TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS ..... **ii**

AVANT-PROPOS ..... **iv**

LISTE DES TABLEAUX ..... **viii**

LISTE DES FIGURES ..... **ix**

CHAPITRE I
MISE EN CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE **1**

1.1 Les changements climatiques 1

1.2 Impacts sur les plantes nordiques 1

1.3 La densification arbustive et arborescente 2

1.4 Objectifs 4

CHAPITRE II
IMPACT DE L'AUGMENTATION DU COUVERT LIGNEUX ÉRIGÉ SUR LA PRODUCTIVITÉ D'*EMPETRUM NIGRUM* L., *VACCINIUM ULIGINOSUM* L. ET *VACCINIUM VITIS-IDAEA* L., À KANGIQSUJUAQ ET KANGIQSUALUJJUAQ (NUNAVIK) **7**

2.1 Résumé 7

2.2 Introduction 8

2.3 Méthodologie 10

2.3.1 Aire d'étude 10

2.3.2 Espèces à l'étude 12

2.3.3 Sélection des sites 12

2.3.4 Caractérisation végétale et environnementale 13

2.3.5 Mesures d'élongation annuelle d'*Empetrum nigrum* 14

2.3.6 Productivité et mûrissement des fruits 15

2.3.7 Analyses statistiques 15

2.4 Résultats 17

2.4.1 Caractérisation végétale 17

2.4.2 Caractérisation environnementale 19

2.4.3 Mesures d'élongation annuelle d'*Empetrum nigrum* 21

2.4.4 Productivité d'*Empetrum nigrum*, *Vaccinium uliginosum* et *Vaccinium vitis-idaea* 21

2.4.5 Mûrissement des fruits 22
2.5 Discussion 22
2.5.1 Caractérisation végétale 23
2.5.2 Mesures d'élongation annuelle d'*Empetrum nigrum* 24
2.5.3 Productivité d'*Empetrum nigrum* 24
2.5.4 Productivité de *Vaccinium uliginosum* 26
2.5.5 Productivité de *Vaccinium vitis-idaea* 27
2.5.6 Mûrissement des fruits 27
2.6 Conclusion 28

CHAPITRE III
IMPACT D'UN RÉCHAUFFEMENT EXPÉRIMENTAL SUR LA PRODUCTIVITÉ ET LA QUALITÉ NUTRITIVE DES FRUITS D'*EMPETRUM NIGRUM* L., *VACCINIUM ULIGINOSUM* L. ET *VACCINIUM VITIS-IDAEA* L., À KANGIQSUJUAQ ET KANGIQSUALUJJUAQ (NUNAVIK) **37**

3.1 Résumé 37
3.2 Introduction 38
3.3 Méthodologie 41
3.3.1 Aire d'étude 41
3.3.2 Installation des parcelles 42
3.3.3 Récolte des fruits et mesures de productivité 43
3.3.4 Analyses en laboratoire 43
3.3.5 Analyses statistiques 45
3.4 Résultats 46
3.4.1 Productivité de fruits sous condition expérimentale 46
3.4.2 Qualité nutritive : polyphénols totaux et capacité antioxydante 46
3.5 Discussion 47
3.5.1 Productivité de fruits sous condition expérimentale 47
3.5.2 Qualité nutritive : polyphénols totaux et capacité antioxydante 50
3.6 Conclusion 52

CONCLUSION GÉNÉRALE **57**

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES **59**

ANNEXE A
LISTE DES PLANTES VASCULAIRES ÉCHANTILLONNÉES À KANGIQSUJUAQ ET KANGIQSUALUJJUAQ, NUNAVIK **72**

ANNEXE B
CARACTÉRISTIQUES ENVIRONNEMENTALES **76**

ANNEXE C
EXEMPLE DE RAMETS D'*EMPETRUM NIGRUM* EN MILIEU OUVERT ET FERMÉ **77**

LISTE DES TABLEAUX

Tableau **Page**

2.1 Étendue du recouvrement spécifique moyen (%), selon l'échelle Domin-Krajina des principales espèces végétales responsables de la fermeture du milieu et des arbustes prostrés à Kangiqsujuaq et Kangiqsualujjuaq (Nunavik), où O : ouvert; a+ : arbustif discontinu à continu; a : arbustif continu; A+ : arborescent discontinu à continu et A : arborescent continu 29

2.2 Caractéristiques environnementales (moyennes ± écart-type, étendus) des types de couverts à Kangiqsujuaq et Kangiqsualujjuaq (Nunavik), où O : ouvert; a+ : arbustif discontinu à continu; a : arbustif continu; A+ : arborescent discontinu à continu et A : arborescent continu 30

3.1 Valeurs de productivité (g/m2) (moyenne ± écart-type) des fruits d'*Empetrum nigrum*, *Vaccinium uliginosum* et *Vaccinium vitis-idaea* produits en 2008 et 2009 dans les OTC et les parcelles témoins à Kangiqsujuaq et Kangiqsualujjuaq (Nunavik) et comparaisons interannuelles (2008 et 2009) de la productivité totale (productivité OTC et témoins cumulée) 54

A.1 Espèces retrouvées à travers les différents milieux échantillonnés et richesse spécifique à Kangiqsujuaq et Kangiqsualujjuaq, Nunavik, où O : milieu ouvert; a : milieu arbustif continu; a+ : milieu arbustif discontinu à continu; A+ : milieu arborescent discontinu à continu; A : milieu arborescent continu 72

B.1 Température (°C) rapportée pour la période du 4 au 16 août 2009 avec minimum (MIN), maximum (MAX) et le total des degrés-jours sans gel (DJ > 0 °C; moyenne ± écart-type), et radiation solaire (R en mol/m2/s; moyenne/jour ± écart-type) et (MAX) pour la période du 3 au 18 août 2009, pour Kangiqsujuaq et Kangiqsualujjuaq (Nunavik), où O : milieux ouverts; a : milieux arbustifs continus; a+ : milieux arbustifs discontinus à continus; A+ : milieux arborescents discontinus à continus; A : milieux arborescents continus 76

LISTE DES FIGURES

Figure **Page**

1.1 Espèces à l'étude (de gauche à droite) : *Vaccinium vitis-idaea* L., *Vaccinium uliginosum* L. et *Empetrum nigrum* L. 4

1.2 Types de couvert à l'étude, photographiés à Kangiqsualujjuaq (Nunavik) : a) milieu ouvert (O); b) strate arbustive discontinue (1964) à continue (2003) (a+); c) strate arbustive continue; d) strate arborescente discontinue (1964) à continue (2003) (A+); e) strate arborescente continue (A) 5

1.3 Trois serres ouvertes « OTC : Open-top chamber » à Kangiqsujuaq (Nunavik) 6

2.1 Analyse de correspondance (DCA) des fréquences moyennes des espèces (triangle) retrouvées à travers les sites échantillonnés par type de couvert (cercle) (3 sites/couvert) à Kangiqsujuaq (WB) et Kangiqsualujjuaq (GR), Nunavik 31

2.2 Hauteur structurale (cm) (moyenne ± écart-type) d'*Empetrum nigrum*, *Vaccinium uliginosum* et *Vaccinium vitis-idaea* par type de couvert à Kangiqsujuaq (WB) et Kangiqsualujjuaq (GR) (Nunavik), où O : ouvert; a+ : arbustif discontinu à continu; a : arbustif continu; A+ : arborescent discontinu à continu et A : arborescent continu 32

2.3 Analyse de correspondance (DCA) de la répartition des milieux à Kangiqsujuaq (W) et Kangiqsualujjuaq (G) (Nunavik), où O : ouvert; a+ : arbustif discontinu à continu; a : arbustif continu; A+ : arborescent discontinu à continu et A : arborescent continu, selon les caractéristiques environnementales les plus influentes (longueur et direction des flèches) 33

2.4 Mesures d'élongations annuelles (mm) (moyenne ± écart-type) d'*Empetrum nigrum* en fonction des années, selon les différents types de couvert pour Kangiqsujuaq (WB) et Kangiqsualujjuaq (GR) (Nunavik), où O : ouvert; a+: arbustif discontinu à continu; a : arbustif continu; A+ : arborescent discontinu à continu et A : arborescent continu 34

2.5 Productivité (g/m^2) (moyenne ± écart-type) corrigée par le recouvrement spécifique des fruits d'*Empetrum nigrum*, *Vaccinium uliginosum* et *Vaccinium vitis-idaea* en 2009 par type de couvert à Kangiqsujuaq (WB) et Kangiqsualujjuaq (GR) (Nunavik), où O : ouvert; a+ : arbustif discontinu à continu; a : arbustif continu; A+ : arborescent discontinu à continu et A : arborescent continu 35

2.6 Indice de mûrissement des fruits (0 à 1) (moyenne ± écart-type) d'*Empetrum nigrum*, *Vaccinium uliginosum* et *Vaccinium vitis-idaea* en 2009 par type de couvert à Kangiqsujuaq (WB) et Kangiqsualujjuaq (GR) (Nunavik), où O : ouvert; a+ : arbustif discontinu à continu; a : arbustif continu; A+ : arborescent discontinu à continu et A : arborescent continu 36

3.1 a) La région la plus nordique du Québec (Nunavik), où sont situées les communautés de Kangiqsujuaq et Kangiqsualujjuaq. b) Les deux villages font partie de deux domaines bioclimatiques distincts du Québec, soit la toundra arctique herbacée et la toundra arctique arbustive, respectivement . 55

3.2 Capacité antioxydante (moyenne ± écart-type) en fonction de la quantité de polyphénols totaux (moyenne ± écart-type) des fruits à Kangiqsujuaq (WB) et Kangiqsualujjuaq (GR) (Nunavik), récoltés dans les OTC (cercle) et témoins (carré) pour les trois espèces représentées par la couleur noire : *Empetrum nigrum* (2008 et 2009; $p = 0{,}002$); bleue : *Vaccinium uliginosum* (2009) et rouge : *Vaccinium vitis-idaea* (2009)..... 56

C.1 Ramets de spécimens d'*Empetrum nigrum* récoltés en milieu ouvert (O; en haut) et en milieu arbustif (a; en bas), à Kangiqsujuaq (Nunavik)..... 77

CHAPITRE I

MISE EN CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

1.1 Les changements climatiques

Les impacts du réchauffement climatique sont de mieux en mieux documentés pour les écosystèmes nordiques. En plus des impacts locaux et régionaux, des mécanismes de rétroaction entre les milieux arctiques et le système global pourraient avoir des répercussions à l'échelle planétaire (Callaghan *et al*, 2004). À titre d'exemple, si l'augmentation de température entraîne l'accroissement du couvert végétal, cela est susceptible de modifier la couche nivale et par conséquent, l'albédo été comme hiver et entraîner un phénomène de rétroaction positive sur le climat (Callaghan & Jonasson, 1995; Wolf *et al*, 2008).

Le retrait des glaciers continentaux (Breen & Lévesque, 2008), le dégel du pergélisol, l'augmentation de la saison de croissance (Bégin, 2006; Stone *et al*, 2002) et l'augmentation de la strate ligneuse érigée font partie des résultats perceptibles qu'engendrent les changements climatiques auxquels nous assistons (Tape *et al*, 2006). Ces changements climatiques rapides, imputables aux activités anthropiques (Ellis & Rochefort, 2006; Syndonia *et al*, 2002), ont d'importantes répercussions pour les milieux des hautes latitudes et leurs organismes, qui semblent être plus sensibles au réchauffement climatique (Aerts *et al*, 2006).

1.2 Impacts sur les plantes nordiques

Parce que les plantes arctiques et sub-arctiques vivent dans l'un des environnements les plus extrêmes, où leur croissance et leur développement sont contraints par une courte saison de croissance, de basses températures et une disponibilité en nutriments limitée (Shevtsova *et al*, 1997; Gerdol *et al*, 2000; Syndonia

Rapport-Gratuit.com

et al, 2002), les plantes du domaine bioclimatique de la toundra constituent de bons bioindicateurs, étant sensibles à tout changement d'ordre climatique (Wookey, 2008). En effet, le climat est un facteur déterminant quant à la croissance et au développement, la phénologie, la physiologie, la répartition et les interactions végétales. Ces variables peuvent donc être utilisées pour l'étude des possibles effets des changements climatiques sur la végétation arctique (Walther, 2003). L'élévation de la température moyenne saisonnière peut par exemple avoir un impact sur la durée de la saison de croissance, par la fonte hâtive de la couche nivale et la diminution du couvert nival (Stone *et al*, 2002; Callaghan & Jonasson, 1995; Wookey, 2008; Robinson *et al*, 1998; Zhou *et al*, 2001). Tout ceci a des impacts directs et indirects sur les espèces végétales, à court (p. ex., phénologie, croissance et reproduction) et à long terme (p. ex., structure et dynamique des communautés; Walker *et al*, 2006). En milieu arctique, la croissance des plantes au printemps est synchronisée avec la fonte des neiges, liée à l'augmentation de température, tout comme la fin de la saison de croissance est déclenchée par le refroidissement. Le réchauffement climatique a par conséquent d'importants effets sur la durée de la saison de croissance (Aerts *et al*, 2006). Depuis les vingt dernières années, la saison de croissance débute plus hâtivement en Eurasie (c.-à-d., environ 6 jours) et en Amérique du Nord (c.-à-d., environ 8 jours) et elle est retardée à l'automne (Eurasie : 11 jours; Amérique du Nord : 4 jours; Zhou *et al*, 2001).

1.3 La densification arbustive et arborescente

Durant les cinquante dernières années, la végétation arctique près de la limite des arbres s'est modifiée, avec des arbustes plus grands et de plus gros diamètres. La strate arbustive a même colonisé et domine maintenant des milieux autrefois ouverts (Sturm *et al*, 2001, Tape *et al*, 2006). Depuis les 150 dernières années, il y a eu un avancement latitudinal (c.-à-d., 10 à 20 m) et altitudinal (c.-à-d., 2 à 5 m) de la limite des arbres au nord-ouest du Canada, relié principalement à la croissance de *Picea glauca* (Moench) Voss (Walther, 2003). Concernant la strate arbustive érigée, elle colonise et domine maintenant des milieux autrefois ouverts (Tremblay *et al*, 2012; Myers-Smith *et al*, 2011; Tape *et al*, 2006; Hudson & Henry, 2009; Wolf *et al*, 2008; Aerts *et al*, 2006;

Walker *et al*, 2006; Hinzman *et al*, 2005; Tommervik *et al*, 2004; Walther, 2002; Sturm *et al*, 2001; Zhou *et al*, 2001; Myneni *et al*, 1997).

De tels changements modifient la composition, la structure et la dynamique des communautés végétales (Aerts *et al*, 2006; Wolf *et al*, 2008; Chapin *et al*, 1995; Parsons *et al*, 1994). Par exemple, la compétition pour la lumière et les nutriments peut devenir plus forte et défavoriser la croissance et la reproduction d'espèces moins compétitives (Press *et al*, 1998). Un des sites à l'étude, Kangiqsualujjuaq (Rivière George), près de la limite des arbres subit depuis au moins une dizaine d'années une expansion ligneuse dominée par *Betula glandulosa* Michx et *Larix laricina* (DuRoi) Koch (Tremblay *et al*, 2012). La fermeture du milieu par l'augmentation du couvert ligneux érigé modifie les facteurs abiotiques (p. ex., disponibilité de lumière, nutriments, température) (Forseth *et al*, 2001; Callaghan & Jonasson, 1995) et par conséquent, la compétition interspécifique pour les ressources (Gerdol *et al*, 2000; Shevtsova *et al*, 1997).

Les plantes investissent différemment selon les conditions environnementales (c.-à-d., allocation des ressources; Grime, 1977; Chapin *et al*, 1994; Callaway & Walker, 1997). La présence d'un couvert érigé est susceptible de modifier les conditions (p. ex., luminosité, température), en comparaison aux milieux ouverts. Par conséquent, ceci pourrait défavoriser la croissance et la production de fruits d'arbustes de faible taille. La disponibilité lumineuse peut aussi grandement limiter la floraison (Arfts *et al*, 1999), affectant ainsi la fructification. Cependant peu de données existent sur l'effet d'une réduction de la lumière disponible causée par la densification arbustive, quant à l'effort reproducteur des arbustes prostrés producteurs de petits fruits (Dormann & Woodin, 2002). Il est donc difficile de prédire les variations de productivité des arbustes de faible taille, de même que celles sur la qualité nutritive (p. ex., antioxydants). Par contre, il est connu que ces propriétés peuvent varier en fonction des conditions environnementales, comme la lumière disponible et la température (Hansen *et al*, 2006; Ernst *et al*, 1991; Riga *et al*, 2008).

Ainsi, nous constatons que l'ensemble des changements climatiques modifiant les conditions environnementales, sont susceptibles d'entraîner des répercussions sur la

reproduction des espèces productrices de petits fruits, ainsi que sur leur qualité nutritive et auront inévitablement des répercussions sur cette ressource utilisée par les communautés inuites et les espèces animales de la toundra.

1.4 Objectifs

Le mémoire contient deux chapitres, traitant des impacts associés aux changements climatiques sur la production de fruits, soit la densification arbustive et l'augmentation des températures. Dans le chapitre II, l'objectif principal était de quantifier la baisse de productivité de trois espèces (*V. vitis-idaea* L., *V. uliginosum* L. et *E. nigrum* L.; Figure 1.1), de vérifier leur sensibilité aux conditions de luminosité et leur croissance sous couvert érigé. Nous avons aussi déterminé l'impact de la fermeture du milieu sur la croissance primaire (c.-à-d., élongation annuelle) de la camarine (*E. nigrum*).

Figure 1.1 : Espèces à l'étude (de gauche à droite) : *Vaccinium vitis-idaea* L., *Vaccinium uliginosum* L. et *Empetrum nigrum* L.
À noter que les fruits de cette dernière sont noirs, une fois à maturité.

Plus près de la limite des arbres, l'analyse de photos aériennes prises à Rivière George (c.-à-d., Kangiqsualujjuaq, Nunavik) en 1964 et 2003 montre la progression de la densification arbustive (Tremblay *et al*, 2012). Les variations de productivité de fruits et de croissance d'*E. nigrum* ont été comparées selon cinq types de couverts (Figure 1.2) :

1- O : milieux ouverts en 1964 et en 2003

2- a+ : strate arbustive discontinue en 1964 et continue en 2003 (fermeture du milieu)

3- a : strate arbustive continue en 1964 et en 2003

4- A+ : strate arborescente discontinue en 1964 et continue en 2003 (fermeture du milieu)

5- A : strate arborescente continue en 1964 et en 2003

Figure 1.2 : Types de couvert à l'étude, photographiés à Kangiqsualujjuaq (Nunavik) : a) milieu ouvert (O); b) strate arbustive discontinue (1964) à continue (2003) (a+); c) strate arbustive continue; d) strate arborescente discontinue (1964) à continue (2003) (A+); e) strate arborescente continue (A).

En deuxième lieu (Chapitre III), nous avons quantifié la productivité et la qualité nutritive (c.-à-d., polyphénols totaux et pouvoir antioxydant) des fruits d'*E. nigrum*, *V. uliginosum* et *V. vitis-idaea*, en fonction d'une augmentation expérimentale de température. Pour ce faire, nous avons employé des serres ouvertes (ci-après OTC). Les OTC constituent une méthode de réchauffement passif utilisée par le programme ITEX (International Tundra Experiment; Henry & Molau, 1997; Wookey, 2008; Figure 1.3).

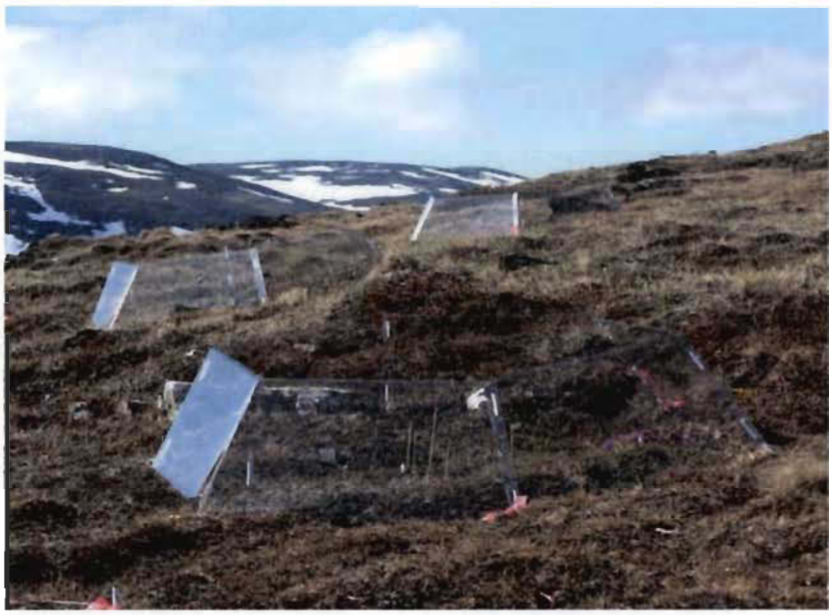


Figure 1.3 : Trois serres ouvertes « OTC : Open-top chamber » à Kangiqsujuaq (Nunavik).

Les études qui sont présentées dans les chapitres II et III, ont été réalisées en 2008 et 2009 près de deux communautés du Nunavik. La communauté de Kangiqsujuaq (61°35.4 N - 71°55.8 O), anciennement Wakeham Bay, est située près du détroit d'Hudson à la pointe nord-ouest de la péninsule d'Ungava et appartient au domaine bioclimatique de la toundra arctique herbacée (Ressources naturelles et Faune Québec, 2003). Kangiqsualujjuaq (58°42.6 N - 65°59.4 O) (Rivière George) est situé au sud-est de la Baie d'Ungava à la limite des arbres près de l'embouchure de la rivière George. Le type de végétation présent est associé au domaine bioclimatique de la toundra arctique arbustive (Ressources naturelles et Faune Québec, 2003).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

CHAPITRE II

IMPACT DE L'AUGMENTATION DU COUVERT LIGNEUX ÉRIGÉ SUR LA PRODUCTIVITÉ D'*EMPETRUM NIGRUM* L., *VACCINIUM ULIGINOSUM* L. ET *VACCINIUM VITIS-IDAEA* L., À KANGIQSUJUAQ ET KANGIQSUALUJJUAQ (NUNAVIK)

Charlène Lavallée, Alain Cuerrier et Esther Lévesque

(En préparation pour publication dans *Journal of Botany)*

2.1 Résumé

La fermeture du milieu entraînée par l'augmentation récente du couvert ligneux érigé en régions nordiques modifie les conditions environnementales (p. ex., lumière, nutriments, température), au détriment de la croissance et de la productivité (g/m^2) de fruits des arbustes prostrés. Ainsi, l'objectif de l'étude était d'évaluer la croissance (c.-à-d., mesures d'élongation d'*Empetrum nigrum* L.) et le nombre de fruits produits (*Vaccinium uliginosum* L., *Vaccinium vitis-idaea* L. et *E. nigrum* L.) sous différents couverts ligneux (arbustifs et arborescents), en comparaison aux milieux ouverts. La croissance d'*E. nigrum* augmente ($p < 0{,}001$) depuis les dernières années indépendamment du type de couvert, résultant possiblement du réchauffement climatique observé dans la région. Les milieux ouverts constituent les habitats où la productivité (g/m^2) est supérieure ($p \leq 0{,}05$) et ce, pour les trois espèces. Cependant, la productivité d'*E. nigrum* et de *V. vitis-idaea* est moins affectée par le couvert arborescent qu'arbustif et à l'inverse, celle de *V. uliginosum* est supérieure en milieu arbustif. Cette perte d'habitat, causée par la densification arbustive, et la plus faible production sous couvert, diminue la quantité de fruits produits, une ressource importante utilisée par les communautés locales et de nombreuses espèces.

