont traduites en français (tableau des relevés, annexe 3). Seuls les spectres biologiques, en figure IX.8 réalisés à partir des relevés floristiques du doctorat sont retenus, le protocole de l'Intercept Cover ayant été appliqué avec un biais observateur excessif pendant le projet Envexx. Ceux-ci sont basés sur le protocole de l'Intercept Cover, et montre ainsi en premier lieu l'absence de phanérophytes et de chaméphytes hauts (supérieurs à 50 cm) pour

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

les relevés localisés en altitude (landes et pelouses rases, zones faiblement végétalisées, spectres biologiques de l'annexe 4). Pour les relevés floristiques où la méthode de l'Intercept Cover est appliquée (et dont les formations végétales se composent d'une strate arborée et arborescente de plus de 50 cm), la figure IX.8 montre une grande hétérogénéité selon la dominance des individus : méga- et méso – phanérophytes majoritaires pour les relevés effectués en forêt de pins, en toundra arborée ou en forêt mixte (relevés MAS 270 ; NJU 490). Cependant, de nombreux relevés présentent en sous-strate arborée (micro-, nano- et chaméphytes) des pourcentages relativement importants, et dénotent des densités de Méga- ou Mésophanérophytes moindres : c'est particulièrement le cas des relevés de végétation réalisés en forêts de conifères (EFID 219, EFID 222). L'architecture forestière est dans ces cas relativement complexe, car même si les forêts échantillonnées présentent des traces de sylviculture (à la fois des panneaux, ou marqueurs, mais aussi des hauteurs de Pins sylvestres traduisant une pousse équiennne des peuplements), la densité des canopées permet la croissance des espèces de sous-bois : Ericacées, Poacées, etc. Cependant, ces relevés en forêt de conifères, localisés en pâturages hivernaux à l'échelle de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna, ne présentent qu'une quantité moindre de ressources pastorales, en particulier les lichens terricoles du genre *Cladonia* (Roturier, Roué et al., 2009).

Certains relevés floristiques ont été réalisés dans des formations végétales dominées par une physionomie haute, d'après les cartes Corine Land Cover et *Swedish Vegetation Map* (2012, annexe 3). Ces relevés ont notamment été opérés dans une zone indiquant une transition progressive entre buttes sèches à Sphaigne supportant les *Empetrum* et *Vaccinium* en lisière de Bétulaie et végétation hygrophile de tourbière à *Carex* et à *Equisetum* (ABI377).

Du point de vue phyto-climatique, l'ensemble des relevés floristiques et la diversité des altitudes échantillonnées rendent compte du climat régional, marqué par des températures froides (parties II et III) et une variabilité prononcée entre hiver et été. Le tableau IX.6 reprend les contributions spécifiques au biovolume calculés pour les différents taxons végétaux rencontrés pendant les inventaires floristiques exhaustifs (strate herbacée). Sauf exceptions, les contributions au biovolume des Chaméphytes et des Hémicryptophytes sont importantes, et indicatrices de phyto-climats caractéristiques des régions subarctiques (Cain, 1950). De manière générale, le phyto-climat dominant est de type chamaephytique, avec des taux de Chaméphytes et d'hémicryptophytes élevés. Certains relevés semblent se rapprocher d'un phyto-climat de type hémicryptophytique (Hémicryptophytes majoritaires sur le taux de

recouvrement total, Raunkiaer in Cain, 1950), c'est particulièrement le cas des inventaires réalisés sur pelouses alpines (GOR 750, GOR 770) ou en situation de tourbière (TOR 367). Généralement, les Phanérophytes ont une contribution faible voire nulle, car leur appareil végétatif est concentré à des hauteurs supérieures au demi-mètre, tranche de hauteur où sont comptabilisés les contacts entre les parties végétatives et florales de la strate herbacée. Certains relevés floristiques réalisés sous couvert forestier font exception, car des rejets bas de Phanérophytes ont été échantillonnés par la méthode des points contacts. Cela dénote de l'hétérogénéité des formations végétales, selon le biome échantillonné et ses caractéristiques topo-climatiques et gestionnaires : rejets bas de phanérophytes bien représentés pour les relevés de forêt boréale, dont certaines étaient exploitées pour la sylviculture (*Pinus sylvestris*, *Picea Abies*). Certains relevés floristiques réalisés en forêts de *Betula pubescens tortuosa* (toundra arborée) se démarquent par des spectres biologiques tendant à les confondre avec la catégorie des forêts caduques de moyenne – latitude (taux élevé d'Hémicryptophytes et de Chaméphytes bas, les Phanérophytes étant représentés par les rejets bas-branchus, par exemple : NJU 490).

Tableau IX-6 : Spectres biologiques selon les contributions spécifiques au biovolume de la strate herbacée (relevés doctorat)

Code_relevé	Phanérophytes	Chaméphytes	Hémicryptophytes	Géophytes	Non vasculaires terricoles	Non-vasculaires épiphytes
GOR750D2	0	4	85	0	12	0
TOR367D1	0	6	91	0	4	0
NJU1160D1	0	13	35	0	52	0
GOR770D2	0	28	42	0	30	0
NJU1060D1	0	34	42	0	24	0
SLO630D2	0	36	20	0	44	0
BAL925D2	0	42	20	2	34	1
NJU990D1	0	43	23	0	33	1
NIS610D2	0	44	16	0	40	0
BAD557D2	1	31	39	0	29	0
NJO445D1	4	36	33	0	27	0
HAU525D2	4	43	11	0	42	0
ABI377D2	4	36	38	1	21	0
EFID222D2	4	31	7	0	52	7
LUO587D2	4	26	33	0	30	8
NJU490D1	5	22	69	0	5	0
SLO570D2	5	39	9	0	46	0
REIN430D2	6	24	29	0	36	5
TER350D2	7	35	9	0	40	8
RAU525D2	7	32	7	0	52	2
MAS270D2	11	35	22	0	25	7
EFID219D2	12	35	2	0	37	14

En altitude, la relation entre les spectres biologiques de Raunkiaer et la contrainte thermique apparait bien dans la série de relevés herbacés réalisés pendant la mission Envexx le long d'un gradient altitudinal (figure IX.9). La part de Phanérophytes, dont seule la part située à faible hauteur est prise en compte par la méthode de relevé, baisse avec l'altitude alors qu'augmentent les pourcentages de Chaméphytes et d'Hémicryptophytes. Aux altitudes élevées et sur les versants les plus exposés au gel, la part de chaméphytes rejoint progressivement celle des hémicryptophytes (NJU 1060 ; NJU 990). Les sommets se caractérisent par la limite de pousse de la plupart des chaméphytes (en particulier *Betula nana* et *Empetrum nigrum hermaphroditum*), et l'importance croissante des végétaux non-vasculaires (NJU 1160 par exemple, Cain, 1950). Enfin, les effets de compétition pour la lumière sont notables, en particulier à l'examen des pourcentages d'Hémicryptophytes et de Chaméphytes. Un taux élevé d'Hémicryptophytes reste associé à un taux bas de Chaméphytes, et inversement. Les pourcentages de végétaux non vasculaires sont également élevés dans les cas où les Hémicryptophytes et les Chaméphytes présentent des taux de recouvrements limités.

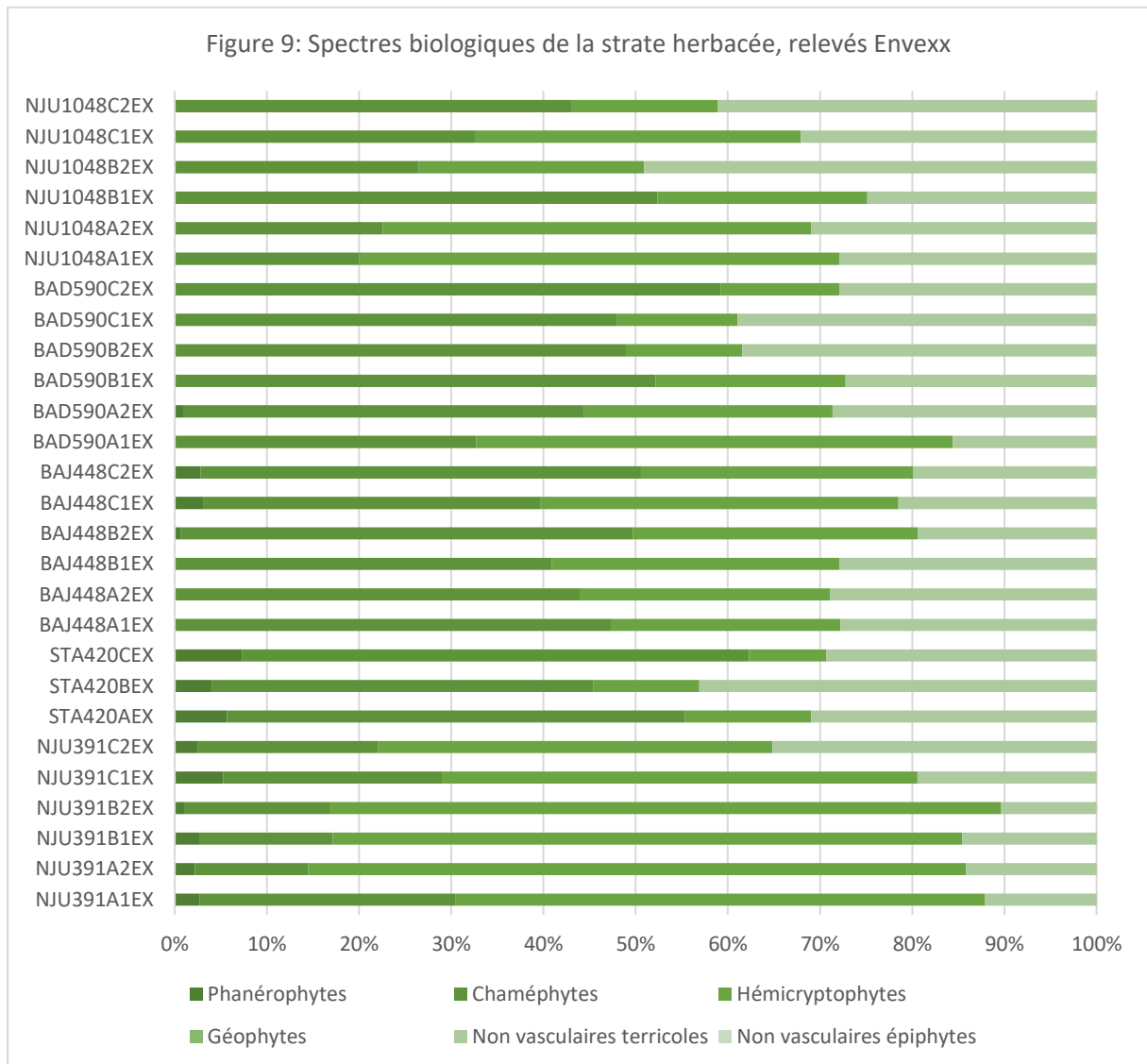


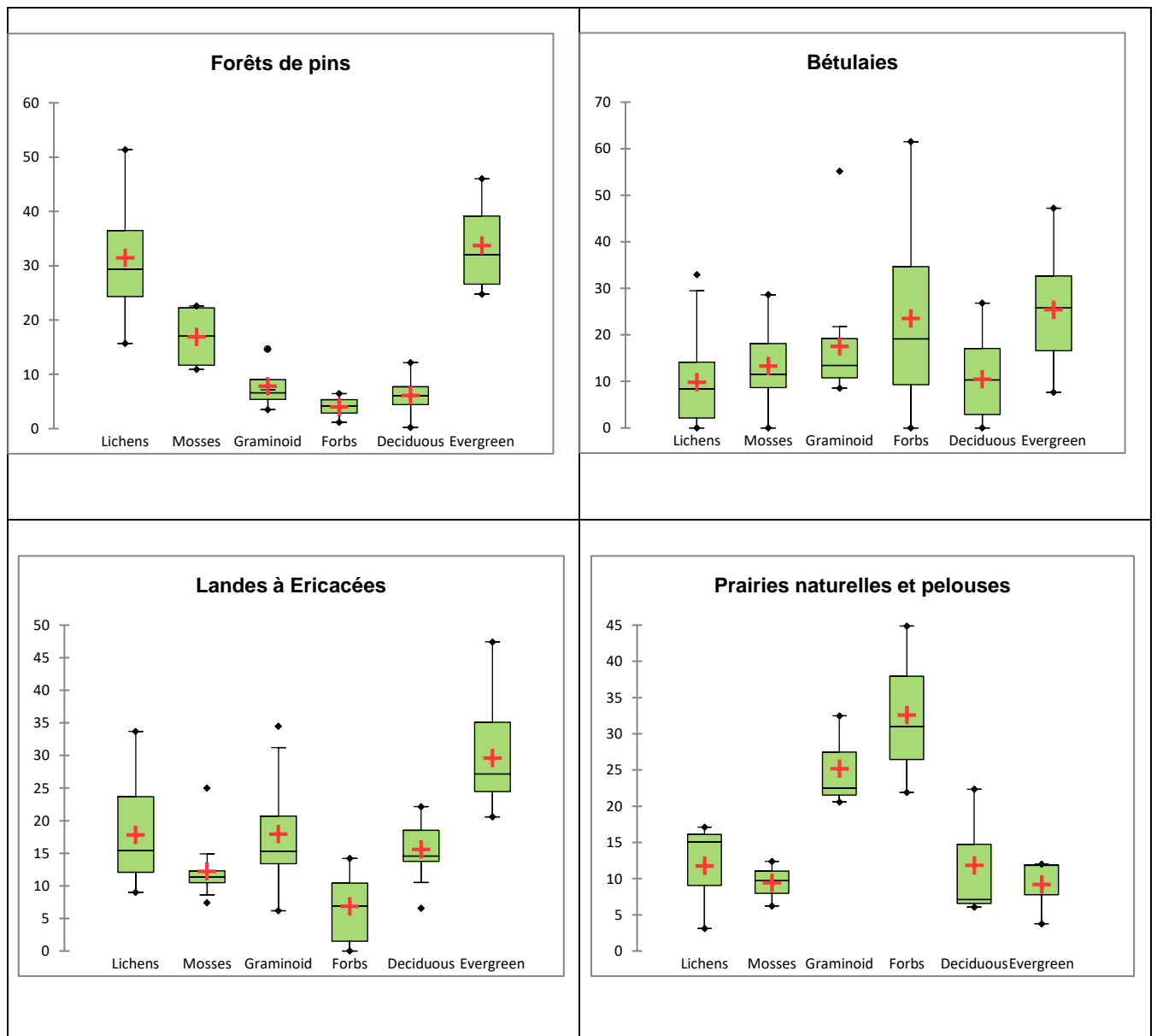
Figure IX-9 : Spectres biologiques de la strate herbacée, relevés Envexx

De façon générale, les formations végétales échantillonnées se caractérisent par leur variabilité physiologique, malgré la présence d'espèces floristiques et d'essences forestières dominantes pouvant présager des cortèges floristiques associés. Cette variabilité physiologique se caractérise en particulier par la stratification de la végétation, notamment dans les forêts de Pins et les Bétulaies, où les clairières et les puits de lumière peuvent laisser croître en sous-strate des végétaux représentatifs des phyto-climats froids subarctiques et continentaux. Les taux de recouvrement des sous-types de Phanérophytes et des ligneux bas sont particulièrement utiles pour la compréhension du lien entre canopée, stratification des formations végétales ligneuses hautes, ligneuses basses et réponse approximée de la

végétation chlorophyllienne par l'indice de végétation NDVI. Le paragraphe suivant discutera de la présence des ligneux-bas à l'échelle des relevés, selon l'approche physiologique : relevés forestiers (distinguant les relevés de toundra arborée des relevés en Forêt boréale), de landes et de physiologie basse (prairies, zones faiblement végétalisées).

3) Contribution des végétaux au biovolume selon leurs types de feuillage : des buissons bas dominants en strate herbacée

Les figures IX.10a, b, c, d et e rendent compte de la classification des taxons selon leur type de feuillage, observés et dénombrés des habitats Corine Land Cover échantillonnés : forêts de conifères (relevés localisés en pâturages d'hiver ou de fin hiver), forêts de feuillus (bétulaies hautes, en transition altitudinale avec le biome de taïga), Landes et bruyères (principalement étage bioclimatique alpin), pelouses et zones faiblement végétalisées. Sur les boîtes à moustache, de gauche à droite, sont repris les pourcentages des contributions au biovolume en fonction des types de feuillages des taxons observés en strate herbacée. Les ligneux-hauts, Phanérophytes et Chaméphytes excédant les 50 cm sont exclus de cette analyse (*Betula pubescens* et *Pinus sylvestris* pour les peuplements forestiers, fourrés à *Salix* pour les habitats de moyenne-montagne au-dessus de la limite forestière du Bouleau pubescent). L'objectif est ici de mieux comprendre l'organisation des cortèges floristiques au sein des habitats Corine Land Cover échantillonnés, à travers la problématique de l'embroussaillage des pâturages à rennes. Si l'attribution des catégories par type de feuillage peut sembler relativement grossière au vu du degré de précision des espèces broutées saisonnièrement par les rennes semi-domestiques (Klein, 1990 ; Lefrère, 2003), elle peut donner une idée du potentiel pastoral des habitats échantillonnés composant les paysages de l'élevage de rennes de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna. En effet, ces espèces se composent majoritairement de lichens et de graminoides (voir tableau repris de Lefrère (2003) en annexe 5, et paragraphes précédents).



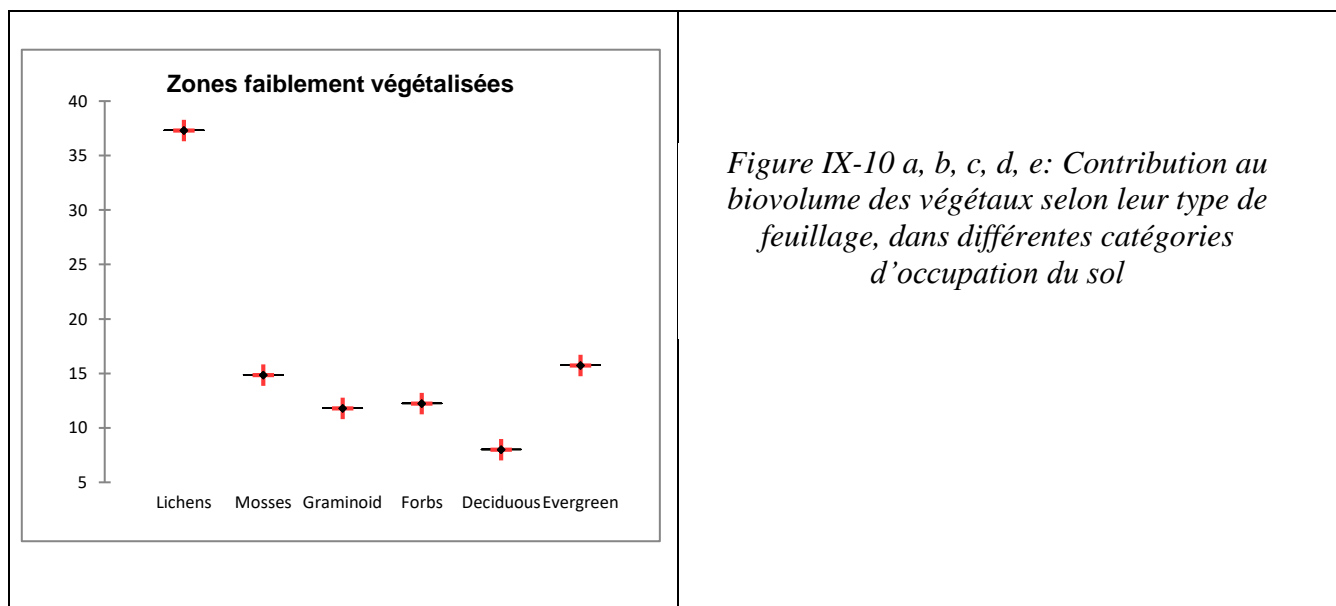


Figure IX-10 a, b, c, d, e: Contribution au biovolume des végétaux selon leur type de feuillage, dans différentes catégories d'occupation du sol

Ainsi, les ligneux-bas à feuilles persistantes occupent au moins 30 % du biovolume herbacé des inventaires réalisés en Forêts de conifères et en Landes et bruyères, avec des valeurs médianes de 32 et 27,1% respectivement. Dans ces deux habitats, les végétaux herbacés non graminoides présentent des contributions particulièrement modestes au biovolume, en particulier dans le cas des Forêts de conifères, alors que les lichens et mousses de la strate muscinale totalisent 46% des contributions au biovolume. Les Sphaignes, formant des buttes, et les mousses (*Dicranum*, *Thuidium*) y sont particulièrement présentes. Dans les Landes, les ligneux-bas caducs (*Vaccinium*), les lichens et les Graminoides cumulent en médiane 65% des contributions au biovolume. Ces résultats sont en concordance avec ceux trouvés par Maliniemi, Kapfer et al. (2018), indiquant des contributions similaires, en particulier pour les stations étudiées dans l'extrême nord de la Finlande, en limites de zone biogéographique nord – boréale et alpine/oro-arctique. Les boîtes à moustache distinguant les relevés floristiques du doctorat (annexe 6), montrent des médianes et des dispersions interquartiles beaucoup moins grandes : les Landes étudiées au cours des missions de terrain du doctorat (excluant les stations du programme Envexx), montrent des taux de recouvrement de lichens et de ligneux-bas sempervirents plus importants que les résultats affichés en figure IX.10.

Dans les forêts de feuillus, en particulier les toundras arborées à *Betula pubescens tortuosa* qui dominent dans les vallées glaciaires de la région du Torneträske, les contributions au biovolume des végétaux herbacés non graminoides sont élevées (médiane

34%, figure IX.10b, annexe 6, où les boîtes à moustache ne sont calculées que pour les relevés des terrains du doctorat). Les ligneux-bas persistants occupent également une portion non négligeable du biovolume du tapis herbacé (médiane 26%). Les végétaux non ligneux et non graminoides, puis les Mousses complètent la strate herbacée, avec des valeurs médianes totalisant près de 65% du tapis (annexe 6).

4) Détection de la densité en ligneux : des valeurs multi-scalaires de NDVI (MODIS, Landsat) à la couverture des phanérophytes et des ligneux bas ?

Les paragraphes précédents ont décrit les contributions des végétaux aux différentes strates : les spectres biologiques ou pseudo-biologiques selon les types biologiques de Raunkiaer et/ou les hauteurs dans un premier temps, les boîtes à moustache de la répartition des types de feuillage dans un deuxième temps. Ici, on cherche à associer les taux de recouvrement des espèces ligneuses (haute et basse) avec les valeurs de NDVI échantillonnées à deux échelles d'analyse en télédétection (partie II et chapitres précédents). Ces échelles d'analyse portaient sur l'exploitation des séries temporelles MODIS 13Q1 (résolution spatiale de 250 m) et Landsat (résolution spatiale de 30 m). On étudie dans ce paragraphe les liens statistiques existants entre les valeurs de NDVI et les taux de recouvrement des ligneux quantifiés sur le terrain.

Les hypothèses sous-jacentes concernent en particulier la propension du NDVI à détecter la végétation chlorophyllienne ligneuse, particulièrement couvrante pour les deux strates testées (strate arborée et arbustive – Phanérophytes ; strate herbacée – ligneux bas). L'attention est également mise sur les liens statistiques décelables entre les valeurs de NDVI rencontrés sur l'imagerie grand-champ (MODIS, pixels de 250 m de côté) et les valeurs de NDVI des pixels Landsat (30 m de côté) composant un pixel MODIS. Un taux de recouvrement fort devrait ainsi être statistiquement associé à un NDVI fort, à la fois sur les pixels Landsat décrivant ces taux de recouvrements, mais également sur les pixels MODIS. In fine, cette approche multi-scalaire vise à modéliser la relation entre MODIS et terrain, à travers la problématique du suivi temporel par satellite et de la réponse des paysages végétaux de la communauté Gabna aux modifications profondes des régimes thermiques et hydriques.

Pour ce faire, les valeurs de NDVI des images MODIS et Landsat de juillet 2006 et 2017, ainsi que la moyenne de ces deux dates ont été extraites aux centroïdes des pixels où les relevés de végétation (inventaire exhaustif et Intercept Cover) ont été réalisés. Une matrice de

corrélation par rangs de Spearman a ainsi été calculée, prenant en compte les valeurs de NDVI MODIS et Landsat, et les taux de recouvrement en ligneux, à l'échelle de l'ensemble des inventaires floristiques réalisés. Cependant, deux inventaires floristiques ont été retirés de l'étude (voir annexe 3, et chapitre VIII), la position de la dalle Landsat ne couvrant pas l'ensemble de la communauté Gabna, en particulier la pointe orientale des pâturages d'hiver où étaient localisés ces deux relevés floristiques.

Tableau IX-7 : Matrice de corrélation par rangs de Spearman entre taux de recouvrement et fréquence des ligneux hauts et bas et valeurs de NDVI (Landsat, MODIS) rencontrée pour chaque centroïde de pixel échantillonné sur le terrain

	TR% couverture arborée	Contribution % Phanérophytes	TR% ligneux bas (décidus et persistants)	Moyenne NDVI Landsat (2006-2017)	Moyenne NDVI Modis (2006-2017)	NDVI Landsat (2006)	NDVI Landsat (2017)	NDVI MODIS (2006)	NDVI MODIS (2017)
TR% couverture arborée	1								
Contribution% Phanérophytes	<u>0.8239</u>	1							
TR% ligneux bas (décidus et persistants)	-0.0219	0.1236	1						
Moyenne NDVI Landsat (2006-2017)	<u>0.6444</u>	<u>0.7297</u>	-0.0672	1					
Moyenne NDVI Modis (2006-2017)	<u>0.6811</u>	<u>0.7282</u>	-0.0117	<u>0.8691</u>	1				
NDVI Landsat (2006)	<u>0.6174</u>	<u>0.6862</u>	-0.0852	<u>0.9472</u>	<u>0.7814</u>	1			
NDVI Landsat (2017)	<u>0.6307</u>	<u>0.7304</u>	-0.0755	<u>0.9850</u>	<u>0.8731</u>	<u>0.8970</u>	1		
NDVI MODIS (2006)	0.5752	0.4902	-0.3769	<u>0.7771</u>	<u>0.7164</u>	<u>0.7975</u>	<u>0.7379</u>	1	
NDVI MODIS (2017)	<u>0.6793</u>	<u>0.7497</u>	-0.0197	<u>0.7874</u>	<u>0.9440</u>	<u>0.7068</u>	<u>0.7938</u>	0.5924	1

La matrice de corrélations par rangs de Spearman, en tableau XI.7, présente les valeurs des coefficients entre les différentes variables testées, pour lesquelles on a précisé la significativité. Les valeurs écrites en caractères gras soulignés indiquent une corrélation hautement significative ($p < 0,0001$); tandis que celles écrites uniquement en gras indiquent une significativité moindre ($0,0001 < p < 0,03$). Aucune relation significative n'est trouvée entre

la variable « Pourcentages de couverture en ligneux bas » et le NDVI, hormis avec les valeurs de NDVI MODIS de juillet 2006. Cela signifie que cette variable de pourcentage de couverture des ligneux bas (à feuillage caducs et persistants) n'explique pas les valeurs de NDVI, qu'ils soient issus de l'imagerie MODIS ou Landsat. Ceci est aisément compréhensible, car dans un certain nombre de relevés ces ligneux bas sont sur-cimés par des ligneux hauts, et ce sont ces derniers qui forment la canopée détectée par les satellites. Les pourcentages de couverture arborée (qui totalise ou non le couvert végétal en sous-types de Phanérophytes et en Chaméphytes) ainsi que pour les pourcentages de Phanérophytes (observés en strate herbacée lors des inventaires floristiques) sont calculés. La quasi-totalité des corrélations entre la fréquence ou le recouvrement des espèces arborées, selon les méthodes, et le NDVI extrait de Landsat, et de MODIS, aux deux dates (juillet 2006, 2017) et en moyenne 2006-2017 sont très significatives. On note le pouvoir explicatif plus grand de la Contribution des Phanérophytes au biovolume de la strate herbacée calculée à partir des inventaires floristiques. Il s'agit en l'occurrence de la méthode la plus aisément reproductible sans biais observateur. Pour les moyennes temporelles (MODIS ou Landsat), les coefficients de corrélations sont relativement équivalents, de l'ordre de 0,6 à 0,7. On remarque, sans surprise, que les coefficients sont plus élevés avec les NDVI calculés sur la date la plus proche de la réalisation du travail de terrain (2017), ce qui laisse penser à un changement de situation depuis 2006. Les liens entre couverture ligneuse et valeurs de NDVI, qui étaient attendus, sont ainsi confirmés. De plus, les corrélations fortes entre les réponses NDVI des deux types d'imagerie satellite (MODIS et Landsat) semblent nous conforter dans l'approche multi-scalaire opérée au cours des études en télédétection et des relevés de terrain. Bien que ce premier travail donne des résultats prometteurs, il reste important de bien asseoir ces liens entre couverts végétaux et réponse multi-spectrale. Les relevés radiométriques pourraient dans ce cas précis permettre de détailler la réponse spectrale des végétaux et des formations végétales, et ainsi améliorer ces premiers résultats. De plus, une quantification plus poussée des taux de recouvrement des espèces ligneuses, dont certaines sont compétitives avec les ressources pastorales consommées par les rennes (Herbacées non Graminoïdes, Graminoïdes, Lichens), devrait améliorer la fiabilité de la réalisation des spectres biologiques : la difficulté étant d'associer les méthodes de terrain le long de transects de 42 mètres, réalisés pour deux seuils de hauteur/stratification (plus de 50 cm pour les Intercept Cover, réalisés principalement dans les peuplements forestiers; inférieur à 50 cm pour les inventaires). Dans

cette étude sur la physionomie des formations végétales échantillonnées, le biais observateur principal pouvant être associé à « l'oubli » de la prise en compte des canopées arborées surplombant les transects lors de la réalisation des inventaires floristiques en zone forestière. Comme nous l'avons indiqué plus haut, ce biais observateur, amplifié dans cette étude avec l'intégration dans notre base de données des relevés réalisés lors du stage Envexx, est particulièrement marqué pour la méthode Intercept Cover, ce qui se répercute sur les résultats statistiques obtenus, moins significatifs lorsque l'on retient le taux de recouvrement calculé avec cette méthode.

C - Conclusion et discussion

Ce chapitre aura mis en lumière la diversité paysagère et topographique des paysages composant les territoires de la communauté d'éleveurs de rennes semi-domestiques Gabna. La question de la représentativité spatiale a été particulièrement importante dans le contexte géographique diversifié (écotone boréal et alpin) et celui des effets du changement climatique et de son suivi par les séries temporelles climatiques ou issues des produits de la télédétection. Nous avons ainsi confirmé l'organisation continue des paysages végétaux à l'échelle des territoires de la communauté Gabna le long du double gradient latitudinal et altitudinal. La diversité paysagère échantillonnée reprend également la gradation progressive des phytoclimats plus froids (Elmendorf, Henry et al., 2012 ; Maliniemi, Kapfer et al., 2018). Une analyse plus poussée, portant sur la chorologie des espèces (déjà abordée en 2017 par les traitements de relevés floristiques Envexx, dans le cadre des UE de Biogéographie de L3), permettrait de mieux asseoir cette diversité paysagère, tant du point de vue physionomique que spécifique.

La situation originale de la communauté Gabna sur les marges nord de la forêt boréale, à travers l'examen de la physionomie des relevés floristiques en forêts de pins acidiphile a permis de mieux saisir les interactions dans l'utilisation différenciée des sols composant les paysages hivernaux : stratification haute et pousse équiennne traduisant la sylviculture intensive pour la majorité des relevés effectués en pâturage hivernal. Ces relevés se caractérisaient du point de vue physionomique par la présence d'une strate en sous-bois, et si la présence importante des lichens a été soulevée dans l'analyse des biovolumes par types de feuillage, ceux-ci ne semble pas être broutés par les rennes (surreprésentation du genre *Peltigera* notamment). L'architecture forestière complexe, particulièrement encline à

expliquer l'épaisseur des tapis lichéniques, et caractéristique de la disparition progressive en latitude de la taïga au profit de la toundra, ne semble ainsi pas avoir été échantillonnée dans les relevés (Roturier, Roué, 2009). Pour ces relevés à enjeux particulièrement forts (sylviculture et pâturages hivernaux des rennes), une distinction plus forte sera à l'avenir opérée dans la stratégie d'échantillonnage des relevés floristiques. Celle-ci pourrait notamment reprendre la cartographie nationale des formations végétales suédoise (*Swedish Vegetation Map*) ou encore la typologie forestière des sols, initiée par les ingénieurs forestiers suédois, comparant avec les mêmes protocoles des parcelles forestières intensément gérées par les compagnies forestières vis-à-vis de parcelles reconnues par les éleveurs comme étant riches en lichens terricoles.

Pour les relevés effectués dans le domaine de la toundra (arborée : rives du lac Torneträske ; arbustive et rase : étages subalpins des pâturages de la saison chaude), l'analyse des spectres biologiques permet de reprendre la catégorisation de ces formations végétales de la région, elle montre aussi la variabilité physiologique forte, en fonction des contextes topo-climatiques (orientations, hauteurs de neige et conditions hivernales ; Bokhorst, Bjerke et al., 2009 ; Maliniemi, Kapfer et al., 2018) et hydriques (clairières et tourbières des forêts de Bouleaux de montagne). Ces résultats concordent avec la description détaillée des paysages végétaux de Fennoscandie (Sonesson, Wielgolaski et al., 1975), et la gradation altitudinale correspondante. Cependant, en reprenant les constats de nombreux auteurs sur l'avancée des limites de croissances des espèces arbustives, arborées ou des ligneux bas (Camarine noire ; à l'échelle du biome : Grau, Ninot et al., 2012 ; à l'échelle de la région : Heiskanen, Nilsson et al., 2008), des relevés physiologiques pourraient s'intéresser aux lisières forestières et broussailleuses pour mieux comprendre les dynamiques végétales dans leur contexte topo-climatique et leurs relations avec les espèces végétales broutées par les rennes semi-domestiques, dont les choix d'habitats sont en saison chaude commandés par la diversité paysagère et l'orientation des pentes (Mårell, 2005).

Pour la mise en lien statistique entre variabilité physiologique des relevés de végétation (taux de recouvrement et fréquences des phanérophytes et des ligneux bas), les fortes corrélations trouvées montrent bien une relation entre NDVI et couverture ligneuse. Ce résultat confirme notamment ceux de Laidler, Treitz et al. (2008), qui trouvent de fortes corrélations à plusieurs résolutions spatiales (imagerie satellite à moyenne, Landsat et fine résolution, Ikonos) et insistent en particulier sur les liens entre NDVI et pourcentage de

couverture végétale. La valeur ajoutée de la mise en lien entre pourcentages de couverture en ligneux et valeurs de NDVI à deux résolutions spatiales différentes porte notamment sur la prise en compte de la couverture en Phanérophytes, caractérisant les domaines forestiers (forêts de conifères et toundra basse). Cependant, l'incomplétude des données Landsat (dalle Landsat étudiée chronologiquement) vis-à-vis d'une partie des territoires d'hiver de la communauté Gabna (voir notamment chapitre VII, mais aussi sous-parties B de ce chapitre) incite à acquérir des dalles voisines afin de compléter cette mise en lien entre couverture en ligneux (relevés floristiques, dont certains relevés forestiers avaient été supprimés de l'analyse car trop à l'extérieur de l'emprise géographique de la dalle Landsat) et indices spectraux (images satellite).

Transition entre le chapitre IX et le chapitre X

Le chapitre précédent mettait en relief l'importante diversité paysagère au sein des territoires de la communauté Gabna. L'analyse des phyto-climats résultant des spectres biologiques montrait que d'une manière générale, les relevés caractérisés par des formations ligneuses-hautes et ligneuses-basses reconstituait le gradient thermique latitudinal et altitudinal. L'analyse des biovolumes par type de feuillage montrait également l'importance de la strate ligneuse-basse pour discriminer différentes formations végétales à l'échelle des relevés floristiques. Enfin, l'analyse de la densité en ligneux (haut et bas) vis-à-vis de la réponse par imagerie satellite à plusieurs résolutions temporelles a montré les liens forts existants entre couverture en ligneux et réponse radiométrique couverte par satellite (NDVI). Cette approche physionomiste est particulièrement importante pour caractériser les effets du changement global sur les dynamiques végétales, et les influences sur l'écologie des rennes semi-domestiques : disponibilité et quantité en végétaux palatables, constituant des ressources pastorales cruciales dans le maintien du système pastoral Gabna et des paysages qui le soutient (Myers-Smith, Forbes, 2011).

La question pastorale est évoquée dans le chapitre suivant, qui cherche à estimer le potentiel pastoral des formations végétales échantillonnées sur le terrain, à l'aide des inventaires floristiques réalisés. On s'attache ici à décrire la méthodologie de calcul de la valeur pastorale des formations végétales, qui dans le contexte de l'élevage de rennes doit s'appuyer sur une prise en compte marquée de la saisonnalité bioclimatique : saisonnalité de l'organisation pastorale, saisonnalité du cycle biologique des rennes et saisonnalité des espèces végétales constitutives, ou non, de ressources pastorales pour les rennes semi-domestiques. Ainsi, nous caractériserons l'ensemble des relevés effectués d'après le calcul de ces valeurs pastorales, nous permettant de caractériser plus finement encore les paysages végétaux de l'élevage de rennes semi-domestique. Les questions de recherche sont ici nombreuses, et en priorité liées à la recherche de spatialisation des ressources pastorales, selon leur importance quantitative attribuée d'après la littérature : quels sont les pâturages les plus riches en ressources pastorales ? Pour quelles saisons ? A partir de ces premiers constats, devant par la suite être co-construits prioritairement avec les éleveurs de rennes de la communauté, y'a-t-il des saisons pouvant être plus à même de parer aux effets directs du

changement climatique sur l'écologie du renne et la disponibilité saisonnière en ressources végétales ? Nous nous attacherons ici à répondre en partie à ces questions, en se projetant par la suite dans le futur proche des paysages végétaux de la communauté d'éleveurs. Cette sous-partie utilise en particulier des produits de modèles climatiques globaux (observés : passé proche ; projeté : futur proche) appliqué au contexte d'identification d'unités pastorales significativement importantes pour le cycle biologique des rennes semi-domestiques et pour le système pastoral d'éleveurs Gabna. En particulier, les températures moyennes de mai et de juin passées et futures de l'aire de vèlage, délimitée par la communauté seront étudiées. Nous évoquerons ainsi les différences de températures existantes entre les formations végétales étudiées et résumant la variabilité altitudinale des températures, que l'on résume ici par la distribution des habitats écologiques Corine Land Cover au sein de l'aire de vèlage Gabna.

X - Valeur pastorale actuelle des paysages végétaux de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna et estimations des changements pour le futur¹

A - Introduction

Après avoir caractérisé la diversité physiologique de différentes formations végétales constitutives des paysages de la migration des troupeaux de rennes semi-domestiques de la communauté Gabna, on souhaite dans ce chapitre mieux comprendre la répartition des ressources pastorales saisonnières de *Rangifer tarandus*. Cette répartition est différente en fonction des paysages et des pâturages saisonniers de la communauté, et reste liée à la stratégie évolutive du renne, capital-breeder : majoritairement plantes non-vasculaires lors de la longue saison froide (tapis de lichens terricoles, Cladoniacées), des Graminées et jeunes pousses de ligneux (Saules, Bouleaux, Vaccinium) lors de la fonte des neiges et levée de dormance des différentes communautés et espèces floristiques au long du gradient d'altitude (Mårell, 2005). Les espèces végétales consommées par le Renne le sont ainsi sur une période limitée dans le temps, que l'on peut résumer à l'échelle des saisons pastorales, selon les choix de nourrissage des rennes, la disponibilité et la qualité des ressources végétales. À l'aide des inventaires floristiques exhaustifs réalisés au cours des relevés de terrain (chapitre VIII) on attribue donc aux différents relevés des valeurs pastorales, sur le mode de calcul de Daget & Poissonnet (1972). Ces valeurs pastorales, calculées selon l'appétence et la palatabilité des espèces floristiques consommées par *Rangifer tarandus*, seront données en valeurs saisonnières et annuelles. Ceci nous permet d'identifier les formations végétales échantillonnées et de les décrire selon leurs valeurs pastorales totales (annuelles) ou temporaires (saisonnières). Après cette caractérisation pastoraliste des relevés floristiques de terrain, et discuté de leur variabilité à échelle fine, nous évoquerons les effets de concurrence des espèces ligneuses, couvrantes et donc plus compétitives, sur les espèces végétales pâturées par les rennes. Celles-ci se distinguent en effet par leur bassesse du point de vue de la stratification végétale (strate herbacée, à hauteur de collet), et des répartitions différenciées au long du double écotone biome/altitude. Par la suite, nous estimerons les changements futurs des formations végétales et des ressources pastorales associées, en proposant notamment des

¹ Les résultats préliminaires de cette étude ont été présentés dans une communication au colloque Nordic Conference on Reindeer Husbandry Research, 2017 (Courault & Cohen, 2017)

cartographies comparatives de températures moyennes passées et futures (attendues pour 2050, scénario pessimiste d'émission de gaz à effet de serre), à l'échelle de l'aire de vèlage de la communauté d'éleveurs de rennes de la communauté Gabna. Nous nous intéresserons en particulier aux températures de fin de printemps et de début d'été, correspondant à la répartition déclarée des rennes femelles semi-domestiques en fin de gestation pour ces mois cités.

B - Construction des tableaux de valeurs pastorales saisonnières à l'aide des inventaires floristiques

On cherche ici à mieux comprendre le potentiel pastoral des paysages végétaux de la communauté Gabna à partir des inventaires floristiques menés. Après examen (chapitres précédents), si les relevés floristiques ne semblent refléter qu'une petite partie de la diversité des formations végétales à l'échelle des frontières de la communauté, leur nombre important et les données issues d'inventaires floristiques, notamment dirigées vers les aspects pastoraux (prise en compte des lichens épiphytes et terricoles), permettent la construction et l'analyse des potentiels fourragers des relevés floristiques réalisés. Ces potentiels se définissent dans le cadre de cette étude comme étant la comparaison saisonnière, inter-saisonnière ou annuelle de la contribution au biovolume des espèces végétales qui présentent un intérêt métabolique pour les troupeaux de rennes. Cet intérêt, et la liste d'espèces et de parties végétatives consommées dans diverses situations (biotopes, saisons), sont disponibles en annexe 5. Deux paramètres permettent de hiérarchiser l'intérêt pastoral des végétaux composant les paysages de l'élevage de rennes, selon leur appétibilité (sucres en particulier, mais aussi macronutriments et minéraux) et leur digestibilité (teneur en fibre). Le renne, qui régule son métabolisme à l'échelle annuelle, oscille entre capitalisation via le stockage des graisses en période estivale, et une balance énergétique déficitaire en hiver. Plusieurs hiérarchisations sont alors nécessaires, fonction de l'appétibilité et de la digestibilité globale des végétaux, leurs variations saisonnières, physiologiques ainsi que celle de *Rangifer tarandus*. La valeur pastorale est ici déclinée en deux grandes fonctions, sur le modèle de Daget et Poissonnet (1972), et à partir des données de thèse de C. Lefrère (2003).

Parmi les nombreuses études faites sur le régime alimentaire du renne en Scandinavie (Klein, 1990, Mårell, Ball et al., 2002, Mårell & Edenius, 2005, Mårell, 2006), le travail de thèse de Catherine Lefrère (2003) a retenu notre attention (tableau X.1). La précision et la

concision des informations permettent de dresser une liste rigoureuse des différentes espèces végétales vasculaires et non vasculaires (mousses chlorophylliennes, lichens, champignons). Cette liste, dont un extrait est présenté ici (tableau X.1) présente également l'avantage d'informer sur le contexte saisonnier et topographique dans lesquels les rennes sont susceptibles de pâturer les différents végétaux.

Tableau X-1 : du tableau des espèces pâturées par les rennes semi-domestiques (source : Lefrère, 2003)

Espèces végétales	Période de pâturage							
	Printemps	Début d'été	Été	Fin d'été	Automne	Début d'hiver	Hiver	Fin d'hiver
<i>Agrostis mertensii</i>			x	x	x			
<i>Alectoria sarmentosa</i>	x						x	x
<i>Angelica archangelica</i>	x	x	x	x	x			
<i>Betula nana</i>	x	x	x					
<i>Betula tortuosa</i>			x	x				

Ce tableau a été élaboré à partir de celui dressé par Catherine Lefrère, à partir de données personnelles dû à son contexte de travail de thèse, et une source principale norvégienne : la Flore des pâturages à rennes (Waremborg, Danell, Gaare, Niemen, 1997, Flora i Reinbeteland in Ekendahl, Bye (eds) Landsbruksforlaget, Oslo). Le tableau X.1 présente uniquement les données prises en compte dans les analyses suivantes : liste exhaustive des espèces (ou des sous-espèces) consommées par les rennes semi-domestiques du nord de la Scandinavie, et période de pâturage des végétaux. Au total, huit saisons sont proposées, avec le broutage (ou le non-broutage) des espèces végétales en fonction de celles-ci. Ces saisons, et leurs dénominations sont calquées sur le calendrier pastoral saami (plus de détails en partie II).

En annexe 5, le tableau complet précise également les conditions du milieu dans lequel les rennes s'inscrivent, et qui rendent possibles la disponibilité en végétaux pâturables (première colonne). De manière catégorielle, selon l'orientation du versant au vent dominant, la présence de marécages ou de plaques de névés estivales, ou l'acidité et l'hygrométrie des

sols, le tableau permet de dire quelles espèces végétales sont broutées par le renne semi-domestique dans ces conditions variées. Après les indications spatiales concernant la présence des rennes dans différentes conditions de biotope, et les indications temporelles qui reprennent les périodes de pâturage des espèces végétales d'après le découpage saisonnier, un troisième type d'indication affine le tableau. A l'échelle de la physionomie des végétaux, celui-ci s'intéresse aux parties aériennes qui sont broutées par les rennes : feuilles, bourgeons, racines, ou plante dans son intégralité. On peut ainsi aisément apprendre que par exemple une Ericacée relativement fréquente et abondante à l'échelle de la communauté d'éleveurs, *Vaccinium myrtillus* L., est consommée différemment selon la saison et/ou le contexte biogéographique du pâturage. Au printemps, la Myrtille sera consommée dans les moments où les troupeaux de rennes suivent l'apparition progressive des bourgeons dans les pâturages, en fonction du gradient d'altitude et de la levée progressive de la contrainte du froid (sortie de dormance, puis débourrement). Il en est de même pour les feuilles, bien que plus appétentes au moment de leur sortie, mais dont le développement désinhibé par le rayonnement solaire constant rend cette ressource pastorale potentiellement consommable par les rennes de la fin du débourrement à la fin de la période végétative, à l'entrée de l'automne.

Comme précisé au début du paragraphe précédent, les traitements qui sont ici opérés ne portent que sur la variabilité saisonnière du potentiel pastoral des végétaux listés dans le tableau, en annexe 5. On cherche en premier lieu à comparer les relevés floristiques menés au long de l'écotone taïga – toundra, du gradient bioclimatique altitudinal et des saisons pastorales telles que délimitées par les éleveurs de rennes de la communauté Gabna. Cette analyse de la variabilité saisonnière de la valeur pastorale des campagnes de relevés floristiques opérées sur le terrain sera complétée par leur valeur toutes saisons confondues, moyennée et totalisées. Ceci nous permettra d'identifier les formations végétales les plus à mêmes d'être sensibles aux effets directs et indirects du changement climatique sur les relations végétales interspécifiques, en premier lieu représentées par la concurrence entre espèces arborées, arborescentes et herbacées (remontée de la limite forestière, embroussaillage, voir partie III, chapitre IX et partie II, chapitre VII).

La reprise des relevés floristiques par inventaires, et l'estimation de la contribution des types biologiques au biovolume de la strate herbacée représentent ainsi les points de départ de l'analyse. Nous partons notamment du principe que l'unique qualification des cortèges floristiques (via l'attribution d'une nomenclature phyto-sociologique, ou le classement des

espèces les plus fréquemment rencontrées en une unité spatiale, sans prise en compte des qualités pastorales intrinsèques de ces espèces) n'est pas suffisante pour comparer le potentiel pastoral entre les différentes stations/relevés (Daget, Poissonnet, 1972). Il est ainsi nécessaire, en s'aidant du tableau présenté ci-dessus, d'être en mesure de quantifier la valeur pastorale des inventaires floristiques, à partir du dénombrement des parties végétatives par points de contact permettant d'estimer le biovolume (voir chapitre VIII). La méthodologie de Daget et Poissonnet (1972) distingue deux termes à même de décrire les valeurs pastorales de stations, ou de relevés. Le premier terme représente la valeur pastorale totale du relevé. Le deuxième terme a trait à la valeur pastorale spécifique, ou « indice de qualité spécifique (I_{si}) » (Daget, Poissonnet 1972). Il attribue des rangs aux espèces végétales rencontrées sur le terrain. Selon le nombre de catégories utilisées, l'indice de qualité spécifique peut varier de 0 (indice de qualité spécifique nul ; appétibilité et digestibilité nulles) à 10 (indice de qualité spécifique excellent : appétibilité et digestibilité excellentes, pour l'herbivore considéré). En pratique dans ce présent travail, le coefficient ne prendra que deux valeurs : 0 (valeur pastorale nulle) et 1 (valeur pastorale forte, pour l'espèce floristique présente dans le relevé, et la saison considérée). Toutefois, le détail apporté quant aux saisons où les végétaux sont consommables compense en partie cette faible hiérarchisation, l'indice de qualité spécifique pouvant varier de 0 à 8 à l'échelle de l'année. La formule de calcul de la valeur pastorale des relevés est reprise comme suit :

$$VP = 0,2 \sum_{i=1}^n CS_t * I_{si} * F_{si}$$

Où VP désigne Valeur Pastorale globale du relevé effectué ; CS_t représente la Contribution Spécifique au biovolume de chacune des espèces floristiques dénombrées au sein du relevé, I_{si} l'indice de qualité spécifique et F_{si} le taux de recouvrement de la strate herbacée.

En pratique, un premier prétraitement des fiches de terrain numérisées sur Excel est nécessaire. On attribue tout d'abord les indices de qualité fourragère saisonnière aux espèces herbacées (par exemple les Cyperacées), buissonnantes (par exemple les Ericacées) ou arborescentes (par exemple les Salicacées). On calcule ensuite la contribution spécifique au biovolume. Dans le tableau de relevé, on prend en compte les dénombrements effectués par points de contact, qui représentent de bons estimateurs du biovolume des espèces floristiques à l'échelle du transect réalisé. On totalise en ligne le nombre total de contacts par espèce

floristique, puis on fait la somme en colonne de tous les contacts. La contribution des espèces au biovolume (CS_i) est calculée en divisant le nombre de total de contacts spécifique par le nombre total de contacts à l'échelle du relevé floristique et en multipliant ce rapport par 100.

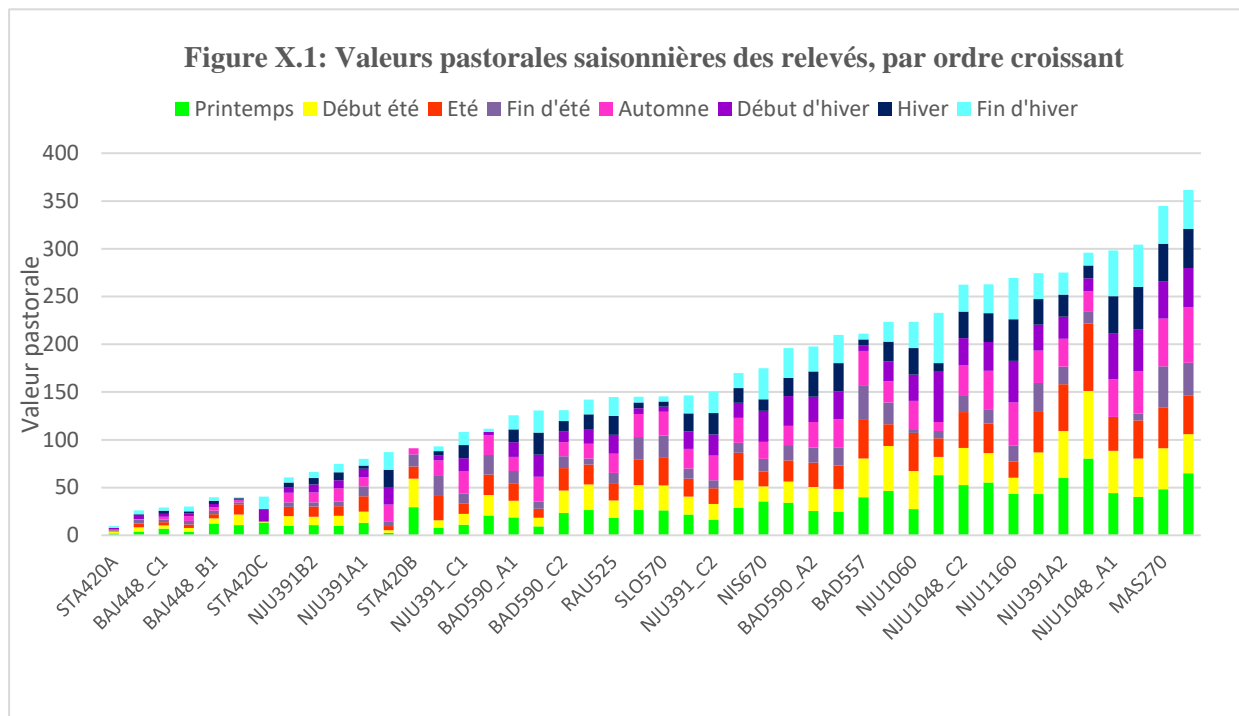
La deuxième partie du calcul s'opère après l'attribution des coefficients saisonniers pastoraux (ici 0 : non pâturable pour une saison donnée ; 1 : pâturable). On attribue pour chaque ligne du relevé (espèces) le, ou les coefficients, les colonnes représentant les huit saisons pastorales considérées. On reporte ensuite le tableau saisonnier, puis on applique la formule de calcul décrite dans l'équation ci-dessus : on multiplie le coefficient saisonnier par la Contribution Spécifique calculée au préalable. La multiplication est appliquée pour chaque espèce/Contribution Spécifique et à chaque saison/coefficient pastoral. A la fin, on peut additionner le potentiel pastoral calculé pour chacune des espèces, à l'échelle du relevé de végétation que l'on traite. Cependant, la simple addition du potentiel pastoral par saison peut parfois être surévalué, notamment à travers l'unique prise en compte des Contributions Spécifiques. Il faut alors pondérer le potentiel pastoral saisonnier par le taux de recouvrement de la strate herbacée. Ce dernier est calculé en divisant le nombre de quadrats où un contact d'espèce est noté (peu importe le nombre) par le nombre total de quadrats. Le ratio résultant de cette opération donne le taux de recouvrement de la strate herbacée. On peut ainsi multiplier le potentiel pastoral saisonnier par ce ratio de recouvrement de la végétation. C'est ce résultat, la valeur pastorale, que l'on prend en compte pour comparer les relevés floristiques réalisés sur le terrain, selon leur valeur pastorale saisonnière. Une dernière opération consiste à additionner les valeurs pastorales saisonnières, ainsi qu'à en faire une moyenne, afin d'obtenir deux ordres de grandeurs synthétiques à l'échelle de l'année. Une fois les valeurs pastorales saisonnières calculées pour chaque inventaire floristique par transect réalisé (relevés de doctorat ; projet Envexx) au sein des pâturages saisonniers ; on les représente graphiquement dans un diagramme en bâton, où chaque bâton représente un relevé floristique. Les bâtons sont alors découpés en tronçons reprenant la Valeur Pastorale saisonnière des relevés. Une carte est finalement réalisée pour montrer la répartition saisonnière de la valeur pastorale dans les pâturages saisonniers.

