

Développement d'indicateurs hydro-climatiques : projection des changements de température et d'humidité des sols forestiers et de leurs impacts potentiels sur la fertilité des sols.

Impacts et adaptation / Programme ICAR-Québec, volet foresterie

**Daniel Houle
Richard Harvey
Travis Logan
Louis Duchesne**

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres.



Remerciements

Nous tenons à remercier Anne Frigon, Anne Blondlot et Michel Campagna pour leurs commentaires sur la première version de ce rapport. Nous tenons aussi à remercier Isabelle Charron, Charles Marty et Mathieu B. Morin pour leurs commentaires et leur aide dans l'édition du document, sans oublier René Laprise qui a participé à quelques réunions et nous a prodigué de judicieux conseils au début de ce projet.

Table des matières

Section 1. Introduction, contexte et méthodologie	14
1.1 Contexte / objectifs	14
1.2 Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature.....	15
1.3 Méthodologie/Données	16
1.3.1 Description des sites d'études et de données disponibles	17
1.3.2 Collecte de données d'humidité et de température des sols.....	20
1.3.3 Les modèles ForHyM et ForSTeM.....	20
1.3.3.1 Description des modèles.....	20
1.3.3.2 Calibration des modèles.....	22
1.3.4 Simulations climatiques	24
1.3.4.1 Scénarios climatiques	24
1.3.4.2 Projections futures	24
1.3.5 Amélioration des champs géophysiques à l'intérieur du MRCC	25
1.3.6 Prédications de la température et du contenu en eau des sols forestiers pour l'ensemble du Québec	26
1.3.7 Développements des modèles reliant la disponibilité en éléments nutritifs à la température et l'humidité des sols.....	27
Section 2. Projection de la température et du contenu en eau des sols forestiers pour trois types de forêt québécoise	29
2.1 Contexte	30
2.2 Résultats.....	31
2.2.1 Performance des modèles	31
2.2.1.1 ForHyM.....	31
2.2.1.2 ForSTeM	34
2.4.2 Projections de variations de l'humidité dans le sol.....	37
2.4.3 Projections de variations de la température du sol.....	39
2.4.4 Comparaison des scénarios basés sur les modèles de climat globaux.....	42
2.5 Analyse et discussion	44
Section 3. Mise à jour des champs géophysiques utilisés par le MRCC et sommaire des tests de sensibilité avec CLASS	46
3.1 Amélioration des champs géophysiques à l'intérieur du MRCC	46
3.2 Tests de sensibilité sur les valeurs de texture du sol.....	48
3.2.1 Changements de % de sable.....	48
3.2.2 Changements de % d'argile.....	50
3.3 Tests de sensibilité sur les valeurs de porosité	51
3.3.1 Changements de porosité de la dernière couche de sol avant la roche-mère.....	51
3.3.2 Changements de porosité de la deuxième couche de sol (10 à 35 cm)	52
3.3.3 Changements de porosité des couches de sol 3 à 9.....	55
3.3.4 Changements de porosité des couches 3 à 9 en fonction de la profondeur de la couche considérée	56
3.3.5 Changements de porosité des couches 3 à 9 du sol en modifiant la pente de la formule empirique de CLASS 3.6 (la porosité varie en fonction du % de sable).....	58
3.4 Tests de sensibilité sur les valeurs de conductivité hydraulique à saturation (KSAT)	60

3.4.1 Changements de KSAT de la dernière couche de sol avant la roche-mère	60
3.4.2 Changements de KSAT des couches 3 à 9 en fonction de la profondeur	61
Section 4. Calibration et amélioration de CLASS en mode colonne à l'aide de données observées de température et de contenu en eau des sols forestiers.....	63
4.1 Version initiale de CLASS utilisée	63
4.2 Modifications aux paramétrages	64
4.3 Résultats : Impacts des modifications	64
4.3.1 Nombre de couches de sol	65
4.3.2 Sols organiques	67
4.3.3 Conductivité thermique de la neige	68
4.3.4 Résistance stomatale minimale	68
4.3.5 Indice de drainage à la base du profil de sol	70
4.3.5.1 Changements de l'indice de drainage (XDRAIN) en sol minéral	70
4.3.5.2 Changements de l'indice de drainage (XDRAIN) en sol organique	72
4.3.5.3 Changements de l'indice de drainage (XDRAIN) en sol argileux	74
Section 5. Simulations terminées et en cours pour le projet	76
Section 6. Effets escomptés des changements de température et d'humidité sur la fertilité des sols forestiers du Québec	80
6.1 Rappel	80
6.2 Quels sont les éléments nutritifs importants?	80
6.3 Cations basiques	80
6.3.1 Distribution de la disponibilité en cations le long d'un gradient climatique spatial	81
6.3.2 Expérience de chauffage de sols en forêt boréale	82
6.3.3 Variation temporelle de la disponibilité en cations en fonction de variations climatiques saisonnières ou annuelles	83
6.3.4 Modélisation quantitative des taux d'altération en fonction des variations de la température et du contenu en eau des sols	85
6.4 Azote inorganique	88
6.4.1 Quelques caractéristiques du cycle de l'N dans trois écosystèmes forestiers du Québec	89
6.4.2 Études expérimentales de déplacements et de réchauffement et de sols	91
6.4.3 Relation temporelles	94
6.5 Conclusion	96
Section 7. Conclusions générales	97
Section 8. Références	100

Liste des figures

Figure 1.1 Localisation des trois bassins versants à l'étude : Lac Clair (LC), Lac Laflamme (LL), et Lac Tirassee (LT).....	18
Figure 1.2 Schéma montrant les processus hydrologiques du modèle ForHyM (adapté de Arp et Yin, 1992).....	21
Figure 1.3 Schéma montrant les flux de transfert de chaleur dans le modèle ForSTeM (Adapté de Yin et Arp, 1993).....	22
Figure 1.4 Localisation des 72 bassins versants ayant servis à l'étude de l'effet d'un gradient climatique sur les taux d'altération.	29
Figure 2.1 Comparaison entre les patrons annuels du contenu en eau dans l'horizon B pour les valeurs mensuelles moyennes observées (%) et simulées (mm) pour A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirassee.	32
Figure 2.2 Comparaison entre les patrons annuels du contenu en eau dans l'horizon C pour les valeurs mensuelles moyenne observées (%) et simulées (mm) pour A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirassee.	33
Figure 2.3 Comparaison entre les patrons annuels des températures de l'humus observées et simulées pour A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirassee.....	35
Figure 2.4 Comparaison entre les patrons annuels des températures de l'horizon B observées et simulées pour A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirassee.....	35
Figure 2.5 Comparaison entre les patrons annuels des températures de l'horizon C observées et simulées pour A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirassee.....	36
Figure 2.6 Patron annuel des variations du contenu en eau dans le sol dans l'humus pour A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirassee selon les projections climatiques du MRCC 4.2 AET.	38
Figure 2.7 Patron annuel des variations du contenu en eau dans le sol dans l'horizon B pour A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirassee selon les projections climatiques du MRCC 4.2 AET.	38
Figure 2.8 Patron annuel des variations du contenu en eau dans le sol dans l'horizon C pour A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirassee selon les projections climatiques du MRCC 4.2 AET.	39
Figure 2.12 Patron annuel des variations de température du sol dans l'humus pour A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirassee selon les projections climatiques du MRCC 4.2 AET.....	41
Figure 2.10 Patron annuel des variations de température du sol dans l'horizon B pour A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirassee selon les projections climatiques du MRCC 4.2 AET.	41
Figure 2.11 Patron annuel des variations de température du sol dans l'horizon C pour A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirassee selon les projections climatiques du MRCC 4.2 AET.	42
Figure 2.12 Patron annuel des variations du contenu en eau pour l'horizon B du bassin versant Laflamme pour A) l'horizon futur 2020, B) l'horizon futur 2050 et C) l'horizon futur 2080.....	43

- Figure 2.13 Patron annuel des variations de température de l'horizon B du bassin versant Laflamme pour A) l'horizon futur 2020, B) l'horizon futur 2050 et C) l'horizon futur 2080.44
- Figure 3.1 Représentations du contenu en sable (%) de la couche 1 du sol (0-10 cm) à partir des bases de données Webb et al. 1993 (gauche), CANSIS/USGS (centre), et CANSIS/USGS/MRN (droite).46
- Figure 3.2 Représentations du contenu en sable (%) de la couche 2 du sol (10-35 cm) à partir des bases de données Webb et al. 1993 (gauche), CANSIS/USGS (centre), et CANSIS/USGS/MRN (droite).47
- Figure 3.3 Représentations du contenu en sable (%) de la couche 3 du sol (35-60cm) à partir des bases de données Webb et al. 1993 (gauche), CANSIS/USGS (centre), et CANSIS/USGS/MRN (droite).48
- Figure 3.4 Un exemple pour le lac Clair d'un test de sensibilité du pourcentage de sable sur a) la température (TG2) et b) le contenu en eau (THL2) de la deuxième couche du sol (THL2). L'argile est fixée à 5 % et le sable varie de 1 à 95 %. Les variations du pourcentage de sable sont indiquées par les lignes grises fines.49
- Figure 3.5 Un exemple pour le lac Clair d'un test de sensibilité du pourcentage d'argile sur a) la température (TG2) et b) le contenu en eau (THL2) de la deuxième couche du sol. Le sable est fixé à 75 % et le % d'argile varie de 1 à 25 %.50
- Figure 3.6 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité sur la variation de porosité de la dernière couche avant la roche mère sur la température de la deuxième couche du sol (TG2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de TG2 sur dix ans de chaque expérience.51
- Figure 3.7 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité de la variation de la porosité de la dernière couche avant la roche mère sur le contenu en eau de la deuxième couche du sol (THL2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de THL2 sur dix ans de chaque expérience.52
- Figure 3.8 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité de la variation de la porosité de la deuxième couche du sol sur la température de la deuxième couche du sol (TG2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de TG2 sur dix ans de chaque expérience.53
- Figure 3.9 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de la porosité de la deuxième couche du sol sur le contenu en eau de la deuxième couche du sol (THL2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de THL2 sur dix ans de chaque expérience.54
- Figure 3.10 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de la porosité de la deuxième couche du sol sur le contenu en eau de la troisième couche du sol (THL3). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité

en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de THL3 sur dix ans de chaque expérience.54

Figure 3.11 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de la porosité des couches 3 à 9 du sol sur la température de la deuxième couche du sol (TG2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de TG2 sur dix ans de chaque expérience.55

Figure 3.12 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de la porosité des couches 3 à 9 du sol sur le contenu en eau de la deuxième couche du sol (THL2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de THL2 sur dix ans de chaque expérience.56

Figure 3.13 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de la porosité des couches 3 à 9 du sol en fonction de la profondeur sur la température de la deuxième couche du sol (TG2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de TG2 sur dix ans de chaque expérience.57

Figure 3.14 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de la porosité des couches 3 à 9 du sol en fonction de la profondeur sur le contenu en eau de la deuxième couche du sol (THL2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de THL2 sur dix ans de chaque expérience.58

Figure 3.15 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de la porosité des couches 3 à 9 du sol en modifiant la pente de la formule empirique de CLASS 3.6 (porosité en fonction de la % de sable) sur température de la deuxième couche du sol (TG2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. La figure à gauche indique la série temporelle de TG2 sur dix ans de chaque expérience.59

Figure 3.16 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de la porosité des couches 3 à 9 du sol en modifiant la pente de la formule empirique de CLASS 3.6 (porosité en fonction de la % de sable) sur le contenu en eau de la deuxième couche du sol (THL2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. La figure à gauche indique la série temporelle de THL2 sur dix ans de chaque expérience.59

Figure 3.17 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de KSAT de la dernière couche avant la roche mère sur la température de la deuxième couche du sol (TG2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où KSAT a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de KSAT en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de TG2 sur dix ans de chaque expérience.60

Figure 3.18 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de KSAT de la dernière couche avant la roche mère sur le contenu en eau de la deuxième couche du sol (THL2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où KSAT a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de KSAT en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de THL2 sur dix ans de chaque expérience.61

Figure 3.19 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de KSAT des couches 3 à 9 du sol en fonction de la profondeur sur la température de la deuxième couche du sol (TG2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où KSAT a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de TG2 sur dix ans de chaque expérience.62

Figure 3.20 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de KSAT des couches 3 à 9 du sol en fonction de la profondeur sur le contenu en eau de la deuxième couche du sol (THL2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où KSAT a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de THL2 sur dix ans de chaque expérience.62

Globalement, les résultats de ces tests de sensibilité montrent clairement que la température des sols est très peu affectée par les variations de contenu en eau induites par les variations forcées de texture, de porosité ou de conductivité hydraulique. Par contre, le contenu en eau peut être très affecté par les variables testées et énumérées ci-haut mais dans la grande majorité des cas, seulement des valeurs extrêmes de ces variables arrivent à produire de grands changements de contenu en eau. Dans une gamme réaliste de variation comme celle que l'on pourrait rencontrer *in situ*, les changements de contenu en eau sont relativement faibles. Il s'ensuit que d'autres pistes doivent être abordées pour obtenir un impact important sur le contenu en eau, dont des modifications au fonctionnement de CLASS, ce que nous abordons dès la prochain section.63

Figure 4.1 Comparaison de 2 simulations effectuées avec CLASS 3.6 de la température et du contenu en eau de la couche 2 du sol.66

Figure 4.2 L'effet de l'ajout d'une couche d'humus sur les températures estivales des sols du bassin versant du Lac Tirasse.67

Figure 4.3 L'effet d'une nouvelle formulation de la conductivité thermique de la neige sur la température des sols du bassin versant du Lac Tirasse.68

Figure 4.4 Simulations de CLASS 3.6 en mode «colonne» pour les trois sites forestiers et dans lesquels les valeurs minimales de résistance stomatale (RSMIN) ont été ajustées pour mieux faire correspondre les valeurs annuelles des termes hydrologiques de base69

Traits bleus : précipitation (PCP) ; Traits oranges : évapotranspiration (EVAP) ; Traits jaunes : écoulement à l'exutoire du bassin (ROF).69

Figure 4.5 Exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.1m) d'un test de sensibilité d'un changement de l'indice de drainage (XDRAIN) du sol sur la température de la deuxième couche du sol (TG2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où XDRAIN a été modifié. La figure indique la série temporelle de TG2 sur dix ans de chaque expérience. La valeur originale de XDRAIN = 1 (courbe rouge).71

Figure 4.6 Exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.1m) d'un test de sensibilité d'un changement de l'indice de drainage (XDRAIN) du sol sur le contenu en eau de la deuxième couche du sol (THL2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où XDRAIN a été modifiée. La figure à gauche indique la série temporelle de THL2 sur dix ans de chaque expérience. La figure à droite indique le profil des valeurs moyennes estivales (JJA) en fonction de la profondeur. La valeur originale de XDRAIN = 1 (courbe rouge).....71

Figure 4.7 Exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.1m) d'un test de sensibilité d'un changement de l'indice de drainage (XDRAIN) du sol sur la température de la deuxième couche du sol (TG2). Le sol est codé organique (flag -2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où XDRAIN a été modifiée. La figure indique la série temporelle de TG2 sur dix ans pour chaque expérience. La valeur originale de XDRAIN = 1 (courbe rouge).72

Figure 4.8 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.1m) d'un test de sensibilité d'un changement de l'indice de drainage (XDRAIN) du sol sur le contenu en eau de la deuxième couche du sol (THL2). Le sol est codé organique (flag -2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où XDRAIN a été modifiée. La figure à gauche indique la série temporelle de THL2 sur dix ans de chaque expérience. La figure à droite indique le profil des valeurs moyennes estivales(JJA) en fonction de la profondeur. La valeur originale de XDRAIN = 1 (courbe rouge).73

Figure 4.9 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.1m) d'un test de sensibilité d'un changement de l'indice de drainage (XDRAIN) du sol sur la température de la deuxième couche du sol (TG2). Dans ce cas CLAY = 80% et SAND = 20%. Chaque couleur de courbe indique une expérience où XDRAIN a été modifiée. La figure indique la série temporelle de TG2 sur dix ans de chaque expérience. La valeur originale de XDRAIN = 1 (courbe rouge).74

Figure 4.10 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.1m) d'un test de sensibilité d'un changement de l'indice de drainage (XDRAIN) du sol sur le contenu en eau de la deuxième couche du sol (THL2). Dans ce cas CLAY = 80% et SAND = 20%. Chaque couleur de courbe indique une expérience où XDRAIN a été modifiée. La figure de gauche indique la série temporelle de THL2 sur dix ans pour chaque expérience. La figure de droite indique le profil des valeurs moyennes estivales (JJA) en fonction de la profondeur. La valeur originale de XDRAIN = 1 (courbe rouge).75

Figure 5.1 Changements de la température (°C) de la couche 2 du sol (10-35 cm) projetés par MRCC4 couplé à CLASS 3.6 (ajb vs aiz) pour l'horizon 2080 par rapport à la période de référence des années 1980.78

Figure 5.2 Changements du contenu en eau (mm) de la couche 2 du sol (10-35 cm) projetés par MRCC4 couplé à CLASS 3.6 (ajb vs aiz) pour l'horizon 2080 par rapport à la période de référence des années 1980.79

Les changements de contenu en eau projetés montrent plus de variabilité spatialement que les changements de températures (Figure 5.2). Pour la majorité du territoire forestier du Québec, on projette des diminutions de l'ordre de 3 à 28% avec des pointes à 48% à certains endroits. Il est intéressant de noter qu'en Ontario et dans le nord-est des États-Unis, les diminutions seront généralement plus importantes qu'au Québec. Il faut aussi mentionner que certaines augmentations très fortes au nord du territoire sont dues au fait que le sol sera plus souvent dégelé que pendant la période de référence. C'est donc surtout un effet du passage de « eau solide » à « eau liquide » dans le modèle, qui est responsable des changements.....79

Il est important de mentionner que les résultats présentés ici sont préliminaires et que ceux de la prochaine simulation pourront être différents. C'est pourquoi nous ne souhaitons pas nous avancer en détails dans l'interprétation des résultats. Par contre, les comparaisons que nous ferons dans un

proche avenir entre les différentes simulations seront riches d'enseignement sur le comportement du modèle et nous permettrons de pousser plus loin l'interprétation des résultats et des mécanismes sous-jacents.79

Figure 6.3 Illustration de l'effet de changements de température et de contenu en eau du sol selon divers scénario climatiques d'augmentation de température et de diminution de contenu en eau. Tous les changements sont exprimés en différence par rapport à une condition initiale pour (A) l'ensemble de l'année (T : 3.65 °C, eau sol : 26%) et (B) la saison de croissance (T : 6.65 °C, eau sol : 35%).87

Figure 6.4 Taux de nitrification estimés avec la méthode des « buried bags » pour des sols minéraux et organiques récoltés à 13 sites forestiers, dont 2 érablières, 9 sapinières et 2 pessières. Adapté de Boutin et al. (2005).90

Figure 6.5 Taux de minéralisation en NH_4 et en NO_3 pour les sols organiques des sites Clair, Laflamme et Tirasse estimés avec la méthode des « buried bags » enfouis *in situ* pendant un mois. Adapté de Ste-Marie et Houle (2006).91

Figure 6.6 Teneurs en N total foliaire et en N minéral dans les sols organiques de trois sites (Bernatchez, Simoncouche, Laflamme) soumis à des expériences de chauffage de sol (+ 4 degrés oC) et d'ajouts en N via des précipitations artificielles pulvérisées sur la canopée d'arbres adultes (épinette noire pour BER et SIM et sapin baumier pour LAF). Les résultats illustrent l'absence d'effets des traitements. Les résultats sont tirés de Lupi et al. (2012) pour les sites SIM et BER et de D'Orangeville et al. (2013) pour le site LAF.93

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Caractéristiques des sites étudiés.	19
Tableau 1.2 Caractéristiques des simulations prévues avec le MRCC4 couplé à CLASS pour le domaine Québec (QC).	27
Tableau 2.1 Évaluation de la performance des modèles ForHyM pour les trois horizons de sols. Le coefficient de détermination (R^2) est obtenu en comparant les patrons annuels ainsi que les données mensuelles du contenu en eau observés à ceux simulés pour la période de calibration.	32
Tableau 2.2 Évaluation de la calibration des modèles ForHyM pour le bilan hydrique.	33
Tableau 2.3 Évaluation de la calibration des modèles ForSTeM pour les trois horizons de sols. Le coefficient de détermination (R^2) est obtenu en comparant les patrons annuels ainsi que les données mensuelles de températures de sol observées et celles simulées pour la période de calibration.	34
Tableau 2.4 Variation annuelle du contenu en eau dans de sol pour trois horizons futurs, selon les projections du scénario de changements climatiques du MRCC 4.2 AET.	37
Tableau 2.5 Variation annuelle de la température du sol pour trois horizons futurs, selon les projections du scénario de changements climatiques du MRCC 4.2 AET.	40
Tableau 4.1 Modifications apportées à CLASS 3.6 afin d'améliorer les régimes thermiques et hydriques des sols simulés.	64
Tableau 5.1 Résumé des simulations de MRCC4 couplé à CLASS terminées et en cours de production.	77
Tableau 6.1 Analyse de régression multiple de la concentration des cations basiques dans les eaux de surfaces et de conditions environnementales. Les R^2 des modèles globaux, les coefficients de régression et les niveaux de signification statistique sont présentés, ainsi que les R^2 cumulés et ajustés selon l'ordre dans lequel les variables environnementales ont été retenues dans les modèles par une analyse STEPWISE. Tiré de Augustin et al. (2013b). TAAM : température annuelle air moyenne, TAAMF : température annuelle air moyenne pendant l'automne, TAAMC : température annuelle air moyenne pendant l'hiver.	82
Tableau 6.3 Récapitulatif des variables climatiques apparaissant dans les 5 meilleurs modèles sélectionnés, de leur occurrence et de leur effet sur les concentrations des cations basiques dans les ruisseaux de chaque site. TC et TB : température horizon C et B respectivement. Pcp: précipitation. T : température.	84
Tableau 6.4 Résultats des ratios des taux d'altération chimique pour le modèle régional AET pour la période 2071-2100 (tableau tiré de Houle et al. 2014).	88
Tableau 6.5 Dépôts atmosphériques azotés, accumulation annuelle d'azote dans la végétation et stocks d'azote dans le sol de 3 bassin-versants forestiers du Québec.	91
Tableau 6.6 Récapitulatif des variables explicatives apparaissant dans les 5 meilleurs modèles sélectionnés, de leur occurrence et de leur effet sur les concentrations en azote minéral dans les ruisseaux de chaque site. TC et TB : température horizon C et B respectivement. Pcp: précipitation. Les modèles pour le lac Laflamme excluent les variables de composition chimique de la pluie	

(Bouffard et al. 2013) pour éliminer une corrélation potentiellement fortuite due aux tendances synchrones du sulfate dans les précipitations et du nitrate dans le ruisseau. Les variations du nitrate dans le ruisseau au début de la série d'observation étant causées par une épidémie de tordeuse (Houle et al. 2009).95

Section 1. Introduction, contexte et méthodologie

Les changements climatiques affectent et affecteront la plupart des écosystèmes forestiers. Entre autres, une modification des températures de l'air et du régime de précipitations pourrait affecter l'humidité et la température du sol, variables qui influent sur un grand nombre de processus des écosystèmes forestiers. Le réchauffement appréhendé altèrera les relations complexes entre la forêt et le climat, affectant ainsi plusieurs processus tels que la dynamique des populations, la productivité primaire et le régime des incendies de forêts. Les forêts du Québec pourraient être particulièrement sensibles aux changements climatiques.

1.1 Contexte / objectifs

La température et l'humidité des sols forestiers sont des variables fondamentales pour les écosystèmes forestiers. Ces variables ont un impact sur la distribution des essences et la croissance des forêts, le recyclage des éléments nutritifs et aussi sur la fréquence des feux de forêts. Cependant, bien qu'il existe plusieurs scénarios climatiques pour la température de l'air et les précipitations, il n'existe que très peu d'études qui se sont intéressées à l'environnement climatique des sols forestiers. Ce projet vise donc à produire les premiers scénarios de l'évolution de la température et de l'humidité des sols forestiers du Québec dans le futur. Cette information sera très utile aux gestionnaires de la forêt pour aider à l'interprétation d'une foule d'impacts des changements climatiques (CC) sur les forêts. Ce projet comporte différentes étapes. La première est d'utiliser des modèles non couplés au MRCC, soit le modèle FORHYM_FORSTEM et le schéma de surface du MRCC (CLASS « off line ») pour vérifier leur capacité à bien prédire des séries de températures et de contenu en eau de sols qui sont mesurés sur une base quotidienne dans trois sites forestiers du MRN. Dans un deuxième temps, nous visons à améliorer le réalisme des champs géophysiques du MRCC en y intégrant des mesures à haute résolution spatiale de variables clés pour les prédictions concernant les sols provenant de 14 000 sites forestiers suivis par le MRN. Troisièmement, le MRCC contenant une version de CLASS et des champs géophysiques améliorés, a été utilisé pour prédire la température et l'humidité des sols forestiers pour l'ensemble du Québec forestier. Parallèlement à ce travail, une étude des relations entre la température et l'humidité du sol et la disponibilité en éléments nutritifs a été faite à partir des mesures faites dans les bassins versants forestiers gérés par le MRN qui sont suivis avec une grande résolution temporelle. Finalement, à partir des simulations « améliorées » de température et d'humidité du sol du MRCC, une première évaluation des changements de la fertilité des sols forestiers dans le futur est en cours et dont les premiers résultats sont présentés. Ce projet met en œuvre l'utilisation de données existantes qui ont une grande valeur scientifique et réunit des collaborateurs avec des expertises variées dans le domaine des sols forestiers et de leur fertilité ainsi que dans le domaine de la modélisation climatique.

1.2 Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature

La température globale moyenne a augmenté à une vitesse de 0.07°C par décennie au courant du siècle dernier et les précipitations totales ont généralement aussi augmenté pour les régions de l'hémisphère nord (IPCC 2007). En Amérique du Nord, une augmentation de la température moyenne de près de 4°C et une augmentation de 7% des précipitations annuelles sont projetées pour l'horizon 2080-2099 (IPCC 2007). Plus régionalement, sur le sud du Québec, des projections basées sur un ensemble de simulations globales et régionales, projettent un réchauffement de 3 à 5°C pour 2080-2099 et une augmentation des précipitations, particulièrement au printemps, de l'ordre de 5 à 17% (Logan et al 2011).

Les changements projetés affecteront l'humidité et la température du sol, variables qui influent sur plusieurs processus tels que la germination des graines et le développement des racines fines. De plus, un contenu en eau du sol faible est associé à une augmentation de la probabilité des feux de forêts, tandis que des températures d'été chaudes combinées à une faible teneur en eau peuvent créer des conditions de stress hydrique (Rennenberg et al. 2006). Une diminution de l'humidité du sol pourrait aussi réduire les échanges d'eau et de CO₂ entre la forêt et l'atmosphère en induisant la fermeture des stomates pour limiter les pertes d'eau (Gessler et al. 2004; Hernandez-Santana et al. 2009; Rennenberg et al. 2006). De plus, des sols chauds et secs diminuent l'assimilation du nitrate par les arbres (Gessler et al. 2004). Enfin, sur de longues périodes, des changements dans l'humidité du sol pourraient aussi avoir un impact sur la distribution et la composition des forêts.

Des changements de température et d'humidité peuvent aussi avoir des impacts indirects sur la dynamique des forêts en contrôlant et affectant plusieurs processus biologiques et chimiques importants pour l'écologie des forêts. Par exemple, des changements dans la température du sol peuvent influencer des réactions biochimiques dépendantes de la température comme la décomposition de la matière organique, liée à l'activité microbienne (Davidson et al. 1998). D'un autre côté, la relation entre la température et la décomposition ou la respiration dépend aussi de l'humidité du sol. Si l'humidité du sol tombe sous un certain niveau, les microorganismes du sol peuvent souffrir de dessiccation, limitant ainsi leur activité (Davidson et al. 1998). Des températures de sol élevées peuvent aussi influencer d'autres processus tels que les taux de libération d'éléments nutritifs du sol en lien avec l'activité microbienne (Melillo et al. 2002) ou l'altération chimique du sol minéral qui contrôle la libération des éléments solubles (White et Blum 1995; Gislason et al. 2009; Houle et al. 2010). Par conséquent, une augmentation des températures accompagnée d'un maintien de l'humidité des sols pourrait avoir un effet de fertilisation potentiel et stimuler la productivité forestière (Luxmoore et al. 1993; Melillo et al. 2002).

Étant donné l'importance de la température et de l'humidité du sol sur la dynamique des forêts, il est essentiel de mieux comprendre comment les changements climatiques affecteront les conditions futures des sols. Par contre, à ce jour, le nombre de scénarios climatiques futurs pour les conditions de sol est limité comparativement à ceux disponibles pour la température de l'air et les précipitations. Les changements d'humidité et de température du sol ne peuvent pas être directement déduits des changements projetés de la température de l'air ou des précipitations, particulièrement sur une base mensuelle ou saisonnière. Par exemple, une augmentation plus importante de la température de l'air en hiver comparativement à l'été est projetée mais pendant l'hiver, les sols forestiers sont isolés de la température de l'air par un couvert de neige. De plus, une augmentation des

précipitations est projetée pour la saison hivernale tandis que peu de changements sont anticipés pour la saison de croissance. Par conséquent, il est envisageable, que, durant la saison de croissance, une hausse de la température de l'air, combinée à de faibles changements dans les précipitations, puisse induire une réduction de l'humidité du sol causée par une augmentation de l'évapotranspiration. Bien que cette hypothèse soit plausible, une procédure de modélisation robuste est requise afin de la tester. Malgré le fait que les modèles globaux et régionaux du climat aient un schéma de surface qui permet de diagnostiquer la température et l'humidité du sol, leur utilité pour directement obtenir des prédictions pour des sites forestiers spécifiques est limitée car leur résolution spatiale est trop grossière pour reproduire adéquatement les caractéristiques des sols propres à chaque site (présence de sols organiques, profondeur du sol organique, profondeur des sols minéraux, profondeur de la zone racinaire, contenu en argile, porosité du sol, type de végétation, etc...). La rareté des études rapportant des projections de conditions de sols s'explique aussi par le fait qu'il existe très peu de données observées *in situ* sur de longues périodes pouvant offrir la possibilité de calibrer ou valider des modèles.

Dans cette étude, des modèles qui simulent les processus de flux hydrologiques (ForHyM) et thermiques (ForSTeM) des sols forestiers (Yin et Arp 1993) ont été utilisés. Ces modèles ont été sélectionnés car ils ont été conçus explicitement pour les écosystèmes forestiers et ont été validés pour de nombreux sites en forêts tempérées et boréales (Arp et Yin 1992; Balland et al. 2006; Bhattin et al. 2000; Houle et al. 2002; Yin et Arp 1993).

1.3 Méthodologie/Données

Dans un premier temps, un modèle simulant les flux hydrologiques et les transferts de chaleur dans les bassins versants forestiers (ForHyM+ForSTeM) sera utilisé pour prédire l'influence du climat sur l'humidité et la température du sol (Arp et Yin 1992; Yin et Arp 1993; Houle et al. 2002). Le sous-modèle ForHyM permet de simuler les variations du contenu en eau dans le sol ainsi que les principaux flux hydrologiques entre les compartiments d'un écosystème forestier. Le sous-modèle ForSTeM permet quant à lui de simuler les températures du sol aux profondeurs désirées. Le transfert de chaleur latente dû aux événements de gel-dégel ainsi que les modifications des propriétés thermiques du sol sont également considérés dans ce modèle. Nous allons calibrer ce modèle pour trois écosystèmes forestiers distincts (érablière, sapinière et pessière) à partir des caractéristiques des sites (densité du couvert, texture des sols, profondeurs des horizons, étendue de la zone racinaire, etc.) et des valeurs observées à haute résolution temporelle de température et d'humidité des sols à différentes profondeurs (voir plus bas). Après l'étape de calibration, le modèle servira à générer des données de température et d'humidité de sol entre 1971 et 2100. Premièrement, à partir de données météo observées aux trois sites afin de combler des valeurs manquantes dans les séries ou d'allonger des séries dans le passé afin de les mettre en lien avec des observations de la disponibilité des éléments nutritifs (voir plus bas) pour lesquelles des séries temporelles à plus long terme sont disponibles. Deuxièmement, les modèles calibrés aux trois sites seront utilisés pour prédire l'évolution future de la température et de l'humidité des sols forestiers jusqu'en 2100 à partir de différents scénarios climatiques. Ces projections seront utilisées pour faire un premier diagnostic de l'évolution de la température et de l'humidité des sols dans le futur et - ce modèle a déjà été utilisé avec succès dans le passé à plusieurs sites - serviront aussi de séries de références pour fin de

comparaison avec les projections qui seront faites avec le Schéma de Surface Canadien (Canadian Land Surface Scheme, CLASS).