2.2 Introduction

Avec les changements climatiques, la végétation arctique et subarctique se modifie. Le couvert ligneux érigé est en augmentation et la strate arbustive a colonisé et domine des milieux autrefois ouverts (Myers-Smith *et al*, 2011; Blok *et al*, 2010; Hudson & Henry, 2009; Wolf *et al*, 2008; Tape *et al*, 2006; Aerts *et al*, 2006; Walker *et al*, 2006; Hinzman *et al*, 2005; Tommervik *et al*, 2004; Walther, 2002; Sturm *et al*, 2001; Zhou *et al*, 2001; Myneni *et al*, 1997). La fermeture du milieu par l'expansion du couvert ligneux modifie les facteurs abiotiques (p. ex., disponibilité de lumière, nutriments et température; Forseth *et al*, 2001; Callaghan & Jonasson, 1995) et, par conséquent, la compétition interspécifique pour les ressources (Gerdol *et al*, 2000; Shevtsova *et al*, 1997). Les plantes investissent différemment selon les conditions environnementales (c.-à-d., allocation des ressources; Grime, 1977; Chapin *et al*, 1994; Callaway & Walker, 1997). La présence d'un couvert érigé est susceptible de modifier les facteurs abiotiques, en comparaison aux milieux ouverts. Par conséquent, ceci pourrait défavoriser la croissance et la production de fruits d'arbustes de faible taille.

Les relations de compétitions pour les ressources seront changées par la densification arbustive. L'augmentation du couvert ligneux érigé entraînera une réduction de la lumière disponible pour les espèces de strates inférieures (Tielborger & Kadmon, 2008; Kudo *et al*, 2008; Sturm *et al*, 2001). Comme la lumière influe positivement sur le développement phénologique des plantes (p. ex., la floraison; Arfts *et al,* 1999; Kudo *et al*, 2008; Kudo & Suzuki, 2003; Phoenix *et al*, 2002), la production et le développement des fruits (p. ex., avortement, mûrissement) sont limités par l'ombrage que font les plantes de tailles supérieures (Niesenbaum, 1993; Wang *et al*, 2009; Uzun, 2007; Castrejon *et al*, 2008). Le type de couvert (p. ex., feuillus ou conifères) et l'ouverture du milieu influent sur la disponibilité lumineuse sous la canopée (p. ex., variation saisonnière). D'après une étude réalisée par Kudo *et al* (2008), l'allocation des ressources pour la fructification de plantes herbacées sous la canopée variait temporellement avec l'ouverture du milieu. Le manque de lumière restreint l'assimilation du carbone (c.-à-d., réduction de l'activité photosynthétique), affectant l'allocation des ressources pour la fructification et provoquant une hausse du taux

d'avortement des fruits (Kudo *et al*, 2008; Niesenbaum, 1993). Stephenson (1981) rapporte aussi que le manque de lumière augmente le nombre de fruits avortés chez certaines espèces du genre *Vitis*. En plus d'agir sur la luminosité, la hausse du couvert ligneux érigé influe sur la disponibilité des nutriments et la température. Chapin *et al* (1995) et Chapin & Shaver (1996) ont observé à long terme une augmentation de la quantité de nutriments sous ombrage, reflétant une baisse de l'assimilation par les plantes. L'ombrage créé par un couvert arbustif diminue la température au sol (Pommeroy *et al*, 2006; Carlsson & Callaghan, 1991). Ces modifications pourraient défavoriser les espèces plus limitées par la température (p. ex., *V. uliginosum* et *E. nigrum*; Parsons *et al*, 1994; Fitter *et al*, 1995) et moins compétitives (Dormann & Woodin, 2002), comme les espèces productrices de petits fruits (p. ex., *Vaccinium* spp et *Empetrum* sp; Kudo & Suzuki, 2003; Wada *et al*, 2002; Press *et al*, 1998; Shevtsova *et al*, 1995).

La densification arbustive et arborescente en régions subarctiques risque d'avoir un impact majeur à long terme sur la production des fruits, une source importante de nourriture pour de nombreuses espèces (Hanson *et al*, 2006). De même, la cueillette de petits fruits représente sans conteste une source de nourriture locale de bonne qualité nutritive pour les communautés nordiques (Usher, 1976; Murray & Boxall, 2005; Goetz, 2006; Fraser *et al*, 2007; Black *et al*, 2008; Fediuk *et al*, 2002). Un exemple typique où il y a une augmentation du couvert ligneux est le village inuit de Kangiqsualujjuaq (Rivière George (ci-après GR), Nunavik) situé à la limite des arbres, une zone particulièrement sensible à tout changement d'ordre climatique (Morin & Payette, 1984; Gamache & Payette, 2004). Depuis au moins une dizaine d'années, il y a une importante expansion ligneuse érigée dominée par *Betula glandulosa* Michx et *Larix laricina* (DuRoi) Koch (Tremblay *et al,* 2012; communication personnelle: Morgan, 2008). Les modifications du paysage observées à partir de photos aériennes disponibles (1964 et 2003) correspondent à l'expansion de la strate arbustive érigée discontinue à continue (c.-à-d., fermeture du milieu) et à une colonisation arborescente (p. ex., altitudinale et latitudinale). Tandis que d'autres types de milieux (c.-à-d., milieux ouverts, strates arbustives continues et strates arborescentes continues) n'ont subi aucune modification

pour la période comprise entre 1964 et 2003 (Tremblay *et al*, 2012). Ainsi, cinq types de milieux ont été identifiés, associés aux modifications de végétation observées autour de GR. Plus au nord, à Kangiqsujuaq (Wakeham Bay (ci-après WB), Nunavik), la problématique est moins complexe. Le village est situé dans le domaine bioclimatique de la toundra arctique herbacée, où aucune espèce d'arbre ne colonise ces latitudes. Ici, la fermeture des milieux ouverts est attribuable à la colonisation et l'expansion d'espèces d'arbustes érigés déjà présentes, tels que *Betula glandulosa* et *Salix* spp.

Considérant l'importance de cette ressource pour les communautés inuites et suite à ces observations, il est nécessaire d'acquérir des connaissances liées à l'impact réel de la densification arbustive sur la productivité de fruits. Nous avons voulu quantifier la variation de productivité de certaines espèces (*V. vitis-idaea* L., *V. uliginosum* L. et *E. nigrum* L.), vérifier leur sensibilité aux conditions de luminosité et leur croissance sous couvert érigé. De plus, considérant qu'*Empetrum nigrum* est plus tolérant à l'ombre (Tybirk *et al*, 2000), nous avons vérifié la possibilité que sa productivité, de même que sa croissance soient moins affectées par l'augmentation du couvert érigé.

Ainsi, nous avons : 1) caractérisé les cinq types de milieux identifiés à GR (p. ex., lumière et nutriments disponibles, température, espèces végétales); 2) mesuré l'élongation annuelle sur des ramets d'*Empetrum nigrum*, afin d'en comparer la croissance primaire; et 3) déterminé pour chacune des espèces selon les milieux, la production de fruits (g/m^2) et le mûrissement (c.-à-d., classifiés selon la coloration) afin d'en évaluer la variabilité. Les mêmes mesures ont été prises à WB, nous permettant de vérifier si la réponse des espèces était similaire à plus hautes latitudes, sous différentes conditions environnementales.

2.3 Méthodologie

2.3.1 Aire d'étude

Au cours de l'été 2009, nous avons évalué l'impact du couvert érigé sur la production de trois espèces d'arbustes à petits fruits dans des conditions contrastées, près

de deux communautés du Nunavik, l'une dans la zone de l'Arctique moyen, Kangiqsujuaq (61°35.4 N - 71°55.8 O) et l'autre dans le Bas-Arctique, Kangiqsualujjuaq (58°42.6 N - 65°59.4 O; Figure 3.1).

La communauté de Kangiqsujuaq (WB) est située près du détroit d'Hudson à la pointe nord-ouest de la péninsule d'Ungava, sur la rive sud de la Baie Wakeham. Ce village fait partie du domaine bioclimatique de la toundra arctique herbacée (Ressources naturelles et Faune Québec, 2003). Le climat de cette région est rigoureux, la température moyenne annuelle est d'environ -7 °C, et les températures mensuelles minimale (janvier) et maximale (juillet) sont de -25 à -29 °C et de 7,5 °C, respectivement. Les précipitations moyennes sont inférieures à 300 mm et la moyenne maximale d'épaisseur de neige varie entre 50 et 100 cm (données de 1971-2000 d'Environnement Canada, 2004). Les arbustes érigés y sont rares, de petite taille et peu diversifiés (Blondeau & Cayouette, 2002). La région est caractérisée par des roches de type granito-gneissique, où le roc et les dépôts sablo-graveleux constituent le type de sol du village, ainsi que les sols riches en glaces et où la présence d'ostioles, de buttes et de coins de glace est fréquente (Allard *et al*, 2007; Blondeau et Cayouette, 2002).

Kangiqsualujjuaq (GR) est situé au sud-est de la Baie d'Ungava à la limite des arbres près de l'embouchure de la rivière George. À la limite nord de la forêt boréale, sa végétation est associée au domaine bioclimatique de la toundra arctique arbustive (Ressources naturelles et Faune Québec, 2003). Les arbustes de faible taille des genres *Alnus*, *Betula* et *Salix*, abondent en association avec des arbustes nains (*Empetrum*, *Vaccinium* et *Cassiope*) (Parsons *et al*, 1994) et des herbacées, majoritairement de type graminoïde (Ressources naturelles et Faune Québec, 2003). Nous y retrouvons également dans les sites protégés (p. ex., vallées) de petites forêts de résineux (c.-à-d., principalement *Larix laricina* (Du Roi) Koch et *Picea mariana* (Miller) BSP; Fournier *et al*, 1987), tandis que les landes à lichen et arbustes colonisent les endroits exposés (Développement durable, Environnement et Parcs, 2010). La température moyenne annuelle enregistrée est de -6 °C, et les températures mensuelles minimales (janvier) et maximales (juillet) sont de -22 °C et de 9 °C respectivement. Les précipitations

annuelles moyennes sont inférieures à 300 mm, dont plus de la moitié sont sous forme de neige (Blondeau & Cayouette, 2002). Le gneiss granitique s'étend à l'échelle régionale et est recouvert de till glaciaire, de sable, de gravier et de blocs glacio-marins. De façon générale, le sol est podzolique (c.-à-d., accumulation de matière organique) et pauvre en minéraux (Allard *et al*, 1989).

2.3.2 Espèces à l'étude

Les trois espèces d'arbustes producteurs de fruits étudiées font partie des *Ericaceae* : *Empetrum nigrum* L. (camarine noire), *Vaccinium uligonosum* L. (bleuet) et *Vaccinium vitis-idaea* L. (airelle rouge) (Marie-Victorin, 1995; Blondeau & Roy, 2004). Les trois espèces sont fréquemment associées et rencontrées en milieu boréal, alpin, subarctique et arctique, où elles se reproduisent principalement de façon végétative (Wada *et al,* 2002; Hagen 2002; Jacquemart, 1997; Jacquemart, 1996; Eriksson, 1989). Cependant, ces arbustes nains produisent aussi de petites baies comestibles, servant à la reproduction sexuée. Les formes de croissance varient selon l'espèce. *Empetrum nigrum* et *Vaccinium vitis-idaea* sont sempervirents, tandis que *V. uliginosum* est un arbuste à feuilles décidues. Leur abondance respective varie selon les conditions environnementales. *Vaccinium vitis-idaea* croît le plus fréquemment dans les sols bien drainés, sur les surfaces rocheuses et en sols acides (Groupe de recherche en écologie des tourbières, 2007). Tolérant aux variations du contenu en eau dans le sol, *E. nigrum* est fréquent dans les milieux où le sol est pauvre en nutriments, sur les falaises et dans les sous-bois de pessière (Shevtsova *et al*, 1997), tandis que *V. uliginosum* est généralement plus fréquent en milieu exposé, de même que dans les lieux humides (Jacquemart, 1996; Blondeau & Cayouette, 2002).

2.3.3 Sélection des sites

À WB, *Betula glandulosa* Michaux et *Salix glauca* L. sont les principales espèces d'arbustes érigés (observations personnelles, 2009). L'échantillonnage a eu lieu dans la vallée située au nord de la communauté, de l'autre côté du lac Tasialuk et du mont

bordant le village. Cette vallée est traversée par le ruisseau d'Aviguti qui se jette dans la Baie de Wakeham. Nous avons d'abord sélectionné aléatoirement des parcelles (1 m^2) sous couvert arbustif faisant minimalement 50 % d'ombrage au sol (c.-à-d., évaluation qualitative effectuée avec l'échelle de Domin-Krajina) et avec minimalement la présence d'une des trois espèces à l'étude. À proximité de celles-ci étaient marquées des parcelles en milieu ensoleillé, pour un total de 19 parcelles en milieu ouvert et 16 sous arbustes. Le patron expérimental non balancé est attribuable au fait que 3 parcelles supplémentaires ont été sélectionnées pour augmenter l'échantillonnage d'*Empetrum nigrum*, étant moins fréquent que les deux autres espèces dans la vallée. Les parcelles sous ombrage étaient installées dans des secteurs représentatifs de la colonisation par les arbustes, d'une taille minimale de 10 m^2.

L'analyse de photos aériennes prises à Rivière George en 1964 et 2003 montre la progression du couvert végétal érigé aux alentours du village (Tremblay *et al*, 2012). Les variations de croissance d'*E. nigrum* et de productivité de fruits ont été comparées entre cinq types de couvert :

1- O : milieux ouverts en 1964 et en 2003 (pas de changement)
2- a+ : strate arbustive discontinue en 1964 et continue en 2003 (fermeture du milieu)
3- a : strate arbustive continue en 1964 et en 2003 (pas de changement)
4- A+ : strate arborescente discontinue en 1964 et continue en 2003 (fermeture du milieu)
5- A : strate arborescente continue en 1964 et en 2003 (pas de changement)

Trois sites d'une superficie moyenne d'environ 30 m × 30 m ont été sélectionnés pour chacun des cinq types de couvert. Trois parcelles (1 m^2) par site y ont été disposées afin de caractériser la végétation et d'en déterminer la productivité spécifique de fruits.

2.3.4 Caractérisation végétale et environnementale

Pour chacune des parcelles (1 m^2) à WB et GR, nous avons évalué le recouvrement (%) des principales strates (arborescente, arbustive et herbacée), de même

que le recouvrement au sol par la roche, le lichen et les mousses. Le recouvrement spécifique a ensuite été déterminé, suivant l'échelle de Domin-Krajina (Lee & Hanus, 1999). Les autres espèces retrouvées à travers le milieu, mais absentes des parcelles ont été inventoriées. Pour compléter la caractérisation végétale, nous avons mesuré aléatoirement la hauteur (3 ramets/espèce/parcelle) des arbustes fruitiers à l'étude.

Pour chaque site, l'orientation (versant) et la pente (%) ont été évaluées et trois échantillons de sol (10 cm × 10 cm × 30 cm de profondeur) ont été prélevés aléatoirement. Les échantillons de sol de chaque site ont été tamisés à 4 mm et pesés individuellement. Par la suite, nous les avons tamisés à 2 mm, mis à l'étuve (77 °C) et repesés jusqu'à la stabilisation du poids afin d'évaluer leur teneur en eau (%), et finalement regroupés (3/site) pour réaliser les analyses en laboratoire (c.-à-d., évaluation de la granulométrie à l'hydromètre; Bouyoucos, 1962; l'azote par la méthode Quikchem 13-107-06-2-D; méthode de Kjeldahl; le phosphore total; Mehlich, 1978; la matière organique; Yeomans & Bremner, 1988, le pH au $CaCl_2$; McKeague, 1978). Pour les sites à GR, deux senseurs de température (période du 4 au 16 août 2009) et deux senseurs d'intensité lumineuse (période du 3 au 18 août 2009) ont été installés par type de couvert (senseurs de type Onset Hoboware Pendant). Les senseurs de température ont été installés à 5 cm dans le sol sous la surface, tandis que l'intensité lumineuse était mesurée à la surface du sol, sous la végétation érigée. À WB, trois senseurs de température ont été installés dans les parcelles en milieux ouverts et trois autres sous couvert arbustif. Le même patron a été utilisé pour évaluer la radiation solaire.

2.3.5 Mesures d'élongation annuelle d'Empetrum nigrum

Afin d'évaluer la croissance d'une espèce productrice de petits fruits de faible taille, soit *E. nigrum*, des ramets ont été sélectionnés aléatoirement (10 par site) et récoltés le 25 août 2009 (GR) et le 29 et 30 août 2009 (WB), pressés et mesurés en laboratoire. *Empetrum nigrum* était présent à travers tous les sites échantillonnés et comme cette espèce se propage principalement par voie végétative, il est difficile de

distinguer les individus génétiquement différents (c.-à-d., genets) sur le terrain. Ainsi, le ramet était défini comme l'unité de mesure. Fonctionnellement, il s'agit de tiges aériennes. Le ramet est constitué de parties nouvellement formées durant la saison de croissance à l'étude et de celles des années précédentes (Shevtsova *et al*, 1997). Les mesures d'élongation ont permis d'estimer la croissance primaire de la saison 2009 et des années antérieures, afin d'en faire la comparaison entre les types de couverts à GR, comme à WB. Les lectures ont été réalisées sur la plus longue branche des ramets, de 2009 jusqu'à la dernière année de croissance visible.

2.3.6 Productivité et mûrissement des fruits

Pour quantifier la productivité et le mûrissement des fruits selon le type de couvert, nous avons récolté (18 au 20 août 2009 à GR; 30 août et 1er septembre 2009 à WB) l'ensemble des fruits des parcelles de 1 m^2. Ils ont été triés par espèce, dénombrés et pesés (c.-à-d., poids frais) pour obtenir une mesure de productivité par espèce. La productivité a été corrigée en fonction du recouvrement spécifique afin d'obtenir des mesures comparables en g/m^2.

Les fruits ont ensuite été classés qualitativement, selon leur stade de mûrissement en trois différentes classes, soit les fruits verts (c.-à-d., non mûrs), intermédiaires ou mûrs. Pour déterminer l'effet du couvert sur le mûrissement des fruits, nous avons calculé un indice (0 à 1) en fonction des stades. Des valeurs étaient associées à chaque stade (c.-à-d., 0 pour les fruits verts, 0,5 pour les fruits de stade intermédiaire et 1 pour les fruits mûrs). Par la suite, la somme des valeurs attribuées était divisée par le nombre de fruits total, afin d'obtenir l'indice de mûrissement par parcelle et par espèce.

2.3.7 Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à partir des logiciels Systat 11 et Jump 9 de SAS, à l'exception des analyses de correspondance, générées par Canoco pour Windows 4.5. Les analyses de végétation ont été effectuées à partir des valeurs

médianes (%) issues des classes de l'échelle Domin-Krajina. Une valeur de 0,001 % a été attribuée aux espèces supplémentaires présentes dans le milieu. Les valeurs moyennes de recouvrement spécifique par type de milieu et les variables environnementales s'y rattachant nous ont permis d'effectuer une analyse descriptive des milieux, afin de voir s'il y avait regroupement des milieux et si ceux-ci étaient fonction des variables abiotiques, à l'aide d'une analyse de correspondances (ci-après DCA). Après avoir vérifié l'inertie, la longueur des segments et les facteurs d'inflation, nous avons choisi d'éliminer les valeurs d'azote, les analyses texturales (c.-à-d., sable, limon fin et grossier et l'argile) et de diminuer l'influence du site 11 associé à des valeurs extrêmes (c.-à-d., en lui attribuant un poids de 0,011) pour l'obtention de la DCA finale. Pour l'analyse descriptive de la répartition des espèces végétales, nous avons identifié les espèces ayant les plus grandes fréquences (c.-à-d., 43 % et plus) issue de la DCA.

Une analyse de variance et un test *post hoc* (test de Tukey) ont été réalisés sur les données de hauteurs des arbustes prostrés à GR, afin de vérifier l'impact de la fermeture du milieu. Par contre, les données de hauteurs pour *V. uliginosum* ont été préalablement transformées pour obtenir une échelle logarithmique. À WB, nous avons comparé les hauteurs des arbustes fruitiers à l'aide de comparaisons de moyennes où, encore une fois, les hauteurs de *V. uliginosum* ont été transformées. Dans le cas où la normalité ou l'homogénéité des variances n'étaient pas respectées, nous avons utilisé des tests non paramétriques (test de Kruskal-Wallis ou Mann-Whitney).

En ce qui concerne les mesures d'élongation d'*E. nigrum*, nous avons utilisé les mesures des années entre 2000 et 2009, correspondant aux lectures possibles de l'ensemble des ramets échantillonnés et ce, afin d'obtenir le même nombre d'années de croissance pour chacun de ceux-ci. L'effet individuel (ramet) a été vérifié et les élongations ont été transformées (c.-à-d., *ln*) avant d'effectuer une ANOVA à mesures répétées.

Le nombre de fruits produits (g/m^2) a été corrigé en fonction du recouvrement spécifique et transformé (c.-à-d., *log*+1). Une ANOVA et un test de Tukey ont permis de

Rapport-Gratuit.com

cibler l'effet et les différences de productivité entre les types de couverts à GR. Pour comparer le nombre de fruits des différentes espèces à WB sous couvert arbustif et en milieu ouvert, nous avons utilisé le test de Mann-Whitney, étant donné que les échantillons ne présentaient pas une distribution normale, ni une homogénéité des variances. Par la suite, pour comparer le mûrissement des fruits à GR, nous avons employé le test de Kruskal-Wallis et à WB, des tests de Mann-Whitney ont été effectués sur les indices de mûrissement, les données étant non paramétriques.

2.4 Résultats

2.4.1 Caractérisation végétale

Afin de vérifier l'impact de l'augmentation récente du couvert ligneux érigé sur les espèces productrices de petits fruits dans deux domaines bioclimatiques, nous avons comparé deux types de couvert végétal à WB (ouvert, O; arbustif, a) et cinq types à GR (ouvert, O; augmentation arbustive récente, a+; couvert arbustif, a; augmentation arborescente récente, A+; couvert arborescent, A).

La richesse spécifique totale varie d'un type d'habitat à l'autre. À WB, 43 espèces vasculaires ont été dénombrées en milieu ensoleillé (O) et 30 étaient associées aux couverts arbustifs (a). Tandis qu'à GR, 21 espèces ont été retrouvées en milieu ouvert (O), 20 dans les milieux arbustifs récemment fermés (a+), 26 espèces sous couverts arbustifs n'ayant pas subis de changement récent (a) et 32 espèces ont été dénombrées pour chacun des deux types de couvert arborescent (Annexe A).

Suite à l'analyse de correspondances (ci-après DCA), nous remarquons que les sites se regroupent en fonction des types de couvert où 25,8 % de la distribution des espèces végétales est expliquée par l'axe 1 et 11,2 % sur l'axe 2 (Figure 2.1). *Betula glandulosa* est présent à travers tous les types de couvert, avec une abondance (c.-à-d., % de recouvrement moyen) variant de 0,001 à 87 %, à l'exception des milieux ouverts à WB, où il est absent. Par contre cette espèce domine les milieux arbustifs à GR et à WB,

en plus forte abondance (Tableau 2.1). De même, la DCA démontre cette tendance, où le bouleau est plus fortement associé aux sites arbustifs (Figure 2.1). Toutefois plus au nord près du village de WB, la colonisation arbustive érigée peut aussi être attribuable à *Salix glauca*, en égale abondance au bouleau (c.-à-d., recouvrant tous deux 0 à 87 %; Tableau 2.1) et formant parfois, l'une ou l'autre des espèces, des peuplements purs. Le saule glauque est une espèce caractéristique de milieux arbustifs à WB. L'analyse démontre qu'à GR *Larix laricina* et *Picea mariana* sont les espèces dominantes des sites arborescents et où la mousse est fortement présente à travers ces sites (Figure 2.1).