Un calcul complémentaire a été réalisé afin d'apprécier l'effet de concurrence entre la couverture ligneuse et les espèces appétentes de la strate herbacée. En effet, plusieurs travaux ont souligné cet effet et ses conséquences dans le futur, où une densification des ligneux et leur remontée en altitude sont attendues (Mod & Luoto, 2016, Maliniemi, Kapfer, 2018). La

valeur pastorale a été calculée dans chaque transect en différenciant la partie couverte par les ligneux (d'après leur présence observée dans les quadrats) et la partie découverte (ligneux absents des quadrats). Selon le type de formation végétale, ces ligneux étaient des arbres ou des arbustes, ces derniers étant sélectionnés parmi ceux ne présentant pas d'intérêt pastoral. L'intérêt pastoral est ainsi comparé, et les différences sont représentées graphiquement (figure X.1).

C - Les valeurs pastorales saisonnières de la communauté d'éleveurs Gabna

La figure X.1 représente la valeur pastorale calculée à l'échelle de l'ensemble des inventaires floristiques réalisés. Tous les relevés par inventaires floristiques ont été calculés sur le modèle proposé par Daget et Poissonnet (1972), selon un score d'appétibilité et de digestibilité équivalent pour toutes les espèces listées par la Flore norvégienne des pâturages à rennes (Flora i Reinbetland, 1997 ; Lefrère, 2003) et la fréquence des espèces présentes pour chaque relevé floristique. Chaque bâton cumule ainsi la valeur pastorale annuelle totale, avec notamment une valeur maximale de 350 rencontrée pour le relevé NJU 1048 B1, et une valeur pastorale inférieure à 10 pour le relevé STA 420. Les couleurs subdivisant en tronçons chaque bâton représentent la valeur pastorale calculée à l'échelle saisonnière, selon le découpage temporel donné par le tableau d'espèces pâturées. L'organisation de l'histogramme (figure X.1) trie les valeurs pastorales par relevés en fonction de leur altitude : altitudes les plus basses à la gauche de la figure X.1, altitudes les plus élevées à l'extrême-droite de la figure X.1.



Ainsi, les valeurs pastorales annuelles (cumulant toutes les valeurs pastorales saisonnières) les plus fortes (supérieures à 250) sont rencontrées dans les stations d'altitude, dont les formations végétales se caractérisent par leur teneur élevée en ligneux bas, en herbacées et en plantes non vasculaires consommables (NJU 1160, NJU 1048, NJU 990 : zones faiblement végétalisées ; pâturages et pelouses naturelles ; landes rases à *Betula nana*). Ces fortes valeurs pastorales sont également présentes pour les relevés situés en zone de transition forestière, en particulier ceux dont les feuillus (Bouleaux) se mélangent progressivement avec les résineux (Pins). C'est le cas notamment du relevé MAS 270 (valeur pastorale annuelle = 298,3), correspondant avec la catégorie d'habitat écologique Corine Land

Cover des forêts mixtes. Les valeurs pastorales annuelles intermédiaires et faibles ($VP < 250$) sont fréquemment retrouvées pour les relevés en toundra arborée et landes à Ericacées caractérisées par leurs basses altitudes et leur proximité aux cours d'eau (NJU 391 ; BAD 590 ; LUO 587 par exemple). La distribution des valeurs pastorales annuelles semble ainsi être fortement corrélée avec le gradient altitudinal : les altitudes élevées (droite du graphique) semblant être associées à des valeurs pastorales annuelles élevées. Cette logique semble notamment corroborée par l'organisation spatio-temporelle des pâturages saisonniers de la communauté de rennes Gabna : le zonage, délimité en figure X.2, est cartographié avec les

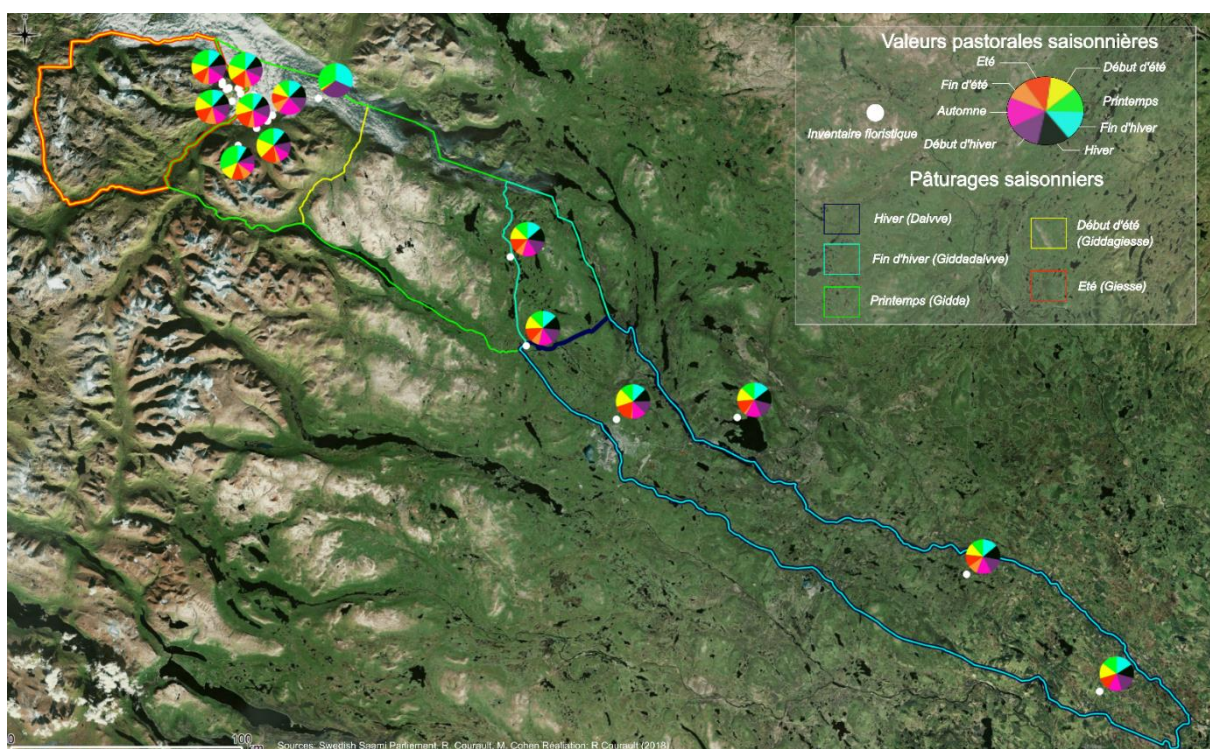


Figure X-2 : Cartographie des valeurs pastorales saisonnières actuelles à l'échelle de l'ensemble des inventaires floristiques réalisés en 2015-2016 (Réalisation R. Courault ; source : terrains de thèse, projet Envexx S-U)

valeurs pastorales saisonnières (et totales) calculées par relevé. Celui-ci dénote de la cooccurrence de plusieurs pâturages saisonniers au cours des différentes saisons végétatives des espèces vasculaires consommées par les rennes. Le pâturage d'été, où les altitudes sont les plus élevées (et où du point de vue biologique, le métabolisme de *Rangifer tarandus* est le plus excédentaire à l'échelle de l'année), constitue également une partie substantielle des pâturages de pré-été (figure X.2). Il en est de même pour l'avancée progressive vers l'aval du lac Torneträske (sud-est) au fur et à mesure de l'approche de la saison biologique du rut (pré automne et automne), et la confusion géographique du zonage entre ces pâturages, et la

disponibilité en ressources pastorales (en particulier les champignons, et les lichens en fin de saison végétative ; Klein, 1990).

Pour ce qui concerne les valeurs pastorales saisonnières, on remarque toujours la prévalence des inventaires floristiques effectués en altitude sur les relevés de basse altitude : les valeurs pastorales hivernales, qui synthétisent le potentiel pastoral (appétibilité et digestibilité) des espèces floristiques consommées par les rennes en hiver (voir tableau de C. Lefrère, annexe 5, et partie A, méthodologie), ont des valeurs élevées dans les prairies et les landes ouvertes d'altitude. Dans ces relevés, les taux de recouvrement des lichens terricoles (Cladoniacées, *Stereocaulon*) et des Ericacées caducifoliées (*Vaccinium*) sont particulièrement importants. On remarque aussi que la répartition saisonnière des valeurs pastorales saisonnières est équitable : les écarts-types restent comparables entre les différentes saisons pastorales, situées entre 9,9 (fin d'été) et 19,2 (printemps), contre 94,9 pour la valeur pastorale annuelle (addition des valeurs pastorales saisonnières, par relevé floristique). Ces résultats, dont la méthodologie de terrain a été appliquée au cœur de l'optimum végétatif, confirment donc la répartition homogène des ressources pastorales du renne entre les saisons tout au long du double gradient biome/altitude. Cette relative homogénéité dans la répartition temporelle, vue à l'échelle de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna concerne aussi bien les végétaux vasculaires que les lichens terricoles, dont le ratio varie selon la disponibilité végétative des plantes (phénologie). Quelques relevés s'individualisent malgré tout, en particulier les relevés opérés en tourbière lacustre (TOR 367), où la forte contribution des linaigrettes (*Eriophorum*, famille des Cyperacées) surestime en particulier les végétaux contributifs des valeurs pastorales hivernales. Enfin, les inventaires floristiques issus du projet Envexx (Collège des Licences, SU) montrent une forte variabilité interne des valeurs pastorales saisonnières au sein d'un même site d'étude (composés de six transects, soit trois pixels Landsat, voir chapitre VIII). Selon la situation micro-topographique (et hydrologique), celles-ci varient significativement selon la saison considérée, au sein de transects comparables du point de vue de la réponse NDVI, et de l'habitat Corine Land Cover échantillonné. C'est notamment le cas pour les inventaires levés pour le site BAJ 448, constitué d'une mosaïque de bétulaie et de clairières (figure X.3). Cette variabilité contribue aussi à expliquer la corrélation non significative entre l'altitude des relevés et le total des valeurs pastorales saisonnières ($r=0,026$, $p=0,07$).

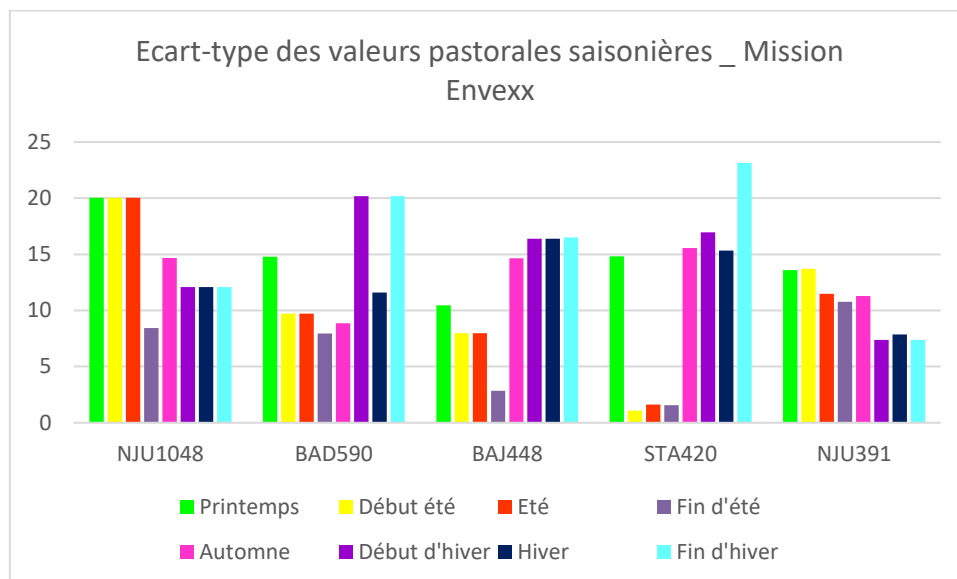


Figure X-3 : Ecart-type des valeurs pastorales saisonnières, projet Envexx (Collège des Licences, Sorbonne-Université)

Pour l'effet de concurrence entre la strate ligneuse et les espèces appétentes des rennes, elle est notable dans 19 des 48 relevés. Parmi les inventaires floristiques concernés par la présence d'une strate ligneuse-haute, on observe 11 cas où la valeur pastorale sous couvert ligneux est supérieure à la valeur pastorale calculée en excluant le recouvrement des arbres ou des broussailles (ligneux supérieurs à 50 cm). A contrario, huit cas sont positifs et vont dans le sens d'une compétition entre espèces herbacées appétentes (figure X.4). Au vu de ces résultats, il semble difficile de conclure du rôle de la compétition des ligneux pour la lumière qui impacterait la valeur pastorale de la strate herbacée. Les effets de compétition peuvent être amplifiés ou atténués en fonction du différentiel de densité de la strate herbacée sous couvert ligneux. Des facteurs édaphiques peuvent compenser l'effet d'ombrage (humidité excessive, ou sol trop rocailleux défavorable aux bouleaux mais aussi aux espèces herbacées appétentes). Le bouleau de montagne concurrence les espèces de type graminéoïde, mais peut favoriser des Ericacées consommables à certaines saisons, comme *Empetrum nigrum hermaphroditum*. Toutefois, dans les sites où le taux de recouvrement du bouleau de montagne est le plus important (NJU391), on observe un effet de compétition entre la couverture du bouleau et les ressources pastorales dans 4 relevés sur 6, et un effet neutre dans 2 relevés sur 6, suggérant un effet de seuil au-delà d'une certaine densité.

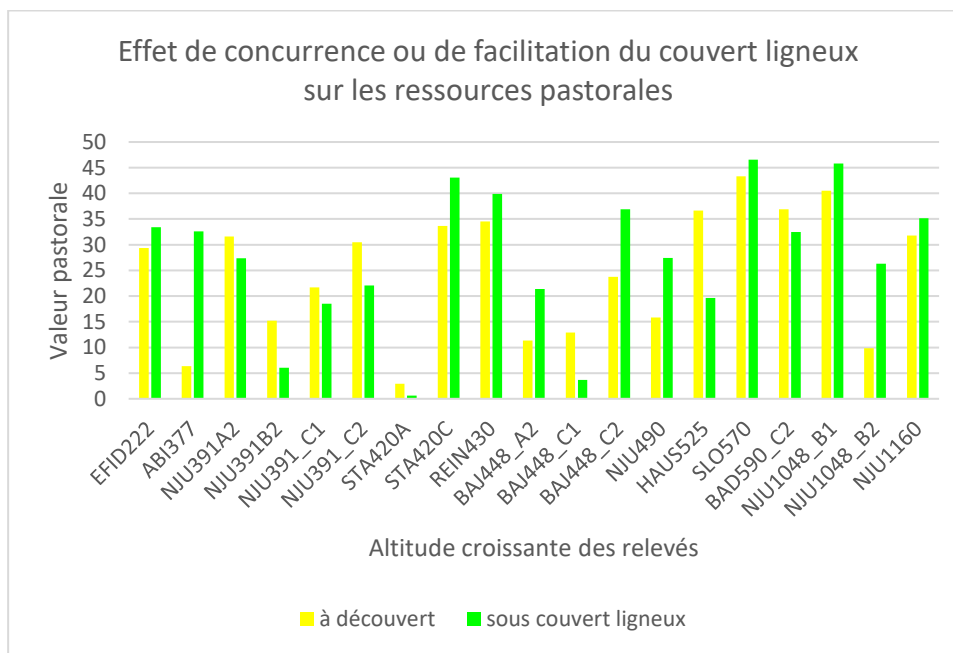


Figure X-4 : Effet de concurrence ou de facilitation du couvert ligneux sur les ressources pastorales

Ces constats appellent à augmenter le nombre de relevés floristiques, selon les deux modalités d'organisation des valeurs pastorales calculées ici. L'augmentation du nombre d'inventaires floristiques en forêt de conifères, où les troupeaux de rennes sont particulièrement sensibles aux phénomènes de fonte-regel, aux effets de la sylviculture (destruction des tapis lichéniques, évitements) et du tourisme, devra mobiliser une méthodologie de quantification des lichens épiphytes (en recouvrement, fréquence et espèces). Ceux-ci représentent en effet des alternatives naturelles éprouvées (Heikknen, Kasanen et al., 2012), pour pallier aux manque de lichens terricoles, qui restent principalement consommés au cours de la saison froide. Pour les formations végétales où se déroule le plus gros de l'activité biologique et pastorale des troupeaux de rennes, la prise en compte du contexte géomorphologique, en particulier topographique (pentes au vent, sous le vent, tills, neige éternelle) permettrait de mieux asseoir les calculs de valeurs pastorales. Ces étapes sont celles de la transhumance dans les forêts mélangeant conifères et feuillus, Bétulaies hautes ; le vèlage dans les vallées glaciaires les plus hautes : prairies plus ou moins riches en Graminoïdes ; le repos et la reconstitution des masses grasseuses : Landes plus ou moins ouvertes et prairies à Poacées. De tels calculs autoriseraient la comparaison de milieux où les échelons locaux de prise en compte des eaux de fonte et des pentes orientées aux vents

dominants hivernaux est négligée par les données cartographiques actuelles (Maliniemi, Kapfer et al., 2018).

En effet, les effets du changement climatique sur ces milieux ouverts des étages alpins à nival restent largement incertains, en particulier pour les effets de compétition induits par l'abaissement de la contrainte thermique en altitude. L'augmentation des températures annuelles (et par conséquent l'augmentation du nombre de jours supérieurs à 5°C qui induisent la croissance végétative de la plupart des espèces végétales à ces altitudes) déséquilibrerait potentiellement le ratio entre ligneux-bas, assez peu palatables par *Rangifer tarandus* (*Empetrum nigrum hermaphroditum*, Maliniemi, Kapfer et al., 2018 ; toutefois Lefrère, 2003 considère cette sous-espèce comme consommable 5 saisons sur 8) et les végétaux herbacées ou non-vasculaires, qui constituent la grande majorité des ressources pastorales consommables et consommées par les rennes (Lefrère, 2003). Il en est de même pour l'augmentation supposée en biomasse de la végétation ligneuse haute, pour l'étage bioclimatique subalpin (Dahl, 1975), provoquée par la remontée de la limite forestière des Bouleaux pubescents (ssp *pubescens* en cœur de forêt, *tortuosa* en lisière) ; et la densification et/ou la colonisation des Saules hygrophiles dans les zones de stagnation des eaux de fonte. D'après notre échantillon limité de relevés, il n'est pas possible de conclure quant à un effet de concurrence entre les ressources pastorales et la strate ligneuse. Mais un résultat différent aurait été obtenu si, à l'instar de Maliniemi, Kapfer et al. (2018), nous avons considéré *Empetrum nigrum hermaphroditum* comme peu palatable, contrairement à Lefrère (2003) qui le classe comme consommable pendant 5 saisons sur 8¹. Ainsi, une spécification plus poussée des coefficients saisonniers attribués aux espèces végétales pastorales ainsi qu'une liste d'inventaires exhaustifs du point de vue des conditions topographiques, pédologiques et hydrologiques aux différents étages bioclimatiques, permettraient de mieux comprendre la réponse de la végétation pâturée vis-à-vis de la compétition attendue avec la végétation ligneuse (haute ou basse) colonisatrice, ou en densification (Cornellissen, Callaghan et al., 2001).

Un travail de re-spécification des valeurs pastorales selon les intérêts des éleveurs de rennes de la communauté Gabna pourrait également être opéré. L'objectif premier étant

¹A titre de comparaison, si l'on exclut *Empetrum nigrum hermaphroditum* des espèces pastorales, l'effet de concurrence de la présence du bouleau est observé dans 8 bétulaies sur 15 et dans seulement 5 cas sur 15 lorsque l'on attribue à l'espèce l'indice de valeur pastorale proposé par Lefrère (2003).

d'attribuer une gamme de coefficients des différentes espèces pâturables, selon les conditions bioclimatiques interannuelles et inter-saisonnières (températures, humidité, avancée de la saison végétative). Ce travail passerait notamment par la présentation du tableau d'espèces pâturables listées par la Flore des Pâturages à rennes faite par Waremberg, Danell, et al. (1997), et des résultats que nous avons obtenus, et leur modification en fonction des connaissances des éleveurs : décision sur les ordres de grandeur des coefficients, attribution des coefficients par espèces, selon les saisons pastorales. Sur le modèle des entretiens réalisés par Heikkinen et al. (2012), différentes années et saisons-types seraient également identifiées par les propriétaires et éleveurs de rennes semi-domestiques, permettant ainsi de modifier les valeurs pastorales annuelles et saisonnières des inventaires floristiques, et posant alors les premiers jalons de la mise en place d'actions concrètes pour assurer à la fois la pérennité et la productivité des troupeaux, et la durabilité des formations végétales ayant les plus forts potentiels pastoraux, a priori identifiés comme les plus résilients aux effets du changement climatique. Les travaux de B. Inga (2007 ; 2008) sur les savoirs locaux autour de la végétation pâturée par les rennes montrent que la nomenclature saamie des végétaux vasculaires semble se limiter aux espèces prélevées et consommées par les rennes, mis à part quelques plantes graminoides indicatrices de bonnes pâtures estivales (*Equisetum fluviatile*). Il serait bon de les confronter avec ceux de Lefrère (2003) et Heikkinen et al. (2012),

En l'occurrence, les résultats que nous avons obtenus –fortes valeurs pastorales des pâturages estivaux d'altitude, faible spécialisation saisonnière des pâturages- laissent augurer de possibilités d'usages glissants d'une saison à l'autre, en réponse à la variabilité climatique qui ne fera que s'accroître dans le futur. Ces usages ajustés aux conditions climatiques sont déjà une réalité pour les éleveurs de rennes (Mårell, 2006), les limites entre pâturages saisonniers de la base RenGis 2.0 étant théoriques (chapitre II). Nos résultats montrent que cette flexibilité s'appuie sur la disponibilité de ressources pastorales à différentes saisons.

D - Les températures attendues à l'horizon 2050 dans l'aire de vèlage des troupeaux de la communauté Gabna : variabilité écologique et altitudinale¹

Les parties précédentes discutaient des valeurs pastorales associées à chaque pâturage saisonnier de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna. De manière générale, et d'après la méthode de calcul opérée (coefficients saisonniers des espèces pâturables contributrices à la valeur pastorale globale de l'inventaire floristique, voir partie A), les valeurs pastorales sont particulièrement importantes en altitude, toutes saisons confondues, et ces valeurs sont relativement homogènes pour les relevés effectués en particulier dans des formations végétales ouvertes (Landes, prairies dominées par les Graminées ou non). Nous avons également vu que la réponse au changement global de ces pâturages variait selon leur localisation au sein de l'écotone toundra-taïga : valeurs pastorales moindres imputables à la sylviculture en forêt de conifères (pâturages d'hiver) ; valeurs pastorales hautes mais potentiellement amoindries par la compétition interspécifique plus forte des ligneux (ligneux hauts en étage altitudinal bas ; ligneux-bas pour les étages subalpins et alpins). Ces effets de compétition, aujourd'hui relativement modestes d'après nos résultats, résultent de la migration et la densification des espèces ligneuses et ainsi de la perte en valeur pastorale pour les pâturages d'altitude. Ils sont principalement structurés par l'augmentation des températures et son corollaire, représenté par la rapidité de la baisse du couvert neigeux lors de la débâcle. Il est donc possible qu'ils s'amplifient dans le futur, notamment si certains seuils biologiques étaient dépassés (Alexandre et Genin, 2012).

Nous étudions ainsi dans cette sous partie une zone particulièrement sensible pour la communauté d'éleveurs de rennes Gabna, représentée par la zone de vèlage des rennes femelles composant le troupeau. Notre objectif est d'améliorer la compréhension des caractéristiques biogéographiques de la zone de vèlage (composition des formations végétales). Il s'agit de connaître un peu mieux les projections d'augmentation des températures pour les mois de Mai et de Juin. Ces deux mois sont particulièrement cruciaux pour le calendrier pastoral (voir chapitre IV) et la biologie des rennes. Ils correspondent effectivement à la période de vèlage pour les rennes femelles et à l'augmentation du métabolisme du troupeaux (les mâles et les jeunes restant éloignés des femelles gestantes) qui

¹ Ces résultats ont été présentés lors de la Reindeer Herding Conference, May 2017, Jukkasjärvi, Sweden.

peuvent consommer les premières plantes vasculaires de l'année. On souhaite ainsi connaître les températures moyennes de ces deux mois importants dans un futur proche (2041-2050), pour un scénario pessimiste d'élévation des températures à cette échéance: concentration élevée des gaz à effet de serre anthropogéniques et forçage radiatif résultant (RCP 8.5; CMIP5). Ces températures moyennes printanières sont en effet importantes pour caractériser l'évolution des paysages végétaux de l'élevage de rennes pour cette saison, et a fortiori les valeurs pastorales associées à cette période charnière pour les troupeaux de rennes.

Ainsi, à différentes échelles temporelles (passé récent: 1970-2000; présent: 2000-2016; futur proche: 2041-2050) nous avons essayé de décrire l'évolution des températures moyennes de l'aire de vèlage de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna, située à cheval entre de nombreux territoires pastoraux saisonniers (du pré-hiver à l'été, figures X.2 et figure X.5). Cette portion de la communauté d'éleveurs de rennes est en effet catégorisée dans la liste des « zones à intérêt » de la base de données géographiques RenGIS 2.0, contrairement à la zonation saisonnière simple des pâturages communautaires (*Saami Parliement ; Lanstryrelssen*). Une partie conséquente de l'étude se concentre alors sur la fiabilité des bases de données en utilisant plusieurs recouvrements. En effet, plusieurs données géographiques de températures des sols, de températures moyennes de l'air interpolées, projetées pour le futur et d'observations météorologiques in-situ ont été nécessaires pour la réalisation des cartographies (figures X.8a et 8b.)

On cherche dans un premier temps à opérer les premières vérifications entre les modèles interpolés de températures moyennes pour le passé (1970-2000; WorldClim, CMIP5 ; Fick, Hijmans, 2017), les températures de surface des sols MODIS (MODIS 11A2 ; USGS ; 2000-2016) et les enregistrements météorologiques au long de la communauté Gabna (stations météorologiques d'Abisko, Kiruna et Vittangi, 1970-2016 ; NOAA-NCDC). La figure X.4 ci-dessous reprend les données climatiques WorldClim 2.0, la localisation de l'aire de vèlage de la communauté d'éleveurs de rennes Gabna, et celles des stations météorologiques pour lesquelles on dispose d'enregistrements fiables (sans données manquantes supérieures à 10 % de l'effectif total).

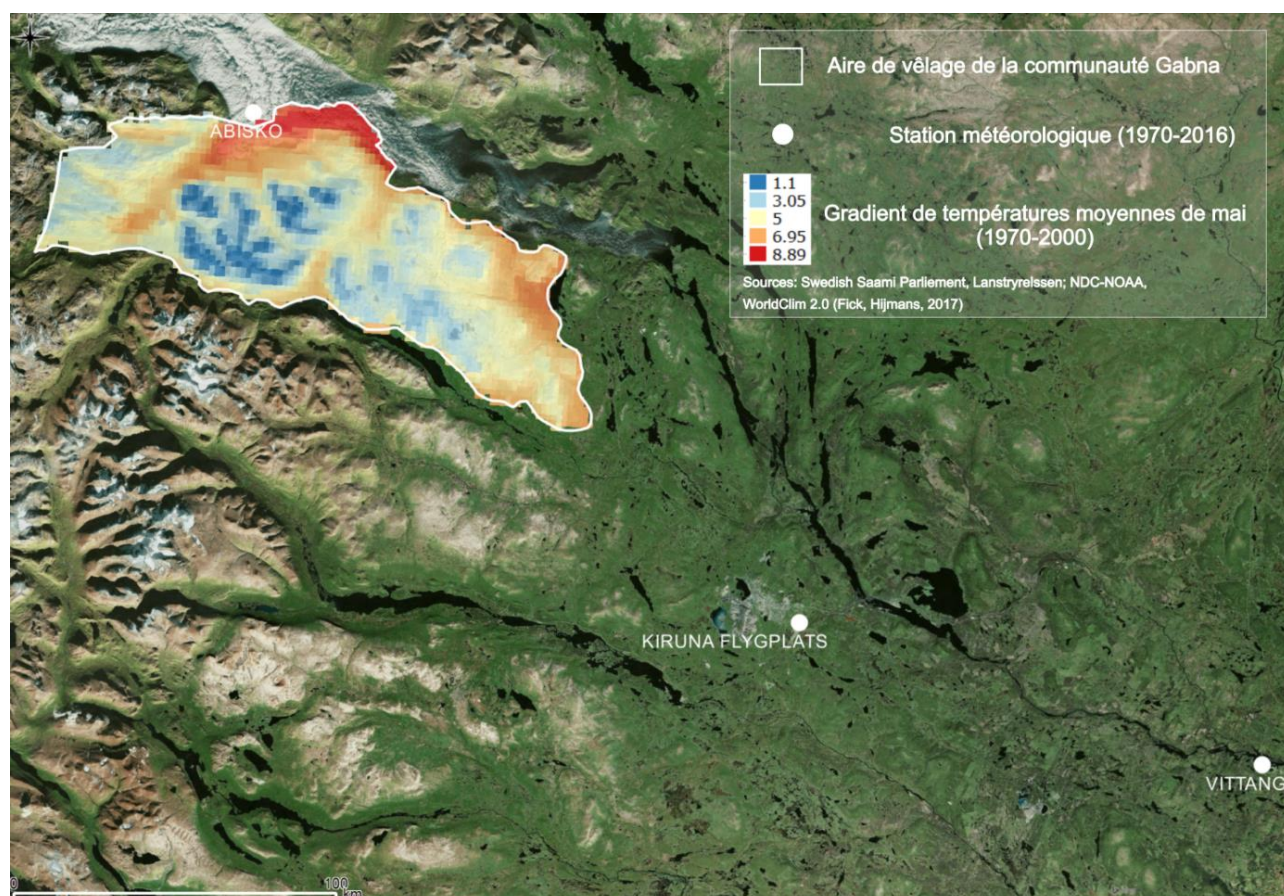


Figure X-5 : Localisation de l'aire de vèlage des rennes femelles de la communauté Gabna, stations météorologiques et exemple du raster initial de températures moyennes de mai (1970-2000 ; WoldrClim 2.0, Fick, Hijmans et al. 2015)

Le croisement entre les données de températures moyennes des mois de Mai et de Juin de l'air et à la surface des sols est opéré en échantillonnant les valeurs des sources de données matricielles (cartes WorldClim 2.0 ; températures moyennes de Mai et de Juin pour 1970-2000 ; cartes MODIS 11A2 pour les températures moyennes de Mai et Juin) selon la

localisation ponctuelle des séries temporelles observées pour les stations météorologiques étudiées. Ces vérifications croisant données cartographiques et observations ne concernent ainsi que les deux périodes renseignées : passé récent (1970-2000) et présent (2000-2016). Pour la première période, on calcule les écarts absolus de températures entre les données échantillonnées WorldClim 2.0 et les moyennes, observées en station, des températures de Mai et de Juin 1970-2000. La seconde période (présent, 2000-2016) est concernée par des calculs d'écart-type et de coefficients de variations pour les deux grands jeux de données disponibles : températures de surface des sols MODIS 11A2 pour les mois de Mai et de Juin à cette période ; températures moyennes observées dans les stations météorologiques. Une fois que les vérifications sont opérées, on procède à la comparaison cartographique et statistique, des températures moyennes passées (1970-2000) et futures (2041-2050), en moyennant les températures à l'échelle Mai-Juin, et en résumant les valeurs de températures moyennes selon l'appartenance de chaque pixel WorldClim (figure X.5) à leurs catégories d'habitats écologiques Corine Land Cover 2012 (Agence Européenne de l'Environnement). Malgré la nécessité de cartographies plus précises des formations végétales, celles-ci sont en effet d'assez bons estimateurs statistiques (ANOVA) de l'étagement de la végétation (et donc des ressources pastorales, et de leur phénologie) dans l'aire de vèlage, qui est particulièrement montagneuse.

Pour ce qui concerne les températures passées (1970-2000), la différence absolue exprimée en degrés Celsius (°C) entre les cartes de températures minimales, moyennes et maximales WorldClim et les températures enregistrées en station météorologiques (minimales, maximales, moyennes) donnent des résultats plus ou moins satisfaisants. Les erreurs totales sont importantes entre les températures minimales ré-analysées (World Clim) et les températures minimales enregistrées (Abisko, Kiruna, Vittangi; erreur totale = 2°C). Les températures moyennes présentent des erreurs totales moindres (0,9°C). En ce qui concerne la quantification des erreurs totales selon les stations météorologiques, la station de Vittangi est moins impactée par l'erreur totale vis-à-vis des températures ré-analysées (1,1°C). Le biais est plus important pour la comparaison ré-analyse/températures mesurées à la station d'Abisko (2,3°C). Ces premiers résultats suggèrent la fiabilité relativement bonne des ré-analyses Worldclim, en particulier pour les températures moyennes. Comme mentionné par leurs concepteurs Hijmans, Cameron et al. (2005), la variabilité topo-climatique augmente l'incertitude, en particulier pour les zones montagneuses et/ou insuffisamment équipées (les

données WorldClim se basant en particulier sur l'interpolation des caractères climatiques en s'appuyant sur le réseau des stations météorologiques de l'OMM). L'augmentation des enregistrements météorologiques et la correction des cartes interpolées pourrait améliorer ces résultats à l'échelle de la communauté d'éleveurs de rennes semi-domestiques Gabna, en particulier dans la région du lac Torneträsk. De plus, un croisement de données plus approfondi devrait être réalisé entre la résolution spatiale fine des cartes World Clim (1 km² à l'Equateur) et les données de ré-analyses issues des modèles ERA-Interim (European Reanalysis Interim – European Centre for Medium Range Weather Forecasts). Par ailleurs, mentionnons que d'autres auteurs proposent de tels produits, en révèlent les biais ou les valident avec des données de NDVI, et qu'une évaluation comparée serait judicieuse afin de choisir le modèle le plus fidèle (Harris et al., 2014, Beguería et al., 2016, Joly et al. 2016).

Pour les températures présentes (2000-2016), l'analyse de variance entre les données de température de sols journalières MODIS 11A2 (variance : 4,93 ; écart-type : 2,2) et les températures moyennes de la station météorologiques d'Abisko (variance 1,36 ; écart-type : 1,16) donne deux distributions de températures bien distinctes le long de la série temporelle journalière 2000-2016. La fiabilité des données journalières de températures de surface des sols MODIS comme approximation des températures de l'air de la station météorologiques d'Abisko ne semble pas suffisante. Les séries temporelles MODIS de température de surface des sols seront probablement plus indiquées pour une meilleure compréhension des liens entre la fonte de la neige au printemps et le démarrage phénologique des végétaux ayant une forte valeur pastorale. Comme cela a été suggéré par Pepin, Maeda et al. (2016), les températures de surface de sols nocturnes pourraient constituer un prédicteur plus fiable de la température de l'air, en particulier pour les zones de haute-altitude, telles que la station d'Abisko.

A l'échelle de l'aire de vèlage, nos résultats indiquent que la température moyenne de Mai et de Juin au cours de la période 1970-2000 est de 4,46°C (figure X.6a). En ce qui concerne le futur proche (2041-2050, selon le scénario radiatif RCP de 8.5 W/m²), l'augmentation projetée est de + 5,23°C (la moyenne atteignant 9,69°C, figure X.6b). Le seuil biologique de 10°C qui délimite en juillet, les zones de la toundra et de la forêt boréale, serait donc presque atteint dès le printemps dans l'aire de vèlage (Amat, Dorize et al., 2008 ; Alexandre, Génin, 2012).

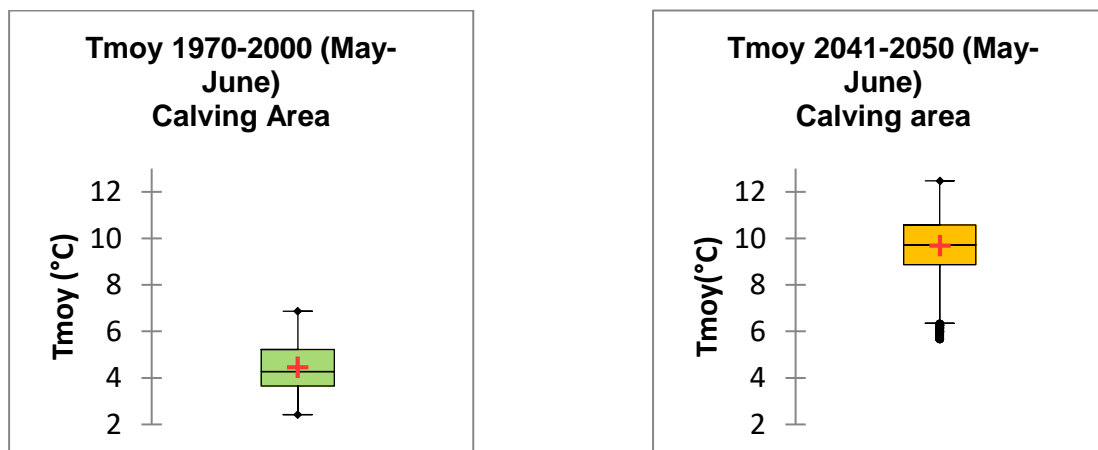


Figure X-6a et b : Boîte à moustache des températures moyennes des mois de mai et de juin 1970-2000 et 2041-2050 à l'échelle de l'aire de vêlage de la communauté Gabna (Réalisation : R. Courault, 2018)

Dans les habitats de basse altitude, telles que les tourbières du lac Torneträske, les forêts de Bouleaux pubescents et les habitats de Landes et Bruyères, les températures vont probablement dépasser largement les 10°C en valeur moyenne de Mai-Juin à l'horizon 2050 (figures X.7a, b, c, d, e, et f). Aux altitudes plus élevées, la température moyenne des prairies et herbages naturels, ainsi que des habitats de végétation clairsemées pourrait excéder les +8°C en moyenne en Mai-Juin (respectivement +9,41°C et +8,74°C, cartographies en figure X.8a et X.8b). La comparaison des graphiques en boîte à moustache des températures moyennes 1970-2000 de Mai-Juin pour les habitats écologiques constituant l'aire de vêlage (figures X.7a, b, c, d, e, f, g, h) montre une grande variabilité inter-habitats, révélant également la distribution géographique et topo-climatique large des formations végétales, tout particulièrement pour les Landes et Bruyères et pour les Prairies et Pâturages naturels (écart-type pour 1970-2000 respectivement de 0,76 et de 0,56 °C, figures X.7c et 7e).

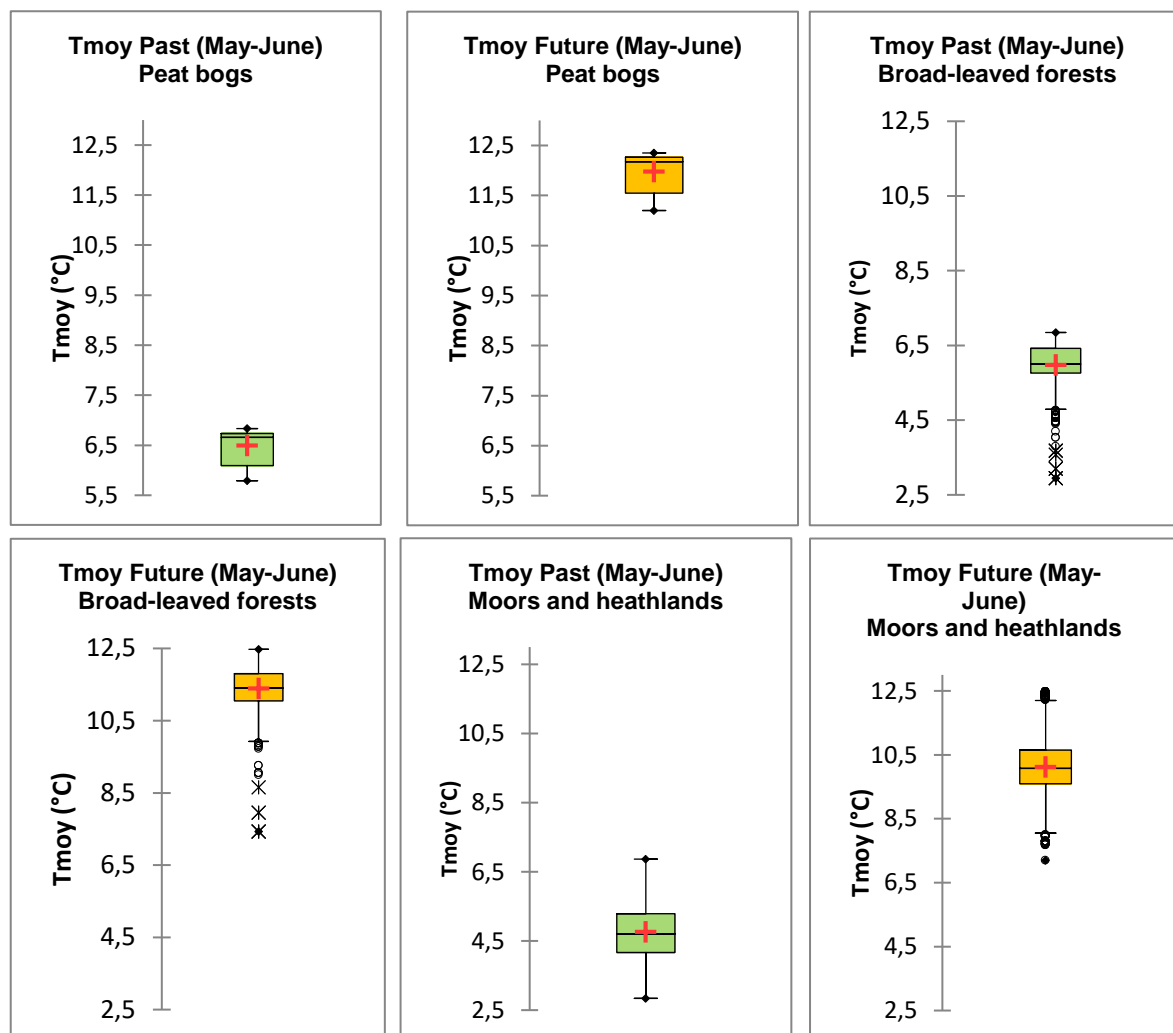


Figure X-7 : Boîtes à moustache des températures moyennes passées (1970-2000, en vert) et futures (2041-2050, en orange) pour les habitats de tourbière (7a et 7b) ; Forêts de feuillus (7c et 7d) ; Landes et Bruyères (7e et 7f)

Au regard des températures moyennes passées et futures, les médianes et la position de la boîte à moustache pour les habitats localisés en haute altitude ou à une altitude intermédiaire sont plus élevées dans le futur comparativement aux températures passées. Comparativement, les boîtes à moustache désignant la variation des températures moyennes de Mai-Juin des habitats de relativement basses altitudes (forêts de Feuillus et Tourbières, figures X.7a, b, g et h) décrivent des médianes et des positions en Q1 et en Q3 plus basses.

Ces résultats suggèrent un réchauffement plus prononcé pour les habitats de Landes et Bruyères, et a fortiori pour les Prairies et pâturages naturels, et les zones faiblement végétalisées, comme cela est confirmé dans les cartographies des figures X.8a et X.8b.

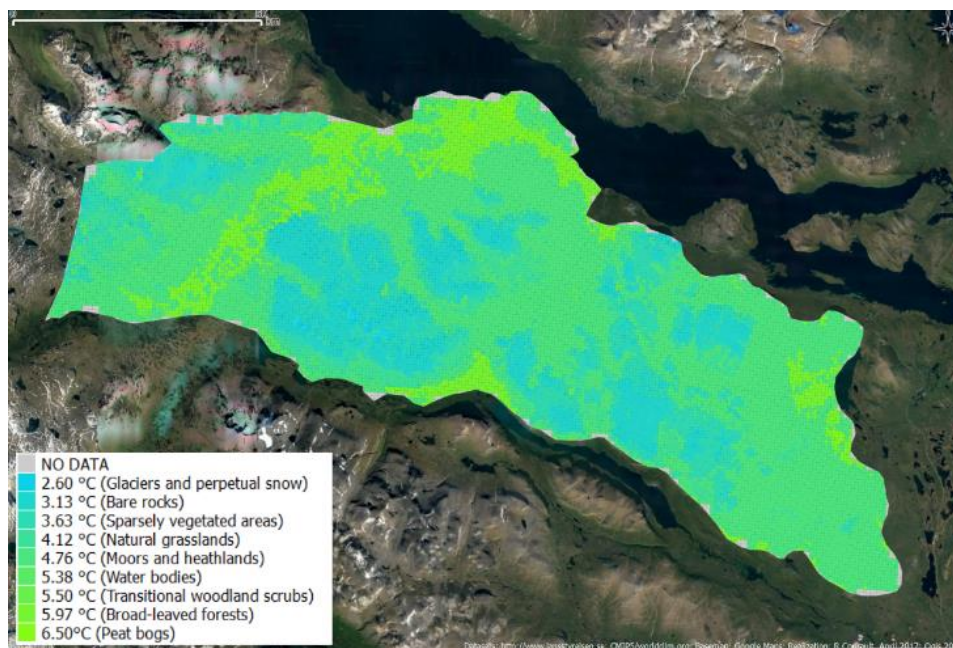
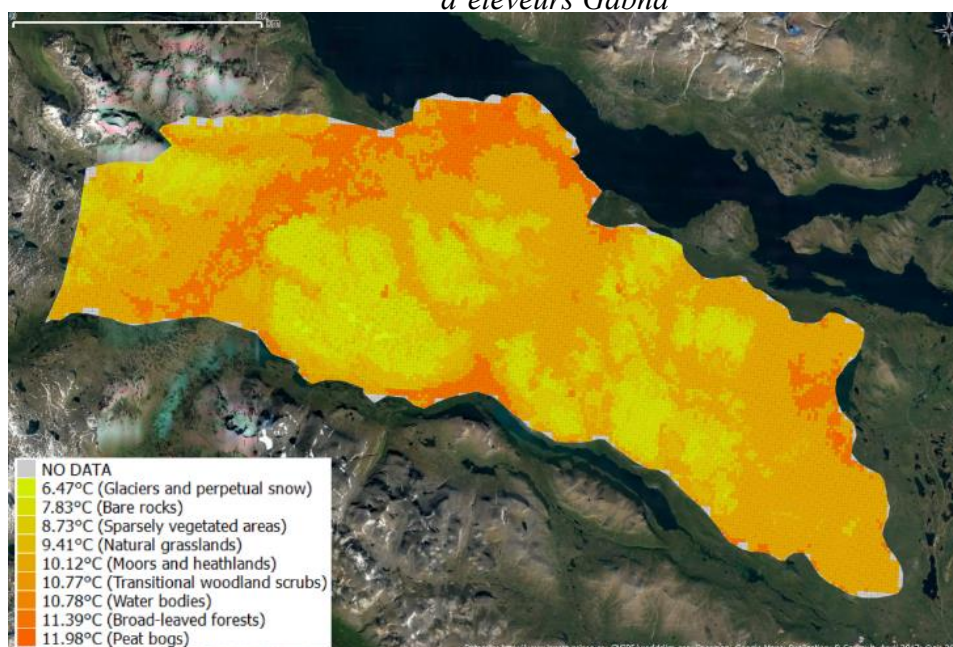


Figure X-8 : Cartographies des températures passées (1970-2000, figure 8a) et futures (2041-2050, figure 8b) résumées par habitat écologique à l'échelle de l'aire de vêlage des rennes femelles de la communauté d'éleveurs Gabna



E - *Conclusions et discussion*

Après avoir discuté de la physionomie des formations végétales échantillonnées, ce chapitre s'est concentré sur la question du potentiel pastoral des paysages végétaux des territoires communautaires Gabna. Ces territoires sont marqués par leur organisation saisonnière, répondant principalement aux structures de migration des rennes semi-domestiques, et à leurs besoins physiologiques d'apports nutritifs en végétaux, dont les choix varient au cours de l'année et de ses conditions climatiques. On a notamment pu voir que la valeur pastorale annuelle variait, à l'échelle des formations végétales échantillonnées, selon le gradient d'altitude : des valeurs pastorales quantitativement plus importantes dans les pâturages de la saison chaude, tandis que celles des formations végétales à basse altitude et sous couvert forestier feuillu (Bétulaies) avaient des valeurs pastorales faibles. Or, les travaux de Mårell, Ball (2002) ont montré l'attraction des rennes femelles pour les habitats présentant une forte biomasse en *Betula* et *Salix* lors de la saison estivale. Pour les relevés décrivant les formations végétales du biome de la forêt boréale (pâturages d'hiver), ceux-ci présentaient des valeurs pastorales généralement hautes.

Comme nous l'avons également vu, ce sont précisément les zones d'altitude qui concentrent une grande partie des espèces pâturables (principalement les plantes herbacées Graminoïdes et non Graminoïdes, pour les périodes d'accumulation des graisses). Par exemple, la sous-espèce *hermaphroditum* d'*Empetrum nigrum*, qui contribue très largement au biovolume herbacé d'après nos mesures, formant des petites touffes prostrées et très denses de petites feuilles épaisses, un peu grasses, pourrait croître en hauteur et perdre de son appétence, comme c'est le cas de la sous-espèce *nigrum* (qui a de grands entre-nœuds et des feuilles peu denses), diminuant d'autant les ressources pastorales. Actuellement, elle n'est guère concurrencée par le bouleau, ce qui permet de disposer de ressources consommables notamment à la période du vêlage. On peut ainsi attendre un double mouvement dans le contexte du réchauffement, celui de la densification du bouleau déjà observé dans le passé proche (Heiskanen, Nilsson, 2008), celui de la concurrence du bouleau envers des ressources herbacées au-delà d'un certain seuil de recouvrement, comme le montrent déjà les relevés de bétulaie de montagne les plus denses. Les interactions entre espèces végétales et animales seraient donc probablement modifiées dans ce contexte de réchauffement.

La mesure de la répartition des températures passées et futures au sein de l'aire de vèlage Gabna doit être également améliorée. L'effet des températures et leur répartition sur celle des traits fonctionnels de la végétation de toundra a notamment été évoquée par Bkorkman, Myers-Smith et al. (2018), et demande ainsi d'approfondir ces recherches en se concentrant en particulier sur les pâturages d'altitude de la saison chaude de la communauté Gabna, dont les valeurs pastorales particulièrement élevées et le contexte biologique des troupeaux (reconstitution des masses grasseuses, repos mais aussi évitement des moustiques) appellent à une surveillance plus approfondie de l'évolution des températures (mais aussi de l'humidité des sols). A une échelle géographique plus large (l'ensemble des territoires de la communauté, voire de la Laponie suédoise, une perspective d'approfondissement de ce travail consisterait à confronter les résultats obtenus à partir des cartographies WorldClim (raffinement des résolutions spatiales des Modèles GCM (*Global Climate Model*) avec les données CORDEX-WRCP. Tout ceci nous autoriserait à simuler les trajectoires écologiques potentielles de ces prairies et de ces landes ouvertes soumises à la densification progressive des ligneux-bas (Maliniemi, Kampfer et al., 2018). La prise en compte des variables topographiques doit également être approfondie, étant donné la haute dépendance entre répartition des formations végétales, leurs types fonctionnels (feuillage) selon le gradient altitudinal et thermique mais répondant également à l'orientation, la présence plus ou moins longue de la neige et l'humidité des sols (Maliniemi, Kampfer et al., 2018 ; Bjorkman, Myers-Smith et al. ; 2018). Un Modèle Numérique à haute résolution spatiale permettrait ainsi d'expliquer plus finement l'hétérogénéité spatiales des formations végétales en altitude, mais aussi les dynamiques inter-reliées entre températures (degrés-jours de croissance notamment), situation topo-climatique, nivologie et écoulement (Joly, Berger et al., 2018).

Transition entre la troisième et la quatrième partie

Après les deux premières parties « à distance » du terrain d'études, la troisième partie s'attachait à décrire de manière plus précise l'organisation des formations végétales et les discussions engagées avec les parties-prenantes agissantes sur les paysages de l'élevage de rennes en Suède. Ces deux volets sont premièrement représentés par la réalisation de relevés floristiques (physionomiques et inventaires) au long du double écotone zonal/altitudinal qui caractérise l'organisation saisonnière de l'élevage des rennes de la communauté Gabna ; et la mise en dialogue réflexif des résultats amorcés au long du travail de doctorat avec les éleveurs, et la sphère scientifique locale. Ainsi, le chapitre VIII traitait en premier lieu de la stratégie d'échantillonnage des relevés floristiques, hautement dépendant de l'approche multi-scalaire de suivi environnemental : continental à régional (circulation atmosphérique, climatologie) ; régional à local (suivi de la végétation par satellite à résolutions spatiales plus ou moins fines) et local (design des relevés floristiques montés sur la résolution spatiale de l'imagerie satellite Landsat). Les aspects humains, sociaux ont été approchés par la mise en réseau de la sphère scientifique locale et interdisciplinaire (intervenants et doctorants saamis, PhD-Course « *Connecting Sciences and local communities in Rangifer Research* », chapitre VIII), mais aussi une partie des éleveurs de rennes, représentée par les réunions et restitutions effectuées au Parlement Saami ou par mail. L'approche par dialogue réflexif a non seulement permis de tenir informées les personnes responsables de la communauté de rennes avec/sur lequel une grande partie du travail de thèse a été effectué, mais aussi de saisir plus finement les agissements, difficultés et stratégies d'adaptation que les éleveurs mettaient en œuvre dans la problématique environnementale interconnectée du changement global (restitutions, retours plus ou moins probants, négociations, etc). Ce protocole d'interactions avec les éleveurs (parties prenantes dans le Parlement saami) a notamment mis en lumière l'importance de la reconnaissance des savoirs locaux (présentation des résultats de performance explicative entre calendrier météorologique occidental et calendrier pastoral). L'orientation des recherches semble devoir se faire en partant des savoirs locaux, pour beaucoup représentés par l'approche linguistique (saisons exprimées en Saami par exemple, mais aussi toponymes, Cogos, Roturier et al., 2017), permettant de comprendre plus finement les problématiques, et solutions développées (« penser plus clairement » ; Roué, Roturier et al., 2015) dans le double

but recherché de coller plus fidèlement à une certaine réalité environnementale, éprouvée par la langue locale, et d'amorcer un dialogue réflexif plus approfondi.