CLASS a été développé à la fin des années 1980 afin d'être couplé avec le Modèle Canadien de Circulation Générale (Canadian Global Climate Model, GCM) (Verseghy, 1991; Verseghy *et al.*, 1993). CLASS est en fait un module qui est spécialisé dans le calcul des variables de surface liées aux processus thermodynamiques et hydrologiques. Le modèle utilise les champs fournis par le modèle atmosphérique pour calculer les champs de surface qui sont à leur tour retournés au modèle atmosphérique afin d'assurer le couplage sol-atmosphère. Dans cette étape, CLASS sera utilisé en mode « colonne », i.e., non couplé au MRCC. Tout comme pour FORHYM_FORSTEM, CLASS sera calibré pour trois sites à partir des caractéristiques des sites et des mesures de températures et d'humidité des sols. Cette étape sera cruciale pour évaluer le comportement de CLASS principalement suite à l'ajout d'une couche de sol organique et de modifications à la conductivité thermique du couvert de neige. Des tests préliminaires ont démontré l'importance de ces deux aspects pour déterminer l'environnement hydro-climatique des sols. Les améliorations apportées à CLASS dans cette étape seront « transférées » à l'intérieur du MRCC.

1.3.1 Description des sites d'études et de données disponibles

Trois sites étudiés intensivement par la Direction de la Recherche Forestière (DRF) du MRN ont été mis à profit pour leurs nombreuses mesures météorologiques et leurs mesures de températures et d'humidité du sol à différentes profondeurs. Les concentrations d'éléments nutritifs dans la solution de sol y sont aussi mesurées. Ces trois sites ont été sélectionnés pour représenter les trois grandes forêts climatiques du Québec, i.e. l'érablière, la sapinière et la pessière.

Bassin versant Clair

Le bassin versant du lac Clair est situé à environ 50 km au nord-ouest de la ville de Québec (Figure 1). Le couvert végétal de cette forêt est dominé par des espèces feuillues (83%), dont principalement l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) en association avec le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton) et l'hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrh.). On y retrouve aussi, en plus faible proportion (17%), des essences de conifères telles que le sapin baumier (*Abies balsamea*) et l'épinette rouge (*Picea rubens*) (Houle *et al.*, 1997). Les principales caractéristiques de ce bassin versant sont décrites dans le tableau 2.1.

Bassin versant Laflamme

Le bassin versant du lac Laflamme est situé à environ 70 km au nord de la ville de Québec (Figure 1). Dans cette forêt, on retrouve principalement du sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill) parsemé d'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) et de bouleau blanc (*Betula papyrifera* Marsh.). Le sol est couvert d'un tapis végétal contenant des mousses, de l'*Oxalis montana* ainsi que du lichen (Duchesne et Houle, 2008). On y retrouve également une quantité importante de débris de bois au sol (Houle et Moore, 2008).

Bassin versant Tirasse

Le bassin versant Tirasse est situé dans la réserve faunique Ashuapmushuan, à environ 120 km au nord de Saint-Félicien (Figure 2.1). La végétation s'y trouvant est majoritairement composée d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) et de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) (Duchesne et Houle, 2006). Le sol est recouvert d'un épais tapis de mousses (Houle et Moore, 2008). Il est également important de noter que dans le sol, plus particulièrement dans l'horizon B, se trouve une mince couche de fer solidifié diminuant la perméabilité du sol par endroit. Finalement, ce bassin versant ne contient aucun lac. L'exutoire est en fait un ruisseau de premier ordre prenant naissance dans une tourbière de 2.5 hectares (Duchesne et Houle, 2006).

Tel que pour les sites Clair et Laflamme, des séries de données météorologiques datant d'au moins 10 ans sont disponibles. La température de l'air a été mesurée quotidiennement depuis septembre 1996. Les précipitations ont été mesurées quotidiennement à partir d'octobre 2000 par le pluviomètre et à partir de septembre 1996 par la méthode du « tipping ». Des mesures hebdomadaires des précipitations ont été prises par le collecteur automatique et le collecteur « bulk » à partir de janvier 1997. Le débit quotidien à l'exutoire a été enregistré à partir de novembre 1996.

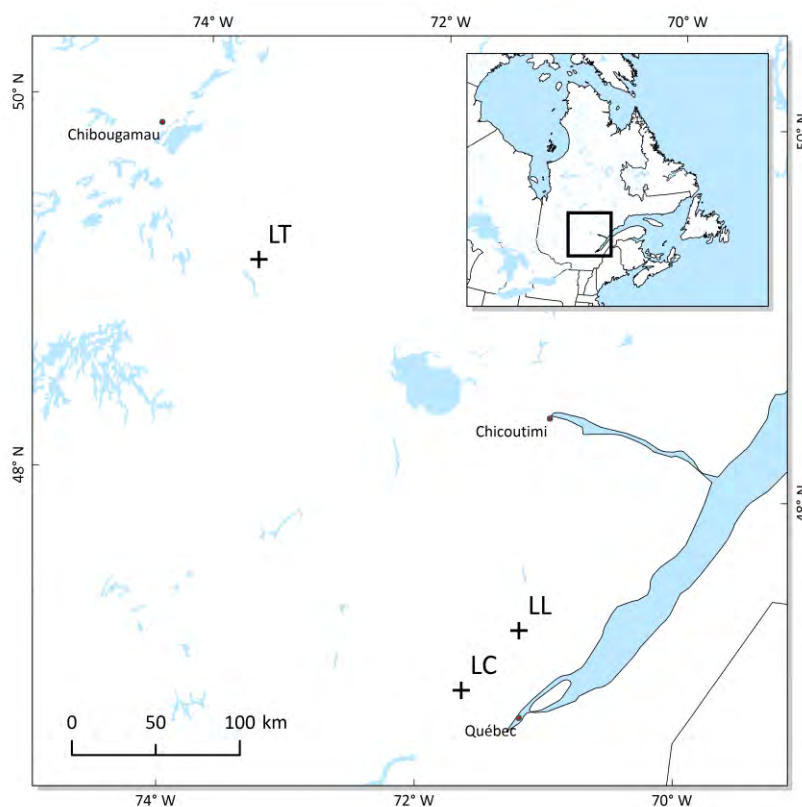


Figure 1.1 Localisation des trois bassins versants à l'étude : Lac Clair (LC), Lac Laflamme (LL), et Lac Tirasse (LT).

Tableau 1.1 Caractéristiques des sites étudiés.

	Clair	Laflamme	Tirasse
Coordonnées géographiques	46°57'N, 71°40'W	47°19'N, 71°07'W	49°12'N, 73°39'W
Altitude (m, ASL)	270-390	770-860	400-450
Superficie du bassin versant (ha)	226	68	56
Type de végétation	<i>Acer saccharum</i>	<i>Abies balsamea</i> – moss	<i>Picea mariana</i> - moss
Classe de sol¹	Ferro-Humic Podzol	Orthic Humo-Ferric Podzol	Humo-Ferric Podzol
Texture du sol	Loam sableux	Loam sableux	Sable loameux
Profondeur de la couche d'humus (mm)	50	168	127
Profondeur du sol minéral (horizon b) (mm)	525	630	495
Température annuelle de l'air (°C)	4.2	1.1	1.0
Précipitations annuelles (mm année⁻¹)	1414	1270	924
Débit annuel à l'exutoire (mm année⁻¹)	855	914	610
Période de mesure des éléments nutritifs (Ca, Mg, K, NO₂, NH₄)	1987-2008	1981-2008	1997-2008

¹ Selon le système canadien de classification des sols (Comité d'experts sur la prospection pédologique d'Agriculture Canada, 1987).

Pour tous ces sites, des séries de données météorologiques d'une durée d'au moins 10 ans sont disponibles. Ces données comprennent notamment, la température de l'air, les précipitations, la direction et la force des vents, l'humidité relative, la radiation solaire, ainsi que la température et le contenu en eau de l'humus et des horizons minéraux B et C. Ces données seront utilisées pour faire rouler les modèles et aussi les calibrer sur les observations réelles. Des mesures exhaustives de la disponibilité des éléments nutritifs dans les sols et les eaux de surface sont aussi faites à chacun des sites notamment en prélevant des échantillons de pluies, de pluvio-lessivats, de solution de sols à différentes profondeurs et

de ruisseaux sur une base hebdomadaire. Des descriptions détaillées relativement aux sondes, aux appareils de récolte et aux analyses chimiques sont disponibles dans d'autres études (Duchesne et Houle, 2006; 2008). L'étude des relations entre la disponibilité des éléments nutritifs et les températures et humidité du sol sera faite pour ces trois sites (voir plus bas).

1.3.2 Collecte de données d'humidité et de température des sols

Des mesures quotidiennes des contenus volumétriques en eau des sols ont été mesurées à l'aide de la réflectométrie de domaine temporel (Campbell Scientific, CS615) et les températures avec des sondes à thermistance (Thermometric, DC95F232V et YS1, 401). Les collectes de ces mesures ont débuté en décembre 1997 pour le Lac Clair, en janvier 1999 pour le Lac Laflamme et en novembre 1996 pour le Lac Tirasse. Les deux variables ont été mesurées à trois profondeurs correspondant à la couche d'humus (située à 2 cm au dessus de la limite entre la couche organique et le sol minéral), à l'horizon B (34 cm au Lac Clair et 22 cm aux Lacs Laflamme et Tirasse) et à l'horizon C (70 cm au Lac Clair et 81 cm aux Lacs Laflamme et Tirasse).

1.3.3 Les modèles ForHyM et ForSTeM

1.3.3.1 Description des modèles

ForHyM

Le modèle qui a été utilisé pour simuler la variation du contenu en eau dans le sol est le modèle ForHyM (Arp et Yin, 1992). Ce modèle simule les principaux flux hydrologiques entre les compartiments d'un écosystème forestier. La simulation des processus hydrologiques se fait de la manière suivante (Figure 2.2): (i) l'eau entre dans le système forestier sous forme de précipitations liquides ou solides; (ii) les précipitations peuvent alors être interceptées par le couvert forestier ou encore atteindre le sol, soit en traversant le couvert végétal (« throughfall ») ou par écoulement sur les arbres; (iii) la neige atteignant le sol peut être évaporée ou elle peut s'accumuler jusqu'à la fonte au printemps; (iv) l'eau atteignant l'humus s'y accumule jusqu'à l'atteinte de la capacité maximale de rétention d'eau; l'eau excédant cette limite rejoint alors l'horizon B par percolation; (v) l'eau de percolation s'accumule dans l'horizon B jusqu'à sa capacité maximale de rétention d'eau; l'eau excédant cette limite rejoint alors l'horizon C par percolation; (vi) l'eau de percolation s'accumule dans l'horizon C jusqu'à sa capacité maximale de rétention d'eau; l'eau excédant cette limite sort alors du système par percolation; (vii) une partie de l'eau contenu dans le sol peut également sortir du système par évapotranspiration ou par ruissellement de surface ou sous-terrain (Arp et Yin, 1992).

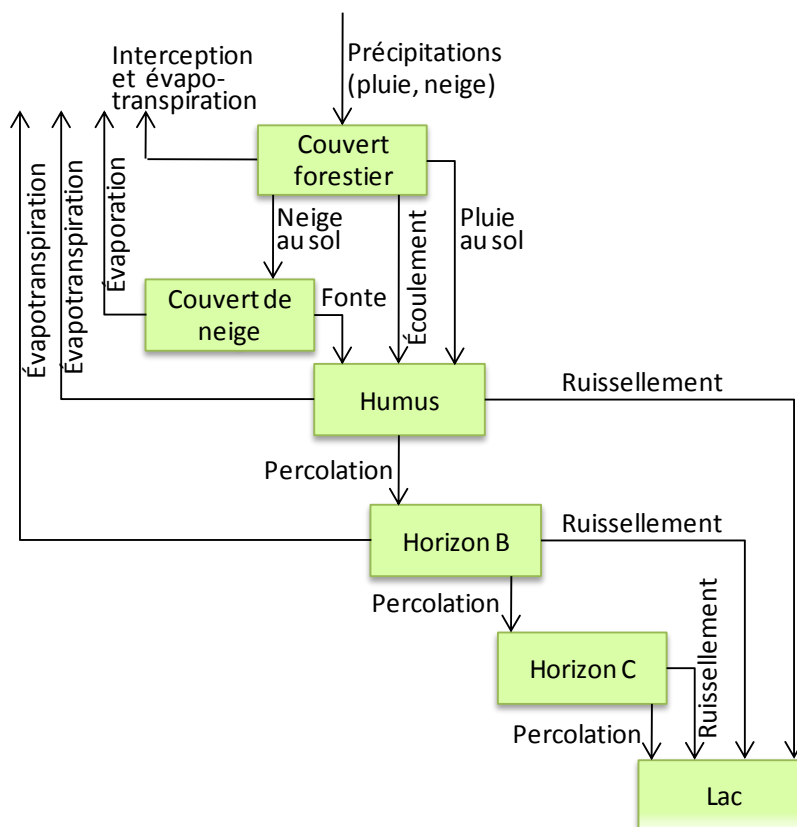


Figure 1.2 Schéma montrant les processus hydrologiques du modèle ForHyM (adapté de Arp et Yin, 1992).

ForSTeM

Le modèle ForSTeM a été utilisé pour simuler les températures de sol dans l'humus et les horizons B et C. Ce modèle simule les transferts de chaleur de manière unidimensionnelle par conduction entre les couches de sol (Figure 2.3). Les compartiments sont la neige accumulée au sol, l'humus et les horizons B et C. Le transfert de chaleur latente dû aux événements de gel-dégel ainsi que les modifications des propriétés thermiques du sol sont également considérées dans le modèle (Yin et Arp, 1993).

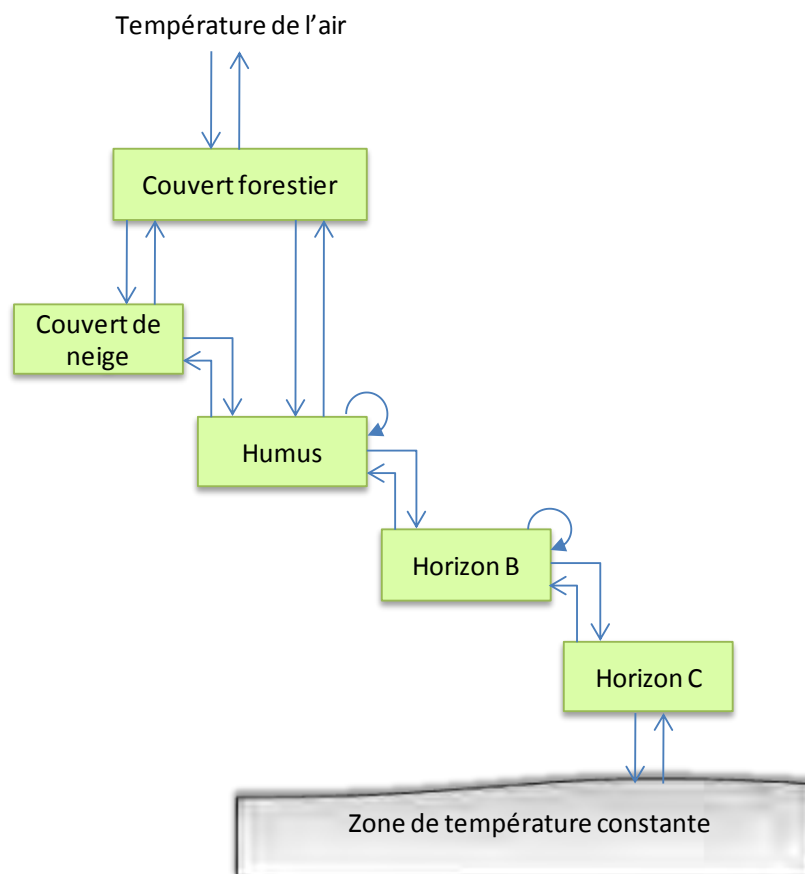


Figure 1.3 Schéma montrant les flux de transfert de chaleur dans le modèle ForSTeM (Adapté de Yin et Arp, 1993).

1.3.3.2 Calibration des modèles

ForHyM

Le modèle ForHyM requiert relativement peu de données d'observations. Les principales variables utilisées comme intrants sont les moyennes mensuelles de température de l'air, le total des précipitations mensuelles et la proportion de précipitations tombée sous forme de neige pour chaque mois. D'autres caractéristiques spécifiques au site, telles que la latitude, l'épaisseur et la texture des horizons de sol sont également nécessaires. Les observations de pluie et de température de l'air enregistrées aux stations météorologiques ont été utilisées comme intrants dans le modèle ForHyM lors de la calibration. Lorsque des valeurs de température étaient manquantes, elles ont été estimées en se basant sur l'interpolation des températures pour d'autres sites situés à proximité (BioSIM). Dans le cas des précipitations, la méthode du pluviomètre est celle qui a été utilisée. Lorsque des valeurs étaient absentes, elles ont été estimées en se basant sur les observations des autres méthodes de mesure des précipitations. Les valeurs mesurées d'humidité dans les trois couches de sol ont été utilisées

comme observations lors de la calibration. Lorsque des valeurs quotidiennes étaient manquantes, elles ont été estimées soit en interpolant les mesures prises avant et après l'arrêt des mesures, ou en se basant sur les mesures prises pour les autres réplicats.

La calibration a été faite en comparant le contenu en eau des horizons B et C simulé par ForHyM au contenu en eau observé pour la même période dans les différentes couches de sol. Aucune calibration n'a été effectuée sur la couche de l'humus étant donné l'absence d'une quantité importante d'observations ainsi que la présence d'un grand nombre de données aberrantes. Le débit simulé a été comparé à celui mesuré à l'exutoire du système. La calibration a été faite sur la plus longue période commune entre la série de données d'humidité dans le sol mesurée et celle simulée qui était fonction de la disponibilité des observations météorologiques. Dans le cas du lac Clair, la calibration s'est faite sur une période de 10 ans, soit entre les mois de janvier 1998 et décembre 2007. Pour le lac Laflamme, la calibration a été faite pour la période allant du mois de janvier 1999 au mois de décembre 2007. Pour ce qui est du bassin versant Tirasse, la calibration a été réalisée sur une période allant du mois de janvier 1997 au mois de décembre 2008.

La performance du modèle calibré a été évaluée par le coefficient de détermination (R^2) de la relation entre les valeurs de contenu en eau observées et les valeurs simulées. Le R^2 a été déterminé à l'échelle des données mensuelles ainsi que sur des patrons annuels basés sur les moyennes de chaque mois. De plus, une inspection visuelle des courbes simulées et observées a permis de s'assurer que le patron saisonnier était adéquatement reproduit. D'autres méthodes d'évaluation de la performance du modèle n'ont pu être utilisées puisque les unités des observations et des simulations n'étaient pas équivalentes. Dans le cas du débit, la méthode du biais sur le pourcentage (PBAIS) a permis d'évaluer la déviation entre les observations et les simulations. De plus, la performance du modèle a aussi été évaluée en utilisant le coefficient d'efficacité de Nash et Sutcliffe (NSE) ainsi que le ratio de déviation basé sur l'erreur type (RSR) (Nash et Sutcliffe, 1970; Moriasi *et al.*, 2007). Le coefficient NSE est une statistique normalisée qui détermine l'amplitude de la variance résiduelle comparée à la variance des observations. Le ratio RSR mesure l'erreur entre les observations et les simulations.

ForSTeM

Lorsque jumelé avec les simulations de ForHyM, le modèle ForSTeM ne requiert aucune donnée supplémentaire. Le modèle nécessite uniquement les moyennes mensuelles des températures de l'air ainsi que quelques caractéristiques spécifiques au site, telles que la profondeur des horizons de sol et des racines, le contenu en argile et la porosité. Il utilise également les valeurs mensuelles de contenu en eau du sol et la neige qui ont préalablement été simulées par le modèle ForHyM. La calibration a été faite en comparant les températures simulées pour les trois couches de sol et celles mesurées pour la même période. Lorsque des observations quotidiennes de température du sol étaient manquantes, elles ont été estimées soit en interpolant les mesures prises avant et après l'arrêt des mesures ou en se basant sur les mesures prises pour les autres réplicats. Tel que pour les simulations utilisant le modèle ForHyM, la calibration de ForSTeM a été effectuée sur une période allant des mois de janvier 1998 et décembre 2008 pour le lac Clair, du mois de janvier 1999 au mois de décembre 2008 pour le lac Laflamme ainsi que du mois de janvier 1997 au mois de décembre 2008 pour le bassin versant Tirasse.

La calibration a été faite dans le but de minimiser les écarts entre les températures du sol mesurées et celles simulées par ForSTeM, et ce, pour l'humus ainsi que les horizons B et C. L'évaluation de la performance du modèle calibré a été basée sur les coefficients de détermination (R^2) appliqués sur les données mensuelles ainsi que sur les patrons annuels.

1.3.4 Simulations climatiques

1.3.4.1 Scénarios climatiques

Afin de capturer la variabilité des projections futures de l'humidité et de la température du sol obtenue avec les modèles ForHyM et ForSTeM, six scénarios climatiques différents ont été utilisés comme intrants dans les modèles.

Premièrement, un scénario de climat futur a été produit en utilisant les sorties du modèle régional canadien de climat (MRCC 4.2.3 AET; Caya et Laprise 1999; Music et Caya 2007). Cette simulation est produite sur un domaine nord américain (AMNO) qui est basé sur une grille de 182 par 174 points, avec des tuiles de 45 km vrai à 60°N, pour la période de 1961-2100, et est pilotée à ses frontières par les champs atmosphériques provenant d'une simulation du modèle canadien couplé de climat global (MCCG3/T47 à environ 3.75 x 3.75° latitude-longitude, 4^{ième} membre; Scinocca et al. 2008; Flato et al. 2000, 2001).

Les sorties de modèles de cinq climats globaux ont également été utilisées comme intrants dans les modèles ForHyM et ForSTeM. L'utilisation d'un ensemble de simulations climatiques assure une certaine robustesse ainsi qu'une mesure quantitative de l'incertitude associée aux projections futures. La sélection des cinq modèles globaux a été effectuée à partir d'une analyse par grappe des moyennes mensuelles de la température de l'air et des précipitations totales de 81 modèles globaux (Logan et al. 2011). Les modèles globaux qui ont servi aux simulations sont MIROC 3.2 MEDRES (membre 1 SRES A1B), MUIB-ECHO-G (membre 1 SRES A1B), ECHAM 5 (membre 1 SRES A1B), MRI-CGCM 2.3.2a (membre 3 SRES A2) et MRI-CGCM 2.3.2a (membre 3 SRES B1).

1.3.4.2 Projections futures

Les projections du MRCC pour la période actuelle présentaient un écart avec les observations pour les trois sites considérés. Les biais des sorties du MRCC ont donc été corrigés avant que celles-ci soient utilisées pour les simulations de ForHyM et ForSTeM. Premièrement, les températures ont été corrigées par la méthode du biais. Pour chacun des 12 mois de l'année, le biais a été calculé en soustrayant la moyenne de l'écart entre les températures observées et celles simulées pour la même période. Les données ont ensuite été débiaisées en ajoutant le biais mensuel au mois correspondant pour toute la série de températures projetées par le MRCC (Salzmann *et al.*, 2007). Dans le cas des précipitations, la méthode de translation a plutôt été utilisée. Un facteur de correction de biais a été calculé en divisant les moyennes des observations par les valeurs simulées pour chaque percentile. La relation ainsi obtenue a alors été appliquée aux percentiles correspondants pour toute la série de précipitations simulées par le MRCC (Mpelasoka et Chiew, 2009).

Les changements de contenu en eau et de température du sol ont en fait été comparées entre la période de référence 1971-2000 et trois horizons futurs, soit 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099. Pour ce faire, la moyenne de chacune des variables simulées a été calculée pour tous les mois de l'année et ce, pour les trois périodes. Les moyennes des mois de la période de référence ont ensuite été soustraites aux moyennes des mois correspondants des horizons futurs. Un delta a ainsi été calculé pour chaque mois de chaque horizon futur. Finalement, un test de t a été effectué sur les valeurs mensuelles afin de déterminer si la variation annuelle observée entre les horizons futurs et la période de référence était significativement différente de zéro. De plus, un test de t a été réalisé pour chaque mois afin de déterminer s'il y avait une variation du patron annuel entre les horizons futurs et la période de référence.

1.3.5 Amélioration des champs géophysiques à l'intérieur du MRCC

Les champs géophysiques actuels du MRCC proviennent de Webb et al (1993). Certaines caractéristiques quant aux propriétés des sols (profondeur des couches, % sable, % argile, absence de couche de sol organique) font en sorte que la représentation physique de la réalité est rudimentaire. Bien que ces caractéristiques (ou leur manque de véracité) ont vraisemblablement un impact mitigé sur les projections climatiques du MRCC en ce qui a trait à l'atmosphère (ce sera aussi évalué dans ce projet bien que ce ne soit pas le but principal), elles ont cependant un impact considérable sur les projections de températures et d'humidité du sol à l'intérieur du MRCC comme l'ont démontré des travaux préliminaires (Logan et al. 2008). Par exemple, sans l'effet d'isolation thermique de la couche organique, le MRCC simule un gel du sol en profondeur l'hiver et des températures très chaudes l'été ce qui est contraire aux observations de terrain et au comportement de modèles non couplés calibrés sur des données observées (Houle et al. 2002). Nous avons donc voulu améliorer les champs géophysiques de façon progressive tout en évaluant l'impact des différentes étapes d'améliorations sur les simulations du MRCC (voir plus bas). Dans un premier temps l'information sur les sols de la banque CANSYS a été utilisée. Par la suite, l'information existante la plus complète et la plus pertinente possible relativement aux écosystèmes forestiers en provenance du MRN a été ajoutée.

Banque de données CANSIS et USGS

Une base de données sur grille à 1 km de résolution a été créée par Environnement Canada, tel que décrit par Szeto et al. (2000; 2008) et rendue disponible à Ouranos pour l'amélioration des champs géophysiques de CLASS. Ces données sur grille sont le résultat de la combinaison d'une base de données canadienne (CANSIS) et d'une base de données américaine (USGS/CONUS-SOIL), qui ont ensuite été traitées afin de créer une carte de distribution de textures des sols selon les trois couches de sol nominales de CLASS dont l'épaisseur est respectivement de 10 cm, 25 cm et 375cm

Données MRN

Les données sur les caractéristiques forestières et pédologiques ont été compilées à partir du système d'information forestière par tesselle (SIFORT). Cette base de données géo-référencées a été développée en partenariat par les trois principaux intervenants en protection des forêts au Québec, soit le ministère des Ressources naturelles et de la Faune,

la Société de protection des forêts contre le feu (SOPFEU) et la Société de protection des forêts contre les insectes et maladies (SOPFIM). Chaque polygone de référence spatiale (unités de 15 secondes par 15 secondes) contient de l'information sur la végétation et la station (superficie, altitude, pente, dépôt, tenure, etc.). De plus, en fonction des caractéristiques de chaque polygone, la texture du sol et l'épaisseur de la couche organique a été estimée à partir de près de 14 000 échantillons de sols provenant des grands réseaux d'inventaire forestier au Québec (Parcelles permanentes, parcelles temporaires et parcelles d'analyse de tige).

À l'aide d'un système d'information géographique, le sommaire des points SIFORT du MRN couvrant le Québec forestier a été ramené sur une grille de 1 km. Chaque pixel de 1 km a été attribuée à la valeur moyenne de texture et de profondeur des points SIFORT qui se trouve à l'intérieur du pixel. Les données sommaires ont ensuite été superposées sur les données CANSIS / USGS à la même résolution spatiale afin de créer une nouvelle base de données. Il est important de noter que les données du MRN ne couvrent que la partie forestière du Québec. Pour implantation dans le MRCC, les deux jeux de données (CANSIS/USGS & CANSIS/USGS+MRN) ont ensuite été intégrés dans les champs géophysiques globaux du MRCC à une résolution spatiale de 1/16° de degré.

1.3.6 Prédications de la température et du contenu en eau des sols forestiers pour l'ensemble du Québec

Plusieurs descriptions détaillées du fonctionnement des modèles climatiques globaux et régionaux, notamment du MRCC, sont disponibles ailleurs (voir Plummer et al. 2006, entre autres).

Tel que mentionné précédemment, une des catégories de données que CLASS 3.5 requiert à l'entrée est une base de données des propriétés des sols (textures, profondeur du substrat, etc.). Le tableau 1 présente une série d'expériences incrémentales conçues afin d'évaluer l'effet de trois de ces bases de données sur les sols et le climat du MRCC4. La base de données présentement utilisée dans le MRCC4 est celle décrite par Webb et al. (1993) et couvre une résolution spatiale d'environ 100 km. Une des nouvelles bases de données que nous voulons évaluer sera celle de «CANSIS/USGS» qui combine une base de données canadienne (CANSIS) et américaine (USGS/CONUS-SOIL). Les deux ont une résolution nominale de 1 km. Finalement, la base de données provenant du MNR a été insérée dans celle de CANSIS/USGS pour le sud du Québec. De plus, les effets de l'ajout des sols organiques et d'une nouvelle conductivité thermique de la neige seront étudiés afin de démontrer l'importance des processus d'isolation thermique sur les régimes thermiques et hydriques des sols. Notez que la version 4.2.3 du MRCC est couplée à la version 2.7 de CLASS (qui ne simule pas les sols organiques), alors que la version 4.3.1 du MRCC est couplée à la nouvelle version 3.5 de CLASS.

Tableau 1.2 Caractéristiques des simulations prévues avec le MRCC4 couplé à CLASS pour le domaine Québec (QC).

Domaine	Version de modèle MRCC	Base de données	Remarques
QC	4.2.3 (CLASS 2.7)	CANSIS/USGS	Sols organiques = NON
QC	4.3.1 (CLASS 3.5)	Webb <i>et al.</i> (1993)	Sols organiques = NON
QC	4.3.1 (CLASS 3.5)	CANSIS/USGS	Sols organiques = NON
QC	4.3.1 (CLASS 3.5)	CANSIS/USGS	Sols organiques = OUI
QC	4.3.1 (CLASS 3.5)	CANSIS/USGS+MRN	Sols organiques = OUI
QC	4.3.1 (CLASS 3.5)	CANSIS/USGS+MRN	Sols organiques = OUI + nouvelle conductivité thermique de la neige

1.3.7 Développements des modèles reliant la disponibilité en éléments nutritifs à la température et l'humidité des sols

Pour ce travail, les mesures faites aux trois bassins versants de la DRF seront mises à profit. Toutes les données seront d'abord exprimées sur une base mensuelle. Les éléments nutritifs ciblés seront les nitrates (NO_3) en raison de la limitation en azote des forêts tempérées et boréales (Vitousek 1991) et les cations basiques (Ca, Mg, K) en raison du nombre croissant d'études rapportant des carences en ces éléments autant dans les forêts tempérées du nord-est des États-Unis et du sud du Québec (Houle et al. 1997; Watmough et Dillon 2004; Courchesne et al. 2005; Johnson et al. 2008; Bedison and Johnson 2010) que pour des sites de la forêt boréale québécoise (Duchesne et Houle 2006;2008). Une attention particulière sera apporté au sodium (Na) dont les variations d'abondance sont représentatives des variations dans le taux d'altération des minéraux du sol qui est la principale source de cations basiques pour la nutrition des arbres. Cette particularité du Na est due à son comportement conservateur dans les écosystèmes forestiers, i.e. que la prise en charge par les plantes ainsi que le stockage de Na sont négligeables (Bailey et al., 2003; Duchesne and Houle, 2008). Comme en milieu continental les apports atmosphériques en Na sont faibles, les exportations des bassins sont ni plus ni moins équivalentes aux taux nets d'altération.

Les concentrations d'éléments nutritifs pour 72 lacs distribués de l'Outaouais à la Côte-Nord seront aussi rendus disponibles par l'entremise d'Environnement Canada. Pour une trentaine de ces lacs, des séries temporelles annuelles continues sont disponibles alors que pour d'autres, les séries sont entrecoupées. Ces données ont une moins grande résolution temporelle que celles des trois bassins versants de la DRF mais par contre, elles permettent d'aborder la distribution spatiale des taux d'altération le long d'un gradient climatique. En fait, ces bassins versants sont distribués entre le 45 et le 50^{ième} parallèle. Ces données seront utilisées à deux fins (variations temporelle et spatiale).