L'abondance des espèces productrices de petits fruits varie entre les sites et en fonction du type de couvert (Tableau 2.1). Par contre, suite à l'analyse de correspondances nous remarquons que les trois espèces sont concentrées autour des milieux ouverts (Figure 2.1). Sous couvert arbustif (a et a+), l'abondance de *V. vitis-idaea* est au moins 5 fois plus faible qu'en milieu ouvert et arborescent (A et A+). Cette espèce est principalement associée aux milieux ouverts (GR et WB), tels que le *Rhododendron tomentosum* et le lichen (Figure 2.1). Comme pour *V. vitis-idaea,* l'abondance de *V. uliginosum* est plus élevée en milieu ouvert que sous couvert arborescent (A et A+). Cependant, nous retrouvons le bleuet aussi en forte abondance en milieu arbustif (a et a+), variant de 0 à 87 % (Tableau 2.1). En effet, il est situé spatialement plus près des sites arbustifs, à GR comme à WB, comparativement aux autres espèces productrices de petits fruits (Figure 2.1). À l'inverse des deux espèces de *Vaccinium*, *E. nigrum* est plus fortement associé aux milieux arborescents, après les milieux ouverts (Figure 2.1).

Afin de vérifier l'effet de l'augmentation de la strate érigée, pouvant influer sur la croissance et la production de fruits, nous avons comparé la hauteur des espèces productrices de petits fruits dans les différents milieux, en tant qu'indicateur. Les trois espèces d'arbustes prostrés à WB sont significativement plus hautes sous couvert arbustif ($p < 0{,}001$; Figure 2.2) qu'en milieu ouvert. En milieu ensoleillé, la hauteur moyenne d'*E. nigrum* est inférieure de 2 cm, comparativement à la hauteur sous

couverts érigés, de même que pour *V. vitis-idaea* (2,2 cm moins haut) et pour *V. uliginosum* (2,5 cm moins haut).

À GR, les résultats démontrent aussi que la fermeture du milieu a un effet significatif sur la hauteur des espèces productrices de petits fruits. La hauteur d'*E. nigrum* en milieu ouvert (5,5 ± 6,4 cm) est plus faible ($p < 0{,}001$) d'en moyenne 15 ± 4,1 cm, comparativement aux autres milieux. Tout comme la camarine, les ramets de *V. uliginosum* mesurés en milieux ouverts (5,2 ± 2,8 cm) et ceux de *V. vitis-idaea* (3 ± 0,8 cm) sont inférieurs à ceux retrouvés ailleurs ($p < 0{,}001$; Figure 2.2). La hauteur de *V. uliginosum* est plus élevée en milieux arbustifs (a et a+; $p > 0{,}05$) qu'en milieux ouverts (O) et que sous les arbres (A et A+; $p > 0{,}05$). La taille des ramets du bleuet en milieux ensoleillés varie entre 2,5 et 12 cm, tandis que sous arbustes (a et a+), les ramets mesurent en moyenne 28,2 ± 9,6 cm (Figure 2.2). C'est sous les arbustes établis depuis longtemps (a) que nous retrouvons les plus hauts ramets (8,7 ± 3,3 cm) de *V. vitis-idaea*, significativement supérieures aux milieux ouverts (O; $p < 0{,}001$) et arborescents récemment colonisés (A+; $p < 0{,}001$; Figure 2.2).

2.4.2 Caractérisation environnementale

Tous les sites échantillonnés étaient orientés versant sud, avec quelques variantes (c.-à-d., sud-est, sud-ouest). En ce qui concerne les analyses de sols, pour l'ensemble des milieux des deux villages, nous observons beaucoup de variations au niveau des nutriments et du contenu en eau. De façon générale, les sols sont plutôt acides. À WB le pourcentage d'azote et le contenu en eau sont plus faibles sous couvert arbustif, comparativement aux milieux ouverts (Tableau 2.2). Pour un des sites en milieu arborescent (A+) à GR, nous observons un taux de phosphore très élevé (136,1 ppm), ce pourquoi nous avons diminué son poids lors de l'analyse de correspondances. Ceci peut être relié au fait que ce même site est caractérisé par un sol loam limono-argileux (% d'argile plus élevé), tandis que les autres types de sols retrouvés à GR et WB correspondent à des loams sableux ou sables loameux (Tableau 2.2).

L'axe 1 de l'analyse de correspondances (DCA) explique 25,1 % de la distribution spatiale des sites en fonction de la relation de l'abondance des espèces végétales et des caractéristiques environnementales, tandis que l'axe 2 explique 23 % (Figure 2.3). La proximité des points reflète les sites ayant des profils similaires, ici bien distincts par types de couverts. Les sites arborescents (A et A+) sont regroupés ensemble et associés à de fortes valeurs de carbone organique (Figure 2.3). Sur l'axe 1, nous remarquons que la pente est un facteur qui semble différencier les sites de WB des milieux arborescents à GR, où les arbres colonisent plutôt les vallées, les terrains peu inclinés et protégés au bas de versant (Tableau 2.2; Figure 2.3). La quantité de matière organique (c.-à-d., CO) et le pH semblent aussi être des facteurs environnementaux expliquant partiellement la distribution spatiale des sites (Figure 2.3). À WB, les sols sont plus basiques et contiennent moins de matière organique que ceux situés plus au sud à GR (a, a+, A, A+; Tableau 2.2). Par contre, indépendamment des villages l'ensemble des sites en milieux ouverts sont caractérisés par de plus faibles taux de matière organique (Figure 2.3).

D'autre part, la présence d'un couvert ligneux érigé réduit significativement la lumière disponible au sol, mesurée sur une période de 16 jours (WB, $p < 0{,}001$; GR, $p = 0{,}024$; Tableau 2.2; Annexe B). Les milieux ouverts à GR offrent une meilleure luminosité, à l'exception des milieux arbustifs continus (a), où $p = 0{,}099$ (Annexe B). Aucune différence n'est observée entre les couverts arbustifs et arborescents. Dans le même sens, la lumière est un facteur important caractérisant les milieux ouverts, à l'inverse des milieux arbustifs à GR et à WB (Figure 2.3). Par contre, même si la disponibilité lumineuse influe sur la température, nous remarquons que la température est le facteur environnemental qui explique le mieux la répartition des milieux ouverts, les dissociant des autres types de couverts (Figure 2.3). À WB la température au sol, mesurée durant 13 jours et exprimée en nombre de degrés-jours sans gel (> 0° C) (ci-après DJ), est significativement inférieure sous couvert arbustif qu'en milieu ouvert ($p = 0{,}05$; Annexe B). À l'inverse, à GR il n'y a aucune différence significative ($p = 0{,}359$) de DJ entre les différents types de couverts, même si les milieux ouverts semblent plus chauds (Tableau 2.2; Annexe B).

2.4.3 Mesures d'élongation annuelle d'Empetrum nigrum

Nous avons comparé l'impact de la fermeture du milieu sur la croissance primaire (c.-à-d., mesures d'élongation annuelles) d'*Empetrum nigrum*. À WB et à GR, l'élongation de cette espèce varie significativement selon le type de couvert ($p = 0{,}010$ et $p < 0{,}001$, respectivement). Les élongations des ramets en milieux ouverts à GR comme à WB sont significativement plus faibles que sous tout autre type de couverts (Figure 2.4). L'analyse de comparaisons multiples a révélé qu'à GR la croissance est supérieure en milieu arborescent (A+), suivi des milieux arborescents et arbustifs continus (A et a) qui ne présentent aucune différence entre eux ($p = 0{,}253$). Ensuite, la croissance est inférieure en milieu arbustif ayant augmenté récemment (a+) et c'est en milieu ouvert (O) que nous observons la plus faible croissance (Figure 2.4).

Enfin, nous avons remarqué que les élongations tendent à augmenter avec les années, indépendamment des types de couvert et des villages. À GR, l'élongation augmente de façon significative avec les années ($p < 0{,}001$), tandis qu'à WB ce n'est qu'une tendance (Figure 2.4).

2.4.4 Productivité d'Empetrum nigrum, Vaccinium uliginosum et Vaccinium vitis-idaea

Les modifications de couvert ont un impact sur la production de fruits des espèces des deux domaines bioclimatiques (Figure 2.5). L'ANOVA réalisée démontrait une variation significative intrasite ($p = 0{,}004$) pour chaque espèce d'un même type de couvert. Nous avons donc inclus l'effet du site comme facteur dans l'analyse. De façon générale, malgré une grande variation de productivité (0 à 702,1 g/m^2), celle-ci est inférieure sous couvert érigé à WB, comme à GR (respectivement, pour *E. nigrum*, $p = 0{,}053$ et $p = 0{,}005$; *V. uliginosum*, $p = 0{,}002$ et $p = 0{,}003$; *V. vitis-idaea*, $p = 0{,}019$ et $p < 0{,}001$; Figure 2.5).

C'est en milieux ouverts que les plus grandes productivités sont observées. Cependant, à la limite des arbres (GR), il n'y a aucune différence significative de

productivité de fruits d'*E. nigrum* entre ces milieux et les milieux arborescents, où les arbres sont établis depuis longtemps (A). À l'inverse, les milieux arbustifs (a+ et a) et arborescents récemment refermés (A+) sont associés aux plus faibles productivités d'*E. nigrum* (Figure 2.5). Pour *V. uliginosum*, les milieux ouverts, soit les plus productifs (en moyenne $109 \pm 154{,}1$ g/m^2), sont significativement supérieurs aux milieux caractérisés par un couvert arbustif (a+ et a) et ces derniers le sont des milieux arborescents (A+ et A). Il n'y a toutefois pas de différence entre les milieux arbustifs (a) et arborescents (A) établis de longue date et les milieux récemment colonisés (Figure 2.5). Finalement, la productivité de *V. vitis-idaea* est supérieure en milieux ouverts (en moyenne $47 \pm 52{,}4$ g/m^2) et sous couverts arborescents récemment refermés (A+) (en moyenne $77 \pm 147{,}7$ g/m^2), tandis qu'il n'y a aucune différence significative entre les autres types de couverts, avec une plus faible productivité (Figure 2.5).

2.4.5 Mûrissement des fruits

En plus du nombre de fruits produits, nous avons voulu vérifier l'impact de l'augmentation du couvert ligneux érigé, sur le mûrissement des fruits. À plus hautes latitudes, le type de couvert ne semble pas jouer un rôle important sur le mûrissement, à l'exception de *V. vitis-idaea* où les fruits récoltés sont plus mûrs en milieu ouvert ($p < 0{,}001$; Figure 2.6). Le mûrissement des fruits a aussi été comparé selon les types de couvert à GR, où aucun effet significatif n'est observé, et ce, pour les trois espèces (Figure 2.6). Indépendamment des couverts et des latitudes, l'espèce la plus hâtive, soit *E. nigrum*, présente des indices de mûrissement plus élevés que les fruits de *Vaccinium* spp. À l'inverse, l'espèce la plus tardive, *V. vitis-idaea*, est associée aux indices de mûrissement les plus bas (Figure 2.6).

2.5 Discussion

La densification arbustive et arborescente a un impact significatif sur l'élongation d'*Empetrum nigrum*, plus élevée sous ombrage. De plus, indépendamment des villages, l'élongation de la camarine augmente sous tous les types de couvert depuis les

dix dernières années. Les espèces productrices de petits fruits sont fréquentes dans tous les milieux étudiés (ouverts, arbustifs ou forestiers), mais leur abondance varie selon le type de couvert. Leur recouvrement est plus important en milieu ouvert, là où nous observons une meilleure productivité de fruits (g/m^2), ajustée par recouvrement spécifique.

2.5.1 Caractérisation végétale

La végétation est assez représentative de chaque milieu, permettant de les distinguer par village et grands groupements (p. ex., ouverts, arbustifs et arborescents) (Figure 2.1). *Betula glandulosa* est l'espèce arbustive érigée associée aux milieux arbustifs à GR et à WB, où elle est présente en plus forte abondance. Les résultats obtenus appuient le fait qu'il s'agirait d'une des espèces arbustives décidues principalement responsables de la densification arbustive des milieux nordiques au Nunavik, tel qu'à GR (Tremblay *et al*, 2012) et à Boniface (Ropars & Boudreau, 2011). Avec *Picea mariana*, *Larix laricina* est l'essence d'arbre qui constitue les milieux arborescents à GR, ce dernier semblant prendre davantage d'importance quant à la colonisation.

Quant aux trois espèces productrices de petits fruits, elles sont concentrées autour des milieux ouverts (Figure 2.1). Ceci tend à démontrer que les milieux ouverts indépendamment des villages semblent offrir des conditions plus favorables à leur croissance, comparativement à l'ensemble des milieux sous ombrage. Jacquemart (1996) rapporte qu'en milieux ouverts, il n'est pas rare de rencontrer *E. nigrum*, *V. uliginosum* et *V. vitis-idaea* en association, où ils dominent parfois les milieux exposés, laissant peu de place pour la colonisation d'autres espèces. Ces espèces co-dominent les habitats exposés (Gerdol *et al*, 2000; Shevtsova *et al*, 1997) caractérisés par de plus fortes radiations solaires, comparativement aux milieux arbustifs. Ceci explique en partie leur distribution, de même que l'absence de compétition (c.-à-d., par le couvert ligneux érigé) en milieu ouvert, ce qui peut favoriser leur croissance. En effet, la richesse spécifique

moindre en milieux arbustifs (à GR et à WB) (Annexe A) peut être attribuable à la forte compétition induite par la colonisation du bouleau (Myers-Smith *et al*, 2011).

2.5.2 Mesures d'élongation annuelle d'Empetrum nigrum

Nous observons, dans tous les types de couverts et dans les deux communautés, une augmentation de la croissance primaire d'*E. nigrum* (c.-à-d., élongation annuelle) qui correspond aux dernières années les plus chaudes dans cette région (Tremblay *et al*, 2012). Il reste difficile d'en discerner les causes avec exactitude, mais l'augmentation de température des milieux arctiques et subarctiques (Hinzman *et al*, 2005; ACIA, 2005) peut y contribuer (Shevtsova *et al*, 1997; Aerts, 2010). En effet, suite à une expérimentation (c.-à-d., réchauffement à l'aide de serre) Wada *et al* (2002) ont démontré que l'élongation des tiges d'*E. nigrum* était 4 fois plus élevée en serre que dans les parcelles témoins. D'autres études démontrent aussi que le réchauffement climatique favorise la croissance d'espèces arctiques (Arft *et al*, 1999; Pajunen, 2009; Forbes *et al*, 2009; Hallinger *et al,* 2010; Hudson & Henry, 2009; Dormann & Woodin, 2002).

L'élongation annuelle d'*E. nigrum* et la hauteur sont inférieures en milieux ensoleillés. Cela suggère que même s'il y a une augmentation de l'élongation pour l'ensemble des milieux, il y a étiolement des plants sous tous les types de couvert ombragés. Ces données concordent avec le fait que cette espèce est une mauvaise compétitrice pour la lumière et qu'elle tend à s'étioler et à diminuer le nombre de feuilles produites par tige (Tybirk *et al*, 2000).

2.5.3 Productivité d'Empetrum nigrum

C'est en milieu ouvert que la productivité de fruits des trois espèces est la plus élevée. L'ombrage créé par un couvert érigé joue un rôle d'isolant thermique diminuant les températures et atténuant les écarts (Pommeroy *et al*, 2006; Carlsson & Callaghan, 1991). Ces modifications thermiques peuvent défavoriser les espèces prostrées plus

limitées par la température. À plus long terme, ce phénomène pourrait entraîner une modification du taux de décomposition de la matière organique et donc, du pH et des nutriments disponibles pour les plantes entre les milieux récemment colonisés et établis depuis longtemps (a, a+; A , A+). Callaghan & Jonasson (1995) expliquent que ce phénomène d'isolation thermique, attribuable à la densification arbustive, diminue la température à la surface du sol, où le taux de décomposition de la matière organique par les microorganismes s'en trouvera plus faible à basse température. Ceci aurait pour effet d'augmenter la compétition pour les nutriments, facteur limitant en régions arctiques.

Aucune différence n'est observée pour *E. nigrum* entre les milieux ouverts (O) et arborescents continus (A). Comme il est tolérant à l'ombre, mais mauvais compétiteur pour la lumière, il est possible que d'autres facteurs environnementaux limitent sa croissance et sa fructification. Il est adapté à croître dans des sols acides, pauvres en nutriments et est fréquent en terrain humide (Tybirk *et al*, 2000; Goetz, 2006). Les milieux arborescents continus (A) échantillonnés réunissent ces conditions, où l'eau disponible n'est pas un facteur limitant (Tableau 2.2). Ceci est susceptible d'expliquer la forte productivité sous ce type de couvert, de même que la différence marquée entre les deux types de couverts arborescents (c.-à-d., A+ et A), où la teneur en eau est plus faible sous couvert A+. Aussi, il est possible que la plus faible productivité de la camarine sous couvert arborescent récemment établi (A+) comparativement au couvert Arborescent continu (A), soit la démonstration que l'espèce ne s'est pas encore adaptée à ces changements de végétation. De plus, les ramets semblent s'étioler et produire moins de feuilles sous ombrage (Annexe C). Cette réduction d'organes photosynthétiques entraînant une diminution du taux de carbone assimilé en milieu ombragé peut modifier l'allocation des ressources (Chapin & Shaver, 1996) et défavoriser la production de fruits (Kudo *et al*, 2008).

Par contre, *E. nigrum* est présent sous tous les types de couverts à GR. Sa tolérance à une réduction de lumière (Tybirk *et al*, 2000; Schmidt *et al*, 2002; Wada *et al*, 2002) peut expliquer son abondance, de même que les différentes stratégies de compétition qui le caractérisent. À titre d'exemple, la reproduction clonale lui permet de

se propager une fois établi et l'allélopathie l'avantage quant à la germination et l'établissement d'autres espèces (Tybirk *et al*, 2000; Keech *et al*, 2005).

2.5.4 Productivité de Vaccinium uliginosum

À l'inverse d'*E. nigrum*, *Vaccinium uliginosum* est moins abondant et productif sous couvert arborescent. Après les milieux ouverts, c'est sous couvert arbustif (c.-à-d., a et a+) que *V. uliginosum* produit le plus de fruits. Plus sensible aux variations de lumière, *V. uliginosum* a une meilleure capacité d'adaptation morphologique (c.-à-d., plasticité) qu'*E. nigrum* et *Vaccinium vitis-idaea* (Gerdol *et al*, 2000). L'orientation de ses feuilles et sa capacité à s'élever au-dessus des deux autres espèces font de lui un excellent compétiteur, lui procurant un meilleur accès à la ressource (Jacquemart, 1996). En effet, sous ombrage sa hauteur à GR et à WB est plus élevée qu'en milieu ouvert et supérieure aux autres espèces. La forme de croissance que présente *V. uliginosum* semble l'avantager. Cette espèce décidue doit refaire des feuilles chaque saison, lui permettant de s'acclimater plus rapidement et spécifiquement aux conditions de luminosité ambiante qu'une espèce sempervirente (p. ex., modification architecturale: hauteur, orientation des feuilles et surface foliaire) (Graglia *et al*, 1997; Gerdol *et al*, 2000; Jacquemart, 1996).

Cependant à GR, sous couvert arborescent nous observons une faible productivité. D'autres facteurs environnementaux tels que la température et l'azote disponible sont souvent limitants aux latitudes nordiques (Press *et al*, 1998). Jacquemart (1996) mentionne que *V. uliginosum* est plus limité par l'azote que par la lumière. Il est possible que ce facteur y ait contribué sous couvert arborescent (GR) et sous couvert arbustif (WB). Chapin & Shaver (1996) mentionnent que de faibles pourcentages d'azote peuvent refléter une forte compétition, suite à l'assimilation de l'azote par d'autres espèces (p. ex., *Betula*, *Larix*), au détriment d'espèces moins compétitrices. En effet, nous observons un plus faible pourcentage d'azote sous ombrage comparativement aux milieux ensoleillés à WB. Ceci peut refléter une plus forte compétition aux plus hautes latitudes pour les nutriments, où ils sont plus limitants. Dans le même ordre d'idée, la

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

récente colonisation par les arbustes érigés et les espèces arborescentes (a+ et A+) peut expliquer, les faibles pourcentages d'azote observés dans ces milieux.

2.5.5 Productivité de Vaccinium vitis-idaea

Moins plastique que *V. uliginosum* et de plus faible taille que les deux autres espèces (c.-à-d., morphologiquement) (Jacquemart, 1996; Marie-Victorin, 1995), *V. vitis-idaea* est désavantagé sous ombrage, ne pouvant rivaliser pour la lumière. Tolérant à la sécheresse et sensible au régime lumineux (Gerdol *et al*, 2000), les milieux ouverts semblent optimaux à sa production à GR, comme à WB. Même si cette espèce est parfois retrouvée en sous-bois des forêts de conifères, nous expliquons mal la différence marquée de production entre les deux types de couvert arborescent à GR (c.-à-d., A+ et A). Par contre, il est possible que ce soit attribuable à l'anoxie du sol en milieu arborescent continu (A). Gerdol *et al* (2000) explique qu'un sol saturé en eau et pauvre en oxygène peut défavoriser sa croissance et ainsi en diminuer la productivité en fruits. De plus, le phosphore influe sur la fructification (Gauci, 2008). Les sols riches en phosphore des milieux arborescents récemment colonisés (A+) semblent favoriser la productivité des espèces du genre *Vaccinium*.

2.5.6 Mûrissement des fruits

Si le type de couvert influence la productivité, il semble avoir un impact mineur sur leur mûrissement à GR comme à WB (Figure 2.6). L'indice de mûrissement élevé des fruits d'*Empetrum nigrum* sous tous les types de couvert est lié directement à la date tardive de récolte et à son développement phénologique. Comme l'initiation florale a lieu à la fin de la saison de croissance, il peut entamer la floraison rapidement l'année suivante. Ses fruits se développent et mûrissent donc plus hâtivement que les espèces du genre *Vaccinium* (Shevtsova *et al*, 1995).

À la même date, les fruits des trois espèces sont cependant un peu plus mûrs en milieu ouvert. La lumière semble bénéfique au mûrissement des fruits, mais il est

laborieux d'évaluer précisément son importance, étant donné les multiples facteurs et interactions qui peuvent y contribuer (Forney *et al*, 2009; Uzun, 2007). Par exemple, la température et la longueur de la saison de croissance jouent un rôle important sur le développement phénologique des espèces et sur le mûrissement (Opstad & Sonsteby, 2008), ce pourquoi les fruits sont prêts plus hâtivement en basse latitude (GR) qu'en haute latitude (WB) (observation personnelle, 2008, 2009). Le manque d'eau peut aussi retarder le mûrissement (Jacquemart, 1996), de même qu'une carence d'éléments nutritifs (Opstad & Sonsteby, 2008; Zaid, 2006).