Cette quatrième partie s'inscrit partiellement dans cette logique de mise en réflexion entre discussions et suivi environnemental. Les traces GPS de la communauté Gabna n'ayant pu être négociées, du fait de leur sensibilité (culturelle, scientifique, privée, politique), il nous a semblé éthiquement, et scientifiquement plus intéressant de suivre une population de rennes dits sauvages, également localisée dans la chaîne fennoscandienne et évoluant dans des paysages relativement similaires du point de vue écologique. Si les problématiques environnementales diffèrent quelque peu (contrôle par l'Homme limité aux stratégies d'évitements liés à la fragmentation paysagère, isolement génétique vis-à-vis des autres sous-populations de rennes sauvages ; Panzacchi, 2013; effets directs et indirects des changements climatiques sur la sous-population de rennes sauvages), l'enjeu paysager de conservation reste le même, *Rangifer tarandus* étant fortement impliqué dans la structure et le fonctionnement des écosystèmes subarctiques (Väisanen, 2008 ; Forbes, Kumpula et al., 2009 ; Barthelemy, Stark et al., 2015).

En particulier, l'étude de données télémétriques de rennes sauvages permet de mieux comprendre l'écologie du pendant sauvage de *Rangifer tarandus tarandus* L. En Laponie scandinave, ce taxon comprend à la fois les troupeaux de rennes semi-domestiqués par les Saamis, mais aussi les hordes de rennes sauvages, dont les trois dernières sous-populations sont norvégiennes (voir chapitre introductif pour plus de détails ; Uboni et al., 2016). Comme le chapitre introductif l'a également montré, les représentants sauvages de *Rangifer tarandus* ont largement été influencés et génétiquement nourris par les représentants domestiques, venus de communautés pastorales saamies plus lointaines dans le cas de la sous-population du plateau d'Hardangervidda. Ce palimpseste humain des paysages naturels de la Laponie scandinave, l'appartenance au même rang taxonomique, mais des différences notables quant à leurs libertés migratoires justifient ces intérêts d'étudier les mouvements migratoires (annuels, saisonniers et quotidiens), les choix d'habitats et les liens avec la variabilité bioclimatique de l'une des dernières populations de rennes sauvages en Scandinavie.

Cette quatrième partie permettra ainsi de répondre indirectement aux questions de migrations (partielles, quotidiennes) de *Rangifer tarandus* dans un espace désormais marginal de la Laponie scandinave, le plateau d'Hardangervidda. La variabilité bioclimatique, particulièrement forte sous ces latitudes et tendanciellement plus irrégulière avec les effets du

changement climatique (extrêmes climatiques plus fréquents et intenses liés à l'augmentation généralisée des températures: on peut citer l'augmentation des températures estivales maximales, les cumuls de neige plus importants ou les phénomènes de fonte – regel en hiver ; mais aussi verdissement, augmentation de la biomasse végétale et colonisation des espèces arborées et arbustives) sont ainsi rapidement explorés dans cette quatrième partie. L'enjeu est ici de mieux comprendre la variabilité géographique saisonnière des rennes sauvages équipés de colliers GPS (en latitude ou en longitude ; superficies d'aires vitales bimensuelles ; densités de rennes estimées), et leurs liens avec les caractères bioclimatiques statiques (ou pseudo-statiques : topographie, habitats écologiques) et dynamiques (variation à différentes résolutions temporelles de la circulation atmosphérique, des températures et cumuls locaux, des indices de végétation).

Un premier chapitre discutera ainsi des caractéristiques de migration hivernale des rennes sauvages d'Hardangervidda, dans des contextes hivernaux relativement différents du point de vue des centres d'action atmosphériques sur la période d'étude. Cette étude fait également appel à l'un des échanges que nous avons eus au Parlement saami avec les éleveurs, représenté par leur constat de rennes femelles se dirigeant naturellement, en hiver, en direction des aires de vèlage, lors de conditions climatiques plus douces. Le deuxième chapitre traite des choix d'habitats inter-mensuels des rennes femelles sur la période d'étude (2007-2010), et des liens supposés entre densités de rennes et facteurs bio-géophysiques au cours des périodes végétatives. L'accent a été mis sur le développement d'une boîte à outil Python permettant de collecter et de prétraiter rapidement des jeux de données géographiques en environnement, se basant sur une analyse par points de maille.

**Quatrième partie : Ecologie spatiale du renne
(*Rangifer tarandus*) : suivi des migrations des
troupeaux et variabilités bioclimatiques**

XI - Structure des migrations hivernales des rennes sauvages du plateau d'Hardangervidda dans le contexte du changement climatique actuel ¹

A - Introduction

Au cours des chapitres précédents, nous avons cherché à explorer les relations entre la variabilité atmosphérique et climatique, la démographie des rennes semi-domestiques et les couverts végétaux. L'importance de la saison hivernale, cruciale pour la survie des rennes (directement : thermorégulation, indirectement : accessibilité et disponibilité aux tapis lichéniques) et pour le développement de la végétation lors de la saison estivale, a ainsi été montrée. Les effets du climat sur la migration de *Rangifer tarandus* L. n'ont ceci dit pas encore été étudiés, hormis dans le chapitre bibliographique. Il nous faut ici distinguer la migration saisonnière des migrations partielles, correspondant à des déplacements de moindre ampleur au cours d'une saison (Skarin, Åhman, 2014). Nous avons choisi dans cette étude de nous concentrer sur la saison hivernale, dont de nombreux travaux montrent l'importance pour la survie des rennes (Roturier, Roué, 2009 ; Paoli, Weladji, 2018). Au regard de la tendance au réchauffement climatique, et de ses liens avec l'Oscillation nord-atlantique, de sa variation spatiale et temporelle, qui structure les conditions hivernales en Europe (subarctique), et de l'influence des indices de circulation atmosphérique et des variables climatiques locales sur la biologie et l'écologie spatiale de *Rangifer tarandus* L. (voir chapitre introductif pour plus de détails), plusieurs questions peuvent être posées :

1. Est-ce que les déplacements hivernaux des rennes (en latitude et en longitude) répondent statistiquement à la variabilité atmosphérique et climatique ?
2. Quelle variabilité climatique (régionale – atmosphérique-, locale – climatique-) approximerait le mieux les déplacements des rennes ?
3. Peut-on tracer une chaîne de corrélations entre variabilité atmosphérique, climatique et migratoire avec les données traitées dans cette étude ?
4. Y a-t-il une concordance de directions de déplacement entre le comportement migratoire déclenché par le passage des saisons et les migrations partielles en hiver ?

¹ Les prémisses de ce travail ont fait l'objet d'une communication à l'EGU2017. Courault R., Cohen M., Ronchail J., 2018. Wild reindeer winter migratory patterns: what resilience under climate change? (Hardangervidda, Norway), Abstract EGU.

Nous essaierons de répondre à l'ensemble de ces questions en étudiant les données télémétriques des rennes sauvages du plateau d'Hardangervidda, dans le centre-sud norvégien. Après une rapide présentation de la zone d'étude, les données géographiques de localisation GPS des rennes au cours de l'année seront cartographiées puis pendant la saison hivernale seront mises en lien avec les séries temporelles d'Oscillation nord-atlantique et les variables climatologiques locales. On tente par ces moyens de mieux caractériser la résilience de l'ongulé arctique vis-à-vis de types de temps hivernaux relativement différents à l'échelle de la série temporelle de données GPS disponible (2007-2010).

B - Présentation de la zone d'étude, démarche générale, matériel et méthodes

Le plateau d'Hardangervidda se situe au sud de la Norvège au sein du comté de Telemark (figure XI.1). Ce plateau érodé d'altitude (plus de 1000 m) est une ancienne pénéplaine, rabotée par les glaciations successives du Quaternaire et irrigué par de nombreuses vallées glaciaires (carte topographique N50, www.kartkatalog.geonorge.no). Son climat subarctique est particulièrement contraignant pour la latitude. La moyenne 1979-2009 des températures annuelles est de 3,9°C, et 826 mm de précipitations (www.globalspecies.org, CRU TS 3.1). Le nombre de jours de neige important, ainsi que la variabilité inter-saisonnière des températures font du climat d'Hardangervidda un climat de type Dfc (Continental humide à étés frais) d'après la classification de Köppen. Il est continental du fait de la différence entre les températures du mois le plus froid < 0°C, celles du mois le plus chaud > 10°C ; humide de par l'absence de saison sèche ; à été court et frais du fait de températures moyennes mensuelles comprises entre 11 et 14°C pour les mois de juin, juillet et août.

Comme dans d'autres systèmes montagnards subarctiques fennoscandiens (Dahl in Sonesson, Wielgolaski et al., 1975), les formations végétales du plateau sont rattachées à quatre étages bioclimatiques, le long du gradient d'altitude. Un étage subalpin allant jusqu'à 1050 m, où les forêts de conifères, puis plus en altitude les forêts de bouleaux pubescents sont limitées par la contrainte thermique. Cet étage est borné par la limite de croissance des arbres (*Pinus*, *Betula*). Un étage bas alpin, dominé par les landes à *Betula nana*, *Juniperus communis* et Ericacées (*Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idae*) dont la physionomie générale se caractérise par sa faible hauteur, même si les pentes ensoleillées ou les versants bien irrigués peuvent être tachetés de fourrés de saules (*Salix* sp.). Selon l'altitude et la microtopographie, qui dépend de

la cryoclastie et de la solifluxion induite par les eaux de fonte, on trouve également des graminées xérophiiles, particulièrement appréciées par les rennes, ainsi que des dépressions tourbeuses. La limite de croissance de *Vaccinium myrtillus* délimite l'entrée dans l'étage moyen alpin, approximativement entre 1200 et 1400 mètres d'altitude sur le plateau d'Hardangervidda (Dahl in Sonesson, Wilgolaski et al., 1975). Au-delà de ces altitudes, sur les sols stables, les prairies alpines deviennent plus fréquentes, et sont caractérisées par des Poacées, des Joncacées et des Cypéracées (*Festuca ovina*, *Juncus trifidus*, *Carex bigelowii*). Sur les sommets, la végétation est clairsemée, et dominée par les communautés de bryophytes (groupe Musci, Dicranacées, Hypnacées, Polytrichacées, etc), et de lichens terricoles (*Cladonia*, *Peltigera*, *Stereocaulon sp.*).

Au sein des communautés animales du plateau d'Hardangervidda existe l'une des dernières populations de rennes sauvages (*Rangifer tarandus*) de la péninsule scandinave. Le renne *Rangifer tarandus* est actuellement classé comme Vulnérable par l'IUCN, du fait du déclin généralisé des populations à l'échelle circumpolaire. Cette baisse des populations de *Rangifer tarandus* est estimée à 40% en trois générations (Gunn, IUCN, 2016). La sous-population de rennes sauvages d'Hardangervidda a fortement décliné au cours du 20^{ème} siècle, passant de 30 000 en 1960 à 5 000 en 2000, et légèrement augmenté dans la première décennie du 21^{ème} siècle (de 5000 en 2000 à 7000 individus en 2010, Uboni et Horstkott, 2016 ; Røed, Flagstad et al., 2011). Il existe des liens génétiques et historiques entre les rennes sauvages et les troupeaux de rennes semi-domestiques, en particulier dus à la cohabitation au XIX^{ème} siècle entre les rennes sauvages et les troupeaux de rennes semi-domestiques (Røed, Flagstad et al., 2011). Toutefois, la situation topographique de plateau, ainsi que l'enclavement environnemental induit par la fragmentation éco-paysagère autour du Parc National (routes, urbanisation) contribuent à l'isolement biogéographique (génétique et paysager) de cette sous-population de rennes sauvages.

La méthodologie employée comportera deux étapes. La première consiste à délimiter l'aire de vie de la population, et à cartographier les localisations des individus de rennes selon les saisons, elle a pour objet de contextualiser notre étude, en utilisant une image Geoeye en fond de carte. L'étape suivante essaiera de mettre en lien la compréhension de la migration partielle hivernale des rennes sauvages d'Hardangervidda à travers plusieurs variables atmosphériques et climatiques. Dans les calculs et dans les résultats, nous prendrons d'abord en compte la globalité de la période d'étude (365 journées composant les mois d'hiver étudiés

pris indistinctement), puis les 12 mois hivernaux constituant la période d'étude (la performance explicative atmosphérique et climatique à l'échelle inter-mensuelle). Dans le premier cas, les corrélations seront calculées sur un effectif plus grand (365 individus) que dans le deuxième (28 à 31 jours constituant chaque mois). Pour cela, nous utiliserons une série de données, dont le tableau XI.1 établit la liste, et décrites dans les sous-sections suivantes.

a) Données GPS

Les données télémétriques de suivi GPS des rennes sauvages ont été acquises sur le portail DataDryad (tableau XI.1). Celles-ci ont été déposées par Cagnacci, Focardi et al. (2015), qui étudiaient à l'échelle de trois grands cervidés (dont le renne) la distinction entre temps de résidence et migration effective, à l'échelle de l'ensemble des individus équipés de colliers GPS. Ces données télémétriques concernent huit individus femelles, appareillées de colliers GPS de mars 2007 à février 2010. Il est important de noter que l'échantillon de rennes femelles équipées pourrait représenter un plus grand nombre d'individus, étant donné la grégarité de leurs comportements migratoires à l'échelle du troupeau (Colman et al., 2004 in Pape & Löffler, 2015). Ces colliers donnent la position précise (échelle métrique) de chaque individu toutes les trois heures. Les coordonnées GPS en latitudes / longitudes, sont exprimées en degrés décimaux (système de projection WGS-84 / UTM 32 N). Les autres variables disponibles concernent l'âge du renne équipé, la date à laquelle celui-ci a été équipé, également l'heure et la date précise de la mesure GPS, ainsi qu'un numéro d'identification de chaque individu.

Pour la première étape du travail, l'ensemble des enregistrements GPS collectés au cours de l'ensemble des mois et saisons de la période 2007-2010, ont été moyennés par journée, puis intégrés dans une base de données géographique, et superposés avec une image Geoeye en libre accès en fond d'écran. Dans la deuxième phase, les données sont dans un premier temps triées et filtrées par année, mois et jour, afin de sélectionner les mois hivernaux disponibles (novembre, décembre, janvier, février de la période 2007 – 2010, voir tableau XI.1). Les données sont ensuite reportées dans un tableur individuel par mois. A partir des dates associées à chaque enregistrement GPS, les coordonnées GPS en latitude / longitude sont moyennées à l'échelle journalière. Les latitudes et longitudes ont été moyennées par la suite à l'échelle de l'ensemble de la population de rennes équipée.

Tableau XI-1 : Présentation des données et métadonnées utilisées dans l'étude (Réalisation : R. Courault, 2018)

Types de jeux de données	Source	Période étudiée	Extension géographique	Résolution temporelle	Résolution spatiale	Unité de mesure et type de variable	Système géodésique entrant
Traces GPS des rennes sauvages	DataDryadPortal http://datadryad.org/resource/doi:10.5061/dryad.rg0v3	Décembre 2007 –2008 –2009 – Novembre 2007 – 2008 – 2009 – Janvier 2008 – 2009 – 2010 – Février 2008 – 2009 – 2010	100 km ² , plateau d'Hardangervidda (Norvège)	3 h	mètre	Latitude/longitude	WGS84-UTM32N
Séries temporelles climatiques	eKlima http://sharki.oslo.dnmi.no	Décembre 2007 –2008 –2009 – Novembre 2007 – 2008 – 2009 – Janvier 2008 – 2009 – 2010 – Février 2008 – 2009 – 2010	Høydalsmo (59°30'N 8°11'E, alt: 590m), Rauland (59°43'59.99" N 8°00'0.00" E, alt: 715 m)	Jour	-	T° min, moy, max (°C), Précipitations (mm), Profondeurs de neige (mm)	-
Séries temporelles atmosphériques	NOAA-NCEP http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml	Décembre 2007 –2008 –2009 – Novembre 2007 – 2008 – 2009 – Janvier 2008 – 2009 – 2010 – Février 2008 – 2009 – 2010	-	Jour	-	Indice NAO	-

b) Séries temporelles de variabilité atmosphérique

Les valeurs journalières de l'indice d'oscillation nord-atlantique (NAO) ont été téléchargées sur le portail de la NOAA-NCEP (tableau XI.1). L'indice disponible est standardisé sur trente ans (période 1981-2010). Cet indice présente les écarts relatifs standardisés à l'échelle de la période 1981-2010. Sur le même mode que les données de suivi GPS de rennes, nous opérons la même sélection des mois d'hiver (novembre, décembre, janvier, février de 2007 à 2010). Vu le faible recul temporel (seulement trois hivers) de l'étude, on caractérise la variabilité atmosphérique induite par l'indice NAO. Les données

sont ainsi moyennées à l'échelle des 4 mois pour les trois années, afin d'approximer les conditions atmosphériques des trois hivers. Ainsi, au cours des trois années de mesure télémétrique des rennes sauvages du plateau d'Hardangervidda (Norvège), de 2007 à 2010, l'indice s'échelonne de positif (+0,7) à légèrement négatif (-0,1) jusqu'à un indice NAO fortement négatif (-2,4). Ces valeurs correspondent à trois types de conditions atmosphériques, avec les trois types de temps associés : plus doux et humide que les normales quand l'indice NAO est positif ; températures et précipitations proches des normales si l'indice NAO n'est ni positif, ni négatif ; plus froid et sec comparativement aux normales si cet indice d'oscillation atmosphérique est fortement négatif. La diversité des conditions atmosphériques questionne ainsi sur la résilience du renne face aux effets de l'anomalie NAO sur le climat local, la sévérité de l'hiver et leur réponse biologique vue à travers les localisations des rennes (locomotion, pâturage).

c) Séries temporelles de variabilité climatique

Sur le portail du *Norwegian Meteorological Institute* des séries temporelles climatiques ont également été acquises. Les séries téléchargées concernent en particulier les températures journalières minimales, moyennes et maximales, les hauteurs de précipitation, et les profondeurs de neige. La sélection des mois à télécharger est opérée selon les objectifs de l'étude, soit l'exploration des liens entre localisation des rennes et variabilité climatique en hiver. Nous avons ainsi sélectionné les mois de novembre, décembre, janvier, février de la période étudiée (2007 à 2010). La résolution temporelle de ces données est journalière. Les séries temporelles concernent deux stations météorologiques localisées à une dizaine de kilomètres au nord et à l'est de l'aire vitale annuelle des rennes sauvages du plateau d'Hardangervidda (figure XI.1). Ces deux stations météorologiques se caractérisent par leurs altitudes relativement contrastées pour la région (Høydalsmo, 590m, Rauland, 715m). La première station (Høydalsmo) ne proposant pas de données sur les hauteurs de neige, une deuxième station (Rauland) nous informant des hauteurs de neige locales a été ajoutée au jeu de données.

C - Méthodes

Dans la première phase de travail, nous avons élaboré une carte de l'aire de vie de la population de rennes étudiée, en utilisant la méthode des densités de Kernel¹ (figure XI.1) et nous avons cartographié leurs localisations journalières moyennes pendant toute la période aux différentes saisons (figure XI.2). Dans la deuxième phase de notre étude, une fois les différentes séries temporelles téléchargées et prétraitées, on rassemble toutes les variables dans la base de données statistiques finale. Celle-ci agrège, par mois d'hiver, les données de télémétrie moyennées à l'échelle de l'échantillon de rennes composant la sous-population d'Hardangervidda. Préférant travailler sur l'ensemble de la population, la variabilité individuelle hivernale des localisations n'a pas été prise en compte. Celles-ci sont également moyennées à l'échelle de la journée, tout comme les séries temporelles journalières d'indice NAO et de variables climatiques locales. Les mois des hivers disponibles de 2007 à 2010 (novembre, décembre, janvier, février), représentent l'ensemble des jeux de données traités statistiquement (soit 12 mois au total, correspondant à 361 jours, représentant les individus géostatistiques ici testés).

Un exemple de jeu de données final est présent en tableau XI.2. Les lignes, ou individus statistiques, représentent les journées d'un mois d'hiver (en tableau XI.2, exemple des premières lignes du mois de janvier 2010). Les colonnes rassemblent les variables testées statistiquement entre-elles : par jour, les latitudes, et les longitudes des positions GPS moyennées à l'ensemble des femelles suivies. Pour les variables explicatives testées, celles-ci représentent la valeur journalière de l'indice d'oscillation nord-atlantique, les températures moyennes, minimales et maximales de la station météorologique d'Høydalsmo, et ses cumuls de précipitations ; les cumuls de la station météorologique de Rauland, ainsi que les hauteurs de neige (tableau XI.2).

¹ Pour plus de détails sur cette méthode, voir le chapitre XII.

Tableau XI-2 : Exemple de jeu de données final, à l'échelle inter-mensuelle (ici le mois de janvier 2010). Réalisation R.Courault, 2018

Jour	Moy longitude janvier 2010	Moy latitude janvier 2010	NAO janvier 2010	T°C moy Hoydalsmo Janvier 2010	T°C min Hoydalsmo Janvier 2010	T°C max Hoydalsmo Janvier 2010	Pluies mm Hoydalsmo Janvier 2010	Pluies mm Rautas Janvier 2010	Hauteur neige Rautas Janvier 2010
01/01/2010	415157,929	6606699,72	-442,12	-12,2	-16,6	-10,2	0	0,3	68
02/01/2010	417073,816	6607879,23	-546,96	-18,8	-24	-11,2	0,3	0	68
03/01/2010	416802,679	6607674,13	-564,29	-12,6	-20,8	-8,7	0	0	68
04/01/2010	414377,545	6606889,05	-496	-11,5	-14,9	-6,1	0	0	68
05/01/2010	413756,148	6606355,05	-401,93	-17,8	-24,6	-12,2	0,1	0	68
06/01/2010	413732,966	6605807,18	-343,71	-22,8	-26,2	-12,6	0,1	0	68

Par la suite, les corrélations par rangs de Spearman sont calculées pour vérifier les liens entre les séries temporelles journalières de chacun des mois d'hiver. Les matrices de corrélations résultantes sont enfin résumées en prenant les corrélations significatives entre les facteurs expliqués (latitude, longitude des rennes) et les facteurs explicatifs testés (l'indice de circulation atmosphérique NAO, les données de températures, de précipitations et de hauteurs de neige pour la climatologie locale). Deux échelles temporelles de calcul sont menées : l'échelle de l'intégralité des journées hivernales (365 individus) afin de vérifier les liens statistiques entre variables; et l'échelle comparative des différents mois d'hiver étudiés (+/- 30 individus statistiques par unité temporelle) pour une approche plus contextuelle de la variabilité bioclimatique inter-mensuelle. On décompte le nombre de corrélations significatives et on le rapporte au total des corrélations calculées à l'échelle de l'ensemble de la période hivernale étudiée, puis pour les différents mois composant l'analyse : novembre 2007, 2008, 2009 ; décembre 2007, 2008, 2009 ; janvier 2008, 2009 et 2010 ; février 2008, 2009 et 2010 (tableau XI.1, métadonnées).

D - Résultats

Une première étape consiste à visualiser et analyser l'aire vitale et les localisations des rennes selon les saisons. La figure XI.1 présente la zone d'étude, et l'aire vitale de la population de rennes. Dans cette aire, on observe sur l'image Geoeye des teintes claires dans la partie sud et en bordure nord-est., correspondant aux végétations discontinues des altitudes les plus élevées. Au nord de l'aire vitale, on observe d'est en ouest un dégradé de teintes

allant du beige au vert, suggérant une pente descendante modelée de vallons humides (taches noires allongées et subparallèles), le long de laquelle l'on passe de végétation de pelouses et de landes (en beige) à des végétations de forêts de feuillus et de résineux (en vert et vert-brun) en fond de vallée.

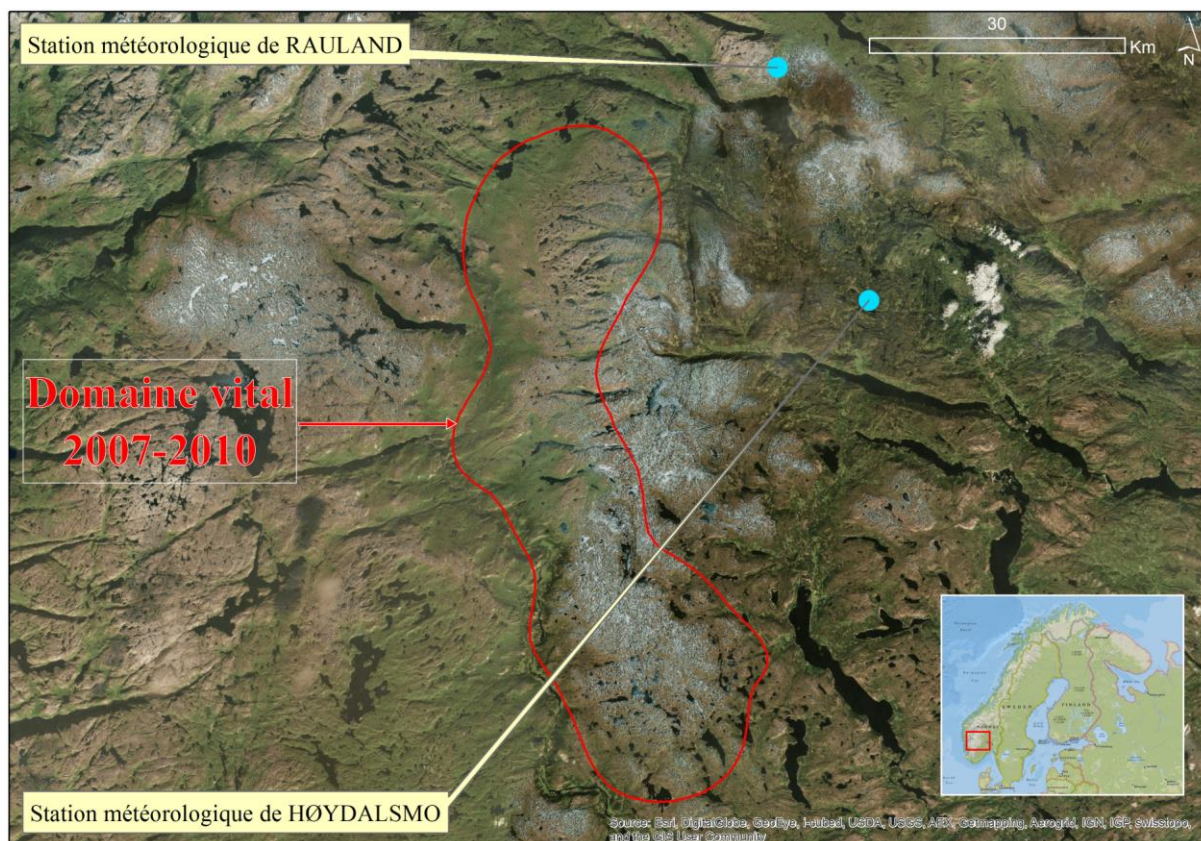


Figure XI-1 : Représentation cartographique du domaine vital d'après les données télémétriques de rennes d'Hardangervidda (calculée par la méthode des densités de Kernel, voir chapitre XII) et localisation des stations météorologiques (Rauland, et Høydalsmo) ; sources : Cagnacci, Focardi et al., 2015 ; NOAA-NCEP ; Réalisation : R. Courault, 2018)

La figure XI.2 présente un échantillon des localisations multiples des individus composant la sous-population de rennes du plateau d'Hardangervidda (Cagnacci, Focardi et al., 2015). Pour l'ensemble des individus équipés, la cartographie présente leur répartition à l'échelle de la période de suivi GPS. Toutes années confondues, la discrétisation en couleurs reprend les localisations hivernale, inter-saisonnières, de fin de printemps et estivales. Une zonation entre ces trois grands découpages de l'année biologique des rennes sauvages est discernable : plutôt au sud pendant le vêlage et l'été, à plus haute altitude, au nord pendant l'hivernage (notamment dans les fonds de vallées couverts de forêts), avec un balancement automnal et printanier entre ces deux pôles.

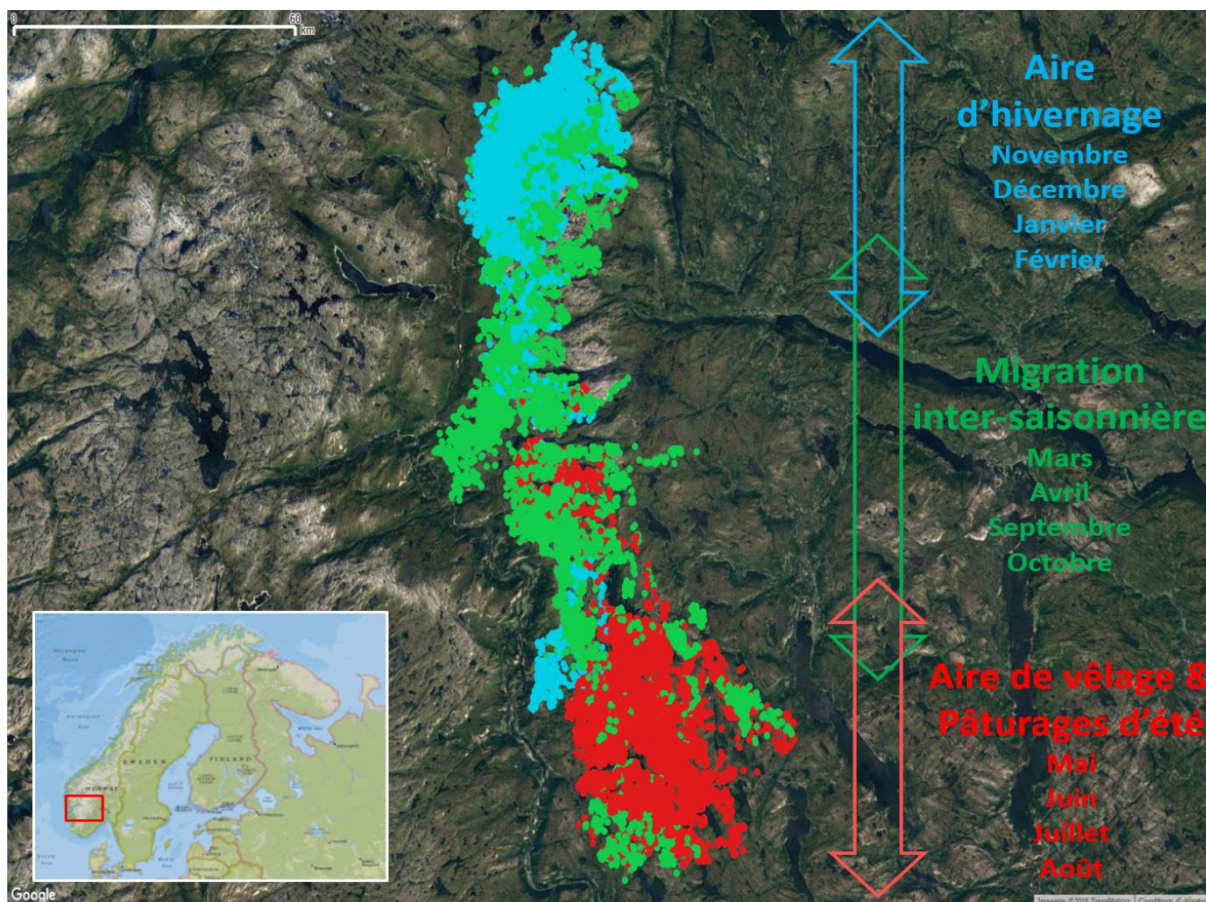


Figure XI-2 : Représentation cartographique ponctuelle et saisonnière des données GPS de rennes sauvages du plateau d'Hardangervidda (Norvège ; source : Cagnacci, Focardi et al. 2016). Réalisation : R. Courault, 2018

Les superficies varient en fonction de la saisonnalité prise en compte : une surface plus ramassée pour l'été, plus extensive pour l'hiver et pour la période de migration inter-saisonnière. Une grande hétérogénéité est notable, représentée ici par le mélange entre les points bleus, verts et rouges, en particulier dans le quadrant sud des traces GPS. Ainsi, les interrogations quant à la variabilité géographique et saisonnière (bioclimatique) de ces localisations sont nombreuses, en particulier en hiver, saison au cours de laquelle nous allons essayer de vérifier le lien entre ces localisations, très variables, et les conditions atmosphériques et climatiques. Les résultats sont présentés dans les sections suivantes pour les deux échelles d'analyse : l'ensemble des données hivernales de 2007 à 2010, tous mois confondus ; et l'échelle des unités temporelles inter-mensuelles (mois hivernaux de l'analyse).

1) Echelle d'analyse de l'ensemble des périodes hivernales

Le tableau XI.3 est une matrice de corrélation de Spearman, calculée entre les différents facteurs expliqués et explicatifs. Les variables de températures moyennes sont issues de la station d'Høydalsmo, tandis que les cumuls de précipitations et les hauteurs de neige proviennent de la station de Rautland.

Tableau XI-3 : Matrice de corrélations par rangs de Spearman, calculée à l'échelle de l'intégralité de la période hivernale d'analyse (365 jours). Les coefficients en gras indiquent une significativité des relations élevée (p-value < 0,05), Réalisation R. Courault (2018)

Variables	longitude	latitude	NAO	Tmean	Pmm	Prof neige
longitude	1	0,361	0,278	0,070	0,137	0,026
latitude	0,361	1	-0,070	0,000	-0,002	0,209
NAO	0,278	-0,070	1	0,462	0,426	-0,127
Tmean	0,070	0,000	0,462	1	0,491	-0,264
Pmm	0,137	-0,002	0,426	0,491	1	0,060
Prof neige	0,026	0,209	-0,127	-0,264	0,060	1

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,05

Les localisations GPS de rennes sauvage sont exprimées en latitude et en longitude. Les longitudes présentent 3 corrélations significatives sur les 5 calculées, tandis que les latitudes seulement deux corrélations. Les longitudes sont significativement corrélées avec les latitudes : plus la longitude est élevée (déplacement vers l'est) plus la latitude (déplacement vers le nord) l'est également. Cette corrélation suggère une orientation générale des mouvements de rennes sauvages légèrement en oblique, du sud-sud-ouest vers le nord-nord-est, que l'on retrouve en particulier au cœur de la saison d'hivernage, où le nombre de traces GPS hivernales rencontrées est le plus important (en bleu sur la figure XI.2). La figure XI.3 résume l'ensemble des relations significatives trouvées entre les variables.

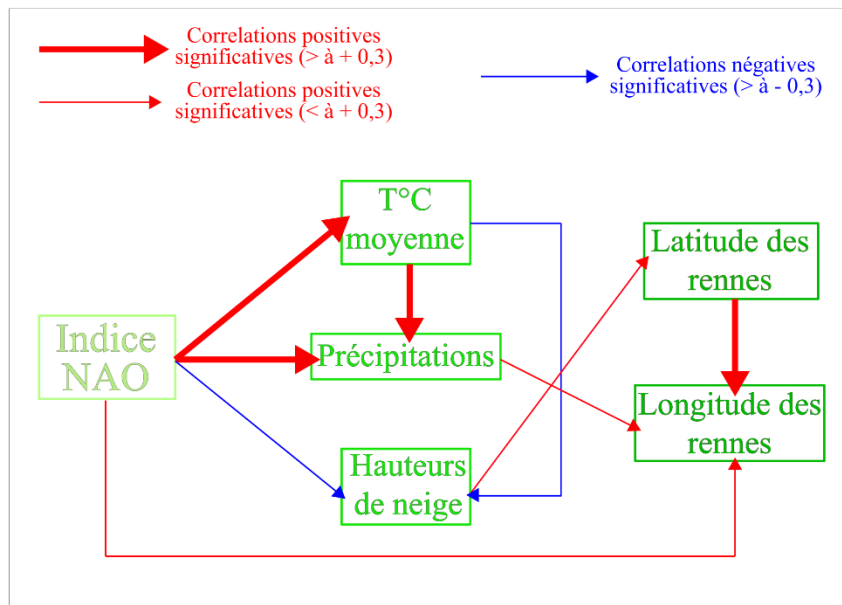


Figure XI-3 : Diagramme des relations statistiques significatives (p -value < 0,05) entre les différentes variables étudiées dans l'analyse à l'échelle de la période hivernale étudiée. Les couleurs indiquent le sens des relations statistiques, l'épaisseur des flèches indique l'intensité de la relation modélisée (trait épais = $r > +0,3$; trait fin = $r < 0,3$; Réalisation R. Courault, 2018)

Les longitudes sont positivement corrélées (+0,278) avec l'indice d'oscillation nord-atlantique. En résumé, plus l'anomalie de l'indice d'oscillation nord-atlantique est positive, plus les trajectoires longitudinales semblent dévier vers l'est de la zone d'étude. Dans ce cas, les rennes semblent préférer les hautes altitudes du plateau (figure XI.1), l'utilisation d'un Modèle Numérique de Terrain et des conditions topographiques confirmerait cette piste explicative fondée sur la photo-interprétation de l'image Geoeye. Il en est de même avec le coefficient, relativement peu solide mais significatif sur le lien entre longitudes et précipitations (figure XI.3). Les facteurs explicatifs se corréleront bien entre eux ($r > 0,4$ entre indice NAO, températures et précipitations ; $r = +0,137$ entre précipitations et longitudes ; $r = +0,278$ entre indice NAO et longitudes). Un indice élevé de NAO est associé à des cumuls de pluie élevés et à des températures douces. Les longitudes étant doublement corrélés positivement avec l'indice NAO et les cumuls de pluie, la chaîne de corrélations semble raisonnablement se confirmer, indiquant un déplacement vers les hauts de versants du plateau, à l'est, lors des épisodes hivernaux doux et pluvieux.

Il existe aussi un lien entre hauteurs de neige et latitudes des positions des rennes, le coefficient de corrélation est de + 0,209. La relation positive et significative indique que plus les hauteurs de neige sont importantes (station de Rautland) plus la position en latitude des rennes sauvages tend à dériver vers le nord de l'aire d'hivernage. La corrélation négative entre NAO et neige est ici relativement faible ($r=-0,127$) mais significative ($p\text{-value} < 0,05$). Elle indique que les indices négatifs de NAO sont associés à des hauteurs de neige importantes. La chaîne de corrélation qui se dessine entre indice NAO, hauteurs de neige, basses températures et position des rennes en latitude semble indiquer que les phases négatives de NAO, associées à des précipitations neigeuses plus importantes par temps froid, amèneraient les rennes sauvages à remonter vers le nord quand ce type de temps se manifeste. Malgré tout, l'indice NAO n'est pas significativement corrélé aux latitudes. La chaîne de corrélations n'est donc pas aussi marquée que les liens entre NAO-précipitations-longitude des rennes.

2) Analyse à l'échelle inter-mensuelle

Le tableau XI.4 résume, par mois et pour l'ensemble des mois d'hiver, le ratio exprimé en pourcentage entre le nombre de corrélations par rangs de Spearman significatifs ($p\text{-values} < 0,05$) et le total des corrélations calculées (14 par mois * 12 mois de l'étude, soit 168). Les corrélations décomptées concernent les liens entre position du troupeau en latitudes et longitudes et les facteurs explicatifs. Elles ont été calculées d'après les données journalières des 12 mois étudiés (28 à 31 jours). Les déplacements hivernaux des rennes en latitude et en longitude répondent statistiquement à la variabilité atmosphérique et climatique. Au total, 41,1 % des corrélations sont significatives pour l'ensemble des calculs (168). Toutefois, les pourcentages pour chaque mois (calculés sur une base de 14 corrélations) sont très variables, allant de 7,1 % (décembre 2008) à 78,6 % (décembre 2009), sans que l'on puisse identifier de tendance. En particulier à l'échelle inter-mensuelle, où les résultats diffèrent grandement. Pour l'échelle interannuelle, le nombre d'années reste trop peu important pour pouvoir en qualifier la variabilité.

Tableau XI-4 : Pourcentages de corrélations significatives (p-value <0,05) sur le total des corrélations calculées, entre latitude et longitude et facteurs explicatifs, par mois. Ces chiffres ne prennent pas en compte l'intensité des relations statistiques (r) ni le sens de la relation (positive, négative). Réalisation, R. Courault (2018)

nov-07	nov-08	nov-09
50,0	21,4	57,1
déc-07	déc-08	déc-09
57,1	7,1	78,6
janv-08	janv-09	janv-10
21,4	64,3	35,7
févr-08	févr-09	févr-10
14,3	57,1	28,6
Total		
41,1		

Dans le but de comparer les résultats entre variables atmosphériques et variables climatiques locales, les dénombrements de coefficients significatifs ont été effectués en séparant ceux concernant les liens entre localisation des rennes (latitude et longitude) et indice d'oscillation nord-atlantique (colonnes de gauche, sous chaque mois de la tableau XI.5) et les variables climatiques toutes confondues (températures, précipitations, hauteurs de neige, colonnes de droite, sous chaque mois, tableau XI.5). Au total, l'indice d'oscillation nord-atlantique représente une fréquence de corrélations significatives de 54,2% alors que les variables climatiques présentent un score moindre, de 38,9%. Novembre et décembre sont les mois participant le plus aux liens entre oscillation nord-atlantique et variabilité géographique des traces GPS de rennes semi-domestiques, contrairement à février. Ceci dit, les plus hauts pourcentages de corrélations significatives sont trouvés en janvier et en février pour les variables climatologiques locales. Pour finir, un examen attentif des séries temporelles montre que les mois présentant des indices les plus élevés de NAO (décembre 2007, janvier et février 2008 : +0,77) se caractérisent par des écarts-types des valeurs de latitude et longitude relativement plus élevés comparativement aux mois d'hiver à situation atmosphérique sans anomalie de NAO (hiver 2008-2009), ou même des mois d'hiver avec une anomalie négative de NAO (hiver 2009-2010).

Tableau XI-5 : Pourcentages de relations significatives (sur le total des corrélations calculées) entre latitude et longitude des rennes et l'indice NAO (colonne gauche de chaque mois et au total de tous les mois) ; latitude et longitude des rennes et variables climatiques locales d'autre part (colonne droite de chaque mois et au total de tous les mois), Réalisation R. Courault (2018)

nov-07		nov-08		nov-09	
50,0	50,0	100,0	8,3	100,0	50,0
déc-07		déc-08		déc-09	
100,0	50,0	0,0	8,3	100,0	75,0
janv-08		janv-09		janv-10	
50,0	16,7	50,0	66,7	50,0	33,3
févr-08		févr-09		févr-10	
0,0	16,7	50,0	58,3	0,0	33,3
Total					
54,2			38,9		

Le tableau XI.6 récapitule le pourcentage de corrélations significatives entre la localisation des rennes (latitudes et longitudes) et les différentes variables climatiques locales : températures minimales, moyennes et maximales (station météorologique d'Høydalsmo) ainsi que les précipitations et les hauteurs de neige pour la station de Rautland. Le nombre total de corrélations est de 120. Les variables climatiques locales ayant le plus de corrélations significatives sont les hauteurs de neige (54,2%) et les températures moyennes (41,7%).

Tableau XI-6 : Pourcentages de relations significatives (sur le total des corrélations calculées) entre latitude et longitude des rennes sauvages et variables climatiques locales. Réalisation R. Courault, 2018

Tmoy (°C)	41,7
Tmin (°C)	37,5
Tmax (°C)	33,3
Pluies (mm)	33,3
Neige (mm)	54,2

Le tableau XI.7 détaille le nombre de corrélations significatives, positives ou négatives, entre les coordonnées géographiques et les variables atmosphériques et climatiques, d'après les coefficients de corrélations calculés sur les jours de 14 mois pour chaque couple de variables.

Tableau XI.7 : Nombre de corrélations significatives entre les coordonnées géographiques de localisation des rennes et les variables atmosphériques et climatiques, par mois. Source : Courault et al., EGU 2017

Sens de la corrélation significative avec la latitude et la longitude	Variables atmosphériques et climatiques					
	NAO	T° moy	T ° min	T ° max	Pmm	Neige (Hmm)
positif_latitude	1	1	2	4	0	3
positif_longitude	4	2	1	1	4	1
négatif_latitude	5	4	5	3	11	4
négatif_longitude	3	2	1	2	0	5

Les corrélations significativement négatives sont plus fréquentes que les corrélations significativement positives entre latitude, NAO, températures moyennes et précipitations. Les rennes se déplacent plutôt vers le Nord lorsque l’anomalie de circulation est négative (5 corrélations négatives/1 positive), les températures moyennes sont froides (4 corrélations négatives/1 positive) et surtout lorsque les précipitations liquides sont peu abondantes (11 corrélations négatives/0 positives). Les résultats sont moins nets concernant la longitude. On remarque toutefois que les corrélations significatives entre la longitude et les pluies sont toujours positives, bien que peu fréquentes (4 positives/0 négatives) et que les corrélations entre longitude et épaisseur de neige sont plus souvent négatives (5) que positives (1), bien que là aussi peu fréquentes. Cela suggère une tendance à une migration partielle vers l’ouest en cas de temps neigeux et au contraire vers l’est en cas de temps pluvieux. D’après le test de Fisher, il n’y a pas de relation significative d’ensemble entre le sens des corrélations significatives liant latitude et longitude avec les variables atmosphériques et climatiques ($p=0,06$). En revanche quelques combinaisons de variables sont significativement ($p<0,05$) surreprésentées (corrélation négative significative entre latitude et pluies) ou sous-représentées (corrélation positive significative entre latitude et pluies, et corrélation négative significative entre longitude et pluies). Cela confirme que les rennes se déplacent vers nord lorsque les pluies sont peu abondantes et qu’ils se déplacent plutôt vers l’est par temps pluvieux.

E - Discussion, conclusion et perspectives

Les corrélations observées entre les coordonnées géographiques et les données climatiques suggèrent que les rennes opèrent leurs migrations partielles hivernales en latitude dans la même direction que leurs migrations saisonnières. Lorsque l’on analyse l’ensemble de

la période, en « lissant » l'irrégularité climatique entre les mois et les années, les résultats suggèrent que les rennes se déplacent vers le nord lorsque le temps est neigeux, paramètre corrélé avec des températures froides et une anomalie de circulation négative. Lorsque l'on analyse séparément les 14 mois de la période étudiée, ce déplacement vers le nord est très significativement lié avec la faiblesse des précipitations. Les migrations partielles hivernales semblent donc bien mimer les migrations saisonnières, en étant déclenchées par un temps froid, et sec ou neigeux, même si ce type d'anomalie et de temps semblent être de moins en moins fréquent avec le changement climatique actuel (chapitre III). Ce constat n'a pas été retrouvé dans la littérature en l'état actuel des connaissances (Hansen, Aanes et al., 2010 ; Nellemann, Vistnes et al., 2001).

Toutefois, une interrogation subsiste sur le lien entre phases négatives de NAO et hauteurs de neige, étant donné que la littérature indique en général des relations positives entre les deux : les cumuls importants de neige sont généralement observés quand la NAO hivernale est positive ; à l'inverse une phase négative de la NAO d'hiver est plutôt rattachée à un type de temps anticyclonique, froid et sec, semblant peu propice aux chutes de neige (Ottersen, Planque et al., 2001 ; Uvo, Berndtsson et al., 2002 ; Scaife, Knight et al., 2005). A ce titre, les résultats obtenus sur l'analyse par mois sont davantage en cohérence avec la littérature.

D'après les résultats obtenus sur l'ensemble de la période, lorsque l'indice NAO présente une anomalie positive et que le temps est doux et pluvieux, les rennes se déplacent vers l'est, vers des zones plus en altitude. L'analyse mensuelle confirme uniquement la relation entre hauteur des précipitations et déplacement vers l'est. Cela suggère que les rennes recherchent des secteurs plus pentus, avec une épaisseur de neige moindre, ou encore pour éviter les problèmes de fonte-regel qui compliquent l'accès aux lichens sous-jacents. Ces phénomènes météorologiques se produisent lors de périodes douces et pluvieuses avec des gels nocturnes, comme cela a notamment été décrit à propos des rennes semi-domestiques (voir chapitre 1). Ces conditions atmosphériques et climatiques ayant tendance à être de plus en plus fréquentes avec le changement climatique (chapitre 3), ces déplacements coûteux en énergie pour le renne sauvage (montée en altitude), contribuent à l'affaiblir, ce qui questionne la résilience de l'ongulé face au changement climatique. Comme attendu, les anomalies positives de l'oscillation nord-atlantique sont fortement corrélées avec des conditions météorologiques plus douces et plus humides que les normales.

Nos résultats ont donc montré une relation assez nette entre les déplacements des rennes et les variables climatiques et atmosphériques. Les résultats sont toutefois très variables selon les mois et les saisons hivernales, suggérant que certains mois, des variations climatiques de faible ampleur ne déclenchent pas de déplacements importants. Le rôle plus important des indices atmosphériques sur les localisations des rennes en début d'hiver suggère que leurs migrations partielles sont déclenchées par des situations météorologiques générales, d'échelle régionale. Au contraire, en fin d'hiver, l'importance accrue des variables climatiques locales suggère que des changements de conditions locales suscitent des migrations partielles. Ce constat semble rejoindre les conclusions de Pape & Löffler sur la variabilité des modes migratoires répondant à celles des conditions bioclimatiques saisonnières (froid, neige). La faible mobilité des rennes en hiver, et l'épuisement progressif de leurs réserves en graisse l'aggravant en fin de saison, expliqueraient peut-être cette plus forte sensibilité aux conditions locales qu'en début d'hiver (Weladji, Klein, et al., 2002).

Une analyse plus fine des jeux de données, incluant également la topographie et les catégories d'habitats écologiques reprise sur une méthodologie d'analyse statistique multivariée (Analyse en Composante Principale), telle que celle opérée par Pape & Löffler à l'échelle annuelle du cycle biologique des rennes semi-domestiques de Filefjell Reinlag (centre de la Norvège), permettrait d'améliorer les résultats ci-présents pour la sous-population de rennes sauvages d'Hardangervidda et leur comportement migratoire en hiver. La méthodologie présentée liant la position des rennes en latitude et en longitude avec des variables atmosphériques et climatiques mériterait aussi d'être testée à échelle régionale. La faible durée de la période d'étude (3 hivers de 2007 à 2010) ne nous autorise qu'à des conclusions partielles sur les liens entre variabilité atmosphérique, climatique et biogéographique. Des données télémétriques collectées sur des périodes de temps plus longues permettraient ainsi de vérifier ces premiers résultats. Du point de vue de l'écologie spatiale, l'inclusion d'autres sous-populations de rennes sauvages norvégiens ainsi que celles des populations de rennes semi-domestiques équipées, et pourquoi pas les données télémétriques d'autres cervidés, nous autoriserait à asseoir la méthodologie plus fermement, et à mieux comprendre les facteurs structurant les déplacements des herbivores à l'aune du changement bioclimatique actuel.

Transition entre le chapitre XI et le chapitre XII :

L'analyse du rôle des conditions climatiques sur les déplacements des rennes en hiver puis à la belle saison permettent d'estimer la résilience de l'ongulé face au effets du changement climatique. Nous avons ainsi pris en compte la saison hivernale, dont les variabilité atmosphériques et climatiques structurent de façon générale les écosystèmes subarctiques froids, et a fortiori l'écologie des Rennes de Scandinavie.

Comme nous l'avons vu, sa capacité de migration à grande échelle semble être un atout important, dans le contexte de changements atmosphériques (anomalies positives de NAO plus fréquentes) et climatiques (températures plus douces, chutes de neige plus importantes) tendanciels et interannuels, tels que nous avons pu les décrire dans le chapitre XI.

Le chapitre suivant traitera de la variabilité annuelle, saisonnière et interannuelle des mouvements migratoires des rennes sauvages, à travers l'étude des domaines vitaux bimensuels et la densité des rennes, ainsi que leurs liens avec des données géographiques statiques (altitudes, habitats écologiques) et dynamiques (variabilité de l'indice NDVI-MODIS).

XII - Variabilité bioclimatique récente et migration des rennes sauvages du plateau d'Hardangervidda (Norvège)¹

A - Introduction

Après avoir examiné les structures migratoires hivernales pour les rennes sauvages équipés de GPS dans le chapitre précédent, ce chapitre traite de la variabilité bioclimatique récente, représentée par l'étude des choix d'habitats par aire vitale et les liens entre densités de rennes estimées et la variabilité phénologique des végétaux chlorophylliens. Le suivi et la compréhension de la migration partielle des rennes, représentée ici par l'évolution des aires vitales bimensuelles au long de la période d'étude, et l'estimation des densités de rennes pour des situations phénologiques relativement différenciées est importante, étant donné le constat de baisse démographique particulièrement important touchant cette sous-population de rennes sauvages. Les effectifs de rennes sont en effet ont été divisés par sept entre le début des années 70 et le milieu des années 2010 (Uboni et al., 2016). Avec les sous-populations de Rondane et de Snøhetta, ces trois îles biogéographiques pourraient représenter une ressource génétique particulièrement utile, contribuant à la résilience des rennes scandinaves semi-domestiques au changement climatique et aux paysages naturels et culturels adossés au Renne. Ainsi, il est important d'améliorer notre compréhension des migrations de l'ongulé *capital-breeder* pendant la période de croissance des végétaux qu'il est susceptible de pâturer, ainsi qu'au cours de périodes critiques de son cycle biologique : réponse à la fonte des neiges printanière, période de vêlage et période d'accumulation des masses graisseuses à la fin de l'été (Klein, 1990; Skarin et al. 2008).