Finalement, les résultats d'une expérience de transplantation de sols forestiers le long d'un gradient latitudinal et altitudinal seront aussi utilisés pour établir des relations climat-disponibilité des éléments nutritifs. Les résultats, seront fournis par une équipe de chercheurs de la DRF qui vient tout juste de terminer une étude de trois ans.

De façon générale, les relations établies avec les approches décrites ci-dessous seront utilisées pour projeter l'abondance des éléments nutritifs dans le futur à partir des scénarios de changements de température et d'humidité de sols qui seront obtenus pour l'ensemble du Québec.

Effets du climat sur la variation temporelle de l'abondance des éléments nutritifs

Une première approche consistera à prédire les variations temporelles de l'abondance des éléments nutritifs dans la solution de sol et dans les ruisseaux des trois bassins forestiers en fonction des variations des températures et des humidités de sol observées à l'aide de modèles de régressions multiples. Les analyses seront faites sur une base mensuelle, saisonnière et annuelle pour capter la bonne échelle de variation selon le temps de réponse escompté des systèmes qui peut varier par exemple, de la solution de sol d'un humus forestier, à un ruisseau qui intègre les variations sur une plus grande superficie et conséquemment sur une échelle temporelle plus grande. Les changements d'abondance des éléments nutritifs dans la solution de sol pendant la saison de croissance d'une année à l'autre recevront une attention particulière.

Une deuxième approche consistera à utiliser un modèle quantitatif des taux de libération des cations basiques à partir des réactions d'altération. Ce modèle se nomme PROFILE (v5.0, Becker 1999) et a été construit pour des sols suédois assez semblables aux sols granitiques du bouclier canadien qui couvrent une bonne partie du Québec forestier. Il a été récemment évalué avec succès sur 22 bassins versants forestiers au Québec (Houle et al. 2012). Ce modèle prédit des taux d'altération à partir d'informations sur la minéralogie, la quantité et la qualité des précipitations et la température et le contenu en eau de la zone racinaire. Toutes ces informations sont disponibles pour les trois sites d'études. Un modèle PROFILE spécifique à chaque site sera utilisé pour prédire des taux d'altération annuels pour les périodes d'observation qui seront ensuite comparées aux exportations de cations (le Na sera considéré plus spécifiquement étant donné son comportement conservateur) des profils de sols sous la zone racinaire et aux exportations à la sortie des bassins. D'ailleurs, pour le Na, l'exercice avec PROFILE sera aussi fait en utilisant les données de lacs drainant 30 bassins forestiers du réseau des lacs Québécois d'environnement Canada situés dans le sud du Québec pour lesquels des séries temporelles de chimie sont disponibles. Un signal climatique a récemment été décelé dans la chimie de ces lacs (Houle et al. 2010).

Effets d'un gradient spatial du climat sur les taux de libération des cations basiques

Pour cette étape, les données d'exportations des cations basiques pour 72 bassins versants forestiers de l'Outaouais drainés par de petits lacs de tête ont été utilisées. À partir des données d'exportations, des taux d'altération pour le Ca, Mg, K, et Na ainsi que pour la somme de ces cations seront calculés pour la période 1989-1996. Cette fenêtre de temps sera utilisée parce que les données sont disponibles pour tous les lacs en même temps, ce qui permettra d'éliminer de possibles tendances temporelles. Des séries climatiques de températures et de précipitations mensuelles seront reconstituées pour chaque bassin. À partir des données climatiques, des températures et des humidités de sols seront simulés pour la période 1989-1996. Finalement, toutes les données climatiques ainsi que les données cartographiées de minéralogie, composition forestière, altitude, pente moyenne, etc. seront

utilisées à l'aide d'analyses statistiques multivariées pour quantifier l'effet « climat » à l'intérieur de la région étudiée qui s'étend entre le 45 et le 50^{ième} parallèle.

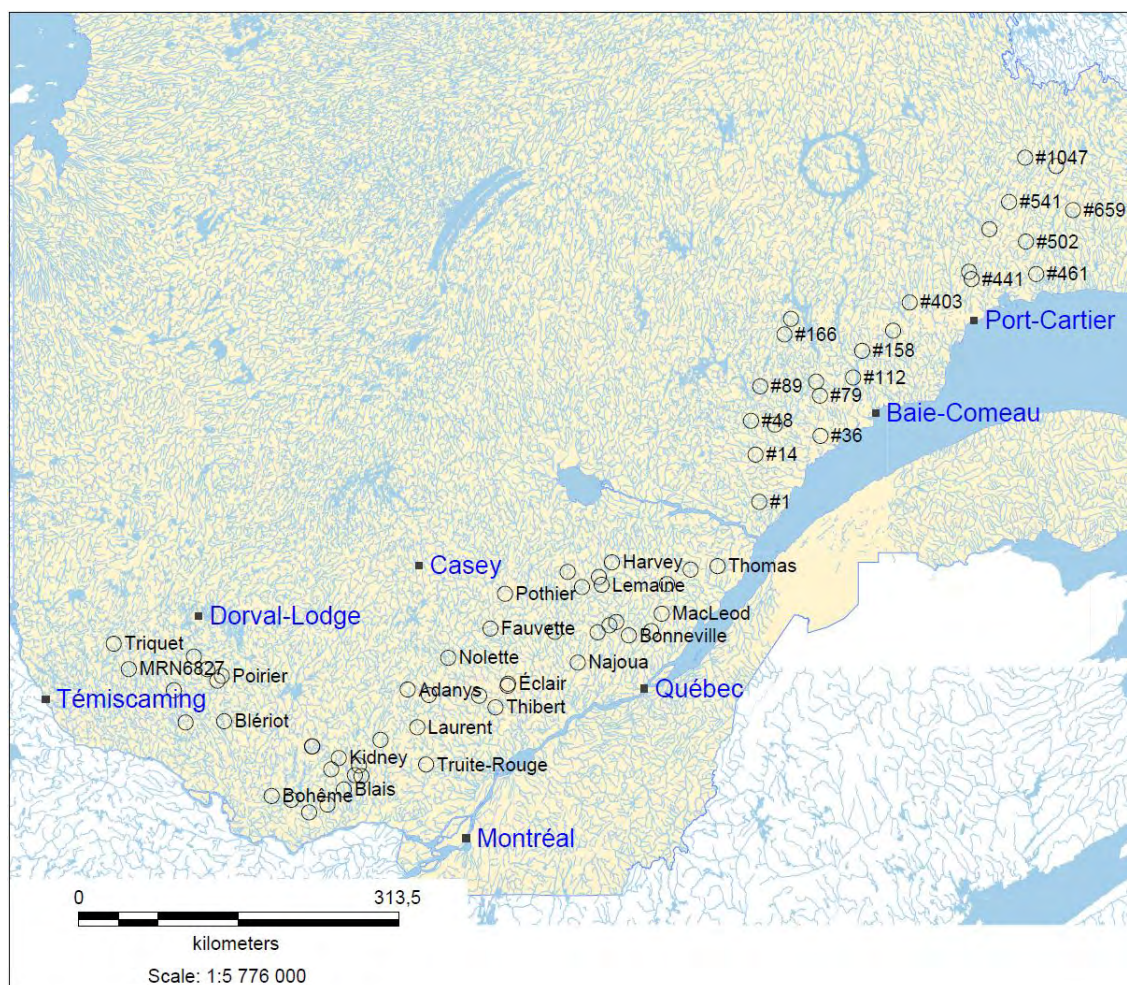


Figure 1.4 Localisation des 72 bassins versants ayant servi à l'étude de l'effet d'un gradient climatique sur les taux d'altération.

Section 2. Projection de la température et du contenu en eau des sols forestiers pour trois types de forêt québécoise

2.1 Contexte

Il est actuellement difficile de prédire l'impact des changements climatiques sur les forêts. Ceci s'explique en partie par le fait qu'il existe très peu d'études évaluant les effets à long-terme d'une modification du climat à l'échelle de l'écosystème forestier. Dans ce cas, l'utilisation de modèles peut s'avérer un bon outil pour permettre de comprendre quels effets les changements climatiques pourraient avoir sur le milieu. Les modèles, qui sont en fait une simplification des processus d'un écosystème, permettent de considérer les interactions entre les différents compartiments de système. Ils peuvent donc servir à prédire quelle pourrait être l'influence d'un environnement changeant sur certaines variables telles que les processus hydrologiques d'un bassin versant.

Dans cette étude, les modèles ForHyM et ForSTeM ont été utilisés pour prédire l'influence des changements climatiques sur l'humidité et la température du sol. Le premier objectif de ce projet était de tester les modèles hydrologique et thermique afin d'évaluer leur capacité à simuler adéquatement les conditions dans trois bassins versants du sud du Québec. Le second objectif était de simuler les effets des changements climatiques sur l'humidité et la température du sol pour ces trois mêmes sites. Pour ce faire, les simulations ont été basées sur les projections climatiques d'un scénario du modèle régional canadien de climat (MRCC) ainsi que sur celles de cinq scénarios de modèles de climat globaux (MCG). Il est important de noter que les résultats complets de cette étude sont maintenant publiés dans la revue « Journal of Climate » (Houle et al. 2012) que les lecteurs pourront consulter pour plus de détails.

2.2 Résultats

2.2.1 Performance des modèles

2.2.1.1 ForHyM

L'ajustement de seulement quelques paramètres pour chaque système s'est avéré suffisant pour que le modèle ForHyM reproduise adéquatement les observations d'eau contenue dans le sol des trois bassins versants.

L'évaluation de la performance du modèle ForHyM a permis de conclure que ce dernier reproduisait bien les observations de contenu en eau dans le sol ainsi que le débit à l'exutoire, et ce, pour les trois systèmes étudiés. Les R^2 appliqués sur les patrons annuels étaient tous supérieurs à 0.65, tant pour l'horizon B (Tableau 2.2, Figure 2.4) que l'horizon C (Tableau 2.2, Figure 2.5). Les R^2 appliqués sur les valeurs mensuelles donnaient toutefois des résultats inférieurs (Tableau 2.2). Finalement, les différents indices permettant d'évaluer la performance du modèle pour le débit à l'exutoire ont montré que, selon les critères de Moriasi *et al.* (2007), les calibrations étaient satisfaisantes pour les trois sites (Tableau 2.3).

Tableau 2.1 Évaluation de la performance des modèles ForHyM pour les trois horizons de sols. Le coefficient de détermination (R^2) est obtenu en comparant les patrons annuels ainsi que les données mensuelles du contenu en eau observés à ceux simulés pour la période de calibration.

	Clair		Laflamme		Tirasse	
	Patron annuel	Données mensuelles	Patron annuel	Données mensuelles	Patron annuel	Données mensuelles
Humus	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Horizon B	0.94	0.83	0.88	0.73	0.91	0.70
Horizon C	0.65	0.46	0.92	0.64	0.97	0.88

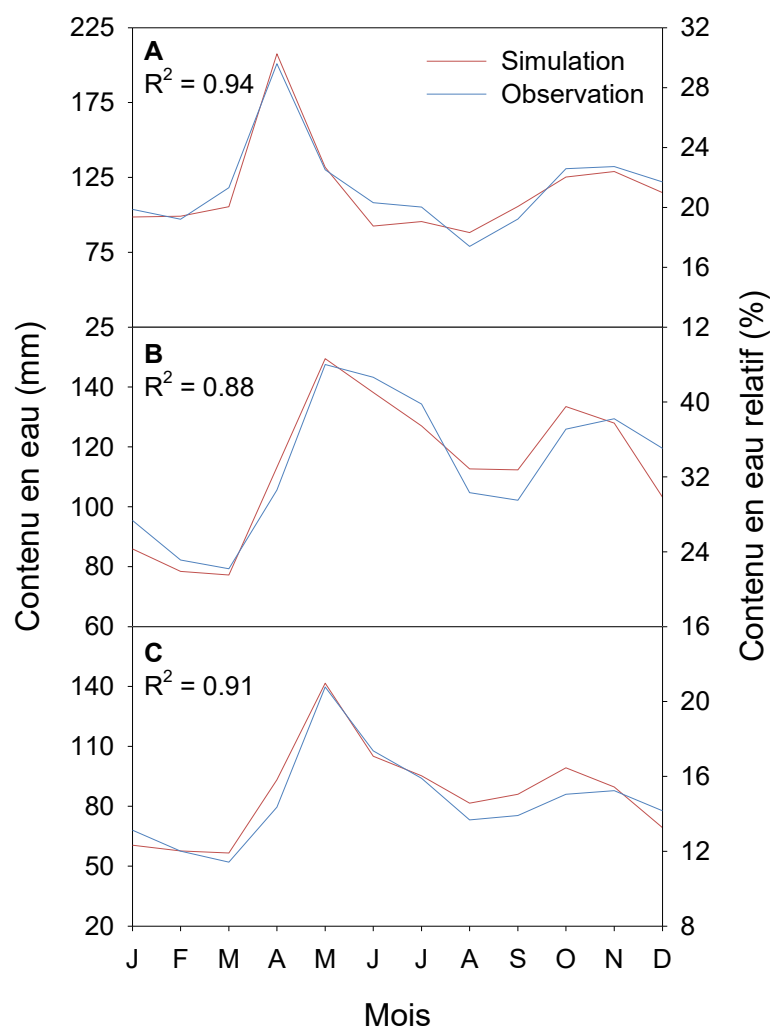


Figure 2.1 Comparaison entre les patrons annuels du contenu en eau dans l'horizon B pour les valeurs mensuelles moyennes observées (%) et simulées (mm) pour A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirasse.

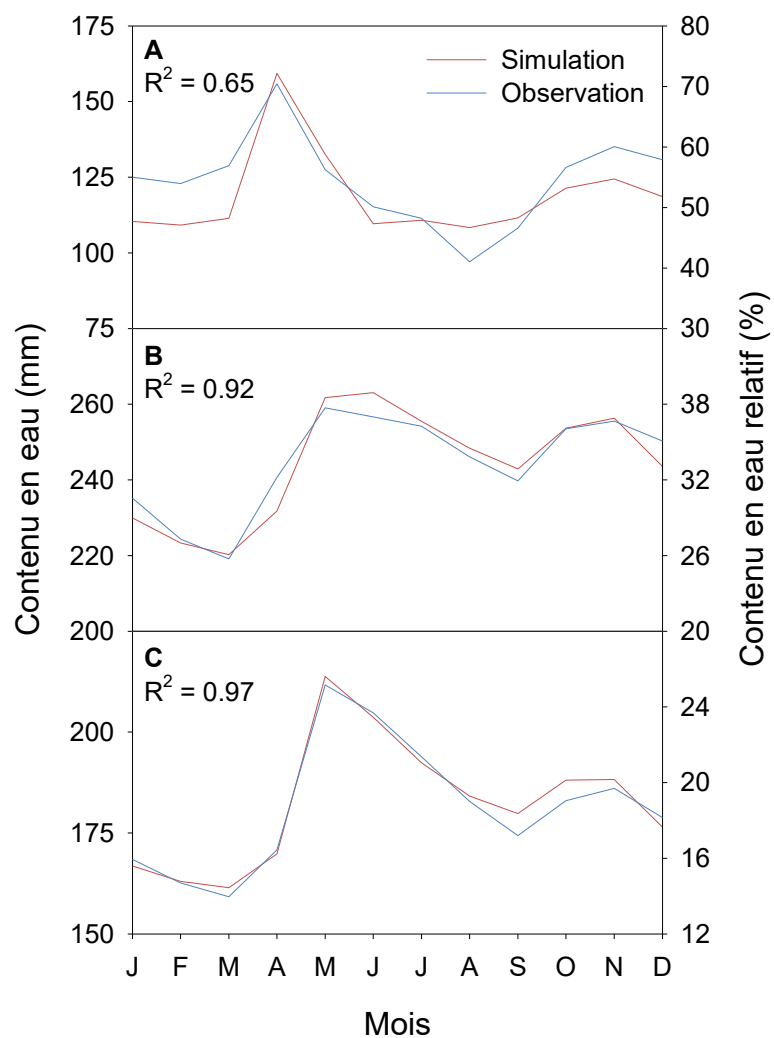


Figure 2.2 Comparaison entre les patrons annuels du contenu en eau dans l'horizon C pour les valeurs mensuelles moyenne observées (%) et simulées (mm) pour A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirasse.

Tableau 2.2 Évaluation de la calibration des modèles ForHyM pour le bilan hydrique.

	Clair	Laflamme	Tirasse
R ² patron annuel	0.91	0.54	0.91
R ² données mensuelles	0.71	0.53	0.62
NSE	0.69	0.70	0.69
RSR	0.56	0.51	0.52
PBIAIS (%)	3	0	23

2.4.1.2 ForSTeM

L'évaluation de la calibration du modèle ForSTeM a permis de conclure que ce dernier reproduisait très bien les observations de température le sol pour les trois systèmes étudiés. Les R^2 appliqués aux patrons annuels étaient tous supérieurs à 0.94, tant pour l'humus (Tableau 2.4, Figure 2.6) que les horizons B (Tableau 2.4, Figure 2.7) et C (Tableau 2.4, Figure 2.8). Les R^2 appliqués sur les valeurs mensuelles étaient également très bons (Tableau 2.4).

Tableau 2.3 Évaluation de la calibration des modèles ForSTeM pour les trois horizons de sols. Le coefficient de détermination (R^2) est obtenu en comparant les patrons annuels ainsi que les données mensuelles de températures de sol observées et celles simulées pour la période de calibration.

	Clair		Laflamme		Tirasse	
	Patron annuel	Données mensuelles	Patron annuel	Données mensuelles	Patron annuel	Données mensuelles
Humus	0.96	0.94	0.97	0.96	0.94	0.92
Horizon B	0.99	0.97	0.99	0.97	0.94	0.91
Horizon C	0.99	0.98	0.99	0.94	0.96	0.93

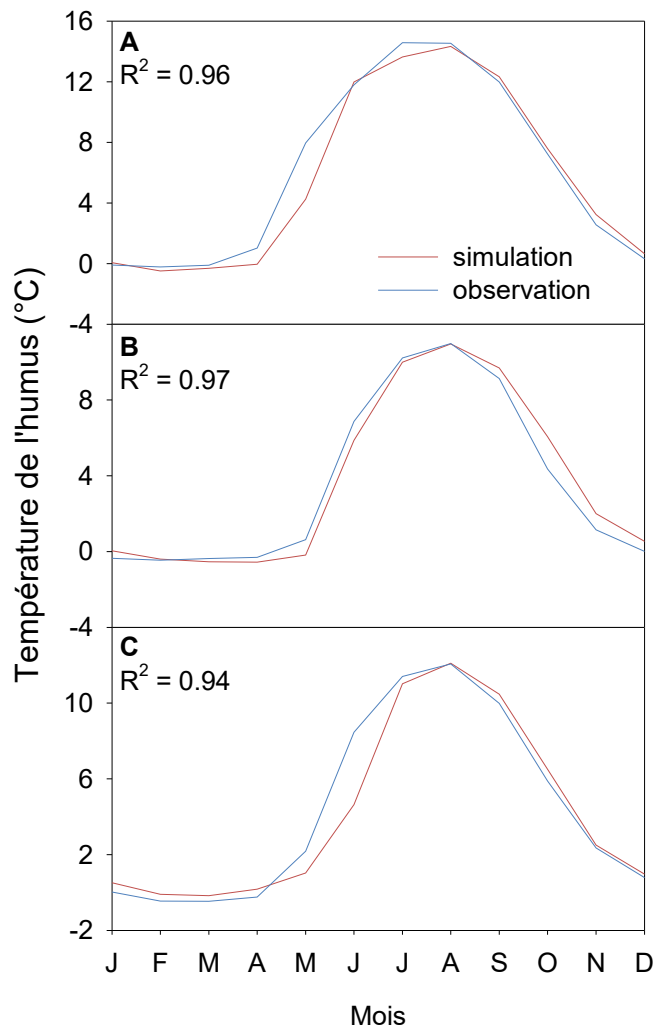


Figure 2.3 Comparaison entre les patrons annuels des températures de l'humus observées et simulées pour A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirasse.

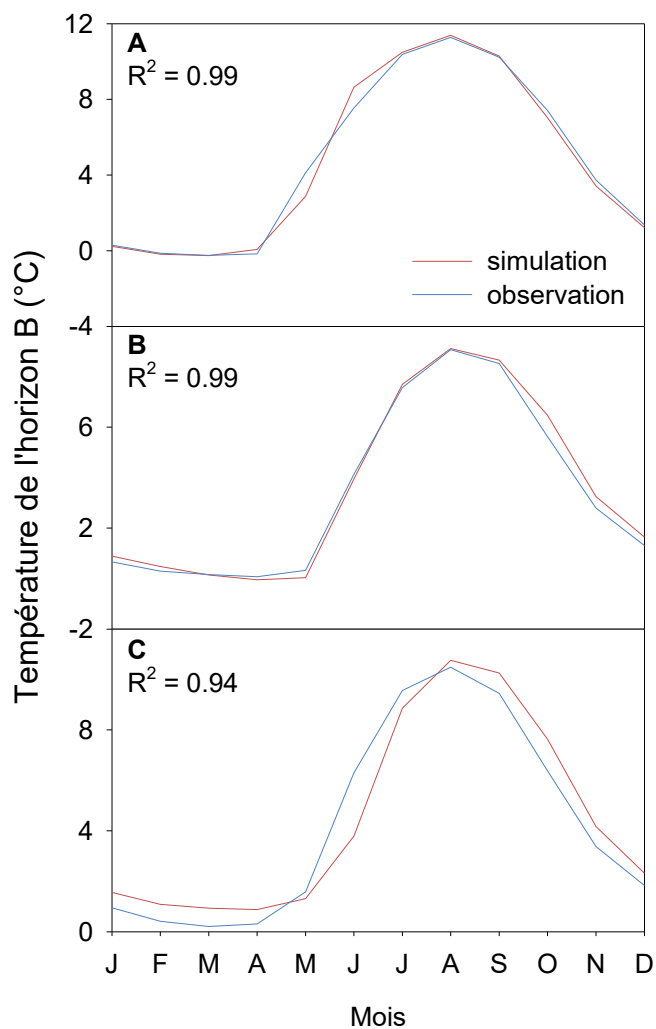


Figure 2.4 Comparaison entre les patrons annuels des températures de l'horizon B observées et simulées pour A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirasse.

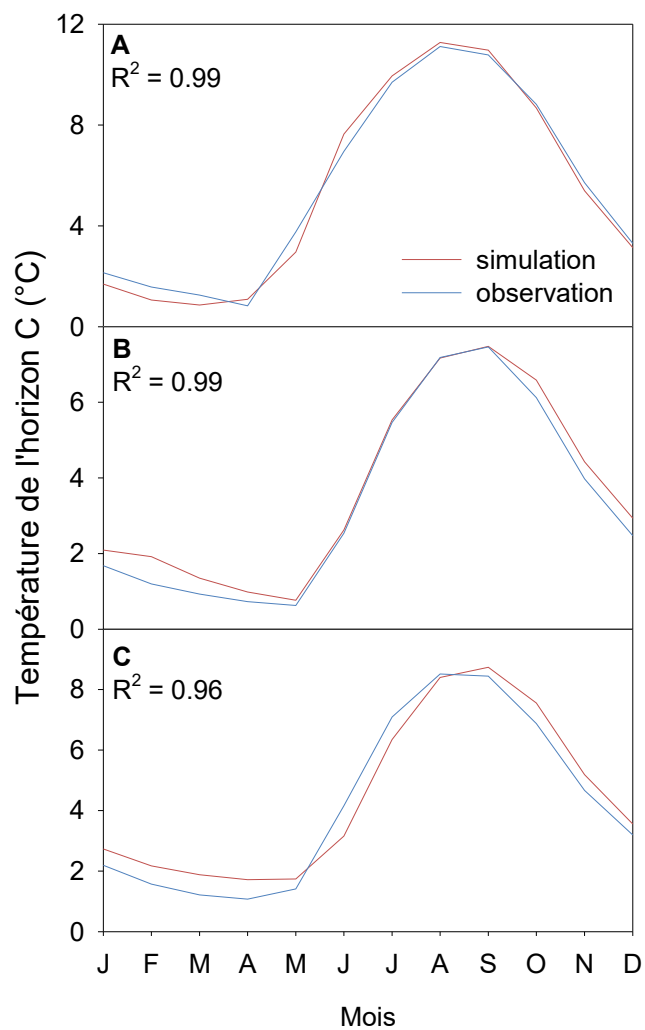


Figure 2.5 Comparaison entre les patrons annuels des températures de l'horizon C observées et simulées pour A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirasse.

2.4.2 Projections de variations de l'humidité dans le sol

Selon les simulations dans ForHyM utilisant les projections climatiques du MRCC 4.2 AET, une modification des températures de l'air et du régime des précipitations pourrait, dans le futur, avoir un effet sur l'humidité du sol. Néanmoins, lorsqu'on observe la variation annuelle du contenu en eau dans l'humus, on remarque qu'il n'y a eu aucun changement significatif entre les horizons futurs et la période de référence pour les trois sites étudiés (Tableau 2.5). Dans l'horizon B, la variation annuelle du contenu en eau est également très faible, faisant en sorte qu'une diminution significative a seulement été observée pour l'horizon 2080 pour les lacs Clair et Laflamme. Similairement, une diminution significative du contenu en eau dans l'horizon C du sol au lac Laflamme a été détectée dès l'horizon futur 2080. Finalement, aucune variation annuelle n'a pu être observée pour le bassin Tirasse. L'effet des changements climatiques sur le bilan annuel du régime hydrique des sols serait donc faible puisque toutes les simulations projettent des diminutions du contenu en eau qui seraient, dans tous les cas, inférieures à 6%.

Tableau 2.4 Variation annuelle du contenu en eau dans de sol pour trois horizons futurs, selon les projections du scénario de changements climatiques du MRCC 4.2 AET.

Bassin	Horizon futur	Variation annuelle du contenu en eau (%)		
		Humus	Horizon B	Horizon C
Clair	2020	-0.5 NS	-1.8 NS	-0.6 NS
	2050	-1.0 NS	-3.5 NS	-0.9 NS
	2080	-1.4 NS	-4.9 *	-0.9 NS
Laflamme	2020	-0.8 NS	-2.2 NS	-0.6 NS
	2050	-0.8 NS	-4.8 NS	-1.2 NS
	2080	-3.0 NS	-8.6 ***	-1.6 **
Tirasse	2020	0.0 NS	-2.9 NS	-1.0 NS
	2050	2.0 NS	0.0 NS	-0.1 NS
	2080	1.5 NS	-4.1 NS	-1.5 NS

NS : Non significativement différent de zéro

* : $p < 0.05$

** : $p < 0.01$

*** : $p < 0.001$

Lorsqu'on observe les variations du contenu en eau dans le sol au niveau mensuel plutôt qu'annuel, les résultats sont différents. En effet, bien que le bilan annuel du contenu en eau ait peu changé, le patron annuel montrait des variations significatives de contenu en eau dans le sol. L'écart entre les simulations futures et les conditions de la période de référence croissant avec le temps. Les trois couches de sol ont montré une augmentation du contenu en eau allant jusqu'à 50% pendant la saison froide, et ce, pour les trois bassins versants (Figures 2.9-2.11). Par contre, une diminution marquée du contenu en eau a pu être observée de mai à octobre. Ce phénomène pourrait s'expliquer par un devancement de la fonte printanière.

Tous les bassins ont montré une variation significative du contenu en eau dans le sol pour au moins un des mois de l'année, et ce, pour toutes les couches de sol et tous les horizons futurs, à une exception près. En effet, dans le bassin Tirasse, les projections du contenu en eau dans l'humus pour l'horizon 2020 n'étaient pas significativement différente de celles de la période de référence pour tous les mois (Figure 2.9c).

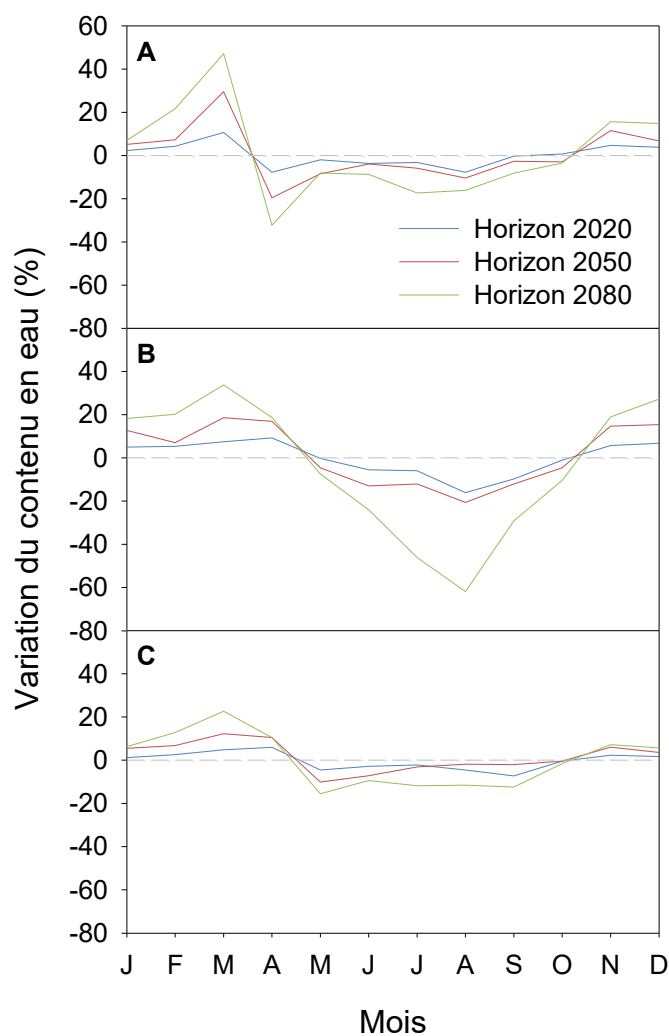
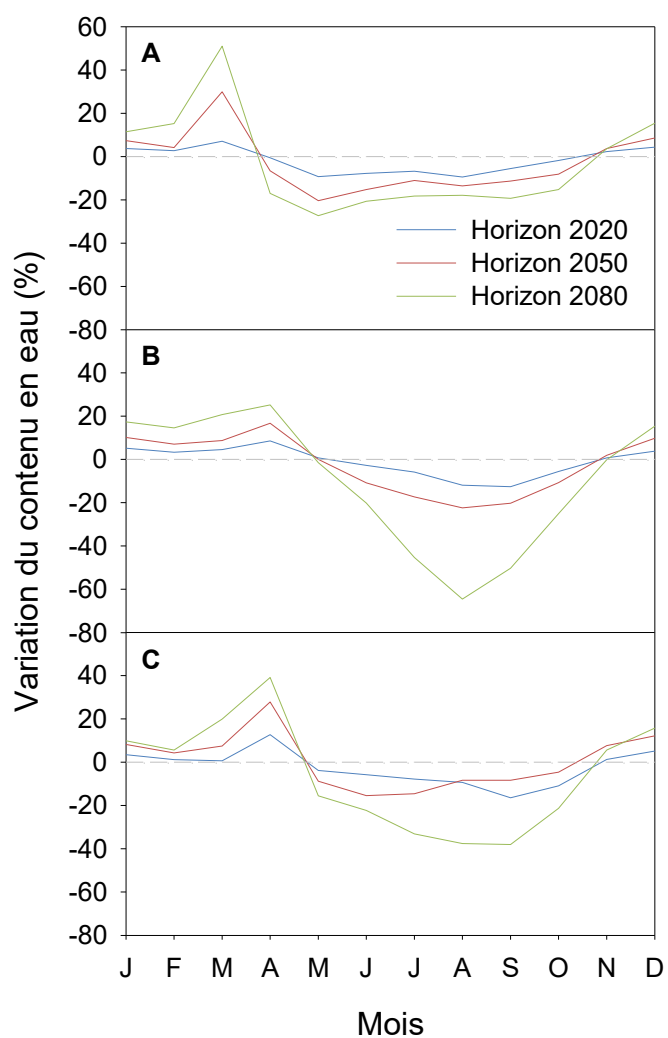


Figure 2.7 Patron annuel des variations du contenu en eau dans le sol dans l'horizon B pour A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirasse selon les projections climatiques du MRCC 4.2 AET.

2.6 Patron annuel des variations du contenu en eau dans le sol dans l'humus
 A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirasse selon les projections climatiques du MRCC 4.2 AET.