2.6 Conclusion

Une fois établis, les arbres et arbustes érigés dominent les écosystèmes de toundra, en diminuant la lumière disponible pour les espèces prostrées et en augmentant la compétition pour les nutriments (Hallinger *et al*, 2010; Kudo *et al*, 2008), souvent limitants aux latitudes nordiques (Press *et al*, 1998). L'augmentation du couvert ligneux érigé restreint la superficie des milieux ouverts (Tremblay *et al*, 2010), habitat où la production est la meilleure pour les trois espèces aux différentes latitudes. Selon les conditions environnementales et le type de couvert (c.-à-d., arbustif ou arborescent), certaines espèces arriveront à se maintenir et à se reproduire sexuellement. La progression des milieux dominés par *Betula glandulosa* affecte moins la productivité de *V. uliginosum*, tandis que l'augmentation du couvert arborescent semble avoir un impact plus faible sur la productivité d'*E. nigrum*. Par conséquent, ces changements de végétation auront inévitablement des répercussions sur la ressource. Une baisse de production de fruits est envisageable avec la progression du couvert ligneux érigé. À long terme, le réchauffement est susceptible de modifier la structure et la composition des communautés végétales, ce qui risque d'engendrer des pertes localisées d'espèces et ultimement, des changements dans le fonctionnement des écosystèmes (Chapin *et al.* 1995).

Tableau 2.1

Étendue du recouvrement spécifique moyen (%), selon l'échelle Domin-Krajina des principales espèces végétales responsables de la fermeture du milieu et des arbustes prostrés à Kangiqsujuaq et Kangiqsualujjuaq (Nunavik), où O : ouvert; a+ : arbustif discontinu à continu; a : arbustif continu; A+ : arborescent discontinu à continu et A : arborescent continu

Les valeurs de 0,01 signifient la présence dans le milieu, mais l'absence dans les parcelles échantillonnées.

	Kangiqsujuaq		**Kangiqsualujjuaq**				
	O	a	O	a+	a	A+	A
Strate arborescente							
Pinaceae							
Larix laricina			0 - 0,05	0,01	0 - 0,55	0,01	0 - 1
Picea mariana				0,01		0,01	0 - 0,55
Strate arbustive érigée							
Betulaceae							
Betula glandulosa		0 - 87	0 - 3	62,5 - 87	62,5 - 87	0,05 - 41,5	0 - 62,5
Salicaceae							
Salix glauca	0 - 15	0 - 87	0,01	0 - 15	0,01	0 - 3	
Salix planifolia					0 - 15	0 - 15	0,01
Strate arbustive prostrée							
Ericaceae							
Empetrum nigrum	0 - 87	0 - 62,5	7,5 - 87	7,5 - 87	0 - 87	7,5 - 87	15 - 87
Vaccinium uliginosum	0 - 87	0 - 87	0 - 41,5	0 - 41,5	0 - 87	0 - 15	0 - 26,5
Vaccinium vitis-idaea	0 - 87	0 - 62,5	0 - 26,5	0 - 3	0 - 3	0 - 15	0 - 7,5

Tableau 2.2

Caractéristiques environnementales (moyennes ± écart-type, étendus) des types de couverts à Kangiqsujuaq et Kangiqsualujjuaq (Nunavik), où O : ouvert; a+ : arbustif discontinu à continu; a : arbustif continu; A+ : arborescent discontinu à continu et A : arborescent continu

Abréviations : N : azote; P: phosphore; CO : matière organique; TE : teneur en eau; Limon_gr : limon grossier; Limon_f : limon fin.

	Kangiqsujuaq		**Kangiqsualujjuaq**				
	O	a	O	a+	a	A+	A
Pente (%)	17,4 ± 5,7	17,6 ± 5,7	14,5 ± 6,5	12,7 ± 6,0	22,3 ± 10,6	5,5 ± 3,3	4,8 ± 3,8
Sols :							
pH	4,47 - 5,17	4,52 - 4,78	3,77 - 4,31	3,77 - 4,13	3,91 - 4,46	3,96 - 5,36	3,88 - 4,35
N (%)	0,43 - 0,86	0,01 - 0,3	0,12 - 0,33	0,06 - 0,47	0,05 - 1,10	0,03 - 0,24	0,34 - 0,96
P (ppm)	12,4 - 46,8	12,9 - 33,5	4,97 - 25,55	8,64 - 18,81	8,12 - 17,15	15,5 - 136,1	18,6 - 32,3
CO (%)	7,69 - 15,55	2,06 - 5,60	2,68 - 11	1,59 - 13,92	0,93 - 31,3	0,59 - 6,49	9,74 - 25,89
TE (%)	67 – 93	16 - 63	41 - 77	20 - 63	16 - 100	21 - 46	53 - 100
Texture (%) :							
Sable	76,3 ± 1,5	68,7 ± 20,6	73 ± 4,6	69 ± 1	68,7 ± 7,5	54 ± 32	71,5 ± 7,8
Limon_gr	6 ± 1,7	11 ± 3,5	10,3 ± 2,5	9,7 ± 1,2	9,7 ± 2,1	10,7 ± 4,9	7 ± 4,2
Limon_f	12 ± 1,7	11,3 ± 8,5	11,3 ± 1,5	12,7 ± 1,2	13,3 ± 4,5	17,7 ± 12,2	12 ± 1,4
Argile	5,7 ± 1,5	9 ± 8,7	5,3 ± 0,6	8,7 ±2,1	8,3 ± 4	17,7 ± 16,1	9,5 ± 2,1
DJ (> 0°C)	122,3 ± 5,8	108,3 ± 1,9	121,8 ± 2,4	97,7 ± 7	98,1 ± 20	95,2 ± 34	112 ± 16,1
Min/Max*	(6,1/18,6)	(5,9/17,9)	(6/20,5)	(5,5/12,5)	(4/15,5)	(3,2/16,3)	(4,2/17,1)
Radiation	0,16 ± 0,01	0,04 ± 0,01	0,90 ± 0,02	0,28 ± 0,09	0,43 ± 0,2	0,20 ± 0,19	0,32 ± 0,13
Max**	(0,005)	(0,004)	(0,05)	(0,03)	(0,04)	(0,02)	(0,02)

* DJ (Degrés-jours sans gel (> 0°C)) moyen ± écart-type, et (MIN-MAX (C°)) pour la période du 4 au 16 août 2009.

** Radiation solaire (mol/m^2/s) moyenne quotidienne ±écart-type et (MAX) pour la période du 3 au 18 août 2009.

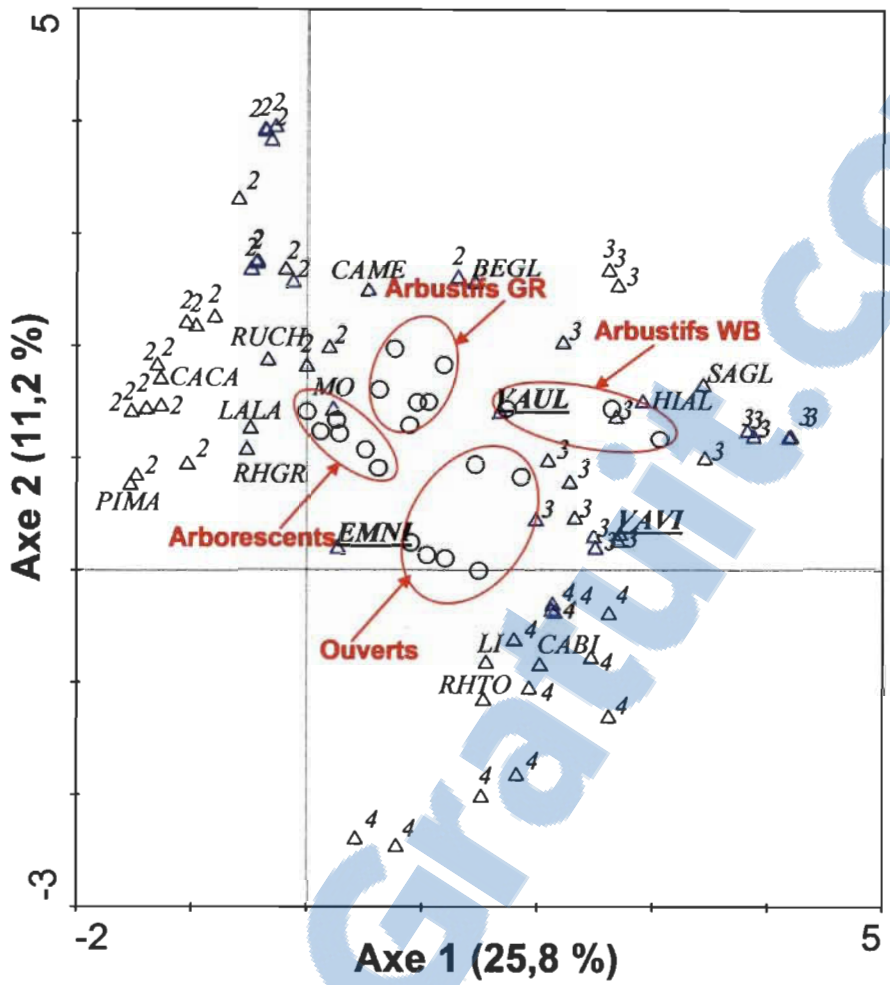


Figure 2.1 : Analyse de correspondance (DCA) des fréquences moyennes des espèces (triangle) retrouvées à travers les sites échantillonnés par type de couvert (cercle) (3 sites/couvert) à Kangiqsujuaq (WB) et Kangiqsualujjuaq (GR), Nunavik.

Les milieux arbustifs (a et a+) et arborescents (A et A+) sont regroupés en rouge. Seules les espèces ayant une fréquence de plus de 43 % sont identifiées: **EMNI** : *Empetrum nigrum*; **VAUL** : *Vaccinium uliginosum*; **VAVI** : *Vaccinium vitis-idaea*; BEGL : *Betula glandulosa*; SAGL : *Salix glauca*; RHTO : *Rhododendron tomentosum*; LALA : *Larix laricina*; RHGR : *Rhododendron groenlandicum*; CACA : *Calamagrostis canadensis*; CABI : *Carex bigelowii*; HIAL : *Hierochloe alpina*; CAME : *Carex membranacea*; PIMA : *Picea mariana*; RUCH : *Rubus chamaemorus*; LI : lichen; MO : mousse. Le chiffre 2 identifie des espèces plutôt retrouvées en milieu arbustif et arborescent à GR; le 3, des espèces retrouvées à WB en milieu ouvert et arbustif et le 4, des espèces plus fréquentes en milieu ouvert (Annexe A).

Rapport-Gratuit.com

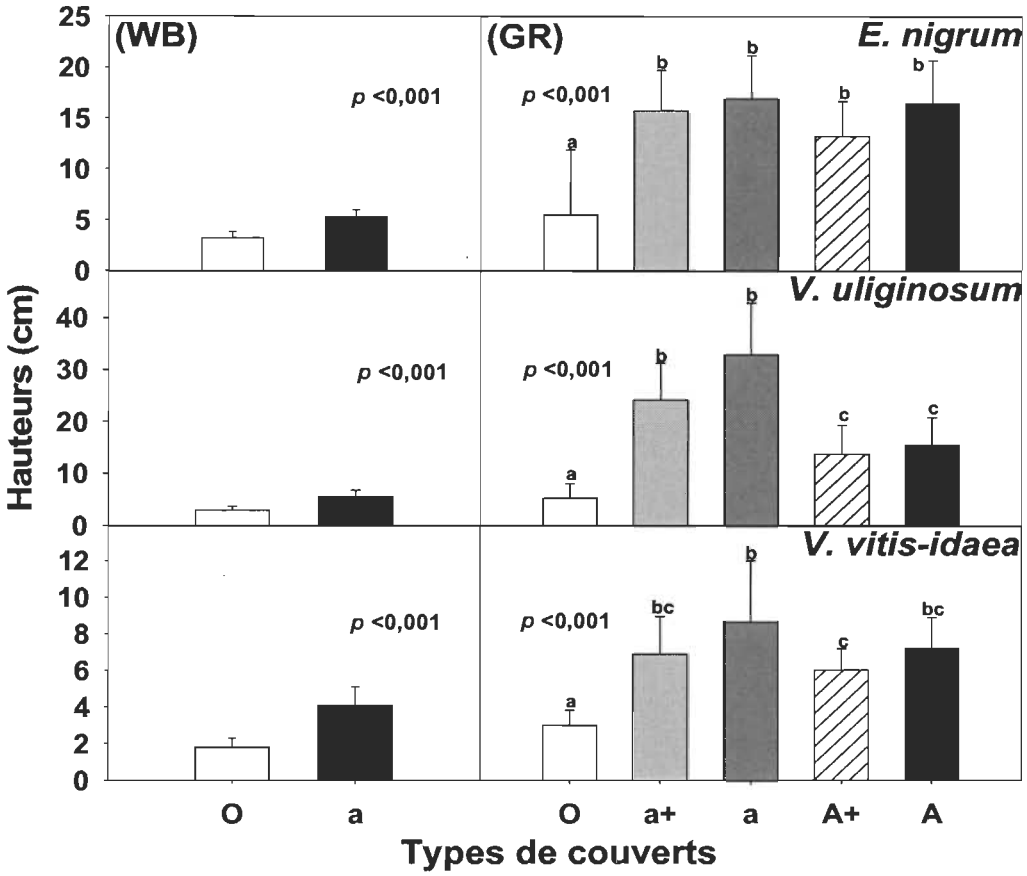


Figure 2.2 : Hauteur structurale (cm) (moyenne ± écart-type) d'*Empetrum nigrum*, *Vaccinium uliginosum* et *Vaccinium vitis-idaea* par type de couvert à Kangiqsujuaq (WB) et Kangiqsualujjuaq (GR) (Nunavik), où O : ouvert; a+ : arbustif discontinu à continu; a : arbustif continu; A+ : arborescent discontinu à continu et A : arborescent continu.
Les valeurs de *p* significatives issues des analyses sont inscrites et les lettres minuscules qui lorsqu'elles sont différentes, correspondent aux différences significatives observées.

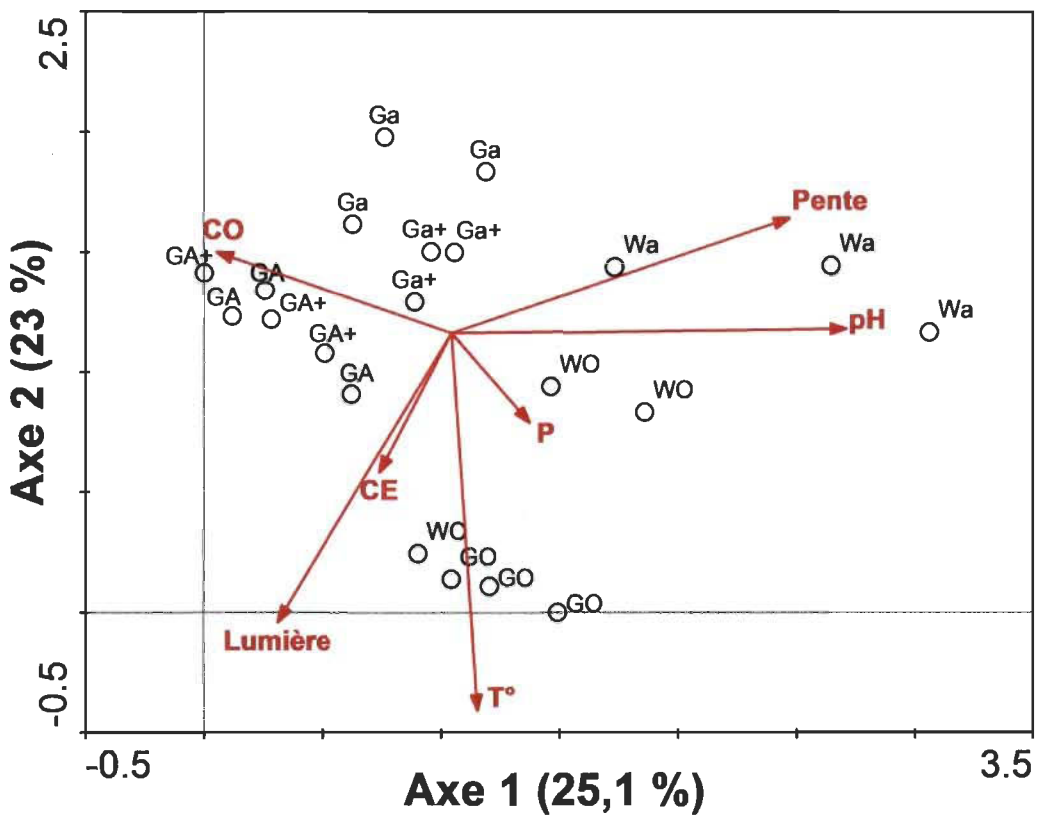


Figure 2.3 : Analyse de correspondance (DCA) de la répartition des milieux à Kangiqsujuaq (W) et Kangiqsualujjuaq (G) (Nunavik), où O : ouvert; a+ : arbustif discontinu à continu; a : arbustif continu; A+ : arborescent discontinu à continu et A : arborescent continu, selon les caractéristiques environnementales les plus influentes (longueur et direction des flèches). Abréviations : CE : contenu moyen en eau des sols (%); Lumière : radiation solaire moyenne/jour (mol/m^2/s); CO : quantité moyenne de matière organique (%); Pente moyenne (%); pH : moyen des sols; P : quantité moyenne de phosphore contenu dans les sols (ppm); T°: moyenne du nombre de degrés-jours sans gel des milieux (C°).

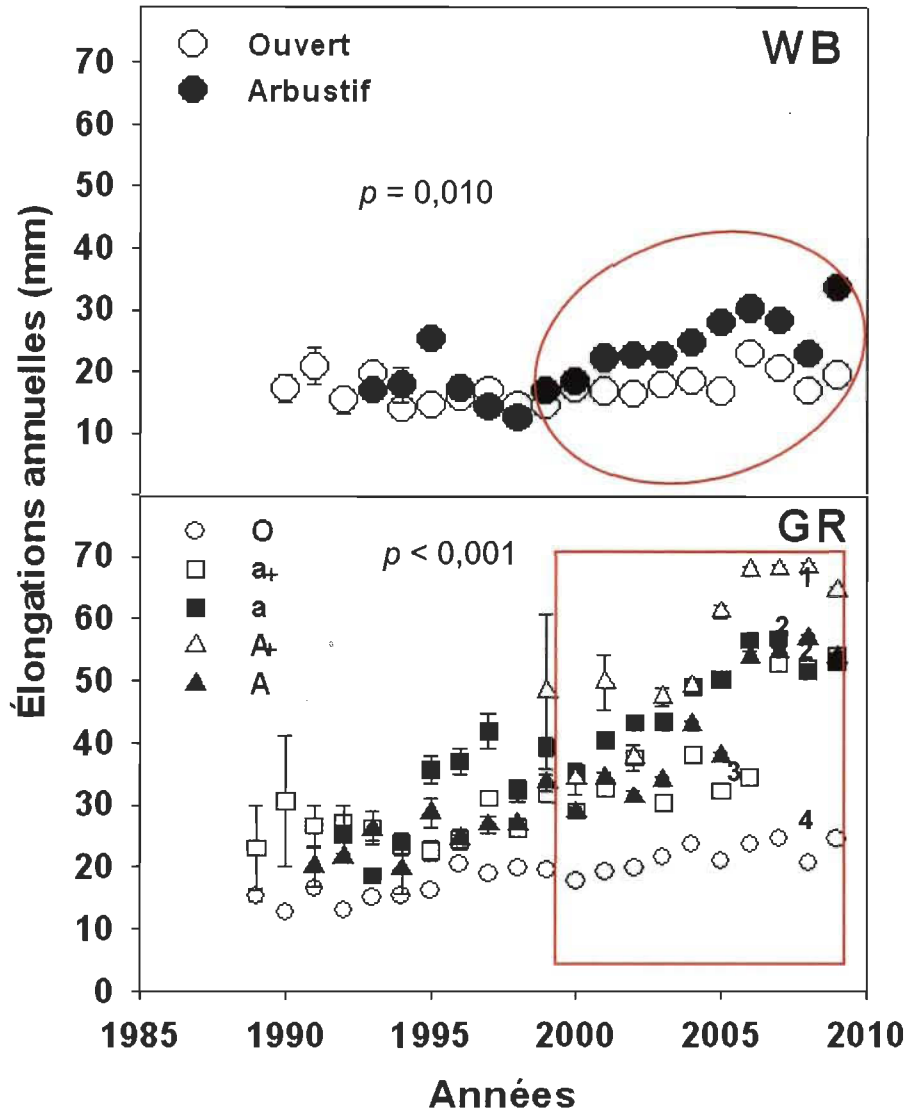


Figure 2.4 : Mesures d'élongations annuelles (mm) (moyenne ± écart-type) d'*Empetrum nigrum* en fonction des années, selon les différents types de couvert pour Kangiqsujuaq (WB) et Kangiqsualujjuaq (GR) (Nunavik), où O : ouvert; a+: arbustif discontinu à continu; a : arbustif continu; A+ : arborescent discontinu à continu et A : arborescent continu.
Les analyses statistiques ont été réalisées sur les dix dernières années (valeur de *p*), où les chiffres en exposant associés aux types de couvert à GR illustrent les différences significatives.

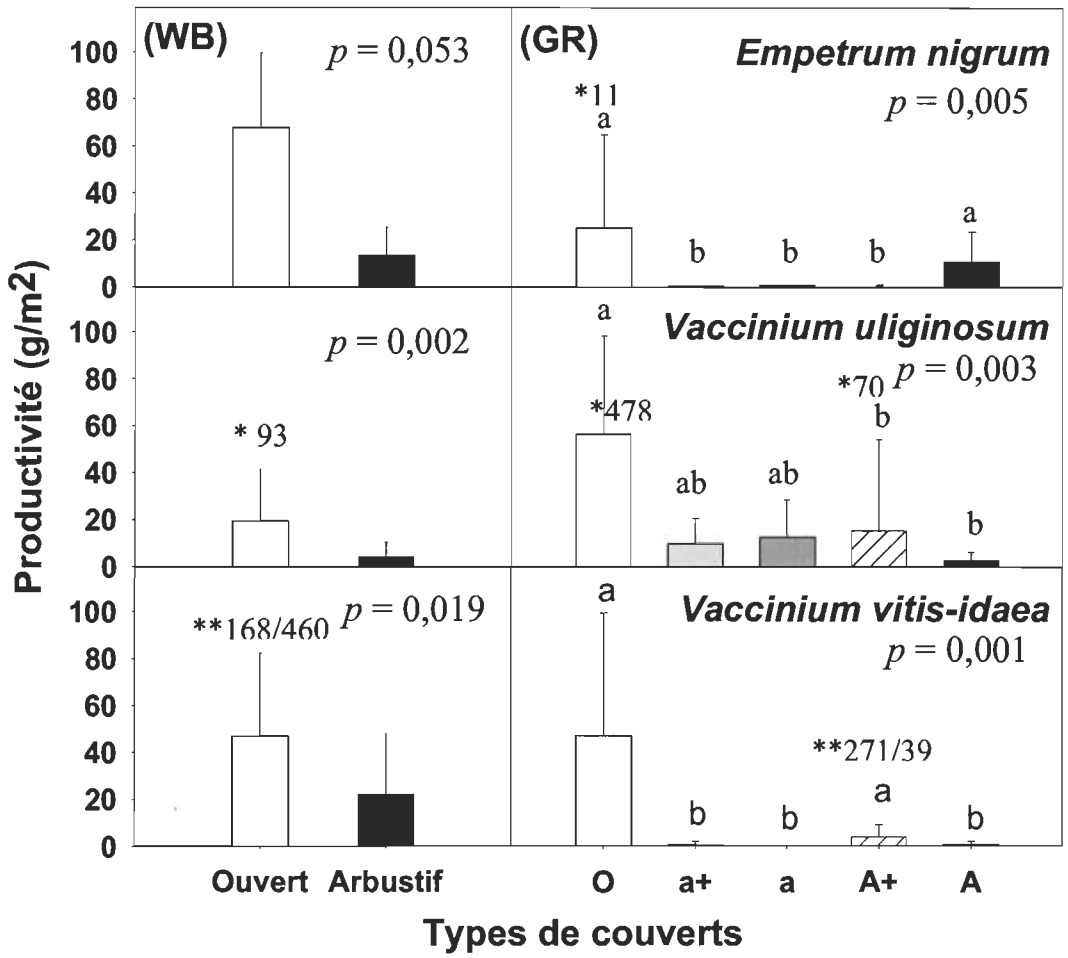


Figure 2.5 : Productivité (g/m²) (moyenne ± écart-type) corrigée par le recouvrement spécifique des fruits d'*Empetrum nigrum*, *Vaccinium uliginosum* et *Vaccinium vitis-idaea* en 2009 par type de couvert à Kangiqsujuaq (WB) et Kangiqsualujjuaq (GR) (Nunavik), où O : ouvert; a+ : arbustif discontinu à continu; a : arbustif continu; A+ : arborescent discontinu à continu et A : arborescent continu.
Les valeurs de *p* issues des analyses sont inscrites et les lettres en minuscule, lorsque différentes, correspondent aux différences significatives observées. Les valeurs extrêmes exclues des analyses sont notées d'une étoile (*).