Nos hypothèses sont les suivantes: *Rangifer tarandus tarandus* L. a un comportement saisonnier lui permettant de choisir différents habitats écologiques selon le moment clé de son cycle biologique au cours de la saison de croissance végétative (Skarin, 2008). Les densités estimées les plus fortes dépendent de conditions bioclimatiques marquées au cours de sa migration, et sur des descripteurs géographiques précis, tels que la topographie et les habitats

¹ Ce chapitre traduit et adapte une communication publiée en anglais. Courault R., Franclet A., Bourrand K., Bilodeau C., Said S., et al.. "Recent vegetation phenology variability and wild reindeer migration in Hardangervidda plateau (Norway)". *28th International Cartographic Conference*, Jul 2017, Washington, United States. ICC 2017 proceedings.

(Klein, 1990). La gestion de jeux de données fusionnés, ici représentée par la spatialisation de relations statistiques entre biocénose et biotope, permettrait d'améliorer les boîtes à outils géomatiques existantes tout comme notre compréhension des interactions de *Rangifer tarandus tarandus* avec son environnement. L'étude cherche à présenter une toolbox géomatique, "GRiD", qui combine des outils préexistants dans les versions actuelles des logiciels tels que ArcMap et QuantumGis, le tout dans une étude multi-scalaire des domaines vitaux de *Rangifer tarandus*.

B - *Matériel et méthodes*

1) **Matériel**

Les jeux de données de l'étude sont disponibles en accès-libre. Décrits dans le tableau XII.1, ceux-ci sont compilés, fusionnés et analysés. Le téléchargement des jeux de données représente la première étape (liens URL dans la table XII.1).

Le premier jeu de données concerne les traces GPS des rennes sauvages du plateau d'Hardangervidda utilisés par Cagnacci, Focardi et al. (2015) pour évaluer et caractériser les temps de résidence des plus grands herbivores européens, les aires vitales associées ainsi que l'identification des structures géographiques et temporelles de migrations. Sept rennes sauvages femelles ont été équipés et suivis via l'utilisation de colliers GPS. Le deuxième jeu de données est le MNT ASTER-GDEM, fournissant les altitudes et d'autres informations topographiques (inclinaison et orientation des pentes). Le troisième jeu de données attrait aux températures moyennes annuelles interpolées en résolution spatiale fine du *Global Historical Climatological Network* (Hijmans et al., 2005). La cartographie des habitats et occupation des sols Corine Land Cover représente le quatrième jeu de données. A l'échelle européenne élargie, le programme Corine mobilise les Ministères de l'Environnement pour sectoriser les habitats écologiques et l'occupation humaine des sols en s'appuyant sur l'interprétation d'images satellite et les observations issues de missions de photographie aérienne. Les jeux de données Corine Land Cover sont disponibles pour 1990, 2000, 2006 et 2012. Dans notre cas, l'édition 2006 est utilisée pour convenir temporellement avec la période de suivi des rennes par GPS (2007-2010). Le dernier jeu de données est représenté par les séries temporelles MODIS 13Q1. L'acquisition de ces séries temporelles s'est portée sur le jeu de données bimensuel, s'étalant du début de l'année 2000 à la fin de 2015. Les dates d'acquisition de chaque image sont exprimées en jours juliens. Les tuiles MODIS acquises s'étendent

originellement à l'échelle de la Scandinavie, pour une résolution de 250m. Etant donné le format *.HDR des données téléchargées permettant l'acquisition de plusieurs sous-canaux, le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) a été choisi, puis ce sous-canal a été converti en un fichier au format GéoTiff, pour chaque acquisition bi-mensuelle de 2000 à 2015.

Tableau XII-1: Jeux de données étudiés et métadonnées associées (Réalisation R. Courault)

Types de jeux de données	Variable échantillonnée	Source	Période	Extension géographique	Résolution temporelle	Résolution spatiale	Unité de mesure et type de variable	Système géodésique entrant
Traces GPS des rennes sauvages	Estimation des densités de rennes par Kernel (KUD)	http://datadryad.org/resource/doi:10.5061/dryad.rg0v3	20/3/2007 - 15/2/2010	> 100 km ² , plateau d'Hardanger vidda (Norvège)	3 heures	mètre	-	WGS84-UTM32N
Modèle Numérique de Terrain	Altitudes, Inclinaison, Exposition	http://www.eea.europa.eu/	-	Monde, tuiles	-	30 mètres	Mètres, degrés	ETRS 89
Températures annuelles	Température annuelle	www.worldclim.org	1960-1990	Monde	Tri-décennale	900 mètres	Degrés Celsius	WGS 84
Habitats écologiques	Classes d'habitats Corine Land Cover	http://www.eea.europa.eu/	2006	Europe élargie	1990-2000-2006-2012	100 mètres	Catégories	ETRS 89
Phénologie de la végétation	MODIS 13Q1-NDVI, saison de croissance 2007-2009	https://earthexplorer.usgs.gov/	2000-2015	Monde, tuiles	Bi-mensuel	250 mètres	Indice NDVI	Polar sinusoidal

2) Méthodes: définition des unités spatiales, extraction des valeurs et analyse statistique

Des logiciels différents sont utilisés dans la présente étude, selon l'étape de traitement (ou de prétraitement). En premier lieu, nous avons utilisé les logiciels de SIG tels que ArcMap 10.2 et QuantumGIS 2.18 à la fois pour les prétraitements et les traitements. Par la suite, R-Studio et le package ADE-Habitat-HR (HR pour *Home ranges*; Callenge, 2006) nous a permis de calculer les aires vitales des rennes, en utilisant la technique dite *Kernel Utilization Density*, sur une base bimensuelle. Par la suite, les aires vitales bimensuelles ont été exportées dans des fichiers *shape* séparés. Ces aires vitales et la quantification de densité des rennes qui y est associée constitue l'entrée essentielle pour la génération de nouveaux jeux de données incluant les variables bio-géo-physiques. Les tableurs ordinaires, tels que Open Calc 4.1.3 ou Office Excel 2016 sont utilisés tout au long de l'étude. Pour l'analyse statistique, les logiciels R et Xlstats peuvent être utilisés indifféremment. Ici, Xlstat a été privilégié.

L'approche générale nécessite de définir les unités spatiales et temporelles pour comparer et analyser les interactions faune-environnement. Dans cette étude, nos unités sont représentées par les aires vitales bimensuelles au cours de la période de croissance des formations végétales (avril à août) durant laquelle les traces GPS de rennes ont pu avoir été enregistrées (2007 à 2010). La résolution spatiale et temporelle reste ici contrainte par la précision de MODIS 13Q1, même si la boîte à outils GRiD permet de faire varier la résolution spatiale d'échantillonnage dans ses paramètres.

a) Suivre l'évolution des aires vitales des rennes sauvages du Plateau d'Hardangervidda (Norvège).

A l'échelle de la sous-population équipée de colliers GPS (sept individus), les traces GPS ont été triées par quinzaine de jours et exportées en format tabulaire (*.CSV). Les données ont été triées en deux sous-ensembles. Le premier tri agrège les traces GPS pendant l'intégralité de la période d'acquisition des données télémétriques (2007-2010) et représente la variabilité saisonnière de la saison de croissance végétative (deux aires vitales par mois, d'avril à août, de 2007 à 2009, totalisant 15 fichiers). Le second tri s'intéresse à la variabilité

interannuelle des 10 aires vitales bimensuelles au cours des trois années du suivi (2007, 2008 et 2010), donnant 30 fichiers.

Les traces GPS sont ainsi prêtes pour l'estimation des répartitions de rennes par quinzaine. Le package R - ADE Habitats HR (Callenge, 2006) est utilisé pour calculer les *Kernel Utilization Distribution* (KUD) pour chaque quinzaine. La technique dite "*bivariate normal kernel*" est spécifiée, tout comme le paramètre de lissage calculé "ad-hoc" (Worton 1989; Skarin et al., 2008). La taille de maille (~100m²) et l'extension (*h-value* pour les densités estimées; 1km²) sont également spécifiées pour correspondre avec les caractéristiques de migration à large échelle des rennes. Les enveloppes convexes qui en résultent ont été par la suite vectorisées, avec 95% de l'extension de l'aire en tant que limite. Les jeux de données sont ensuite exportés puis convertis, respectivement en raster GeoTIFF pour les densités de rennes dites *Kernel Utilization Densities*, et en format shapefile (*.shp) pour les enveloppes convexes. Finalement, une grille est générée, puis le géo-traitement "Intersection" est appliqué pour chaque enveloppe convexe, avant d'échantillonner les descripteurs bio-géophysiques.

b) Boîte à outils GRiD: conceptualisation sur ModelBuilder (ArcMap) et programmation Python (Qgis)

La figure XII.1 résume la chaîne de traitement qu'utilise GRiD (*Grid Raster Information Dataset*). Deux prototypes de GRiD sont disponibles, même si des améliorations sont toujours en cours. Ici, la solution via le *Modeluilder* d'ArcMap est préférée, mais la boîte à outils GRiD pour Quantum GIS est prête à être utilisée pour la troisième et la quatrième étape, montrée en figure XII.1. Selon les buts de l'étude, les trois premières étapes sont flexibles et interchangeables dans la chaîne de traitements.

Une étape clé représente la définition d'une projection commune pour minimiser l'erreur géométrique, puis statistique, entre les jeux de données. La projection WGS84-UTM32N est ici choisie, car initialement utilisée pour les traces GPS des rennes sauvages. Après avoir re-projeté chaque jeu de données, une grille d'échelle régionale est générée, basée sur l'extension et la résolution spatiale (250m) des tuiles MODIS 13Q1 étudiées.

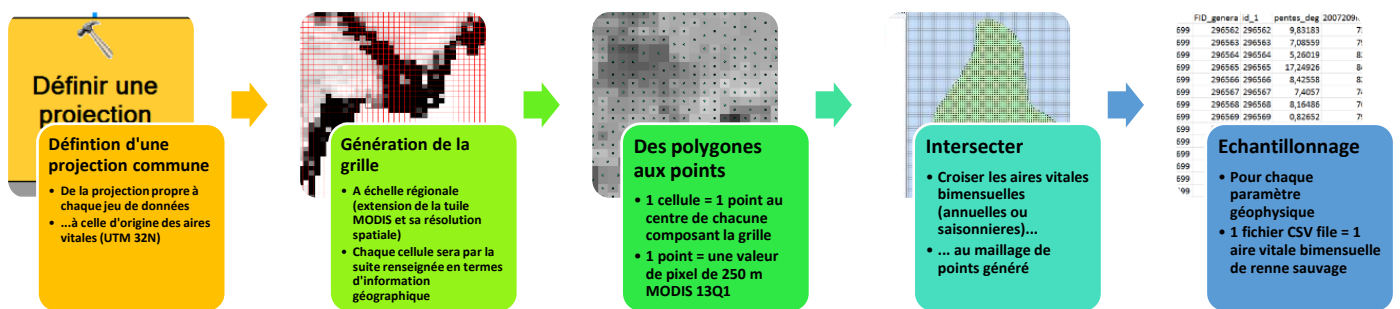


Figure XII-1: Modèle conceptuel de traitement des données par la boîte à outils GRiD, utilisant ici le ModelBuilder d'ArcMap 10.2 (Réalisation R. Courault, 2017)

Chaque cellule est théoriquement supposée reprendre le maillage des données matricielles brutes MODIS 13Q1, et ainsi la répartition exacte des données multi-temporelles NDVI. L'étape 3 prépare l'échantillonnage et convertit les cellules en points central de chacune des cellules. Le maillage qui en résulte a toujours une extension régionale, telle que la grille basique obtenue à l'étape 2. Les aires vitales générées bimensuellement à partir des traces GPS de rennes sauvages sont ainsi placées dans la chaîne de traitement pour intersecter le maillage régional des prescripteurs bio-géo-physiques étudiés. En sortie, chaque produit intersecté donne une unité spatiale différente pour chaque aire vitale bimensuelle, à laquelle chaque descripteur aura été ajouté par la suite.

La dernière étape est cruciale: les jeux de données raster sont échantillonnés et les tables attributaires en résultant sont exportées en fichiers CSV. A l'échelle de chaque unité spatiale d'analyse (les aires vitales bimensuelles du troupeau de rennes), chaque matrice CSV comporte un certain nombre de lignes correspondant à chaque point de maille échantillonné, assorti aux caractères bio-géo-physiques (colonnes) que l'on souhaite statistiquement récapituler, ou tester. Chaque observation (ligne) est ainsi un pixel contenu dans une aire

vitale préalablement calculée. Ces observations géostatistiques sont maintenant caractérisées par une valeur spécifique, à la fois pour les facteurs biotiques (densités de rennes estimées, NDVI, etc) et les facteurs abiotiques (habitats CLC sans végétation, topographie) et sont prêts à être analysés.

c) Traitements statistiques: validation des grilles générée et suppression des facteurs redondants pour les caractères bio-géophysiques étudiés

Vérification des correspondances entre les jeux de données bruts et les jeux de données échantillonnés

Nous quantifions ici la potentielle perte d'information spatiale induite par la mise à l'échelle forcée des jeux de données bio-géo-physiques sur la résolution spatiale de MODIS 13Q1 (250m). Dans cette étude, la comparaison sera faite entre la cartographie brute de Corine Land Cover (caractérisée par une résolution spatiale de 100m²) et le nouveau jeu de données Corine Land Cover extrait en utilisant la boîte à outils GRiD (250m²). L'analyse implique le calcul des erreurs partielles et totales entre les jeux de données CLC bruts et échantillonnés. Un seuil de 5% d'erreur total est ici retenu.

Suppression des facteurs bio-géo-physiques spatialement auto-corrélés

Le but est ici de supprimer les facteurs géophysiques qui pourraient être redondants statistiquement dans l'analyse impliquant les aires vitales de rennes, les densités de rennes estimées et les autres facteurs explicatifs évoqués. A l'échelle de l'une des aires vitales les plus étendue (deuxième moitié d'avril 2007-2009), les valeurs quantitatives continues (températures annuelles, altitudes, inclinaison et orientation des pentes, NDVI) sont testées à l'aide des coefficients de corrélation de Pearson. Une corrélation de 0.8 est retenue pour l'intensité et la significativité de la relation, nous autorisant à supprimer les facteurs éventuellement redondants.

d) Traitement statistique à l'échelle d'analyse intra-annuelle

Caractériser la variabilité saisonnière des habitats écologiques sélectionnés

Pour la caractérisation de la variabilité inter-saisonnière des habitats écologiques, nous avons rattaché l'appartenance de chaque pixel d'analyse à une classe d'habitat CLC pour chaque aire vitale. La somme de pixels par classe d'habitat CLC nous permet de comparer leurs superficies (en nombre de pixels de 250m², ou en relativisant en pourcentages) entre les aires vitales saisonnières, agrégées au cours de la période entière d'étude. Les résumés statistiques et représentations graphiques associées pour chaque aire vitale sont ensuite récapitulées par habitats écologiques répertoriés au sein de chaque aire vitale bimensuelle. Un test du Khi² est ainsi appliqué pour vérifier l'indépendance entre la quinzaine de mois considérée et le nombre de pixels dénombrés par catégorie d'habitat écologique Corine Land Cover.

Variabilité interannuelle des conditions bioclimatiques: choix d'années particulièrement différentes pour la migration printanière, l'aire de vèlage et l'aire d'accumulation des masses graisseuses

Lors de l'extraction des séries temporelles MODIS - NDVI pour les aires vitales annuelles, nous avons pris soin d'échantillonner les trois quinzaines, exprimées sur les données MODIS en Jours Juliens, de chaque quinzaine considérée entre 2007, 2008 et 2009. Cela donne trois séries temporelles MODIS-NDVI (colonnes) par aire vitale bimensuelle. Par exemple, l'extraction des données NDVI pour la première quinzaine d'avril se compose du 97^{ème} jour julien de 2007, 2008 et 2009. Trois colonnes, correspondant aux trois quinzaines des trois quinzaines d'avril de période d'étude sont ainsi présentes en sortie de la table attributaire, dont l'échantillon global a été fait à l'échelle de l'aire vitale correspondante.

Par la suite on vérifie à l'aide du test de Kruskal-Wallis l'indépendance statistique dans la distribution statistique de ces trois quinzaines, nous permettant de sélectionner des quinzaines particulièrement normales, ou anormales à l'échelle de la variabilité NDVI de la période étudiée. Le test d'indépendance de distribution de Kruskal-Wallis est basé sur la médiane des distributions par rangs automatiquement générée. Il permet de sélectionner deux différents années du point de vue de leur variation interannuelle de NDVI.

e) Traitements statistiques à l'échelle interannuelle: aires vitales bimensuelles spécifiques

Test des relations entre facteurs biotiques (densités de rennes estimées) et facteurs abiotiques

Les aires de vêlages bimensuelles contextuelles sélectionnées correspondent à trois moments importants dans la biologie annuelle des rennes: descente dans les pâturages d'été (première quinzaine d'avril); vêlage (deuxième quinzaine de mai); ratio énergétique excédentaire et accumulation des graisses (deuxième quinzaine de juillet). Pour ces aires vitales particulières, les relations statistiques ont été traitées entre les densités estimées et les autres descripteurs bio-géo-physiques extraits (altitudes, inclinaison et orientation des pentes, NDVI). Dans ce cas, les corrélations de Spearman sont préférées pour la mise en relation. Selon la table des significativités de Spearman, avec un seuil de confiance de 95% et un nombre d'observations supérieur à 100, le seuil de significativité correspondant doit être inférieur à 0.197.

Différences des choix d'habitats

Nous comparons la répartition géographique des valeurs de NDVI et les densités estimées de rennes pour une aire vitale bimensuelle donnée. On cherche ici à vérifier les similarités (ou au contraire les dissimilarités) entre ces deux distributions géographiques. Les tests d'indépendance de Kruskal-Wallis sont opérés en utilisant les catégories d'habitats Corine Land Cover en sous-échantillons. Les catégories d'habitats écologiques divisent les estimations de densité de rennes aussi bien que les valeurs de NDVI en autant d'habitats caractérisant chacune des observations/pixels échantillonné.

C - Résultats

1) La forte précision spatiale de l'utilisation de la boîte à outils GRiD

Le tableau XII.2 compare les pourcentages d'occupation des sols et d'habitats écologiques Corine Land Cover (première ligne, tableau XII.2) selon leur résolution spatiale au sein de l'une des aires vitales les plus étendue (deuxième quinzaine d'avril; soit 17 236 pixels/cellules; ~4309 km²). Des pourcentages similaires peuvent être trouvés pour le jeu de données brut (troisième ligne) comparé aux pourcentages du jeu de données extrait en

utilisant la boîte à outils Python GRiD. La dernière ligne soustrait la différence entre les pourcentages extraits via GRiD et les pourcentages du jeu de données Corine Land Cover brut. Chaque erreur comptabilisée a été ajoutée aux pourcentages d'erreur totale, soit 0.59%. Proche des 99.4% de représentativité, la méthode d'extraction via la boîte à outils Python GRiD montre des résultats convenables, en particulier pour le jeu de données Corine Land Cover.

Tableau XII-2: Erreur cumulée, en pourcentages, entre le jeu de données Corine Land Cover brut (résolution spatiale de 100m²) et le jeu de données extrait par la boîte à outils GRiD (résolution spatiale de 250 m²), pour la deuxième quinzaine d'avril (Réalisation R. Courault 2017)

% de superficie totale pour chacune des classes d'habitat présente pour le Corine Land Cover brut															
Tissu urbain discontinu (2)	Équipements sportifs ou de loisirs(11)	Terres arables non-irriguées (12)	Systèmes culturaux et parcellaires complexes (20)	Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants (21)	Forêts de feuillus (23)	Forêts de conifères (24)	Forêts mélangées(25)	Landes et bruyères(27)	Forêt et végétation arbustive en mutation (29)	Plages, dunes et sable (31)	Végétation clair-semée (32)	Tourbières (36)	Cours d'eau (40)	Plans d'eau (41)	Total
0.04	0.05	0.07	0.30	0.77	16.51	9.49	5.80	38.96	0.55	0.24	15.14	5.45	0.02	6.60	100
% % de superficie totale pour chacune des classes d'habitat présente pour le Corine Land Cover échantillonné par GRiD															
0.04	0.04	0.08	0.32	0.75	16.40	9.41	5.84	39.16	0.57	0.24	15.14	5.44	0.04	6.54	100
Erreur cumulée pour chaque classe d'habitat, et erreur totale cumulée															
0	0.01	0.01	0.01	0.02	0.11	0.08	0.03	0.2	0.03	0	0	0	0.02	0.07	0.6

Ceci dit, des améliorations substantielles pourraient renforcer la précision spatiale de la boîte à outils GRiD. Premièrement, la méthode de quantification de l'erreur entre la résolution spatiale spécifique des jeux de données bruts et les jeux de données échantillonnés par GRiD doit être plus approfondie. Il pourrait être intéressant de répéter les mêmes tests pour d'autres

jeux de données, tels que le Modèle Numérique de Terrain ASTER-GDEM, dont la résolution spatiale brute est de 30m², pour une résolution spatiale sortante de 250m².

A l'échelle de l'analyse, représentée ici par la deuxième aire vitale de rennes sauvages la plus étendue de l'étude, il est important de remarquer que le nombre d'observations testées (pixels/cellules) varie selon l'unité spatiale considérée au départ. Etant donné que le nombre d'observations géostatistiques peut être très différent selon les aires vitales, la vérification de la représentativité des unités spatiales pour chacun des jeux de données bio-géo-physique testé donnerait un aperçu plus précis de l'erreur totale pour une résolution spatiale spécifiée en entrée dans les paramètres de la boîte à outils GRiD.

La deuxième piste d'amélioration est liée aux biais géométriques probablement générés par le choix de la projection cartographique (UTM-32N). En effet, la projection cylindrique conforme de Mercator est plus adaptée pour les régions équatoriales, et tendrait à allonger les surfaces des jeux de données étudiés et re-projetés des régions polaires et subpolaires. Travailler avec une projection cartographique nationale (EuREF89-NTM pour notre cas) améliorerait probablement les résultats totaux et partiels en ce qui concerne l'analyse des jeux de données bio-géo-physiques traités par GRiD et la répartition des rennes sauvages d'Hardangervidda. Un autre paramètre autorisant le choix d'une projection cartographique pourrait être ajouté à la boîte à outils GRiD et traiter automatiquement de la projection des données raster que l'on souhaite extraire et étudier.

2) L'échelle intra-annuelle: sélection des facteurs biotiques et abiotiques

a) Données auto-corrélées et redondantes

Les facteurs auto-corrélés sont les températures moyennes annuelles (1950-1990) et les altitudes. Ceci peut être expliqué par le gradient altitudinal, en particulier entre les hautes altitudes et les températures annuelles basses du nord de la zone d'étude et entre les basses altitudes et les hautes températures du sud du Plateau d'Hardangervidda. A l'échelle de la seconde aire vitale la plus étendue (deuxième quinzaine d'avril), la corrélation entre températures et altitudes est forte et significative ($r= +0.83$; $p<0.0001$). Ainsi, il paraît statistiquement raisonnable d'exprimer le gradient d'altitude par le gradient de températures, et inversement. Ceci dit, il pourrait être intéressant de recalculer les corrélations de Pearson

avec un jeu de données climatiques plus récent (1980-2010 par exemple), mais aussi thématiquement plus précis (températures minimales, maximales).

b) Habitats écologiques et variabilité intra-annuelle (=inter-saisonnière) des domaines vitaux

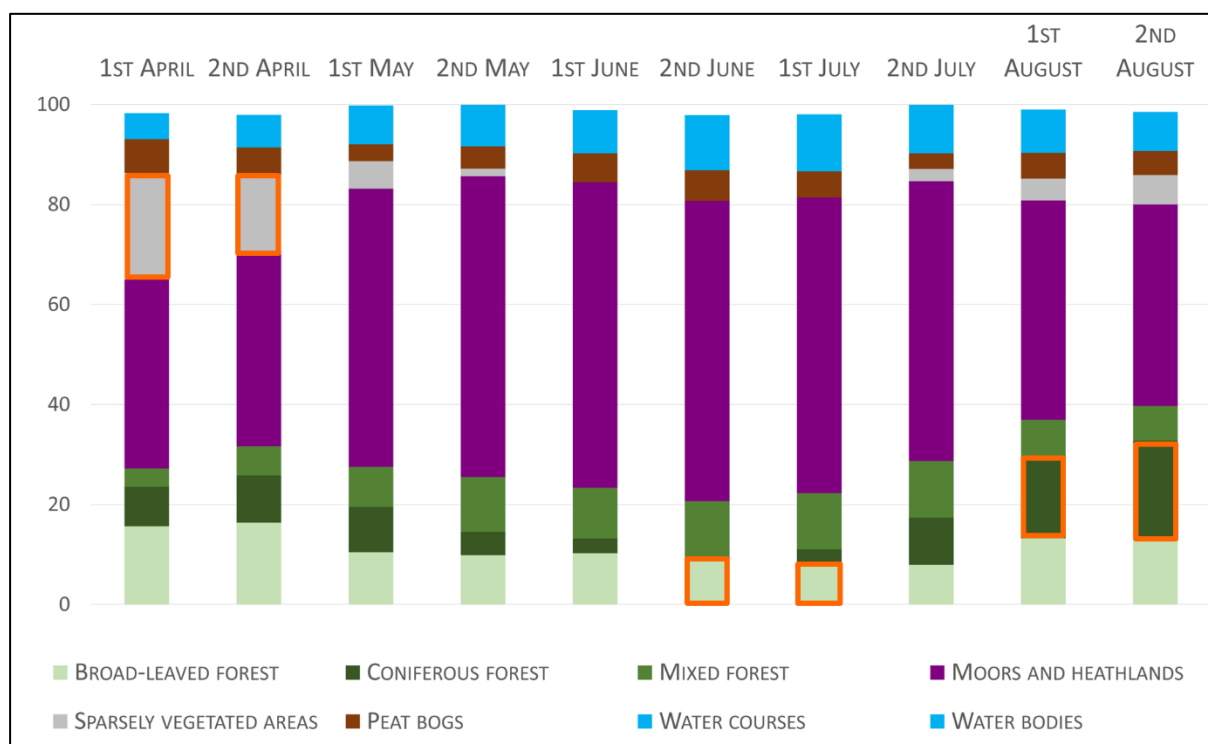
En nombres absolus de pixels, les domaines vitaux de saisons intermédiaires (début de printemps, été tardif) ont les plus grandes superficies totales, comparées aux domaines vitaux dédiés au vèlage et aux domaines de pleines saisons.

Par exemple, le domaine vital le plus étendu (première quinzaine d'avril) dénombre 19736 observations géostatistiques (ou pixels, soit 4480 km²). A l'opposé, on compte 2262 pixels échantillonnés (soit 565 km²) pour le domaine vital le plus petit (seconde moitié de juin). Ce constat sur la taille variable des domaines vitaux selon la quinzaine considérée est visible indirectement en figure XII.2. Les pourcentages des habitats écologiques fréquentés par quinzaine et par domaine vital au cours de la période étudiée y sont représentés. Les couleurs représentent le type d'habitat écologique, avec un nombre total de six. A la fois pour les quinzaines d'avril et d'août, la distribution des habitats par domaine vital bimensuel est relativement équilibrée, comparée aux domaines vitaux de juin. Les habitats écologiques de landes et bruyères sont largement représentés, avec pas moins de 35% de superficie pour chacun des domaines vitaux. Les plans d'eau sont présents pour la première quinzaine de juillet (~10%), étant donné qu'aucune différenciation interne ne peut être faite à l'intérieur de chaque domaine vital bimensuel.

Le test du Khi² (réalisé sur le nombre de pixels des 9 habitats écologiques les plus représentés pour les dix quinzaines) montre une forte relation statistique entre ces variables (valeurs observées: 9873.29, valeur critique: 92.80; p<0.0001). Certains habitats sont surreprésentés au cours du démarrage printanier, en particulier les habitats écologiques présentant une faible végétalisation. Au cours du printemps et de l'été, les habitats de landes et bruyères, ainsi que les forêts mélangées sont surreprésentés. Pour l'été tardif, les forêts de conifères et les habitats à végétation arbustive de transition sont également surreprésentés. Ainsi, dû à l'étendue plus large des domaines vitaux de rennes aux saisons intermédiaires (début du printemps, fin d'été), la diversité en habitats écologique contenus dans les domaines vitaux semble être plus grande quand les femelles suivies par GPS commencent leur migration en direction des aires de vèlage. Le même constat peut être fait au cours de l'été,

avec l'arrivée progressive des habitats écologiques de forêts mélangées et de forêts de conifères au fur et à mesure que l'été se termine. Ces habitats semblent ainsi émerger à la suite des pics phénologiques des habitats écologiques riches en arbres feuillus ou en végétation arbustive et broussailleuse.

Figure XII-2: Comparaison entre les domaines vitaux bimensuels des rennes au cours de la saison végétative (Avril à Août) et superficies de catégories d'habitats écologiques Corine Land Cover 2006. Les pourcentages encerclés en orange correspondent aux habitats surreprésentés dans le test du Khi² (sources: European Environmental Agency; AdeHabitat package, Callenge, 2006; GRiD-toolbox; réalisation R. Courault, 2017)



c) Dissimilarités du NDVI et sélection des domaines vitaux spécifiques

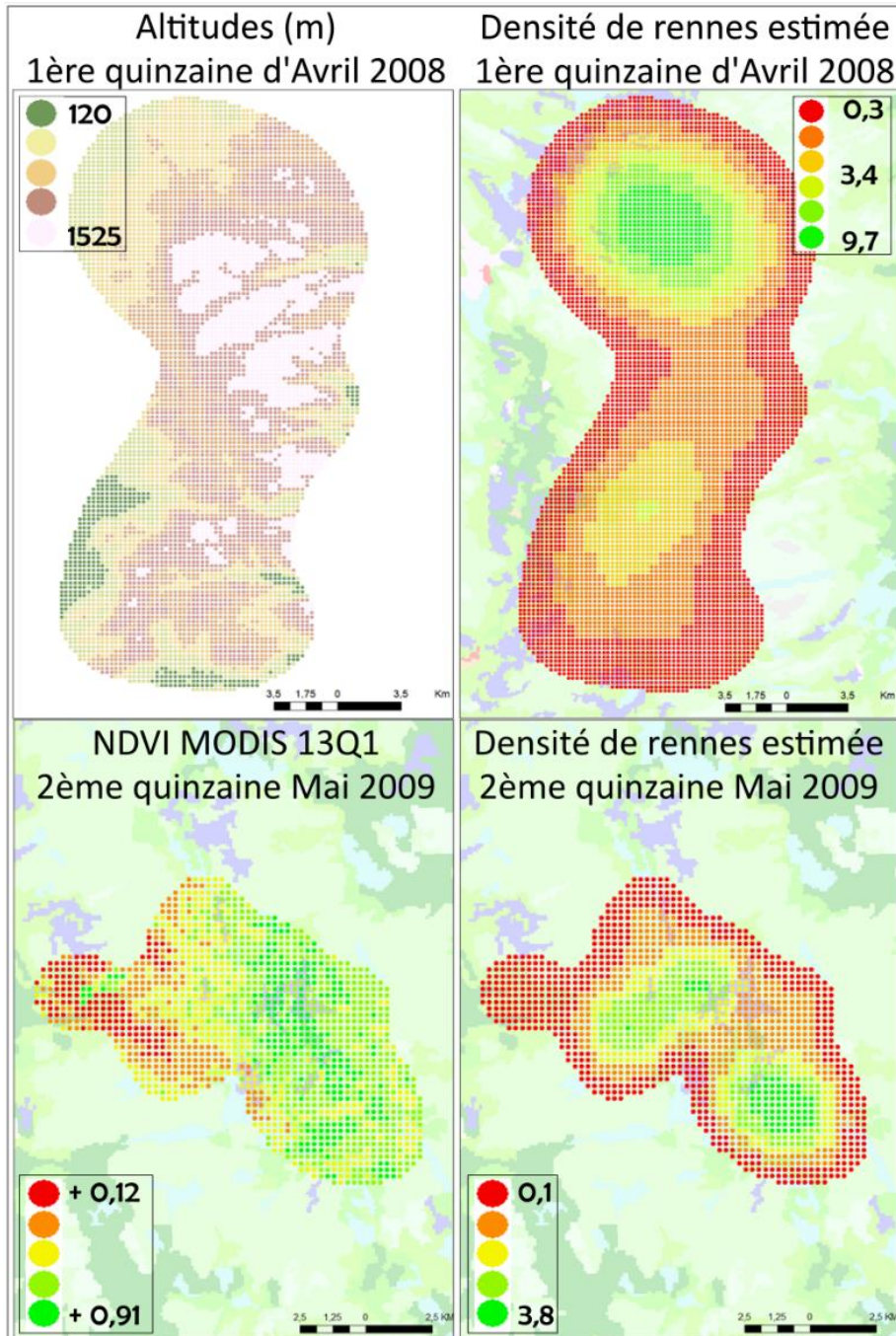
Le test de Kruskal-Wallis est utilisé pour vérifier si les distributions statistiques sont significativement différentes. C'est le cas pour les trois domaines vitaux testés (migration printanière: première quinzaine d'avril; aire de vèlage: deuxième quinzaine de mai; accumulation de graisse: deuxième quinzaine de juillet), qui totalisent les neuves distributions de NDVI.

Les valeurs de NDVI (2007, 2008 et 2009) sont bien statistiquement différentes ($p < 0.0001$). D'après le démarrage phénologique, la distribution et les paramètres centraux de NDVI, il est ainsi possible de déterminer quelles années sur les trois sont plutôt "froides" ou "chaudes". Une fois l'année "chaude" et l'année "froide" sélectionnée, les domaines vitaux interannuels de rennes pourront être étudiés. Le domaine vital spécifique décrivant la migration vers les aires de vèlage (première quinzaine d'avril) dans des conditions "froides" est 2008; avec un NDVI moyen de +0.11. Le domaine vital de début de printemps de 2009 représente l'année "chaude" avec un NDVI moyen de +0.32. L'aire de vèlage des rennes femelles équipées de GPS (deuxième quinzaine de mai) sous conditions "froides" est représentée par le domaine vital de 2008 (moyenne de NDVI : +0.45), tandis que 2009 est "chaud" (+0.56). Pour l'aire vitale décrivant la période d'accumulation graisseuse (deuxième semaine de juillet) sous conditions froides est 2009 (+0.66), tandis que 2007 est "chaud", avec un NDVI moyen de +0.75.

3) Echelle interannuelle (=inter-saisonnière) des aires vitales : quels paramètres sont reliés aux densités estimés de rennes les plus élevées?

La figure XII.3 présente les résultats cartographiques obtenus après l'échantillonnage via GRiD. Les données ponctuelles représentent différentes valeurs des facteurs bio-géophysiques échantillonnées par aire vitale bimensuelle.

Figure XII-3: Exemples cartographiques des aires vitales bimensuelles de rennes sauvages échantillonnés par GRiD, et représentation des facteurs bio-géo-physiques, pour les aires de la première quinzaine, d'avril 2008 et la deuxième quinzaine de mai 2009, Réalisation, R.Courault 2018



A titre d'exemples, les aires vitales bimensuelles de la première quinzaine d'avril 2008 sont cartographiées sur la première ligne de la figure, avec les valeurs d'altitude (en haut, à gauche), et de densités estimées de rennes pour cette quinzaine de jours en particulier (en haut, à droite). La deuxième ligne de la figure XII.3 affiche l'aire vitale bimensuelle de mai 2009, avec en bas à droite les valeurs de NDVI MODIS 13Q1, et en bas à gauche les densités estimées de rennes de cette quinzaine. Les valeurs se comptent en nombre moyen de rennes, compris entre 0,3 et 9,7 rennes sauvages estimés pour la densité d'avril 2008 (cf légende) ; contre 0,1 à 3,8 pour la densité estimée de mai 2009. Ces exemples cartographiques d'aires vitales bimensuelles échantillonnées dénotent également de l'approche méthodologique développée dans les sous-parties suivantes : la mise en lien statistique entre espaces utilisés effectivement par les rennes sauvages du plateau d'Hardangervidda (aires vitales), densités de rennes estimées et les facteurs environnementaux échantillonnés.

a) Le printemps comme marqueur robuste du lien entre densités estimées de rennes sauvages et NDVI

La table XII.3 reporte les corrélations de Spearman entre les densités estimées de rennes sauvages (en utilisant la technique des *Kernel Utilization Distribution*) pour les années "froides" et "chaudes" sélectionnées et les facteurs explicatifs pertinents.

Les corrélations supérieures au seuil de 0.2 (p-value <0.0001) sont montrées ici. Les hautes latitudes sont favorablement associées avec de hautes valeurs de densités de rennes au cours du printemps "froid" (2008), pour la première quinzaine d'avril (migration) et la période de vèlage (2ème quinzaine de mai). Les cortèges floristiques de haute-altitude, tels que les bryophytes et les lichens terricoles pourraient être favorisés par les rennes, ceux-ci temporisant le relatif retard dans la fonte nivale saisonnière et le démarrage phénologique des plantes vasculaires (Klein, 1990).

Inversement, les conditions "chaudes" dénotent de corrélations significatives entre les estimations de densités de rennes sauvages et le NDVI. Dans ce cas, les corrélations décrivent à la fois des relations négatives (Spearman's-rho =-0.268; p-value < 0.0001) pour la première quinzaine d'avril 2009 et des relations positives (+0.262, p-value < 0.0001). La corrélation négative (première quinzaine d'avril 2008) décrit de basses densités de rennes reliées à de hautes valeurs de NDVI; tandis que la corrélation positive (deuxième quinzaine de mai 2009) décrit de grandes densités estimées en rennes sauvages et de hautes valeurs de NDVI.

Aucune corrélation marquée pour les aires vitales décrivant la période d'accumulation grasseuse (deuxième semaine de juillet) n'a été trouvée. Ici, l'abondance relative de la biomasse végétale consommable par les rennes, brièvement après le pic phénologique de la plupart des plantes vasculaires, pourrait expliquer le manque de relations statistiques significatives.

Tableau XII-3: Matrice de corrélations par rang de Spearman entre les densités de rennes estimées par aire vitale annuelle et les facteurs explicatifs testés. Les rhos de Spearman > 0.2 et ayant une p-value < 0.0001 sont ici représentés (Réalisation R. Courault 2017)

Estimation de la densité par aire vitale annuelle / Facteurs explicatifs	Altitudes	NDVI
Première quinzaine d'Avril 2008 (migration; conditions froides)	0.374	NA
Première quinzaine d'Avril 2009 (migration, conditions chaudes)	NA	-0.268
Deuxième quinzaine de Mai 2008 (vêlage, conditions froides)	0.230	NA
Deuxième quinzaine de Mai 2009 (vêlage, conditions chaudes)	NA	0.262

b) Une forte variabilité dans les densités estimées de rennes et la phénologie entre les différentes aires vitales interannuelles

Dans le but d'explorer de façon plus détaillée les relations statistiques entre les densités de rennes estimées et les valeurs NDVI, des tests de distribution de Kruskal-Wallis ont été calculés. Les distributions statistiques de densités de rennes, et de valeurs de NDVI ont été regroupées par sous-échantillons, les catégories d'appartenance de chaque pixel/observation renseigné aux différents habitats écologiques composant les aires vitales inter-saisonnières. A l'échelle de ces neuf aires vitales, chaque test de Kruskal-Wallis (neuf menés) a rejeté l'hypothèse d'une dépendance entre les distributions statistiques de densités de rennes sauvages estimés et les distributions statistiques de NDVI. Cette variabilité est graphiquement représentée en figure XII.4. Le jeu de cartes montre la similitude des formes des modèles de distributions de densités de rennes (comportement individuel, cas des aires de vêlage) mais aussi des dissimilarités (facteurs environnementaux dépendant des contextes annuels, saisonniers, mensuels, cas des migrations de printemps).

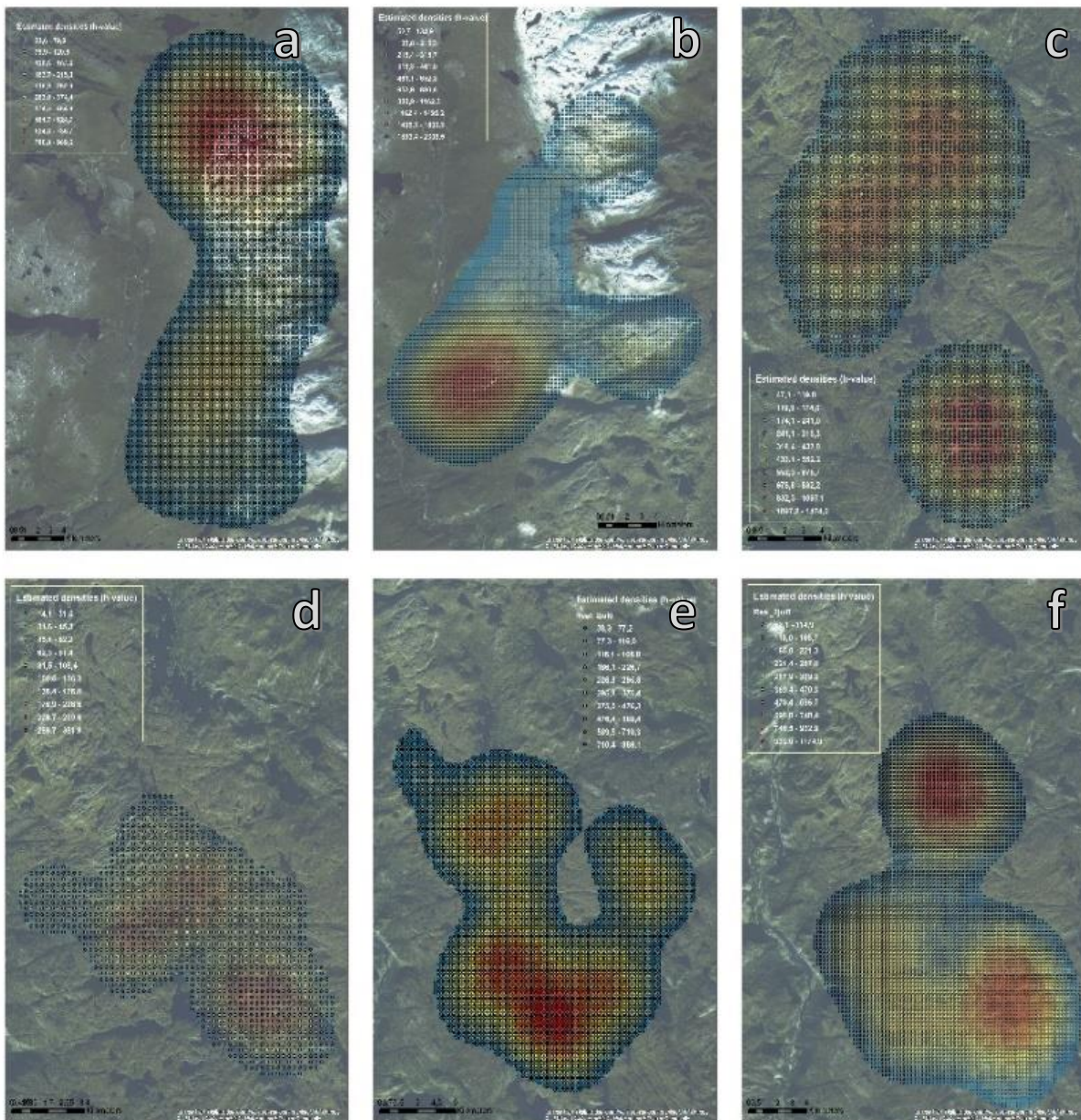


Figure XII-4: Jeu de cartes montrant les densités estimées de rennes sauvages en utilisant la technique de la Kernel Utilization Distribution (Callenge et al., 2006), dans un gradient de couleur allant du bleu (faible densité) au rouge (forte densité) Carte a: 1^{ère} quinzaine d'avril 2008; b. 1^{ère} quinzaine d'avril 2009; c. 2^{ème} quinzaine de mai 2008; d. 2^{ème} quinzaine de mai 2009; e. 2^{ème} quinzaine de juillet 2007; f. 2^{ème} quinzaine de juillet 2009 (Source du fond de carte: ESRI Dataglobe, Crédits: R. Courault, 2017)

D - Discussion et conclusion

Ce chapitre avait deux objectifs, celui de proposer un nouvel outil d'analyse, et celui de s'en servir pour mieux comprendre les migrations du renne sauvage pendant la période de

reconstitution des réserves, et ses déterminants environnementaux et climatiques, afin d'évaluer sa résilience dans le contexte du changement climatique.

Le montage de la boîte à outils Python GRiD a été progressivement encouragé par le besoin d'automatiser le prétraitement de données géographiques pour le suivi des migrations et des densités de rennes sauvages sur le plateau d'Hardangervidda, en Norvège. La vaste étendue des comportements spatiaux du renne sauvage représente un cas d'étude particulièrement intéressant pour appliquer cette méthode de prétraitements géomatiques, plus adaptée aux grands territoires qu'une analyse diachronique multi-dates plus simple, précédemment réalisée par d'autres auteurs pour des superficies plus restreintes (Jolivet, 2014; Bortolamiol et al., 2016). En effet, le choix des points échantillonnant au centre de chaque cellule composant un maillage permet un temps de traitement informatique raisonnable, tout en limitant les biais géostatistiques entre jeux de données bruts et échantillonnés, d'après la première série de test réalisés dans notre étude. Des améliorations doivent toujours être réalisées pour s'assurer de la fiabilité de GRiD en termes de géométrie, de possibilité d'homogénéisation de la projection cartographique en sortie et de minimisation d'erreurs dans l'extraction de nombreux et large jeux de données raster.

L'application de la boîte à outils GRiD dans le suivi des rennes sauvages au cours des trois périodes de croissance végétative a permis de simplifier les prétraitement en automatisant la création de grille, de semis de points et l'intégration finale des jeux de données raster en une seule table attributaire, représentant une unité spatiale d'étude. Basée sur les observations géostatistiques (pixels), ceci nous a autorisé à mener des analyses statistiques complexes, pas présentes de façon ordinaires dans les logiciels de géomatique. Basée sur des jeux de données en Open Access, l'étude montre en premier lieu l'existence de liens entre la répartition intra-annuelle des rennes et la diversité des habitats écologiques utilisés par les ongulés. Cette diversité varie à l'échelle annuelle : plus importante au début du printemps, le nombre et les proportions d'habitats par domaine vital bimensuel s'uniformisent au cœur de l'été (juillet). Dans le même temps les superficies des domaines vitaux bimensuels se contractent pendant le vêlage, avant de rétracter avec l'avancée de la saison estivale. La plus haute correspondance entre densités de rennes et hautes valeurs de NDVI, en situation printanière douce (2009). Des pistes explicatives peuvent être évoquées si l'on prend en compte les stratégies alimentaires opportunistes de *Rangifer tarandus*, particulièrement au printemps lors du débouillage des premiers ligneux et du développement des premières plantes

à graines. La prise en compte de variables topographiques plus poussées (pentes, orientations) permettrait de mieux comprendre la réponse des rennes à la variabilité bioclimatique, notamment en termes de choix d'habitats au printemps et à l'été: types de communautés végétale selon le couvert neigeux, dynamique phénologique et de débâcle, et orientation des versants (Mårell, 2005 ; Mårell, 2006 ; Skarin et al., 2008).

Conclusions générales

Ce travail de thèse s'inscrit dans le suivi multi-scalaire des dynamiques bioclimatiques à l'œuvre dans le nord de la Scandinavie, et les répercussions du changement global sur ces dynamiques vis-à-vis des paysages culturels de l'élevage de rennes semi-nomades.

Le changement global est défini comme « *les changements imprimés aux écosystèmes par l'anthropisation* » (Géoconfluence, ENS Lyon). Au long des chapitres, nous avons pu constater la séparation particulièrement ténue entre écosystèmes et anthropisation, nature et société, en premier lieu par l'étude des paysages migratoires du renne, au carrefour entre nature et culture. Cette espèce clé de voûte des paysages du nord de l'hémisphère boréal est en effet au cœur des problématiques environnementales et sociétales actuelles, étant donné sa place centrale dans les écosystèmes arctiques et subarctiques, mais aussi au sein de la culture des éleveurs de rennes Saamis, qui se sont emparés de ce symbole écologique fort pour faire valoir leurs droits territoriaux et sociaux. Plus largement, la reconnaissance de la diversité des systèmes de valeurs, de pensées et d'agir contribuent à nourrir la compréhension, l'anticipation et la résilience des effets du changement climatique sur les sociétés humaines.

Avec ces constats levés tout au long de la thèse et vu la complexité multi-scalaire des effets du changement global sur les paysages de l'élevage de rennes en Scandinavie, les hypothèses de travail ont été particulièrement nombreuses. De façon générale, l'accent a été mis sur la mise en liaison multi-scalaire des différentes expressions du changement global, qui touche à présent l'ensemble des compartiments du système-Terre, l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère des socio-écosystèmes subarctiques froids du nord de l'Europe. Cette mise en relation est notamment abordée et synthétisée dans l'expression suivante :

Atmosphère → Climat → Paysages végétaux

et occupation des sols → Ecologie de *Rangifer tarandus* → Ecologie des paysages migratoires → Résilience des systèmes pastoraux (sociale et économique)

Si cette expression est une vision simplificatrice de la réalité, elle constitue un schéma conceptuel efficace des éléments de compréhension pris en compte à l'échelle de l'ensemble des analyses effectuées. Cependant celui-ci efface les particularités géographiques et temporels des espaces étudiés, et la prise en compte des effets hautement spécifiques du changement global aux échelons régionaux et locaux, pour des temporalités éprouvées par les

Romain Courault – « *Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global* » - Thèse de Géographie,

éleveurs (calendrier pastoraux, pâturages saisonniers) et les chercheurs (domaines vitaux annuels, saisonniers et bimensuels).

C'est justement ces spécificités géographiques qui ont été étudiées, afin de renseigner le plus clairement possible les études menées sur le suivi dans le temps et dans l'espace des paysages de l'élevage de rennes en Scandinavie.

La première série d'hypothèses a montré que pour les différents paysages culturels étudiés, les effets du changement global ont été mesurés, particulièrement à des échelles d'analyses régionales et sur le temps long.

L'une des manifestations les plus visibles du changement global est représentée par les **effets des changements d'occupation de sols** à l'échelle de la Laponie suédoise. Il a en effet été discuté, dans le chapitre II, de l'effet conjoint de l'accélération du changement climatique global avec celui de l'économie post-industrielle, exprimé par l'exploitation de ressources primaires (énergie, minéraux, bois), secondaires (complexes industriels) et tertiaires (tourisme, recherche scientifique, défense militaire) dans la transformation rapide des paysages culturels de l'élevage de rennes en Laponie suédoise. Ces effets transparaissent clairement au regard de la perte en habitats écologiques, et donc en ressources paysagères pour le renne comme pour les systèmes pastoraux suédois. On a pu étudier la géographie de cette perte en habitats écologiques, décrivant indirectement le processus de fragmentation paysagère à l'œuvre au sein des territoires pastoraux. Nous avons notamment pu mesurer l'hétérogénéité géographique de la perte en habitats écologiques.

La fragmentation paysagère touchait ainsi principalement les forêts de conifères, valorisées économiquement par la sylviculture intensive, ressource paysagère déterminante pour l'élevage de rennes semi-domestiques dans l'ensemble de ses organisations pastorales (montagnarde, forestière, concessionnaire), historiquement liées à la spécialisation des systèmes pastoraux aux terroirs environnants, autour d'écotypes de rennes (migration plus ou moins large) et de la valorisation via la chasse, la pêche ou l'élevage intensif de rennes. **L'urbanisation littorale et les voies de communication** sont également soulevées par l'étude et nourrissent la description géographique de la fragmentation des paysages en Laponie suédoise. Ceci renvoie tout particulièrement aux revendications territoriales contemporaines, et à la question de la colonisation historique (spirituelle, gestionnaire, spatiale) ayant façonné les relations complexes entre Saamis et Scandinaves. **La**

communauté d'éleveurs Gabna, catégorisée comme montagnarde, ressort dans ces analyses comme s'inscrivant dans un contexte de fragmentation paysagère singulier, dénotant de la concentration particulièrement importante au sein de ses territoires des enjeux liés au changement global : du point de vue humain tout d'abord avec la plus grande mine de magnétite à ciel ouvert d'Europe, à Kiruna. C'est justement dans cette ville-capitale de la région de Nord-Botnie qu'est située le Parlement saami, institution suédoise de reconnaissance des droits territoriaux saamis.

Pour le changement climatique pluri-décennal, le suivi des séries temporelles atmosphériques et climatiques a révélé les écarts importants entre les premières et les dernières années des modèles linéaires pour les trois paramètres testés : indices de circulation atmosphérique (et ses oscillations continentales : arctique, nord-atlantique, est-atlantique et scandinave), températures et précipitations de Barentsburg (Spitzberg), Cuovdatmohkki (Finnmark norvégien), Abisko (Norrbotten, Suède). Il apparaît en particulier **l'élévation marquée des indices NAO à l'échelle des cinquante derniers hivers**. Il en est de même pour les températures moyennes annuelles, à l'échelle de l'ensemble des stations climatiques étudiées. L'évolution linéaire des températures a notamment confirmé **le desserrement généralisé de la contrainte thermique, avec l'esquisse d'une zonalité** dans la réponse du réchauffement des températures, confirmant l'influence du changement climatique global sur les latitudes polaires. Les effets d'un gradient thermique en augmentation agissant sur la variabilité atmosphérique, spécifiquement hivernale, sont intimement inter-reliés, et sont également observés sur les régimes de précipitations.

Au-delà des aspects linéaires de la description des séries temporelles climatiques et atmosphériques, l'hypothèse d'une **évolution temporelle par seuils des climats arctiques et subarctiques** est confirmée, en mettant notamment en lumière l'individualisation de périodes statistiques délimitant des années seuils au-delà desquelles le système climatique a significativement changé. A l'échelle de la période d'étude (1950-2013), deux périodes charnières ressortent dans les trois thématiques traitées (atmosphère, températures et précipitations) : la fin des années 1970 et la fin des années 1980. Celles-ci semblent décrire un basculement, encore une fois inter-relié étant donné la synchronicité entre séries temporelles atmosphériques et climatiques. L'indice hivernal (décembre-janvier-février) de NAO ressort encore une fois de l'analyse, avec des hivers largement positifs après 1982 (type de temps

océanique, doux et humides), négatifs avant cette période (type de temps anticyclonique continental, froid et sec).