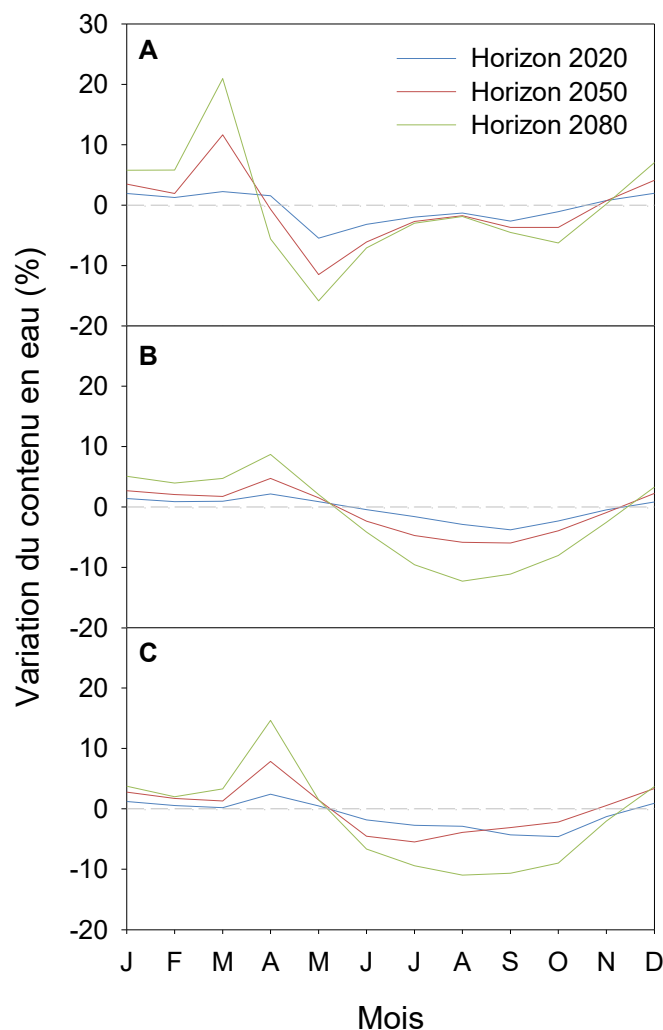


Figure 2.8 Patron annuel des variations du contenu en eau dans le sol dans l'horizon C pour A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirasse selon les projections climatiques du MRCC 4.2 AET.

2.4.3 Projections de variations de la température du sol

Les simulations dans ForSTeM utilisant les projections climatiques du MRCC 4.2 AET ont permis de montrer que les changements climatiques pourraient avoir un effet sur la température du sol. L'effet serait d'ailleurs de plus en plus important avec le temps. En premier lieu, lorsqu'on observe la variation annuelle de la température du sol, on peut voir que dans un futur rapproché (horizon 2020), les températures de l'humus pourraient rester stables dans les trois bassins (Tableau 2.6). Par contre, une augmentation significative des températures dans l'humus pourraient être observée dès la période 2040-2069. De manière similaire, la température de l'horizon B pourrait augmenter significativement à partir de l'horizon 2050 dans les bassins des lacs Clair et Tirasse, alors qu'elle pourrait augmenter significativement dans le bassin Tirasse dès l'horizon 2020. Dans le cas de l'horizon C, une augmentation significative de la température pourrait être observable dans un futur proche dans les trois sites étudiés.

Tableau 2.5 Variation annuelle de la température du sol pour trois horizons futurs, selon les projections du scénario de changements climatiques du MRCC 4.2 AET.

Bassin	Horizon futur	Variation annuelle de température (°C)		
		Humus	Horizon B	Horizon C
Clair	2020	0.7 NS	0.6 NS	0.6 *
	2050	1.3 **	1.2 ***	1.2 ***
	2080	2.1 ***	1.9 ***	2.0 ***
Laflamme	2020	0.6 NS	0.5 NS	0.5 *
	2050	1.2 ***	1.1 ***	1.2 ***
	2080	2.3 ***	2.1 ***	2.3 ***
Tirasse	2020	0.5 NS	0.6 *	0.6 **
	2050	1.1 ***	1.4 ***	1.3 ***
	2080	2.0 ***	2.4 ***	2.3 ***

NS : Non significativement différent de zéro

* : $p < 0.05$

** : $p < 0.01$

*** : $p < 0.001$

Lorsqu'on examine les variations de température dans le sol au niveau mensuel, on peut remarquer que l'augmentation de la température ne serait pas constante tout au long de l'année. L'augmentation de température serait beaucoup plus importante entre les mois d'avril et octobre pour l'humus et l'horizon B et entre les mois de juin à octobre pour l'horizon C, et ce, pour les 3 bassins versants considérés dans cette étude (Figures 2.12-2.14). On pourrait observer un maximum d'augmentation de température allant jusqu'à 5°C pour l'humus, 4°C pour l'horizon B et 3°C pour l'horizon C dans un futur éloigné.

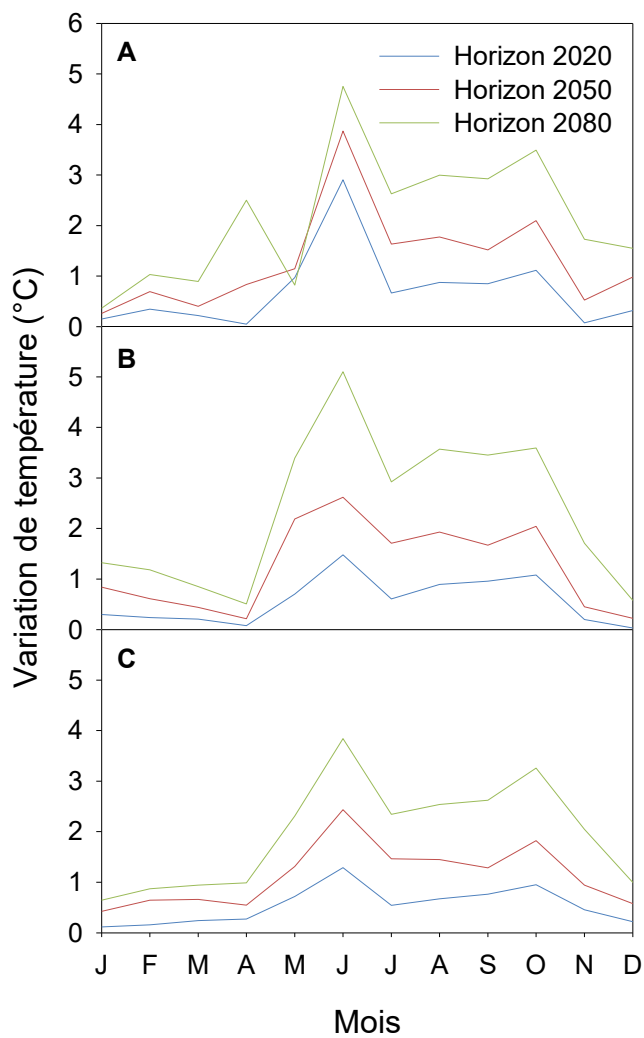
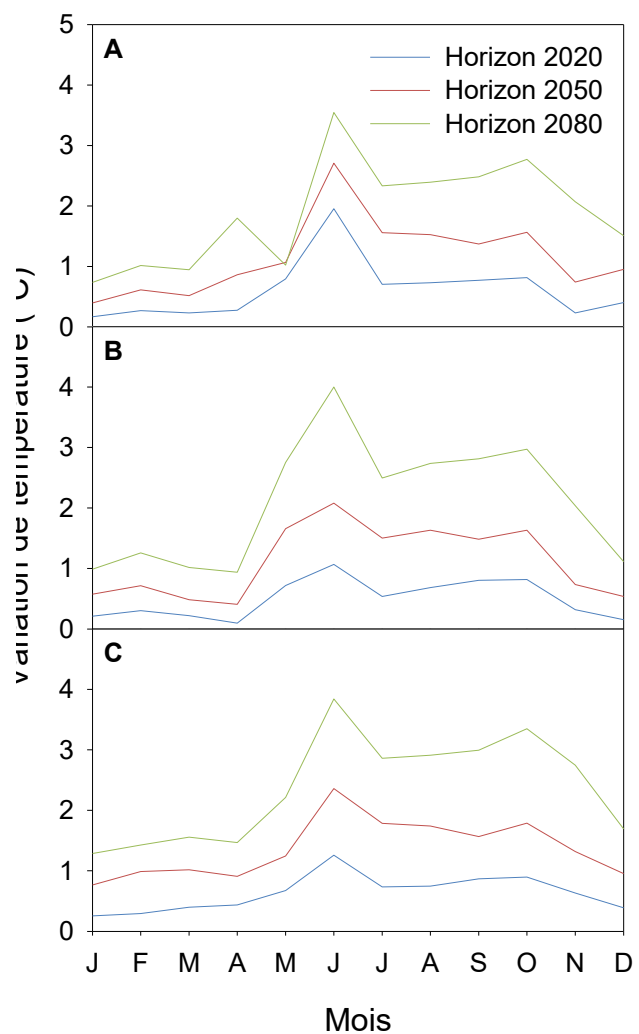


Figure 2.12 Patron annuel des variations de température du sol dans l'humus pour A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirasse selon les projections climatiques du MRCC 4.2 AET.



température du sol dans l'horizon B pour A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirasse selon les projections climatiques du MRCC 4.2 AET.

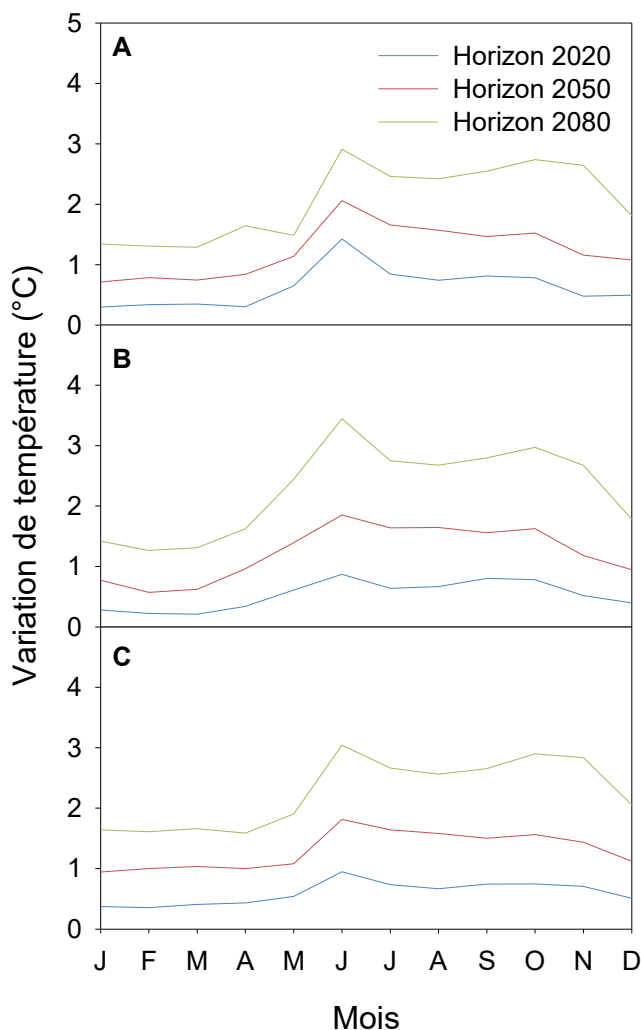


Figure 2.11 Patron annuel des variations de température du sol dans l'horizon C pour A) le lac Clair, B) le lac Laflamme et C) le bassin Tirasse selon les projections climatiques du MRCC 4.2 AET.

2.4.4 Comparaison des scénarios basés sur les modèles de climat globaux

La comparaison de différents scénarios de variation d'humidité et de température dans le sol basés sur les modèles de climat globaux (MCG) permet d'évaluer les écarts entre les projections. Nous avons choisi de présenter l'exemple du lac Laflamme mais les variations entre modèles sont similaires pour les autres bassins. Les simulations basées sur les modèles globaux, tout comme celles basées sur le modèle régional de climat projettent une augmentation du contenu en eau dans le sol au printemps qui sera suivi par un assèchement du sol au cours de l'été au bassin du lac Laflamme (Figure 2.15). L'ampleur de l'assèchement est variable entre les différents modèles. Les projections basées sur les scénarios du modèle MRI sont les plus optimistes. Selon ce modèle, le contenu en eau dans l'horizon B du sol ne devrait pas diminuer de plus de 15% d'ici l'horizon futur 2080. Toutefois, les simulations basées sur les scénarios des modèles globaux ECHO et MIROC sont plus pessimistes. Des diminutions du contenu en eau de 15% pourraient être observées dès l'horizon 2020 et elles pourraient atteindre 40% pour l'horizon 2080.

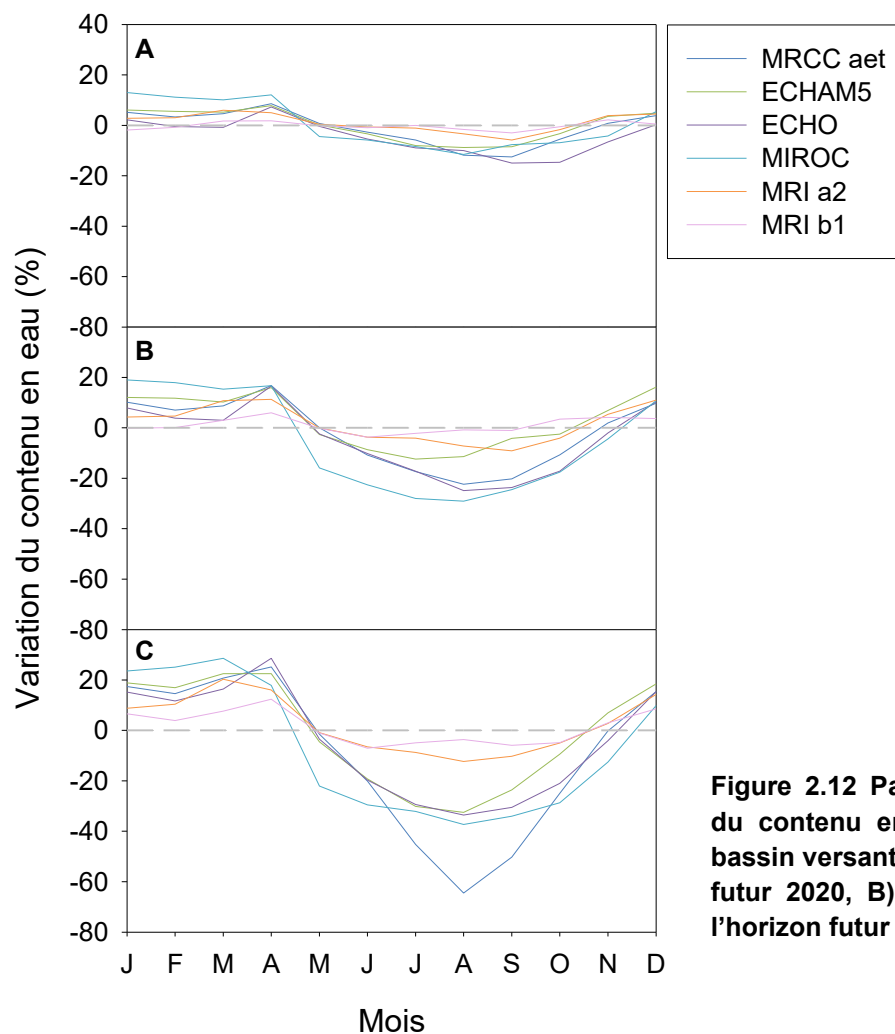


Figure 2.12 Patron annuel des variations du contenu en eau pour l'horizon B du bassin versant Laflamme pour A) l'horizon futur 2020, B) l'horizon futur 2050 et C) l'horizon futur 2080.

Dans le cas des températures de sol, les simulations basées sur les modèles de climats globaux donnent également des résultats similaires à celles basées sur le modèle régional. La température du sol pourrait augmenter de manière significative dès l'horizon 2020 (Figure 2.16). L'augmentation serait plus importante pendant la période où le sol n'est pas recouvert de neige. L'augmentation de la température du sol croîtrait avec le temps. Ainsi, selon les scénarios les plus pessimistes, des températures de 4.5°C supérieures à celles qui sont actuellement mesurées pourraient être observées dans l'horizon B du lac Laflamme au cours de l'horizon 2080. Le scénario le plus pessimiste est celui basé sur les projections du modèle global MIROC. Les projections basées sur les scénarios du modèle global MRI sont encore une fois les plus optimistes. Si on se fie à ces scénarios, le maximum d'augmentation du sol pour l'horizon B pourrait être inférieur à 3°C.

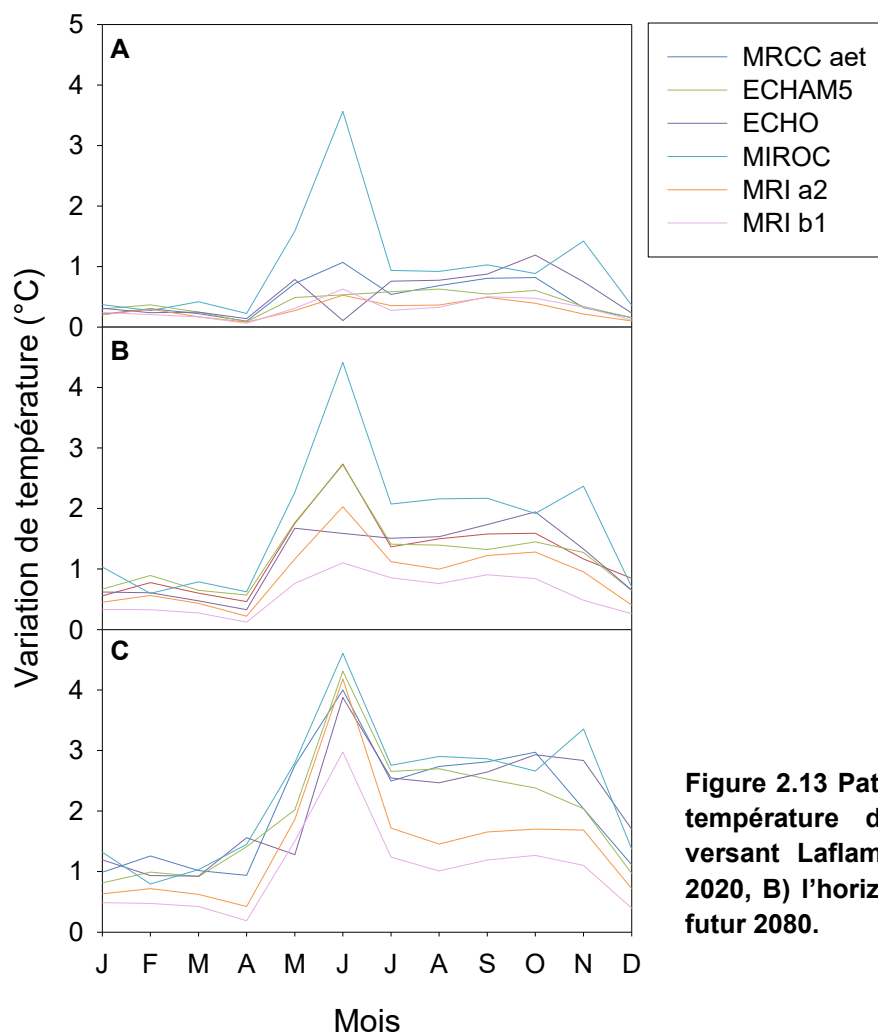


Figure 2.13 Patron annuel des variations de température de l'horizon B du bassin versant Laflamme pour A) l'horizon futur 2020, B) l'horizon futur 2050 et C) l'horizon futur 2080.

2.5 Analyse et discussion

Bien qu'il y ait un nombre croissant de modèles et de scénarios climatiques disponibles à la communauté scientifique, l'impact des changements globaux sur les conditions futures de l'humidité et de la température du sol a reçu très peu d'attention malgré son importance sur la dynamique des forêts. Dans cette étude, nous avons utilisé un modèle de température du sol (ForSTeM) et d'humidité du sol (ForHyM) pour simuler les conditions de sols futurs dans trois sites selon un scénario du modèle régional canadien de climat et cinq scénarios issus de modèles de climat globaux. À la suite des résultats obtenus, il est possible de conclure que selon les scénarios basés sur le modèle régional et les modèles de climat globaux, les changements climatiques pourraient avoir un effet sur l'humidité et la température du sol. La température moyenne annuelle des sols augmentera de 1.1 à 1.9°C en 2050 et de 1.9 à 3.3°C en 2080, dépendamment des horizons du sol, tandis qu'aucun changement significatif est attendu dans l'humidité du sol sur une base annuelle. Les résultats varient en terme de changements absolus entre les sites, par contre, les patrons saisonniers des changements sont les mêmes aux trois sites pour la température et l'humidité du sol. Selon les projections

les sols pourraient être un peu plus humides et plus chauds en hiver mais d'importantes diminutions du contenu en eau pourraient survenir pendant la saison de croissance. Les mois de juin, juillet et août sont cruciaux puisqu'ils englobent la saison de croissance des plantes. C'est aussi pendant cette période que se produisent la plupart des réactions chimiques dans le sol qui contrôlent le cycle des éléments nutritifs. Un retardement de la fonte, un assèchement du sol pendant la période de croissance ainsi qu'une augmentation des températures du sol pourraient avoir des effets notables sur les processus inhérents aux sols forestiers.

Des conditions chaudes en été peuvent causer une augmentation de l'évapotranspiration des plantes ce qui peut induire un stress hydrique, particulièrement quand l'humidité du sol est faible (Rennenberg et al. 2006). Une augmentation de la vulnérabilité causée par une diminution de l'humidité pourrait diminuer la photosynthèse, la transpiration et la croissance. Ces processus pourraient en effet diminuer à cause de la réduction de l'ouverture des stomates afin de réduire les pertes d'eau, limitant ainsi l'influx de CO₂ dans la plante et par conséquent sa croissance (Gessler et al. 2004; Hernandez-Santana et al. 2009; Rennenberg et al. 2006).

Les impacts sur les cycles biogéochimiques des nutriments sont plus difficiles à prévoir donnée raison de la complexité des interactions ou des effets antagonistes que la température et l'humidité peuvent avoir sur l'activité microbienne et les processus d'altération chimique des sols. La relation positive entre l'activité microbienne et la température peut être invalidée quand l'humidité du sol est sous un certain seuil (Almagro et al. 2009; Curiel et al. 2007; Davidson et al. 1998). Une diminution de l'humidité peut par le fait même limiter les processus écologiques des sols et contrebalancer les effets potentiels d'une augmentation des températures. Finalement, des études récentes ont rapporté une activité des microorganismes et des cycles de nutriments significatifs sous la neige (Monson et al. 2006; Schmidt et Lipson 2004), démontrant l'importance des processus hivernaux sur la biogéochimie des sols en hiver (Campbell et al. 2005). Étant donné que nos projections suggèrent des sols plus chauds et plus humides sous le couvert de neige, la contribution du recyclage de nutriments hivernaux aux taux annuels de recyclage des nutriments pourrait augmenter dans le futur et potentiellement leur lessivage.

Section 3. Mise à jour des champs géophysiques utilisés par le MRCC et sommaire des tests de sensibilité avec CLASS

3.1 Amélioration des champs géophysiques à l'intérieur du MRCC

Afin de réaliser des simulations de température et de contenu en eau des sols, que ce soit en mode couplée (avec le MRCC) ou en mode colonne (avec CLASS « offline ») certaines étapes se sont avérées nécessaires dont l'amélioration des champs géophysiques dans le MRCC et aussi une batterie de tests de sensibilité à la modification de certaines variables (voir sections suivantes 3.2 à 3.4). Pour illustrer les changements apportés, nous avons sélectionné quelques cartes pour des variables clés. Le contenu en sable et en argile est primordial pour bien déterminer la capacité d'un sol à reproduire adéquatement les processus hydrologiques des sols forestiers. Par exemple, la figure 3.1 montre les changements dans la composition de la couche 1 (0-10 cm) du champ géophysique. Auparavant (figure 3.1 à gauche), cette couche était pratiquement constituée à 100% de sable (0% argile) alors que dans les versions CANSIS-USGS et MRN-CANSIS-USGS (figure 3.1 du centre et celle de droite) on peut apprécier l'apparition d'une couche organique beaucoup plus représentative de la couche d'humus que l'on retrouve sous les peuplements forestiers.

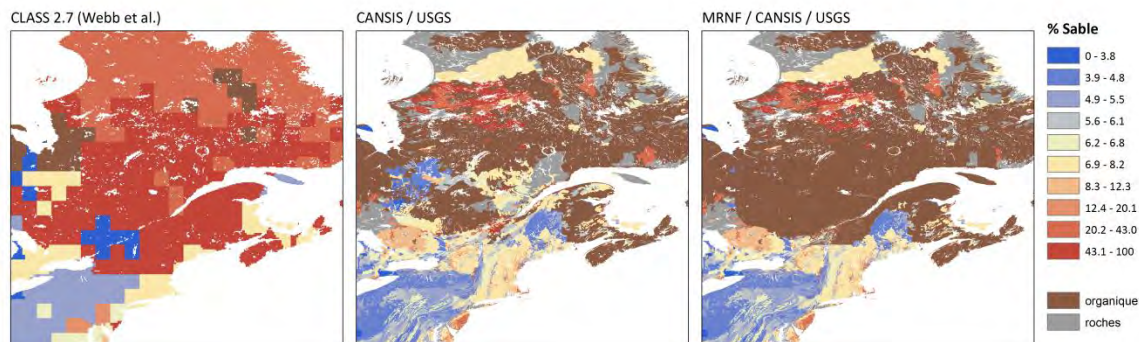


Figure 3.1 Représentations du contenu en sable (%) de la couche 1 du sol (0-10 cm) à partir des bases de données Webb et al. 1993 (gauche), CANSIS/USGS (centre), et CANSIS/USGS/MRN (droite).

La figure 3.2 montre les améliorations successives des trois représentations des champs géophysiques pour le contenu en sable de la couche 2 alors que la figure 3.3 montre les différences pour trois représentations pour la proportion de sable dans la couche 3.

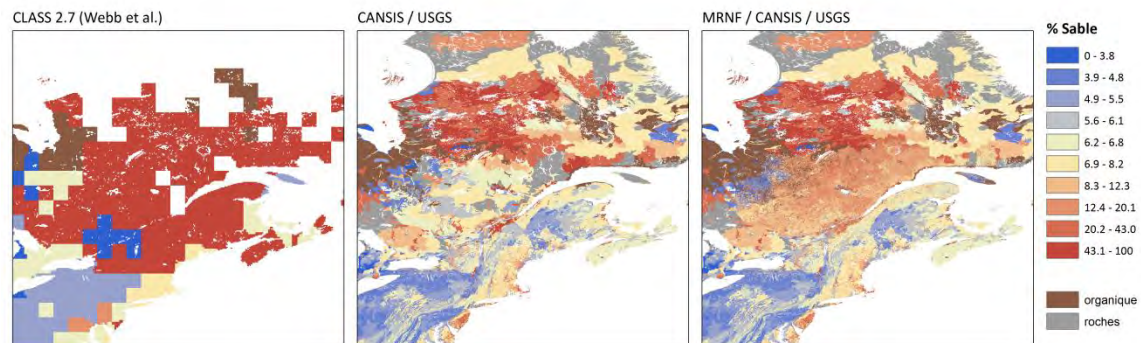


Figure 3.2 Représentations du contenu en sable (%) de la couche 2 du sol (10-35 cm) à partir des bases de données Webb et al. 1993 (gauche), CANSIS/USGS (centre), et CANSIS/USGS/MRN (droite).

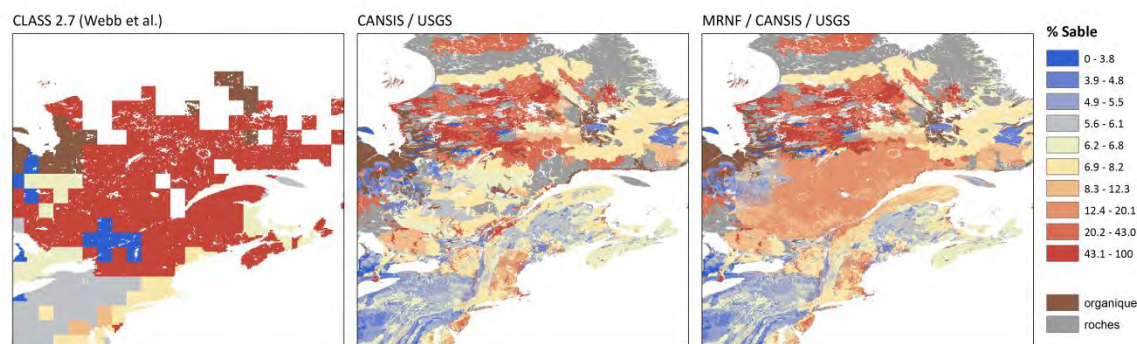


Figure 3.3 Représentations du contenu en sable (%) de la couche 3 du sol (35-60cm) à partir des bases de données Webb et al. 1993 (gauche), CANSIS/USGS (centre), et CANSIS/USGS/MRN (droite).

Afin de déterminer les valeurs optimales de certaines caractéristiques physiques des sols qui servent d'« entrées » dans le modèle CLASS et aussi pour mieux comprendre le comportement de CLASS face à des variations dans les valeurs de ces caractéristiques, plusieurs centaines de simulations ont été faites en utilisant CLASS « off line » ou si on préfère, en mode colonne. Dans cette configuration, le modèle CLASS agit en mode « non-couplé », contrairement aux simulations faites à l'intérieur du MRCC où CLASS est en « mode couplé ». Il aurait été impossible évidemment de faire tous ces tests en mode couplé. Il faut noter cependant que pour les tests qui ont été faits, le travail en mode non couplé est parfaitement adéquat. En général les tests avaient pour but d'éclaircir des pistes potentielles qui permettraient à CLASS 3.6 de produire des valeurs plus élevées de contenu en eau dans le sol sans affecter les valeurs de températures du sol. A cette étape, il n'est pas question de changer le fonctionnement du modèle CLASS en soi mais de vérifier sa sensibilité à des changements aux champs géophysiques. Dans la section suivante (4), nous aborderons la question de la sensibilité des projections à des modifications au fonctionnement du modèle. Tous les tests ont été faits pour trois sites forestiers (lac Clair, lac Laflamme, et lac Tirasse) souvent en utilisant différentes valeurs de profondeur de la roche mère. Les tests ont été faits pour les variables de température (TG), contenu en eau liquide (THL), et contenu en eau gelée (THI) du sol pour toutes les couches de sol de CLASS. Par contre dans les descriptions qui suivent, seulement les exemples obtenus pour le site du lac Clair, pour les variables de TG2 et THL2 (couche 2; 10 à 35cm), pour une seule valeur de profondeur de la roche-mère (2.1 mètre) sont présentés pour éviter la répétition de plusieurs figures quasi-identiques.

3.2 Tests de sensibilité sur les valeurs de texture du sol

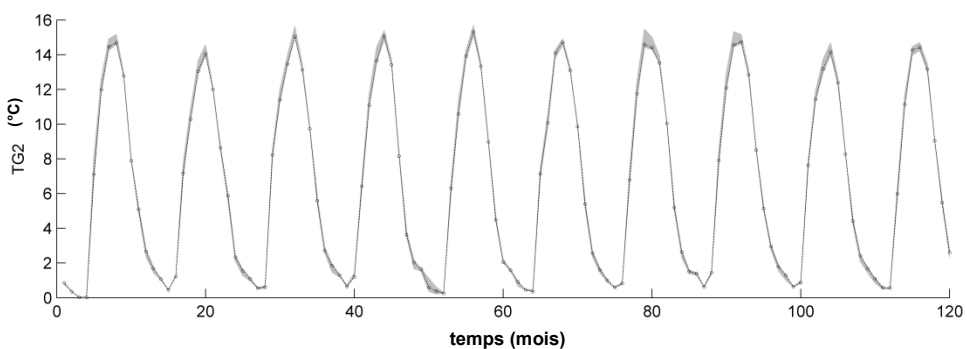
3.2.1 Changements de % de sable

- Quatre séries de tests par site avec valeurs d'argile (CLAY) fixée à 5, 25, 50 ou 75%
- Valeur de sable est variée de 1 à 1-%Argile

- Profondeur de la roche mère = 2.1m

Les tests indiquent qu'il y a très peu d'influence du pourcentage du sable sur la température du sol, sauf des effets légers en période estivale (figure 3.4a). Par contre les tests montrent une relation négative entre le pourcentage de sable et la quantité d'eau dans le sol (figure 3.4b).

a.



b.