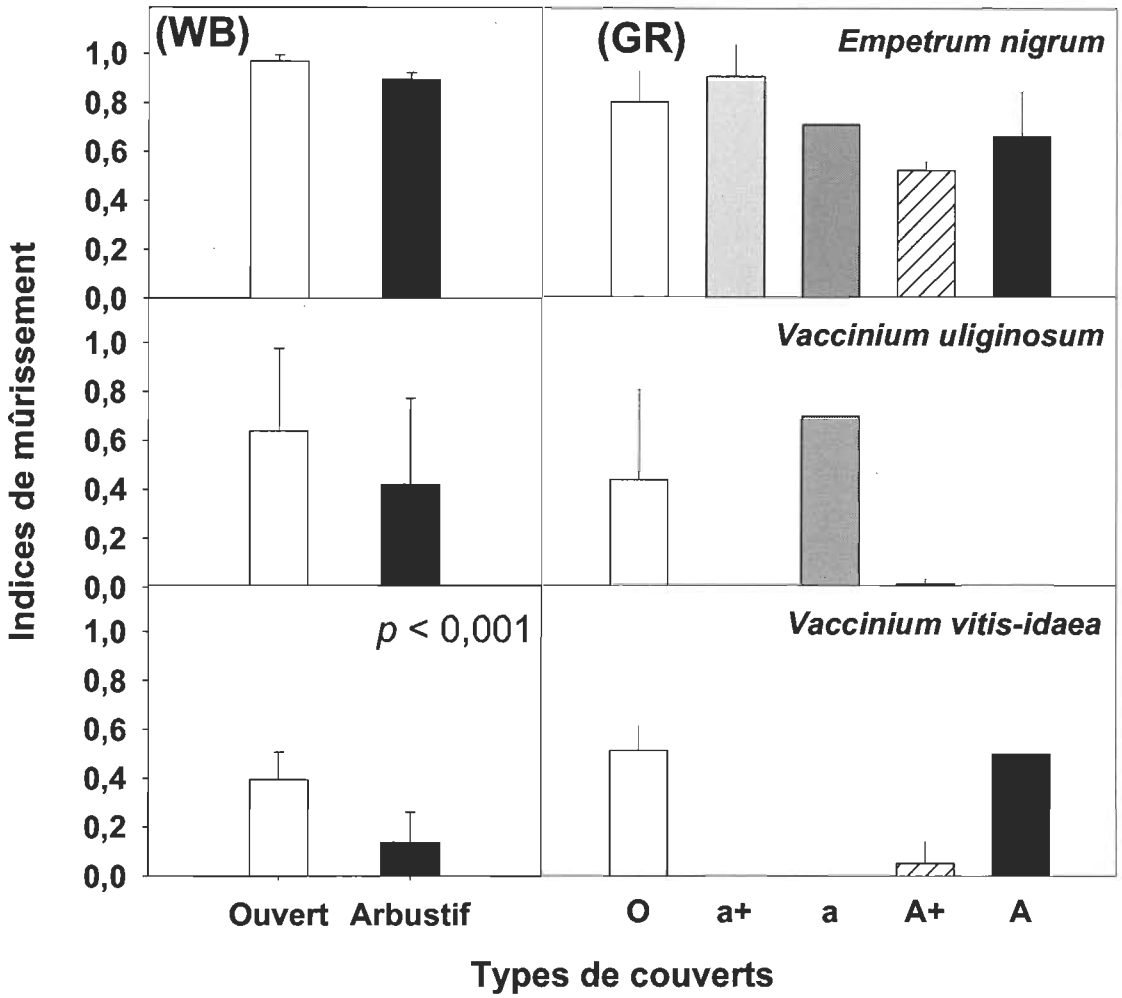


Figure 2.6 : Indice de mûrissement des fruits (0 à 1) (moyenne ± écart-type) d'*Empetrum nigrum*, *Vaccinium uliginosum* et *Vaccinium vitis-idaea* en 2009 par type de couvert à Kangiqsujuaq (WB) et Kangiqsualujjuaq (GR) (Nunavik), où O : ouvert; a+ : arbustif discontinu à continu; a : arbustif continu; A+ : arborescent discontinu à continu et A : arborescent continu. Les différences significatives (valeurs de *p*) y sont inscrites.

CHAPITRE III

IMPACT D'UN RÉCHAUFFEMENT EXPÉRIMENTAL SUR LA PRODUCTIVITÉ ET LA QUALITÉ NUTRITIVE DES FRUITS D'*EMPETRUM NIGRUM* L., *VACCINIUM ULIGINOSUM* L. ET *VACCINIUM VITIS-IDAEA* L., À KANGIQSUJUAQ ET KANGIQSUALUJJUAQ (NUNAVIK)

Charlène Lavallée, Alain Cuerrier et Esther Lévesque

En préparation pour publication dans *Journal of Botany*

3.1 Résumé

Les changements climatiques sont susceptibles d'entraîner de nombreux bouleversements au niveau de la reproduction des plantes de milieux nordiques. Par exemple, la production de fruit ainsi que leur qualité nutritive peuvent être affectées par les facteurs climatiques (Krebs *et al*, 2009; Hanson *et al*, 2006). Nous avons déterminé l'impact d'une augmentation de température sur la quantité de fruits et leur qualité nutritive (c.-à-d., polyphénols totaux et pouvoir antioxydant), produits par *Empetrum nigrum* L., *Vaccinium uliginosum* L. et *Vaccinium vitis-idaea* L. avec des serres ouvertes (ci-après OTC; open-top chambers) installées à Kangiqsujuaq et Kangiqsualujjuaq, deux villages du Nunavik (Québec) en 2008 et 2009. Les fruits produits en milieu réchauffé et dans les parcelles témoins ont été dénombrés (g/m^2) et analysés en laboratoire avec les méthodes de Folin-Ciocalteu et ABTS (2,2'-azino-bis(3-ethylbenzthiazoline-6-sulfonic acid). Suite aux résultats obtenus, nous observons une forte variation annuelle (2008 et 2009) de productivité de fruits de *V. vitis-idaea* et ce, dans les deux villages (p <0,01 et p = 0,006). Après deux années de réchauffement, il n'y a pas de différences significatives à l'effet que les plantes produisent plus de fruits sous les serres. Cependant, à Kangiqsujuaq après deux ans d'expérimentation les trois espèces ont tendance, sans toutefois être significatif, à développer plus de fruits en condition

réchauffée. De plus, le réchauffement a un impact sur la quantité de polyphénols totaux et le pouvoir antioxydant. Une forte variation annuelle de polyphénols et capacité antioxydante est observée pour *E. nigrum* à Kangiqsualujjuaq ($p = 0{,}002$). Finalement, il semble que *V. uliginosum* soit l'espèce la moins riche en antioxydant, ayant une plus faible capacité antioxydante, et ce, pour les deux sites à l'étude.

3.2 Introduction

Les impacts du réchauffement climatique sont de mieux en mieux documentés pour les écosystèmes nordiques (Wolf *et al*, 2008; Walker *et al*, 2006; ACIA, 2005; Hinzman *et al*, 2005; Parsons *et al*, 1994; Callaghan & Jonasson, 1995). L'augmentation de la saison de croissance (Bégin 2006; Stone *et al*, 2002) et l'augmentation du couvert ligneux érigé font partie des résultats perceptibles qu'engendrent les changements climatiques auxquels nous assistons (Tremblay *et al*, 2012; Tape *et al*, 2006). Ces changements climatiques, imputables aux activités anthropiques (Ellis & Rochefort, 2006; Syndonia *et al,* 2002), ont d'importantes répercussions sur les milieux des hautes latitudes et leurs organismes qui semblent être plus sensibles aux réchauffements climatiques (Aerts *et al*, 2006). Les plantes arctiques et sub-arctiques vivent dans l'un des environnements les plus extrêmes, où leur croissance et leur développement sont contraints par une courte saison de croissance, de basses températures et une disponibilité en nutriments limitée (Bret-Harte *et al*, 2002; Gerdol *et al*, 2000; Shevtsova *et al*, 1997).

Arft *et al* (1999) ont réalisé une méta-analyse portant sur la réponse à court terme des plantes de toundra au réchauffement expérimental, effectué grâce à des serres ouvertes (OTC). Les plantes du Bas-Arctique et alpines répondaient fortement au réchauffement par l'augmentation de croissance, tandis que la reproduction sexuée était en hausse chez les plantes du Haut-Arctique. À court terme pour la majorité des espèces de toundra, le réchauffement induisait des changements au niveau de la croissance et de la phénologie, tandis que la reproduction sexuée était influencée suite à un réchauffement à long terme (Arft *et al*, 1999).

En plus de la variation spatiale, la réponse à un réchauffement expérimental peut varier en fonction des formes de croissance et des modes d'allocation des ressources (Molau *et al,* 2005). Après deux saisons de croissance en milieu subarctique en Suède, les arbustes sempervirents semblaient plus susceptibles au réchauffement que les espèces caduques (Parsons *et al*, 1994). De même, en Alaska les arbustes décidus répondaient de façon plus progressive au réchauffement, comparativement aux espèces à feuilles persistantes (Chapin & Shaver, 1985; Chapin & Shaver, 1996; Chapin *et al*, 1995). Suzuki & Kudo (2000) expliquent ceci par le fait que le réchauffement expérimental allonge la saison de croissance et que ce sont les espèces sempervirentes qui en bénéficient le plus. Par exemple, *Vaccinium uliginosum* L., une espèce à feuilles caduques, répondait au réchauffement par une production de fleurs élevées, comparativement à une meilleure croissance végétative chez les espèces sempervirentes (p. ex., *Empetrum nigrum* L.; Suzuki & Kudo, 2000). Les espèces à feuilles persistantes auraient donc tendance à être plus agressives au niveau de la croissance végétative, adoptant une stratégie de compétition. Toutefois, certaines études démontrent que les espèces des deux formes de croissance ont des réponses similaires dans les parcelles réchauffées (Graglia *et al*, 1997), démontrant la complexité des interactions des différents facteurs qui peuvent intervenir.

La température est un facteur déterminant quant à la croissance et la reproduction des arbustes fruitiers, tels que *Empetrum nigrum* L., *Vaccinium uliginosum* L. et *Vaccinium vitis-idaea* L (Walther, 2002). Ces fruits représentent une source locale importante de nourriture pour les communautés nordiques, tant pour leur accessibilité que pour leurs qualités nutritives (Murray & Boxall, 2005; Goetz, 2006). Riches en vitamines et en antioxydants, la consommation de ces petits fruits a plusieurs effets bénéfiques pour la santé, tels que leurs pouvoirs antimicrobien et anti-inflammatoire et le traitement de certains symptômes associés au diabète (Kahkönen *et al*, 2001; Szajdek & Borowska, 2008; Battino *et al*, 2009; Usher, 1976; Murray & Boxall, 2005; Goetz, 2006; Fraser *et al*, 2007; Black *et al*, 2008; Groupe de recherche en écologie des tourbières, 2007). Les changements climatiques et les conséquences qu'ils entraînent sur les écosystèmes nordiques (p. ex., densification arbustive; Myers-Smith *et al*, 2011;

Tape *et al*, 2006) risquent de modifier la croissance, la production de fruits et la composition chimique des plantes (p. ex., métabolites secondaires). Par exemple, le processus photosynthétique est optimal sous certaines conditions de température, favorisant l'assimilation du CO_2. Lors des processus métaboliques, la réaction produit des radicaux libres, molécule instable et pouvant causer des dommages cellulaires. Les plantes sont cependant dotées de mécanismes de protection. Des variations au niveau des conditions environnementales peuvent perturber le métabolisme photosynthétique et conduire à un stress oxydant, c'est-à-dire une formation élevée de radicaux libres. Cependant en réaction à ceci, les plantes utilisent un mécanisme de défense naturel, en synthétisant des molécules antioxydantes (p. ex., composés phénoliques) (Edreva, 2005; Boutour, 2011). Ainsi, la concentration des métabolites secondaires présents dans les plantes, tels que les composés phénoliques, est déterminée par différents facteurs telle que l'espèce (p. ex., variation intra et interspécifique), la maturation et les conditions environnementales, tel que mentionné précédemment (p. ex., température, lumière disponible; Szajdek & Borowska, 2008; Riga *et al*, 2008; Hakala *et al*, 2003; Kondo *et al*, 2003; Saure, 1990). Par conséquent, le réchauffement climatique est susceptible d'altérer la qualité nutritive des plantes, une source importante de nourriture pour de nombreuses espèces animales (Hanson *et al*, 2006).

Étant donné l'importance culturelle des petits fruits et l'intérêt grandissant pour leurs effets bénéfiques sur la santé (Szajdek & Borowska, 2008; Hosseinian & Beta, 2007), nous avons voulu déterminer l'impact d'une augmentation de température sur la quantité de fruits produits (c.-à-d., *E. nigrum*, *V. uliginosum* et *V. vitis-idaea*) et sur leur qualité nutritive (c.-à-d., polyphénols totaux et pouvoir antioxydant). En second lieu, nous avons évalué la variation interannuelle (2008 et 2009) et spatiale (c.-à-d., entre deux communautés du Nunavik, Kangiqsujuaq et Kangiqsualujjuaq), en contexte de réchauffement climatique. Pour ce faire, des parcelles de réchauffement expérimental passif (OTC) et des parcelles témoins ont été installées. Les fruits ont été récoltés, dénombrés et analysés en laboratoire. Le dosage des polyphénols totaux a été réalisé à l'aide de la méthode de Folin-Ciocalteu et la capacité antioxydante suivant la méthode ABTS (2,2'-azino-bis (3-ethylbenzthiazoline-6-sulfonic acid).

3.3 Méthodologie

3.3.1 Aire d'étude

La toundra arbustive est la végétation typique d'une grande partie du Sub-Arctique et du Bas-Arctique de l'Amérique du Nord. Elle est caractérisée par l'abondance d'arbustes de faible taille des genres *Alnus*, *Betula* et *Salix*, en association avec des arbustes nains des genres *Empetrum*, *Vaccinium* et *Cassiope* (Parsons *et al*, 1994). Les sites sélectionnés sont situés au Nunavik, la région la plus nordique du Québec (Figure 3.1a), et correspondent à deux domaines bioclimatiques distincts :

1. Kangiqsualujjuaq (Rivière George; 58°42.6 N - 65°59.4 O; Figure 3.1b) : Cette communauté est située au sud-est de la Baie d'Ungava, près de l'embouchure de la rivière George, dans la zone du Bas-Arctique correspondant au domaine bioclimatique de la toundra arctique arbustive québécoise (couvrant 197 800 km^2), à la limite extrême nord de la forêt boréale (Ressources naturelles et Faune Québec 2003). La température moyenne annuelle enregistrée à la station météorologique la plus près (Kuujjuaq) est -6 °C, la température moyenne du mois de juillet est 11,5 °C et les précipitations annuelles moyennes sont d'environ 500 mm (données 1971 à 2000; Environnement Canada, 2004). Plus précisément, Blondeau & Cayouette (2002) mentionnent que pour Kangiqsualujjuaq les précipitations annuelles moyennes sont inférieures à 300 mm, dont plus de la moitié sont sous forme de neige.

2. Kangiqsujuaq (Wakeham Bay; 61°35.4 N - 71°55.8 O; Figure 3.1b) : Cette communauté est située dans le détroit d'Hudson près de la pointe nord-ouest de la péninsule d'Ungava, sur la rive sud de la Baie Wakeham, dans la zone du Moyen-Arctique correspondant au domaine bioclimatique de la toundra arctique herbacée (couvrant 38 200 km^2; Ressources naturelles et Faune Québec, 2003). Le climat de cette région est plus rigoureux. La température annuelle moyenne est d'environ -7 °C, la température moyenne de juillet est 7,5 °C et les précipitations moyennes sont inférieures à 300 mm (données de

1971 à 2000; Environnement Canada, 2004). Les arbustes érigés y sont rares, de plus petite taille et peu diversifiés (Blondeau & Cayouette, 2002), comparativement à Kangiqsualujjuaq.

3.3.2 Installation des parcelles

Pour Kangiqsualujjuaq (ci-après GR) et Kangiqsujuaq (ci-après WB), les sites sont caractérisés par la présence d'arbustes prostrés tel que *Vaccinium vitis-idaea* L., *Vaccinium uliginosum* L. et *Empetrum nigrum* L. Les deux sites sélectionnés étaient exposés au sud. À GR (58°42.1 N - 65°56.9 O), les parcelles ont été installées près du village, à droite de la route qui mène à la station de pompage. Le drainage y est généralement bon, avec une pente moyenne de 6 % et un substrat plutôt rocheux. Le second site plus au nord, à WB (61°37.5 N - 71°56.4 O), a été installé dans la vallée qui est située au nord de la communauté, de l'autre côté du lac Tasialuk et de la montagne Qarqaaluk bordant le village. Cette vallée est traversée par le ruisseau d'Aviguti qui se jette dans la Baie de Wakeham. Le site présentait un très bon drainage (c.-à-d., pente moyenne de 14 %) et le substrat était composé d'un mélange de cailloux, galets et de blocs erratiques.

Pour chacun des sites, 12 parcelles réchauffées à l'aide de serres ouvertes (ci-après OTC) et 12 parcelles témoins ont été installées, en s'assurant que les différentes parcelles étaient distantes d'au moins un mètre. Le patron expérimental était divisé en 4 blocs, où un bloc était constitué de 3 OTC et 3 témoins (c.-à-d., totalisant 12 OTC et 12 témoins). Les OTC constituent une méthode de réchauffement passif utilisée depuis les années 1990 à travers la toundra (c.-à-d., en milieu arctique, alpin et en antarctique) par le programme ITEX (International Tundra Experiment; Henry & Molau, 1997; Wookey, 2008; Elmendorf *et al*, 2011). Ces serres hexagonales, ayant 120cm de diamètre et 40cm de hauteur, permettent d'y installer un quadrat de 70 cm × 70 cm. Les OTC augmentent la température moyenne journalière de 1,2 à 1,8 °C (Marion *et al*, 1997). En comparaison, les parcelles témoins correspondaient à des quadrats de même taille disposés aléatoirement dans le milieu.

3.3.3 Récolte des fruits et mesures de productivité

Le recouvrement spécifique (%) a d'abord été évalué suivant l'échelle de Domin-Krajina (Lee & Hanus, 1999). Tous les fruits des parcelles témoins et réchauffées ont été récoltés en fin de saison estivale, indépendamment de leur maturité. Ils ont été dénombrés et pesés par espèces, en 2008 et 2009. Les mesures de productivité ont été ramenées en g (poids frais)/m^2 et corrigées en fonction du recouvrement spécifique. Suite à la récolte, les fruits ont été congelés pour le transport et la réalisation des analyses en laboratoire, afin de déterminer la quantité de polyphénols totaux et leur capacité antioxydante.

3.3.4 Analyses en laboratoire

Comme certains fruits n'étaient pas mûrs au moment de la récolte et que cela influence l'activité antioxydante (Castrejon *et al*, 2008), nous avons sélectionné uniquement les fruits mûrs prêts à la consommation pour les analyses. Trois réplicats ont été faits pour chacune des analyses. Par contre, faute de matériel, nous avons dû faire les analyses uniquement sur *E. nigrum* en 2008. De même en 2009 à GR, trop peu de fruits de *V. vitis-idaea* ont été produits dans les OTC pour réaliser les analyses chimiques.

Nous avons tout d'abord extrait les composés phénoliques des fruits à l'aide de méthanol. Cette technique permet d'extraire les métabolites secondaires des structures vacuolaires par rupture et diffusion, pour ensuite permettre de faire le dosage des composés phénoliques (Amiot *et al,* 1989). Les fruits ont été broyés à l'azote liquide afin d'obtenir une poudre fine et homogène. Nous avons utilisé 0,2 g de cette poudre à laquelle 3 ml de méthanol pur était ajouté et ensuite mis au bain-marie durant 20 minutes à 65 °C. L'extrait a ensuite été filtré et l'opération répétée une seconde fois, en ramassant et ajoutant le résidu de la filtration à chaque extraction. Pour la troisième extraction, nous avons utilisé 3 ml de méthanol 50 % et avons laissé reposer 30 minutes à température ambiante.

Après l'extraction, nous avons quantifié les polyphénols totaux des différents extraits suivant la méthode de Folin-Ciocalteu (Wolfe *et al*, 2003). Le réactif de Folin-Ciocalteu oxyde les groupements OH des polyphénols. Les produits de la réduction sont de couleur bleue et ont un maximum d'absorption à 760 nm, où l'intensité est proportionnelle au taux de polyphénols (Recueil international des méthodes d'analyses, 2010; ISITEC-LAB, 2009). Pour quantifier les polyphénols, 0,5 ml d'extrait a été ajouté à 2,5 ml d'eau distillée et 0,5 ml de Folin-Ciocalteu. Après 5 minutes, nous avons ajouté 1,5 ml de Na_2CO_3, agité et laissé reposer 120 minutes. L'extrait a été remplacé par du méthanol pur pour obtenir le blanc (c.-à-d., le témoin). Les solutions ont ensuite été centrifugées (c.-à-d., Beckman J2-MC) 6 minutes à 7000 rotations par minute. Par la suite, les lectures au spectrophotomètre ont été réalisées à 760 nm à partir de 2 ml des solutions précédemment centrifugées. Dans le cas où les valeurs d'absorbance étaient plus élevées que 1.7, une dilution avec de l'eau distillée était réalisée et notée, afin de la considérer dans les calculs finaux. Une courbe de calibration obtenue avec différentes concentrations de solutions d'acide tannique a permis de quantifier la concentration des composés phénoliques des extraits (c.-à-d., mg d'acide tannique/g de matière fraîche).

Pour déterminer la capacité antioxydante des fruits, soit leur potentiel d'oxydoréduction, nous avons employé la méthode de l'ABTS (2,2'-azino-bis(3-ethylbenzthiazoline-6-sulfonic acid)). Le radical utilisé ($ABTS^+$) a un spectre d'absorbance caractéristique (p. ex., 415, 645, 734 et 815 nm). L'$ABTS^+$ en contact avec un donneur d'électron conduit à la décoloration de la solution (Marc *et al*, 2004). L'activité antioxydante totale d'un extrait est donc déduite de la capacité à réduire chimiquement le radical $ABTS^+$ et est comparée à un antioxydant de référence, le Trolox, un dérivé de la vitamine E. Des courbes de calibration ont permis de vérifier la corrélation entre les solutions de différentes concentrations de Trolox et la diminution d'absorbance, où les résultats étaient exprimés en TEAC (Trolox equivalent antioxidant capacity) (Villano *et al*, 2004; Dubeau *et al*, 2009).