Les conséquences du changement climatique sur les effectifs de rennes distinguent nettement les rennes sauvages du Spitzberg et les rennes semi-domestiques du nord de la Scandinavie : les premiers semblant favorisés par des anomalies positives hivernales de NAO, les seconds défavorisés (chapitre III). Cette prééminence des indices d'oscillation atmosphérique sur les variables climatiques locales pour décrire et expliquer les variations démographiques de rennes de la région de Nord-Botnie se retrouvent dans le chapitre IV, dont la grande majorité des relations statistiques significatives étaient retrouvées sur les variables atmosphériques, comparativement aux températures et précipitations locales. Pour toutes les catégories démographiques décrivant les cheptels de cette région, les fortes anomalies positives de NAO et EATL/WRUS s'associaient à des effectifs en baisse. Sous des climats particulièrement irréguliers, les résultats montrent également **l'importance de la prise en compte des saisonnalités**, en particulier celles, inclusives, du pastoralisme saami. On a notamment observé la finesse des saisons pastorales saamies, qui organisent les systèmes pastoraux en se basant notamment sur les cycles biologiques des rennes. Le décompte des corrélations calculées dans le chapitre IV a notamment montré le nombre deux fois plus important de liens climat/démographie comparativement aux saisons astronomiques traditionnellement utilisées en climatologie. En particulier, on a pu constater des liens entre démographie des rennes et les moyennes saisonnières estivales et automnales des indices atmosphériques cités ci-dessus.

Reprenant les constats d'une plus forte correspondance entre les dynamiques de population des rennes semi-domestiques du nord de la Suède et les conditions climatiques en saisons estivales et automnales sur une échelle temporelle décennale (2000-2017), nous avons par la suite testé les **liens entre les variabilités climatiques, phénologiques et démographiques** pour deux moments-clés des dynamiques paysagères de la région (fin mai, vêlage des femelles ; fin juillet, pic phénologique théorique ; chapitre V). Avec un recul méthodologique nécessaire, les conditions bioclimatiques de la saison Giddà (avril-mai) semblent être particulièrement contributives dans la variation de la majorité des catégories de rennes semi-domestiques. La méthodologie doit cependant être approfondie, en termes d'échelles géographiques de prise en compte des facteurs explicatifs, mais aussi dans l'ajout

d'autres variables pouvant certainement contribuer à expliquer la démographie des cheptels (variables de domestication, pratiques et économie de l'élevage).

Vers des échelles d'analyses plus locales, nous avons ainsi mis l'accent a par la suite été mis sur **les paysages végétaux** soutenant les systèmes pastoraux, en particulier la communauté montagnarde d'éleveurs de rennes Gabna. La partie 3 a généralement confirmé les effets du changement global, montrant avec un certain recul temporel **l'augmentation généralisée de la biomasse végétale à l'échelle de la communauté Gabna** (chapitre V et VII).

Le suivi des séries chronologiques de l'indice de végétation NDVI, via l'application de **tests de tendance** (chapitre V), a dans un premier temps montré un certain **déphasage entre la partie hivernale** de la communauté **et sa partie orientale**, marquée par les migrations printanières et estivales des troupeaux de rennes semi-domestiques. Cette réponse différenciée dans les tendances temporelles de NDVI (significativement positives à l'est ; hétérogène à l'ouest des territoires Gabna) illustre les enjeux auxquels les éleveurs de rennes ont à faire face, déjà en partie soulevé dans le chapitre II : **tendances certaine à l'augmentation du NDVI lié à la sylviculture, sur des superficies particulièrement importantes ; tendances plus nuancée à la baisse du NDVI** pour les pâturages de la saison chaude pouvant être liée à l'attaque d'insectes parasites dans les forêts de feuillus caducs, et à la sur-mobilisation des pâturages estivaux par les rennes dans les prairies alpines. Le gradient bioclimatique d'altitude et les contextes topographiques et hydrologiques marqués dans ces pâturages doivent cependant nuancer le propos, allant plutôt vers une tendance au verdissement des paysages culturels de la communauté Gabna. **L'estimation de la longueur de la saison phénologique**, approximée par le nombre de quinzaines MODIS par an présentant un NDVI >0,2, a montré la grande variabilité bioclimatique interannuelle, mais ne semble pas valider l'hypothèse de l'allongement de la période phénologique, un des effets du changement climatique actuel cité dans la littérature.

Sur une analyse diachronique plus longue (1990-2017, chapitre VII), nous avons pu quantifier et comparer les surfaces végétalisées composant différentes unités pastorales de la communauté (pâturages saisonniers, zones de grand intérêt pastoral liés à la reproduction des troupeaux de rennes). Nous avons ainsi montré l'augmentation généralisée, toute unité confondue, de la biomasse végétale estimée par NDVI. Comme précédemment cité, **les résultats distinguent nettement les deux saisons clés du cycle migratoire** des troupeaux

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

Gabna, avec des territoires hivernaux particulièrement affectés par la densification de la biomasse arborée (**parcelles sylvicoles**) aux dépens d'anciennes forêts tourbeuses, tandis que les territoires de montagne (aire de vêlage, territoires estivaux) sont concernés par les processus de conquête forestière et arbustive (*shrubification*). Les pâturages inter-saisonniers se situent précisément dans ces deux cas de figures, avec le front de croissance du Pin sylvestre (délimitant le biome de taïga) semblant tendre à remonter la rivière du *Törnetraske* (**boréalisation**), point de convergence des troupeaux au printemps et à l'automne ; et la colonisation des ligneux bas sur les versants de montagne moins contraignants. Le déplacement des formations végétales arborées et arborescentes semble être lié à l'élévation des températures précédant la saison végétative.

Si l'approche par le terrain en biogéographie n'a pas permis de réaliser un suivi chronologique (partie 3), il a cependant mis en lumière la **diversité des formations végétales** (chapitre IX), composant les pâturages saisonniers de la communauté. **La végétation ligneuse**, semble pouvoir être **approximée par la réponse du NDVI au long de l'écotone tundra-taïga** (chapitre VIII pour la démarche méthodologique emboîtée ; chapitre IX pour les résultats). Cette diversité est en particulier visible dans les terrains de montagne, et tranche particulièrement avec la monotonie des **forêts de conifères**, dont les stations se caractérisaient par leur **faible biovolume en lichens terricoles**. La deuxième partie de résultat reprend les constats opérés précédemment, marquant la quantité et la **diversité pastorale forte en espèces pâturables** rencontrées et dénombrées au long des relevés floristiques (chapitre X). En comparant les valeurs pastorales des relevés opérés au long du gradient boréo-alpin, nous nous sommes ainsi rendu compte de l'équilibre, du point de vue de la composition spécifique des végétaux pastoraux entre les différents pâturages saisonniers. Si les travaux sur les **effets de compétition entre ligneux non pâturables et espèces végétales pâturées** par les rennes n'a pas montré de changement significatif dans la valeur pastorale des relevés, l'examen des températures printanières (Giddàgisse, mai-juin) passées et futures à l'échelle de l'aire de vêlage des rennes femelles de la communauté Gabna (chapitre X) a permis de constater **l'évolution substantielle** projetée des températures, dont **la moyenne pourrait dépasser les 10°C en 2050 (limite de pousse du Pin sylvestre)**. En particulier les forêts de bouleaux pubescents actuelles présenteraient les réchauffements les plus significatifs, laissant présager d'une remontée importante de l'ensemble des étages bioclimatiques, et interrogeant quant aux

potentiels pastoraux de l'aire de vêlage, et de l'ensemble des pâturages saisonniers de montagne.

Toujours à une échelle locale, mais sur une temporalité courte, la partie 4 s'attachait à décrire les **comportements migratoires des rennes sauvages vis-à-vis de l'irrégularité climatique**. Le chapitre XI discutait de l'effet imbriqué des conditions atmosphériques et climatiques hivernales sur les grandes structures de migration des rennes sauvages. La résilience de l'ongulé avait en partie été soulignée par la prise en compte de **distances plus grandes** dans les migrations hivernales se déroulant dans des conditions atmosphériques particulièrement extrêmes, en particulier les **phases positives d'oscillation nord-atlantique**, reliées à des cumuls de neige plus profond et à des migrations tendant à mimer les migrations saisonnières de début de printemps. Le chapitre XI, discutant de l'effet de la variabilité phénologique au cours de la période végétative a montré que les **habitats préférentiels étaient les landes et les bruyères**, largement surreprésentées dans les analyses. Ces choix d'habitats étaient notamment guidés par la **rétractation puis la dilatation progressive des domaines vitaux bimensuels** des rennes femelles suivies par GPS, et ce **autour de la période de vêlage**. Ces effets d'agrandissement progressif des domaines vitaux bimensuels, qui s'accompagne d'une diversité en habitats plus forte, et différente selon le mois de l'année considéré, soulignent ainsi la stratégie de nourrissage des rennes femelles particulièrement opportuniste, dépendante de la diversité paysagère. **Les variations interannuelles dans les choix d'habitats et les densités de rennes dépendaient en partie des conditions climatiques et phénologiques**, rappelant l'adaptabilité marquée de l'ongulé aux conditions environnementales difficiles.

De façon générale, l'ensemble des éléments de **prise en compte des savoirs locaux**, et de mise à profit des dialogues opérés sur le terrain auprès des parties-prenantes a montré la compréhension améliorée des différents processus et effets du changement global sur les paysages culturels de l'élevage. Cette prise en compte est passée dans un premier temps par la **modélisation de variables** nous permettant de **décrire** des phénomènes climatiques (chapitre III) ; sans discuter de l'importante **contribution du calendrier pastoral** dans les parties 1 et 2. L'exploitation de la base de données RenGIS, opérée dans un cadre dynamique dans le chapitre VI en est un exemple, les résultats montrant **la synchronicité** entre date d'arrivée théorique des cheptels au sein des pâturages saisonniers Gabna et dates de démarrage de verdissement. Ceux-ci confirment l'hypothèse de **l'adéquation entre l'organisation spatio-**

temporelle du système pastoral Gabna et dynamiques écologiques des paysages culturels. Cette mise en perspective n'est cependant qu'un début, une partie substantielle de ce travail de thèse demandant à être présentée en Suède, et ayant été menée avec le souhait d'interagir efficacement avec les éleveurs et de pouvoir proposer les résultats les plus transparents, utiles et évocateurs possibles quant à l'évolution de leurs paysages culturels face au changement global actuel.

Liste des figures

FIGURE 0-1: SCHEMA CONCEPTUEL DE LA DEMARCHE METHODOLOGIQUE DEVELOPPEE DANS LES TRAVAUX DE THESE (REALISATION R.COURAULT, 2018)	19
FIGURE I-1 : CARTE DE SITUATION DE LA LAPONIE SUEDOISE (SOURCES: E. CHARLOT, 2015, RENGIS 2.04, 2017, EEA, 2017; REALISATION: G. DUVAL, 2017, A PARAITRE DANS COURAULT, DUVAL ET COHEN (ACCEPTÉ))	44
FIGURE II-1: TYPES DE COMMUNAUTES PASTORALES ET GRANDES CATEGORIES D'UTILISATION DES SOLS (SOURCES: CORINE LAND COVER 2012, EEA, RENGIS 2.0, REALISATION : R. COURAULT 2017)	53
FIGURE II-2 : ELEMENTS FRAGMENTANT LES TERRITOIRES DE LAPONIE SUEDOISE (REALISATION: G. DUVAL, 2017)	59
FIGURE II-3 : POURCENTAGES DE SUPERFICIES DE PAYSAGES NON FRAGMENTEES PAR COMMUNAUTE D'ELEVEURS (SOURCES: RENGIS 2.0, SAMETINGET, REALISATION: R.COURAULT 2017)	61
FIGURE III-1 : LOCALISATION DES ZONES D'ETUDE (STATIONS METEOROLOGIQUES, ZONES DE DENOMBREMENT DES RENNES, SOURCES : NOAA-NCDC ; ABDS.IS ; SSB.NO)	71
FIGURE III-2 : TRAITEMENTS STATISTIQUES OPERES SUR LES SERIES TEMPORELLES CLIMATIQUES ET ECOLOGIQUES	73
FIGURE IV-1A ET IV-1B : CARTE DES TEMPERATURES MOYENNES MAXIMALES ANNUELLES EN SCANDINAVIE A) 1950-2000 (A GAUCHE) ; B) 2080-2100 (A DROITE). SOURCES: WORLDCLIM.ORG, CMIP5, GCM: IPSL, -CM5A-LR, REALISATION R. COURAULT, 2016	83
FIGURE IV-2 : VILLAGES D'ELEVEURS ET TERRITOIRES SAISONNIERS DES CHEPTELS DE RENNES DU NORD DE LA SUEDE. SOURCES : SAAMI PARLIEMENT, DIVA-GIS.COM, REALISATION R. COURAULT, 2016.....	85
FIGURE IV-3: TEST DE RUPTURE APPLIQUE AUX T°C ANNUELLES A ABISKO (1950-2013; ABISKO RESEARCH STATION, METHODE DE PETTITT), REALISATION : R. COURAULT, 2015	87
FIGURE IV-4 : LES BIOMES DU COMTE DU NORD-BOTNIE ET STATION SYNOPTIQUE D'ABISKO. SOURCES : AEE, ABISKO RESEARCH STATION, DIVA-GIS.ORG ; REALISATION : R. COURAULT, 2016.	89
FIGURE IV-5 : DEMARCHE METHODOLOGIQUE GENERALE (REALISATION : R.COURAULT, 2016)	90
FIGURE IV-6 : STATUT DES TROUPEAUX DECOMPTEES ET STATION METEOROLOGIQUE D'ETUDE. SOURCES : SAMETINGET.SE, AEE, DIVA-GIS.ORG, REALISATION : R. COURAULT, 2016.....	94
FIGURE IV-7 : METHODOLOGIE D'EXTRACTION DE SERIES TEMPORELLES DE TEMPERATURES EN SURFACE DE SOL ISSUES DES IMAGES MODIS 11C3.....	96
FIGURE IV-8 : AGREGATION SAISONNIERE DES SERIES TEMPORELLES DE DONNEES CLIMATIQUES ET ATMOSPHERIQUES	97
FIGURE IV-9 : VARIABILITE DES TEMPERATURES DE SOLS DANS DIFFERENTS HABITATS DU COMTE DE NORD-BOTNIE, A) SELON LES SAISONS PASTORALES B) SELON LES SAISONS METEOROLOGIQUES. SOURCES MODIS 11A2 ; CLC 06 ; REALISATION : R. COURAULT (2016).....	100
FIGURE V-1 : CARTOGRAPHIE DE LA DISTRIBUTION DES ECHANTILLONS DE COUVERTURES DE SOLS VEGETALISES ET NON VEGETALISES A L'ECHELLE DE LA COMMUNAUTE D'ELEVEURS DE RENNES GABNA, ET LOCALISATION DE LA STATION METEOROLOGIQUE D'ABISKO (SOURCE : CORINE LAND COVER 2006, ABISKO RESEARCH STATION, ARCGIS BASEMAP, REALISATION R. COURAULT, 2018)	122

FIGURE V-2 : VALEUR DU TEST DE TENDANCE DESAISONNALISE DE MANN-KENDALL (2000-2017) POUR LE NDVI DES PIXELS MODIS 13Q1 DE LA REGION D'ETUDE. LES CONTOURS BLANCS DISTINGUENT LES FRONTIERES DE LA COMMUNAUTE D'ELEVEURS GABNA, REALISATION R. COURAULT (2018)	133
FIGURE V-3 : P-VALUES ASSOCIEES AUX TESTS DE TENDANCE DE MANN-KENDALL DESAISONNALISE. EN JAUNE SONT REPRESENTES LES PIXELS DONT LES P-VALUES ASSOCIEES SONT COMPRISES ENTRE 0,1 ET 0,05. EN ROUGE, LES PIXELS POUR LESQUELS LA P-VALUE EST INFERIEURE A 0,05 (SIGNIFICATIVITE FORTE DU TEST DE TENDANCE), REALISATION R. COURAULT (2018)	133
FIGURE V-4 : CARTE DES OCCUPATIONS DE SOLS DE LA COMMUNAUTE D'ELEVEURS DE RENNES GABNA ET DES PATURAGES SAISONNIERS (SOURCE : AEE, CLC12 ; RENGIS 2.0, REALISATION : R.COURAULT, 2018)	134
FIGURE V-5 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DU NDVI MOYEN ANNUEL DES ECHANTILLONS D'HABITATS/COUVERTURES DE SOLS NON VEGETALISES UTILISES POUR L'EXTRACTION DU NDVI MODIS 13Q1, ENTRE 2000 ET 2017 (SOURCES : USGS, CORINE LAND COVER, REALISATION : R. COURAULT, 2018).....	135
FIGURE V-6 : DIAGRAMME DE L'ENCHAINEMENT DES FACTEURS TESTES DANS L'ETUDE. LES BOITES REPRESENTENT LES FACTEURS EXPLICATIFS/EXPLIQUES. LES FLECHES BLEUES ET ROUGE OBLIQUES SIGNIFIENT LA PRESENCE OU NON D'UNE TENDANCE TEMPORELLE POUR LES FACTEURS TESTES, ET SON EVENTUELLE AUGMENTATION/DIMINUTION. LES FLECHES BLEUES ET ROUGES DROITES CONCERNENT LES RESULTATS DES CORRELATIONS PAR RANGS DE SPEARMAN, ET DES MODELES DE REGRESSION LINEAIRES MULTIPLES. (REALISATION R.COURAULT, 2018).....	153
FIGURE VI-1 : LOCALISATION ET PRESENTATION DES NIVEAUX DE DECOUPAGES GEOSTATISTIQUES (REALISATION: R.COURAULT, 2016)	163
FIGURE VI-2 : PROFILS TEMPORELS DES MOYENNES DE JOURS DE DEMARRAGES DE VERDISSEMENT PAR CLASSE D'HABITATS DES PATURAGES SAISONNIERS	175
FIGURE VI-3 : CARTOGRAPHIE DE LA MOYENNE 2000-2013 DE DATES DE DEMARRAGES PHENOLOGIQUES PAR GROUPE DE CELLULES COMPOSANT LA TRAJECTOIRE PASTORALE DE MIGRATION ANNUELLE GABNA (REALISATION R. COURAULT, 2017)	178
FIGURE VII-1: MODELE CONCEPTUEL DE PRESENTATION DE LA DEMARCHE GENERALE OPEREE POUR LA PRESENTE ETUDE (REALISATION: R. COURAULT, 2018)	186
FIGURE VII-2: CARTOGRAPHIE DES UNITES PASTORALES DE LA COMMUNAUTE D'ELEVEURS DE RENNES GABNA ETUDIEE: SAISONS PASTORALES ET ZONES A INTERET PASTORAL (REALISATION R.COURAULT 2018)	189
FIGURE VII-3 : PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE: CONTOURS DE LA COMMUNAUTE D'ELEVEURS DE RENNES SEMI-DOMESTIQUES, FORMATIONS VEGETALES ASSOCIEES, ET LOCALISATION DE LA STATION METEOROLOGIQUE D'ABISKO. LA FIGURE PRESENTE EGALEMENT LA "COUPURE" DES DONNEES RASTER INDUITE PAR LA POSITION DE L'UNIQUE DALLE LANDSAT ETUDIEE (WRS 2: PATH 197; ROW 002)	191
FIGURE VII-4 : CARTOGRAPHIES DE L'EVOLUTION DU SEUIL DE NDVI >0.7 ENTRE 1990 ET 2017 POUR DEUX UNITES PASTORALES DE LA COMMUNAUTE D'ELEVEURS DE RENNES GABNA : AIRE DE VELAGE A GAUCHE ET PATURAGE DIT DE PRINTEMPS-HIVER A DROITE. (REALISATION R. COURAULT)	199
FIGURE VIII-1 : EXTRAIT DE LA BANDE PROCHE-INFRA-ROUGE D'UNE SOUS-SCENE LANDSAT ENTRANT DANS LA STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE ET LE DESIGN DES RELEVES FLORISTIQUES PAR TRANSECT (REALISATION R. COURAULT, 2018)	216

FIGURE VIII-2 : TRONÇON NORD-OUEST DU PROFIL DE VEGETATION REALISE A PARTIR DE LA TRAJECTOIRE MIGRATOIRE PRINCIPALE DES RENNES SEMI-DOMESTIQUES DE LA COMMUNAUTE GABNA (SOURCE: RENGIS 2.0; CORINE LAND COVER; REALISEE SOUS GRASS GIS ET R, R. COURAULT (2018).....	218
FIGURE VIII-3: TRONÇON NORD-OUEST DU PROFIL DE VEGETATION REALISE A PARTIR DE LA TRAJECTOIRE MIGRATOIRE PRINCIPALE DES RENNES SEMI-DOMESTIQUES DE LA COMMUNAUTE GABNA (SOURCE: RENGIS 2.0; CORINE LAND COVER; REALISEE SOUS GRASS GIS ET R, R. COURAULT (2018).....	219
FIGURE VIII-4: PHOTOGRAPHIE DE TERRAIN CENTRALISANT LA MAJEURE PARTIE DU MATERIEL UTILISE POUR LES RELEVES FLORISTIQUES ET LES MESURES ABIOTIQUES (CREDITS: R. COURAULT, 2015)	224
FIGURE VIII-5: PHOTOGRAPHIE DU MATERIEL DE TERRAIN UNE FOIS L'INVENTAIRE FLORISTIQUE INITIE. AU PREMIER PLAN: LE DEMARRAGE DU TRANSECT, AVEC LE METRE DE CHARPENTIER SERVANT A DELIMITER LES QUADRATS. CREDITS R. COURAULT 2016.....	225
FIGURE VIII-6: EXEMPLE DE FICHE DE RELEVÉ FLORISTIQUE (PARTIE INVENTAIRE) NUMERISE ET HABILLE POUR DESCRIPTION ET EXPLICATIONS AUPRES DES ETUDIANTS DE LICENCE DU PROJET ENVEXX (SORBONNE-UNIVERSITE), REALISATION R. COURAULT (2018)	227
FIGURE VIII-7: PHOTOGRAPHIE DES FEUILLETS D'ECHANTILLONS DE VEGETAUX HERBACES, PARTICULIEREMENT UTILE POUR LA RECONNAISSANCE VEGETALE ET LA CORRECTION DES IDENTIFICATIONS D'ESPECES POST-TERRAIN. CREDITS: R. COURAULT, 2018	230
FIGURE VIII-8: EXEMPLE ILLUSTRE DE LA METHODE PAR INTERCEPT COVER (SOURCE: UNIVERSITY OF IDAHO, VOIR LIEN URL CI-DESSOUS).....	231
FIGURE VIII-9: EXEMPLE DE RELEVÉ PAR INTERCEPT COVER NUMERISE. EN COLONNE, LES ESPECES VEGETALES RENCONTRES, LA HAUTEUR, LE DEBUT ET LA FIN DE LA PROJECTION DE LA COURONNE SUR LE TRANSECT. LES LIGNES REPRESENTENT LES INDIVIDUS. REALISATION: R. COURAULT (2018).....	232
FIGURE VIII-10: PHOTOGRAPHIE DU SPECTROMETRE JAZ-S (OCEANOPTICS) ET DE SON SPECTRALON BLANC POUR L'ETALONNAGE ENTRE CHAQUE PRISE DE MESURE RADIOMETRIQUE. CREDITS: R. COURAULT 2016	235
FIGURE VIII-11: SCHEMA RECAPITULATIF DU PROTOCOLE DE MESURES BIOTIQUES ET ABIOTIQUES EFFECTUEES LORS DES INVENTAIRES FLORISTIQUES (REALISATION R.COURAULT, 2018). LA STRATIFICATION DE LA VEGETATION N'ETANT PAS REPRESENTEE ICI, LA METHODE DE L'INTERCEPT COVER N'APPARAÎT DONC PAS.	236
FIGURE VIII-12: DESIGN DES RELEVES FLORISTIQUES ENVEXX (SU): DEUX TRANSECTS PAR 3 PIXELS LANDSAT, EN GRAPPE (REALISATION: H. POTIER, 2017)	238
FIGURE IX-1 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES FACTEURS PRIS EN COMPTE DANS LA STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE DES RELEVES FLORISTIQUES. DANS L'IDEAL, UNE CARTOGRAPHIE SYNTHETISANT CES FACTEURS, ET CEUX DISCUTES AU LONG DU CHAPITRE, AURAIT AMELIORE LE DEPLOIEMENT SUR LE TERRAIN (REALISATION R. COURAULT, 2015)	254
FIGURE IX-2 : CARTOGRAPHIE DES RELEVES DE TERRAIN REALISES AU LONG DU DOCTORAT, ET A L'AIDE DES ETUDIANT.E.S PARTICIPANT AU PROJET ENVEXX – SU, ET DE LA ZONATION DES PATURAGES SAISONNIERS DE LA COMMUNAUTE D'ÉLEVEURS DE RENNES GABNA (REALISATION, R. COURAULT, 2018)	256
FIGURE IX-3 : PHOTO DE LISIERE FORESTIERE EN TOUNDRA ARBUSTIVE (ABISKO). (CREDITS : COURAULT, 2015)	260
FIGURE IX-4 : LANDES RASE SECHE A ERICACEES (CREDITS : COURAULT, 2016)	261

FIGURE IX-5 : PHOTOGRAPHIE DE LA STRATE HERBACEE EN SOUS-BOIS CLAIR DE TOUNDRA ARBUSTIVE (CREDITS : COURAULT, 2016)	262
FIGURE IX-6 : PSEUDO-PRAIRIE A BUTTES A SPHAINES (PALSES) DANS DES SOLS SATURES EN EAU. (CREDITS : ETUDIANT.E.S ENVEXX)	262
FIGURE IX-7 : CAMEMBERT DE POURCENTAGES D'OCCUPATION DE SOLS CLC COMPARANT LE NOMBRE DE RELEVES FLORISTIQUES PAR CATEGORIES AUX SUPERFICIES DE CATEGORIES A L'ECHELLE DE LA COMMUNAUTE D'ELEVEURS DE RENNES GABNA	278
FIGURE IX-8 : SPECTRE BIOLOGIQUE POUR LES RELEVES DU DOCTORAT AVEC STRATE HAUTE DE VEGETATION	281
FIGURE IX-9 : SPECTRES BIOLOGIQUES DE LA STRATE HERBACEE, RELEVES ENVEXX	285
FIGURE IX-10 A, B, C, D, E: CONTRIBUTION AU BIOVOLUME DES VEGETAUX SELON LEUR TYPE DE FEUILLAGE, DANS DIFFERENTES CATEGORIES D'OCCUPATION DU SOL	288
FIGURE X-1 : VALEURS PASTORALES SAISONNIERES DES RELEVES, PAR ORDRE CROISSANT	305
FIGURE X-2 : CARTOGRAPHIE DES VALEURS PASTORALES SAISONNIERES ACTUELLES A L'ECHELLE DE L'ENSEMBLE DES INVENTAIRES FLORISTIQUES REALISES EN 2015-2016 (REALISATION R. COURAULT ; SOURCE : TERRAINS DE THESE, PROJET ENVEXX S-U)	306
FIGURE X-3 : ECART-TYPE DES VALEURS PASTORALES SAISONNIERES, PROJET ENVEXX (COLLEGE DES LICENCES, SORBONNE-UNIVERSITE)	308
FIGURE X-4 : EFFET DE CONCURRENCE OU DE FACILITATION DU COUVERT LIGNEUX SUR LES RESSOURCES PASTORALES	309
FIGURE X-5 : LOCALISATION DE L'AIRE DE VELAGE DES RENNES FEMELLES DE LA COMMUNAUTE GABNA, STATIONS METEOROLOGIQUES ET EXEMPLE DU RASTER INITIAL DE TEMPERATURES MOYENNES DE MAI (1970-2000 ; WOLRDCLIM 2.0, FICK, HIJMANS ET AL. 2015)	314
FIGURE X-6A ET B : BOITE A MOUSTACHE DES TEMPERATURES MOYENNES DES MOIS DE MAI ET DE JUIN 1970-2000 ET 2041-2050 A L'ECHELLE DE L'AIRE DE VELAGE DE LA COMMUNAUTE GABNA (REALISATION : R. COURAULT, 2018)	317
FIGURE X-7 : BOITES A MOUSTACHE DES TEMPERATURES MOYENNES PASSES (1970-2000, EN VERT) ET FUTURES (2041-2050, EN ORANGE) POUR LES HABITATS DE TOURBIERE (7A ET 7B) ; FORETS DE FEUILLUS (7C ET 7D) ; LANDES ET BRUYERES (7E ET 7F)	318
FIGURE X-8 : CARTOGRAPHIES DES TEMPERATURES PASSES (1970-2000, FIGURE 8A) ET FUTURES (2041-2050, FIGURE 8B) RESUMEES PAR HABITAT ECOLOGIQUE A L'ECHELLE DE L'AIRE DE VELAGE DES RENNES FEMELLES DE LA COMMUNAUTE D'ELEVEURS GABNA	319
FIGURE XI-1 : REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE DU DOMAINE VITAL D'APRES LES DONNEES TELEMETRIQUES DE RENNES D'HARDANGERVIDDA (CALCULEE PAR LA METHODE DES DENSITES DE KERNEL, VOIR CHAPITRE XII) ET LOCALISATION DES STATIONS METEOROLOGIQUES (RAULAND, ET HØYDALSMO) ; SOURCES : CAGNACCI, FOCARDI ET AL., 2015 ; NOAA-NCEP ; REALISATION : R. COURAULT, 2018)	334
FIGURE XI-2 : REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE PONCTUELLE ET SAISONNIERE DES DONNEES GPS DE RENNES SAUVAGES DU PLATEAU D'HARDANGERVIDDA (NORVEGE ; SOURCE : CAGNACCI, FOCARDI ET AL. 2016). REALISATION : R. COURAULT, 2018	335
FIGURE XI-3 : DIAGRAMME DES RELATIONS STATISTIQUES SIGNIFICATIVES (P-VALUE <0,05) ENTRE LES DIFFERENTES VARIABLES ETUDIEES DANS L'ANALYSE A L'ECHELLE DE LA PERIODE HIVERNALE ETUDIEE. LES COULEURS INDIQUENT LE SENS DES RELATIONS	

STATISTIQUES, L'ÉPAISSEUR DES FLECHES INDIQUE L'INTENSITE DE LA RELATION MODELISEE (TRAIT EPAIS = $R > 0,3$; TRAIT FIN = $R < 0,3$; REALISATION R. COURAULT, 2018).....	337
FIGURE XII-1: MODELE CONCEPTUEL DE TRAITEMENT DES DONNEES PAR LA BOITE A OUTILS GRID, UTILISANT ICI LE MODEL BUILDER D'ARCMAP 10.2 (REALISATION R. COURAULT, 2017).....	350
FIGURE XII-2: COMPARAISON ENTRE LES DOMAINES VITAUX BIMENSUELS DES RENNES AU COURS DE LA SAISON VEGETATIVE (AVRIL A AOUT) ET SUPERFICIES DE CATEGORIES D'HABITATS ECOLOGIQUES CORINE LAND COVER 2006. LES POURCENTAGES ENCERCLES EN ORANGE CORRESPONDENT AUX HABITATS SURREPRESENTES DANS LE TEST DU Khi^2 (SOURCES: EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY; ADEHABITAT PACKAGE, CALLENGE, 2006; GRID-TOOLBOX; REALISATION R. COURAULT, 2017).....	357
FIGURE XII-3: EXEMPLES CARTOGRAPHIQUES DES AIRES VITALES BIMENSUELLES DE RENNES SAUVAGES ECHANTILLONNES PAR GRID, ET REPRESENTATION DES FACTEURS BIO-GEO-PHYSIQUES, POUR LES AIRES DE LA PREMIERE QUINZAINE, D'AVRIL 2008 ET LA DEUXIEME QUINZAINE DE MAI 2009, REALISATION, R.COURAULT 2018.....	359
FIGURE XII-4: JEU DE CARTES MONTRANT LES DENSITES ESTIMEES DE RENNES SAUVAGES EN UTILISANT LA TECHNIQUE DE LA KERNEL UTILIZATION DISTRIBUTION (CALLENGE ET AL., 2006), DANS UN GRADIENT DE COULEUR ALLANT DU BLEU (FAIBLE DENSITE) AU ROUGE (FORTE DENSITE) CARTE A: 1 ^{ERE} QUINZAINE D'AVRIL 2008; B. 1 ^{ERE} QUINZAINE D'AVRIL 2009; C. 2 ^{EME} QUINZAINE DE MAI 2008; D. 2 ^{EME} QUINZAINE DE MAI 2009; E. 2 ^{EME} QUINZAINE DE JUILLET 2007; F. 2 ^{EME} QUINZAINE DE JUILLET 2009 (SOURCE DU FOND DE CARTE: ESRI DATAGLOBE, CREDITS: R. COURAULT, 2017)	362

Liste des tableaux

TABLEAU II-1 : TYPES DE COMPOSITION PAYSAGERE DANS LES TERRITOIRES DES COMMUNAUTES D'ELEVEURS D'APRES LA CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE (CAH). LES POURCENTAGES CORRESPONDENT AUX BARYCENTRES DES CLASSES DE LA CAH (SOURCES : CLC 2012, RENGIS 2.0).....	57
TABLEAU II-2 : OCCUPATION DU SOL EN % DANS LES POLYGONES CORRESPONDANT AU QUART DES SURFACES LES PLUS ET LES MOINS FRAGMENTEES DU TERRITOIRE DE LAPONIE SUEDOISE (EN GRIS CLAIR, COMBINAISON SURREPRESENTEE, EN GRIS FONCE COMBINAISON SOUS-REPRESENTEE, D'APRES LE TEST DU KHI ² , P<0,0001) (SOURCES : CLC 2012, DIVA-GIS, SKARIN ET ÅHMAN, 2014)	60
TABLEAU III-5 : TEST DE PETTITT ET P-VALUES ASSOCIEES POUR LES INDICES DE CIRCULATION ET LES VARIABLES CLIMATIQUES DE LA STATION D'ABISKO (1950-2013)	74
TABLEAU III-6 : TENDANCES TEMPORELLES LINEAIRES DES INDICES ATMOSPHERIQUES ET DES VARIABLES CLIMATIQUES ANNUELLES ET SAISONNIERES	75
TABLEAU III-7 : ECHANTILLON DES MATRICES DE CORRELATIONS ENTRE VARIABLES ATMOSPHERIQUES, CLIMATIQUES LOCALES, ET DEMOGRAPHIE DU RENNE. « DJF » : DECEMBRE-JANVIER-FEVRIER ; « DJF_TCUOVD » : MOYENNE HIVERNALE T°C A CUOVDDATMOHKKI ; « DFJ_PABISKO » : CUMULS HIVERNAUX DE PRECIPITATIONS (MM) A ABISKO ; « AN_ABISKO_NBDAYTMAX<-5 » : NOMBRE DE JOURNEES PAR AN OU LA T°C MAXI EST INFERIEURE A -5°C A ABISKO	76
TABLEAU IV-1 : DESCRIPTION DES DONNEES UTILISEES DANS L'ETUDE	91
TABLEAU IV-2 : SAISONS CALENDRAIRES SAAMIS ET « OCCIDENTAUX » (SOURCES : PARLEMENT SAAMI-SAMETINGET ; DICTIONNAIRE FREELANG, DEVERRIERE, 2009, ET INSTITUT DE LINGUISTIQUE FINLANDAIS).....	95
TABLEAU IV-3 : NOMBRE DE CORRELATIONS SIGNIFICATIVES ENTRE LA DEMOGRAPHIE DES RENNES, LES DECOUPAGES TEMPORELS ET LES VARIABLES CLIMATIQUES. SOURCES : SAAMI PARLIEMENT, NCEP (NOAA), NCDC (NOAA), REALISATION R. COURAULT (2016)	103
TABLEAU IV-4 : MATRICE DES CORRELATIONS ENTRE LES VARIABLES SAISONNALISEES ET LES COMPTAGES DE RENNES. EN GRAS : P<0,05; GRAS SOULIGNE : P<0,001. NAO « OSCILLATION NORD-ATLANTIQUE » ; EA/WR « OSCILLATION EST-ATLANTIQUE OUEST-RUSSE, SCAND « OSCILLATION SCANDINAVE » ; GIESSE « PLEINE SAISON ESTIVALE » ; ČAKCAGIESSE « DEBUT D'AUTOMNE ». SOURCES : SAAMI PARLIEMENT, NCDP (NOAA), NCDC (NOAA) ; REALISATION : R. COURAULT (2016)	105
TABLEAU V-1 : DESCRIPTION DES DONNEES ET METADONNEES DE L'ETUDE.....	117
TABLEAU V-2 : SELECTION DES ECHANTILLONS DE COUVERTURES DE SOLS VEGETALISES ET NON VEGETALISES (CORINE LAND COVER 2006) POUR L'EXTRACTION DES SERIES TEMPORELLES MODIS 13Q1, SOURCE : CORINE LAND COVER 2006, AGENCE EUROPEENNE DE L'ENVIRONNEMENT, REALISATION : R.COURAULT.....	120
TABLEAU V-3 : TABLEAU RECAPITULATIF DE DIFFERENTS PARAMETRES ANNUELS ISSUS DES SERIES TEMPORELLES DE NDVI ET DES VARIABLES ATMOSPHERIQUES ET CLIMATIQUES: DEGRADE DE VERT : REPRESENTATION DES DONNEES DE DATE MOYENNE DE PIC NDVI PAR COLONNE DU PLUS TARDIF (BLANC) AU PLUS PRECOCE (VERT). CELLULES ROUGE ET BLEU : OBSERVATIONS (ANNEES) ATMOSPHERIQUES OU CLIMATIQUES SUPERIEURES A LA MOYENNE 2000-2017 (ROUGE), INFERIEURES A LA MOYENNE DE LA PERIODE D'ETUDE (BLEU).	137

TABLEAU V-4 : TABLEAU RECAPITULATIF DE LA SIGNIFICATIVITE DES TESTS DE TENDANCE DE MANN-KENDALL, NIVEAUX DE CONFIANCE, ET VALEURS EXPRIMEES PAR LA REGRESSION LINEAIRE SIMPLE ENTRE LA PERIODE D'ETUDE ET L'EVOLUTION DES VALEURS DE NDVI PAR ECHANTILLON D'HABITAT VEGETALISE POUR LA DERNIERE QUINZAINE DE MAI (DEMARRAGE PHENOLOGIQUE) ET LA DERNIERE QUINZAINE DE JUILLET (PIC PHENOLOGIQUE). SOURCE : MODIS 13Q1, CORINE LAND COVER, REALISATION : R. COURAULT (2018).....	139
TABLEAU V-5 : TABLEAU RECAPITULATIF DE LA SIGNIFICATIVITE DES TESTS DE TENDANCE DE MANN-KENDALL, L'INTERPRETATION DES INTERVALLES DE CONFIANCE, ET VALEURS EXPRIMEES PAR LA REGRESSION LINEAIRE SIMPLE ENTRE LA PERIODE D'ETUDE ET LES VARIABLES ATMOSPHERIQUES ET CLIMATIQUES SAISONNIERES (SOURCE : NOAA, ABISKO METEOROLOGICAL STATION, SWEDISH SAAMI PARLIAMENT, REALISATION : R. COURAULT (2018)	140
TABLEAU V-6 : MATRICE DE CORRELATION PAR RANGS DE SPEARMAN ENTRE LES VARIABLES ATMOSPHERIQUES (INDICE NAO) ET LES VARIABLES CLIMATIQUES (TEMPERATURES) EN FONCTION DES SAISONS PASTORALES SAAMIES ETUDIEES (REALISATION : R. COURAULT, 2018)	141
TABLEAU V-7 : EXTRAIT DE LA MATRICE DE CORRELATIONS PAR RANGS DE SPEARMAN ENTRE VARIABLES ATMOSPHERIQUES ET NDVI ECHANTILLONS D'HABITATS ECOLOGIQUES, LORS DU DEMARRAGE ET DU PIC PHENOLOGIQUES. LES CORRELATIONS INDIQUEES SONT SUPERIEURES A R=0,4 ET FORTEMENT SIGNIFICATIVES (P <0,05). REALISATION R. COURAULT (2018)	141
TABLEAU V-8 : TABLEAU RECAPITULATIF DE LA VARIANCE STATISTIQUE EXPRIMEE PAR LES MODELES DE REGRESSION LINEAIRE MULTIPLES POUR DECRIRE, EXPLIQUER ET PREDIRE LA VARIABILITE DEMOGRAPHIQUE DES QUATRE CATEGORIES DE RENNES SEMI-DOMESTIQUES (MALES, FEMELLES, FAONS, TOTAL CHEPTELS), AINSI QUE DES VARIABLES BIOCLIMATIQUES CONTRIBUANT STATISTIQUEMENT DANS LES MODELES (REALISATION R. COURAULT (2018).	143
TABLEAU VI-1 : SERIES TEMPORELLES, DONNEES SPATIALES ACQUISES ET METADONNEES ASSOCIEES	159
TABLEAU VI-2 : CHOIX ET DENOMINATION DES ENTITES SPATIALES DES PATURAGES SAISONNIERS. LES CELLULES FUSIONNEES DE LA COLONNE DE DROITE CORRESPONDENT AUX ENTITES SPATIALES AYANT EXACTEMENT LES MEMES CONTOURS.....	161
TABLEAU VI-3 : RECAPITULATIF DES PRETRAITEMENTS D'EXTRACTION DES DESCRIPTEURS A PARTIR D'UNE GRILLE VECTEUR	166
TABLEAU VI-4 : JEUX DE DONNEES TESTES POUR LA PART EXPLICATIVE DES HABITATS CORINE LAND COVER SUR LES DISTRIBUTIONS D'AMPLITUDES NDWI ET EFFECTIFS POUR LES OBSERVATIONS/PIXELS RENSEIGNES	167
TABLEAU VI-5 : LISTE DES TRAITEMENTS EFFECTUES SELON LES ECHELONS GEOGRAPHIQUES ETUDIES.....	168
TABLEAU VI-6 : VALEURS CENTRALES ET ECART-TYPES ARRONDIS DES DATES MOYENNES DE VERDISSEMENT PAR HABITAT ECOLOGIQUE (ECHELLE REGIONALE).....	170
TABLEAU VI-7 : MATRICE DE CORRELATION DE SPEARMAN SUR LE JEU DE DONNEES « AMPLI_NDWI > 0,2 » ; ACHI : ARCTIC CLIMATE HARSHNESS INDEX ; * P-VALUE <0.0001	171
TABLEAU VI-8 : MOYENNES 2000-2013 DES DATES DE DEMARRAGE PHENOLOGIQUE DES HABITATS ECOLOGIQUES COMPOSANT LES DIFFERENTS PATURAGES SAISONNIERS DE LA COMMUNAUTE GABNA	173
TABLEAU VI-9 : VALEURS CENTRALES ET ECART-TYPES DE LA SERIE TEMPORELLE 2000-2013 DES MOYENNES DE DATES DE DEMARRAGE PAR HABITAT ECOLOGIQUE POUR LES TRAJECTOIRES PASTORALES DE LA COMMUNAUTE GABNA	176
TABLEAU VII-1 : METADONNEES DES JEUX DE DONNEES UTILISES AU COURS DE L'ETUDE	187
TABLEAU VII-2 : POURCENTAGES D'OCCURRENCE DES PLANTES VASCULAIRES REPRESENTATIVES DES FORMATIONS VEGETALES LES PLUS PRESENTES A L'ECHELLE DE LA COMMUNAUTE D'ELEVEURS DE RENNES ETUDIEE. LE TABLEAU RECAPITULE LES POURCENTAGES DE	

PRESENCE DE CHACUNE DES ESPECES, AGREGÉES EN FORMATION VEGETALE AU SEIN DE CHACUN DES SEUILS DE VALEUR NDVI TESTE. CES PRESENCES PAR SEUILS SONT ICI MOYENNEES ENTRE LES TROIS ANNEES D'ETUDE (1990, 2006 ET 2017) (REALISATION R. COURAULT, 2018).....	194
TABLEAU VII-3 : POURCENTAGES DE SUPERFICIES DE TERRAIN DE LA COMMUNAUTE D'ELEVEURS DE RENNES SEMI-DOMESTIQUES GABNA COMPRIS DANS LES SEUILS DE NDVI CALCULES POUR LES TROIS ANNEES DU SUIVI DIACHRONIQUE (REALISATION R. COURAULT, 2018).....	195
TABLEAU VII-4 : EVOLUTION EN POURCENTAGE DES SUPERFICIES DE PATURAGES SAISONNIERS ET DES ZONES A INTERET PASTORAL DE LA COMMUNAUTE D'ELEVEURS DE RENNES SEMI-DOMESTIQUES GABNA COMPRIS DANS LES SEUILS DE NDVI CALCULES POUR LES TROIS ANNEES DU SUIVI DIACHRONIQUE (REALISATION R. COURAULT, 2018).....	197
TABLEAU VII-5 : TABLEAU RECAPITULATIF DES ECARTS MENSUELS AUX NORMALES DE LA PERIODE D'ETUDE (1988-2017) POUR LES TROIS ANNEES DONT ON A ETUDIE L'EVOLUTION DES SURFACES EN NDVI (1990, 2006 ET 2017). EN GRIS SONT FIGURES LES MOIS DE PERIODE VEGETATIVE (REALISATION R. COURAULT, 2018).....	200
TABLEAU VII-6 : TABLEAU RECAPITULATIF DE L'EVOLUTION LINEAIRE SUPPOSEE DES TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES DE LA STATION METEOROLOGIQUE D'ABISKO AU COURS DE LA PERIODE 19988-2017. LE TABLEAU COMPORTE LE SIGNE D'EVOLUTION DU MODELE LINEAIRE CALCULE (POSITIF, NEGATIF, AUCUNE EVOLUTION) ; LA VARIANCE EXPLIQUANT LES EFFETS DU TEMPS SUR LES TEMPERATURES MENSUELLES ETUDIEES, ; AINSI QUE LA MAGNITUDE DE LA TENDANCE, EXPRIMEE EN °C, QUI PERMET DE QUANTIFIER L'EVOLUTION MODELISEE DES TEMPERATURES (R. COURAULT, 2018).....	201
TABLEAU VII-7 : TABLEAU DES RESULTATS DES TESTS DE MANN-KENDALL CALCULE POUR LES TEMPERATURES MENSUELLES MOYENNES DE LA STATION METEOROLOGIQUE D'ABISKO SUR LA PERIODE 1988 – 2017. LE TABLEAU PRESENTE LA P-VALUE DE CHAQUE COEFFICIENT DE MANN-KENDALL CALCULE, ET LE NIVEAU DE CONFIANCE ASSOCIE EN FONCTION DE QUATRE INTERVALLES DE CONFIANCE (REALISATION : R. COURAULT, 2018).....	202
TABLEAU IX-1 : CRITERES D'ECHANTILLONNAGE STRATIFIE OPTIMUM.....	257
TABLEAU IX-2 : DISCRETISATION DES VARIABLES D'ALTITUDE, D'ORIENTATION ET DE PENTE.....	258
TABLEAU IX-3 : NOMBRE D'ESPECES VEGETALES BROUTEES PAR LES RENNES, SELON LEUR TYPE DE FEUILLAGE (SOURCE : LEFRERE, 2003 ; TELABOTANICA).....	272
TABLEAU IX-4 : TABLEAU RECAPITULATIF DES SUPERFICIES D'HABITATS ECOLOGIQUES CLC A DIFFERENTES ECHELLES D'ETUDES : DE GAUCHE A DROITE, COMMUNAUTE GABNA, SOUS-SCENE LANDSAT ET RELEVES DE TERRAIN (NOMBRE ET SUPERFICIE ECHANTILLONNEE SUR LE TERRAIN).....	276
TABLEAU IX-5 : REPARTITION DES CLASSES D'ORIENTATION DES PENTES ET D'ALTITUDE DANS LE TERRITOIRE DE LA COMMUNAUTE GABNA ET DANS L'ECHANTILLON DE RELEVES FLORISTIQUES ET PAYSAGERS.....	278
TABLEAU IX-6 : SPECTRES BIOLOGIQUES SELON LES CONTRIBUTIONS SPECIFIQUES AU BIOVOLUME DE LA STRATE HERBACEE (RELEVES DOCTORAT).....	283
TABLEAU IX-7 : MATRICE DE CORRELATION PAR RANGS DE SPEARMAN ENTRE TAUX DE RECOUVREMENT ET FREQUENCE DES LIGNEUX HAUTS ET BAS ET VALEURS DE NDVI (LANDSAT, MODIS) RENCONTREE POUR CHAQUE CENTROÏDE DE PIXEL ECHANTILLONNE SUR LE TERRAIN.....	291
TABLEAU X-1 : DU TABLEAU DES ESPECES PATUREES PAR LES RENNES SEMI-DOMESTIQUES (SOURCE : LEFRERE, 2003).....	300
TABLEAU XI-1 : PRESENTATION DES DONNEES ET METADONNEES UTILISEES DANS L'ETUDE (REALISATION : R. COURAULT, 2018)..	330

TABLEAU XI-2 : EXEMPLE DE JEU DE DONNEES FINAL, A L'ECHELLE INTER-MENSUELLE (ICI LE MOIS DE JANVIER 2010). REALISATION R.COURAULT, 2018	333
TABLEAU XI-3 : MATRICE DE CORRELATIONS PAR RANGS DE SPEARMAN, CALCULEE A L'ECHELLE DE L'INTEGRALITE DE LA PERIODE HIVERNALE D'ANALYSE (365 JOURS). LES COEFFICIENTS EN GRAS INDIQUENT UNE SIGNIFICATIVITE DES RELATIONS ELEVEE (P-VALUE < 0,05), REALISATION R. COURAULT (2018)	336
TABLEAU XI-4 : POURCENTAGES DE CORRELATIONS SIGNIFICATIVES (P-VALUE <0,05) SUR LE TOTAL DES CORRELATIONS CALCULEES, ENTRE LATITUDE ET LONGITUDE ET FACTEURS EXPLICATIFS, PAR MOIS. CES CHIFFRES NE PRENNENT PAS EN COMPTE L'INTENSITE DES RELATIONS STATISTIQUES (R) NI LE SENS DE LA RELATION (POSITIVE, NEGATIVE). REALISATION, R. COURAULT (2018)...	339
TABLEAU XI-5 : POURCENTAGES DE RELATIONS SIGNIFICATIVES (SUR LE TOTAL DES CORRELATIONS CALCULEES) ENTRE LATITUDE ET LONGITUDE DES RENNES ET L'INDICE NAO (COLONNE GAUCHE DE CHAQUE MOIS ET AU TOTAL DE TOUS LES MOIS) ; LATITUDE ET LONGITUDE DES RENNES ET VARIABLES CLIMATIQUES LOCALES D'AUTRE PART (COLONNE DROITE DE CHAQUE MOIS ET AU TOTAL DE TOUS LES MOIS), REALISATION R.COURAULT (2018)	340
TABLEAU XI-6 : POURCENTAGES DE RELATIONS SIGNIFICATIVES (SUR LE TOTAL DES CORRELATIONS CALCULEES) ENTRE LATITUDE ET LONGITUDE DES RENNES SAUVAGES ET VARIABLES CLIMATIQUES LOCALES. REALISATION R. COURAULT, 2018	340
TABLEAU XII-1: JEUX DE DONNEES ETUDIES ET METADONNEES ASSOCIEES (REALISATION R. COURAULT)	347
TABLEAU XII-2: ERREUR CUMULEE, EN POURCENTAGES, ENTRE LE JEU DE DONNEES CORINE LAND COVER BRUT (RESOLUTION SPATIALE DE 100M ²) ET LE JEU DE DONNEES EXTRAIT PAR LA BOITE A OUTILS GRID (RESOLUTION SPATIALE DE 250 M ²), POUR LA DEUXIEME QUINZAINE D'AVRIL (REALISATION R.COURAULT 2017)	354
TABLEAU XII-3: MATRICE DE CORRELATIONS PAR RANG DE SPEARMAN ENTRE LES DENSITES DE RENNES ESTIMEES PAR AIRE VITALE ANNUELLE ET LES FACTEURS EXPLICATIFS TESTES. LES RHOS DE SPEARMAN > 0.2 ET AYANT UNE P-VALUE < 0.0001 SONT ICI REPRESENTES (REALISATION R. COURAULT 2017)	361

Liste des annexes

ANNEXES	412
Annexe 1 : Encadrés bibliographiques complétant le chapitre I	412
Annexe 2: Notes à l'issue de la première réunion avec le Parlement saami, Kiruna, août 2015. Dans la continuité, discussion de la conférence "Arctic ungulate conference", en Norvège, à laquelle j'ai pu assister dans les jours suivants	429
Annexe 3 : Localisation en UTM 34N des relevés floristiques (inventaires et points paysagers) et descripteurs géographiques associés.....	433
Annexe 4a : Spectres biologiques basés sur les inventaires floristiques effectués au cours du doctorat	438
Annexe 4b : Spectres biologiques basés sur les inventaires floristiques effectués au cours de la mission Envexx (Sorbonne-Université, Collège des Licences)	438
Annexe 4c : Pseudo-spectres biologiques en strate haute, basés sur les Intercept Cover effectués au cours du doctorat.....	439
Annexe 4d : Pseudo-spectres biologiques en strate haute basés sur les Intercept Cover effectués au cours de la mission Envexx (Sorbonne-Université, Collège des Licences).....	439
Annexe 5 : Tableau des espèces pâturables par les rennes semi-domestiques (C. Lefrère, 2003) .	440
Annexe 6 : Boîtes de dispersion des relevés floristiques, sur les espèces classifiées selon le type de feuillage. Statistiques exprimées en pourcentages, prenant en compte les relevés du doctorat et excluant les données du projet Envexx (SU, Collège des Licences)	442
Annexe 7, semaine d'école doctorale SLU en août 2015, "Connecting science and local communities in Rangifer research"	443
Annexe 8: Prise de notes et retranscription rapide après discussions avec l'homme du circuit de traîneau à chiens ("smugler"), activité effectuée à la fin décembre 2016 à l'occasion du terrain d'hiver à Kiruna.....	461

Bibliographie

AANES, Ronny, SÆTHER, Bernt-Erik, SMITH, Fiona M., *et al.* The Arctic Oscillation predicts effects of climate change in two trophic levels in a high-arctic ecosystem. *Ecology Letters*, 2002, vol. 5, no 3, p. 445-453.

AGENCE EUROPEENE DE L'ENVIRONNEMENT, 2011, *Landscape fragmentation in Europe*. Rapport conjoint AAE-OFEV, 87 p.

BERNER, Jim et HEAL, O. W. Arctic Climate Impact Assessment-Scientific Report. Cambridge University Press, 2005.

ANDERSSON, Folke (ed.). Coniferous forests. Elsevier, 2005.

ANDERSSON, Kajsa. L'image du Sápmi II: études comparées. Örebro University, 2013.