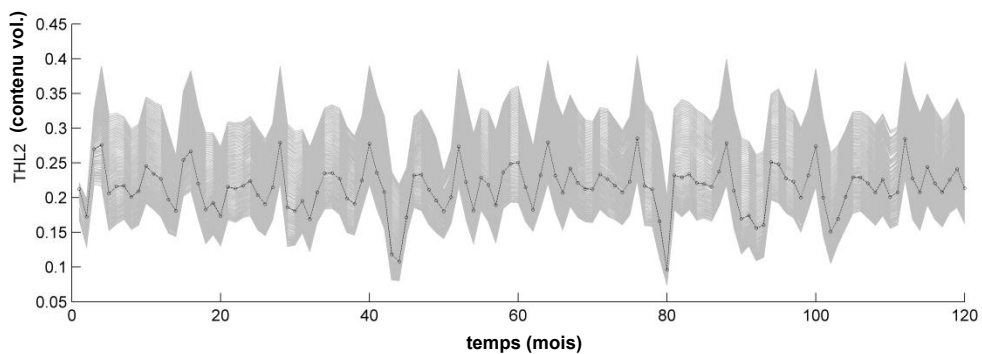


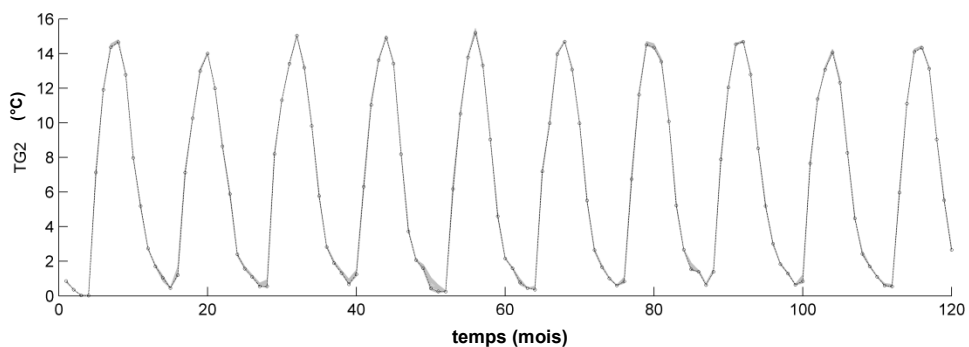
Figure 3.4 Un exemple pour le lac Clair d'un test de sensibilité du pourcentage de sable sur a) la température (TG2) et b) le contenu en eau (THL2) de la deuxième couche du sol (THL2). L'argile est fixée à 5 % et le sable varie de 1 à 95 %. Les variations du pourcentage de sable sont indiquées par les lignes grises fines.

3.2.2 Changements de % d'argile

- Quatre séries de tests par site avec valeurs de sable (SAND) fixées à 5, 25, 50 ou 75 %
- L'argile varie de 1 à (1-%SAND)
- Profondeur de la roche mère = 2.1m

Comme pour les tests sur le % de sable, les tests sur l'argile indiquent qu'il y a très peu d'influence du pourcentage d'argile sur la température du sol (figure 3.5a). Par contre les tests montrent une relation positive entre le pourcentage d'argile et la quantité d'eau dans le sol (figure 3.5b).

a.



b.

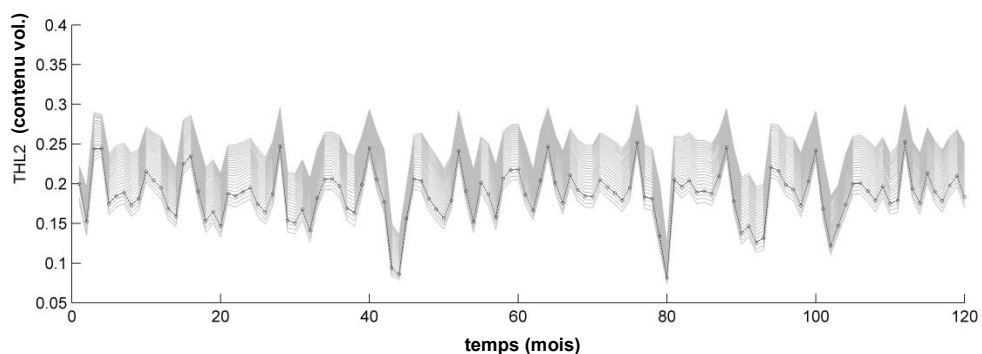


Figure 3.5 Un exemple pour le lac Clair d'un test de sensibilité du pourcentage d'argile sur a) la température (TG2) et b) le contenu en eau (THL2) de la deuxième couche du sol. Le sable est fixé à 75 % et le % d'argile varie de 1 à 25 %.

3.3 Tests de sensibilité sur les valeurs de porosité

3.3.1 Changements de porosité de la dernière couche de sol avant la roche-mère.

- Série de tests par site avec les valeurs de profondeur de la roche mère de 1.1m, 1.35m, 1.6m, 1.85m et 2.1m
- La porosité de la dernière couche au-dessus de la roche-mère varie de 0 à 0.6

Les figures 3.6 et 3.7 indiquent qu'il y a très peu d'influence de la porosité de la dernière couche sur la température du sol et on voit que presque toutes les courbes sont superposées (figure 3.6). En termes de contenu en eau, les tests montrent un léger effet positif causé par une augmentation de la porosité (figure 3.7). Cet effet est observé davantage dans les sols moins profonds (profondeur de la roche mère de 1.1 ou 1.35m). On observe aussi qu'en diminuant les valeurs de porosité, il y a un effet de seuil (autour d'une porosité de ~ 0.04 de la dernière couche). Dès que ce seuil est atteint, la quantité d'eau augmente très rapidement.

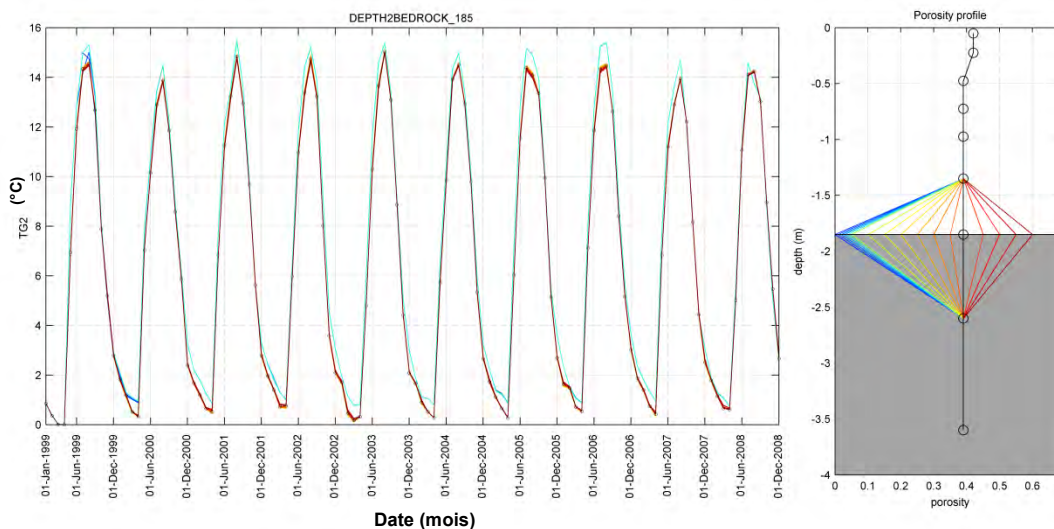


Figure 3.6 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité sur la variation de porosité de la dernière couche avant la roche mère sur la température de la deuxième couche du sol (TG2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de TG2 sur dix ans de chaque expérience.

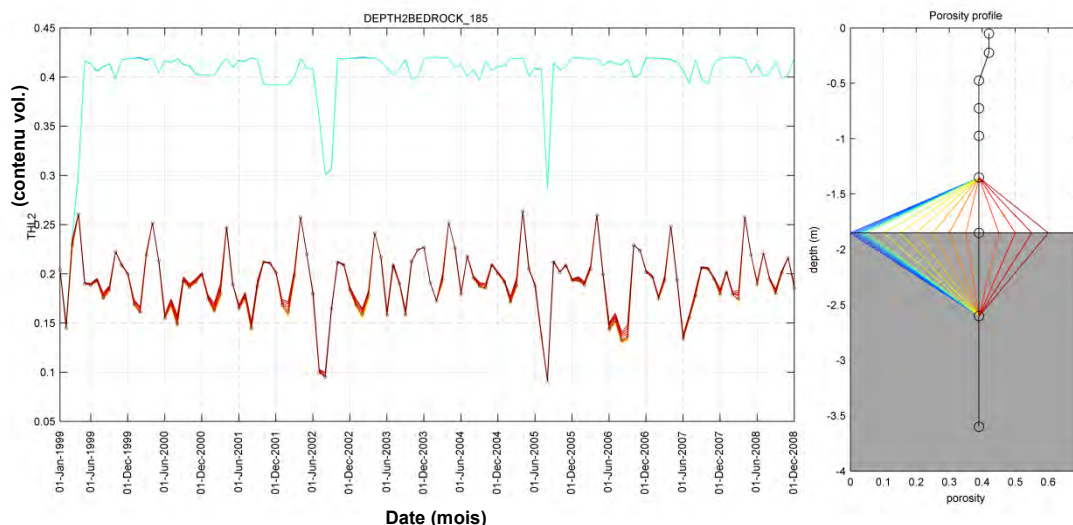


Figure 3. 7 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité de la variation de la porosité de la dernière couche avant la roche mère sur le contenu en eau de la deuxième couche du sol (THL2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de THL2 sur dix ans de chaque expérience.

3.3.2 Changements de porosité de la deuxième couche de sol (10 à 35 cm)

- Série de tests par site avec les valeurs de profondeur de la roche mère de 1.1m, 1.35m, 1.6m, 1.85m et 2.1m
- La porosité de la deuxième couche varie de 0 à 0.6

Les figures 3.8 à 3.10 montrent les résultats des tests de changements de porosité de la deuxième couche de sol. Comme dans l'exemple précédent, à droite des figures on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol pour chacune des expériences. Les résultats indiquent qu'il y a très peu d'influence de la porosité sur la température du sol et on voit que presque toutes les courbes sont superposées. En termes d'humidité des sols les tests montrent un effet positif entre une augmentation de la porosité et la quantité d'eau dans le sol (figure 3.9). On observe aussi qu'en diminuant les valeurs de porosité un seuil est atteint (autour d'une porosité de ~ 0.04 de la dernière couche) à partir duquel la quantité d'eau augmente drastiquement dans la deuxième couche. Par contre dans ces cas de porosité $\leq \sim 0.04$ on observe que pour les couches plus profondes (ex. couche 3) il n'y a plus de variabilité ou fluctuations dans le contenu en eau (figure 3.10).

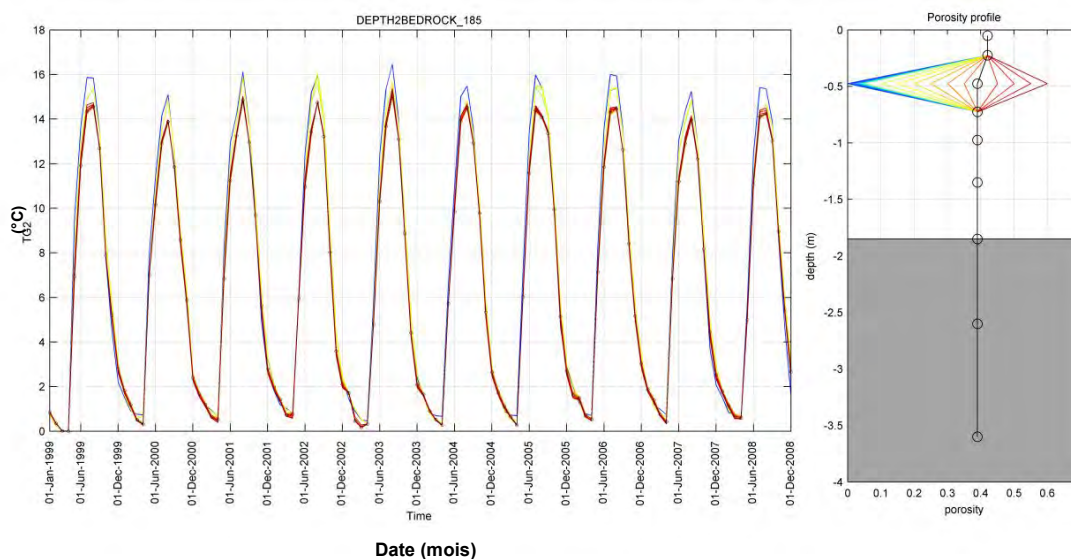


Figure 3.8 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité de la variation de la porosité de la deuxième couche du sol sur la température de la deuxième couche du sol (TG2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de TG2 sur dix ans de chaque expérience.

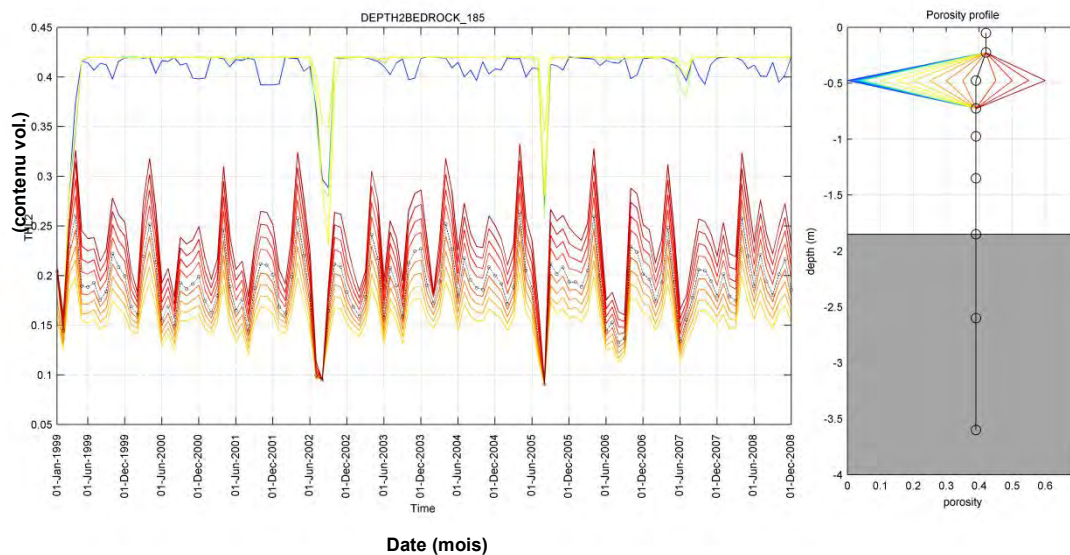


Figure 3.9 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de la porosité de la deuxième couche du sol sur le contenu en eau de la deuxième couche du sol (THL2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de THL2 sur dix ans de chaque expérience.

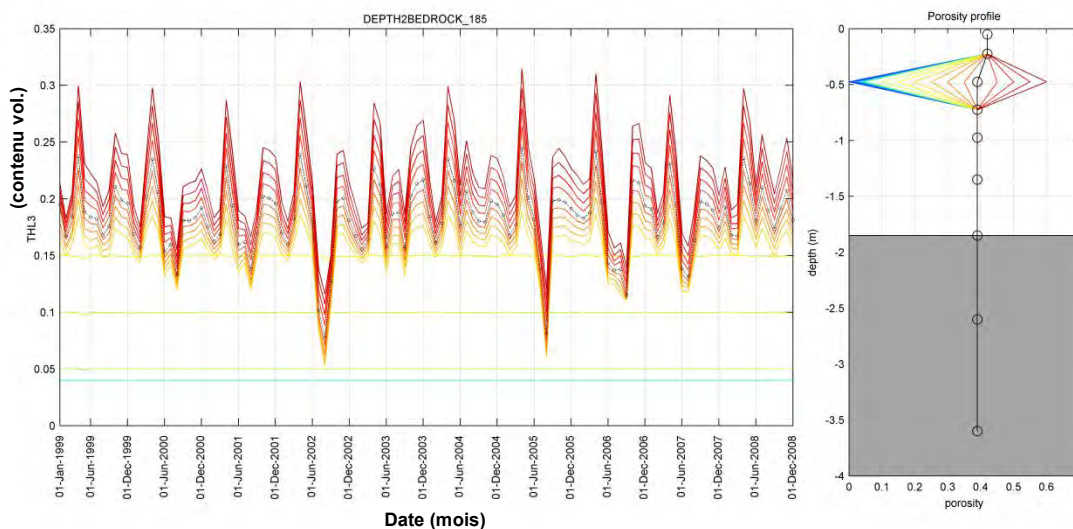


Figure 3.10 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de la porosité de la deuxième couche du sol sur le contenu en eau de la troisième couche du sol (THL3). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de THL3 sur dix ans de chaque expérience.

3.3.3 Changements de porosité des couches de sol 3 à 9

- Série de tests par site avec les valeurs de profondeur de la roche mère de 1.1m, 1.35m, 1.6m, 1.85m et 2.1m
- Valeur de porosité des couches 3 à 9 est variée de 0 à 0.6

Les figures 3.11 et 3.12 montrent les résultats des tests de changements de porosité des couches 3 à 9 du sol. Encore une fois les résultats indiquent qu'il y a très peu d'influence de la porosité sur la température du sol. En termes de contenu en eau du sol, les tests montrent des résultats semblables aux tests précédents avec une relation positive entre une augmentation de la porosité et le contenu en eau (figure 3.12). L'effet de seuil (autour d'une porosité de ~ 0.04 de la dernière couche) est encore présent, seuil à partir duquel, la quantité d'eau augmente rapidement dans la deuxième couche.

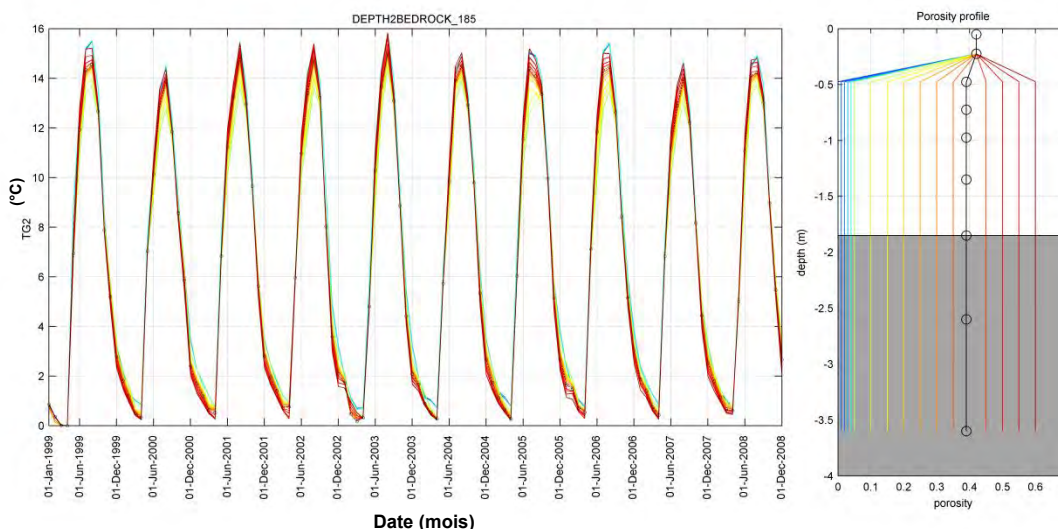


Figure 3.11 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de la porosité des couches 3 à 9 du sol sur la température de la deuxième couche du sol (TG2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de TG2 sur dix ans de chaque expérience.

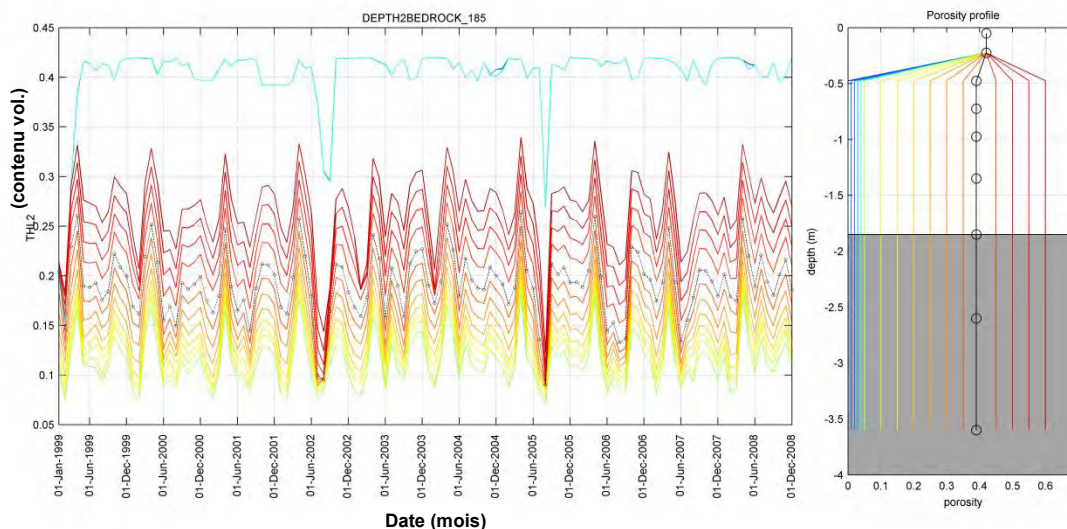


Figure 3.12 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de la porosité des couches 3 à 9 du sol sur le contenu en eau de la deuxième couche du sol (THL2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de THL2 sur dix ans de chaque expérience.

3.3.4 Changements de porosité des couches 3 à 9 en fonction de la profondeur de la couche considérée

- Série de tests par site avec les valeurs de profondeur de la roche mère de 1.1m, 1.35m, 1.6m, 1.85m et 2.1m
- La valeur de porosité des couches 3 à 9 diminue de façon exponentielle en fonction de la profondeur selon : $POR_p = 0.01 + (POR_2 - 0.01) \cdot (1 - t)^{prof_p}$; Où POR_p = porosité de la couche 'p' et $prof_p$ = profondeur de la couche 'p'
- t varie de 0.01 à 1 (étapes de 0.05)

Les figures 3.13 et 3.14 montrent les résultats des tests de changements de porosité des couches 3 à 9 du sol en fonction de la profondeur. Les tests et résultats de température (figure 3.13) et humidité (figure 3.14) du sol sont semblables à ceux de la section précédente (section 3.3.3) mais dans le cas présent, la porosité diminue de façon graduelle en fonction de la profondeur. On remarque que les températures de sol estivales diminuent rapidement avec la diminution graduelle de la porosité en fonction de la profondeur (figure 3.13). Pour le contenu en eau du sol, on remarque un patron semblable aux tests précédents où une diminution de la porosité diminue la quantité d'eau jusqu'au seuil de ~0.04 après lequel une diminution subséquente résulte en une augmentation dramatique du contenu en eau.

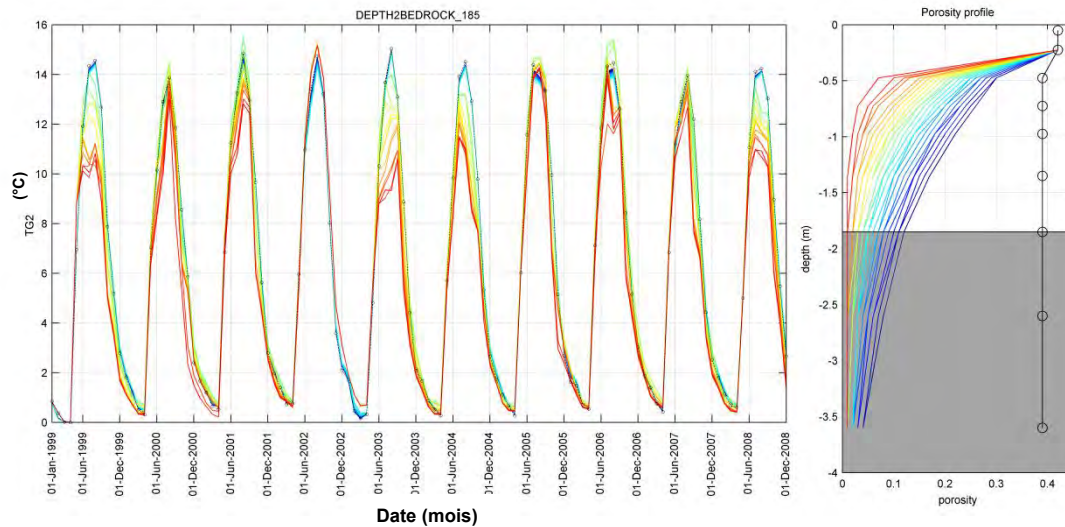


Figure 3.13 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de la porosité des couches 3 à 9 du sol en fonction de la profondeur sur la température de la deuxième couche du sol (TG2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de TG2 sur dix ans de chaque expérience.

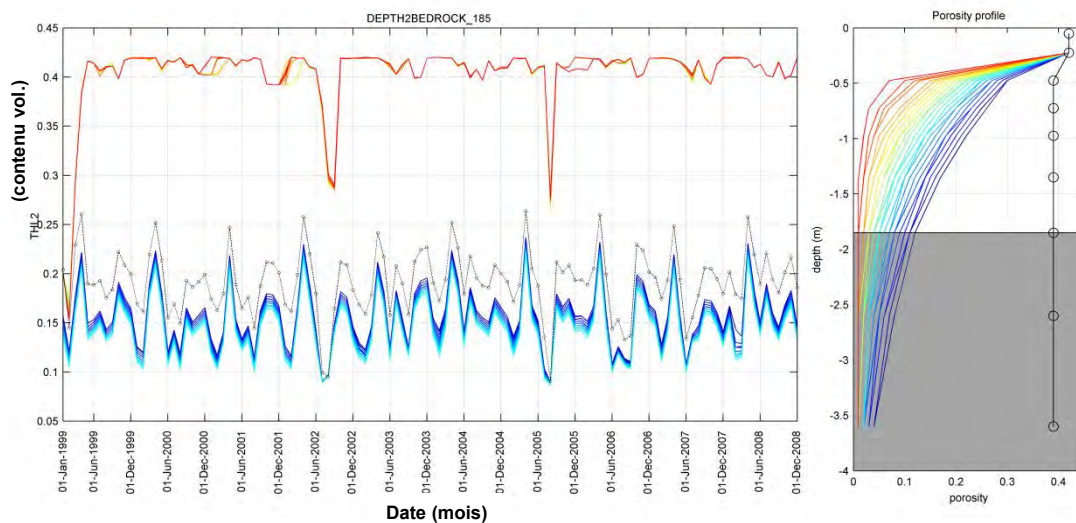


Figure 3.14 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de la porosité des couches 3 à 9 du sol en fonction de la profondeur sur le contenu en eau de la deuxième couche du sol (THL2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de THL2 sur dix ans de chaque expérience.

3.3.5 Changements de porosité des couches 3 à 9 du sol en modifiant la pente de la formule empirique de CLASS 3.6 (la porosité varie en fonction du % de sable)

Formule CLASS3.6 de porosité : $POR = (b * SAND + 48.9)/100$

- Série de tests par site avec les valeurs de profondeur de la roche mère de 1.1m, 1.35m, 1.6m, 1.85m et 2.1m
- La valeur de la pente (b) est variée de -0.176 à -0.031 (étapes de 0.005); NB valeur original = -0.126

Les figures 3.15 et 3.16 montrent les résultats des tests de changements de porosité des couches 3 à 9 du sol en en modifiant la pente de la formule empirique de CLASS 3.6. On remarque qu'il y a peu d'effet sur les températures de sol (figure 3.15). En termes d'humidité on observe qu'en augmentant la pente, le contenu en eau augmente également (figure 3.16). En comparant des observations des trois sites avec les valeurs simulées il est donc possible de trouver la pente pour laquelle on obtient la meilleure correspondance entre le modèle et les observations. Par contre, il ne semble malheureusement pas y avoir une valeur de pente universelle qui produirait des résultats acceptables pour l'ensemble des trois sites et différentes conditions de sol.

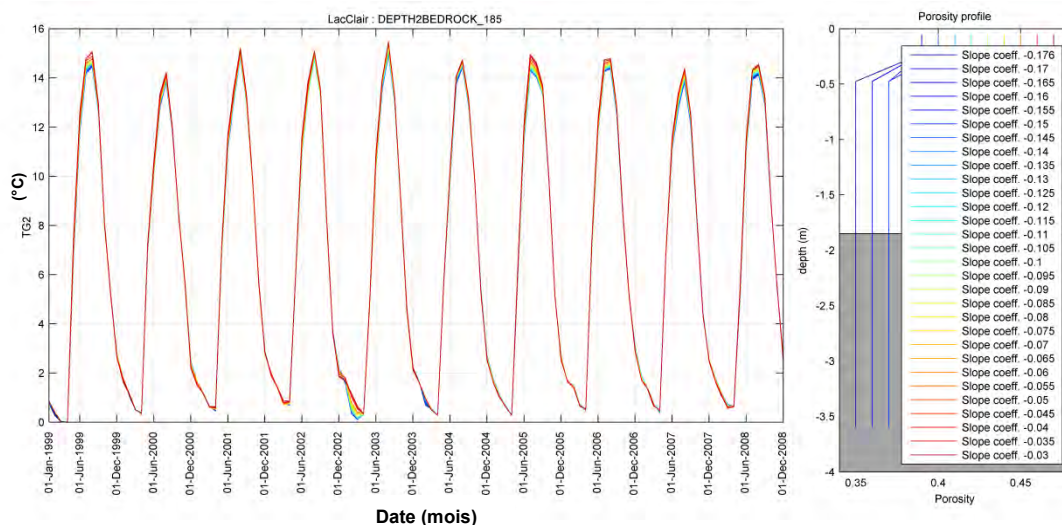


Figure 3.15 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de la porosité des couches 3 à 9 du sol en modifiant la pente de la formule empirique de CLASS 3.6 (porosité en fonction de la % de sable) sur température de la deuxième couche du sol (TG2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. La figure à gauche indique la série temporelle de TG2 sur dix ans de chaque expérience.

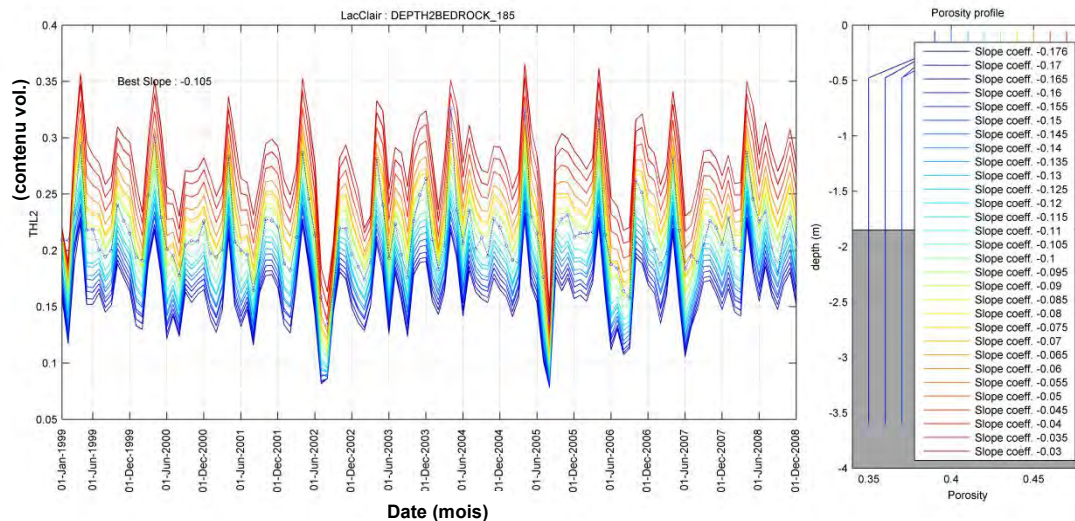


Figure 3.16 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de la porosité des couches 3 à 9 du sol en modifiant la pente de la formule empirique de CLASS 3.6 (porosité en fonction de la % de sable) sur le contenu en eau de la deuxième couche du sol (THL2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où la porosité a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. La figure à gauche indique la série temporelle de THL2 sur dix ans de chaque expérience.