Comme l'$ABTS^+$ est sensible à la lumière, les opérations se sont déroulées à l'obscurité. Nous avons dilué la solution préalablement préparée la vielle (c.-à-d.,

10 ml d'eau distillée, 0,0384 g d'$ABTS^+$ et 0,0066 g de persulfate de potassium) avec de l'éthanol, afin d'obtenir une absorbance de 0,700 ± 0,01 à 734 nm. L'éthanol pur (3 ml) servait de blanc. Nous avons ajouté 75 µl d'extrait à 3 ml de la solution diluée d'$ABTS^+$ et bien agité. Après 6 minutes, les lectures spectrales étaient effectuées. Par contre, si les lectures se rapprochaient de zéro, nous devions faire une dilution et noter les changements de concentration afin de corriger les calculs.

3.3.5 Analyses statistiques

Afin de comparer la productivité des différentes espèces entre les traitements (c.-à-d., OTC et témoins) ainsi que la variation annuelle, étant donné que les blocs issus du patron expérimental n'avaient pas d'effet sur la productivité (ANOVA, $F = 2.498$, $p = 0{,}061$), nous avons utilisé des tests de comparaison (c.-à-d., test de *t*). Les échantillons étant de petits tailles et indépendants, ce type de test était approprié et suffisamment robuste pour détecter les différences significatives. Lorsque les principaux paramètres n'étaient pas respectés (c.-à-d., homogénéité des variances et normalité des distributions; Scherrer, 1984), nous avons eu recourt à un test non paramétrique (c.-à-d., Kruskall-Wallis).

Lors des analyses d'antioxydants en laboratoire, trois réplicats étaient réalisés pour chaque analyse. La moyenne de ceux-ci a été utilisée pour les calculs afin d'obtenir les résultats de concentration de composés phénoliques totaux (mg acide tannique/g matière fraîche) contenus dans les extraits de fruits et le pouvoir antioxydant (µmol E trolox/g matière fraîche). Les résultats obtenus ont été comparés à l'aide du test de *t*. Dans le cas où les échantillons n'étaient pas homogènes ou distribués normalement même après transformation, nous avons employé le test non paramétrique de Kruskall-Wallis. L'analyse de variance (c.-à-d., ANOVA) et un test de Tukey nous ont permis de comparer les données de qualité nutritive d'*E. nigrum* de 2008 et 2009 selon les différents traitements. La corrélation entre la concentration en polyphénols totaux et la capacité antioxydante a aussi été vérifiée. Les analyses statistiques ont été réalisées avec le programme Systat 11.

3.4 Résultats

3.4.1 Productivité de fruits sous condition expérimentale

De façon générale, il existe une grande variabilité de quelques grammes à plus de 300 g/m^2 et des écarts-types élevés dans la quantité de fruits produits pour l'ensemble des espèces, indépendamment des villages, des ans et du type de traitement (Tableau 3.1). Nous observons des différences de plus de 10 fois entre les années, illustrant la grande variabilité interannuelle. Comparativement à WB, il existe de plus fortes variations annuelles à GR. Par contre indépendamment des latitudes, la productivité totale de *Vaccinium vitis-idaea* est significativement différente d'une année à l'autre pour les deux villages ($p < 0{,}001$; $p = 0{,}006$, respectivement; Tableau 3.1). À l'inverse de *V. vitis-idaea*, *Empetrum nigrum* a produit plus de fruits en 2008 à GR ($p = 0{,}001$; Tableau 3.1).

Après un an de traitement, il n'y a pas de tendance claire à l'effet qu'il y a plus de fruits produits en serre (ci-après OTC) à WB. Par contre, après deux années de traitement à WB, il semble qu'une plus grande quantité de fruits sont produits dans les OTC, mais les différences ne sont pas significatives. Plus au sud, à GR, nous obtenons des résultats similaires. C'est-à-dire qu'il y a une forte variabilité et aucune différence significative d'augmentation de productivité en condition réchauffée. Par contre, plus de fruits d'*E. nigrum* ont été produits en 2008 dans les parcelles témoins que dans les OTC ($p = 0{,}038$) (Tableau 3.1).

3.4.2 Qualité nutritive : polyphénols totaux et capacité antioxydante

Les résultats démontrent de fortes corrélations (WB: $r^2 = 0{,}503$; GR : $r^2 = 0{,}868$) entre la quantité de polyphénols et leur pouvoir antioxydant, venant confirmer l'efficacité des méthodes utilisées (Figure 3.2; Georgieva *et al*, 2010). En 2009 à WB, la quantité de polyphénols et la capacité antioxydante des fruits d'*E. nigrum* ne varient pas avec le traitement (Figure 3.2). En ce qui concerne *Vaccinium uliginosum*, la capacité antioxydante est significativement supérieure dans les OTC ($p = 0{,}034$),

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

comparativement à *V. vitis-idaea*, où les fruits provenant des témoins avaient un meilleur pouvoir antioxydant ($p < 0{,}001$). À GR, la quantité de polyphénols totaux contenus dans les fruits d'*E. nigrum* et de *V. uliginosum* issus des OTC est supérieure ($p = 0{,}037$), sans toutefois présenter une meilleure capacité antioxydante (Figure 3.2). En 2008, aucune différence n'a été détectée entre les traitements pour *E. nigrum*. Par contre, l'ensemble des fruits produits en 2008 contiennent plus de polyphénols et ont un pouvoir antioxydant significativement supérieur à ceux récoltés en 2009 à GR ($p = 0{,}002$; Figure 3.2). Finalement, il semble que *V. uliginosum* soit l'espèce la moins riche en antioxydant, ayant une plus faible capacité antioxydante, et ce, pour les deux sites à l'étude.

3.5 Discussion

3.5.1 Productivité de fruits sous condition expérimentale

Tel qu'attendu, nous observons une grande variabilité dans la productivité des petits fruits. Cette grande variabilité est observée par plusieurs personnes de différentes communautés inuites du Nunavik et du Nunavut (Gérin-Lajoie *et al*, 2010). Les plantes réagissent différemment d'une espèce à l'autre face au réchauffement. Par exemple, Kudo & Suzuki (2003) ont démontré différentes intensités de réponses selon les espèces, en milieu alpin. Ils ont observé que l'élongation des tiges d'*E. nigrum* était deux fois plus élevée sous OTC et l'élongation de *V. vitis-idaea* était significativement différente (c.-à-d., OTC > témoins). Cependant, aucune différence significative n'est détectée pour *V. uliginosum*. La réponse à un réchauffement expérimental peut varier en fonction des formes de croissance et des modes d'allocation des ressources (Molau *et al*, 2005).

Après deux saisons de croissance, en milieu subarctique en Suède, les arbustes sempervirents semblaient plus susceptibles à court terme au réchauffement que les espèces caduques (Parsons *et al*, 1994). De même, en Alaska les arbustes à feuilles caduques répondaient de façon plus progressive au réchauffement, en comparaison aux espèces à feuilles persistantes (Chapin & Shaver, 1985; Chapin & Shaver, 1996; Chapin

et al, 1995). Suzuki & Kudo (2000) expliquent ces résultats par le fait que le réchauffement expérimental provoque une augmentation de la saison de croissance et que ce sont les espèces sempervirentes qui en bénéficient le plus. Par exemple, *V. vitis-idaea* peut commencer à faire de la photosynthèse très tôt après la fonte nivale (Karlsson, 1985; Aerts *et al*, 2006). Ceci permet aux espèces sempervirentes d'investir plus rapidement dans la croissance végétative, comparativement aux plantes décidues (p. ex., *V. uliginosum*; Suzuki & Kudo, 2000). En revanche, les plantes à feuilles caduques avaient tendance à développer plus de fleurs sous réchauffement (Kudo & Suzuki, 2003; Graglia *et al*, 1997). Dans le cas présent, les résultats obtenus ne démontrent aucune réponse spécifique similaire pour les deux espèces sempervirentes.

Par ailleurs, la productivité de fruits peut grandement varier selon le type de milieu. Les réponses des plantes sont à l'image de l'hétérogénéité spatiale et environnementale du domaine bioclimatique de la toundra (Elmendorf *et al*, 2011; Aerts *et al*, 2006). Arft *et al* (1999) ont réalisé une méta-analyse concernant la réponse des plantes de toundra au réchauffement expérimental à court terme. Les plantes du Bas-Arctique et alpines répondent fortement au réchauffement par l'augmentation de croissance, tandis que la reproduction sexuée est en hausse chez les plantes du Haut-Arctique. Un investissement dans la croissance végétative est probablement une stratégie de conservation, adoptée par les plantes du Bas-Arctique, dans un milieu où la compétition est forte (p. ex., pour la lumière, les nutriments, l'eau). À l'inverse, l'investissement dans la production de graines des plantes de plus hautes latitudes favorise la possibilité de coloniser de nouveaux milieux. Parallèlement à ceci, à WB en 2009, nous remarquons que les espèces ont tendance à produire plus de fruits sous OTC que dans les parcelles témoins. De même, il semble que dans l'ensemble, la productivité soit meilleure à WB, comparativement à GR. Ces différences ne sont pas significatives, mais ces tendances peuvent être reliées au fait qu'aux plus hautes latitudes, la température est un facteur plus limitant, favorisant l'allocation des ressources pour la production de fruits en milieu réchauffé.

De surcroît, le nombre de fruits produits peut grandement varier annuellement (Krebs *et al*, 2009). En effet, nous constatons une forte variation annuelle dans le cas de

V. vitis-idaea (GR et WB) et de *E. nigrum* (GR), où leur productivité est significativement différente d'une année à l'autre. Krebs *et al* (2009) mentionnent que de nombreux facteurs, telles que les conditions climatiques peuvent être à l'origine de ces variations. Après avoir récolté 12 années consécutives les fruits produits par différentes espèces arbustives prostrées, incluant *E. nigrum* et *V. vitis-idaea*, Krebs *et al* (2009) ont trouvé que les précipitations et la température des années antérieures (c.-à-d., *t*-1 et *t*-2) constituaient les paramètres les plus significatifs, expliquant la variation des récoltes de baies de l'année en cours (*t*). En 2008 à GR, *E. nigrum* a produit plus de fruits en condition normale et cette même espèce a eu une meilleure productivité totale (c.-à-d., OTC et témoins cumulés), comparativement à l'année suivante ($p = 0{,}001$). Mentionnons que l'été 2008 à GR fût particulièrement sec, avec 30 jours consécutifs sans précipitation, provoquant même des feux de toundra (Observations personnelles, 2008). Cette sécheresse a probablement provoqué le jaunissement de nombreux plants que nous avons observé. En effet, en plus du réchauffement expérimental, les faibles précipitations ont pu provoquer un stress hydrique considérable. Ceci peut expliquer la meilleure productivité observée dans les parcelles témoins en 2008. Comme les conditions climatiques (c.-à-d., précipitation et température) des années antérieures influencent grandement la production de fruits de l'année (Krebs *et al*, 2009), il est possible que cette sécheresse (2008) soit responsable de la faible productivité d'*E. nigrum* en 2009. À l'inverse, la production de fruits de *V. vitis-idaea* à GR en 2009 est significativement supérieure à celle de 2008 ($p = 0{,}006$). *Vaccinium vitis-idaea* a peut-être mieux toléré ce stress hydrique, étant adapté pour supporter ce type de conditions (p. ex., taille, morphologie des feuilles coriaces). En effet, cette espèce est fréquente dans les milieux caractérisés par des sols bien drainés et colonise souvent les surfaces rocheuses (Groupe de recherche en écologie des tourbières, 2007).

À court terme, pour la majorité des espèces de toundra, le réchauffement provoque des réponses au niveau du développement phénologique et de la croissance. Des changements dans l'effort de reproduction sexuée s'effectuent plus tardivement (Arft *et al*, 1999). Ceci peut expliquer pourquoi aucune différence significative à la hausse dans les OTC n'est détectée. Par contre, à plus long terme, il est possible que des différences

soient observées. D'autres facteurs limitants, autres que la température (p. ex., disponibilité en nutriments, compétition), peuvent influencer la productivité. Par exemple, Aerts *et al* (2004) ont quantifié l'effet du réchauffement sur la production de fleurs et de fruits de *Rubus chamaemorus* L., en milieu sub-arctique. Les auteurs mentionnent qu'il est possible qu'une augmentation de température influe positivement sur la productivité de *R. chamaemorus*, à la condition que les conditions hydriques restent favorables. Le gel est aussi un facteur inhibiteur du développement des fleurs et des fruits (Ågren, 1988), provoquant une mort avant terme et par conséquent, une baisse de productivité. Néanmoins, les risques de gels sont réduits sous OTC. Par exemple, l'impact du vent y est plus faible et la neige qui s'y accumule, étant retenue de façon passive, isole les plants contre le gel (Marion *et al*, 1997; Aerts *et al*, 2006).

De surcroît pour plusieurs espèces, la pollinisation est un facteur limitant la production de fruits (Pelletier, 2001; Dumas & Maillette, 1987; Inouye, 2008). La disponibilité de pollen, tant par sa qualité (Weis & Hermanutz, 1993) que par sa dispersion (Traveset & Richardson, 2006), peut avoir un impact sur l'initiation des fruits (Jacquemart, 1997). Les OTC, en plus de modifier les conditions nivales, peuvent exclure ou favoriser certains pollinisateurs et herbivores (p. ex., effet de barrière ou l'inverse étant donné les températures plus élevées; Richardson *et al*, 2002; Hollister & Webber, 2000). L'ensemble de ces facteurs précédemment exposés, ainsi que leurs interactions sont complexes et peuvent contribuer à ces fortes variations (Tableau 3.1).

3.5.2 Qualité nutritive : polyphénols totaux et capacité antioxydante

Nous remarquons qu'une bonne relation existe entre la concentration des polyphénols totaux et la capacité antioxydante (Figure 3.2). Cela démontre que les antioxydants présents dans les extraits ont une bonne capacité à capter les radicaux libres et la relation positive suggère que les polyphénols seraient les composés principalement responsables de l'activité antioxydante. Par contre, les corrélations ne sont pas parfaites. Georgieva *et al* (2010) ont aussi testé cette relation (c.-à-d., vin rouge). Le phénomène est complexe, mais ils expliquent que l'imperfection de la corrélation peut être

attribuable à la présence de différents types d'antioxydants (c.-à-d., polyphénoliques et non-phénoliques) et aux interactions possibles avec d'autres types de molécules.

De façon générale, les fruits des milieux réchauffés contiennent plus de polyphénols, mais cette tendance n'est pas toujours significative. De multiples facteurs environnementaux sont susceptibles de faire varier la quantité de polyphénols produits par les plantes. Il est donc difficile de cibler avec exactitude les causes de ces variations. Par contre, certaines études ont démontré que l'augmentation de température augmente la qualité antioxydante. La température est le facteur ayant le plus d'influence sur l'activité photosynthétique et conséquemment sur la répartition des composés carbonés vers les différents organes (Medina, 2008). Par exemple, Wang & Zheng (2001) ont trouvé que les fraisiers (*Fragaria* spp.) cultivés en milieu plus frais avaient une faible capacité antioxydante, comparativement aux plants exposés à des températures supérieures. En milieu réchauffé, il y avait une augmentation significative d'acide phénolique, de flavonols et d'anthocyanines. Dans ce cas, l'augmentation de température sous OTC, sans un apport d'eau supplémentaire, peut avoir provoqué un stress hydrique. Ces variations de conditions environnementales peuvent entraîner un stress oxydant et conséquemment, une augmentation des molécules antioxydantes, un mécanisme de protection utilisé chez les plantes (Medina, 2008). Les concentrations plus élevées de polyphénols dans les fruits des parcelles réchauffées pourraient être attribuables à ceci. Par ailleurs, la photoinhibition (c.-à-d., dommages causés par les rayons UV excédant la capacité de réparation des plantes) peut influencer la formation des composés phénoliques, ceux-ci ayant un rôle photoprotecteur (Edreva, 2005). Les processus de photoinhibition peuvent survenir en nature lorsque les plantes sont amenées à faire face à de fortes variations de luminosité brusques (Boutour, 2011). La photoinhibition est accentuée à basse température, condition climatique caractérisant les régions nordiques.

Les conditions environnementales, variant d'une année à l'autre, peuvent modifier la composition chimique des plantes (p. ex., métabolites secondaires; Hanson *et al*, 2006). Les fruits d'*E. nigrum* formés durant la saison de croissance très sèche de 2008 sont de meilleure qualité nutritive (c.-à-d., polyphénols et capacité) qu'en 2009. Le

stress hydrique associé aux faibles précipitations de la saison (2008) pourrait y avoir jouer un rôle. De plus, les facteurs abiotiques (p. ex., nutriments, précipitations, lumière disponible) et biotiques (p. ex., compétition, herbivorie; Szajdek & Borowska, 2008) varient spatialement et de façon temporelle, de sorte que des variations annuelles peuvent subvenir. Hanson *et al* (2006) ne sont pas parvenus à isoler les facteurs environnementaux responsables des variations de concentration de polyphénols des feuilles de *Salix herbacea* L., *Cassiope tetragona* (L.) D. Don et *V. vitis*-idaea, et n'ont pas trouvé de réponse commune entre ces espèces.

La qualité nutritive peut aussi être influencée par la génétique, variant d'une espèce à l'autre, et peut même différer selon les cultivars (Wang & Zheng, 2001; Wang & Lin, 2000). Selon les résultats obtenus, *V. uliginosum* est l'espèce présentant les propriétés antioxydantes les plus faibles, et ce, pour les deux sites. Les résultats obtenus dans le cadre de notre étude sont supportés par la littérature, où *V. vitis-idaea* est considéré comme l'espèce la plus antioxydante, suivi d'*E. nigrum* et de *V. uliginosum*. Le bleuet est caractérisé par une plus faible concentration en polyphénols et un pouvoir antioxydant moindre, comparativement aux deux autres espèces de fruits (Fraser *et al*, 2007; Leiner *et al*, 2006).

3.6 Conclusion

Avec l'augmentation de température expérimentale, nous remarquons que la productivité des trois espèces à l'étude est très variable et que le réchauffement ne semble pas avoir d'impact significatif. Arft *et al* (1999) mentionnent que des changements dans l'effort de reproduction sexuée s'effectuent plus tardivement. Il serait alors pertinent de poursuivre l'expérimentation afin de détecter l'impact à long terme d'un réchauffement. Par ailleurs, d'autres facteurs et interactions (p. ex., nutriments, précipitation, pollinisation, herbivorie) n'ont pas été vérifiés et peuvent avoir un impact sur la productivité. Les propriétés antioxydantes sont aussi modifiées en fonction des conditions environnementales, variant annuellement (p. ex., *E. nigrum* 2008 et 2009). La hausse des températures semble augmenter le nombre de polyphénols contenus dans les

fruits et leur capacité antioxydante. Par contre, cette tendance n'est pas toujours significative, suggérant que d'autres facteurs peuvent être en cause. Il est difficile de prédire avec exactitude comment les changements climatiques feront varier la productivité et les propriétés antioxydantes avec les résultats de cette étude. Néanmoins, les changements climatiques modifient les conditions environnementales et par conséquent, sont susceptibles d'entraîner des répercussions sur la reproduction des espèces productrices de petits fruits, ainsi que sur leur qualité nutritive.

Tableau 3.1

Valeurs de productivité (g/m^2) (moyenne ± écart-type) des fruits d'*Empetrum nigrum*, *Vaccinium uliginosum* et *Vaccinium vitis-idaea* produits en 2008 et 2009 dans les OTC et les parcelles témoins à Kangiqsujuaq et Kangiqsualujjuaq (Nunavik) et comparaisons interannuelles (2008 et 2009) de la productivité totale (productivité OTC et témoins cumulée)

Les valeurs significatives de *p* des comparaisons de moyennes sont inscrites en caractère gras.

Kangiqsujuaq (WB)		***Empetrum nigrum***	***Vaccinium uliginosum***	***Vaccinium vitis-idaea***
Différence OTC-témoin, 2008	OTC	26,4 ± 33,3	9,3 ± 23,3	28,8 ± 34,5
	Témoin	50,2 ± 86,9	1,3 ± 3,5	17,9 ± 20,8
	p	0,817	0,159	0,295
Différence OTC-témoin, 2009	OTC	318,0 ± 479,9	44,2 ± 102,9	203,2 ± 350,5
	Témoin	173,8 ± 235,5	13,8 ± 18,4	137,7 ± 133,4
	p	0,827	0,094	0,538
Différence productivité totale, 2008-2009	*p*	0,166	0,365	**< 0,001**

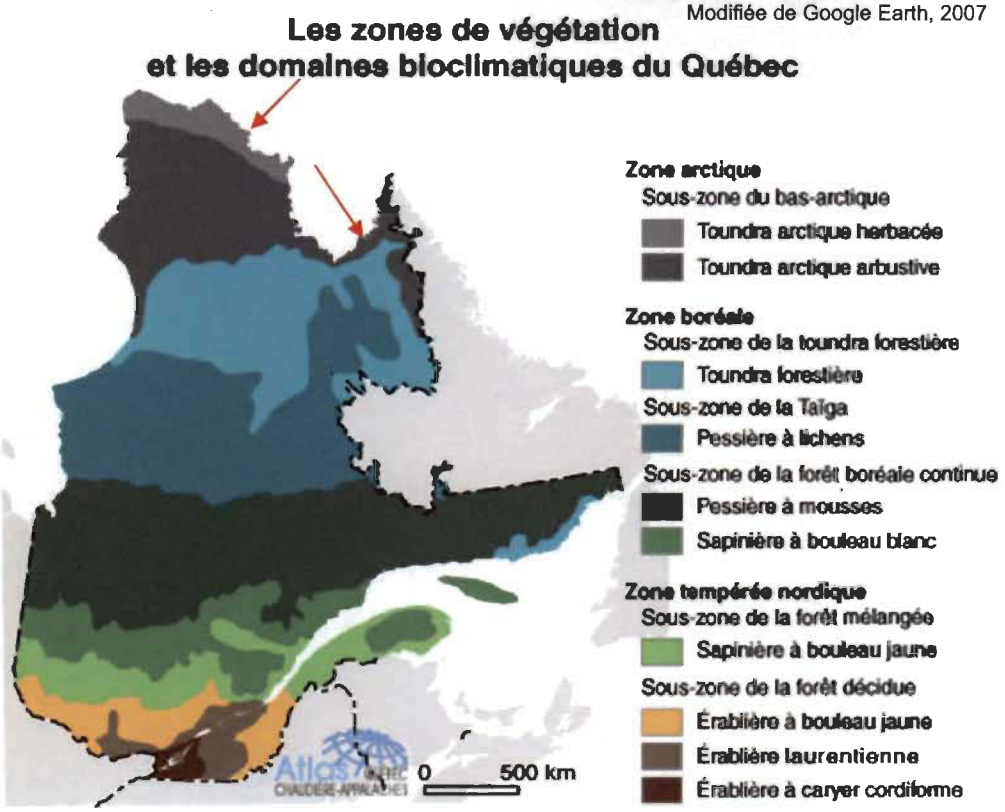
Kangiqsualujjuaq (GR)

Différence OTC-témoin, 2008	OTC	5,6 ± 6,2	5,8 ± 7,4	0,7 ± 1,6
	Témoin	26,2 ± 47,6	3,3 ± 6,7	0,1 ± 0,3
	p	**0,038**	0,159	0,065
Différence OTC-témoin, 2009	OTC	1,5 ± 2,3	4,6 ± 5,3	136,0 ± 318
	Témoin	9,6 ± 25,7	14,7 ± 48,3	8,5 ± 12,5
	p	0,274	0,301	0,333
Différence productivité totale, 2008-2009	*p*	**0,001**	0,714	**0,006**

a)

Modifiée de Google Earth, 2007

b)



Modifiée d'Environnement Canada, 2004

Figure 3.1 : a) La région la plus nordique du Québec (Nunavik), où sont situées les communautés de Kangiqsujuaq et Kangiqsualujjuaq. b) Les deux villages font partie de deux domaines bioclimatiques distincts du Québec, soit la toundra arctique herbacée et la toundra arctique arbustive, respectivement.