ANSHELM J., 2013, *Kraftproduktion och miljöopinion: Kritiken av vindkraftens miljöpåverkan och den som riktats mot övriga kraftslag*. Rapport 6571, Projet Vindval, Stockholm, Naturvårdsverket, 77 p.

AHTI, Teuvo, et al. Nordic lichen flora. Bohuslän '5, 1999.

AMBAUM, Maarten HP, HOSKINS, Brian J., et STEPHENSON, David B. Arctic oscillation or North Atlantic oscillation?. *Journal of Climate*, 2001, vol. 14, no 16, p. 3495-3507.

ANTONIADOU, Theodora, BESSE, Philippe, FOUGÈRES, Anne-Laure, *et al.* L'Oscillation Atlantique Nord (NAO) et son influence sur le climat européen. *Revue de statistique appliquée*, 2001, vol. 49, no 3, p. 39-60.

ANTTONEN M., KUMPULA J., COLPAERT A., 2011, Range selection by semi-domesticated reindeer (*Rangifer tarandus tarandus*) in relation to infrastructure and human activity in the boreal forest environment, Northern Finland, *Arctic*, Vol. 64, n° 1, p. 1-14.

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

ARNOULD P., 2006, Biogéographie et changement global: la valse des biomes. *Historiens et géographes*, n° 395, p. 95-109.

ASSESSMENT, Arctic Climate Impact. Impacts of a warming Arctic-Arctic climate impact assessment. Impacts of a Warming Arctic-Arctic Climate Impact Assessment, by Arctic Climate Impact Assessment, pp. 144. ISBN 0521617782. Cambridge, UK: Cambridge University Press, December 2004., 2004, p. 144.

AYATS J.F., DELFOSSE C., PLUVINAGE J., PORCHER J. (Eds), 2018. Eloge de l'élevage...Mais quel élevage ? N° spécial de la revue *Pour*.

BARBIER, René. La recherche action. Paris : Anthropos, 1996.

BARNSTON, Anthony G. et LIVEZEY, Robert E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly weather review*, 1987, vol. 115, no 6, p. 1083-1126.

BARTHELEMY, Hélène, STARK, Sari, et OLOFSSON, Johan. Strong responses of subarctic plant communities to long-term reindeer feces manipulation. *Ecosystems*, 2015, vol. 18, no 5, p. 740-751.

BECHET B., LE BISSONNAIS Y., RUAS A. (Eds), 2017, *Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols, Déterminants, impacts et leviers d'action*. INRA (France), 609 p.

BECK, Pieter SA, ATZBERGER, Clement, HØGDA, Kjell Arild, et al. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI. *Remote sensing of Environment*, 2006, vol. 100, no 3, p. 321-334.

BERQUE, Augustin. Cinq propositions pour une théorie du paysage. Editions Champ Vallon, 1994.

BERTRAND, Georges et DOLLFUS, Olivier. Le paysage et son concept. *L'espace géographique*, 1973, vol. 2, no 3, p. 161-163.

BERTRAND, Georges. Pour une étude géographique de la végétation. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest. Sud-Ouest Européen*, 1966, vol. 37, no 2, p. 129-144.

BIGNERT, Anders, ODSJÖ, Tjelvar, et RÄIKKÖNEN, Jannikke. Time trends of metals in liver and muscle of reindeer (*Rangifer tarandus*) from northern and central Lapland, Sweden, 1983-2005. 2007.

BIROT, Pierre. Les formations végétales du globe. 1965.

BJORKMAN, Anne D., MYERS-SMITH, Isla H., ELMENDORF, Sarah C., *et al.* Plant functional trait change across a warming tundra biome. *Nature*, 2018, p. 1.

BONNEFOY, Cyril, QUÉNOL, Hervé, BONNARDOT, Valerie, *et al.* Temporal and spatial analyses of temperature in a French wine-producing area: the Loire Valley. *International Journal of Climatology*, 2013, vol. 33, no 8, p. 1849-1862.

.

BOKHORST, Stef F., BJERKE, Jarle W., TØMMERVIK, Hans, *et al.* Winter warming events damage sub-Arctic vegetation: consistent evidence from an experimental manipulation and a natural event. *Journal of Ecology*, 2009, vol. 97, no 6, p. 1408-1415.

BOKHORST, S., TØMMERVIK, H., CALLAGHAN, Terry V., *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*, 2012, vol. 81, p. 18-25.

BORTOLAMIOL, Sarah, COHEN, Marianne, JIGUET, Frederic, *et al.* Chimpanzee non-avoidance of hyper-proximity to humans. *The Journal of Wildlife Management*, 2016, vol. 80, no 5, p. 924-934.

BOUZILLÉ, Jan-Bernard. *Connaissance de la biodiversité végétale*. Lavoisier, 2014

BRAQUE, René. *Biogéographie des continents*. Paris : Masson, 1988.

BRÄNNLUND, Isabelle et AXELSSON, Per. Reindeer management during the colonization of Sami lands: A long-term perspective of vulnerability and adaptation strategies. *Global Environmental Change*, 2011, vol. 21, no 3, p. 1095-1105.

BRIENS S., GADELLI K., KYLHAMMAR M., ROUE M., WALECKA M. (Org.), 2014. Conférence, BOREALISME, Première Université doctorale d'hiver franco-suédoise, Abisko, Suède

BUSETTO, Lorenzo et RANGHETTI, Luigi. MODISstp: An R package for automatic preprocessing of MODIS Land Products time series. *Computers & Geosciences*, 2016, vol. 97, p. 40-48.

CABOURET M., 1986, La délimitation des frontières terrestres dans le nord de la Scandinavie et en Finlande, *Norvège*, n° 130, p. 137-150.

CAGNACCI, Francesca, FOCARDI, Stefano, GHISLA, Anne, et al. How many routes lead to migration? Comparison of methods to assess and characterize migratory movements. *Journal of Animal Ecology*, 2016, vol. 85, no 1, p. 54-68.

CANNOBIO E., 2014. De l'Alpe en Laponie : regards croisés sur l'espace pastoral, in Guichard-Anguis S., Frérot A.M. et Da Lage A. (Eds), *Natures, miroirs des hommes ?* Paris, Harmattan, Collection Géographie et Culture, p. 127-144.

CALAS, Christophe. Concepts et méthodes pour le météorologiste: Les savoirs: modèles conceptuels et données disponibles. Météo-France, 2013.

Calenge, C. (2011). Home range estimation in R: the adehabitatHR package. Office national de la chasse et de la faune sauvage, Saint Benoist, Auffargis, France.

CARSON M., PETERSON G. (Eds), 2016, *Arctic Resilience Report*. Arctic Council, Stockholm Environment Institute and Stockholm Resilience Centre, Stockholm, 240 p.
<http://www.arctic-council.org/arr>.

CHARLOT E., 2016, *L'élevage de rennes face aux changements d'occupation du sol en Laponie*, mémoire de M1, EDTS-Geodep, Université Paris Sorbonne, 76 p.

CHARTIER D., 2014 ; L'imaginaire du Nord et l'invention de néologismes: la nordicité et l'hivernité culturelles, Conférence, BOREALISME, Première Université doctorale d'hiver franco-suédoise, Abisko, Suède.

CHEN, Yaoliang, LU, Dengsheng, LUO, Geping, et al. Detection of vegetation abundance change in the alpine tree line using multitemporal Landsat Thematic Mapper imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, vol. 36, no 18, p. 4683-4701.

CHERNOKIAN R., ROBERT S., 2014, Les interactions homme-milieux; questions et pratiques de la recherche en environnement, Editions Quaé, 180 p.

CHRISTOPHERSON, Robert W., HALL, Prentice, et THOMSEN, Charles E. Introduction to Physical Geography. Montana, 2012.

CLUTTON-BROCK, T. H., GUINNESS, F. E., et ALBON, S. D. The costs of reproduction to red deer hinds. *The Journal of Animal Ecology*, 1983, p. 367-383.

COGOS S., ROUE M.M., ROTURIER S., 2017, Saami place names and maps: transmitting knowledge of a cultural landscape in contemporary contexts, *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 49(1), 43-51

COHEN M, VARGA D, VILA J, BARRUSSAUD E, 2011, A multi-scale and multi-disciplinary approach to monitor landscape dynamics: A study case in the *Catalan* pre-Pyrenees (Spain), *Geographical Journal*, Vol 177 (1), p. 79-91.

COHEN, M. éditeur. La brousse et le berger. Une approche interdisciplinaire de l'embroussaillage des parcours. Espace et milieux. CNRS Édition, Paris, France, 2003.

COHEN, Marianne, BORTOLAMIOL, Sarah, et COURAULT, Romain. Un débat ancien, des questions nouvelles. 2017.

COMAS-BRU, Laia et MCDERMOTT, Frank. Impacts of the EA and SCA patterns on the European twentieth century NAO–winter climate relationship. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2014, vol. 140, no 679, p. 354-363.

CORNELISSEN, J. Hans C., CALLAGHAN, Terry V., ALATALO, J. M., *et al.* Global change and arctic ecosystems: is lichen decline a function of increases in vascular plant biomass?. *Journal of Ecology*, 2001, vol. 89, no 6, p. 984-994.

COSTE, Hippolyte. 1906. Flore descriptive et illustrée de la France de la Corse et des contrées limitrophes, 1901, vol. 1906.

COURAULT, Romain, COHEN, Marianne, et RONCHAIL, Josyane. Régimes de circulation atmosphérique, impact du changement climatique et variation démographique des rennes dans le nord de la Scandinavie. In : *XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*,. 2015.

COURAULT, Romain, COHEN, Marianne, et DELBART, Nicolas. Suivi phénologique de la végétation des régions subarctiques scandinaves: des réponses contrastées au changement climatique. In : *Variabilités et changement climatique: impacts sur les sociétés*. 2015.

COURAULT R., COHEN M., 2015, Variabilité climatique, résolution temporelle et démographie des rennes semi-domestiques de Laponie suédoise, *Journée AGF Climats, territoires, environnement*, 21 novembre 2015 (à paraître dans Giusti Ch. [Ed.], Paris, SUP).

COURAULT, Romain, COHEN, Marianne, et RONCHAIL, Josyane. Wild reindeer winter migratory patterns (Hardangervidda, Norway): what resilience under climate change?. In : European Geosciences Union-General Assembly 2018. 2018.

COURAULT, Romain et COHEN, Marianne. Recent past, present and future temperatures for calving area in Gabna community: cross-checking datasets and first results. In : Nordic Conference on Reindeer Husbandry Research. 2017.

COURAULT, Romain, FRANCIET, Alexiane, BOURRAND, Kevin, *et al.* Recent vegetation phenology variability and wild reindeer migration in Hardangervidda plateau (Norway). In : *28th International Cartographic Conference*. 2017.

COUTURIER, Serge, CÔTÉ, Steeve D., OTTO, Robert D., *et al.* Variation in calf body mass in migratory caribou: the role of habitat, climate, and movements. *Journal of Mammalogy*, 2009, vol. 90, no 2, p. 442-452.

DAHLE, Bjørn, REIMERS, Eigil, et COLMAN, Jonathan E. Reindeer (*Rangifer tarandus*) avoidance of a highway as revealed by lichen measurements. *European Journal of Wildlife Research*, 2008, vol. 54, no 1, p. 27-35.

DANEL K., BERGSTRÖM R., DUNCAN P., PASTOR J. (Eds), 2006, *Large herbivore ecology, ecosystem dynamics and conservation*, Vol. 11, Cambridge, Cambridge University Press, 506 p.

DAGET, Philippe et POISSONET, Jacques. Un procédé d'estimation de la valeur pastorale des pâturages. Institut national de la recherche agronomique, 1972.

DE JONG, Rogier, DE BRUIN, Sytze, DE WIT, Allard, et al. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, 2011, vol. 115, no 2, p. 692-702.

DELAPORTE Y., ROUE M-M., 1986, *Une communauté d'éleveurs de rennes. Vie sociale des Lapons de Kautokeino*, Paris, Institut d'ethnologie, 200 p.

DELBART, Nicolas, KERGOAT, Laurent, LE TOAN, Thuy, *et al.* Determination of phenological dates in boreal regions using normalized difference water index. *Remote Sensing of Environment*, 2005, vol. 97, no 1, p. 26-38.

DELBART, Nicolas, LE TOAN, Thuy, KERGOAT, Laurent, *et al.* Remote sensing of spring phenology in boreal regions: A free of snow-effect method using NOAA-AVHRR and SPOT-VGT data (1982–2004). *Remote Sensing of Environment*, 2006, vol. 101, no 1, p. 52-62.

DELBART, Nicolas, PICARD, Ghislain, LE TOAN, Thuy, *et al.* Spring phenology in boreal Eurasia over a nearly century time scale. *Global Change Biology*, 2008, vol. 14, no 3, p. 603-614.

O'KEEFE, Phil, O'BRIEN, Geoff, DEVISSCHER, Tahia, *et al.* The adaptation continuum: groundwork for the future. LAP Lambert Academic Publishing, 2011.

DÍAZ, Sandra, DEMISSEW, Sebsebe, CARABIAS, Julia, *et al.* The IPBES Conceptual Framework—connecting nature and people. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2015, vol. 14, p. 1-16.

DRIEDGER E., 2014, *Analyzing cumulative effects from human development on reindeer habitat in Sweden. An approach from Canadian Caribou Recovery Planning*, Mémoire de fin d'étude SLU, UMEÅ, 45 p.

EASTMAN, J. Ronald, SANGERMANO, Florencia, MACHADO, Elia A., *et al.* Global trends in seasonality of normalized difference vegetation index (NDVI), 1982–2011. *Remote Sensing*, 2013, vol. 5, no 10, p. 4799-4818.

ELHAÏ, Henri. *Biogéographie*. A. Colin, 1968.

ELMENDORF, Sarah C., HENRY, Gregory HR, HOLLISTER, Robert D., et al. Global assessment of experimental climate warming on tundra vegetation: heterogeneity over space and time. *Ecology letters*, 2012, vol. 15, no 2, p. 164-175.

EMBERGER, Louis, GODRON, Michel, DAGET, Philippe, et al. Code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu; principes et transcription sur cartes perforées. 1968.

EPSTEIN, Howard E., MYERS-SMITH, Isla, et WALKER, Donald A. Recent dynamics of arctic and sub-arctic vegetation. *Environmental Research Letters*, 2013, vol. 8, no 1, p. 015040.

FAUCHALD, Per, PARK, Taejin, TØMMERVIK, Hans, et al. Arctic greening from warming promotes declines in caribou populations. *Science Advances*, 2017, vol. 3, no 4, p. e1601365.

FAO, 2003. Le régime foncier et le développement rural. *Fao Etudes sur les régimes fonciers* n°3.

FERLAND, Michel. Les régimes de température accompagnant les chutes de neige. *Cahiers de géographie de Québec*, 1968, vol. 25, p. 145-152.

FITTER, Richard, FITTER, Alastair, et FARRER, Ann. Guide des graminées carex, joncs et fougères d'Europe. 1991.

FORBES, Bruce C. et KUMPULA, Timo. The ecological role and geography of reindeer (*Rangifer tarandus*) in northern Eurasia. *Geography Compass*, 2009, vol. 3, no 4, p. 1356-1380.

FRASER, R. H., OLTHOF, I., CARRIÈRE, M., et al. Detecting long-term changes to vegetation in northern Canada using the Landsat satellite image archive. *Environmental Research Letters*, 2011, vol. 6, no 4, p. 045502.

FERNANDEZ-VEST, Jocelyne. *Parlons lapon: Les Sames-Langue et culture*. Editions L'Harmattan, 1997.

FORMAN R.T.T., GODRON M., 1986. *Landscape Ecology*. New York, Wiley, 619 p.

FRONTIER, S. L'échantillonnage de la diversité spécifique. Stratégie d'échantillonnage en écologie, Frontier et Masson édit, 1983.

GADELLI Karl & ROUE Marie (Dirs.) : un autre nord : paysages, territoires et écologie du pays same, revue Nordiques n°30

GALLARDO, Gloria, SAUNDERS, Fred, SOKOLOVA, Tatiana, *et al.* We adapt... but is it good or bad? Locating the political ecology and social-ecological systems debate in reindeer herding in the Swedish Sub-Arctic. *Journal of political ecology*, 2017, vol. 24, no 1, p. 667-691.

GANDHI, G. Meera, PARTHIBAN, S., THUMMALU, Nagaraj, *et al.* NDVI: vegetation change detection using remote sensing and GIS—a case study of Vellore District. *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 57, p. 1199-1210.

GASCARD J.C., CREPIN A.S., KARCHER M. (Ed.), 2017, Arctic Climate change, Economy and Society, numéro spécial *Ambio*, Vol.46, n° 3.

GAVRILOV, Milivoj B., TOŠIĆ, Ivana, MARKOVIĆ, Slobodan B., *et al.* Analysis of annual and seasonal temperature trends using the Mann-Kendall test in Vojvodina, Serbia. *Időjárás*, 2016, vol. 120, no 2, p. 183-198.

ALEXANDRE, Frédéric et GÉNIN, Alain. *Géographie de la végétation terrestre: modèles hérités, perspectives, concepts et méthodes*. Armand Colin, 2012.

GILLETT, Nathan P., HEGERL, Gabriele C., ALLEN, Myles R., *et al.* Implications of changes in the Northern Hemisphere circulation for the detection of anthropogenic climate change. *Geophysical research letters*, 2000, vol. 27, no 7, p. 993-996.

GUTMAN, Garik et REISSELL, Anni (ed.). Eurasian arctic land cover and land use in a changing climate. Springer, 2011.

GILL, Jennifer A., NORRIS, Ken, et SUTHERLAND, William J. Why behavioural responses may not reflect the population consequences of human disturbance. *Biological Conservation*, 2001, vol. 97, no 2, p. 265-268.

HEDENÅS, Henrik, OLSSON, Håkan, JONASSON, Christer, et al. Changes in tree growth, biomass and vegetation over a 13-year period in the Swedish sub-Arctic. *Ambio*, 2011, vol. 40, no 6, p. 672.

HENTTONEN, H., TIKHONOV, A., et al. Rangifer tarandus. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2014.3. 2008.

HAGEMOEN, Rolf Iver M. et REIMERS, Eigil. Reindeer summer activity pattern in relation to weather and insect harassment. *Journal of Animal Ecology*, 2002, vol. 71, no 5, p. 883-892.

HANNA, Edward, CROPPER, Thomas E., JONES, Philip D., et al. Recent seasonal asymmetric changes in the NAO (a marked summer decline and increased winter variability) and associated changes in the AO and Greenland Blocking Index. *International Journal of Climatology*, 2015, vol. 35, no 9, p. 2540-2554.

HANSEN, B. B., AANES, R., et SÆTHER, B.-E. Partial seasonal migration in high-arctic Svalbard reindeer (*Rangifer tarandus platyrhynchus*). *Canadian Journal of Zoology*, 2010, vol. 88, no 12, p. 1202-1209.

HEIKKINEN H. I., KASANEN M., LÉPY É., 2012, Resilience, vulnerability and adaptation in reindeer herding communities in the Finnish-Swedish border area, *Nordia Geographical Publications*, Vol. 41, n°5, p. 107-121.

HEISKANEN, Janne, NILSSON, Björn, MÄKI, Ann-Helen, *et al.* *Aerial photo interpretation for change detection of treeline ecotones in the Swedish mountains*. Sveriges lantbruksuniversitet, 2008.

HELLE T., HALLIKAINEN V., SÄRKELÄ M., HAAPALEHTO M., NIVA A., PUOSKARI J., 2012, Effects of a holiday resort on the distribution of semi-domesticated reindeer. *Annales Zoologici Fennici*, Vol. 49, n°1/2, p. 23-35.

HIJMANS, Robert J., CAMERON, Susan E., PARRA, Juan L., *et al.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 2005, vol. 25, no 15, p. 1965-1978.

HOFFMANN-SCHICKEL K., 2010, *Un Peuple du renne entre hier et demain: les Sâmes de Kautokeino dans le Finnmark norvégien*, thèse dirigée par Eric Navet, Université de Strasbourg, 627 p.

HURRELL, James W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, 1995, vol. 269, no 5224, p. 676-679.

HAMPTON, Stephanie E., STRASSER, Carly A., TEWKSBUY, Joshua J., *et al.* Big data and the future of ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, vol. 11, no 3, p. 156-162.

HIJMANS, Robert J., CAMERON, Susan E., PARRA, Juan L., *et al.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 2005, vol. 25, no 15, p. 1965-1978.

HURRELL, James W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, 1995, vol. 269, no 5224, p. 676-679.

INGA, Berit. Reindeer (*Rangifer tarandus tarandus*) feeding on lichens and mushrooms: traditional ecological knowledge among reindeer-herding Sami in northern Sweden. *Rangifer*, 2009, vol. 27, no 2, p. 93-106.

INGA, Berit. Traditional ecological knowledge among reindeer herders in northern Sweden. 2008.

IPCC 2013, *Climate Change: Fifth Assessment Report - The Physical Science Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC*. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Eds.)], Cambridge et New York, Cambridge University Press, 1535 p.

IPCC, 2013: « Summary for Policymakers », in Stocker T.F. [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, USA, Cambridge University Press, 2013.

« Impacts, Adaptation et Vulnérabilité »; V. R. Barros [eds], *IPCC, 2014, : Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability; Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2014

IPCC, 2018, Summary for Policymakers, “GLOBAL WARMING OF 1.5 °C an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty”, 48th Session of the IPCC, Korea

JOHANSEN, Bernt et KARLSEN, Stein Rune. Monitoring vegetation changes on Finnmarksvidda, Northern Norway, using Landsat MSS and Landsat TM/ETM+ satellite images. *Phytocoenologia*, 2005, vol. 35, no 4, p. 969-984.

JOLIVET L., 2014. Modélisation de l'espace géographique pour l'étude des déplacements d'animaux, PhD Geography and geomatics, University Paris 1.

JOLY, Daniel, ARNESEN, Geir, MALNES, Eirik, *et al.* Building an indicator to characterize the thermal conditions for plant growth on an Arctic archipelago, Svalbard. *Ecological indicators*, 2016, vol. 66, p. 623-631.

JOLY, Daniel, BERGER, Alexandre, BUONCRISTIANI, Jean-François, *et al.* Geomatic downscaling of temperatures in the Mont Blanc massif. *International Journal of Climatology*, 2018, vol. 38, no 4, p. 1846-1863.

KAMBATLA, Karthik, KOLLIAS, Giorgos, KUMAR, Vipin, *et al.* Trends in big data analytics. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2014, vol. 74, no 7, p. 2561-2573.

KAARLEJÄRVI, Elina, ESKELINEN, Anu, et OLOFSSON, Johan. Herbivores rescue diversity in warming tundra by modulating trait-dependent species losses and gains. *Nature communications*, 2017, vol. 8, no 1, p. 419.

KIVINEN S., KUMPULA T., 2014, 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, p. 13-19.

KLEIN D. R., 1990, Variation in quality of caribou and reindeer forage plants associated with season, plant part, and phenology. *Rangifer*, vol. 10, n° 3, p. 123-130.

KORSMO F. L., 1987, Nordic security and the Saami minority: territorial rights in Northern Fennoscandia, *Human Rights Quarterly*, Vol. 10, p. 509.

KULLMAN L., 2015, Recent and past trees and climates at the Arctic/Alpine margin in Swedish Lapland: an Abisko case study review. *Journal of Biodiversity Management and Forestry*, Vol. 4, n° 4, 12 p.

KUNTZ D., 2011, *Ostéométrie et migration(s) du renne (Rangifer tarandus) dans le Sud-Ouest de la France au cours du dernier Pléniglaciaire et du Tardiglaciaire (21 500-13 000 cal. BP)*, Doctoral dissertation, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II, 497 p.

LAIDLER, Gita J., TREITZ, Paul M., et ATKINSON, David M. Remote sensing of Arctic vegetation: relations between the NDVI, spatial resolution and vegetation cover on Boothia Peninsula, Nunavut. Arctic, 2008, p. 1-13.

LABBA N., 2004, Vindkraft i renskötselområdet [Wind power in the reindeer herding district], examensuppsats inlämnad till företagsekonomiska institutionen Handelshögskolan vid Umeå universitet 2002, Diedut 2004:1. Kautokeino: Sámi Instituhtta.

LABBA, Kristina. Mineral Activities on Sami Reindeer Grazing Land in Sweden. Nordisk Miljörättslig Tidskrift, 2014, vol. 1.

MOREAU, Myrtille, MERCIER, Denis, et LAFFLY, Dominique. Un siècle de dynamiques paraglaciaires et végétales sur les marges du Midre Lovénbreen, Spitsberg nord-occidental/A century of paraglacial and plant dynamics in the Midre Lovénbreen foreland (northwestern Spitsbergen). Géomorphologie: relief, processus, environnement, 2004, vol. 10, no 2, p. 157-168.

LE COEUR, AMAT, DORIZE, 1996, *Principes de géographie physique*, Editions Bréal

LEFRÈRE, Stéphanie Catherine. *Variations saisonnières des activités diurnes et interactions sociales des rennes semi-domestiques Rangifer tarandus tarandus L en Laponie finlandaise: méthodes de gestion traditionnelle et moderne de l'élevage*. 2003. Thèse de doctorat. Atelier national de Reproduction des Thèses.

LEGAGNEUX, P., GAUTHIER, G., LECOMTE, N., et al. Arctic ecosystem structure and functioning shaped by climate and herbivore body size. Nature Climate Change, 2014, vol. 4, no 5, p. 379.

LEWIS G., AITKEN S. (Ed.), 2013, *Monitoring Arctic biodiversity in a warming world*, *Biodiversity*, Vol. 14, special issue 1.

LI, Jing, FAN, Ke, et XU, Zhiqing. Links between the late wintertime North Atlantic Oscillation and springtime vegetation growth over Eurasia. *Climate dynamics*, 2016, vol. 46, no 3-4, p. 987-1000.

LINDBLADH, Matts, AXELSSON, Anna-Lena, HULTBERG, Tove, et al. From broadleaves to spruce—the borealization of southern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2014, vol. 29, no 7, p. 686-696.

LÖF A., 2013, Examining limits and barriers to climate change adaptation in an Indigenous reindeer herding community, *Climate and Development*, Vol. 5, n° 4, p. 328-339.

LORD J. M., NORTON D. A., 1990, Scale and the spatial concept of fragmentation. *Conservation Biology*, Vol. 4, n° 2, p. 197-202.

LOUW, Gideon, et al. *Physiological animal ecology*. Co-published in the US with J. Wiley, 1993.

LU, Jian et GREATBATCH, Richard J. The changing relationship between the NAO and northern hemisphere climate variability. *Geophysical research letters*, 2002, vol. 29, no 7.

LUGINBUHL, Yves. *Mise en scène du monde. Construction du paysage européen (La): Construction du paysage européen*. Cnrs, 2012.

LUNDQVIST H., 2003, *Review of factors affecting productivity of reindeer husbandry*, Introductory research essay, SLU, Uppsala, 43 p.

LUNDQVIST H., 2007, Ecological Cost-Benefit Modelling of Herbivore Habitat Quality Degradation due to Range Fragmentation, *Transactions in GIS*, Vol. 11, n° 5, p. 745-763.

LYNCH, Amanda H., TRYHORN, Lee, et ABRAMSON, Rebecca. Working at the boundary: facilitating interdisciplinarity in climate change adaptation research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, vol. 89, no 2, p. 169-179.

MAGGA O.H., MATHIESEN S. D., CORELL R. W., OSKAL A., 2009, *Reindeer herding, traditional knowledge and adaptation to climate change and loss of grazing land*, Ealat project, Association of World Reindeer Herders in Arctic Council and Sustainable Development Working Group, 76 p.

MALINIEMI, Tuija, KAPFER, Jutta, SACCONI, Patrick, et al. Long-term vegetation changes of treeless heath communities in northern Fennoscandia: Links to climate change trends and reindeer grazing. *Journal of Vegetation Science*, 2018.

MANKER E.M., 1953, *The nomadism of the Swedish mountain Lapps, The Siidas and their migratory routes in 1945*, Nordiska Museet : Acta Lapponica VII, Stockholm, Hugo Gelbers Förlag, 262 p.

MANKER E.M., 1954, *Les Lapons de montagnes suédoises*. Paris, NRF Gallimard, 288 p.

MANKER E.M., 1963, *People of eight seasons, the story of the Lapps*, New York, The Viking Press, 214 p.

MARTY P., LEPART J., CAPLAT P., 2006, Géographie et écologie des paysages : quelles relations ?, *Bulletin de l'Association des Géographes Français* 3, 2006, pp. 355-367.

MCNEILL, John, BARRIE, F. R., BUCK, W. R., et al. International Code of Nomenclature for algae, fungi and plants. *Regnum vegetabile*, 2012, vol. 154.

MENZEL, Annette et FABIAN, Peter. Growing season extended in Europe. *Nature*, 1999, vol. 397, no 6721, p. 659

MESQUITA, Michel d S., ERIKSTAD, Kjell E., SANDVIK, Hanno, *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*, 2015, vol. 3, p. 43.

MILLINGTON, Andrew, BLUMLER, Mark, et SCHICKHOFF, Udo (ed.). *The SAGE handbook of biogeography*. Sage, 2011.

MIROV, N. T. Notes on the domestication of reindeer. *American Anthropologist*, 1945, vol. 47, no 3, p. 393-408.

MITCHELL T. D., RICHARD F. D., BATTISTONI R. M., et al., 2015, Reflective Practice That Persists: Connections between Reflection in Service-Learning Programs and in Current Life. *Michigan Journal of Community Service Learning*, vol. 21, n° 2, p. 49-63.

MOD, Heidi K. et LUOTO, Miska. Arctic shrubification mediates the impacts of warming climate on changes to tundra vegetation. *Environmental Research Letters*, 2016, vol. 11, no 12, p. 124028.

MOSSBERG, Bo et STENBERG, Lennart. *Den nya nordiska floran*. Stockholm: Wahlstrom & Widstrand 928p.-illus., col. illus.. ISBN, 2003.

MYNENI, Ranga B., KEELING, C. D., TUCKER, Compton J., et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, vol. 386, no 6626, p. 698.

MYERS-SMITH, Isla H., FORBES, Bruce C., WILMKING, Martin, et al. Shrub expansion in tundra ecosystems: dynamics, impacts and research priorities. *Environmental Research Letters*, 2011, vol. 6, no 4, p. 045509

MÅRELL, Anders, BALL, John P., et HOFGAARD, Annika. Foraging and movement paths of female reindeer: insights from fractal analysis, correlated random walks, and Lévy flights. *Canadian Journal of Zoology*, 2002, vol. 80, no 5, p. 854-865.

MÅRELL, Anders et EDENIUS, Lars. Spatial heterogeneity and hierarchical feeding habitat selection by reindeer. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2006, vol. 38, no 3, p. 413-420.

MÅRELL, Anders. Summer feeding behaviour of reindeer. 2006.

NAVEH, Zev. Interactions of landscapes and cultures. *Landscape and Urban planning*, 1995, vol. 32, no 1, p. 43-54.

NELLEMANN, Christian, VISTNES, Ingunn, JORDHØY, Per, *et al.* Winter distribution of wild reindeer in relation to power lines, roads and resorts. *Biological Conservation*, 2001, vol. 101, no 3, p. 351-360.

NELLEMANN C., VISTNES I., JORDHØY P., STØEN O. G., KALTENBORN B. P., HANSEN F., HELGESEN R., 2010, Effects of recreational cabins, trails and their removal for restoration of reindeer winter ranges, *Restoration Ecology*, Vol. 18, n° 6, p. 873-881.

NELLEMANN C., JORDHØY P., STØEN O. G., STRAND O., 2000, Cumulative impacts of tourist resorts on wild reindeer (*Rangifer tarandus tarandus*) during winter, *Arctic*, Vol. 53, n°1, p. 9-17.

STENSETH, Nils Chr, OTTERSEN, Geir, HURRELL, James W., *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*, 2003, vol. 270, no 1529, p. 2087-2096.

NIEMINEN, Mauri et HELLE, Timo. Variations in body measurements of wild and semi-domestic reindeer (*Rangifer tarandus*) in Fennoscandia. In : *Annales Zoologici Fennici*. Finnish Academy of Sciences, Societas Scientiarum Fennica, Societas pro Fauna et Flora Fennica and Societas Biologica Fennica Vanamo, 1980. p. 275-283.

NORDBERG, Maj-Liz et EVERTSON, Joakim. Monitoring change in mountainous dry-heath vegetation at a regional scale using multitemporal Landsat TM data. *Ambio*, 2003, p. 502-509.

OJALA C-G., 2009, Sámi prehistories: the politics of archaeology and identity in northernmost Europe. Department of Archaeology and Ancient History, Uppsala. *Occasional papers in archaeology*, n° 47, 353 p.

OLDEBOER K., OPHOF A., 2011. *Nutritional composition of Finnish semi-domestic reindeer (Rangifer tarandus tarandus) spring forage intake*. Thesis research report, Van Hall Larenstein University of Applied Science, 50 p.

OLSSON, Per-Ola, LINDSTRÖM, Johan, et EKLUNDH, Lars. Near real-time monitoring of insect induced defoliation in subalpine birch forests with MODIS derived NDVI. *Remote sensing of environment*, 2016, vol. 181, p. 42-53.

GRAU, Oriol, NINOT, Josep M., BLANCO-MORENO, José M., *et al.* Shrub–tree interactions and environmental changes drive treeline dynamics in the Subarctic. *Oikos*, 2012, vol. 121, no 10, p. 1680-1690.

OZENDA, P. Biogéographie végétale. Paris, Douin.—1994. *La végétation du continent européen*, 1964.

OZENDA, Paul. *Perspectives pour une géobiologie des montagnes*. PPUR presses polytechniques, 2002.

ÖSTLUND L., ZACKRISSON O., AXELSSON A. L., 1997, The history and transformation of a Scandinavian boreal forest landscape since the 19th century, *Canadian journal of forest research*, Vol. 27, n° 8, p. 1198-1206.

OTTERSEN, Geir, PLANQUE, Benjamin, BELGRANO, Andrea, *et al.* Ecological effects of the North Atlantic oscillation. *Oecologia*, 2001, vol. 128, no 1, p. 1-14.

PAOLI, Amélie, WELADJI, Robert B., HOLLAND, Øystein, et al. Winter and spring climatic conditions influence timing and synchrony of calving in reindeer. *PloS one*, 2018, vol. 13, no 4, p. e0195603.

PAPE, R. et LÖFFLER, J. Seasonality of habitat selection shown to buffer alpine reindeer pastoralism against climate variability. *Ecosphere*, 2015, vol. 6, no 12, p. 1-9.

PARVIAINEN, Miia, LUOTO, Miska, et HEIKKINEN, Risto K. NDVI-based productivity and heterogeneity as indicators of plant-species richness in boreal landscapes. 2010.

PANZACCHI, Manuela, VAN MOORTER, Bram, JORDHØY, Per, *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*, 2013, vol. 28, no 5, p. 847-859.

PANZACCHI, Manuela, VAN MOORTER, Bram, et STRAND, Olav. A road in the middle of one of the last wild reindeer migration routes in Norway: crossing behaviour and threats to conservation. *Rangifer*, 2013, vol. 33, no 2, p. 15-26.

PANZACCHI, Manuela, VAN MOORTER, Bram, STRAND, Olav, *et al.* Searching for the fundamental niche using individual-based habitat selection modelling across populations. *Ecography*, 2015, vol. 38, no 7, p. 659-669.

PAPE, R. et LÖFFLER, J. Seasonality of habitat selection shown to buffer alpine reindeer pastoralism against climate variability. *Ecosphere*, 2015, vol. 6, no 12, p. 1-9

PEPIN, N. C., MAEDA, E. E., et WILLIAMS, R. Use of remotely sensed land surface temperature as a proxy for air temperatures at high elevations: Findings from a 5000 m elevational transect across Kilimanjaro. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, vol. 121, no 17, p. 9998.

PECH, Pierre, ARQUES, Sylvie, JOMELLI, Vincent, et al. Spatial and temporal biodiversity variations in a high mountain environment: the case of the proglacial margin of the Evettes, Natura 2000 area (Savoie, French Alps). *Cybergeo: European Journal of Geography*, 2007.

PETTORELLI, Nathalie, VIK, Jon Olav, MYSTERUD, Atle, *et al.* Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in ecology & evolution*, 2005, vol. 20, no 9, p. 503-510.

PETTORELLI, Nathalie, RYAN, Sadie, MUELLER, Thomas, *et al.* The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): unforeseen successes in animal ecology. *Climate Research*, 2011, vol. 46, no 1, p. 15-27.

POST, Eric et PEDERSEN, Christian. Opposing plant community responses to warming with and without herbivores. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, vol. 105, no 34, p. 12353-12358.

RAMEAU, Jean-Claude, MANSION, D., et DUMÉ, G. Flore forestière française (guide écologique illustré. Tome 2, Montagnes). 1993.

RIEPMA, P. et WENG, Wong Phui. A comparison of methods of recording herbaceous weeds in weed control experiments. *Weed Research*, 1963, vol. 3, no 1, p. 26-34.

RISETH, Jan Åge, TØMMERVIK, Hans, HELANDER-RENVALL, Elina, et al. Sámi traditional ecological knowledge as a guide to science: snow, ice and reindeer pasture facing climate change. *Polar Record*, 2011, vol. 47, no 3, p. 202-217.

RONCHAIL, Josyane, COHEN, Marianne, ALONSO-ROLDÁN, María, *et al.* Adaptability of Mediterranean agricultural systems to climate change: the example of the Sierra Magina olive-growing region (Andalusia, Spain). Part II: the future. *Weather, Climate, and Society*, 2014, vol. 6, no 4, p. 451-467.

ROBERT C., 2016. Comprendre les changements d'utilisation des terres en France pour mieux estimer leurs impacts sur les émissions de gaz à effet de serre. De l'observation à la

modélisation. Doctorat de géographie, Université Paris Diderot, 532 p.

ROTURIER S., 2007, Integrating Artificial Dispersion of Reindeer Lichen in Forest Regeneration Procedures, Licenciate Dissertation, sous la direction d'ENANDER, K.G., Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Ecology and Management, Umea, 31 p.

ROTURIER, Samuel et ROUE, Marie. Of forest, snow and lichen: Sámi reindeer herders' knowledge of winter pastures in northern Sweden. *Forest Ecology and Management*, 2009, vol. 258, no 9, p. 1960-1967.

ROTURIER S., 2011. Sami herders' classification system of reindeer pastures – A contribution of adapt forest management to reindeer herding in northern Sweden, *Rangifer*, Vol. 31, n° 1, p. 61-69.

ROUÉ, Marie, ROTURIER, Samuel, LAVRILLIER, Alexandra, *et al.* , 2015, Coproduction of Indigenous and Scientific Knowledge as a response to Global Change in the Arctic: Case studies from Eurasian reindeer herding peoples.

RAASAKKA, Noora et SIVONEN, Sari. Northern Landscapes: “Implementation of the European Landscape Convention In the North Calotte Area Municipalities”-Conference in Inari, Finland 7-9.9. 2011. 2012.

RAUNKIAER, Christen Christiansen. Types biologiques pour la géographie botanique. 1905.

RAUNKIAER, C. 1 934. The Life-forms of Plants and Statistical Plant Geography, 1908.

RUNDQVIST, Sara, HEDENÅS, Henrik, SANDSTRÖM, Anneli, *et al.* Tree and shrub expansion over the past 34 years at the tree-line near Abisko, Sweden. *Ambio*, 2011, vol. 40, no 6, p. 683.

RØED, K. H., FLAGSTAD, Ø., BJØRNSTAD, G., et al. Elucidating the ancestry of domestic reindeer from ancient DNA approaches. *Quaternary international*, 2011, vol. 238, no 1-2, p. 83-88.

RØED, Knut H., FLAGSTAD, Øystein, NIEMINEN, Mauri, et al. Genetic analyses reveal independent domestication origins of Eurasian reindeer. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 2008, vol. 275, no 1645, p. 1849-1855.

SALORANTA, Tuomo M. Post-normal science and the global climate change issue. *Climatic Change*, 2001, vol. 50, no 4, p. 395-404.

SANDSTRÖM P., CORY N., SVENSSON J., HEDENÅS H., JOUGDA L., BOCHERT N., 2016, On the decline of ground lichen forests in the Swedish boreal landscape: Implications for reindeer husbandry and sustainable forest management, *Ambio*, Vol. 45, n°4, p.415–429.

SANDSTRÖM P., GRANQVIST PAHLÉN T., EDENIUS L., TØMMERVIK H., HAGNER O., HEMBERG L., OLSSON H., BAER K., STENLUND T., GÖRAN BRANDT L., EGBERTH M., 2003, Conflict resolution by participatory management: remote sensing and GIS as tools for communicating land-use needs for reindeer herding in northern Sweden, *Ambio*, Vol. 32, n° 8, p. 557-567.

SCAIFE, Adam A., KNIGHT, Jeff R., VALLIS, Geoff K., et al. A stratospheric influence on the winter NAO and North Atlantic surface climate. *Geophysical Research Letters*, 2005, vol. 32, no 18.

SKARIN, Anna, DANELL, Öje, BERGSTRÖM, Roger, *et al.* Summer habitat preferences of GPS-collared reindeer *Rangifer tarandus tarandus*. *Wildlife Biology*, 2008, vol. 14, no 1, p. 1-15.

SKARIN A., ÅHMAN B., 2014, Do human activity and infrastructure disturb domesticated reindeer? The need for the reindeer's perspective. *Polar Biology*, Vol. 37, n° 7, p. 1041-1054.

SKARIN A., SANDSTRÖM P., ALAM M., BUHOT Y., NELLEMANN C., 2016, Renar och vindkraft II - Vindkraft i drift och effekter på renar och renskötsel, Uppsala, Department of Animal Nutrition and Management Swedish University of Agricultural Sciences, 74 p.

SØMME, Axel (ed.). *The Geography of Norden*. Heinemann, 1961.

SMITH, William G. Raunkiaer's "life-forms" and statistical methods. *Journal of Ecology*, 1913, vol. 1, no 1, p. 16-26.

SONESSON, M., WIELGOLASKI, F. E., et KALLIO, P. Description of Fennoscandian tundra ecosystems. In : Fennoscandian tundra ecosystems. Springer, Berlin, Heidelberg, 1975. p. 3-28.

STENSETH, Nils Chr, OTTERSEN, Geir, HURRELL, James W., *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*, 2003, vol. 270, no 1529, p. 2087-2096.

STREETER, David. Guide Delachaux des fleurs de France et d'Europe. Delachaux et Niestlé, 2011.

STRÖMGREN J., 2011, Sápmi, in *The Indigenous World 2011*, Copenhagen, IWGIA, p.29-37.

STURM, Matthew, HOLMGREN, Jon, MCFADDEN, Joseph P., *et al.* Snow–shrub interactions in Arctic tundra: a hypothesis with climatic implications. *Journal of Climate*, 2001, vol. 14, no 3, p. 336-344.

SUOMINEN O., OLOFSSON J., 2000, Impacts of semi-domesticated reindeer on structure of tundra and forest communities in Fennoscandia: a review. *Annales Zoologici Fennici*, Vol. 37, n° 4, Facing North: Investigating the Northern Dimension to Biodiversity, p. 233-249.

SVANTESSON C., 2017, Analyse multi-scalaire de l'impact de l'éolien sur le pâturage des grands ongulés, Mémoire de M1 EDTS-Géodep, MNHN-Université Paris Sorbonne, 73p.

SVONNI R. (2010), « Samisk markanvändning och MKB », Swedish Saami Parliament (http://www.sapmi.se/samisk_markanvandning.pdf)

TAYLOR, Karl E., STOUFFER, Ronald J., et MEEHL, Gerald A. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, vol. 93, no 4, p. 485-498.

TUCKER M. A., BÖHNING-GAESE K., FAGAN W. F., FRYXELL J. M., VAN MOORTER B., ALBERTS S. C., ALI A. H., ALLEN A. M., ATTIAS N., AVGAR T., BARTLAM-BROOKS H., 2018, Moving in the Anthropocene: Global reductions in terrestrial mammalian movements. *Science*, Vol. 359, n° 6374, 466-469.

TUNÓN H., SJAGGO S. B., 2012, *Ajddo – reflektioner kring biologisk mångfald i renarnas spår*, skriftserie n° 68. Uppsala, Sametinget Kiruna & Centrum för biologisk mångfald, 84 p.

TUTIN, Thomas Gaskell, HEYWOOD, Vernon Hilton, BURGESS, Norman Alan, et al. (ed.). *Flora Europaea: Plantaginaceae to Compositae (and Rubiaceae)*. Cambridge University Press, 1976.

TURNER, Billie L., SKOLE, David, SANDERSON, Steven, et al. Land-use and land-cover change: science/research plan. In : Unknown Host Publication Title. International Geosphere-Biosphere Programme, Stockholm; Report, 35, 1995.

TYLER N. J. C., TURI J. M., SUNDSET M. A., BULL K. S., SARA M. N., REINERT E., OSKAL N., NELLEMAN C., MCCARTHY J. J., MATHIESEN S. D., MARTELLO M. L., 2007, 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, p. 191-206.

UBONI A., HORSTKOTTE T., KAARLEJÄRVI E., SÉVÊQUE A., STAMMLER F., OLOFSSON J., FORBES B. C., MOEN J., 2016, Long-term trends and role of climate in the population dynamics of Eurasian reindeer, *Plos One*, Vol. 11, n° 6.

UVO, Cintia B. et BERNDTSSON, Ronny. North Atlantic Oscillation; a climatic indicator to predict hydropower availability in Scandinavia. *Hydrology Research*, 2002, vol. 33, no 5, p. 415-424.

UNESCO, 2010, *Développement durable de la région arctique face au changement climatique : défis scientifiques, sociaux, culturels et éducatifs*. Paris, UNESCO, 420 p.

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

VÄISÄNEN, Maria, YLÄNNE, Henni, KAARLEJÄRVI, Elina, *et al.* Consequences of warming on tundra carbon balance determined by reindeer grazing history. *Nature Climate Change*, 2014, vol. 4, no 5, p. 384.

VAN DER MAAREL, Eddy. Ecotones and ecoclines are different. *Journal of Vegetation Science*, 1990, vol. 1, no 1, p. 135-138.

VAN DER WAL R., 2006, Do herbivores cause habitat degradation or vegetation state transition? Evidence from the tundra, *OIKOS*, Vol.114, n° 1, p. 177-186.

VISTNES I., NELLEMANN C., 2001, Avoidance of cabins, roads, and power lines by reindeer during calving, *The Journal of wildlife management*, Vol. 65, n° 4, p. 915-925.

VISTNES I., NELLEMANN C., 2008, The matter of spatial and temporal scales: a review of reindeer and caribou response to human activity, *Polar Biology*, Vol. 31, n° 4, p. 399-407

WARENBERG, K., DANELL, O., GAARE, E., et al. Flora i reinbeiteland; Ekendahl B, Bye K, editors. Oslo, Norway: Landbruksforlaget, 1997.

WESTERGAARD-NIELSEN, Andreas, LUND, Magnus, HANSEN, Birger Ulf, et al. Camera derived vegetation greenness index as proxy for gross primary production in a low Arctic wetland area. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, vol. 86, p. 89-99.

WELADJI, Robert B., KLEIN, David R., HOLLAND, Øystein, et al. Comparative response of Rangifer tarandus and other northern ungulates to climatic variability. *Rangifer*, 2002, vol. 22, no 1, p. 33-50.

WELADJI, Robert B. et HOLLAND, Øystein. Global climate change and reindeer: effects of winter weather on the autumn weight and growth of calves. *Oecologia*, 2003, vol. 136, no 2, p. 317-323.

WELADJI, Robert B. et HOLLAND, Ø. Influences of large-scale climatic variability on reindeer population dynamics: implications for reindeer husbandry in Norway. *Climate Research*, 2006, vol. 32, no 2, p. 119-127.

WELADJI, Robert B. et HOLLAND, Ø. Influences of large-scale climatic variability on reindeer population dynamics: implications for reindeer husbandry in Norway. *Climate Research*, 2006, vol. 32, no 2, p. 119-127.

WIDMARK C., 2006, Forestry and reindeer husbandry in Sweden – the development of a land use conflict, *Rangifer*, Vol. 26, n° 2, p. 43-54.

WIELGOLASKI, Frans E. et GOODALL, David W. (ed.). Polar and alpine tundra. Amsterdam : Elsevier, 1997.

WOLFE S. A., GRIFFITH B., GRAY WOLFE C. A., 2000, *Response of reindeer and caribou to human activities*, *Polar Research*, Vol. 19, n° 1, p. 63-73.

WORTON, Brian J. Kernel methods for estimating the utilization distribution in home-range studies. *Ecology*, 1989, vol. 70, no 1, p. 164-168.

WRONA, Frederick J., JOHANSSON, Margareta, CULP, Joseph M., et al. Transitions in Arctic ecosystems: Ecological implications of a changing hydrological regime. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, vol. 121, no 3, p. 650-674

RISETH, Jan Åge, TØMMERVIK, Hans, HELANDER-RENVALL, Elina, *et al.* Sámi traditional ecological knowledge as a guide to science: snow, ice and reindeer pasture facing climate change. *Polar Record*, 2011, vol. 47, no 3, p. 202-217.

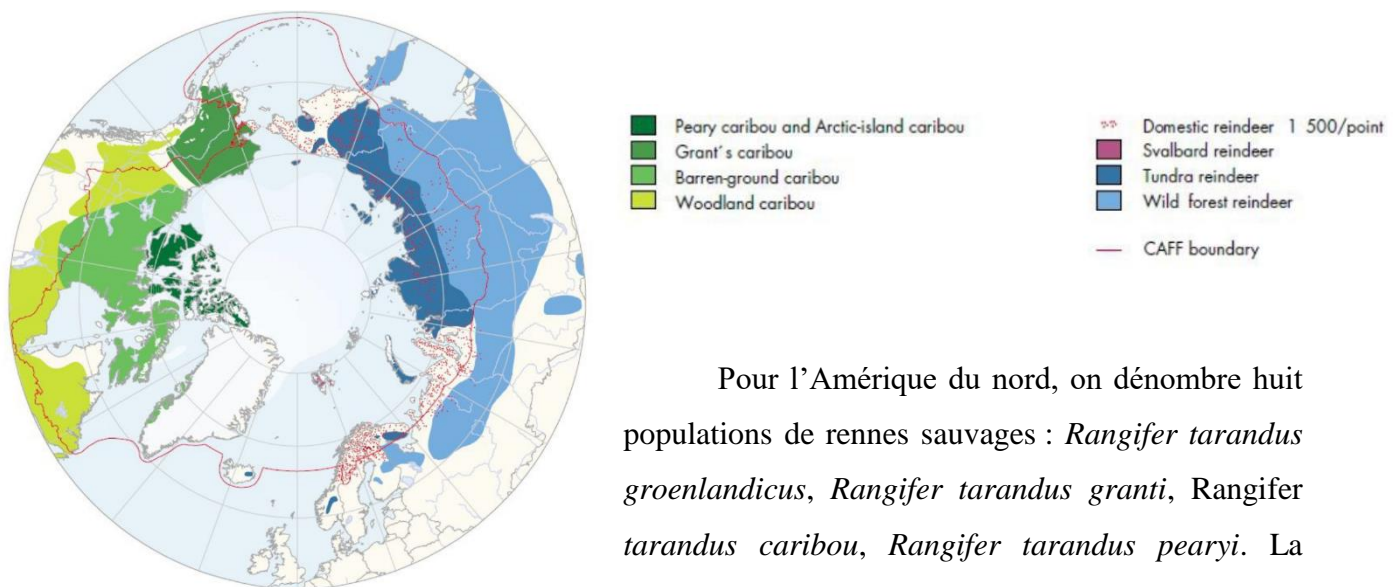
AAHMAN, Birgitta. *Development, control and counter-measures regarding radioactive caesium in Swedish reindeer after the Chernobyl accident*. Swedish Radiation Protection Authority, 2005.

Annexes

Annexe 1 : Encadrés bibliographiques complétant le chapitre I

ENCADRÉ N°1 : RENNES SAUVAGES OU DOMESTIQUES ?

La répartition de l'espèce *Rangifer tarandus* L. est circumpolaire, entre la péninsule scandinave, le Canada et l'Extrême-Orient russe, en passant par la Sibérie Centrale (figure ci-contre, source : CAFF ; <http://library.arcticportal.org/1358/>).



Pour l'Amérique du nord, on dénombre huit populations de rennes sauvages : *Rangifer tarandus groenlandicus*, *Rangifer tarandus granti*, *Rangifer tarandus caribou*, *Rangifer tarandus pearyi*. La plupart de ces sous-espèces ont été discriminées selon des critères morphologiques (Kuntz, 2011), mais aussi géographiques (localisation et distribution des aires vitales des sous-populations). Cependant, la réalité est plus complexe, aussi bien du point de vue génétique (ancêtres communs) et physiologiques (phénotypes) que biogéographique (chevauchement d'aires vitales). En Eurasie et pour les îles arctiques géologiquement apparentées (archipel du Spitzberg par exemple), 17 sous-populations sont décrites dans l'article d'Uboni, Horstkotte et al. (2017). Celles-ci peuvent se résumer en trois sous-espèces de rennes : *Rangifer tarandus platyrhynchus* (Spitzberg), *Rangifer tarandus tarandus* (Eurasie), *Rangifer tarandus fennicus* (Carélie, Finlande ; Forbes, Kumpula, 2009). Egalement pour ce continent, la distinction entre sous-espèces, génotypes, phénotypes et écotypes est particulièrement complexe (Røed, Flagstad et al., 2011, Kuntz, 2011), pour des raisons biologiques et écologiques (dispersion des populations de rennes selon les grandes glaciations puis circulation de gènes entre les populations), mais aussi des interactions sur le

long terme de l'ongulé arctique avec l'Homme (Forbes, Kumpula, 2009 ; Nieminen, Helle, 1980 ; Røed, Flagstad et al., 2011 ; Ojala, 2009). La domestication du renne est particulièrement progressive, et semble être le corollaire des migrations sur le long-terme de ses populations à travers les âges (de la Sibérie méridionale en passant par la Finlande, puis la péninsule scandinave, Manker, 1956 ; Nieminen, Helle, 1980 ; Ojala, 2009). Ce point reste discuté dans la littérature et les différentes parties-prenantes (biologistes, généticiens, anthropologues et archéologues, Saamis ou non-Saamis), mais laisse croire que les actuels Saamis, éleveurs de rennes, ont probablement suivi les rennes d'abord sauvages jusque dans le sud de la péninsule scandinave, avant de s'y établir, approximativement il y'a 2000 ans (Itkonen, 1948 in Nieminen, Helle, 1980). Cependant, la présence avérée de Rennes jusqu'en Espagne pendant les glaciations du Quaternaire (ossements de rennes dans les sites archéologiques du sud de la France et d'Allemagne, Kuntz, 2011; artefacts préhistoriques dépeignant le renne il y'a 32 000 ans, Grotte de Chauvet; Forbes, Kumpula, 2009) dénotent de la présence ancienne de rennes sauvages, avant un repli vers le nord de l'Europe au cours des périodes interglaciaires, jusqu'à aujourd'hui. A partir de ces brefs éléments historiques, on peut avancer que la domestication du renne reste classifiable en fonction du degré de domestication. Cette catégorisation des populations de rennes (et des modes sociaux de l'élevage de rennes associés) peut aller de l'appriivoisement des troupeaux, à leur domestication complète. L'appriivoisement peut dans l'absolu signifier la possibilité d'approcher les rennes, et d'en prélever quelques-uns selon les besoins humains saisonniers (viande, peaux, ossements ; le renne chassé est une proie). Il désigne également le prélèvement des rennes-mâles dominants et leur castration (renne dit *haergit*, Delaporte, Roué, 1986). Le castrat est le renne le plus apprivoisé du troupeau, et permet aux éleveurs de contrôler plus facilement la circulation des hordes à travers le pâturage, et d'éviter la perte en rennes constitutifs de la horde. En effet, l'ongulé reste grégaire dans ses migrations partielles et annuelles, mais des rennes peuvent parfois s'échapper de la horde au cours du parcours, la retrouver, en trouver une autre, voire en fonder une nouvelle (Lefrère, 2003). L'appriivoisement est le degré de domestication où la répartition annuelle des rennes reprend le plus l'aire de répartition naturelle de celui-ci.