3.4 Tests de sensibilité sur les valeurs de conductivité hydraulique à saturation (KSAT)

3.4.1 Changements de KSAT de la dernière couche de sol avant la roche-mère

- Série de tests par site avec les valeurs de profondeur de la roche mère de 1.1m, 1.35m, 1.6m, 1.85m et 2.1m
- Valeur de KSAT de la dernière couche avant la roche-mère est multipliée par un facteur allant de 0.05 à 1 (en étapes de 0.05)

Les figures 3.17 et 3.18 montrent les résultats des tests de KSAT de la dernière couche de sol avant la roche mère. À droite sur les figures on voit le profil de KSAT en fonction de la profondeur du sol pour chacune des expériences (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). Les résultats indiquent qu'il y a très peu d'influence de KSAT de la dernière couche sur la température du sol et on voit que presque toutes les courbes sont superposées (figure 3.17). En termes de l'humidité du sol les tests montrent également très peu d'effet d'une augmentation de KSAT de la dernière couche sur la quantité d'eau (figure 3.18).

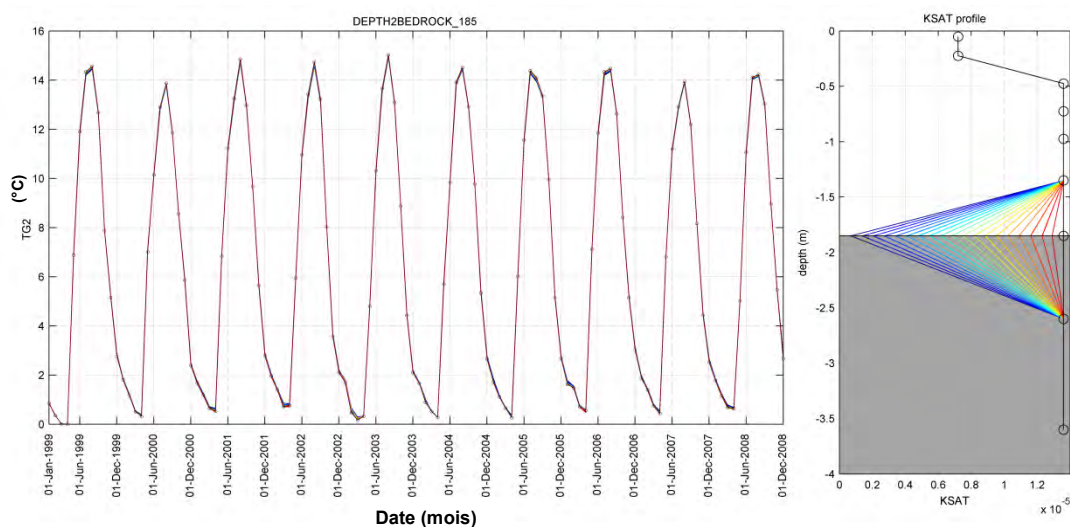


Figure 3.17 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de KSAT de la dernière couche avant la roche mère sur la température de la deuxième couche du sol (TG2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où KSAT a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de KSAT en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de TG2 sur dix ans de chaque expérience.

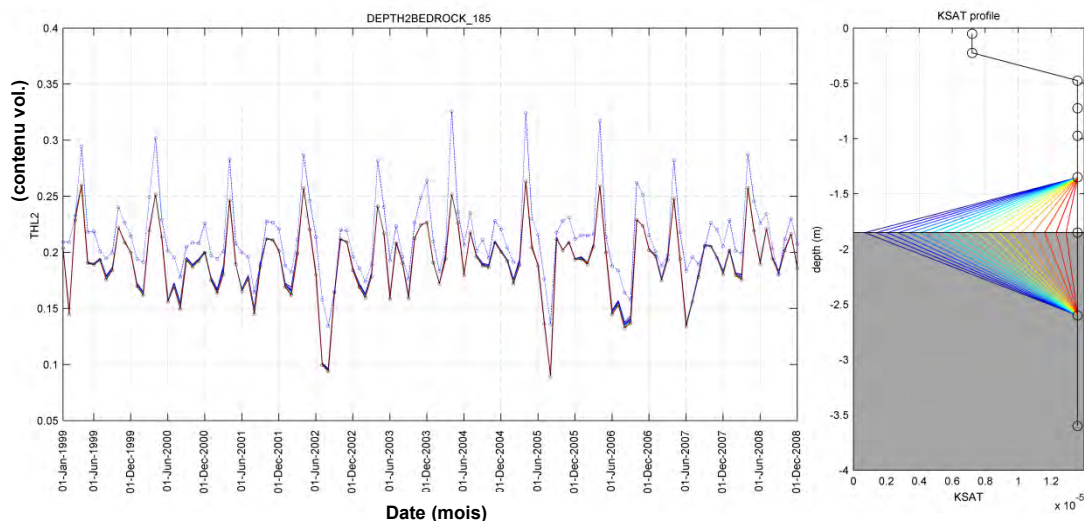


Figure 3.18 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de KSAT de la dernière couche avant la roche mère sur le contenu en eau de la deuxième couche du sol (THL2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où KSAT a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de KSAT en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de THL2 sur dix ans de chaque expérience.

3.4.2 Changements de KSAT des couches 3 à 9 en fonction de la profondeur

- Série de tests par site avec les valeurs de profondeur de la roche mère de 1.1m, 1.35m, 1.6m, 1.85m et 2.1m
- La valeur de KSAT pour les couches 3 à 9 diminue de façon exponentielle en fonction de la profondeur selon : $KSAT_p = KSAT_2^*(1-t)^{prof_p}$ où $KSAT_p$ = KSAT de la couche p et $prof_p$ = profondeur de la couche p
- t varie de 0 à 1 (étapes de 0.05)

Les figures 3.19 et 3.20 montrent les résultats des tests de changements de KSAT des couches 3 à 9 du sol en fonction de la profondeur. Ces tests sont quasi semblables à ceux de la section précédente, mais dans ce cas, KSAT est diminué de façon graduelle en fonction de la profondeur. On remarque qu'il n'y a presque pas d'effet sur les températures de sol (figure 3.19). En revanche, on remarque qu'une diminution de KSAT augmente le contenu en eau de la deuxième couche du sol (figure 3.20). Ce patron est plus évident dans les cas où la valeur de KSAT diminue rapidement avec la profondeur.

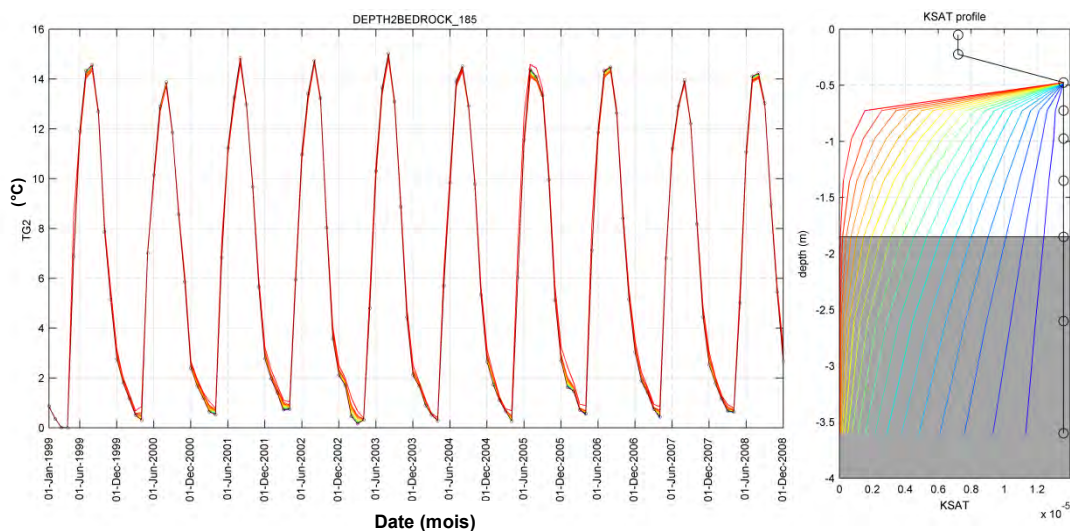


Figure 3.19 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de KSAT des couches 3 à 9 du sol en fonction de la profondeur sur la température de la deuxième couche du sol (TG2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où KSAT a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de TG2 sur dix ans de chaque expérience.

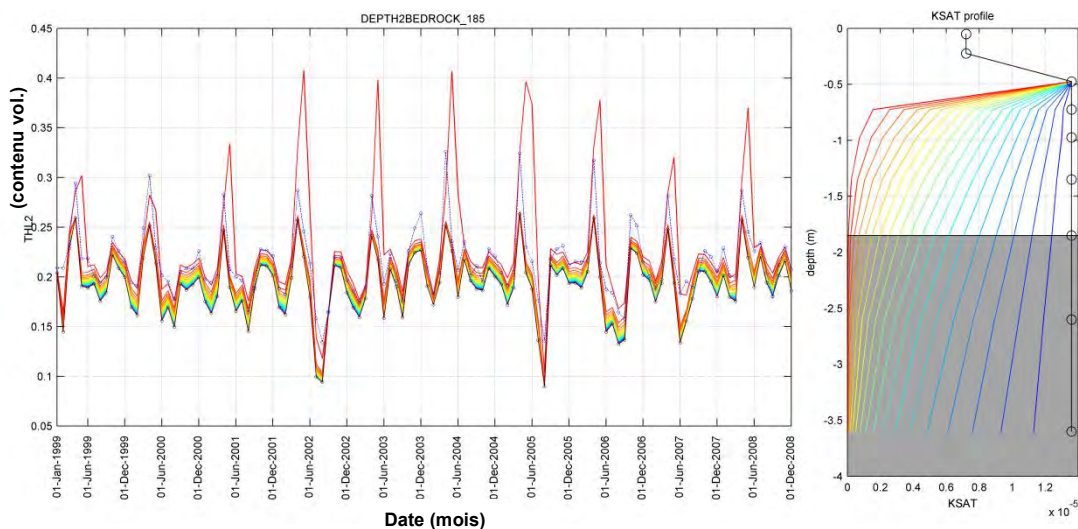


Figure 3.20 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.85m) d'un test de sensibilité d'un changement de KSAT des couches 3 à 9 du sol en fonction de la profondeur sur le contenu en eau de la deuxième couche du sol (THL2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où KSAT a été modifiée. La courbe noire avec cercles ouverts indique les valeurs originales. À droite on voit le profil de porosité en fonction de la profondeur du sol (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). La figure à gauche indique la série temporelle de THL2 sur dix ans de chaque expérience.

Globalement, les résultats de ces tests de sensibilité montrent clairement que la température des sols est très peu affectée par les variations de contenu en eau induites par les variations forcées de texture, de porosité ou de conductivité hydraulique. Par contre, le contenu en eau peut être très affecté par les variables testées et énumérées ci-haut mais dans la grande majorité des cas, seulement des valeurs extrêmes de ces variables arrivent à produire de grands changements de contenu en eau. Dans une gamme réaliste de variation comme celle que l'on pourrait rencontrer *in situ*, les changements de contenu en eau sont relativement faibles. Il s'ensuit que d'autres pistes doivent être abordées pour obtenir un impact important sur le contenu en eau, dont des modifications au fonctionnement de CLASS, ce que nous abordons dès la prochaine section.

Section 4. Calibration et amélioration de CLASS en mode colonne à l'aide de données observées de température et de contenu en eau des sols forestiers.

4.1 Version initiale de CLASS utilisée

Toutes les simulations en mode couplé du projet (sauf une, voir le Tableau 5.1) ont été faites avec la version CLASS 3.6 comme base (voir Versegny [2012] pour la documentation technique). Cette version bénéficie de nombreuses améliorations par rapport à l'ancienne version 2.7, incluant entre autre (liste non-exhaustive) :

- La capacité de simuler un nombre illimité de couches de sol
- La simulation explicite des sols organiques
- Des algorithmes plus réalistes pour certains aspects du couvert de neige, dont :
 - Densité de la neige fraîche
 - Conductivité thermique de la neige
 - Interception de la neige par le couvert végétal
 - Coexistence d'eau liquide permise dans le couvert de neige
- Une formulation plus réaliste de l'évapotranspiration
- Nouvelles formulations des conductivités thermique et hydraulique des sols
- La capacité de simuler des précipitations mixtes pour des températures de l'air près du point de congélation

4.2 Modifications aux paramétrages

Pour les fins de notre étude, certaines modifications ont été ajoutées à CLASS 3.6. Nos tests ont révélé que ces modifications améliorent le réalisme des régimes thermiques et hydriques des sols simulés. Les modifications sont énumérées dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 Modifications apportées à CLASS 3.6 afin d'améliorer les régimes thermiques et hydriques des sols simulés.

Paramètre	Type	Configuration initiale	Nouvelle configuration
Nombre de couches de sol	CLASS 3.6 original	3	9
Sols organiques	CLASS 3.6 original	Sols organiques non-simulés	Sols organiques simulés (de type tourbière)
Conductivité thermique de la neige	CLASS 3.6 original	Formulation de Mellor (1977)	Formulation de Sturm et al. (1997)
Résistance stomatale minimale	Modification à CLASS 3.6	Conifères : 200 s m ⁻¹	Conifères : 500 s m ⁻¹
		Feuillus : 125 s m ⁻¹	Feuillus : 130 s m ⁻¹
		Cultures : 85 s m ⁻¹	Cultures : 85 s m ⁻¹
		Autresherbes : 100 s m ⁻¹	Autres herbes : 100 s m ⁻¹
Drainage à la base du profil de sol	Modification à CLASS 3.6	Conductivité hydraulique à saturation avec XDRAIN=1	Conductivité hydraulique à saturation contrôlée par un facteur 0 ≤ XDRAIN ≤ 1
Base de données des sols et du couvert végétal	Modification à CLASS 3.6	Webb et al. (1993)	CANSIS/USGS/CCRS + MRN

Notez que les paramètres de type « CLASS 3.6 original » ont également été testés pour confirmer ou infirmer leur pertinence dans cette étude. En particulier, la conductivité thermique de la neige a été testée initialement dans le cadre de cette étude avant d'être adoptée définitivement dans la version officielle de CLASS 3.6 en 2011.

4.3 Résultats : Impacts des modifications

Dans cette section, nous passons brièvement en revue les principaux impacts causés par les six modifications illustrées au tableau précédent et nous démontrons succinctement la pertinence de leur utilisation à l'aide de simulations « offline » produites à partir de données observées de trois sites forestiers (Lac Clair, Lac Laflamme et Lac Tirasse).

4.3.1 Nombre de couches de sol

Pour chacun des sites forestiers, deux simulations ont été effectuées : la première (3 LEVS) comprenait les 3 niveaux de sol nominal de CLASS (épaisseur 10, 25 et 375 cm) et la seconde (9 LEVS) comprenait 9 niveaux de sol (épaisseur 10, 25, 25, 25, 25, 50, 50, 100 et 100 cm), la troisième couche de la première configuration étant subdivisée en 7 niveaux dans le deuxième cas. Les résultats comparés pour la première couche de sol minéral (couche 2 dans CLASS) sont illustrés dans la figure 4.1. Notons que l'effet de la couche organique n'est pas nécessairement limité à la couche 2 mais que cette dernière est très importante au niveau de l'écologie forestière, la vaste majorité des racines y étant confinée. C'est pourquoi nous nous attardons particulièrement sur celle-ci.

Température (°C) – couche 2

Contenu vol. d'eau liquide (%) – couche 2

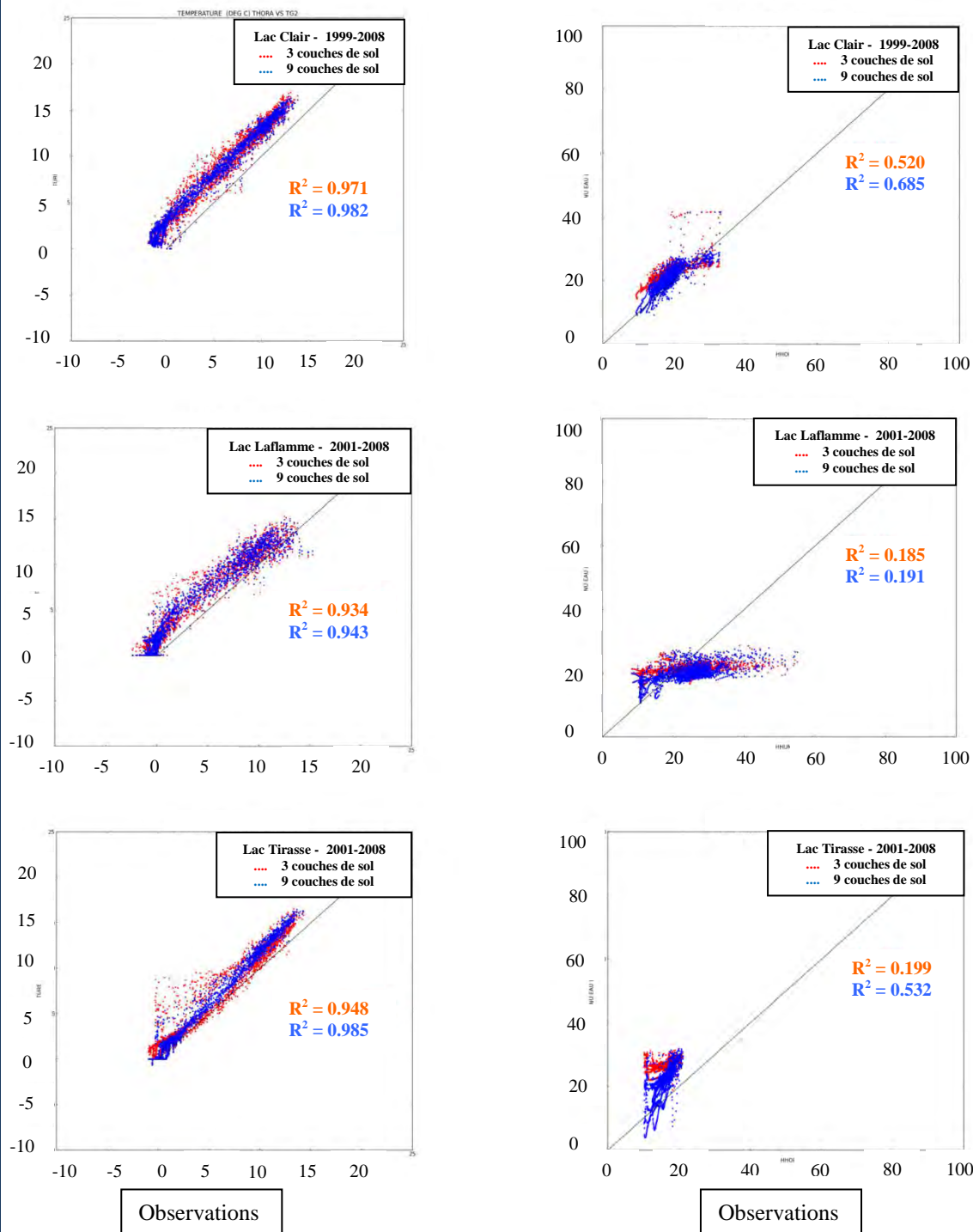


Figure 4.1 Comparaison de 2 simulations effectuées avec CLASS 3.6 de la température et du contenu en eau de la couche 2 du sol.

Dans tous les cas, la configuration à 9 niveaux donne de meilleurs R^2 , tant pour les températures que pour les contenus en eau liquide, bien que les contenus en eau des sols du Lac Laflamme demeurent problématiques. De plus, des simulations effectuées à l'aide de données provenant du site Old Aspen (Projet BOREAS – non montré) ont démontré que les températures de la couche 2 sont beaucoup mieux simulées lors des hivers rigoureux (i.e., lorsque le sol gèle complètement). Dans ces cas, la formation de glace dans les couches relativement profondes provoque un réchauffement des couches de sol plus près de la surface en raison d'un important relâchement de chaleur latente de fusion. Ce processus est complètement absent en présence d'une troisième couche très épaisse (telle qu'on la retrouve dans la configuration à trois niveaux) puisque dans ce cas la grande inertie thermique de celle-ci empêche le gel complet de l'eau.

4.3.2 Sols organiques

La figure 4.2 illustre l'effet de l'ajout d'une couche d'humus (approximée par une couche de sol organique de type « tourbière ») sur les températures estivales des sols du bassin versant du Lac Tirasse. Deux simulations en mode « colonne » ont été effectuées pour lesquelles la première couche de sol fut tour-à-tour fixée comme minérale («CTL» - Figure 4.2a) puis organique («EXP1» - Figure 4.2b).

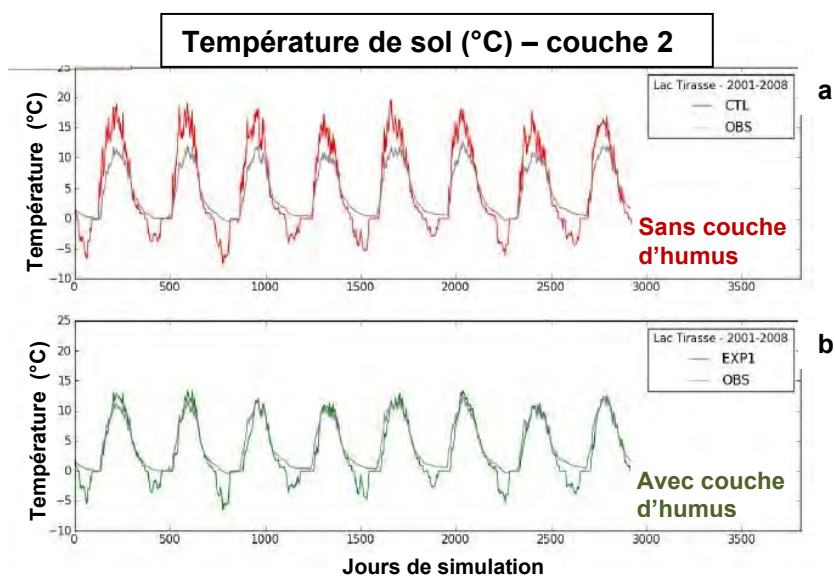


Figure 4.2 L'effet de l'ajout d'une couche d'humus sur les températures estivales des sols du bassin versant du Lac Tirasse.

Les résultats démontrent une nette amélioration (et statistiquement significative) des températures estivales simulées pour la couche 2 (les autres couches ne sont pas montrées, mais la réponse est similaire), alors que les sols organiques ont un impact très marginal et non-significatif sur les températures hivernales.

4.3.3 Conductivité thermique de la neige

Dans la figure 4.3, la même simulation «EXP1» (Figure 4.3a) de la figure précédente est maintenant comparée à la simulation «EXP2» (Figure 4.3b) dans laquelle une nouvelle formulation de la conductivité thermique de la neige a été implémentée. Ainsi, «EXP1» contient la formulation courante selon Mellor (1977) alors que «EXP2» contient la formulation de Sturm *et al.* (1997).

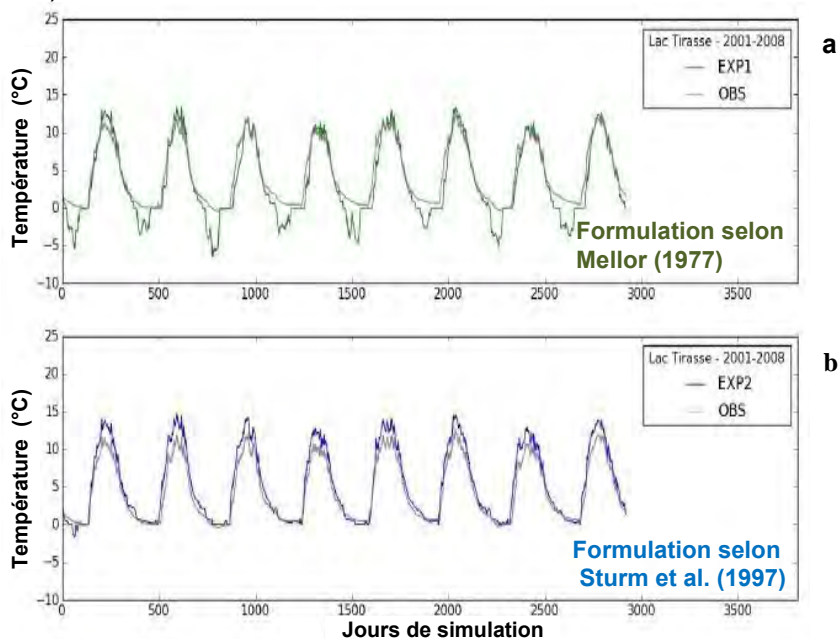


Figure 4.3 L'effet d'une nouvelle formulation de la conductivité thermique de la neige sur la température des sols du bassin versant du Lac Tirassee.

Il est clair que la formulation de Sturm *et al.* (1997) isole les sols beaucoup mieux durant l'hiver et corrige les biais fortement négatifs des températures de sol. La formulation de Mellor (1977) dans «EXP1» donne une conductivité sur-estimée d'environ un facteur 2 (non montré) par rapport à Sturm *et al.* (1997). Les différences de températures ne sont statistiquement significatives qu'en hiver.

4.3.4 Résistance stomatale minimale

La figure 4.4 illustre les résultats de simulations de CLASS 3.6 en mode «colonne» pour les trois sites forestiers et dans lesquels les valeurs minimales de résistance stomatale (RSMIN) ont été ajustées pour mieux faire correspondre les valeurs annuelles des termes hydrologiques de base : précipitation, écoulement et évapotranspiration. Les valeurs d'écoulements et de précipitations annuelles sont des données observées alors que celles de l'évapotranspiration sont calculées comme résidus du bilan hydrologique Précipitation – Écoulement. Dans la colonne des valeurs de RSMIN par défaut (colonne du centre), on remarque que CLASS 3.6 tend à sous-estimer les écoulements annuels et sur-estimer l'évapotranspiration. Or, dans un climat tempéré ou nordique comme le Québec où le rayonnement net au sol est relativement faible, la répartition des précipitations annuelles tend

à favoriser l'écoulement plutôt que l'évapotranspiration. Nous voyons par exemple que l'évapotranspiration annuelle moyenne simulée au Lac Tirasse est du même ordre de grandeur que l'écoulement, ce qui ne correspond pas aux valeurs observées. Les valeurs de RSMIN ajustées à la hausse (colonne de droite) ramènent les valeurs d'écoulement et d'évapotranspiration à des niveaux plus réalistes.

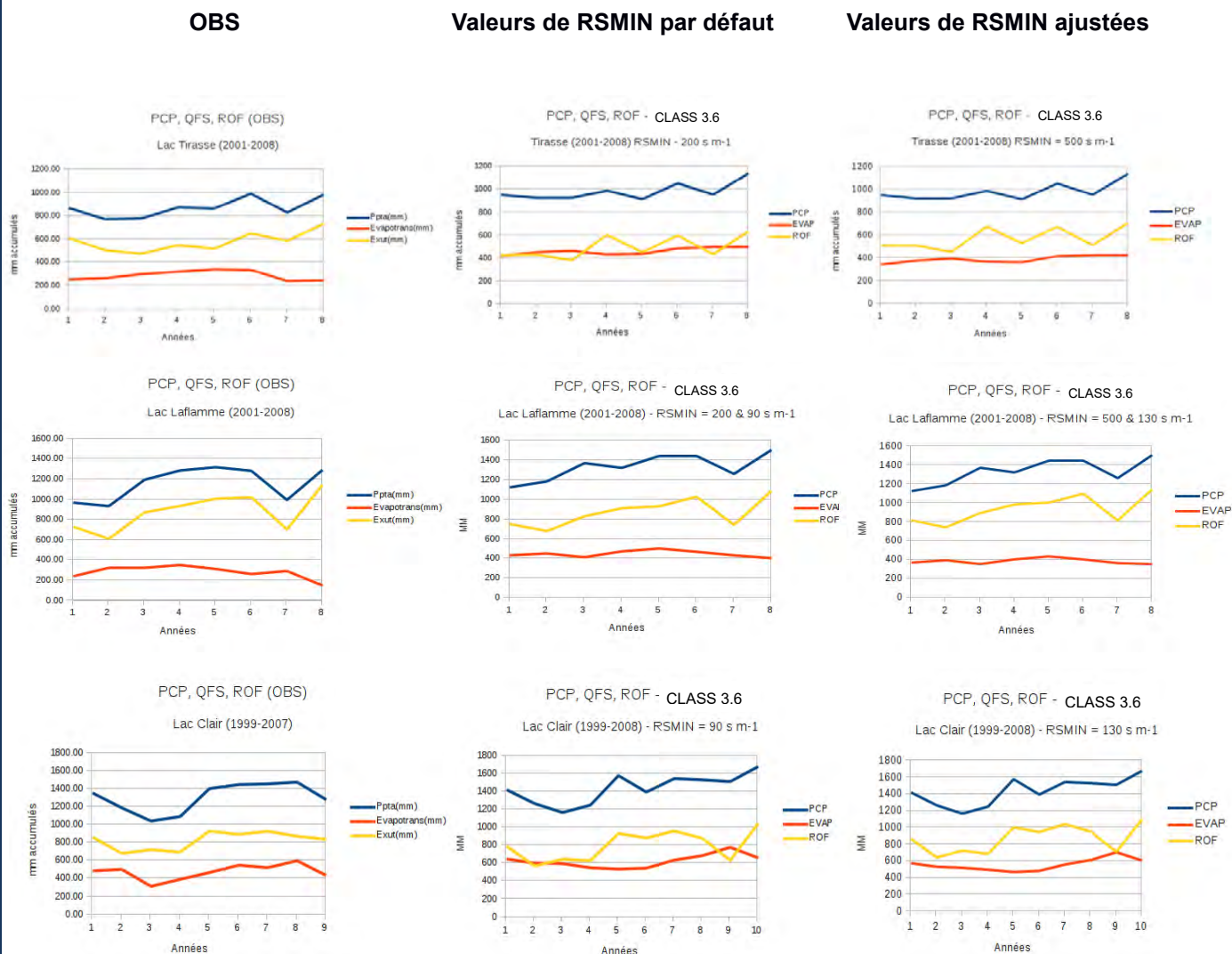


Figure 4.4 Simulations de CLASS 3.6 en mode «colonne» pour les trois sites forestiers et dans lesquels les valeurs minimales de résistance stomatale (RSMIN) ont été ajustées pour mieux faire correspondre les valeurs annuelles des termes hydrologiques de base

Traits bleus : précipitation (PCP) ; Traits oranges : évapotranspiration (EVAP) ; Traits jaunes : écoulement à l'exutoire du bassin (ROF).

4.3.5 Indice de drainage à la base du profil de sol

Dans CLASS 3.6 l'indice de drainage (XDRAIN) est un facteur multiplicatif qui modifie le flux de drainage vertical au fond de la colonne de sol. Dans CLASS 3.6 la variable XDRAIN peut prendre des valeurs continues entre 0 pour les sols imperméables (ex. : un marécage) et 1 pour les sols totalement perméables. La valeur par défaut de XDRAIN a été fixée à 1.0 jusqu'à maintenant, de sorte que la perméabilité effective du sol est contrôlée plutôt par la conductivité hydraulique à saturation au bas de la colonne de sol. Dans les tests présentés ici nous examinons des valeurs de XDRAIN entre 0 et 1 pour déterminer son efficacité à réduire le déficit apparent d'eau dans la colonne de sol – possiblement en raison de l'absence d'une nappe phréatique dans le modèle.

4.3.5.1 Changements de l'indice de drainage (XDRAIN) en sol minéral

- Série de tests par site avec les valeurs de profondeur de la roche mère de 0.1m, 0.3m, 0.5m, 0.75m, 0.9m, 1.1m, 1.35m, 1.6m, 1.85m et 2.1m
- Valeurs de XDRAIN testées : 0.002, 0.005, 0.007, 0.01, 0.012, 0.015, 0.017, 0.02, 0.05, 0.1, 1.0; NB valeur originale = 1.0

Les figures 4.5 et 4.6 montrent les résultats des tests de XDRAIN. Ceux-ci indiquent que XDRAIN exerce très peu d'influence sur la température du sol et on voit que presque toutes les courbes sont superposées (figure 4.5). Quant à l'humidité du sol, les tests montrent une relation négative dans la mesure où une diminution de XDRAIN tend à causer une augmentation du contenu en eau (figure 4.6). Sur la figure 4.5b à droite on voit le profil estival moyen (moyenne de 10 ans pour les mois de juin, juillet et août) en fonction de la profondeur du sol pour chacune des expériences (le rectangle gris indique le niveau de la roche mère). Les résultats indiquent qu'une diminution de la valeur de XDRAIN augmente la quantité d'eau dans toutes les couches de sol et davantage dans les couches plus profondes. Ainsi on observe dans la figure 4.6 que pour une profondeur de ~0.25m on obtient une gamme de valeurs de contenu en eau de ~0.15 quand XDRAIN = 1 jusqu'à ~0.2 quand XDRAIN = 0.005, alors qu'à une profondeur de ~1.0 m on observe une valeur de ~0.15 quand XDRAIN = 1 et de 0.27 quand XDRAIN = 0.005. Il apparaît donc que, pour certains profils verticaux (qui sont fonction de la profondeur de la roche mère) de XDRAIN semble permettre la présence d'une fausse « nappe phréatique » qui serait normalement absente dans le modèle.