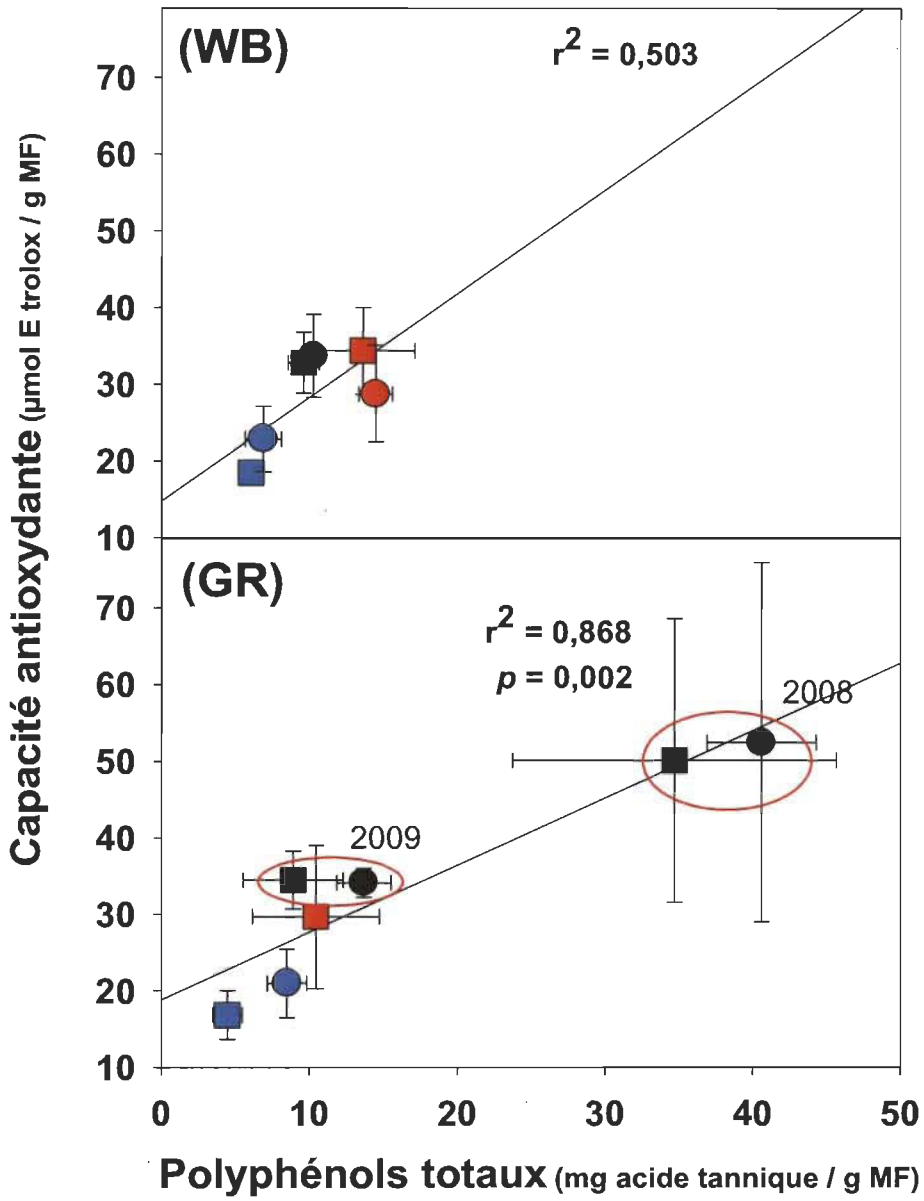


Figure 3.2 : Capacité antioxydante (moyenne ± écart-type) en fonction de la quantité de polyphénols totaux (moyenne ± écart-type) des fruits à Kangiqsujuaq (WB) et Kangiqsualujjuaq (GR) (Nunavik), récoltés dans les OTC (cercle) et témoins (carré) pour les trois espèces représentées par la couleur noire : *Empetrum nigrum* (2008 et 2009; $p = 0{,}002$); bleue : *Vaccinium uliginosum* (2009) et rouge : *Vaccinium vitis-idaea* (2009).

CONCLUSION GÉNÉRALE

La première partie du mémoire présente la mise en contexte de l'étude (Chapitre I), divisée en deux chapitres. L'un traitant de l'impact de l'augmentation du couvert ligneux érigé sur la productivité de petits fruits d'arbustes prostrés (c.-à-d., *Empetrum nigrum* L., *Vaccinium vitis-idaea* L. et *V. uliginosum* L.), et le dernier chapitre s'attardant à l'impact d'un réchauffement expérimental sur la productivité de ces arbustes, de même que sur la qualité nutritive des fruits. Les résultats ont été obtenus à la suite de l'échantillonnage et de l'expérimentation, en 2008 et 2009 à Kangiqsujuaq et Kangiqsualujjuaq, deux villages inuits du Nord québécois (Nunavik).

Dans le chapitre II, l'objectif principal était de quantifier la baisse de productivité (g/m^2) des trois espèces (*V. vitis-idaea* L., *V. uliginosum* L. et *E. nigrum* L.), de vérifier leur sensibilité aux conditions de luminosité et leur croissance sous couvert érigé. Nous avons aussi déterminé l'impact de la fermeture du milieu sur la croissance (c.-à-d., élongation annuelle) de la camarine (*E. nigrum*). Une fois établis, les arbres et arbustes érigés dominent les écosystèmes de toundra, en diminuant la lumière disponible pour les espèces prostrées et en augmentant la compétition pour les nutriments (Hallinger *et al*, 2010; Kudo *et al*, 2008), souvent limitants aux latitudes nordiques (Press *et al*, 1998). L'augmentation du couvert ligneux érigé restreint la superficie des milieux ouverts (Tremblay *et al*, 2010), habitat où la production est la meilleure pour les trois espèces à Kangiqsujuaq et Kangiqsualujjuaq. Cependant, selon les conditions environnementales et le type de couvert érigé (c.-à-d., arbustif ou arborescent), certaines espèces arriveront à se maintenir et à se reproduire sexuellement. La progression des milieux dominés par *Betula glandulosa* affecte moins la productivité de *V. uliginosum*, tandis que l'augmentation du couvert arborescent semble moins limitant pour la productivité d'*E. nigrum.*

Finalement (Chapitre III), nous avons quantifié la productivité (g/m^2) et la qualité nutritive (c.-à-d., polyphénols totaux et pouvoir antioxydant) des fruits

d'*E. nigrum*, *V. uliginosum* et *V. vitis-idaea*, en fonction d'une augmentation expérimentale de température. Pour ce faire, nous avons employé des serres hexagonales ouvertes. Avec l'augmentation de température expérimentale, nous remarquons que la productivité des trois espèces à l'étude est très variable et que le réchauffement ne semble pas avoir d'impact significatif. Arft *et al* (1999) mentionnent que des changements dans l'effort de reproduction sexuée s'effectuent plus tardivement. Il serait alors pertinent de poursuivre l'expérimentation afin de détecter l'impact à long terme d'un réchauffement. Par ailleurs, d'autres facteurs et interactions (p. ex., nutriments, précipitation, pollinisation, herbivorie) n'ont pas été vérifiés et peuvent influer sur la productivité. Les propriétés antioxydantes sont aussi modifiées en fonction des conditions environnementales, variant annuellement (p. ex., *E. nigrum* 2008 et 2009). La hausse des températures semble augmenter le nombre de polyphénols contenus dans les fruits et leur capacité antioxydante. Par contre, cette tendance n'est pas toujours significative, suggérant que d'autres facteurs peuvent être en cause.

Il est difficile de prédire avec exactitude comment les changements climatiques feront varier la productivité et les propriétés antioxydantes avec les résultats de cette étude. Néanmoins, les changements climatiques modifient les conditions environnementales et par conséquent, sont susceptibles d'entraîner des répercussions sur la reproduction des espèces productrices de petits fruits, ainsi que sur leur qualité nutritive. À long terme, le réchauffement est susceptible de modifier la structure et la composition des communautés végétales, ce qui risque d'engendrer des pertes localisées d'espèces et ultimement, des changements dans le fonctionnement des écosystèmes (Chapin *et al.* 1995).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ACIA. 2005. Arctic Climate Assessment. Cambridge University Press. 1042p.

Aerts R. 2010. Nitrogen-dependant recovery of subarctic tundra vegetation after simulation of extreme winter warming damage to *Empetrum hermaphroditum*. *Global Change Biology* 16: 1071-1081.

Aerts R., Cornelissen J.H.C. et E. Dorrepaal. 2006. Plant performance in a warmer world: General responses of plants from cold, northern biomes and the importance of winter and spring events. *Journal of Plant Ecology* 182: 65-77.

Aerts R., Cornelissen J.H.C., Dorrepaal E., R.S.P. Van Logtestijn et T.V. Callaghan. 2004. Effects of experimentally imposed climate scenarios on flowering phenology and flower production of subarctic bog species. *Global Change Biology* 10: 1599-1609.

Ågren J. 1988. Between-year variation in flowering and fruit set in frost-prone and frost-sheltered populations of dioecious *Rubus chamaemorus*. *Journal of Oecologia* 76: 175-183.

Allard M., Calmels F., Fortier D., Laurent C., L'Hérault E. et F. Vinet. 2007. Cartographie des conditions de pergélisol dans les communautés du Nunavik en vue de l'adaptation au réchauffement climatique. [En ligne]. Disponible sur : http://geoportal.krg.ca/public/communities/KRG/docs/rapport_villages_Nunavik.pdf Consulté le 8 janvier 2011.

Allard M., Fournier A., Gahé E. et M.K. Séguin. 1989. Le Quaternaire de la côte sud-est de la baie d'Ungava, Québec nordique. *Géographie physique et Quaternaire* 43: 325-336.

Amiot M.J., Aubert S., Gonnet M. et M. Tacchini. 1989. Les composés phénoliques des miels : étude préliminaire sur l'identification et la quantification par familles. *Journal of Apidologie* 20: 115-125.

Arft M., Walker M.D., Gurevitch J., Alatalo J.M., Bret-Harte M.S., Dale M., Diermer M., Gugerli F., Henry G.H.R., Jones M.H., Hollister R.D., Jonsdottir I.S., Laine K., Levesque E., Marion G.M., Molau U., Molgaard P., Nordenhall U., Raszhivin V., Robinson C.H., Starr G., Stenstrom A., Totland O., Turner P.L., Walker L.J., Webber P.J., Welker J.M. et A. Wookey. 1999. Responses of tundra plants to experimental warming: meta-analysis of the International Tundra Experiment. *Journal of Ecological Monographs* 64: 491-511.

Battino M., Beekwilder J., Denoyes-Rothan B., Laimer M., McDougall G.J., et B. Mezzetti. 2009. Bioactive compounds in berries relevant to human health. *Nutrition reviews* 67: 145-150.

Bégin Y. 2006. Le changement climatique en cours dans le Nord du Québec. *Mémoire présenté à l'Assemblée nationale du Québec.*

Black P.L., Arnason J.T. et A. Cuerrier. 2008. Medicinal plants used by the Inuit of Qikiqtaaluk (Baffin Island, Nunavut). *Canadian Journal of Botany* 86: 157-163.

Blok D., Heijmans M.M.P.D., Schaepman-Strub G., Kononov A.V., Maximov T.C. et F. Berendse. 2010. Shrub expansion may reduce summer permafrost thaw in Siberian tundra. *Journal of Global change biology* 16: 1296-1305.

Blondeau M. et J. Cayouette. 2002. La flore vasculaire de la baie Wakeham et du havre Douglas, détroit d'Hudson, Nunavik, Québec. *Provancheria* 28: 184p.

Blondeau M. et C. Roy. 2004. Atlas des plantes des villages du Nunavik. Éditions multimondes. Sainte-Foy (Québec). 610p.

Boutour M. 2011. Protection contre le stress photooxydant chez des feuilles d'érable argenté (*Acer saccharinum* L.) grâce à l'oxydation de composés phénoliques caractérisée pas voltammétrie cyclique. Mémoire présenté à l'Université du Québec à Trois-Rivières. 80p.

Bouyoucos G. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal* 54: 464-465.

Breen K. et E. Lévesque. 2008. The influence of biological soil crusts on soil characteristics along a high arctic glacier foreland, Nunavut, Canada. *Arctic, Antarctic, and Alpine research* 40: 287-297.

Bret-Harte M.S., Shaver G.R. et F.S. Chapin. 2002. Primary and secondary stem growth in arctic shrubs: implications for community response to environmental change. *Journal of Ecology* 90: 251-267.

Callaghan T.V. et S. Jonasson. 1995. Arctic terrestrial ecosystems and environmental change. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* 352: 259-276.

Callaghan T.V., Björn L.O., Chernov Y., Chapin T., Christensen T.R., Huntley B., Ims R.A., Jhansson M., Jolly D., Jonasson S., Matveyeva N., Panikov N., Oechel W., Shaver G., Schaphoff S. et S. Sitch. 2004. Effects of changes in climate on landscape and regional processes, and feedbacks to the climate system. *Ambio* 33: 459-468.

Callaway R.M. et Walker L.R. 1997. Competition and facilitation: a synthetic approach to interactions in plant communities. *Journal of Ecology* 78: 1958-1965.

Carlsson B.A. et T.V. Callaghan. 1991. Positive plant interactions in tundra vegetation and the importance of shelter. *Journal of Ecology* 79: 973-983.

Castrejón A.D.R., Eichholz I., Rohn S., Kroh L.W. et S. Huyskens-Keil. 2008. Phenolic profile and antioxidant activity of highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) during fruit maturation and ripening. *Journal of agricultural and Food Chemistry* 109: 564-572.

Chapin F.S. et G.R. Shaver. 1985. Individualistic growth response of tundra plant species to environmental manipulations in the field. *Journal of Ecology* 66: 564-576.

Chapin F.S. III et G.R. Shaver. 1996. Physiological and growth responses of arctic plants to a field experiment simulating climatic change. *Journal of Ecology* 77: 822-840.

Chapin F.S. III, Shaver G.R., Giblin A.E., Nadelhoffer K.J. et J.A. Laundre. 1995. Responses of arctic tundra to experimental and observed changes in climate. *Journal of Ecology* 76: 694-711.

Chapin F.S. III, Walker L.R., Fastie C.L. et L.C. Sharman. 1994. Mechanisms of primary succession following deglaciation at Glacier Bay, Alaska. *Ecological Monographs* 64:149-175.

Développement durable, Environnement et Parcs. 2010. Description des provinces naturelles. [En ligne]. Disponible sur : http://www.mddep.gouv.qc.ca/biodiversite/aires_protegees/provinces/partie4k.htm Consulté le 12 janvier 2011.

Dormann C.F. et S.J. Woodin. 2002. Climate change in the Arctic: using plant functional types in a meta-analysis of field experiments. *Functional Ecology* 16: 4-17.

Dubeau S., Samson G. et H-A. Tajmir-Riahi. 2009. Dual effects of milk on the antioxidant capacity of black, green, and Darjeeling teas. *Journal of agricultural and food chemistry* (manuscript).

Dumas P. et L. Maillette. 1987. Rapport des sexes, effort et succès de reproduction chez *Rubus chamaemorus,* plante herbacée vivace dioïque de distribution subarctique. *Canadian Journal of Botany* 65: 2628-2639.

Rapport-Gratuit.com

Edreva A. 2005. The importance of non-photosynthetic pigments and cinnamic acid derivatives in photoprotection. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106: 135-146.

Ellis C.J. et L. Rochefort. 2006. Long-term sensitivity of a High Arctic wetland to Holocene climate change. *Journal of Ecology* 94: 441-454.

Elmendorf S.C., Henry G.H.R., Hollister R.D., Björk R.G., Bjorkman A.D., Callaghan T.V., Siegwart Collier L., Cooper E.J. Cornelissen J.H.C., Day T.A., *et al.* 2011. Global assessment of experimental climate warming on tundra vegetation: heterogeneity over space and time. *Ecology letters* doi: 10,1111/j.1461-0248.2011.01716.x.

Environnement Canada, 2004. Normales climatiques au Canada 1971-2000 – Kuujjuaq. [En ligne]. Disponible sur : www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals/results_f.html Consulté le 14 décembre 2008.

Eriksson O. 1989. Seedling dynamics and life histories in clonal plants. *Oikos* 55: 231-238.

Ernst W.H.O., Kuiters A.T, Nelissen H.J.M. et D.J. Tolsma. 1991. Seasonal variation in phenolics in several savanna tree species in Botswana. *Acta Botanica neerlandica* 40: 63-74.

Fediuk K., Hidiroglou N., Madère R. et H.V. Kuhnlein. 2002. Vitamin C in Inuit traditional food and women's diets. *Journal of Food Composition and Analysis* 15: 221-235.

Fitter A.H., Fitter R.S.R., Harris I.T.B. et M.H. Williamson. 1995. Relationships between first flowering date and temperature in the flora of a locality in central england. *Funtional Ecology* 9: 55-60.

Forbes B., Fauria M. et P. Zetterberg. 2009. Russian Arctic warming and greening are closely tracked by tundra shrub willows. *Global Change Biology* 15: 1-13.

Forney C.F., Kalt W., Abrams S.R. et S.J. Owen. 2009. Effects of Postharvest Light and ABA Treatments on the Composition of Late-Harvested White Cranberry Fruit. *Acta Horticulturae (ISHS)* 810: 799-806.

Forseth I.N., Wait D.A. et B.B. Casper. 2001. Shading by shrubs in a desert system reduces the physiological and demographic performance of an associated herbaceous perennial. *Journal of Ecology* 89: 670-680.

Fournier A., Allard M. et M.K. Séguin. 1987. Typologie morpho-génétique des marelles du marais littoral de la baie de Kangiqsualujjuaq, estuaire du George, Québec nordique. *Géographie physique et Quaternaire* 1: 47-64.

Fraser M.H., Cuerrier A., Haddad P.S., Arnason J.T., Owen P.L. et T. Johns. 2007. Medicinal plants of Cree communities (Québec, Canada): antioxidant activity of plants used to treat type 2 diabetes symptoms. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology* 85: 1200-1214.

Gamache I. et S. Payette. 2004. Height growth response of tree line black spruce to recent climate warming across the forest-tundra of eastern Canada. *Journal of Ecology* 92: 835-845.

Gauci R. 2008. Étude de certains facteurs influençant la production de fruits et de ramets floraux chez la chicouté (*Rubus chamaemorus*). *Faculté des sciences et génie.* Université Laval, Québec. 131p.

Georgieva S., Boyadzhiev L. et G. Angelov. 2010. Caractérisation des vins bulgares par leur capacité antioxydante. *Revue de génie industriel* 5: 124-132.

Gerdol R., Brancaleoni L., Menghini M. et R. Marchesini. 2000. Response of dwarf shrubs to neighbour removal and nutrient addition and their influence on community structure in a subalpine heath. *Journal of Ecology* 88: 256-266.

Gérin-Lajoie J., Lévesque E., Siegwart Collier L., Hermanutz L., Jacobs J., Spiech C., Lavallée C., Henry G. et A. Cuerrier. 2010. Three years of community-based monitoring of berry productivity across the canadian arctic: results, constraints and recommendations. *ArcticNet annual scientific meeting*. Ottawa, ON, 14-17 décembre 2010.

Goetz P. 2006. Baies des régions arctiques, d'Amérique du Nord et d'Eurasie septentrionale. *Journal of Phytothérapie* 3: 130-135.

Graglia E., Jonasson S., Michelsen A. et I.K. Schmidt. 1997. Effects of shading, nutrient application and warming on leaf growth and shoot densities of dwarf shrubs in two arctic-alpine plant communities. *Journal of Ecoscience* 4: 191-198.

Grime J.P. 1977. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. *The American Naturalist* 111: 1169-1194.

Groupe de recherche en écologie des tourbières. 2007. Production de petits fruits en tourbières. Université Laval, Québec. 134p.

Hagen D. 2002. Propagation of native Arctic and alpine species with a restoration potential. *Polar Research* 21:37-47.

Hakala M., Lapvetelainen A., Huopalahti R., Kallio H. et R. Tahvonen. 2003. Effects of varieties and cultivation conditions on the composition of strawberries. *Journal of food composition and analysis* 16: 67-80.

Hallinger M., Manthey M. et M. Wilmking. 2010. Establishing a missing link: warm summers and winter snow cover promote shrub expansion into alpine tundra in Scandinavia. *New Phythologist* doi: 10.1111/j.1469-8137.2010.03223.x

Hansen A.H., Jonasson S., Michelsen A. et Julkunen-Tiitto R. 2006. Long-term experimental warming, shading and nutrient addition affect the concentration of phenolic compounds in arctic-alpine deciduous and evergreen dwarf shrubs. *Journal of Oecologia* 147: 1-11.

Henry G.H.R. et U. Molau. 1997. Tundra plants and climate change: the International Tundra Experiment (ITEX). *Journal of Global Change Biology* 3: 1-9.

Hinzman L.D., Bettez N.D., Bolton W.R., Chapin F.S. III, Dyurgerov M.B., Fastie C.L., Griffith B., Hollister R.D., Hope A., Huntington H.P., Jensen A.M., Jia G.J., Jorgenson T., Kane D.L., Klein D.R., Kofinas G., Lynch A.H., Lloyd A.H., McGuire A.D., Nelson F.E., Oechel W.C., Osterkamp T.E., Racine C.H., Romanovsky V.E., Stone R.S., Stow D.A., Sturm M., Tweedie C.E., Vourlitis G.L., Walker M.D., Walker D.A., Webber P.J., Welker J.M., Winker K.S. et K. Yoshikawa. 2005. Evidence and implications of recent climate change in northern Alaska and other arctic regions. *Journal of Climate Change* 72: 251-298.

Hollister R.D. et P.J. Webber. 2000. Biotic validation of small open-top chambers in a tundra ecosystem. *Journal of Global Change Biology* 6: 835-842.

Hosseinian S. F. et T. Beta. 2007. Saskatoon and wild blueberries have higher anthocyanin contents than other Manitoba berries. *Journal of agricultural and food chemistry* 55: 10832-10838.

Hudson J.M.G. et G.H.R. Henry. 2009. Increased plant biomass in a High Artic heath community from 1981 to 2008. *Journal of Ecology* 90: 2657-2663.

Inouye D.W. 2008. Effects of climate change on phenology, frost damage, and floral abundance of montane wildflowers. *Journal of Ecology* 89: 353-362.

ISITEC-LAB. 2009. Indice de Folin / polyphenols totaux. [En ligne]. Disponible sur : http://www.isiteclab.com/documents/methodologies/POLYPHENOLS%20TOTAUX%20KHPE05565.pdf

Jacquemart A-L. 1996. Vaccinium Uliginosum L. *Journal of Ecology* 84: 771-785.