Par conséquent, l'élevage, vu en tant qu'organisation socio-économique concentrée sur l'animal, y est le moins permis. Pour la domestication, l'expression la plus parlante est

représentée par la grande familiarité entre les rennes et leurs propriétaires/éleveurs. Les exemples les plus probants sont décrits dans la littérature comme les troupeaux n'ayant pas besoin de surveillance au cours du nourrissage, leur faculté à revenir seuls au campement, voire jusqu'à la tente de leur propriétaire/éleveur (Mirov, 1945). La castration reste l'élément le plus structurant dans l'utilisation des facultés grégaires, sociales du renne, de l'appivoisement et de la domestication progressive de celui-ci. On peut donc opposer l'appivoisement des hordes de rennes, qui se fait sur une portion d'espace importante et est fonction d'une probabilité saisonnière de rencontrer des troupeaux, de la domestication de ceux-ci, où la relation entre espace, troupeaux domestiqués et société d'élevage est particulièrement forte, et nécessaire à la pérennisation de l'activité. L'exemple des rennes sauvages du plateau d'Hardangervidda peut être évoqué. Il s'agit en effet de l'une des dernières populations de rennes sauvages existant actuellement en Scandinavie (voir partie 4), avec des enjeux écologiques d'animal non domestiqué. Cependant, les généticiens ont montré qu'un brassage génétique a eu lieu, de façon importante, entre les hordes de rennes sauvages du Plateau actuelles et les troupeaux de rennes semi-domestiqués des élevages de rennes saamis riverains, au cours du XIX^{ème} et du XX^{ème} siècle (Røed, Flagstad et al., 2011). La sous-population actuelle est ainsi constituée de descendants de rennes sauvages et de rennes domestiques féralisés (individus s'échappant du troupeau et se retrouvant en conditions naturelles). La complexité historique et géographique de la relation entre rennes sauvages et rennes semi-domestiques fait qu'il est particulièrement difficile de donner une date précise de la domestication du renne en Eurasie, et a fortiori en Laponie scandinave. Cette date supposée de la domestication du Renne peut être associée avec le développement d'activités économiques formellement centrées sur l'animal. Originellement chasseurs-cueilleurs, les populations qui sont aujourd'hui marquées par leur organisation sociale et culturelle dans l'élevage de rennes ont longtemps pris parti de l'ongulé comme ressource ponctuelle, avec d'autres : pêche d'eau douce et littorale, cueillette de fruits, etc.

Une question particulièrement importante est celle de la généralisation géographique (« régionalisation »), dans le contexte actuel de changement global complexe (et pluri-scalaire), pour une population qui a ses propres caractéristiques culturelles, linguistiques et qui se démarque par l'exploitation du Renne en ses territoires. La Laponie reste une région particulièrement intéressante où les définitions traditionnelles d'espace et de territoire en géographie semble partielles, et interdépendantes. Peut-on délimiter la Laponie ? Des points de vue archéologiques, historiques et écologiques, et si l'on se fie aux traces matérielles sporadiques laissées par les Saamis (sites sacrés, plantes nitrophiles associées au pâturage et à de hautes densités en rennes, etc), il semble difficile de délimiter précisément les contours de l'occupation de l'espace par cette population initialement chasseuse-cueilleuse, et qui a bénéficié d'échanges commerciaux tout au long de son existence (vente de peaux d'animaux, artisanat, Mériot, 1980). Il en est de même du point de vue linguistique, où de nombreux idiomes peuvent rendre l'intercompréhension difficile entre les locuteurs de Laponie selon qu'ils soient du centre sud de la Norvège ou de la péninsule de Kola. Neuf aires linguistiques se répartissent la région lapone (Scandinavie, Finlande et Russie incluses), elle-même difficilement délimitable selon le nombre de locuteurs saamis ayant cette langue maternelle (Fernandez, 1997).

Du point de vue administratif, et sur critères linguistiques et culturels, au moins quatre Laponies peuvent être identifiées : la Laponie norvégienne, la Laponie suédoise, finlandaise et russe. Ces quatre sous-ensemble sont régis par des systèmes juridiques nationaux divergents, tant dans la reconnaissance ethnique et culturelle de la « Saméité », du « fait same » (Cocq in Andersson [eds], 2013) que dans la gestion des pâturages ancestraux, dans une région du nord de l'Europe continentale où les enjeux économiques et commerciaux sont certains : énergie hydraulique, éolienne, minéraux (Cannobio, 2007). Il en est de même pour leur représentation à l'échelle des gouvernements scandinaves, finlandais et russes : les organes institutionnels saamis sont rares, et ne représentent que la partie « revendicatrice » de la population.

Ici, le parti pris est de délimiter géographiquement la Laponie selon la répartition des communautés d'éleveurs de rennes, en particulier en Suède, simplifiant la prise en compte des effets du changement global sur les paysages de l'élevage de rennes semi-domestiques. Il

semble malgré à tout important de conserver à l'esprit que cette délimitation semble éloignée des racines de la flexibilité du pastoralisme saami, et de sa culture, où la délimitation territoriale est exclue et arrive bien plus tard avec la gestion étatique des cheptels, et des ressources régionales.

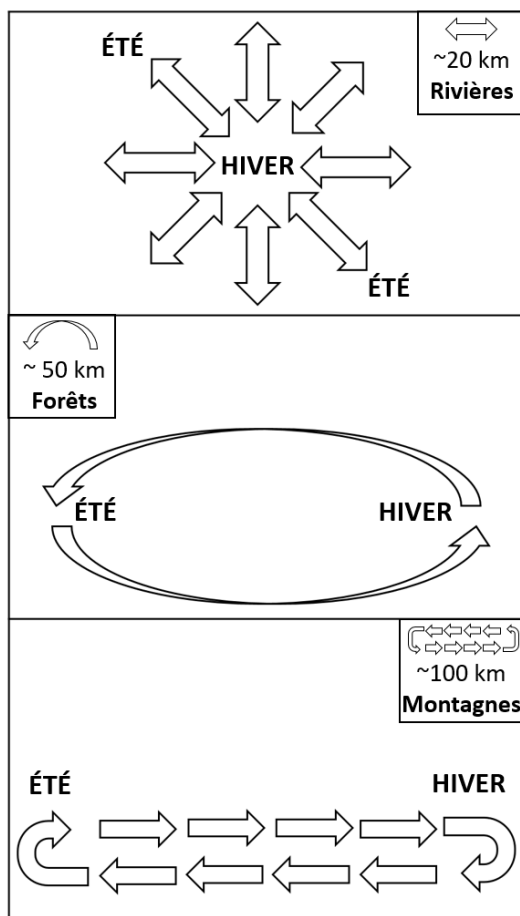
Encadré n° 3 Nomadisme ou semi-sédentarité ?

La question de la nomadicité ou de la sédentarité des populations d'éleveurs de rennes, en particulier Saamis, reste encore une fois complexe et transdisciplinaire, et finalement liée aux considérations politiques et sociales sur la nature « sauvage » et « ingérable » que l'on a attribué ou l'on attribue aux populations Saamis (Troy in Andersson, 2013 ; Roué, 2011). On trouve souvent dans la littérature le statut de « nomade », ou de « semi-nomade » pour décrire les systèmes pastoraux organisés autour du renne, et tout particulièrement les Saamis scandinaves (Mériot, 1984 ; Lahteenmaki, 2006). Il décrit conjointement le mode d'expression actuel de mouvement saisonnier des populations d'éleveurs de rennes, et une partie de l'année au cours de laquelle les éleveurs de rennes ne bougent pas de leurs habitations. Si historiquement ce concept de nomadisme sert à décrire les activités plurielles des Saamis sur de grands espaces géographiques et des ancrages quotidiens plus sociaux que spatiaux (pêche au printemps et à l'été, chasse en hiver), le glissement sémantique s'est focalisé sur l'activité d'élevage de rennes, et son exploitation (dont la « traditionnalité » reste à définir par les éleveurs eux-mêmes, la littérature orale et écrite saamie et scandinave, qui véhicule l'élevage de rennes, et par l'ethnologie autochtone ; Troy in Andersson [eds], 2013 ; Cocq in Andersson [eds], 2013). Le concept de nomadisme décrit ainsi le nomadisme saisonnier, avec un mouvement humain particulièrement prononcé en été, lorsque les troupeaux de rennes se déplacent en liberté dans les pâturages estivaux.

Ceci dit, trois grands types de modes migratoires viennent complexifier cette compréhension partielle de l'élevage de rennes et son expression géographique. Manker (1963) a notamment beaucoup étudié les Saamis sur un angle anthropologique et ethnologique. La figure ci-contre récapitule une partie de ses constats sur l'expression spatiale des systèmes pastoraux de rennes semi-domestiques en Scandinavie, qui reste étroitement liée à la capacité migratrice des rennes élevés (Manker, 1963 ; Forbes, Kumpula, 2009), mais aussi aux autres ressources valorisables par les populations locales, et leur spécialisation

économique. Différentes gyres migratoires sont ici présentées (figure ci-contre). En l'état actuel des connaissances de ce travail, il reste difficile de distinguer le rôle de l'Homme ou de l'animal dans ces modes migratoires : s'agit-il de la migration initiée par trois grands écotypes de rennes (aire vitale plus ou moins grande selon l'adaptation de la population de rennes aux conditions du milieu) ? Ou au contraire de la lente domestication de ces écotypes de rennes par les Saamis, qui accompagnent les troupeaux migrateurs en optimisant les déplacements des familles par l'exploitation extensive de ressources naturelles complémentaires ? Cette question reste ainsi étroitement liée au degré de domestication des troupeaux de rennes, qui donne en filigrane la dépendance du système pastoral et de la communauté saamie vis-à-vis de l'exploitation de cette ressource, et finalement son degré de dépendance socio-économique (exploitation et commerce de la viande, de l'artisanat et du tourisme autour du renne).

Si Manker trace quoiqu'il en soit les modes migratoires des communautés Saamies, et non des troupeaux de rennes sur lesquels s'adosent les communautés, cette organisation est synthétisée selon trois grands modes migratoires, ou gyres pastorales. Deux grands pôles



Tiré de Manker, *The People of Eight Seasons*, 1963
Réalisation : R. Courault (2017)

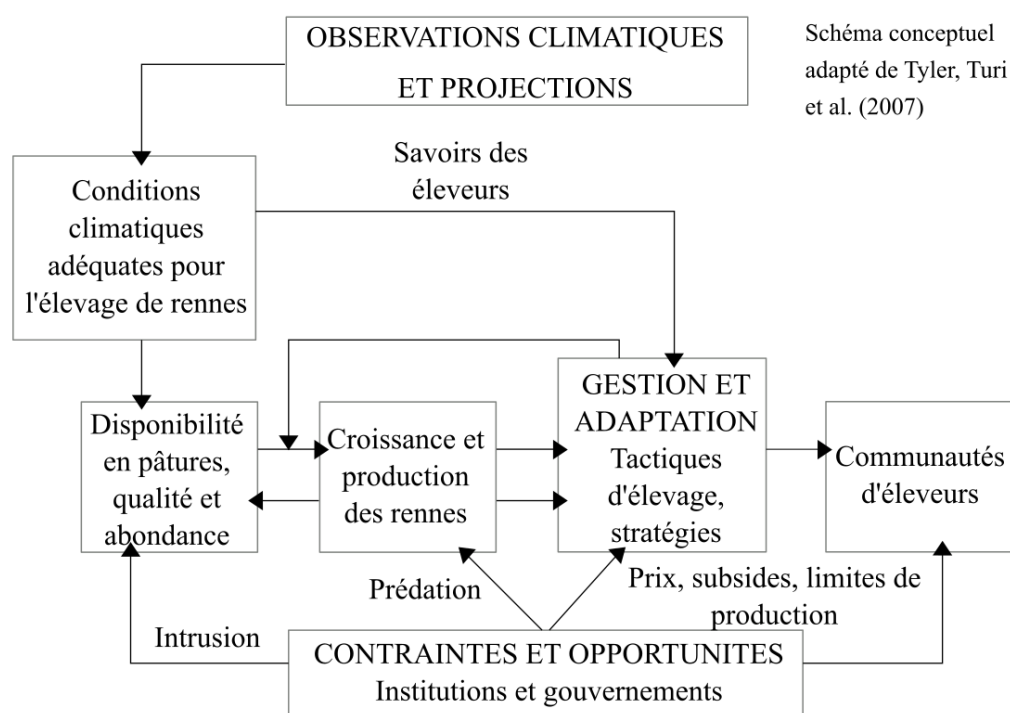
saisonniers organisent les trois schémas en figure ci-contre : été et hiver. Dans cette région où les saisonnalités (lumineuses, climatiques, biologiques) sont structurantes, celles-ci sont cruciales pour appréhender et distinguer différents modes migratoires, eux-mêmes structurant l'organisation socio-spatiale des systèmes pastoraux de l'élevage de rennes. Le premier mode migratoire est dit « en étoile », et semble représenter l'organisation annuelle des communautés d'éleveurs dans des régions où l'hydrographie est particulièrement développée, et permet conjointement la chasse, la pêche et la cueillette. Celui-ci est le principe « le plus ancien », en tout cas venant des Saamis Skolts (Russie), dont les systèmes pastoraux sont reconnus par les communautés scientifiques (anthropologues, linguistes) comme étant les

moins influencés par les cultures étatiques (Manker, 1963 ; Fernandez, 1997). Le système pastoral en « étoile » décrit une migration des éleveurs relativement faible en distance, dont les transhumances estivales pulsent autour de la « siida » (village d'hiver). Le deuxième mode migratoire est organisé selon le principe du « cercle », c'est-à-dire une organisation territoriale relativement relâchée entre été, automne, hiver et printemps. Les trajectoires pastorales inter-saisonniers sont ici bien différenciées dans leur géographie, avec un chemin d'automne distingué du chemin de printemps. Manker (1963) parle ici de « forests Lapp », c'est-à-dire de Saami des forêts, dont la spatialisation s'opère dans un champ limité (cinquantaine de kilomètres, à titre indicatif, figure ci-contre) au sein des forêts boréales de la péninsule fennoscandienne, localisées jusque dans les premiers piémonts de la chaîne de montagnes éponyme. Le dernier mode migratoire transcrit un mouvement en « fuseau », avec une organisation spatiale ressemblante au principe du « cercle » : un dipôle marqué en distance entre hiver et été, deux localisations bien distinctes entre les fjords ou les sommets fennoscandiens au cours du vêlage des rennes femelles, et en été, et le pâturage des troupeaux de rennes en hiver au sein des forêts de pins boréales. Contrairement au deuxième type de mode migratoire, le mode en « fuseau » décrit des trajectoires pastorales inter-saisonniers qui ne se distinguent pas entre l'automne et le printemps : les mêmes vallées sont empruntées par les troupeaux, qui jouissent de pâturages naturels spécifiquement différents en fonction de l'avancée dans la saison phénologique (au printemps : de jeunes pousses de ligneux et de Graminées, champignons et lichens avant les regels automnaux). Ce mode migratoire est le plus étendu dans l'espace, à l'échelle de la centaine de kilomètres, selon la distance entre village d'hiver (*siida*) et aire de vêlage des rennes femelles en été. Ces modes migratoires pastoraux, généralisés par Manker (1963), pourraient être reliés aux écotypes de *Rangifer tarandus tarandus* présents et migrants dans la région des communautés saamies considérées. Comme le précise l'encadré « sauvage ou domestique », la variabilité génétique et biologique des rennes est forte, en grande partie liée à sa place structurante, et sa survie au sein des écosystèmes européens froids, et à l'évolution temporelle de ceux-ci en fonction des grandes glaciations. D'après la littérature en écologie, à l'échelle circumpolaire, deux écotypes sont décrits pour *Rangifer tarandus tarandus* L. Un écotype forestier est distingué de l'écotype de toundra. Ceux-ci ont des réponses physiologiques à la variabilité bioclimatique longue distinctes, et des répartitions géographiques (aires vitales annuelles) plus ou moins grandes. Les écotypes forestiers ont tendance à être relativement peu mobiles au long de l'année

bioclimatique, tandis que les écotypes de Rennes de toundra se distinguent par leur grande amplitude géographique entre aire de vèlage et mobilité hivernale.

Encadré n°4 Système pastoral ou communautés d'éleveurs ? Pastoralisme ou élevage ?

Les systèmes pastoraux peuvent se définir comme étant l'ensemble des phénomènes, humains et non-humains, interagissant de concert et dans une aire géographique large. Ces interactions permettent le fonctionnement, l'exploitation et la jouissance humaine des ressources directes et indirectes liées à l'élevage extensif d'animaux dont les activités peuvent se dérouler dans une zone géographique large. Le fonctionnement et l'exploitation des produits de l'élevage peuvent être listés comme étant : mise en valeur de produits carnés, vêtements, artisanat, culture, gestion dans le temps et dans l'espace des troupeaux et des ressources végétales etc. Les systèmes pastoraux saamis, dans le contexte du changement global, ont été formalisés comme tels :



Ce modèle conceptuel, tiré de l'article de Tyler, Turi et al. (2007), montre la difficile généralisation de l'ensemble des phénomènes et facteurs, humains ou non-humains, interagissant entre eux dans le contexte actuel de l'élevage de rennes en Scandinavie. Le schéma résume tout de même une partie conséquente de ces facteurs, que l'on peut diviser conceptuellement en deux parties : une première partie est environnementale au sens large, et concerne aussi bien les facteurs naturels externes (climat ; disponibilité et accessibilité en pâtures) que des facteurs sociaux, humains externes, ici représentés par les contraintes et

opportunités apportés par les modes de gouvernance nationaux, régionaux. La deuxième partie du schéma porte sur les éléments humains composant les systèmes pastoraux de l'élevage de rennes, le faisant fonctionner dans le temps, et selon les aléas externes évoqués en premier lieu (environnement naturel et institutionnel). Ici, la communauté d'éleveurs est incluse dans le système pastoral d'élevage de rennes. La notion de communauté d'éleveurs reprend ici une définition géographique de l'expression territoriale, en l'occurrence les *sameby* (ou communauté saamie, en suédois) pour les Saamis de Scandinavie. Ces *sameby* sont chapeautés d'une organisation sociale traditionnelle, sans cesse réinventée, appelée *siida* (Delaporte, Roué, 1986 ; Cabouret, 1987 ; Fernandez-Vest, 1997 ; Nils Sara, 2009). Les villages composant la *siida* représentent des familles de propriétaires et d'éleveurs dont les troupeaux de rennes sont ceux de la communauté (Delaporte, Roué, 1986, Fernandez, 1997). La *siida* : « est une communauté saami locale qui a existé depuis des temps immémoriaux. L'élevage de rennes par *siida* est formé de l'adaptation des anciens principes de la *siida* de l'élevage de rennes extensif. Elle est le prérequis et l'unité d'organisation basique pour réaliser l'élevage de rennes à large échelle. » (Nils Sara, 2009). La *siida* est donc une unité socio-spatiale et économique de base, soumise à des recompositions constantes (familles ou individus, régulations étatiques) dans la gestion des troupeaux de rennes, en particulier en hiver, quand les éleveurs préparent la mise en pâturage et la transhumance d'été à venir, et se divisent la tâche de suivre et surveiller le troupeau constitutif de la *siida*, et le subdivisent. Le *sameby* peut regrouper plusieurs *siidas*, et ce concept peut se traduire par « pays saami » (Fernandez, 1997), ou « village saami », « district », ou « corporation » (Roué, Roturier et al., 2016 ; FAO, 2016). Il représente l'expression moderne de l'activité d'élevage de rennes, c'est-à-dire l'unité de gestion territorialisée, telle qu'elle est présente dans la figure ci-dessus, et dans les données étatiques de suivi de l'élevage de rennes (cartographies RenGIS 2.0, voir chapitres suivants). Un « Sameby » semble donc être l'expression actuelle des systèmes pastoraux suédois d'élevage de rennes : le concept suédois permettant de chapeauter l'organisation sociale et spatiale traditionnelle évoquée par le concept de *siida*. On peut donc dire que l'approche suédoise vient systématiser l'élevage de rennes, son expression géographique et gestionnaire. Ces systèmes d'élevage ont également une dimension pastoraliste affirmée, au regard de la migration longue distance des troupeaux de rennes, dont la domestication, et la gestion humaine associée, restent fondamentalement liés à l'exploitation de pâturages naturels à l'échelle de centaines de kilomètres, sur le balancement

saisonnier des déplacements de rennes. Les systèmes pastoraux semblent ainsi intimement liés à la géographie de la migration des systèmes pastoraux, elle-même intimement liée à celle des troupeaux de rennes *Rangifer tarandus*.

Encadré n° 5 : La communauté Gabna : état des connaissances

La communauté d'éleveurs de rennes Gabna s'étend presque longitudinalement, entre Vittangi et l'ouest de la vallée glaciaire du Torneträske. Cette communauté suédoise est dite « montagnarde » (*Swedish Saami Parliament*), et s'étire entre les sommets alpins de Fennoscandie (monts Coamoahas, Latnjacorru par exemple), le long de la vallée du Torne (lac Torneträske) et les forêts tourbeuses où coule le Torneälven. La grande majorité de la communauté saamie se trouve dans le comté de Nord-Botnie, et est principalement localisée au sein de la commune de Kiruna. La partie la plus orientale de la communauté est localisée au sein de la commune de Pajala. Historiquement, la communauté d'éleveurs Gabna était constituée de plusieurs siidas (villages d'hiver), dont le principal était localisé à Rensjön. D'après les travaux d'ethnologie, Rensjön était la résidence centrale des éleveurs, qui y restaient de fin avril à fin octobre. L'amorce et la fin de l'hiver s'opéraient entre Rensjön et Merasjärvi. Le vèlage, et la saison estivale se déroulaient de l'autre côté du lac Torneträske, pour atteindre historiquement les fjords de la région de Narvik (Manker, 1953, 1964) (figure I.2).

A ce niveau de connaissance, la communauté montagnarde d'éleveurs de rennes semi-domestiques de rennes apparaît plusieurs fois dans la littérature scientifique formelle : à plusieurs reprises, dans les livres de l'ethnologue Manker (1953, 1964), décrivant les gyres migratoires et les villages d'hiver composant le sameby, dont le remembrement a été monnaie courante au XXème siècle (Manker, 1953). La communauté Gabna apparaît à plusieurs reprises dans des revues scientifiques à comité de lecture, ainsi que dans la littérature « grise » (mémoire de master, université des Sciences agricoles suédoises, voir tableau récapitulatif ci-dessous).



Figure I.2 : Localisation de la communauté de Gabna

A plusieurs reprises la communauté Gabna est évoquée pour des questions environnementales (tableau I.1). Ces questions environnementales se démarquent par le nombre de disciplines élevé : éthologie et écologie ; sciences vétérinaires ; sociologie ou sciences juridiques. Les effets du changement global sont affichés pour l'ensemble des publications abordées : impacts de l'intensification de l'anthropisation, vices juridiques, mesures de protection paysagères, questionnements et perception des éleveurs sur la mise en pratique des concepts de « résilience » et « d'adaptabilité » par les promoteurs ou le gouvernement. La communauté Gabna semble ainsi particulièrement affectée par les effets locaux du changement global, en premier lieu représenté par la perte, directe ou indirecte en pâturages. Si la saison hivernale concentre géographiquement une grande partie des problématiques de pertes en pâturages, les effets du changement climatique, moins visibles, sont malgré tout particulièrement marqués en montagne (shrubification). Nous renvoyons à l'état de l'art concernant les études ayant traité de la densification des ligneux aux environs d'Abisko.

La première étude est universitaire, et discute des effets cumulatifs cartographiés de l'anthropisation (sites miniers, centres urbains, voies de communication, lignes haute-tension, etc), comparant les rennes semi-domestiques de la communauté Gabna avec les caribous de Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

Québec. La moitié hivernale (orientale) de la communauté est étudiée, où se concentrent les enjeux humains les plus importants. L'étude met en lumière le zonage de haute-intensité humaine des pâturages d'hiver de la communauté, et le besoin d'une prise en compte socio-écologique de cette problématique environnementale aux retentissements importants pour les cheptels de la communauté (Driedger, 2014).

Plusieurs études concernent le comportement alimentaire des rennes. L'une date de 2002 et traite des choix d'habitats et du comportement alimentaire des rennes femelles de la communauté Gabna au long de la saison chaude (partie occidentale de la communauté). Alliant observations de terrain, comptages et les premières technologies de suivi télémétriques, ils ont notamment mis en lumière le choix préférentiel des rennes femelles échantillonnées vers les formations végétales caractérisées par une biomasse plus importante, en particulièrement les sites présentant une biomasse importante en Saules (*Salix ssp*) et en Bouleaux (*Betula ssp* ; Mårell, Ball, 2002). La seconde est également menée par Mårell (2006). Ses travaux de thèse (SLU) montrent l'intérêt de la prise en compte saisonnière des comportements alimentaires des rennes semi-domestiques, en particulier la disponibilité en biomasse pâturable en saison estivale. Pour les troupeaux des communautés pastorales montagnardes (Gabna), celle-ci insiste sur le gradient bioclimatique altitudinal suivi progressivement par les troupeaux de rennes pour optimiser la prise de parties végétales jeunes, riches en protéines et hautement digestibles. Les espèces végétales caractérisées du point de vue biochimique dans la thèse sont *Betula nana* L., *Eriophorum angustifolium* L., *Rumex acetosa* L., *Vaccinium myrtillus* L., dont les contenus en azote/protéines sont reliés avec la présence de neige. Selon le degré de sélectivité des habitats (haute : sélection d'une communauté végétale ; basse : sélection d'espèces et de parties végétatives), les rennes semblent préférer la quantité à la qualité des végétaux. L'hétérogénéité paysagère est évoquée comme bénéfique pour les troupeaux de rennes (Marell, 2006).

La troisième étude est menée par la même équipe de chercheurs de l'Université des Sciences Agricoles suédoises, dont une antenne est présente à la station scientifique d'Abisko. Egalement sur la question des choix d'habitats des troupeaux de rennes semi-domestiques de la communauté Gabna, celle-ci aborde le sujet de l'hétérogénéité et de la hiérarchisation des choix d'habitats de nourrissage des rennes, cette fois ci à l'échelle de l'année biologique du

troupeau surveillé (toutes saisons confondues). Ils montrent que l'hétérogénéité spatiale forte des paysages de la communauté (en situation de double écotone, latitudinal et altitudinal) est associée à un comportement de nourrissage sélectif. Ils insistent sur la nécessité de conserver des paysages ayant une distribution spatiale continue à l'échelle de la communauté, et que cette variabilité paysagère « douce » permet de nombreux choix d'habitat comme cela a été démontré par le suivi des rennes femelles (Mårell & Edenius, 2005).

Trois études concernent les savoirs locaux. Deux sont des travaux réalisés par B. Inga (2007 ; 2008 ; SLU). Ils s'intéressent aux savoirs locaux autour de la végétation pâturée par les rennes (taxonomie suédoise et saamie, choix des espèces broutées et saisonnalité, qualification par les éleveurs des pâturages d'hiver). Les entretiens et questionnaires menés montrent notamment que la nomenclature saamie des végétaux vasculaires semble se limiter aux espèces prélevées et consommées par les rennes, mis à part quelques plantes graminoides indicatrices de bonnes pâtures estivales (*Equisetum fluviatile*). Ceci dit, le champ lexical de description des lichens broutés en hiver est riche (selon l'apparence et l'habitat de l'espèce), tout comme ceux décrivant la neige, et l'humidité des sols (un sol humide étant relié, d'après les éleveurs, à des couches de neige plus épaisses). Les lichens terricoles seraient préférablement broutés en hiver, dans une moindre mesure en été quand le temps est frais et humide. La troisième étude édicte l'importance de leur prise en compte dans les études sur le changement global. Comme pour les études de B.Inga, les auteurs insistent sur la diversité et la complexité des champs lexicaux de la neige. Ils soulignent notamment l'importance, en début d'hiver, des conditions de constitution de la première couche de neige sur les tapis lichéniques pâturés. Celle-ci est en effet déterminante pour l'accessibilité verticale aux tapis lichéniques et la bonne tenue de la saison pastorale.

Deux autres études ont été menées sur les sols. L'une porte sur la chimie des sols et des communautés végétales au sein desquelles des fèces de rennes sont trouvées (Barthélémy, Stark et al., 2015). Elle indique que la densité de fèces est significativement corrélée avec une augmentation substantielle de la productivité en biomasse végétale totale, en particulier celle des graminoides et des plantes ligneuses basses. Au-delà de la densité en fèces de rennes et l'enrichissement en nutriments dans le sol (azote) à même d'expliquer l'augmentation observée en biomasse, l'étude insiste sur les autres interactions entre l'herbivore et les

communautés végétales (nourrissage, et piétinement). Une seconde discute des évolutions temporelles des quantités d'éléments traces (métaux lourds) retrouvés dans les muscles et les reins des rennes semi-domestiques. Les résultats montrent des tendances temporelles en baisse significative pour la plupart des éléments-trace, hormis pour le chrome, le cuivre et le mercure, dont les tendances sont significativement à la hausse (1980-2005). Ces baisses générales des quantités de métaux lourds rejoignent les constats effectués pour le Césium 137 (accident de Tchernobyl), bioaccumulé par les lichens consommés en hiver. La variabilité saisonnière des taux de Césium 137 est donc marquée, faible en été et forte en hiver, même si la tendance est à la baisse. Pour les troupeaux de rennes contrôlés dont la limite acceptée est dépassée, des mesures de protection sont engagées par les éleveurs (changement de période d'abattage ; apport de fourrages externes en hiver).

Les dernières études traitent de la vulnérabilité de l'élevage de rennes, du point de vue des sciences sociales. La première (Brännlund & Axelsson, 2011) discute de l'utilisation flexible de zones de pâturages parmi les communautés étudiées, qui reste la stratégie d'adaptation historiquement utilisée par les éleveurs Saamis, face aux changements géohistoriques ayant lieu au cours du XIX^{ème} siècle en Laponie suédoise (colonisation et limitation de l'accès aux pâturages). Le deuxième article donne des éléments concrets sur les enjeux les plus importants aux yeux des membres des communautés entretenues, basés principalement sur les conflits territoriaux entre parties prenantes. L'exploitation minière, la foresterie, le tourisme et d'autres facteurs (prédation, exercices militaires, stations de recherche et parcs nationaux) sont notamment cités. Du point de vue de l'adaptation concertée des enjeux environnementaux liés à l'élevage de rennes, les auteurs soulignent également la faible participation des éleveurs aux réunions de consultation mises en place par les différents acteurs, du fait du manque de temps et du désintérêt à y trouver ou faire valoir des informations pouvant être utiles aux Saamis (Gallardo, Saunders, 2017). Enfin, une troisième étude (Labba, 2014) en sciences juridiques discute de la perte en pâturages d'élevage dû aux activités minières, dans le contexte politique suédois de souhait de renforcement des activités minières. L'article souligne les vides juridiques en matière de garantie des droits de propriété des éleveurs de rennes dans le document juridique de *Swedish Mineral Act*, et est contraire à la protection juridique des zones d'intérêt national dont font partie les pâturages, dans le Code de l'Environnement suédois.

L'intérêt de l'étude de cette communauté est ainsi pluriel, et peut être synthétisé par ses contours géographiques, et son allongement entre le biome de taïga et celui de toundra. Son statut officiel de communauté saamie « Montagnarde », dont les aires de vèlage sont localisées en montagne avec des pâturages hivernaux dans les forêts boréales, pose la question généralisée de la résilience de l'ensemble des systèmes pastoraux affectés par la fragmentation paysagère, et les effets directs ou indirects du changement climatique sur d'autres sociétés agricoles centrées sur l'élevage. Enfin, les territoires de la communauté sont également soumis à des enjeux économiques forts, notamment représenté par l'activité minière et ses conséquences locales sur la biosphère. Les sous-sols de la ville de Kiruna et ses alentours sont en effet particulièrement riches en minerais, notamment le fer et la magnétite (mine LKAB de Kirunavaara) et le cuivre (mine Boliden AB de Gällivare, Driedger, 2014).

Tableau I.1 : Récapitulatif des publications consultées sur la communauté de Gabna

Thématique abordée (mots-titres ou mots-clés)	Nombre de publications (articles scientifique, littérature grise)	Référence
Reindeer behavior : foraging, habitat selection	3	Mårell, Ball et al., 2002 ; Mårell & Edenius, 2005; Mårell, 2006
Foraging, winter pastures, vegetation and traditional ecological knowledges	3	Inga, 2007 ; Inga, 2008 ; Riseth, Tommervik et al., 2011
Cumulative impacts, human disturbance on reindeer, mineral activities	3	Driedger, 2014 ; Labba, 2014 ; Gallardo, Saunders et al., 2017
Trace elements, metal, Cesium 137, bioaccumulation	2	Odsjö, Räikkönen et al., 2007 ; Åhman, 2005
Vulnerability, adaptation strategies (to socio-environmental changes), political ecology	2	Brännlund, Axelsson et al., 2011 ; Gallardo, Saunders et al., 2017
Plant communities and reindeer feces	1	Barthelemy, Stark et al., 2015
Reindeer pastoralism ethnology	2	Manker, 1953 ; Manker, 1964

Annexe 2: Notes à l'issue de la première réunion avec le Parlement saami, Kiruna, août 2015. Dans la continuité, discussion de la conférence "Arctic ungulate conference", en Norvège, à laquelle j'ai pu assister dans les jours suivants

Premier contact, en particulier avec la responsable des relations internationales, et le responsable du service SIG du Parlement saami.

Présentation du cadre institutionnel, des objectifs de la thèse, et ce qui a déjà été réalisé et publié. Ceux-ci ne concernaient qu'indirectement la communauté Gabna à l'issue de cette première année de doctorat (la réunion ayant eu en août 2015): exploration des séries temporelles climatiques d'Abisko, démographiques des cheptels de rennes de la région Norrbotten (chapitre 3), reprise de la stratégie d'échantillonnage et objectifs des relevés de terrain à Abisko (réponse entre NDVI et formations végétales, disponibilité pastorale des ressources végétales des rennes).

Ressenti d'une bienveillance, teintée d'interrogations de leur part: comment est-il arrivé qu'un français vienne seul au Parlement annoncer qu'il travaille sur l'élevage de rennes et le changement global? Explication des premières explorations en master 2, avec le programme BRISK et le Muséum national d'Histoire Naturelle. Très vite, l'éco-anthropologie est citée, et le nom d'une personne de la SLU, notamment liée aux chercheurs français du MNHN apparaît. Ils m'expliquent ce qu'est un sameby, une communauté d'éleveurs, et que j'ai travaillé à Abisko au sein des pâturages de la communauté Gabna. Je leur demande, "Would you like to me be your scientific representant?", à propos des Gabna. Ils ne répondent pas. Après coup, je comprends facilement qu'ils n'en ont pas vraiment besoin.

J'évoque la partie norvégienne de la communauté suédoise: y'a-t'il des effets de frontières, comme j'avais pu le lire, et le voir en image satellite entre la Norvège et la Finlande: une où les pâturages sont surpâturés du côté finlandais, beaucoup plus mesuré en Norvège. Comment réagissent les éleveurs norvégiens du côté de Narvik?

Je sens une certaine tension, ces questions ont l'air de déranger. La représentante des relations internationales calme le jeu. "Okay for Gabna. But only if you work on climate and

vegetation. This norwegian part of Gabna you mentioned, forget it”. L'accord semble être conclu, et je ne travaillerai non pas “sur”, mais “avec” la communauté Gabna.

Par la suite, questions et explication des saisons pastorales saamies. Plus de détails dans les publiés de Lépy, Heikkinen, 2012, ou encore Sandström, Grandvist-Pahlèn et al. 2003. Ici saisons pastorales exprimées en Saami du nord (premier terme); Saami de Lule (deuxième terme). Gabna: principalement saami du nord, mais proche de l'aire linguistique du saami de Lule (Jokkmokk, Luleå).

- “Vrai” hiver : Dállvie (Saami du nord)/ Dàlvve (Saami de Lule). Dàlvvådat: temps hivernal. Jusqu'à ~15 janvier
- Fin-d'hiver/Début de printemps: Gijrrådálve (SN) Giddådàlvve (SL), jusqu'au ~30 avril
- “Vrai” printemps: Gijrra (SN); Giddà (SL): Giddet: provoquer le gel. Miesse mannu: mois de mai. Miessta: buisson. Miesstakazirat: Spirea (Genre Spirea. Gieddi: pelouse, jusqu'au ~15 juin
- Fin de printemps/début d'été: Gijrragiessie (SN) / Giddàgiesse (SL). Jusqu'à ~15 juillet
- Ete: Giessie (SN)/Giesse (SL). Jusqu'à ~15 août
- Fin d'été/début d'automne: Tjakkttjagiessie (SN)/Cakcakgiesse (SL) jusqu'au ~15 septembre
- Vrai automne: Tjakkttja (SN)/Cakcak (SL). Cakcakmànnu: mois de septembre. Début ~15 septembre
- Fin d'automne/début d'hiver : Tjakkttjadàlvvie (SN)/Cakcakdàlvve (SL). Jusqu'au ~15 octobre
- Miessemànnu: mois des faons/vêlage (mai)

Grandvist-Pahlen 2003: “Each season represents a separate phase of reindeer grazing”

Conseils de ressources et de sites:

samer.se/english

sametinget.se : Rännering (Rennes, élevage), Samebyar (Laponie, communautés d'éleveurs). Sameby: village saami/district/communauté. Markanvänding : utilisation des sols. Kartor: carte.

Statistik : Renhjorder (troupeau de rennes). Vajor: femelles; Kalv: faons; Rentjur: mâles

“Land is life” : élevage traditionnel de rennes

Programme environnemental saami: Eallingbiras

hakan.tunon@slu.se : biologiste / anthropologue

Par la suite, je leur dis que je suis inscrit au cours doctoral de Birgitta Åhman, “Connecting sciences and local communities in Rangifer research”, qui se tiendra la semaine suivante à Enafors, dans le centre de la Suède. Ils ont l’air de bien connaître la SLU. Je leur demande si ils seront présents à la Northern Ungulate Conference, à Roros en Norvège (une centaine de kilomètres à l’ouest d’Enafors), et si on pourra se rencontrer à cette occasion. “Not this time, my friend” , me répond-on.

Je comprendrai, en arrivant à Roros pour la Northern Ungulate Conference, que les Saamis n’ont pas l’air d’être les bienvenus dans le palace luxueux tenant lieu de la conférence.

L’unique présentation provient d’un journaliste norvégien, qui défend les droits des saamis avec beaucoup de stéréotypes (voir poster récupéré, en annexe ci-contre). Tout le reste est très orienté sciences dures, mais réunit de nombreux acteurs internationaux, avec lesquels des doctorants et moi-même avons pu rencontrer et discuter pendant la présentation des posters fabriqués du PhD-course “Connecting sciences and local communities in Rangifer research”. In fine je saisis les objectifs de ce cours et son organisation en amont de la conférence, la création et la présentation de posters et de doctorants désireux de prendre également en compte la dimension humaine des ongulés arctiques: les éleveurs de rennes, qu’ils soient scandinaves, russes ou américains. Il me semble qu’il s’agit conjointement de briser certains codes académiques (multi-disciplinarité et éthique), et de souligner aux scientifiques et responsables territoriaux leurs rôles en tant que partie - prenantes plus ou moins directs des

systemes pastoraux d'élevage "autochtone". Quoiqu'il en soit, la conférence est très riche d'informations en écologie, biologie, éthologie. Les notes issues de cette conférence seront j'espère retranscrites par la suite.

Annexe 3 : Localisation en UTM 34N des relevés floristiques (inventaires et points paysagers) et descripteurs géographiques associés

ID	Nom relevé	Méthode	Tavg 2050 NorESM1-MRCP 8.5	Tavg 2050 IPSL-CM5A-LR RCP 8.5	Moy Tavg 2050 NorESM1/IPSL	Tavg 1970-2000 World Clim	NDVI Landsat Jul 2017	NDVI Landsat Jul 2006	Habitat Corine Land Cover	Classe altitude (m) ASTER GDEM	Exposition	Latitude (UTM 34N)	Longitude (UTM 34N)	Formation végétale principale Swedish Vegetation Map (nomenclature)	Formation végétale Swedish Vegetation Map (Swedish)	Formation végétale Swedish Vegetation Map (French)
1	NJ_490	relevé pixel transect	2,92083	5,3125	4,116665	0,26667	0,85464	0,78036	23	1450 m à	89,68357	7585018,5	407558,5	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
2	NJO_445	relevé pixel transect	2,76667	5,3	4,033335	0,16667	0,80375	0,73451	23	451 à 900 m	315,32068	7582446,664	409352,2822	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
3	TOR_367	relevé pixel transect	2,76667	5,35	4,058335	0,225	0,74412	0,62676	23	1450 m à	21,55126	7583010,232	420388,255	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
4	TOR_410	point paysager	2,71667	5,25417	3,98542	0,5	0,75673	0,75284	23	1450 m à	345,27405	7583447,07	417414,8599	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
5	treeline_lake	point paysager	2,75	5,09583	3,922915	0,5	0,69318	0,55948	23	1450 m à	1,83783	7583206,07	417756	800	Open myrvegetation	Végétation ouverte des tourbières/marais
6	fence_trepassor	point paysager	2,25417	3,4625	2,858335	0,6	0,78399	0,74467	23	1450 m à	32,59762	7575704,327	429435,6546	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
7	eratosthene	point paysager	1,0125	3,4625	2,2375	0,64167	0,78152	0,73913	23	451 à 900 m	343,49908	7575391,202	427653	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
8	shrubland	point paysager	3,10833	5,50833	4,30833	0,59167	0,78921	0,74895	23	1450 m à	60,0094	7585011,473	407934,5671	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
9	Betulaie pluricaule	point paysager	2,92083	5,50833	4,21458	0,59167	0,85219	0,80325	23	1450 m à	89,68357	7585066,662	407858	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
10	tourbiere a carex	point paysager	2,92083	5,3125	4,116665	0,26667	0,81015	0,74952	23	1450 m à	89,68357	7585089,662	407736,4329	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
11	Lande bouleaux, 489m	point paysager	2,92083	5,3125	4,116665	0,26667	0,84713	0,81133	23	1450 m à	89,68357	7585041,095	407552,7562	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
12	treeline	point paysager	2,71667	5,25417	3,98542	0,5	0,75673	0,75284	23	1450 m à	345,27405	7583455,095	417391,189	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse

13	entre deux lacs	point paysager	2,76667	5,3	4,033335	-0,16667	0,79669	0,71555	23	1450 m	0,78004	7582788,293	409372	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
14	ABI_377	relevé pixel transect	3	5,53333	4,266665	0,3	0,76724	0,63189	23	1450 m	0,78004	7583410,125	409734,5834	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
15	SLO_570	relevé pixel transect	2,34167	4,7375	3,539585	-0,625	0,84294	0,79494	23	451 à 900 m	113,44067	7583037,669	406508,0759	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
16	REIN_430	relevé pixel transect	1,4	3,53333	2,466665	-1,2	0,85812	0,78386	23	1450 m	78,86469	7514729,031	484744	634	Torr-frisk barrskog	Forêt d'épineux sèche et fraîche
17	HAJ_525	relevé pixel transect	1,65417	3,97917	2,81667	-1,4	0,8125	0,71081	23	451 à 900 m	61,33209	7556723,031	450618,9375	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
18	LUO_587	relevé pixel transect	1,2125	3,3	2,25625	-1,75833	0,85504	0,77192	23	451 à 900 m	71,31447	7530045,969	467362	734	Torr-frisk lövskog	Forêt de feuillus sur terrain sec et frais
19	rennes_paturant_envexx	point paysager	3	5,53333	4,266665	0,3	0,79351	0,69251	23	1450 m	0,78004	7583391,735	409741,4708	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
20	reingarde_597m	point paysager	0,29167	2,32917	1,31042	-1,66667	0,7476	0,69882	23	451 à 900 m	279,89267	7498827,735	509015,5292	NODATA	NODATA	
21	reaching_slupoint	point paysager	1,5375	4,17083	2,854165	-1,45833	0,80705	0,8211	23	451 à 900 m	3,02769	7578210,508	410318,0158	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
22	abiskojaure_surroundings	point paysager	2,975	5,4125	4,19375	0,39167	0,88863	0,83958	23	1450 m	357,26837	7584164,206	407892,5875	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
23	STA420A	relevé pixel transect	3,04583	5,57917	4,3125	0,3	0,81983	0,76361	23	1450 m	17,32607	7583863,202	410071,5964	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
24	STA420B	relevé pixel transect	3,04583	5,57917	4,3125	0,3	0,81983	0,76361	23	1450 m	17,32607	7583859,202	410090	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
25	STA420C	relevé pixel transect	3,04583	5,57917	4,3125	0,3	0,78833	0,71371	23	1450 m	17,32607	7583849,793	410110,7556	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
26	NJU391A (1 et 2)	relevé pixel transect	2,975	5,50833	4,241665	0,39167	0,88863	0,83958	23	1450 m	357,26837	7584190,735	407897,4708	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
27	NJU391B (1 et 2)	relevé pixel transect	2,975	5,4125	4,19375	0,39167	0,88911	0,81804	23	1450 m	357,26837	7584157,735	407926,5292	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse

28	NJU391C (1 et 2)	relevé pixel trans ect	2,975	5,4125	4,19375	0,39167	0,88116	0,76057	23	1 à 450 m	357,26837	7584123,869	407948,7542	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
29	BAJ448A (1 et 2)	relevé pixel trans ect	2,76667	5,3	4,033335	0,16667	0,77063	0,70456	23	451 à 900 m	315,32068	7582434,503	409338,3232	423	Frisk rished	Lande fraîche
30	BAJ448B (1 et 2)	relevé pixel trans ect	2,76667	5,3	4,033335	0,16667	0,85221	0,78639	23	451 à 900 m	329,51138	7582464,666	409366,8982	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
31	BAJ448C (1 et 2)	relevé pixel trans ect	2,76667	5,3	4,033335	0,16667	0,79848	0,77355	23	451 à 900 m	329,51138	7582495,358	409398,1191	730	Mossmarksövskog	Forêts de feuillus avec tapis de mousse
32	MAS_270	relevé pixel trans ect	1,92083	3,975	2,947915	-0,375			24	1 à 450 m	126,09236	7485485,752	547137,3492	NODATA	NODATA	NODATA
33	EFID_219	relevé pixel trans ect	1,81667	3,87917	2,84792	-1,175			24	1 à 450 m	198,82907	7505257,228	541786,4087	NODATA	NODATA	NODATA
34	TER_350	relevé pixel trans ect	1,80883	3,9875	2,897915	-0,98333	0,81913	0,77824	24	1 à 450 m	165,7628	7530194,031	487131	634	Torr-frisk barrskog	Forêt d'épineux sèche et fraîche
35	EFID_222	relevé pixel trans ect	2,025	4,05833	3,041665	-1,11667	0,79921	0,77928	24	1 à 450 m	105,28982	7504529,232	524783,1545	NODATA	NODATA	NODATA
36	ressiere_equiene	point paysager	1,40883	3,44583	2,42708	-1,375	0,73244	0,63687	24	1 à 450 m	8,06403	7500388,735	509412,5292	NODATA	NODATA	NODATA
37	tourbe_sous_for et_efid221	point paysager	1,9	3,9375	2,91875	-0,71667	0,83774	0,73527	24	1 à 450 m	341,55203	7503181,735	510134,4708	NODATA	NODATA	NODATA
38	post-EFID19	point paysager	1,81667	3,87917	2,84792	-1,175			24	1 à 450 m	151,38834	7505387,147	541753,0846	NODATA	NODATA	NODATA
39	sand_carriere_post-EFID222	point paysager	1,98333	4,0375	3,010415	-0,81667			24	1 à 450 m	287,35049	7501706,514	525458,9712	NODATA	NODATA	NODATA
40	reperage EFID222	point paysager	2,025	4,07917	3,052085	-1,11667	0,65513	0,63826	24	1 à 450 m	108,16227	7504594,84	524833,2769	NODATA	NODATA	NODATA
41	NJU_1060	relevé pixel trans ect	0,53333	2,19167	0,82917	-2,29167	0,72188	0,61687	26	901 à 1500 m	85,47786	7585680,605	405053,7441	471	Alpin lagortang	Prairie alpine
42	REIN_1150	point paysager	0,07083	2,50417	1,2875	-2,31667	0,72325	0,6607	26	901 à 1500 m	144,13004	7571637,484	420564,2574	471	Alpin lagortang	Prairie alpine
43	lapgate bank1	point paysager	-0,025	2,44167	1,208335	-2,525	0,7195	0,66393	26	901 à 1500 m	20,75548	7576853,031	416729,3247	422	Torr rished	Landes exposées au vent
44	lapgate bank12	point paysager	-0,025	2,44167	1,208335	-2,41667	0,63761	0,57594	26	901 à 1500 m	344,94141	7577120,432	416624,6374	422	Torr rished	Landes exposées au vent

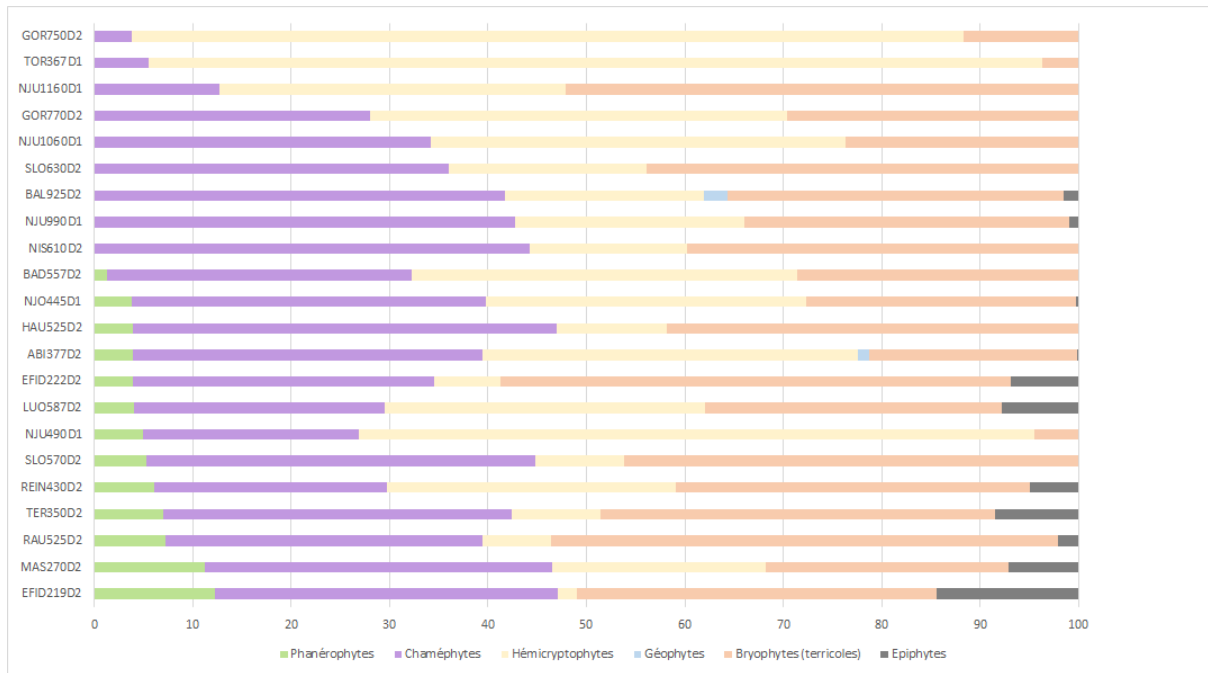
Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