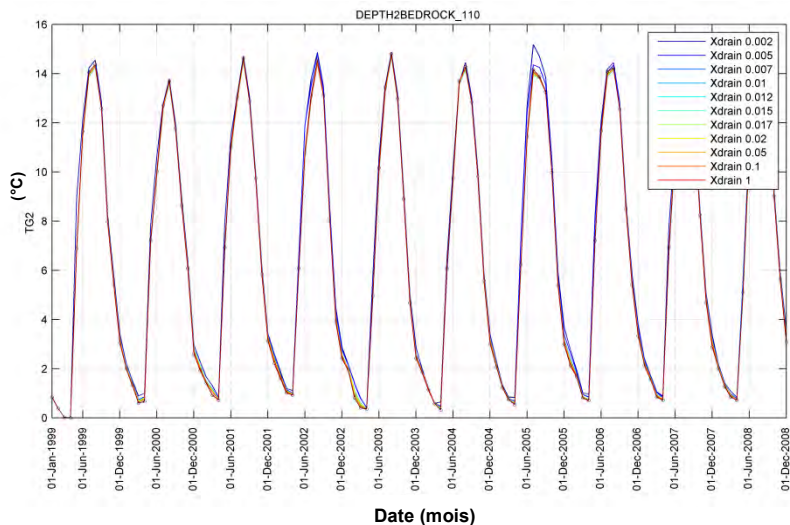


Figure 4.5 Exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.1m) d'un test de sensibilité d'un changement de l'indice de drainage (XDRAIN) du sol sur la température de la deuxième couche du sol (TG2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où XDRAIN a été modifié. La figure indique la série temporelle de TG2 sur dix ans de chaque expérience. La valeur originale de XDRAIN = 1 (courbe rouge).

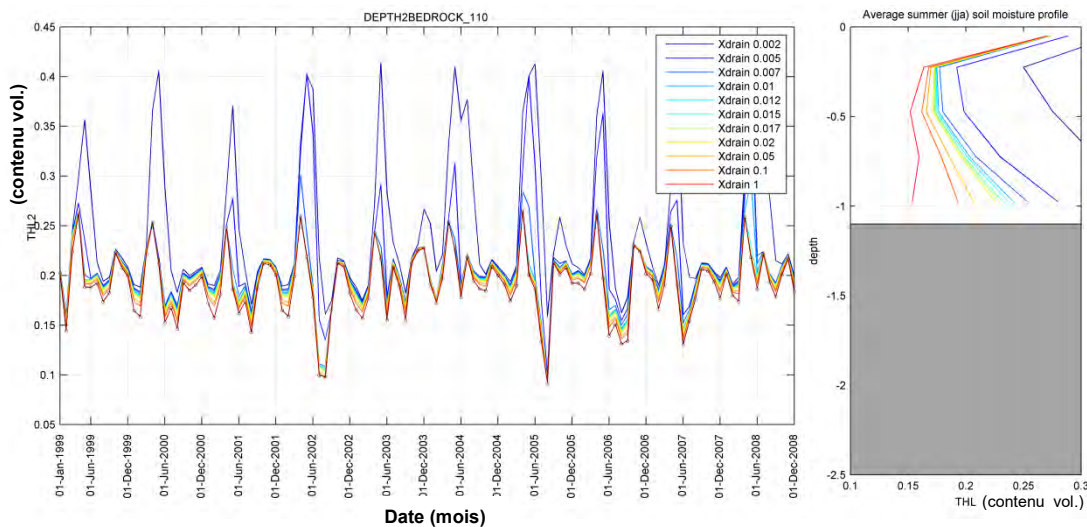


Figure 4.6 Exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.1m) d'un test de sensibilité d'un changement de l'indice de drainage (XDRAIN) du sol sur le contenu en eau de la deuxième couche du sol (THL2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où XDRAIN a été modifiée. La figure à gauche indique la série temporelle de THL2 sur dix ans de chaque expérience. La figure à droite indique le profil des valeurs moyennes estivales (JJA) en fonction de la profondeur. La valeur originale de XDRAIN = 1 (courbe rouge).

4.3.5.2 Changements de l'indice de drainage (XDRAIN) en sol organique

- Le sol de chaque site est artificiellement classé 'organique' pour ces tests (code SAND=-2 dans CLASS3.6)
- Série de tests par site avec les valeurs de profondeur de la roche mère de 0.1m, 0.3m, 0.5m, 0.75m, 0.9m, 1.1m, 1.35m, 1.6m, 1.85m et 2.1m
- Valeurs de XDRAIN testées : 0.002, 0.005, 0.007, 0.01, 0.012, 0.015, 0.017, 0.02, 0.05, 0.1, 1.0; NB valeur originale = 1.0

Les figures 4.7 et 4.8 montrent les résultats des tests de XDRAIN en sol organique. Ces tests ont été effectués afin de vérifier si une modification de l'indice de drainage dans des sols très humides et peu drainés produit ou non des effets non-désirables. La figure 4.7 indique qu'il n'y a presque aucun effet de l'indice de drainage sur les températures d'un sol organique. Par contre on constate que des valeurs de XDRAIN inférieures ou égales à ~0.02 peuvent produire des conditions de saturation prolongées (figure 4.8).

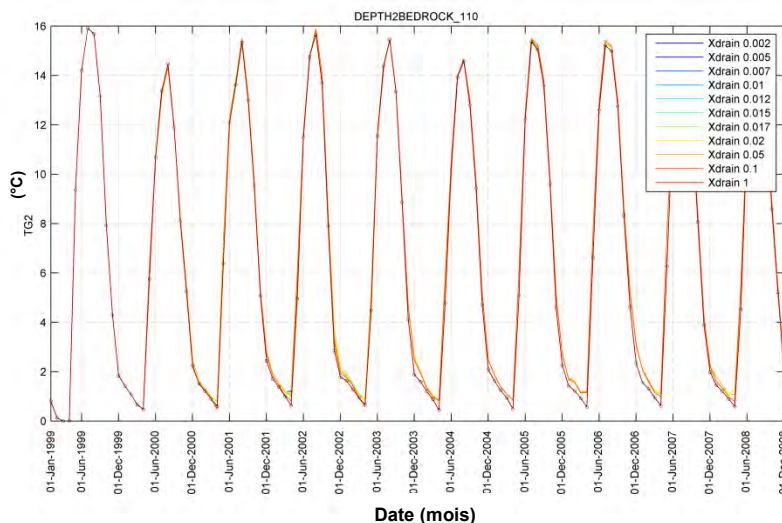


Figure 4.7 Exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.1m) d'un test de sensibilité d'un changement de l'indice de drainage (XDRAIN) du sol sur la température de la deuxième couche du sol (TG2). Le sol est codé organique (flag -2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où XDRAIN a été modifiée. La figure indique la série temporelle de TG2 sur dix ans pour chaque expérience. La valeur originale de XDRAIN = 1 (courbe rouge).

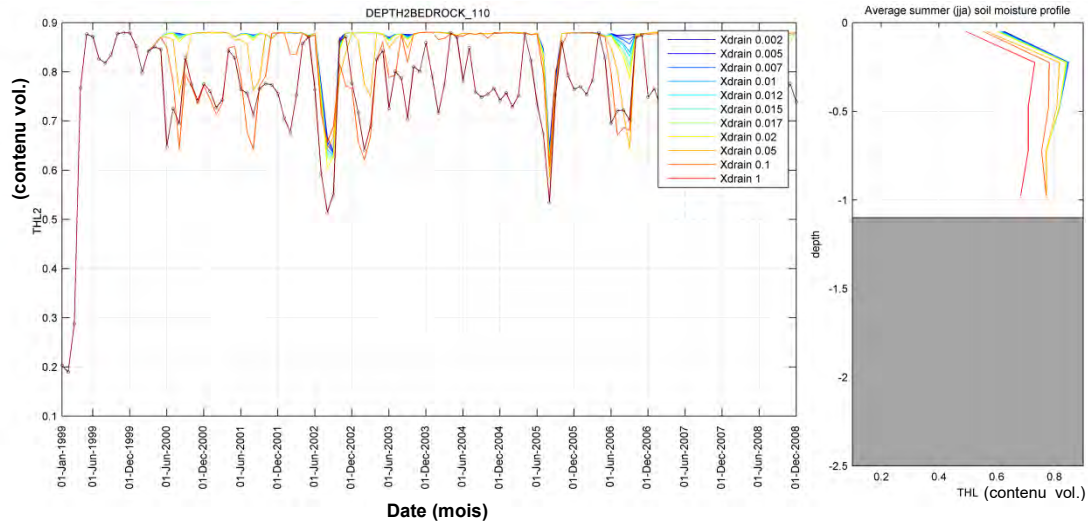


Figure 4.8 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.1m) d'un test de sensibilité d'un changement de l'indice de drainage (XDRAIN) du sol sur le contenu en eau de la deuxième couche du sol (THL2). Le sol est codé organique (flag -2). Chaque couleur de courbe indique une expérience où XDRAIN a été modifiée. La figure à gauche indique la série temporelle de THL2 sur dix ans de chaque expérience. La figure à droite indique le profil des valeurs moyennes estivales(JJA) en fonction de la profondeur. La valeur originale de XDRAIN = 1 (courbe rouge).

4.3.5.3 Changements de l'indice de drainage (XDRAIN) en sol argileux

- Le sol de chaque site est artificiellement modifié pour tester des valeurs d'argile (CLAY) de 50 ou 80% et la valeur du sable (SAND) est calculée comme 1-CLAY
- Série de tests par site avec les valeurs de profondeur de la roche mère de 0.3m, 0.75m, 1.1m, 1.35m, 1.6m
- Valeurs de XDRAIN testées : 0.002, 0.005, 0.007, 0.01, 0.012, 0.015, 0.017, 0.02, 0.05, 0.1, 1.0; NB valeur originale = 1.0

Les figures 4.9 et 4.10 montrent les résultats des tests de XDRAIN en sol argileux. Comme dans le cas des sols organiques, ces tests ont été effectués à titre de vérification de production d'effets non-désirables dans les sols typiquement déjà très humides. La figure 4.9 indique que les températures des sols argileux sont très peu sensibles aux changements de XDRAIN. Quant au contenu en eau du sol on observe des résultats semblables à ceux de la section A (figure 4.10).

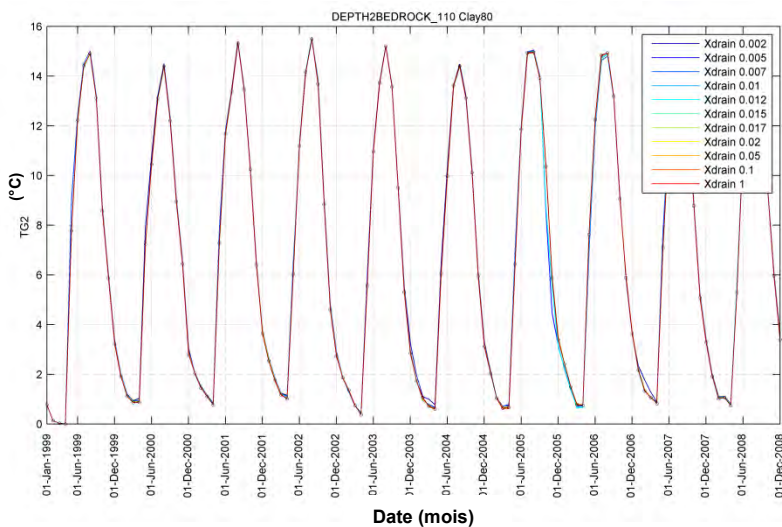


Figure 4.9 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.1m) d'un test de sensibilité d'un changement de l'indice de drainage (XDRAIN) du sol sur la température de la deuxième couche du sol (TG2). Dans ce cas CLAY = 80% et SAND = 20%. Chaque couleur de courbe indique une expérience où XDRAIN a été modifiée. La figure indique la série temporelle de TG2 sur dix ans de chaque expérience. La valeur originale de XDRAIN = 1 (courbe rouge).

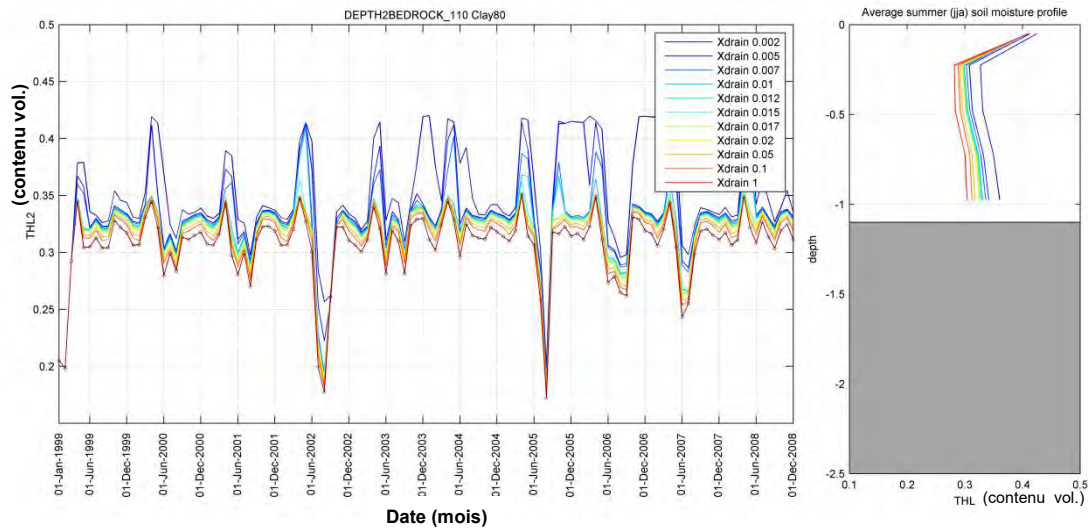


Figure 4.10 Un exemple pour le lac Clair (prof. roche-mère = 1.1m) d'un test de sensibilité d'un changement de l'indice de drainage (XDRAIN) du sol sur le contenu en eau de la deuxième couche du sol (THL2). Dans ce cas CLAY = 80% et SAND = 20%. Chaque couleur de courbe indique une expérience où XDRAIN a été modifiée. La figure de gauche indique la série temporelle de THL2 sur dix ans pour chaque expérience. La figure de droite indique le profil des valeurs moyennes estivales (JJA) en fonction de la profondeur. La valeur originale de XDRAIN = 1 (courbe rouge).

Profil de l'indice de drainage pour les simulations couplées MRCC4.

Suite aux tests de l'indice de drainage avec différentes valeurs de profondeur de la roche-mère et pour les différents sites, un profil de valeurs de XDRAIN en fonction de la profondeur du sola été établi pour les simulations couplées MRCC4. Ces valeurs doivent être considérées comme empiriques et cet exercice a pour but de recréer la présence d'une nappe phréatique à une certaine profondeur dans le sol, ce qui a un effet sur les couches au dessus.

Profondeur de la roche-mère (m)	XDRAIN
0.10	1
0.30	0.1
0.50	0.012
0.75	0.01
0.90	0.01
1.10	0.01
1.35	0.01
1.60	0.01
1.85	0.01
>=2.10	0.01

Section 5. Simulations terminées et en cours pour le projet

L'ensemble des simulations a été fait dans le but d'analyser le signal de changement climatique dans les données de température et d'humidité du sol. Ces simulations ont été produites sur un domaine centré sur le Québec (QC) qui est basé sur une grille de 112 par 88 points, avec des tuiles de 45 km, et ont été pilotées aux frontières par les données du modèle canadien couplé de climat global (MCCG3).

Le tableau 5.1 résume les simulations déjà terminées (en vert) et celles en cours de route ou non analysées (en jaune).

Tableau 5.1 Résumé des simulations de MRCC4 couplé à CLASS terminées et en cours de production.

Nom de la simulation	Domaine	Pilote	Période	Version MRCC	Version CLASS	Nombre de couches de sol	Champs Géo-physiques	Sols organiques	Conductivité thermique de la neige	Résistance stomatale minimale	Facteur XDRAIN
afx	QC	CGCM3	1960-2100	4.2.3	2.7	3	Webb et al. (1993)	Non	Mellor (1977)	1 : 50 s m ⁻¹ 2 : 50 3 : 50 4 : 50	1.0
aiz	QC	CGCM3	1971-2000	4.3.3	3.6	9	CANSIS/USGS/CCRS	Oui	Sturm et al. (1997)	1 : 200 s m ⁻¹ 2 : 125 3 : 85 4 : 100	1.0
aja	QC	CGCM3	2041-2069	4.3.3	3.6	9	CANSIS/USGS/CCRS	Oui	Sturm et al. (1997)	1 : 200 s m ⁻¹ 2 : 125 3 : 85 4 : 100	1.0
ajb	QC	CGCM3	2070-2099	4.3.3	3.6	9	CANSIS/USGS/CCRS	Oui	Sturm et al. (1997)	1 : 200 s m ⁻¹ 2 : 125 3 : 85 4 : 100	1.0
ajg	QC	CGCM3	1971-2000	4.3.3	3.6	9	CANSIS/USGS/CCRS/MRN	Oui	Sturm et al. (1997)	1 : 500 s m ⁻¹ 2 : 130 3 : 85 4 : 100	~0.01
ajh	QC	CGCM3	2041-2069	4.3.3	3.6	9	CANSIS/USGS/CCRS/MRN	Oui	Sturm et al. (1997)	1 : 500 s m ⁻¹ 2 : 130 3 : 85 4 : 100	~0.01
aji	QC	CGCM3	2070-2099	4.3.3	3.6	9	CANSIS/USGS/CCRS/MRN	Oui	Sturm et al. (1997)	1 : 500 s m ⁻¹ 2 : 130 3 : 85 4 : 100	~0.01

Étant donné que les dernières simulations ne sont pas terminées, nous ne sommes pas en mesure de montrer les résultats que nous aurions espérés obtenir au début. La simulation en cours comporte des améliorations substantielles apportées suites aux nombreuses analyses de sensibilité décrites dans les sections 3 et 4. Entre temps, nous disposons de simulations « intermédiaires » du MRCC dans lesquelles les champs géophysiques ont tout de même été grandement améliorés par l'ajout des données CANSIS/USGS et par l'ajout des sols organiques (voir figures 3.1 à 3.3). Un exemple des résultats obtenus simulations aiz et

ajbest présenté aux figures 5.1 et 5.2. Par contre toutes les figures obtenues sont présentées en annexe (Annexe 1) comme il aurait été fastidieux de les inclure et de les décrire ici.

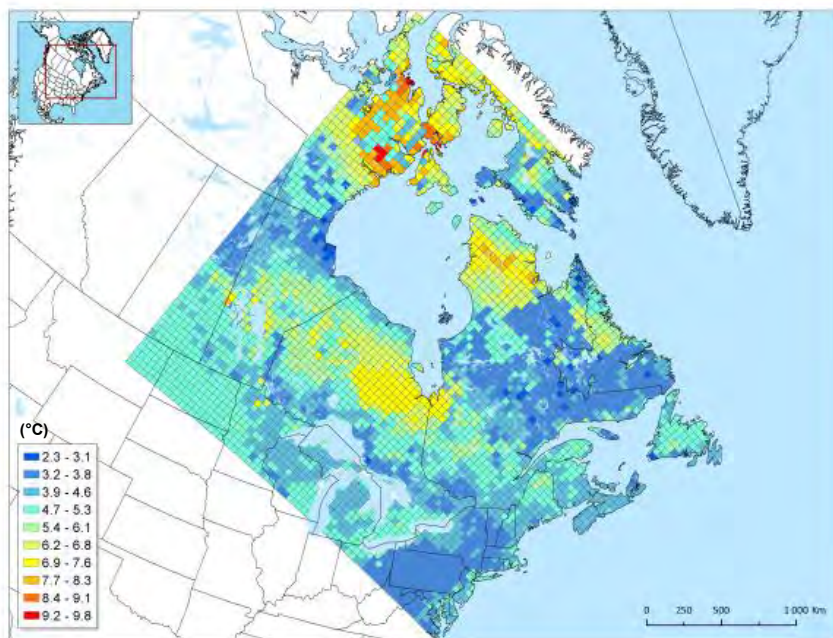


Figure 5.1 Changements de la température (°C) de la couche 2 du sol (10-35 cm) projetés par le MRCC4 couplé à CLASS 3.6 (ajb vs aiz) pour l'horizon 2080 par rapport à la période de référence 1971-2000.

Les figures 5.1 et 5.2 montrent les changements de température et de contenu en eau projetés en 2080 pour l'été par rapport à la période de référence 1971-2000 pour la couche 2 du champ géophysique. Cette couche correspond à une profondeur de 10 à 35 cm où la majorité des racines des arbres sont présentes. Selon cette projection, la température augmentera de 2.3 à 5.3 °C pour la majorité du Québec forestier ce qui est conforme aux projections faites à l'aide des modèles non couplés FORHYM-FORSTEM pour trois sites (voir section 2 de ce rapport et Houle et al. 2012). Il y a quand même des écarts qui atteignent jusqu'à 7.6 °C dans certaines régions.

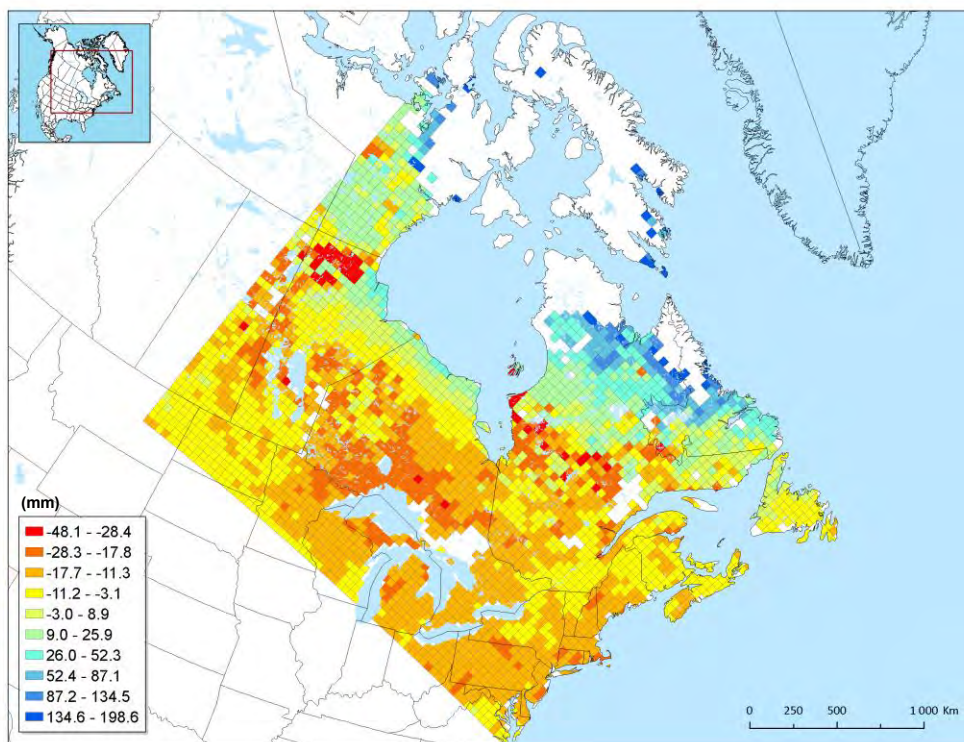


Figure 5.2 Changements du contenu en eau (mm) de la couche 2 du sol (10-35 cm) projetés par le MRCC4 couplé à CLASS 3.6 (ajb vs aiz) pour l'horizon 2080 par rapport à la période de référence 1971-2000.

Les changements de contenu en eau projetés montrent plus de variabilité spatialement que les changements de températures (Figure 5.2). Pour la majorité du territoire forestier du Québec, on projette des diminutions de l'ordre de 3 à 28% avec des pointes à 48% à certains endroits. Il est intéressant de noter qu'en Ontario et dans le nord-est des États-Unis, les diminutions seront généralement plus importantes qu'au Québec. Il faut aussi mentionner que certaines augmentations très fortes au nord du territoire sont dues au fait que le sol sera plus souvent dégelé que pendant la période de référence. C'est donc surtout un effet du passage de « eau solide » à « eau liquide » dans le modèle, qui est responsable des changements.

Il est important de mentionner que les résultats présentés ici sont préliminaires et que ceux de la prochaine simulation pourront être différents. C'est pourquoi nous ne souhaitons pas nous avancer en détails dans l'interprétation des résultats. Par contre, les comparaisons que nous ferons dans un proche avenir entre les différentes simulations seront riches d'enseignement sur le comportement du modèle et nous permettront de pousser plus loin l'interprétation des résultats et des mécanismes sous-jacents.

Section 6. Effets escomptés des changements de température et d'humidité sur la fertilité des sols forestiers du Québec

6.1 Rappel

La dernière étape du projet qui consistait à faire une première estimation des impacts des changements de température et d'humidité des sols sur la fertilité des sols forestiers a connu des retards en raison des délais dans les séries de simulations du MRCC qui étaient prévues à l'origine du projet. Il faut en effet rappeler que plusieurs séries de simulations « incrémentales » étaient envisagées, dans lesquelles on aurait modifié une ou seulement quelques variables à la fois de façon à apprécier les améliorations progressives, réalisées à chaque étape, dues à l'introduction des nouvelles variables. Chacune des simulations prévues, contenant la période de référence actuelle et deux fenêtres dans le futur, aurait dû durer plus d'un mois. La mise en marche de ces simulations a donc demandé plus de temps que prévu, en grande partie à cause des nombreuses améliorations qui ont dû être apportées aux champs géophysiques (section 3), et surtout au schéma de surface CLASS (section 4), améliorations qui se sont révélées nécessaires avant de lancer la dernière simulation. Ces améliorations ont été énumérées et discutées précédemment. La toute dernière simulation comprenant toutes les améliorations apportées est actuellement en cours et les résultats arriveront trop tard pour être utilisés comme base de réflexion pour l'étape de l'estimation des changements de la fertilité future des sols forestiers. Néanmoins, nous pouvons nous baser sur les résultats des premières étapes de ce projet pour dresser un portrait global des changements attendus sans nécessairement pouvoir produire une cartographie à l'échelle du Québec, de tous les changements attendus.

6.2 Quels sont les éléments nutritifs importants?

En raison de la limitation en azote des forêts tempérées et boréales (Vitousek & Howarth 1991), nous avons étudié les différentes formes d'azote importantes pour la nutrition des forêts, à savoir l'azote sous forme organique, sous forme de nitrate (NO_3) et d'ammonium (NH_4). Les cations basiques (Ca, Mg, K, Na) ont aussi une grande importance en raison du nombre croissant d'études rapportant des carences en ces éléments autant dans les forêts tempérées du nord-est des États-Unis et du sud du Québec (Houle et al. 1997; Watmough et Dillon 2004; Courchesne et al. 2005; Johnson et al. 2008; Bedison and Johnson 2010) que pour des sites de la forêt boréale québécoise (Duchesne et Houle 2006; 2008). Pour la suite de cette section nous diviserons la discussion en deux parties, cations basiques et azote.

6.3 Cations basiques

Les dépôts atmosphériques et l'altération des minéraux du sol représentent les deux seules sources à long terme de cations basiques (Ca, Mg et K) pour les écosystèmes forestiers. Pour cette raison, les taux d'altération sont souvent estimés par différentes méthodes dans une variété d'études sur la nutrition des forêts (Taylor et Velbel, 1991; Likens et Bormann, 1995; Anderson et al., 2002; Bélanger et al., 2004). Les taux d'altération sont également estimés car ils sont essentiels dans l'équation utilisée pour calculer les charges acides critiques pour les sols forestiers et les eaux de surface (Hodson et Langan, 1999a). Enfin, l'altération chimique des silicates implique la consommation de CO_2 qui est libéré sous

forme de HCO_3^- dans les eaux de surface puis transporté vers les océans où il précipite sous forme de carbonates (Garrels et Mackenzie, 1971; Gislason et al. 2009).

6.3.1 Distribution de la disponibilité en cations le long d'un gradient climatique spatial

Une première étude réalisée dans le cadre de ce projet en collaboration avec Environnement Canada et le département de Géographie de l'Université de Montréal visait à quantifier la variabilité des taux d'altération historiques des cations basiques à l'aide d'une méthode de perte d'éléments par profil de sols sur 22 bassins versants forestiers du sud du Québec. À l'intérieur du gradient spatial étudié, Augustin et al. (2013a) ont conclu à un impact relativement faible du climat sur la disponibilité des cations basiques, dû en grande partie à un très fort gradient minéralogique dans la zone d'étude. Ce gradient était causé par la présence de quelques sites de la région de l'Outaouais dont les sols étaient riches en calcite, un minéral facilement altérable contenant, entre autre beaucoup de Ca. Ce gradient minéralogique avait une influence prépondérante sur les taux d'altération des minéraux et ainsi sur la disponibilité des cations basiques. L'humidité du sol s'est néanmoins avérée être une variable importante avec un effet positif sur la disponibilité du sodium et du calcium. De ces résultats, il ne faut pas conclure à une faible importance du climat. Dans un contexte de changements climatiques, ce sont les variations du climat qui seront appelées à contrôler les variations futures de disponibilité en cations car les variables minéralogiques demeureront évidemment stables dans le futur alors que le climat et éventuellement la composition forestière seront appelés à changer.

Une autre étude en collaboration avec Environnement Canada et le département de Géographie de l'Université de Montréal a permis de souligner l'influence climatique sur la concentration en cations basiques des lacs et sur le taux d'altération des minéraux à l'échelle de 72 bassins versants forestiers (Figure 1.4). Notons que ces deux variables, concentration et taux d'altération des cations basiques, sont très reliées entre elles et représentent un indice de la disponibilité de ces éléments. Dans cette étude (Augustin et al. 2013b), un grand nombre de variables climatiques, morphométriques, lithologiques ainsi que des variables de composition forestière ont été utilisées comme variables prédictives de la disponibilité en cations. Dans ce cas, en raison de l'existence d'un gradient climatique beaucoup plus grand et de l'inclusion d'un plus grand nombre de sites, les variables climatiques se sont avérées les plus performantes et expliquaient à elles seules entre 22 et 50% de la variance dans la disponibilité des différents cations à l'intérieur de modèles de régressions multiples dont l'explication de la variance allait de 30 à 61% (Tableau 6.1). Dans les différents modèles obtenus, la température de l'air (annuelle, estivale et hivernale) et les précipitations (hivernales et annuelles) avaient un impact positif sur la disponibilité des cations basiques. Ces résultats sont en accord avec d'autres études publiées sur ce sujet. En effet, autant l'étude de relations empiriques que des études de modélisation géochimiques ont démontré l'influence de la température sur les réactions chimiques à la base du phénomène de l'altération des minéraux (Gislason et al. 2009; White et Blum, 1995). Par contre, l'existence d'une relation négative entre les taux d'altération et le nombre de jours avec gel (qui est inversement corrélée à la longueur de la saison de croissance) représente une découverte originale et intéressante. Ceci est probablement explicable par le fait qu'une plus longue saison de croissance signifie que l'eau transite dans les sols pendant une plus longue période de l'année et donc que les réactions d'altération ont plus de temps pour se produire. Cet effet n'est certainement pas négligeable particulièrement pour les sols forestiers les plus au nord, pour lesquels la saison sans couvert nival est déjà plus courte qu'au sud du Québec. Un mois

de moins dans la durée de la couverture nivale, comme il est projeté dans le futur (Houle et al. 2012), aura donc un effet plus fort au nord qu'au sud du territoire forestier québécois. Ce phénomène sera mis à profit dans un exercice de modélisation (voir plus bas).

Tableau 6.1 Analyse de régression multiple de la concentration des cations basiques dans les eaux de surfaces et de conditions environnementales. Les R^2 des modèles globaux, les coefficients de régression et les niveaux de signification statistique sont présentés, ainsi que les R^2 cumulés et ajustés selon l'ordre dans lequel les variables environnementales ont été retenues dans les modèles par une analyse STEPWISE. Tiré de Augustin et al. (2013b). TAAM : température annuelle air moyenne, TAAMF : température annuelle air moyenne pendant l'automne, TAAMC : température annuelle air moyenne pendant l'hiver.