Jacquemart A-L. 1997. Pollen limitation in three sympatric species of *Vaccinium* (*Ericaceae*) in the Upper Ardennes, Belgium. *Journal of Plant systematics and evolution*. 207: 159-172.

Kahkönen M. P., Hopia A. I. et M. Heinonen. 2001. Berry phenolics and their antioxidant activity. *Journal of agricultural and food chemistry* 49: 4076-4082.

Karlsson P.S. 1985. Patterns of carbon allocation above ground in a deciduous (*Vaccinium uliginosum*) and an evergreen (*Vaccinium vitis-idaea*) dwarf shrub. *Journal of Physiology Plant* 63: 1-7.

Keech O., Carcaillet C. et M.C. Nilsson. 2005. Adsorption of allelopathic compounds by wood-derived charcoal: the role of wood porosity. *Plant and soil* 272: 291-300.

Kondo S., Yoshikawa H. et S. Nakatani. 2003. Effects of shading on the levels and activities antioxidative compounds in the skin of lemons and apples. *Journal of japanese society horticultural science* 72: 221-223.

Krebs C. J., Boonstra R., Cowcill K. and A. J. Kenney. 2009. Climatic determinants of berry crops in the boreal forest of the southwestern Yukon. *American journal of Botany* 87: 401-408.

Kudo G., Suzuki S. 2003. Warming effects on growth, production, and vegetation structure of alpine shrubs: a five-year experiment in northern Japan. *Journal of Oecologia* 135: 280-287.

Kudo G., Ida T.Y. et T. Tani. 2008. Linkages between phenology, pollination, photosynthesis and reproduction in deciduous forest understory plants. *Journal of Ecology* 89: 321-331.

Lee P. and S. Hanus. 1999. Monitoring of terrestrial vascular plants and structure in the forested regions of Alberta: background, indicators, and protocols. [En ligne]. Disponible sur : http://abmi.biology.ualberta.ca/18_Chapter_Compendium/Monitoring%20of%20Terrestrial%20Vascular%20Plants%20and%20Structure_13.pdf
Consulté le 10 mars 2010.

Leiner H. R., Holloway S. P. et D. B. Neal. 2006. Antioxidant capacity and quercetin levels in Alaska wild berries. *International journal of fruit science* 6 (1): 83-91.

Marc F., Davin A., Deglène-Benbrahim L., Ferrand C., Baccaunaud M. et P. Fritsch. 2004. Méthodes d'évaluation du potentiel antioxydant dans les aliments. *Journal of Medecine/Sciences* 20: 458-463.

Marie-Victorin FEC. 1995. Flore laurentienne. Les presses de l'Université de Montréal. Montréal (Québec). Troisième édition. 1093p.

Marion G.M., Henry G. H., Freckman D.W., Johnstone J., Jones G., Jones M. H., Lévesque E., Molau U., MØlgaard P., Parsons A.N., Svoboda J. et R.A. Virginia. 1997. Open-top designs for manipulating field temperature in high-latitude ecosystems. *Journal of Global Change Biology* 3: 20-32.

McKeague J.A. 1978. Manual on soil sampling and methods of analysis. 2nd ed. Canadian society of soil. AAFC, Ottawa, Ontario, Canada. 1224p.

Medina Y. 2008. Influence de différents paillis de plastique sur le microclimat, l'activité photosynthétique, la productivité et la qualité des fruits de fraisiers (var. Seascape) cultivés sous grands tunnels. Mémoire présenté à l'Université Laval, Québec. 55p.

Mehlich A. 1978. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. *Communications Soil Science Plant Analysis* 9(6): 477-92.

Molau U., Nordenhäll U. et B. Eriksen. 2005. Onset of flowering and climate variability in an alpine landscape: A 10-year study from Swedish Lapland. *American Journal of Botany* 92: 422-431.

Morgan P. 2008. Maire de Kangiqsualujjuaq, Nunavik (Québec) Canada.

Morin A. et S. Payette. 1984. Expansion récente du mélèze à la limite des forêts (Québec nordique). *Canadian Journal of Botany* 62: 1404-1408.

Murray G. et P. Boxall. 2005. The distribution, abundance, and utilization of wild fruits by the gwich'in in the Mackenzie River Delta. *Economic Botany* 59: 174-184.

Myers-Smith I. H., Forbes B.C., Wilmking M., Hallinger M., Lantz T.,Blok D., Tape K.D., Macias-Fauria M., Sass-Klaassen U., Lévesque E., Boudreau S., Ropars P., Hermanutz L., Trant A., Collier L.S., Weijers S., Rozema J., Rayback S.A., Schmidt N.M., Schaepman-Strub G., Wipf S., Rixen C., Ménard C.B., Venn S., Goetz S., Andreu-Hayles L., Elmendorf S., Ravolainen V., Welker J., Grogan P., Epstein H.E. et D. S. Hik. 2011. Shrub expansion in tundra ecosystems: dynamics, impacts and research priorities. *Environmental Research Letters* 6:045509. doi: 10.1088/1748-9326/6/4/045509.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Myneni R.B., Keeling C.D., Tucker C.J., Asrar G. et R.R. Nemani. 1997. Increase plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991. *Nature* 386: 698-702.

Niesenbaum R.A. 1993. Light or pollen – Seasonal limitations on female reproductive success int he understory shrub lindera benzoin. *Journal of Ecology* 81: 315-323.

Opstad N. et A. Sonsteby. 2008. Flowering and fruit development in strawberry in a field experiment with two fertilizer strategies. *Soil and Plant Science* 58: 297-304.

Pajunen A.M. 2009. Environmental and biotic determinants of growth and height of arctic willow shrubs along a latitudinal gradient. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 41: 478-485.

Parsons A.N., Welker J.M., Wookey P.A., Press M.C., Callaghan T.V. et J.A. Lee. 1994. Growth-responses of 4 sub-arctic dwarf shrubs to simulated environmental-change. *Journal of Ecology* 82: 307-318.

Pelletier L., Brown A., Otrysko B. et J.N. McNeil. 2001. Entomophily of the cloudberry (*Rubus chamaemorus*). *Journal of Entomologia Experimentalis et Applicata* 101: 219-224.

Phoenix G.K., Gwynn-Jones D., Lee J.A. et T.V. Callaghan. 2002. Ecological importance of ambient solar ultraviolet radiation to a sub-arctic heat community. *Plant Ecology* 165: 263-273.

Pommeroy J.W., Bewley D.S., Essery R.L.H., Hedstrom N.R., Link T., Granger R.J., Sicart J.E., Ellis C.R. et J.R. Janowicz. 2006. Shrub tundra snowmelt. *Hydrological Processes* 20: 923-941.

Porsild, A.E., and Cody, W.J. 1980. Vascular plants of the continental Northwest Territories, Canada. National Museum of Canada, Ottawa.

Press M.C., Potter J.A., Burke M.J.W., Callaghan T.V. et J.A. Lee. 1998. Responses of a subarctic dwarf shrub heath community to simulated environmental change. *Journal of Ecology* 86: 315-327.

Recueil international des méthodes d'analyses. 2010. [En ligne]. Disponible sur : http://news.reseau-concept.net/images/oiv/Client/MA-F-AS2-10-INDFOL.pdf

Ressources naturelles et Faune Québec, 2003. Zone de végétation et domaines bioclimatiques du Québec. [En ligne]. Disponible sur : www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-inventaire-zones-carte.jsp Consulté le 12 décembre 2008.

Richardson S.J., Press M.C., Parsons A.N. et S.E. Hartley. 2002. How do nutrients and warming impact on plant communities and their insect herbivores? A 9-year study from a sub-Arctic heath. *Journal of Ecology* 90: 544-556.

Riga P., Anza M. et C. Garbisu. 2008. Tomato quality is more dependent on temperature than on photosynthetically active radiation. *Journal of Science of food and Agriculture* 88: 158-166.

Robinson C.H., Wookey P.A., Lee J.A., Callaghan T.V. et M.C. Press. 1998. Plant community responses to simulated environmental change at a high arctic polar semi-desert. *Journal of Ecology* 79: 856-866.

Ropars P. & S. Boudreau. 2011. Shrub expansion at the forest-toundra ecotone: spatial heterogeneity linked to local topography. *Environemental research letters*. doi: 10.1088/1748-9326/7/1/015501.

Saure M. C. 1990. External control of anthocyanin formation in apple. *Journal of Scientia horticulturae* 42: 181-218.

Scherrer B. 1984. Biostatistique. Gaëtan Morin Éditeur ltée. 850p.

Schmidt I.K., Jonasson S., Shaver G.R., Michelsen A. et A. Nordin. 2002. Mineralization and distribution of nutrients in plants and microbes in four artic ecosystems: responses to warming. *Plant and Soil* 242: 93-106.

Shevtsova A., Haukioja E. et A. Ojala. 1997. Growth response of subarctic dwarf shrubs, *Empetrum nigrum* and *Vaccinium vitis-idaea*, to manipulated environmental conditions and species removal. *Oikos* 78: 440-458.

Shevtsova A. O., Neuvonen A.S., Vieno M. et E. Haukioja. 1995. Growth and reproduction of dwarf shrubs in a subartic plant community: annual variation and above-ground interactions with neighbours. *Journal of Ecology* 83: 263-275.

Stephenson A.G. 1981. Flower and fruit abortion: proximate causes and ultimate functions. *Annual Review of Ecology and Systematics* 12: 253-279.

Stone R., Dutton E., Harris J. et D. Longenecker. 2002. Earlier spring snowmelt in northern Alaska as an indicator of climate change. *Journal of geophysical research-atmospheres* 107 (D10). Art. No. 4089.

Sturm M., Racine C. et K. Tape. 2001. Climate change - Increasing shrub abundance in the Arctic. *Nature* 411: 546-547.

Suzuki S. et G. Kudo. 2000. Responses of alpine shrubs to simulated environmental change during three years in the mid-latitude mountain, northern Japan. *Journal of Ecography* 23: 553-564.

Szajdek A. et E.J. Borowska. 2008. Bioactive compounds and health-promoting properties of berry fruits: a review. *Journal of Plant foods human nutrition* 63: 147-156.

Tape K., Sturm M. and C. Racine. 2006. The evidence for shrub expansion in Northern Alaska and the Pan-Arctic. *Journal of Global Change Biology* 12: 686-702.

Tielbörger K. et K. Kadmon. 2008. Arid dune ecosystems. Chapitre 27: Effects of shrubs on annual plant populations. doi: 10.1007/978-3-540-75498-5_27. p. 385-400.

Tommervik H., Johansen B., Tombre I., Thannheiser D., Hogda K.A., Gaare E. et F.E. Wielgolaski. 2004. Vegetation changes in the Nordic mountain birch forest: the influence of grazing and climate change. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 36: 323-332.

Traveset A. et D.M. Richardson. 2006. Biological invasions as disruptors of plant reproductive mutualisms. *Journal of Trends in Ecology and Evolution* 21: 208-216.

Tremblay B., Lévesque E. et S. Boudreau. 2012. Recent expansion of erect shrubs in the Low Arctic: evidence from Eastern Nunavik. *Environemental Research Letter* 7 (2012) 035501.

Tybirk K., Nilsson M.C., Michelsen A., Kristensen H.L., Shevtsova A., Strandberg M.T., Johansson M., Nielsen K.E., Riis-Nielsen T., Strandberg B. et I. Johnsen. 2000. Nordic *Empetrum* dominated ecosystems: function and susceptibility to environmental changes. *Ambio* 29: 90-97.

Usher P.J. 1976. Evaluating country foods in the Northern native economy. *Journal of Arctic* 29: 105-120.

Uzun S. 2007. Effect of light and temperature on the phenology and maturation o the fruit of eggplant (*Solanum melongena*) grown in greenhouses, New Zealand *Journal of Crop and Horticultural Science* 35: 51-59.

Villano D., Fernandez-Pachin M.S., Troncoso A.M. et M.C. Garcia-Parrilla. 2004. The antioxidant activity of wines determineted by the ABTS+ method : influence of sample dilution and time. *Journal of Talanta* 64: 501-509.

Wada N., Shimono M., Miyamoto M. et S. Kojima. 2002. Warming effects on shoot developmental growth and biomass production in sympatric evergreen alpine dwarf shrubs Empetrum nigrum and Loiseleuria procumbens. *Ecological Research* 17: 125-132.

Walker M.D., Wahren C.H., Hollister R.D., Henry G.H.R., Ahlquist L.E., Alatalo J.M., Bret-Harte M.S., Calef M.P., Callaghan T.V., Carroll A.B., Epstein H.E., Jonsdottir I.S., Klein J.A., Magnusson B., Molau U., Oberbauer S.F., Rewa S.P., Robinson C.H., Shaver G.R., Suding K.N., Thompson C.C., Tolvanen A., Totland O., Turner P.L., Tweedie C.E., Webber P.J. et P.A. Wookey. 2006. Plant community responses to experimental warming across the tundra biome. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103: 1342-1346.

Walther GR. 2002. Plants in a warmer world. *Perspectives in plant ecology, evolution and systematics* 6/3:169-185.

Wang S. Y. et H-S. Lin. 2000. Antioxidant activity in fruits and leaves of blackberry, raspberry, and strawberry varies with cultivar and developmental stage. *Journal of agricultural and chemistry* 48: 140-146.

Wang S. Y. et W. Zheng. 2001. Effect of plant growth temperature on antioxidant capacity in strawberry. *Journal of agricultural and food chemistry* 49: 4977-4982.

Wang S.Y., Chen C.T. et C.Y. Wang. 2009. The influence of light and maturity on fruit quality and flavonoid content of red raspberries. *Food Chemistry* 112: 676-684.

Weis I.M. et L. Hermanutz. 1993. Pollination dynamics of arctic dwarf birch (*Betula glandulosa;*Betulaceae) and its role in the loss of seed production. *American Journal of Botany* 80: 1021-1027.

Wolf A., Callaghan T.V. et K. Larson. 2008. Future changes in vegetation and ecosystem function of the Barents region. *Journal of Climatic Change* 87: 51-73.

Wolfe K., Wu X. et RH. Liu. 2003. Antioxidant activity of apple peels. *Journal of agricultural and food chemistry* 51: 609-614.

Wookey P.A. 2008. Experimental approaches to predicting the future of tundra plant communities. *Journal of Plant Ecology and Diversity* 1: 299-307.

Yeomans J.C. et J.M. Bremmer. 1988. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 19: 1467-1476.

Zaid E.H. 2006. Complément de cours de physiologie végétale. [En ligne]. Disponible sur :
http://www.fsr.ac.ma/cours/biologie/zaid/cours.pdf
Consulté le 17 avril 2010.

Zhou L., Tucker C.J., Kaufmann R.K., Slayback D., Shabanov N.V. et R.B. Myneni. 2001. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of geophysical research* 106: 20,069-20,083.

ANNEXE A

LISTE DES PLANTES VASCULAIRES ÉCHANTILLONNÉES À KANGIQSUJUAQ ET KANGIQSUALUJJUAQ, NUNAVIK

Tableau A.1

Espèces retrouvées à travers les différents milieux échantillonnés et richesse spécifique à Kangiqsujuaq et Kangiqsualujjuaq, Nunavik, où O : milieu ouvert; a : milieu arbustif continu; a+ : milieu arbustif discontinu à continu; A+ : milieu arborescent discontinu à continu; A : milieu arborescent continu

Les « x » signifient que ces espèces ont été inventoriées dans l'ensemble du milieu, sans pour autant être présentes dans les parcelles récoltées (1 m^2). Les chiffres en exposant, issus de l'analyse de correspondance : 2: identifie des espèces plutôt retrouvées en milieu arbustif et arborescent à GR; 3 : des espèces retrouvées à WB en milieu ouvert et arbustif; 4 : des espèces plus fréquentes en milieu ouvert.

	Kangiqsujuaq		**Kangiqsualujjuaq**				
	O	a	O	a+	a	A+	A
Strate arborescente							
Pinaceae							
Larix laricina (DuRoi) K. Koch			x	x	x	x	x
Picea mariana (Mill.)				x		x	x
Strate arbustive érigée							
Betulaceae							
Betula glandulosa Michx		x	x	x	x	x	x
Ericaceae							
Kalmia polifolia Wang[2]					x	x	x
Salicaceae							
Salix glauca L.[3]	x	x	x	x	x	x	
Salix planifolia Pursh[2]					x	x	x
Strate arbustive prostrée							
Caprifoliaceae							
Linnaea borealis L.[2]					x	x	x
Diapensiaceae							
Diapensia lapponica L.[3]	x						

Tableau A.1 (suite)

	Kangiqsujuaq		Kangiqsualujjuaq				
	O	a	O	a+	a	A+	A
Ericaceae							
Arctous alpina (L.) Spreng[3]	x	x	x				
Cassiope tetragona (L.) D. Don[3]	x	x					
Empetrum nigrum L.	x	x	x	x	x	x	x
Phyllodoce caerulea (L.) Babingt[3]	x						
Rhododendron groenlandicum Retzius			x	x	x	x	x
Rhododendron lapponicum (L.) Wahl[3]	x	x					
Rhododendron tomentosum (L.) BSP[2]	x		x	x		x	x
Vaccinium caespitosum Michx[2]					x	x	x
Vaccinium uliginosum L.	x	x	x	x	x	x	x
Vaccinium vitis-idaea L.	x	x	x	x	x	x	x
Rosaceae							
Dryas integrifolia Vahl[3]	x	x					
Salicaceae							
Salix arctica Pallas[3]	x						
Salix arctophila Cock[3]		x			x		
Salix calcicola Fern. & Wieg[3]		x					
Salix herbacea L.[3]	x		x				
Salix reticulata L.[4]	x	x					
Strate herbacée							
Asteraceae							
Antennaria monocephala Candolle[3]	x						
Aster sp.[2]	x			x	x	x	
Petasites frigidus spp.*palmatus* (Ait.) Gray.[2]					x	x	
Solidago macrophylla Pursh[2]					x	x	x
Brassicaceae							
Draba glabella Pursh[4]		x					
Eutrema edwardsii R. Br.[4]	x						
Campanulaceae							
Campanula uniflora L.[3]	x						
Caryophyllaceae							
Cerastium alpinum L.[3]	x						
Silene acaulis (L.) Jacq. [4]	x						
Stellaria longipes Goldie[3]	x	x					

Tableau A.1 (suite 1)

	Kangiqsujuaq		Kangiqsualujjuaq				
	O	a	O	a+	a	A+	A
Cornaceae							
Cornus canadensis L.[2]						x	
Cornus suecica L.[2]				x	x		
Cyperaceae							
Carex aquatilis Wahl[2]						x	
Carex atratiformis Britton[2]							x
Carex bigelowii Torr[4]	x	x	x		x	x	x
Carex limosa L.[2]							x
Carex membranacea R. Br.[2]	x	x		x		x	x
Eriophorum angustifolium Honckeny[3]			x				
Trichophorum caespitosum L.[2]	x		x				x
Colchicaceae							
Streptopus amplexifolius (L.) DC[2]							x
Dryopteridaceae							
Dryopteris expansa (C. Presl)[2]							x
Equisetaceae							
Equisetum arvense L.[3]	x	x					
Equisetum sylvaticum L.[2]				x		x	x
Ericaceae							
Pyrola grandiflora Rad.[4]	x	x				x	
Pyrola minor L.[4]				x			
Fabaceae							
Astragalus alpinus L.[4]	x						
Oxytropis campestris Fernald[3]	x	x					
Juncaceae							
Juncus sp.[2]	x						
Luzula parviflora (Ehrh.) Desv[4]						x	x
Lycopodiaceae							
Lycopodium annotinum L. [2]			x	x	x		x
Onagraceae							
Chamerion angustifolium (L.) Holub [2]					x	x	x
Chamerion latifolium (L.) Holub[3]	x						

Tableau A.1 (suite 2)

	Kangiqsujuaq		Kangiqsualujjuaq				
	O	a	O	a+	a	A+	A
Orobanchaceae							
Bartsia alpina L.[4]	x						
Pedicularis flammea L.[3]	x	x					
Pedicularis hirsuta L.[4]	x						
Pedicularis labradorica Wirsing[4]			x	x	x		
Pedicularis lanata Cham. & Schl[3]	x						
Pedicularis lapponica L.[3]	x	x	x				
Papaveraceae							
Papaver labradoricum (Tolm)[3]	x						
Plumbaginaceae							
Armeria maritima Willd[3]	x	x					
Poaceae							
Calamagrostis canadensis (Michx) Nutt[2]	x	x	x		x	x	x
Calamagrostis lapponica (Wahlenb.) Hartm[2]		x	x			x	x
Hierochloe alpina (L.) Beauv[2]	x	x	x			x	x
Poa alpina L.[4]	x						
Poa arctica R. Br.[2]			x	x		x	
Polygonaceae							
Oxyria digyna (L.) Hill[3]		x					
Persicaria vivipara (L.) Ronse Decr.[3]	x	x					
Primulaceae							
Trientalis borealis Raf.[2]				x	x	x	x
Ranunculaceae							
Coptis trifolia Salisb.[2]					x	x	x
Ranunculus nivalis L.[2]		x					
Rosaceae							
Potentilla hyparctica Malte[4]	x	x					
Potentilla nivea L.[4]	x	x					
Rubus arcticus spp. *acaulis* L.[2]				x	x	x	x
Rubus chamaemorus L.[2]			x	x	x	x	x
Thelypteridaceae							
Phegopteris connectilis (Michx) Watt[2]							x
Total (nombre d'espèces)	43	30	21	20	26	32	32

* Nomenclature selon : Blondeau & Roy, 2004; Porsild & Cody, 1980.

ANNEXE B

CARACTÉRISTIQUES ENVIRONNEMENTALES

Tableau B.1

Température (°C) rapportée pour la période du 4 au 16 août 2009 avec minimum (MIN), maximum (MAX) et le total des degrés-jours sans gel (DJ > 0 °C; moyenne ± écart-type), et radiation solaire (R en mol/m^2/s; moyenne/jour ± écart-type) et (MAX) pour la période du 3 au 18 août 2009, pour Kangiqsujuaq et Kangiqsualujjuaq (Nunavik), où O : milieux ouverts; a : milieux arbustifs continus; a+ : milieux arbustifs discontinus à continus; A+ : milieux arborescents discontinus à continus; A : milieux arborescents continus

Les valeurs de *p* en gras et les lettres en exposant réfèrent aux différences significatives observées.

	Kangiqsujuaq			Kangiqsualujjuaq					
	O	**A**	***p***	**O**	**a+**	**a**	**A+**	**A**	***p***
Température									
Min (°C)	6	6		6	6	4	3	4	
Max (°C)	19	18		20	13	16	16	17	
DJ (< 0°C)	122,3 ± 5,8	108,3 ± 1,8	**0,050**	121,8 ± 2,4	97,7 ± 7	98,1 ± 20	95,2 ±34	112 ± 16	0,359
R (mol/m^2/s)	0,16 ± 0,01 (0,005)	0,04 ± 0,01 (0,004)	**< 0,001**	0,90 ± 0,02^a (0,05)	0,28 ± 0,09^b (0,03)	0,43 ± 0,2^{ab} (0,04)	0,20 ± 0,19^b (0,02)	0,32 ± 0,13^b (0,02)	**0,024**

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

ANNEXE C

EXEMPLE DE RAMETS D'*EMPETRUM NIGRUM* EN MILIEU OUVERT ET FERMÉ

Figure C.1 : Ramets de spécimens d'*Empetrum nigrum* récoltés en milieu ouvert (O; en haut) et en milieu arbustif (a; en bas), à Kangiqsujuaq (Nunavik). Nous remarquons que les ramets sous arbustes semblent s'étioler, comparativement aux ramets plus compacts en milieu ouvert.