45	reingarde	point paysager	-0,8125	1,65417	0,420835	-2,75	0,65076	0,60268	26	901 à 1500 m	159,20233	7572601,202	419478,5964	471	Alpin lagortang	Prairie alpine
46	GOR_750	relevé pixel transect	0,37917	3,6	1,989585	-1,89167	0,48671	0,70828	26	451 à 900 m	48,7775	7584340,031	393697,9375	471	Alpin lagortang	Prairie alpine
47	GOR_770	relevé pixel transect	1,42083	3,85417	2,6375	-1,75833	0,77452	0,74353	26	451 à 900 m	0,48514	7582979,844	395042,875	471	Alpin lagortang	Prairie alpine
48	NJU_990	relevé pixel transect	0,36667	2,53333	1,45	-2,05833	0,6054	0,56309	27	901 à 1500 m	107,64208	7584880,89	405638,2167	422	Tor rished	Landes exposées au vent
49	Pelouse piquete	point paysager	-0,00417	2,75833	1,37708	-2,05833	0,53977	0,46848	27	901 à 1500 m	107,64208	7585095,284	405815,189	422	Tor rished	Landes exposées au vent
50	BAD_557	relevé pixel transect	2,17083	4,64167	3,40625	-0,55	0,72313	0,67556	27	451 à 900 m	5,14512	7580512,19	412871,7518	422	Tor rished	Landes exposées au vent
51	NIS_610	relevé pixel transect	1,79583	4,17083	2,98333	-1,45833	0,70027	0,67253	27	451 à 900 m	3,02769	7578533,708	410308	422	Tor rished	Landes exposées au vent
52	SLO_630	relevé pixel transect	1,29167	3,84167	2,56667	-1,5	0,73848	0,70337	27	451 à 900 m	124,41179	7582440,031	403226	800	Open myrvegetation	Végétation ouverte des tourbières/marais
53	RAU_525	relevé pixel transect	1,7125	4,0125	2,8625	-1,725	0,76765	0,71619	27	451 à 900 m	336,35031	7542273,031	452878,9375	734	Torr-frisk lovskog	Forêt de feuillus sur terrain sec et frais
54	BAL_925	relevé pixel transect	-0,56667	2,75	1,091665	-2,88333	0,5726	0,55242	27	901 à 1500 m	316,91003	7575895,462	407246,8975	422	Tor rished	Landes exposées au vent
55	point_culminant_telecom	point paysager	0,375	2,55833	1,466665	-1,50833	0,6354	0,57493	27	451 à 900 m	82,10181	7498745,265	509621	NODATA	NODATA	NODATA
56	foggy_as_hell	point paysager	-0,53333	2,19167	0,82917	-2,38333	0,46494	0,43784	27	901 à 1500 m	85,47786	7585378,735	405058,4708	132	Permanent snölega	Glaciers ou neiges pérennes
57	betulaie_pluricaules	point paysager	2,31667	4,83333	3,575	-0,69167	0,70959	0,67014	27	451 à 900 m	337,36688	7579944,467	409329,749	422	Tor rished	Landes exposées au vent
58	plateau_sec	point paysager	2,53333	4,92083	3,72708	-0,71667	0,83071	0,74687	27	451 à 900 m	339,06363	7580408,508	408677,9842	422	Tor rished	Landes exposées au vent
59	exBAL760	point paysager	0,26667	3,4875	1,877085	-1,99167	0,78017	0,71774	27	451 à 900 m	346,21481	7577384,508	407315	423	Frisk rished	Lande fraîche
60	plaine_alluviale_korsavag	point paysager	0,37917	3,6	1,989585	-1,89167	0,52298	0,67701	27	451 à 900 m	49,23144	7584325,206	393622	471	Alpin lagortang	Prairie alpine

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

61	BAD590A (1 et 2)	relevé pixel transect	1,7375	4,275	3,00625	-0,91667	0,72755	0,64816	27	451 à 900 m	333,32858	7579674,999	412018,1583	422	Tor rished	Landes exposées au vent
62	BAD590B (1 et 2)	relevé pixel transect	1,7375	4,275	3,00625	-0,91667	0,66876	0,58025	27	451 à 900 m	333,32858	7579705,161	412047,7917	422	Tor rished	Landes exposées au vent
63	BAD590C (1 et 2)	relevé pixel transect	1,7375	4,275	3,00625	-0,91667	0,65212	0,58032	27	451 à 900 m	333,32858	7579735,324	412077,9542	422	Tor rished	Landes exposées au vent
64	NJU1048A (1 et 2)	relevé pixel transect	0,21667	2,75833	1,4875	-1,29167	0,6377	0,60396	27	902 à 1500 m	101,30754	7585071,232	406029,2672	422	Tor rished	Landes exposées au vent
65	NJU1048B (1 et 2)	relevé pixel transect	0,21667	2,75833	1,4875	-1,29167	0,67568	0,62776	27	903 à 1500 m	101,30754	7585111,727	406035,5868	422	Tor rished	Landes exposées au vent
66	NJU1048C (1 et 2)	relevé pixel transect	0,21667	3,1875	1,702085	-1,29167	0,61218	0,55253	27	904 à 1500 m	101,30754	7585157,764	406045,641	422	Tor rished	Landes exposées au vent
67	pre-EFID219	point paysager	1,85417	3,85	2,852085	-1,175			29	1 à 450 m	107,43719	7505545,052	542068,8953	NODATA	NODATA	NODATA
68	NJU_1160	relevé pixel transect	0,42917	2,20833	0,88958	-2,29167	0,5404	0,46783	32	902 à 1500 m	18,15904	7586192,025	405090,0224	422	Tor rished	Landes exposées au vent
69	rocky_as_hell	point paysager	0,53333	2,00417	0,73542	-2,38333	0,5186	0,49822	32	901 à 1500 m	92,75577	7585037,514	404855	132	Permanent snölega	Glaciers ou neiges pérennes
70	tourbe sous conifères	point paysager	1,98333	4,0375	3,010415	-0,74167			36	1 à 450 m	287,35049	7501189,208	525547,6276	NODATA	NODATA	NODATA
71	foret_dense	point paysager	1,9625	4,01667	2,989585	-0,74167			36	1 à 450 m	2,68501	7500804,735	525636	NODATA	NODATA	NODATA

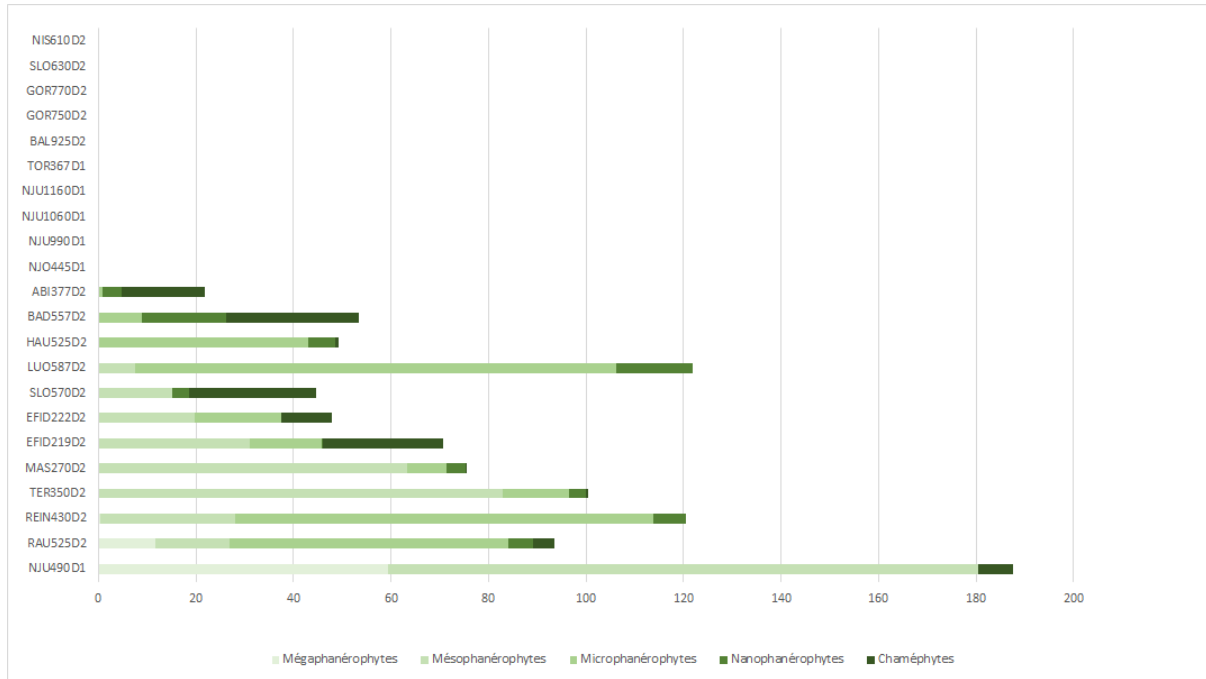
Annexe 4a : Spectres biologiques basés sur les inventaires floristiques effectués au cours du doctorat



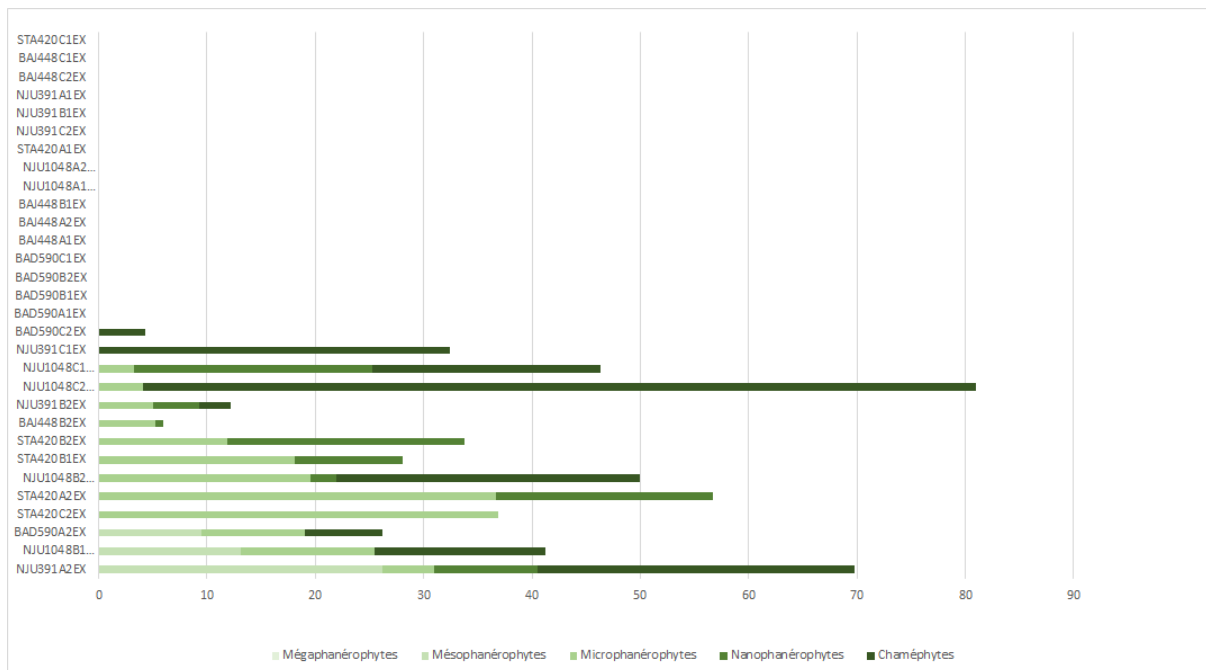
Annexe 4b : Spectres biologiques basés sur les inventaires floristiques effectués au cours de la mission Envexx (Sorbonne-Université, Collège des Licences)



Annexe 4c : Pseudo-spectres biologiques en strate haute, basés sur les Intercept Cover effectués au cours du doctorat



Annexe 4d : Pseudo-spectres biologiques en strate haute basés sur les Intercept Cover effectués au cours de la mission Envexx (Sorbonne-Université, Collège des Licences)

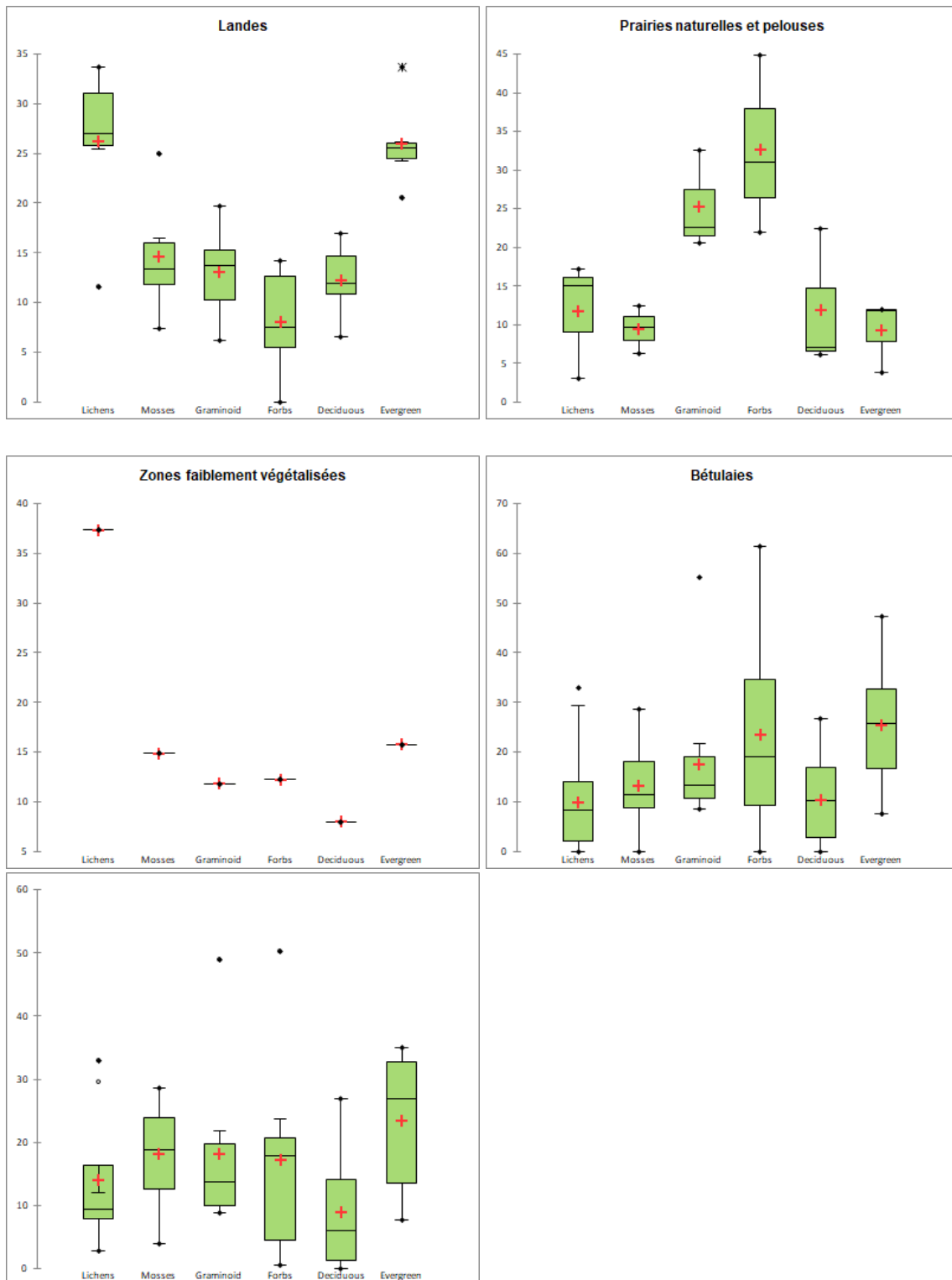


Annexe 5 : Tableau des espèces pâturables par les rennes semi-domestiques (C. Lefrère, 2003)

Espèces végétales	Biotope										Sol			Période de pâturage							Partie broutée			
	Versant face au vent	Versant face au vent	Versant protégé	Plaque de neige longue durée	Buisson de saule	Marécage	Forêt de bouleaux	Forêt de pins	Plage	??	??	?	Printemps	Début d'été	Eté	Fin d'été	Automne	Début d'hiver	Hiver	Fin d'hiver	Feuilles	Bourgeons	Toute la plante	Racines
<i>Agrostis mertensii</i>				x		x	x		x						x	x	x				x			
<i>Alectoria sarmentosa</i>							x	x				x	x						x	x				x
<i>Angelica archangelica</i>					x		x			x			x	x	x	x	x				x			x
<i>Betula nana</i>	x	x	x								x	x	x	x	x						x	x		
<i>Betula tortuosa</i>							x	x					x	x							x			
<i>Bryoria fuscescens</i>							x	x				x	x					x	x					x
<i>Carex aquatilis</i>						x			x			x	x	x	x	x					x			x
<i>Carex bigelowii</i>	x	x	x	x								x	x	x	x						x			x
<i>Carex invucello ???</i>						x			x			x	x	x	x						x			x
<i>Carex lasiocarpa</i>						x						x	x	x	x		x	x			x			x
<i>Carex rostrata</i>						x			x			x	x	x			x				x			x
<i>Carex saxatilis</i>						x					x		x	x							x			
<i>Cetraria islandica</i>				x			x	x				x	x	x	x	x	x	x	x	x				x
<i>Cetraria nivalis</i>	x											x	x				x	x	x	x				x
<i>Cicerbita alpina</i>					x		x			x	x			x	x	x	x				x			
<i>Cladina arbuscula</i>	x	x					x	x				x	x	x	x	x	x	x	x	x				x
<i>Cladina rangiferina</i>		x					x	x				x	x	x	x	x	x	x	x	x				x
<i>Cladina stellaris</i>		x					x	x				x	x	x	x	x	x	x	x	x				x
<i>Cladonia unciata</i>		x					x	x				x	x	x	x	x	x	x	x	x				x
<i>Deschampsia alpina</i>					x		x					x		x	x	x						x		
<i>Deschampsia cespitosa</i>					x							x	x	x				x			x	x		
<i>Deschampsia flexuosa</i>			x	x	x		x	x				x	x	x				x			x	x		
<i>Empetrum hermaphroditum</i>	x	x	x				x	x				x	x				x	x	x	x	x			
<i>Epilobium angustifolium</i>							x	x			x		x	x	x	x	x							x
<i>Equisetum fluviatile</i>									x			x	x				x	x						x
<i>Equisetum hyemale</i>							x	x	x	x	x					x	x	x						x
<i>Eriophorum angustifolium</i>						x			x			x	x	x	x	x	x	x			x	x		x
<i>Eriophorum scheuchzeri</i>				x	x	x			x			x	x	x				x				x		x
<i>Eriophorum vaginatum</i>						x			x			x	x					x			x	x		x
<i>Festuca ovina</i>	x											x	x	x	x	x	x					x		
<i>Filipendula vulgaris</i>							x	x			x	x				x	x	x				x		
<i>Geranium sylvaticum</i>					x		x	x			x	x				x	x	x				x		
<i>Hypogymna physodes</i>							x	x				x	x						x	x				x
<i>Juncus filiformis</i>						x	x	x	x			x	x	x								x		x
<i>Juncus trifidus</i>	x	x										x	x	x								x		
<i>Lactarius tomentosus</i>							x											x						x
<i>Leccinum versipelle</i>							x					x						x						x
<i>Luzula pilosa</i>							x	x				x	x	x								x		
<i>Melampyrum sylvaticum</i>							x	x		x				x	x									x
<i>Menyanthes trifoliata</i>						x			x	x	x		x	x	x	x	x	x			x			x
<i>Molinia caerulea</i>						x						x	x	x							x	x		
<i>Oxyria digyna</i>				x			x					x		x	x	x	x					x		
<i>Phleum alpinum</i>				x			x					x		x								x		
<i>Poa alpina</i>				x			x					x		x								x		

Romain Courault – « Les paysages culturels de l'élevage de rennes face au changement global » - Thèse de Géographie,

Annexe 6 : Boîtes de dispersion des relevés floristiques, sur les espèces classifiées selon le type de feuillage. Statistiques exprimées en pourcentages, prenant en compte les relevés du doctorat et excluant les données du projet Envexx (SU, Collège des Licences).



Annexe 7, semaine d'école doctorale SLU en août 2015, "Connecting science and local communities in Rangifer research".

J'ai essayé, dans la mesure du possible, de structurer au maximum les notes prises tout au long de la semaine. Malheureusement, il a parfois été compliqué sur le terrain et en relisant les notes, de rattacher tel élément à telle journée/cours/thématique traitée. L'ordre des notes suit celui de la semaine. Le programme de la semaine de PhD-course apparaît ci-dessous.

Monday 10 August

The role and significance of reindeer and caribou

Tuesday 11 August

Research ethics in indigenous research

Wednesday 12 August

Participatory research approaches

Thursday 13 August

Study visit Njaarke reindeer herding community

Friday 14 August

Research communication

Le cours "Connecting sciences and local communities in Rangifer researches" (NOVA/IRSAE/SLU) rassemblait différentes personnes, en tant qu'encadrant.e.s. et en tant que doctorant.e.s.

Pour les encadrant.e.s, la composition de l'équipe peut être trouvée sur Internet.

Ici, ce sont en particulier le parcours et la spécialité des chercheur.e.s qui m'ont intéressé.

- Un chercheur canadien, en "freelance" rattaché à un institut de recherche norvégien. Il a un très fort accent américain, disons "campagnard", et travaille sur le caribou et une maladie qui touche le bétail (bovins, de plus en plus rennes) : la Brucellose.
- Une chercheuse suédoise, rattachée à l'Université suédoise des sciences agricoles, originellement rattachée au domaine des sciences vétérinaires, en particulier à l'impact

des retombées radioactives de Tchernobyl sur la mortalité des rennes, et la bioaccumulation du Césium sur les pâturages des éleveurs. A l'origine de la création du cours, elle travaille sur les problématiques transdisciplinaires de l'élevage de rennes (changement climatique, surpâturage, dissémination de la recherche, géoarchéologie, revendications territoriales saamies).

- Une chercheuse suédoise en écologie à l'université des sciences agricoles suédoises, travaillant sur les questions comportementales et spatiales d'évitement des rennes (semi-domestiques et sauvages) aux perturbations anthropiques, en particulier dans le diagnostic d'impact de construction de sites touristiques et de sites de production d'énergie éolienne.
- Une chercheuse suédoise, à l'époque en post-doctorat à la SLU, travaillant sur les effets du changement climatique et leur perception par les éleveurs sur le socio-écosystème d'élevage de rennes suédois. Spécialisée en sciences politiques et en recherche participative.
- Une chercheuse italienne, à l'époque en post-doctorat à l'université suédoise des sciences agricoles. Elle travaillait en particulier sur l'estimation de biomasse lichénique dans les pâturages d'hiver des communautés saamies suédoises, s'appuyant sur la typologie des sols employée par les forestiers suédois, et des parcelles expérimentales quantifiant la richesse en lichens terricoles broutés par les rennes.
- Une chercheuse en sociologie à l'université des sciences agricoles suédoises, travaillant sur les savoirs locaux, et la gestion socio économique de la biodiversité, en particulier à travers le site classé Patrimoine Mondial Unesco Laponia
- Une chercheuse russe, travaillant sur la génétique des populations et l'amélioration génétique des stocks de rennes à viande, en particulier sur les élevages de rennes Nenets et Aunsk.

- Un chercheur nigérian, spécialisé en sciences vétérinaires, travaillant la santé publique, en particulier sur la brucellose touchant le bétail et la transmission de cette anthroponose sur les populations élevant le bétail en Afrique
- Une chercheuse en sociologie et en psychologie à l'université de Laponie, en Finlande, faisant de la "recherche saamie", et travaillant en particulier sur un projet de recherche qui portait sur la fermeture progressive de la toundra (shrubification) et des solutions avec les éleveurs pour la conserver ouverte.
- Une chercheuse danoise travaillant à Copenhague, sur les questions agricoles de la mangue en Tanzanie, en particulier la destruction des plants et des fruits par les parasites, et leur sensibilité selon les variétés de mangue. A également mené beaucoup d'entretiens semi-directifs pour mieux comprendre le rôle des agriculteurs dans la protection des plants (pesticide, sélection variétale etc)
- Une chercheuse suédoise travaillant au musée ethnologique saami de Jokkmokk, spécialisée en anthropologie sur les savoirs locaux, en particulier les connaissances ethnobotaniques et la gestion espèces floristiques clés pour la fabrication des fromages de renne.

Lecture 1 : Le rôle de l'élevage de rennes pour les Saamis et les autres "indigenous" populations rattachée à l'élevage

To tame = genetic selection / breeding. En français, apprivoiser serait un terme approprié, mais induit l'apprivoisement comportemental, et exclut relativement l'apprivoisement génétique

La domestication (domestication = apprivoiser, domestiquer, mais d'un point de vue biologique/écologique/génétique) précède le pastoralisme (vu comme un système socio - économique)

La question des frontières: en premier lieu surtout sur les marges de forêts denses du centre-sud de la Scandinavie médiévale

Les lichens: micro-organismes facilement digérés par les rennes, via l'appareil digestif qui transforme les thalles en glucides (sélection adaptative des rennes aux contraintes environnementales)

En moyenne: 25 kilos de viande produite par renne.

Période de vêlage est en mai/juin. Les jeunes rennes et les mâles ne sont pas aux mêmes endroits que les femelles à cette période charnière pour les troupeaux.

Les insectes: moyen utile pour rassembler les rennes

Après le rut, en septembre, la neige arrive, et les mâles sont abattus.

Le stress (=production de cortisol) est un facteur important à prendre en compte, joue beaucoup sur les comportements individuels (et de groupe) des rennes, et par conséquent sur leur santé.

La question des acteurs/parties prenantes (stakeholders) : les trouver, et les identifier. Stake = parties

Déterminer quelles sont les parties : gestion de la biodiversité? Agronomie ? Plans d'urbanisme? Chasseurs? Eleveurs?

Fuite des rennes semi-domestiques = féralisme

Résumé de la lecture 1:

- Importance d'études intégrées
- Besoin de prendre en compte la trans/multi disciplinarité dans les études environnementales
- La question de l'assise politique dans la gestion territoriale, avec en filigrane le besoin d'une réflexion politique sur quoi, pour quoi les chercheurs travaillent

Co -Construction des études environnementale

Lecture 2: Répartition géographique du renne Rangifer tarandus en Amérique du nord.

Sous-espèces Groenlandicus, Granti, Peary, Caribou

La question aborigène: les Inuits (différents des Eskimos) pas considérés par les Canadiens comme “First nation” / peuple premier, car non considéré par les autorités comme étant indiens/amérindiens du point de vue ethnique.

Pluralité de l'identification raciale, locale, régionale, nationale etc (inuit, canadien, québécois, etc) => comme pour les Saamis

Baisse du nombre de caribous: découverte retentissante des scientifiques. Fragmentation des paysages, changement climatique.

Inuits = 6 saisons pastorales, mais nombre et apparition des saisons étroitement dépendantes de la région (latitude, saison des pluies)

Distinction à faire entre “hunting” et “harvesting”: le premier est la chasse au sens strict, avec une connotation de dévalorisation écologique importante: les chasseurs vidant les troupeaux.

Harvesting s'emploie beaucoup plus dans le cadre de la cueillette/pêche, et dans le cadre de l'exploitation du renne. Il prend plus le sens de “récolte”, c'est à dire prélèvement des rennes prêts à être abattus, et dont les caractères physiologiques indiquent une valorisation des différentes parties (viande, mais aussi peau, tendons etc). Connotation plus “saine” du point de vue écologique.

Leçon 3: Ethique de la recherche

Pourquoi ce sujet est-il important? Dans quelle mesure?

Parler avec les parties-prenantes et vulgariser, tout en s'assurant de:

- Transparence / traçabilité des résultats
- Déconstructivisme (lié à la traçabilité, et au fait de favoriser l'exploitation de données en accès libre et open source)
- Comprendre en quoi cela devient un problème

Quelques principes éthiques universels

- Quelles recherches sont acceptables, d'autres non?
- Régulation de celles-ci par des lois
- Processus externes (opinion publique, politiques, parties prenantes) et internes (disciplines, écoles etc)
- Maintenir une légitimité de recherche : comment puis-je agir ?

Le pouvoir du chercheur: symbolique, mais souvent facile pour lui de "tricher" avec ça. Pourtant "entre eux" les académiciens/universitaires doivent montrer égalité, justice/justesse, honnêteté intellectuelle.

Quelques exemples:

- USA: Tuskegee (1932-1972): travail sur les populations noire américaine, et la syphilis. Cette MST est prévalente en particulier sur cette catégorie ethnique. Dans cette étude, les patients atteints ne sont pas soignés par les chercheurs, pour mieux comprendre comment la maladie évolue.
- Vipeholm, Suède : 1944-1954: travail sur les liens entre retard mental et glucose. Les chercheurs imposent un régime sur- ou sous- glucidiques sans s'assurer de l'accord des patients/cobayes.
- Suède, années 20-50: Institut National suédois de Biologie Raciale. Mesures de crânes, recherche anthropométrique sur les populations saamies et finnoises de Suède, et liens avec l'alcoolisme ou la criminalité.

Codes internationaux éthiques :

- Codex de Nuremberg, 1947, en recherche médicale: consentement informé et enregistré, bénéfices sociaux et publics, minimiser les risques pour les cobayes - patients - individus
- Code d'Helsinki (1964) Recherche biomédicale
- Rapport Belmont (1974): respect, bienfaisance, justice
- Loi de 2003, #460 Etikprövninglagen : inclut les recherches impliquant les humains. Les données et informations sensibles, en particulier à propos de l'ethnicité. Les droits humains et les libertés fondamentales doivent être respectés.

Qu'est ce qu'une donnée sensible, et pour qui? Voir le review board des recherches Saamies.

Qu'est ce qui est bénéfique, et pour qui?

Qu'est ce qui est préjudiciable, et pour qui?

Comment sécuriser et garantir (des deux côtés, chercheur et enquêté) le consentement éclairé?

Il faut prendre soin des normes culturelles.

Héritages coloniaux et décolonisation.

Qu'est ce que la recherche saamie? Qu'est ce que la recherche "autochtone"/indigenous? "Indigenous methodologies"? Systèmes de savoirs et d'acquisition/synthèse de ces savoirs.

Gradients entre outsider et insider.

Liste non exhaustive des "pour" et des "contre" d'être insider ou outsider:

- + facilitation du partage entre outsiders, et d'outsider vers insider

- Accessibilité difficile aux savoirs “locaux”/”autochtones” etc; barrière du langage

L’importance de la construction sociale et de la représentation (du chercheur envers le “cherché”, des “cherchés” envers le “chercheur” etc)

Le fait de s’attribuer une appartenance sociale : souvent de nombreuses facettes pour la même personne, et parfois “jeu”/”triche” dans le cadre de la recherche (du côté du sondeur, mais aussi du sondé).

Importance des enregistrements lors d’entretiens semi-directifs. Souvent chez les Saamis, (les chercheurs Saamis et les outsiders?): association d’idée forte entre mesurer un crâne et enregistrer des entretiens

Etre INSIDER => en général plus digne de confiance, mais la confiance surajoutée peut avoir ses aspects négatifs, en cas de comportement fallacieux. Problème également lors d’entretiens avec le biais de la proximité sociale, en particulier avec les voisins, amis etc: ils ne vous diront probablement pas ce qui est important à vos yeux (de chercheur)

POLITIQUES, ET GUIDES DE LA RECHERCHE “AUTOCHTONE”

- Codes internationaux
- Déclaration des Nations Unies sur l’autodétermination et le développement socio-économique
- Contextes spécifiques (Ara Tika, Nouvelle Zélande: trois degrés d’insiders dans la recherche maorie)

DROIT TERRITORIAL SAAMI

Le Parlement Saami n’est pas synonyme d’Elevage de rennes, ou d’éleveurs de rennes

Une grosse pression de recherche leur est imposée

Présentation de la sociologue-psychologue travaillant sur l’ouverture/fermeture de la toundra dans le nord de la Finlande

Comment mener une recherche sur la toundra avec les Saamis et éleveurs de rennes?

Réaliser des workshops avec des éleveurs? Quelles opportunités cette méthodologie donne t'elle? Quels impacts ou conséquences l'utilisation de ces données auront/auraient?

Deux concepts fondamentaux pour la législation concernant l'élevage de rennes, et ayant une grande implication sur l'économie familiale et communautaire:

- Capacité de charge (nombre de rennes par unité spatiale/écologique)
- Surpâturage

Présentation de l'anthropologue travaillant sur les sous-produits du renne, en particulier le lait et le fromage

Système des laiteries du renne et son exploitation: le système change, et l'argent et l'optimisation économique deviennent de plus en plus importants.

Diptyque entre AUTONOMIE et CAPITALISATION (= avoir de l'argent en excédent)

De plus en plus: fromages faits avec des laits ne venant plus de l'élevage où la laiterie a pu avoir fabriqué le fromage.

Distinction à faire entre "OWNERS" (propriétaires) et "HERDERS" (éleveurs)

Distinction à faire dans les systèmes d'élevage: "INTENSIF" (zones de production plus grandes) VS "EXTENSIF" (zones plus petites, moins de production mais plus d'acteurs/producteurs).

Des objectifs différents parmi les parties-prenantes, ajoutant de la complexité à la complexité:

1- Nombre de prédateurs du renne : en augmentation; mauvais pour les éleveurs mais bon pour le gain en biodiversité

2- Gagner en crédibilité, par la création de (nouveaux) problèmes?

3- Mécanismes de compensation pour les coûts dûs à l'augmentation de la biodiversité, en particulier les ré-introductions et l'augmentation des populations de prédateurs.

Génétiquement parlant: une population de rennes inférieure de 1000 à 500 individus se situe en dessous du taux de consanguinité, ce qui affecte les populations négativement.

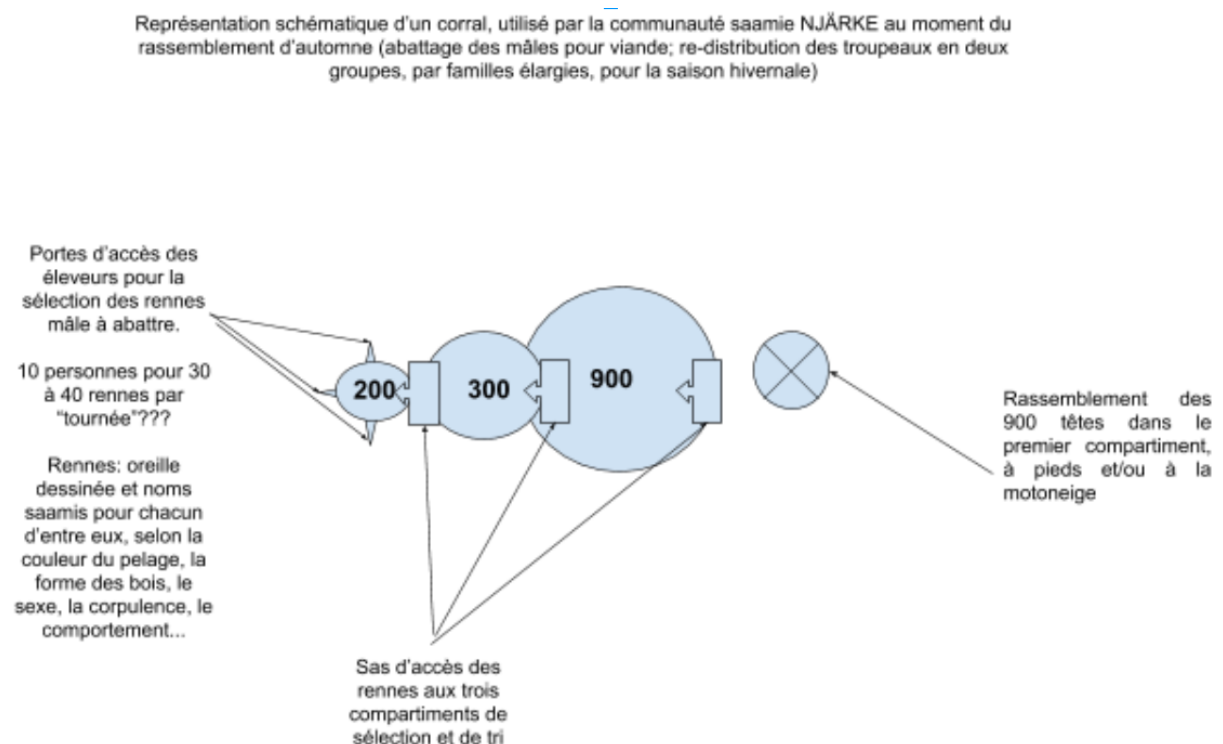
Nordic/Saami convention: quels types de recherches ont ils besoin?

Rennes en clôtures = études sur le comportement du renne

Semi-domestique = à moitié clôturé

Féral/Sauvage = totalement libre de mouvement en toute saison

Visite de la communauté saamie de Njärke (proche d'Östersund)



La communauté Njärke : entourée par les eaux, étymologie: Njärke = péninsule.

La plus petite communauté d'éleveurs de Suède, une dizaine d'éleveurs. A peu près 4 entreprises. Les propriétaires de rennes sont de la même famille que les éleveurs. Ils aident en particulier pour le marquage des faons au printemps.

Nouvelles motoneiges sont moins polluantes et moins bruyantes.

En automne: chasse de l'élan.

Pour délimiter les chemins/routes à motoneige en hiver: fréquent d'utiliser des drapeaux, ou des sacs

Chasse de l'élan et chasse des prédateurs: utilisation de la radio pour communication lors de la chasse.

La question des prédateurs: souvent le renne s'aventure proche des aires vitales des prédateurs (gloutons, loups); et se fait dévorer, en particulier les faons.

Lors de la collision de rennes avec des voitures, ou des trains: compensation (assurances?)

Beaucoup d'infections touchent le renne

Utilisation des GPS : comprendre comment les rennes perdus ayant quitté le troupeau pourraient potentiellement retrouver le troupeau (comportement). Comprendre aussi par effet inverse le comportement progressivement plus sauvage du renne feral?

Production de viande ou argent? Augmentation du nombre de cas d'accidents/de rennes dévorés par les prédateurs "no way for the authorities to say that this is impossible"

Plans de chasses mis en oeuvre par le gouvernement : à long-terme (2 ans). Augmentation du nombre de faons de plus de 50%

Que souhaite le gouvernement suédois?

- Calmer les différends à l'échelle régionale
- Diminuer le nombre de rennes élevés
- Augmenter les revenus liés à l'extraction de matière première (fer, métaux rares, bois) ou la production énergétique

Au delà des questions écologiques/régulation des populations de prédateurs, la question de la chasse reste liée à des conditions économiques (licences) et géographiques: les chasseurs sont plus urbains que les Saamis. Impacte la démographie, mais aussi la répartition des prédateurs.

Questions également de conservation des espèces sauvages, parfois prédateurs des rennes: aigles, ours, loup etc.

“Money as usual” double jeu entre Wilderness et le Modern-folklorism

Interventionnisme partout ou non interventionnisme? Mesures partielles/ciblées (au niveau des espèces) ou mise sous cloche intégrale? Deep ecology ou une forme plus légère et libérale? Qui décide de ce qui a de la valeur ou non? Décision interne aux Saamis ou intervention des intermédiaires (le Comté, les Municipalités, les éleveurs etc)

Question de l'éthique dans la recherche, et sa publication: garder à l'esprit les notions (et les faits) de vie privée, intégrité, humilité et respect.

Ne pas être trop intrusif, en particulier dans le quotidien des personnes. Dépend évidemment du sujet sur lequel on travaille, et l'équilibre entre éthique et recherche. Les parties-prenantes sont puissantes, certaines risquent cependant d'être, ou de se sentir menacées.

Important de passer du temps à réfléchir sur combien, comment la communauté d'éleveurs de rennes avec/sur laquelle on travaille pourrait être affectée, positivement ou négativement par les résultats des recherches.

Les grandes communautés sont moins accessibles aux chercheurs que les petites. Il reste cependant important, peu importe la taille de la communauté de faire en sorte de garder tout le monde en contact sur le projet.

Géoarchéologie, géosites: projet commun avec la communauté Njärke de mettre en place des visites touristiques montrant aux visiteurs les anciennes traces de la culture saamie (huttes, anciennes âtres pour faire le feu en hiver, anciens corals pour le marquage des faons, lieux de stockage du lait/fromage etc). Flore: certaines espèces permettent de présager de la présence d'anciens corals à rennes, et d'anciennes âtres/cabanes hivernales. Carex, Eriophorum, Poa, Arctostaphylos, Andromeda, Juniperus

Historique des lieux: 100 personnes maxi pour la communauté. Petit Age de Glace: limite de pousse des arbres en dessous de l'actuelle. XI^e/XIII^e s. Pas assez d'herbages à l'époque, les Saamis ont dû brûlé des parties de la forêt de bouleaux pour fournir des pâturages corrects aux rennes.

L'élevage de rennes, et le système pastoral ont changé littéralement la végétation. Domestication du renne: si le renne avait été sauvage, les troupeaux n'auraient pas été à ces endroits dans des moments aussi difficiles. Périodes froides : plutôt défavorable pour le renne, mais augmentation des troupeaux de rennes semi-domestiques (pour permettre aux Saamis de parer au froid?)

XVII^e: découverte des filons de métaux rares (fer, argent etc). Les Saamis ont souvent été utilisés comme mineurs pour faciliter l'exploration et l'extraction

Artefacts archéologiques exposés et diffusés au grand public: prévenir des méfaits de l'exploitation minière à outrance.

Vallées glaciaires en auge / en U : facilitent le contrôle des troupeaux de rennes par les éleveurs

Renne apprivoisé (= renne castré) : le plus efficace pour suivre et faire suivre les troupeaux dans les mêmes directions/éviter leur dispersion

Certains pâturages ont été longuement pâturés par les rennes, sans que des restes humains n'aient pu y avoir été découverts.

Les rennes auraient créé par leur propre action les prairies dont ils ont besoin, même si la composition floristique (et l'appétibilité des plantes) de certaines prairies ne semble pas s'expliquer seulement par le pâturage des rennes (autres interactions entre plantes/herbivores/intervention humaine/climat?)

Résumé de la journée:

Le dialogue prend du temps. Don, et contre-don. Attention à ne pas surdimensionner le rôle et l'action des personnes. Personne différent de son humeur; personne différente de sa culture.

Dans la collaboration avec les saamis (et d'autres populations "autochtones") toujours supposer que le "non" prévaudra sur le oui.

Montage du poster résumant l'école doctorale, avec une doctorante en sociologie/psychologie

Durant la semaine, cours, randonnées et visites ont également été assorties de la confection d'un poster en A3; résumant l'école doctorale et ce qu'on avait pu dire/partager ensemble. Les posters allaient être présentés à l'occasion de l'Arctic Ungulate Conference, qui se tenait la semaine suivante à Roros, à une centaine de kilomètres du lieu où l'on résidait pour le cours doctoral (Enafors, Suède). Certain.e.s doctorant.e.s, dont moi, avaient prévu d'y assister, pour une communication orale ou pour présenter les posters du Phd-course.

Celui-ci devait résumer l'école doctorale, et nous permettre de mettre en oeuvre une collaboration avec un partenaire issu d'une discipline différente, d'un bagage culturel différent. Les chercheurs encadrants, nous ont donc fait jouer un jeu de rôle appelé "speed dating de la recherche".

Tous les doctorants participants avaient présenté leurs recherches, et on se connaissait déjà tous plutôt bien. Le but du jeu était de poser quelques questions, et de décrire par la suite très brièvement quelles perspectives on voyait ensemble pour le poster. Une équipe de doctorant.e.s constituait un premier cercle, la deuxième équipe un deuxième cercle, plus grand, englobant le premier. A l'issue du jeu de rôle, les doctorants sélectionnés pour former le premier cercle pourront choisir leur(s) partenaire(s) du second cercle.

Les doctorants se faisant face à face, nous avions une minute par personne en face de nous pour poser quelques questions, puis dans un deuxième tour pour proposer une idée de poster. Selon les questions, les idées, et la position dans l'un des cercles, les doctorants choisissaient de la composition de leur équipe. Au final six posters ont été réalisés à l'issue de la semaine doctorale, et présentées à l'Arctic Ungulate Conference (http://arcticungulate.org/sites/default/files/Posters_PhD%20course_0.pdf, consulté en 2017).

Les notes qui suivent sont les premières idées venant des discussions avec la doctorante en sociologie/psychologie, travaillant sur les processus de shrubification de la toundra, et comment les éleveurs de rennes percevaient la fermeture du paysage et pouvaient la contrer.

Il est à préciser que le design du poster a été compliqué. On travaillait tous les deux sur des problématiques proches, mais des points de vue et façon de procéder finalement différents.

Me souvenant des cours de biogéographie reçus et donnés l'année précédente aux L3 de Paris 7, nous avons ainsi pris l'angle du paysage, sa polysémie et sa transversalité.

Le poster n'aurait finalement pas un format scientifique usuel, et serait conceptualisé comme étant suggestif. L'objectif du poster restait intimement lié à une approche phénoménologique du paysage: rattaché ou non à différents qualificatifs, le paysage (en particulier celui de l'élevage de rennes) parlerait à tout le monde, et autorisait dans le même temps le scientifique et la personne "sensible" à le lire.

1. Polysémie du concept de paysages et de ses qualificatifs

Le paysage vu comme un héritage : produit social pour les historiens, mais aussi fragments de mémoire individuels les politiciens, les psychanalystes

Le paysage comme espace: système pour les géographe, espace perceptuel pour la psychologie cognitive.

Le paysage comme cadre existentiel: cadre de vie pour les habitants, processus de conscientisation pour les philosophes. Concept du da-sein (Heidegger, in Roué, 2011): l'être là, l'être dans le monde.

Le paysage comme nature: environnement physique pour les biologistes, les climatologues ou les géologues. Compréhension phénoménologique des paysages pour les artistes, moyen sensitif et indirect pour l'affect et les sentiments (cf Proust et sa madeleine, l'odeur des fleurs au printemps, des bois après la pluie etc)

Le paysage comme média: jardin pour les paysagistes, décorum pour les touristes, niche commerciale pour les compagnies touristiques

Le paysage comme ressource: Pâturages de valeurs pour les éleveurs de rennes, Forêt à valoriser pour l'industrie forestière.

Le paysage comme territoire: problématique des aménageurs, patrimoine collectif pour les citoyens.

2. La non-étanchéité des perspectives données

Un biologiste, un naturaliste utilise souvent le terme “espace” ou “territoire” pour expliquer ses résultats.

Pour un resort touristique cherchant des clients, le paysage est à la fois une ressource, et un média.

3. Citation de la loi européenne sur le Paysage? Guides éthiques des l'UE, des Nations Unies (sur le paysage, la biodiversité, le climat)

4. Toucher un public large, et interroger sur le rôle personnel changeant de sa “détermination”: universitaires, citoyens, touristes, autochtone saami ou pas, politiques etc

Après l'impression du poster (fabriqué de bric et de broc avec une imprimante A4!), la présentation de celui-ci s'est d'abord faite entre nous à l'issue de la semaine d'études. Les remarques et critiques furent constructives, et touchent directement au parti-pris dans le poster:

- Le rôle politique de la recherche et ses questionnements y sont inexistantes
- Le référencement des grands textes européens et des Nations Unies sur le Paysage, la Biodiversité et le Climat doit spécifier qu'il s'agit de documents “guidelines” plutôt

que des références au sens strict (nous n'avons pas utilisé les textes comme référence/justification au raisonnement du poster)

- Le titre du poster ne propose pas de question à laquelle les items qui en suivent seraient des éléments de réponse. Questionner dans un poster permet d'amplifier le message que l'on souhaite faire passer.
- Apposer des concepts (paysage) et les assortir de qualificatifs (vu comme...) n'est pas très didactique. Des explications, ou des définitions auraient été souhaitables.
- Cette apposition de concepts est trop suggestive

Qu'est ce que la recherche participative?

Recherche participative = santé et recherche en éducation

Recherche basée sur les communautés : environnement, changement climatique

Recherche participative (action) : environnement, changement

Recherche post-coloniale engagée : Indigenous research

Qu'est ce qu'une véritable participation? Comment les citoyens peuvent participer? Echelles normatives de différentes recherches/actions participatives.

Participation consultative

Questions de transparence

Interactions bottom-up et conflits

Forces de déconstruction/reconstruction

Rennes non marqués : appartiennent en général à la communauté d'éleveurs proche de laquelle ils sont trouvés

Rut = baisse du poids corporel des mâles

Impossibilité d'équiper les rennes mâles de collier: différences saisonnières de poids trop grandes

Lichens arborescents=> lichens épiphytes (Parmeliaceae, Bryoria; Usnea sp)

Challenges pour les éleveurs: retarder, ralentir la migration des rennes à la fin de l'automne et au printemps

Saison de pré-hiver: zone la plus étendue spatialement

Agences forestières: industries pour meubles, fabrique de papier. Zones les moins utilisées par la foresterie = accès difficile/limité

Les forestiers peuvent ils s'adapter à l'élevage de rennes?

(Löf et al., 2012)

Questions inter-disiplinaires : qu'est ce qu'une donnée?

Transformations systémiques et changements institutionnels.

Conflits potentiels de loyauté

Fonds/revenus : Parlements saamis. Comment dépenser l'argent? Qui est employé?

Positoin formelle dans les communauté et implication des membres (insiders et relations de pouvoir)

Jeunes saamis universitaires: pas vraiment au courant qu'ils faisaient de la recherche auprès des éleveurs qu'ils consultaient

Moins de prédictabilité en hiver; saison la plus sensible/goulot d'étranglement

Comment définir ce qui a de la valeur dans la recherche? Ce qui est donné en retour?

Pour les Saamis: si la demande du chercheur ne met pas à l'aise les personnes interrogées; plus sage d'arrêter; dire non. Demande de compensation pour le temps d'expertise et les savoirs disseminiés/transmis

Annexe 8: Prise de notes et retranscription rapide après discussions avec l'homme du circuit de traîneau à chiens ("smugler"), activité effectuée à la fin décembre 2016 à l'occasion du terrain d'hiver à Kiruna

Les notes ont été prises le soir du tour de 2h en traîneau, ne représentent donc que des morceaux d'expressions particulièrement marquantes. Ces notes ne sont pas issues d'un entretien semi-directif, ni d'une participation observante formels. Ces prises de notes reprennent les échanges eus lors de l'activité du tour de chien de traîneau (sur le traîneau, dans la tente saamie lors du café à "mi-tour", sur le chemin du retour). La discussion était particulièrement intéressante. L'homme se revendiquant moitié saami, et dans le même temps particulièrement critique envers l'élevage de rennes à Kiruna (Gabna). Les notes se distinguent en trois types de mise en page : "italique" : expressions et réponses du "smugler"; gras: retranscription indirecte, normal : réflexions personnelles

Il est difficile de figer dans une catégorie les relations entre les exploitants touristiques (traîneau, motoneige) et les éleveurs de rennes.

"Des gens qui profitent des aides de l'Etat et des assurances. Ils élèvent beaucoup de rennes pour se faire de l'argent. Comme un club de plus en plus organisé"

A la base la pêche comme activité principale, puis les années 70 et 80 sont arrivées.

Liens forts entre mouvements écologistes et revendication territoriale.

Le Parlement saami est décrié par les Saamis.

"Un Saami, ça n'existe pas" (!) D'après lui, il s'agirait d'une catégorie, auto-déterminée. Le monsieur se définit comme un peu saami, finnois, norvégien, suédois. Sa femme est d'Asie centrale. Il insiste sur son indépendance, aurait tout appris de lui-même, de la soudure en passant par la fonte et la fabrication d'alliages de métaux. A travaillé pour la mine de fer de Kiruna.

"All humans/tous humains"

"Les grands troupeaux sont synonymes de surpâturage"

Plus le troupeau est grand plus le risque (ou bénéfice) d'avoir un renne écrasé, perdu, ou dévoré est grand. Augmenterait le "gâchis d'argent".

A propos du changement climatique:

“Ils passent leur temps à se plaindre. Si ce n’est pas à propos de la construction d’une route, ils vous disent que c’est le changement climatique”

“Il s’agira toujours du meilleur pâturage, qu’il ne faut pas sacrifier” **(à propos de l’exemple de la construction d’une route)**

Le monsieur a contribué à construire, et amener le câble TV à Kiruna. Nous n’avons pas directement évoqué les mines, les surfaces inondées par l’hydro électricité, ou des plans d’éolienne.

La mine de Kirunasvaara: semble être vue comme une bienfaitrice, celle qui lui aurait appris ses métiers, et son indépendance.

Les paysages culturels de l'élevage de rennes en Scandinavie face au changement global : une approche multi-scalaire (Laponie suédoise, Sud norvégien)

Résumé

Les régions subarctiques font face aux effets interconnectés et pluri-scalaires du changement global (amplification des extrêmes bioclimatiques et intensification dans l'utilisation des sols). Le renne, *Rangifer tarandus* est un grand herbivore qui migre annuellement sur de grands espaces pour ses besoins biologiques. L'ongulé cristallise de nombreux enjeux paysagers pour les pastoralismes saamis. Plusieurs populations de rennes seront étudiées dans un suivi multi-scalaire. Nous évaluons les effets directs du changement global (fragmentation paysagère et changements climatiques) sur les paysages culturels de Scandinavie en lien avec la démographie des rennes. Par la suite, la descente en échelle géographique nous permet de caractériser via satellite et relevés floristiques les effets du changement global sur les paysages végétaux de la communauté montagnarde d'éleveurs Gabna, dans le nord de la Suède. Nous étudions ensuite les comportements migratoires des rennes sauvages norvégiens, pour appréhender les liens entre variabilité bioclimatique et écologie spatiale de l'herbivore. Les résultats principaux rejoignent ceux de la littérature scientifique, appliqués aux espaces étudiés : régionalement, changement des climats et pertes significatives en pâturages ; localement, borealisation et embroussaillage des paysages migratoires. Les liens forts entre une partie des effets cumulés du changement global et la biogéographie scandinave de *Rangifer tarandus* sont ainsi discutés. L'approche paysagère dans les problématiques environnementales complexes (revendication territoriale) a révélé l'importance de l'éthique dans le dialogue science/minorités.

Mots-clés : Climatologie, biogéographie, pastoralisme saami, changement climatique, fragmentation paysagère, *Rangifer tarandus*

Cultural landscapes of the Scandinavian reindeer herding facing the global change: a multi-scalar approach (Swedish Lapland, southern Norway)

Summary

Subarctic areas are currently facing the inter-related and multi-scalar effects of the global change (bioclimatological extremes amplification, land uses intensification). Reindeer, *Rangifer tarandus* is a corpulent migratory herbivorous specie which migrates annually over large distances to insure its biological needs. The arctic ungulate crystallize numerous landscape issues for the saami pastoralism. Several reindeer populations are studied in a multi-scalar survey. We assess the direct effects of global change (landscape fragmentation and climate changes) on the cultural landscapes of Scandinavia by testing links with reindeer' dynamics of population. Thereafter, we downscale to characterize via remote sensing and floristic surveys the effects of the global change on vegetal landscapes of the Gabna herders' community (northern Sweden). We then study migratory patterns of wild reindeer (Norway) to better understand links between the bio-climatological variability and the arctic ungulate' spatial ecology. Main results converge with scientific literature, applied to our studied cases: specific signal of climate change and land loss regionally, and locally borealization and shrubification of the migratory landscapes. Strong links between a part of the cumulated effects of the global change and the Scandinavian biogeography of *Rangifer tarandus* are then discussed. The landscape approach dealing with the complex environmental issues (land claim) also underlines the meaning of ethics for discussions between sciences and minorities.

Keywords : Climatology, biogeography, saami pastoralism, climate change, landscape fragmentation, *Rangifer tarandus*

UNIVERSITÉ SORBONNE UNIVERSITÉ

ÉCOLE DOCTORALE :

ED 7 – Espaces, sociétés et aménagement

Institut de Géographie

191 rue Saint-Jacques, 75005 Paris, France

DISCIPLINE : Géographie