Cation	Modèle global	Descriptif	Coefficients de régression			Contribution relative du descriptif
			Estimation	ES	Valeur-p	R^2 cumulé ajusté
Calcium	0,56	(Intercepte)	4065,00	1353,00	0,00	-
		Nombre de jours de gel	-9,78	1,85	0,00	0,43
		Humus	15,27	3,08	0,00	0,49
		Élévation	0,42	0,12	0,00	0,56
Magnésium	0,55	(Intercepte)	71,22	15,77	0,00	-
		TAAM	13,03	2,85	0,00	0,48
		Superficie du lac	-0,35	0,10	0,00	0,55
Sodium	0,33	(Intercepte)	48,04	8,39	0,00	-
		TAAMF	2,20	0,60	0,00	0,22
		Ratio de drainage	0,62	0,22	0,01	0,33
Potassium	0,33	(Intercepte)	Ns			-
		TAAMC	1,01	0,29	0,00	0,28
		Pente moyenne	-0,34	0,13	0,01	0,33

6.3.2 Expérience de chauffage de sols en forêt boréale

D'autres résultats expérimentaux peuvent aussi nous aider à comprendre l'impact des changements de température du sol sur la disponibilité des éléments nutritifs (D'Orangeville et al. 2013). Dans cette dernière étude, les auteurs ont installé, autour de 12 arbres expérimentaux (sapin baumier, lac Laflamme), 70m de câble chauffant disposés en spirale à l'interface entre le sol organique et minéral. Le chauffage des câbles était activé et désactivé lorsque la différence de température moyenne du sol entre les arbres chauffés et non chauffés était entre 3°C et 5°C, respectivement, de façon à maintenir une différence moyenne

de 4°C. Cette valeur de 4°C était basée sur des valeurs de température du sol projetées pour la période de 2070-2100 (Houle et al. 2012). La disponibilité en cations basiques dans le sol (et aussi en azote, voir plus bas) a été mesurée durant la période sans neige en utilisant une membrane échangeuse d'ions (PRSTM-probes, Western Ag Innovations Inc.; Saskatoon, Canada) enfouie dans l'horizon organique et dans la couche supérieure de l'horizon B du sol minéral. Cette membrane permet d'évaluer la disponibilité des nutriments en absorbant les ions libres sur des surfaces chargées similaires aux racines des plantes. Avec cette approche, après trois années de traitement, une augmentation du Mg disponible a été détectée dans les sols chauffés comparativement aux sols non chauffés servant de témoins. En revanche, la disponibilité du Ca a diminué dans les sols chauffés (D'Orangeville et al. 2013a). L'utilisation d'une méthode standard d'extraction des éléments nutritifs dans les sols a cependant montré peu ou pas de changements dans la disponibilité des cations basiques en réponse au chauffage du sol autant dans le cas de la sapinière (D'Orangeville et al. 2013a) que de la pessière (Lupi et al. 2012). Il faut noter que les changements observés ici l'ont été sur le court terme. Contrairement aux études d'Augustin et al. (2013a; 2013b) citées ci-haut, où on attribuait les relations entre les variables climatiques et la disponibilité des cations à l'intérieur d'un gradient spatial, par un effet sur l'altération des minéraux, les résultats à court terme rapportés par D'Orangeville et al. (2013a) pourraient être dues aussi à une augmentation de la décomposition des réservoirs organiques contenant des cations ou encore à des changements dans l'équilibre entre les réservoirs échangeables de cations du sol, la solution de sol elle-même ou la quantité stockée dans la biomasse. Cependant, les changements dans la contribution de ces réservoirs (organiques/échangeables) est relativement petite à moyen terme et l'ensemble de ces réactions consiste essentiellement en du recyclage interne, i.e. qu'elles ne font pas intervenir de nouvelles sources de cations mais modifient plutôt les proportions entre les différents réservoirs. À moyen et long-terme, seuls les changements dans les taux d'altération sont importants à considérer pour évaluer la disponibilité future des cations en réponse aux changements climatiques.

6.3.3 Variation temporelle de la disponibilité en cations en fonction de variations climatiques saisonnières ou annuelles

Globalement, les études mentionnées ci-haut quantifient l'impact de variables associées au climat sur la disponibilité des cations basiques le long d'un gradient climatique naturel ou à partir d'un gradient, induit expérimentalement, de température du sol. Il est logique de penser que certaines variables climatiques pourraient aussi exercer leur impact via leurs variations temporelles sur une échelle de temps relativement courte. Ainsi, l'on pourrait s'attendre par exemple à pouvoir relier des variations de températures annuelles ou saisonnières à des variations annuelles dans la disponibilité des cations basiques. C'est ce que nous avons tenté de démontrer à l'aide de données à haute résolution temporelle pour trois bassins versants forestiers (Clair, Laflamme et Tirasse) qui sont intensément étudiés par la Direction de la Recherche Forestière du Ministère des Ressources naturelles du Québec. Ces sites ont été abondamment décrits dans d'autres publications, ainsi que dans la section 1.3.

Pour ces trois sites, les données utilisées pour analyser les liens potentiels entre le climat et la disponibilité des cations basiques consistent en des mesures de concentrations d'éléments nutritifs dans des ruisseaux qui intègrent des variations à l'échelle du bassin versant forestier en plus évidemment des nombreuses variables climatiques mesurées à chacun des sites. Ces études, bien que réalisées dans trois types de forêt très différents, ont démontré que les variations temporelles de la disponibilité des cations peuvent être

généralement expliquées avec succès en combinant des variables caractérisant les charges atmosphériques des polluants et des variables climatiques dont surtout la température des sols et de l'air, sur une base saisonnière ou annuelle, selon les modèles et les cations considérés (Bouffard et al. 2013; Houle et al. 2013; Marty et al. 2013; résultats synthèse dans le Tableau 6.3). Bien que les résultats présentés dans ces trois études viennent corroborer ceux d'autres études concernant le rôle des dépositions atmosphériques acidifiantes sur la disponibilité en cations basiques, les corrélations positives entre les variations des concentrations de Ca, Mg et Na dans les ruisseaux de ces trois sites et la température de l'air ou du sol, représentent des éléments nouveaux. Ces résultats montrent que la chimie des précipitations n'exerce pas seule le contrôle sur la disponibilité des cations basiques dans les eaux de surface et que le climat, plus particulièrement la température, joue maintenant un rôle substantiel.

Tableau 6.3 Récapitulatif des variables climatiques apparaissant dans les 5 meilleurs modèles sélectionnés, de leur occurrence et de leur effet sur les concentrations des cations basiques dans les ruisseaux de chaque site. TC et TB : température horizon C et B respectivement. Pcp: précipitation. T : température.

	Clair			Laflamme			Tirasse		
	Variables	Occurrence	Effet	Variables	Occurrence	Effet	Variables	Occurrence	Effet
Ca	TC Au	3/5	+	Pcp H	2/5	+	Pcp Pr	2/5	-
	TB Au	2/5	+	T Hum H	2/5	+	Pcp Été	1/5	+
				TB H	1/5	+	T H	1/5	+
Mg	Tair	2/5	+	Tair SC	2/5	-	Pcp Pr	2/5	-
	Tair Été	1/5	+	Pcp H	1/5	+	Pcp SC	1/5	-
	Tair SC	1/5	+				Pcp Été	1/5	+
	T Hum Pr	1/5	+						
Na	Tair	3/5	+	THum Été	2/5	+	Pcp Pr	2/5	-
	T Hum Au	1/5	+	T Hum SC	1/5	+	Pcp SC	1/5	-
	T Hum Pr	1/5	+	TB SC	1/5	+	Tair	1/5	+
	Pcp Été	1/5	-	TB Été	1/5	+			

Pr : Printemps; Été : Été; Au : Automne; H : Hiver; SC : Saison de croissance

L'impact positif de la température sur les concentrations des cations observé même sur une base annuelle, pourrait être dû à une augmentation du taux de décomposition de la matière organique ou à une augmentation du taux d'altération des minéraux (Gislason et al. 2009; White and Blum, 1995) résultant en une hausse du taux de libération des cations dans la solution de sol. Cependant, les modèles obtenus pour le Na suggèrent que des variations du taux d'altération, induites par les variations de température, seraient responsables des observations. En effet, le Na a un comportement conservateur dans les écosystèmes forestiers, i.e. que la prise en charge par les plantes ainsi que le stockage de Na dans les réservoirs échangeables sont négligeables (Bailey et al., 2003; Duchesne and Houle, 2008). Aussi, comme en milieu continental les apports atmosphériques en Na sont faibles par rapport aux taux d'altération de ce dernier, les variations de disponibilité du Na dans le ruisseau ne peuvent être attribuées à des variations dans les dépôts atmosphériques. Globalement, ces considérations nous laissent croire que les résultats peuvent être raisonnablement attribués à des variations dans les taux d'altération minérale. Par le fait même, les variations du taux d'altération pour le Ca et le Mg peuvent également être évoquées pour expliquer leurs liens avec les variations de température.

6.3.4 Modélisation quantitative des taux d'altération en fonction des variations de la température et du contenu en eau des sols

Il se dégage une image cohérente des études citées ci-haut pour des sites forestiers québécois, qu'on s'intéresse à un gradient spatial ou temporel. La température (de l'air, de l'humus, ou des sols, ces variables étant fortement corrélées entre elles), la longueur de la saison de croissance et l'humidité du sol (ou quantité de précipitation) ont un effet positif sur la disponibilité en cations. En se basant sur ces observations, on peut projeter qu'un climat plus chaud (et forcément une saison de croissance plus longue) et plus humide sera propice à une augmentation de la disponibilité des cations dans le futur, principalement en raison de l'augmentation des taux d'altération. Comment quantifier les changements des taux des réactions d'altération dans le futur et ainsi la disponibilité en cations? Un exercice de modélisation a été fait afin de tenter de répondre à cette question. Le climat futur d'une simulation du MRCC (AET) et d'un modèle global (ECHAM 5) a été utilisé, dans un premier temps, pour projeter les températures et les contenus en eau des sols de 22 bassins versants forestiers (les mêmes que mentionnés précédemment) à l'aide des modèles FORHYM et FORSTEM. Les valeurs de température et de contenu en eau projetées ont ensuite été utilisées pour prédire les taux d'altération de chacun de ces 22 sites à l'aide du modèle géophysique PROFILE tel que décrit dans Houle et al. (2012b). Les résultats, obtenus montrent que pour la période 2070-2100, les taux d'altération devraient augmenter d'environ 20-25% en moyenne avec des écarts pouvant s'échelonner de 15 à 35% (Tableau 6.4, scénario A, Houle et al. 2013). Ces résultats suggèrent un impact potentiellement positif sur la disponibilité en cations des sols. Dans ce contexte, la disponibilité future des cations dans les sols pourrait supporter un gain éventuel de croissance des forêts de l'ordre de 20-25% sans qu'il se crée un appauvrissement des réservoirs des sols, à condition que tous les autres flux (excluant le stockage dans la biomasse qui pourrait augmenter) demeurent constant dans le futur. Il faut cependant noter que ces simulations ont été faites avec des valeurs moyennes annuelles de climat futur et qu'elles ne tiennent donc pas compte des changements potentiels dans les variations saisonnières de température et d'humidité du sol dans le futur. En effet, le modèle PROFILE a été initialement construit de façon à fonctionner avec des valeurs moyennes annuelles. Il est important de rappeler que l'on projette une diminution de l'humidité des sols marginale sur l'ensemble de l'année mais que par contre la diminution devrait être

substantielle en été (Houle et al. 2012). La diminution du contenu en eau pendant l'été de l'ordre de 20-40% devrait avoir tendance à diminuer l'altération des minéraux alors que l'augmentation de la température (plus importante en été que pour l'ensemble de l'année) et l'allongement de la saison de croissance devrait avoir tendance à l'augmenter. Dans ce contexte, il devient plus difficile de faire le bilan net des changements escomptés que permettrait une meilleure intégration de ces variables dans les projections réalisées avec PROFILE. Afin d'approfondir notre compréhension de l'impact de la saisonnalité (et potentiellement des changements de saisonnalité dans le futur) de ces variables, nous avons aussi modélisé les taux d'altération avec PROFILE pour un bassin forestier typique du bouclier canadien de façon à faire varier à la fois la température et l'humidité des sols. L'utilisation de ce site particulier (bassin du lac Chômeur) permet d'arriver à des valeurs absolues d'altération des minéraux qui sont réalistes pour plusieurs sites au Québec mais pas pour tous car la minéralogie et la texture du sol (qui déterminent la surface spécifique) vont fortement varier spatialement. Par contre, le modèle permet de projeter un changement dans les taux d'altération futurs (par rapport à une période de référence) qui est représentatif de l'ensemble des sols forestiers, vu que ces taux vont varier de façon très semblable en fonction de la température et de l'humidité du sol, peu importe le type de minéraux (Houle et al. 2010). L'objectif est donc de calculer un « delta » altération pour le futur par rapport à une période de référence. Nous avons utilisé des scénarios plausibles issus de l'étude de Houle et al. (2012) sur une base annuelle mais aussi pour les mois de juin à octobre inclusivement, de façon à tenir compte des changements qui surviennent pendant la saison de croissance. Dans chaque cas, nous avons modélisé les variations du taux d'altération pour trois températures fixes (5.65, 6.65, 7.65, représentant des deltas de 2, 3 et 4 degrés °C par rapport à la température annuelle actuelle du sol qui est de 3.65 °C) et pour une gamme de diminution de contenu en eau de 0 à 50% (par rapport à la moyenne annuelle « actuelle » qui est de 26%). Nous avons refait le même exercice pour trois autres températures (9.95, 10.95, 11.95, représentant des deltas de 3, 4 et 5 degrés °C par rapport à la température juin-octobre actuelle du sol qui est de 6.65 °C) et en conservant une gamme de diminution de contenu en eau de 0 à 50% (par rapport à la moyenne « actuelle » juin-octobre qui est de 35%). Les résultats présentés à la figure 6.3 montrent par exemple que pour une augmentation de température de 4 °C sur une base annuelle (Figure 6.3A) et une absence de diminution du contenu en eau du sol, le taux d'altération serait plus élevé de 32% (ratio de 1.32) par rapport à la période actuelle. Si on considère seulement la saison de croissance (juin-octobre, Figure 6.3B), une augmentation de température de 5 °C et une absence de diminution du contenu en eau, le taux d'altération serait plus élevé de 41% (ratio de 1.41) toujours par rapport à la période actuelle. Le gain dans le taux d'altération diminue cependant rapidement, de façon linéaire, avec la diminution du contenu en eau du sol pour éventuellement atteindre le seuil de 1.0 qui signifie une absence de changement. Par exemple, l'effet positif d'une augmentation de température de 3 °C pour la période juin-octobre est complètement annulé par une baisse du contenu en eau de 20%. De façon générale, une diminution du contenu en eau de 30% est suffisante pour éliminer tous les gains éventuels qui pourraient survenir en considérant des scénarios de hausses de températures de sol entre 2 et 5 °C. Vu sous cet angle et considérant les scénarios pour les sols décrits dans Houle et al. (2012), il semble qu'une augmentation des taux d'altération dans le futur et ainsi de la disponibilité des cations basiques soit peu probable contrairement à ce que peuvent laisser croire les études faites en considérant seulement les changements annuels.

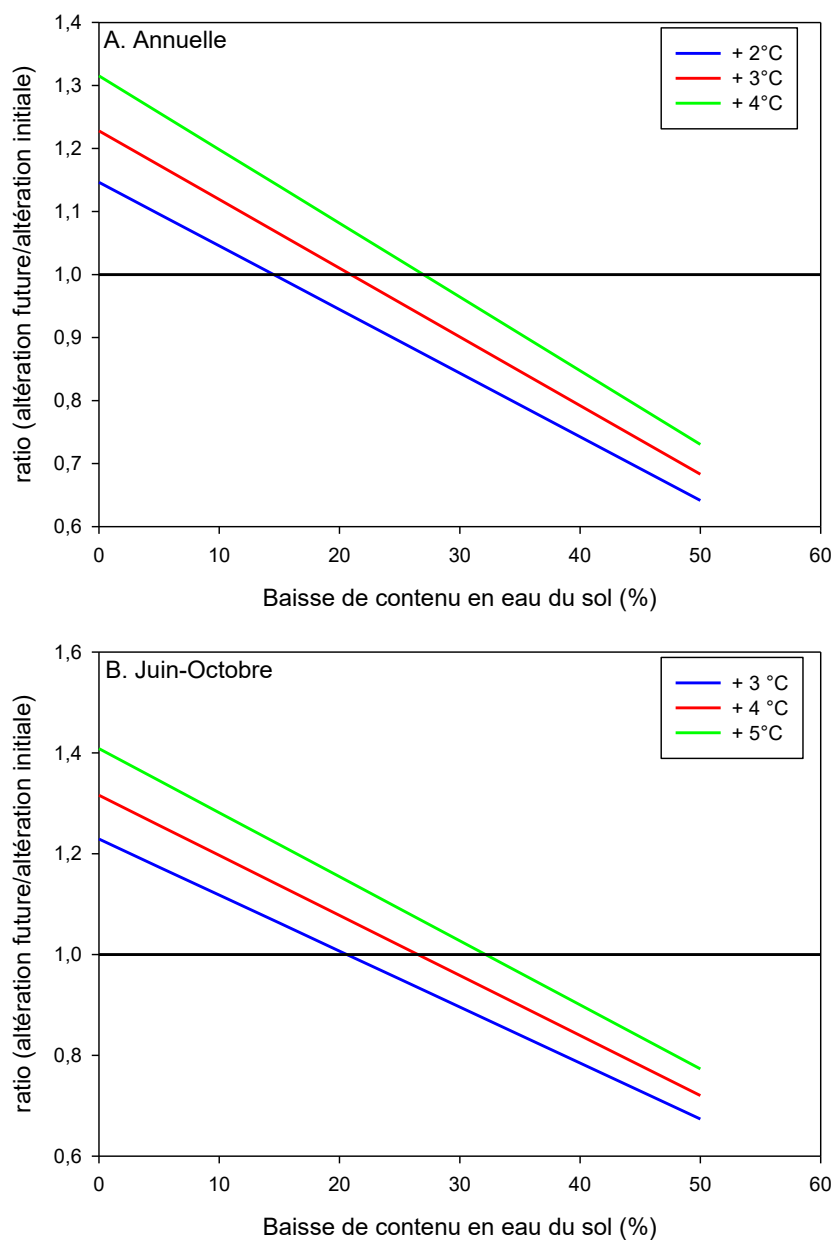


Figure 6.3 Illustration de l'effet de changements de température et de contenu en eau du sol selon divers scénarios climatiques d'augmentation de température et de diminution de contenu en eau. Tous les changements sont exprimés en différence par rapport à une condition initiale pour (A) l'ensemble de l'année (T : 3.65 °C, eau sol : 26%) et (B) la saison de croissance (T : 6.65 °C, eau sol : 35%).

Tableau 6.4 Résultats des ratios des taux d'altération chimique pour le modèle régional AET pour la période 2071-2100 (tableau tiré de Houle et al. 2014).

Nom du BV	ΔT Air ^b (°C)	ΔT Sol ^c (°C)	Ratio Pre ^d	Ratio Eau ^e	Ratios des taux d'altération chimique obtenus pour la période future par rapport à la période actuelle ³															
					BC+Na		Ca		Mg		K		Na		Al		Si		PO ₄	
					Moy	E (%)	Moy	E (%)	Moy	E (%)	Moy	E (%)	Moy	E (%)	Moy	E (%)	Moy	E (%)	Moy	E (%)
Adansys	4.88	3.34	1.12	0.93	1.15	1.2	1.15	0.8	1.17	3.9	1.12	6.0	1.14	5.5	1.15	4.8	1.13	3.5	1.27	3.9
Blais	5.02	3.17	1.13	0.95	1.22	0.4	1.23	0.2	1.21	0.0	1.13	0.0	1.13	0.0	1.15	0.1	1.15	0.1	1.28	0.8
Boisvert	4.93	3.74	1.14	0.97	1.29	3.4	1.25	3.9	1.26	5.8	1.36	5.5	1.36	4.9	1.36	4.4	1.31	3.5	1.31	4.5
Chomeur	4.80	2.97	1.14	0.97	1.19	2.6	1.21	2.5	1.24	2.1	1.16	3.9	1.17	2.3	1.18	2.7	1.17	2.6	1.32	1.1
Clair	5.11	3.21	1.11	0.94	1.20	0.2	1.22	0.3	1.18	0.5	1.11	0.5	1.11	0.1	1.14	0.1	1.13	0.3	1.26	0.9
Daniel	4.82	2.98	1.14	0.98	1.24	1.6	1.20	1.5	1.18	2.6	1.31	2.0	1.31	1.1	1.30	1.3	1.27	1.4	1.24	0.8
David	5.03	3.51	1.14	0.96	1.28	0.2	1.29	0.1	1.29	0.2	1.17	0.2	1.18	0.1	1.21	0.1	1.21	0.1	1.36	0.6
Des Jones	4.91	3.63	1.14	0.96	1.24	1.1	1.26	1.8	1.29	0.6	1.17	0.1	1.19	0.1	1.20	0.1	1.19	0.2	1.39	0.3
Des papillons	5.03	3.53	1.14	0.95	1.26	0.5	1.27	0.3	1.25	0.0	1.15	0.4	1.16	0.0	1.18	0.1	1.18	0.3	1.34	0.4
Duck	5.08	3.15	1.12	0.96	1.23	0.9	1.25	0.8	1.23	0.5	1.14	0.5	1.15	0.1	1.18	0.2	1.17	0.1	1.31	0.7
Eclair	4.91	3.26	1.14	0.95	1.19	1.1	1.20	1.5	1.25	2.4	1.15	0.4	1.16	0.1	1.17	0.1	1.17	0.7	1.34	1.7
Fauvette	4.87	3.49	1.14	0.95	1.24	0.9	1.25	1.5	1.29	0.6	1.17	0.2	1.19	0.0	1.20	0.2	1.20	0.4	1.39	0.4
General White	4.91	3.18	1.13	0.94	1.18	1.5	1.20	3.2	1.20	3.1	1.13	3.2	1.14	3.3	1.15	2.6	1.14	1.3	1.29	3.4
Gregoire	5.02	3.58	1.13	0.94	1.26	0.9	1.27	0.3	1.24	0.3	1.15	1.2	1.15	0.1	1.18	0.2	1.18	1.1	1.33	1.1
Josselin	4.83	4.86	1.11	0.97	1.36	5.5	1.37	4.7	1.40	4.4	1.31	8.6	1.33	6.3	1.34	6.6	1.32	6.5	1.54	1.4
Laurent	4.88	3.38	1.12	0.94	1.20	3.2	1.20	2.6	1.23	3.0	1.18	9.0	1.18	7.3	1.19	6.5	1.18	4.7	1.31	4.2
Lemaine	4.83	4.21	1.11	0.98	1.29	0.6	1.30	1.5	1.33	3.0	1.24	0.6	1.26	0.9	1.27	0.6	1.25	0.3	1.46	2.5
McLoed	4.89	3.46	1.11	0.94	1.23	2.0	1.21	1.1	1.19	1.9	1.28	3.9	1.28	2.8	1.28	2.8	1.25	2.6	1.27	0.2
Najoua	4.82	3.06	1.14	0.97	1.18	4.1	1.18	2.4	1.21	1.0	1.16	8.9	1.17	7.0	1.17	6.7	1.16	5.8	1.29	2.1
Pothier	4.83	3.40	1.16	0.96	1.20	1.0	1.21	1.3	1.24	2.2	1.15	0.7	1.17	0.1	1.18	0.2	1.17	0.7	1.34	1.7
Thomas	4.88	2.88	1.10	0.94	1.17	2.0	1.16	3.3	1.17	5.4	1.18	2.1	1.18	2.6	1.18	1.8	1.16	0.6	1.24	4.4
Truite rouge	4.89	3.17	1.10	0.93	1.17	2.1	1.18	0.0	1.17	2.3	1.14	11.2	1.14	9.6	1.15	7.9	1.13	6.5	1.22	1.6
Moy ^f	4.91	3.42	1.13	0.95	1.23		1.23		1.24		1.19		1.19		1.21		1.19		1.32	
E (%) ^g	2	13	1	2	4		4		5		6		6		5		5		6	

Notes : BV= bassin versant; Moy= moyenne; E (%) = écart relatif = RSD (*Relative standard deviation*); BC (*base cations*)= somme des cations basiques (Ca+Mg+K);
^aLes valeurs reportées pour chaque bassin versant sont déterminées avec 3 profils de sols (n= 3) sauf pour Blais, Daniel, Gregoire et Truite rouge (n= 2); ^bDifférence de température de l'air entre la période étudiée et la période de référence (1971-2000); ^cDifférence de température du sol entre la période étudiée et la période de référence; ^dRatio des précipitations entre la période étudiée et la période de référence; ^eRatio de la teneur en eau pour la couche minérale du sol entre la période étudiée et la période de référence; ^fMoyenne des moyennes; ^gEcart relatif des moyennes des bassins versants.

6.4 Azote inorganique

Il est généralement admis, à l'échelle de la planète, que la croissance des forêts tempérées et boréales est limitée non seulement par le climat mais aussi par la disponibilité en azote (N) (Le Bauer et Treseder 2008). Les quelques études qui existent pour la forêt québécoise concordent avec cette affirmation générale. La faible disponibilité de l'N est entre autre illustrée par les temps de résidence très faibles (< 1 jour) de l'N inorganique dans la solution de sol d'une érablière, d'une sapinière et d'une pessière noire du Québec (Ste-Marie et Houle 2006). De façon générale, les concentrations ambiantes de N minéral, sous forme de NO₃ et NH₄, sont très faibles dans la couche organique des sols forestiers des forêts de conifères (D'Orangeville et al. 2013 ; Lupi et al. 2012; Boutin et al. 2005; Houle et Moore 2008). La rareté de l'N minéral en forêt boréale a ainsi forcé l'apparition d'adaptations particulières visant à optimiser le prélèvement de l'N par les arbres, comme l'association avec des mycorhizes spécialisées dans le prélèvement de N organique soluble dans la solution de sol (Näsholm et al. 1998). On sait également que la canopée des conifères peut prélever directement jusqu'à 60% de l'azote inorganique apporté par les précipitations lors de certains événements de pluie (Houle et al. 1999). En fait, de plus en plus d'études montrent que la réponse des plantes aux changements climatiques est très fortement influencée par la disponibilité en N inorganique (Reich et al. 2006) malgré que cet aspect soit largement ignoré dans les prédictions futures de la croissance de la forêt qui sont essentiellement basées sur les changements de climat projetés. Étant donné la limitation en N des forêts, et plus particulièrement des forêts boréales, plusieurs auteurs suggèrent que les changements climatiques pourraient augmenter la disponibilité de l'N pour les plantes en stimulant la

décomposition de la matière organique du sol et que cet effet « fertilisant » pourrait être plus important que l'effet direct du climat sur la végétation. La possibilité qu'un tel mécanisme puisse avoir un impact considérable sur la croissance des arbres apparaît évidente lorsque l'on compare la quantité très importante d'N contenue dans les sols forestiers en comparaison des besoins annuels en N requis pour la croissance des arbres des sites d'études du MRN et des dépositions atmosphériques en N (Tableau 6.5). Les réservoirs de N total contenu dans les sols organiques ($732\text{-}2,188 \text{ kg ha}^{-1}$) et minéraux ($2,167\text{-}19,112 \text{ kg ha}^{-1}$) de ces trois sites sont plusieurs ordres de grandeur supérieurs aux besoins annuels des arbres ($6\text{-}17 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) et aux dépôts atmosphériques ($3\text{-}9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$). Une augmentation, même modeste, du taux de décomposition de ces réservoirs en réponse au réchauffement des sols, a le potentiel d'accroître la disponibilité en N de façon considérable. Globalement, ces observations suggèrent fortement que la simple projection dans le futur de relations climat-croissance dérivées des quelques décennies antérieures est une approche inadéquate pour prédire la croissance des arbres si la disponibilité future des éléments nutritifs est ignorée. Comprendre l'impact des changements climatiques sur les sols de la forêt boréale est donc d'une importance primordiale. La méta-analyse de 32 études de réchauffement de sols dans divers type d'écosystèmes, suggère un effet positif de la hausse de la température sur la disponibilité de l'N inorganique du sol et la croissance des plantes (Rustad et al. 2001). Il faut mentionner cependant que la majorité des études incluses dans cette méta-analyse ont été faites à des sites plus chauds qu'au Québec où croissaient surtout des forêts tempérées. On connaît beaucoup moins les impacts des changements de température des sols sur la disponibilité de l'N dans la forêt boréale et plus particulièrement de la forêt québécoise. D'une manière générale, on connaît aussi très peu les caractéristiques du cycle de l'N dans les sols des écosystèmes forestiers du Québec. Ces informations sont essentielles pour mieux comprendre la réponse aux changements climatiques.

6.4.1 Quelques caractéristiques du cycle de l'N dans trois écosystèmes forestiers du Québec

Quelques études ont permis de comparer le potentiel de minéralisation de l'N de l'érablière, la sapinière et la pessière. Dans un premier temps, Boutin et al. (2005) ont comparé les taux de nitrification des sols à 13 sites forestiers. Dans cette étude, des sacs d'incubation (« buried bags ») contenant du sol organique (FH) et minéral (couche de 0-20 cm) ont été enterrés et incubés *in situ*. Après une période d'un an, quel que soit le type de sol, la plus grande quantité de NO_3 produite a été mesurée dans le peuplement d'érables à sucre, suivi par les peuplements de sapins baumiers et les peuplements d'épinettes noires (Figure 6.4). La quantité de NO_3 produite s'est avérée particulièrement faible sous les peuplements d'épinettes noires et les auteurs ont suggéré que ces dernières peuvent accéder à de l'N à partir de sources organiques via leur association avec les ectomycorhizes. Au contraire, les racines de l'éclaircie à sucre sont colonisées par des champignons mycorrhiziens à arbuscules, qui sont connus pour leur capacité très limitée d'absorption de l'N organique (Aerts et Chapin, 2000).

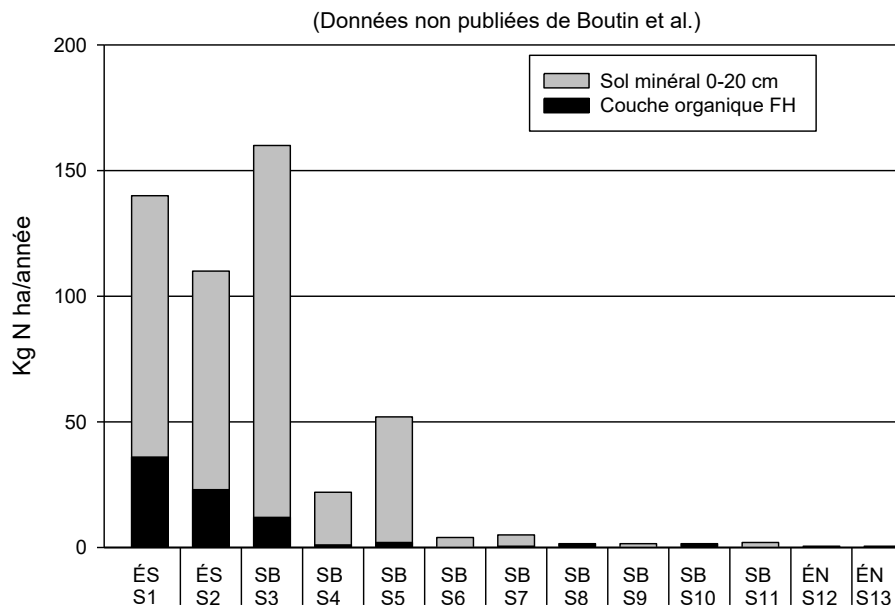


Figure 6.4 Taux de nitrification estimés avec la méthode des « buried bags » pour des sols minéraux et organiques récoltés à 13 sites forestiers, dont 2 érablières, 9 sapinières et 2 pessières. Adapté de Boutin et al. (2005).

Les résultats de cette étude indiquent donc un fort effet du type de forêt et de la qualité de la matière organique du sol sur le potentiel de production de NO_3 . Les auteurs mentionnent également que ces différences pourraient être attribuées à un gradient spatial dans les dépôts atmosphériques de N qui diminuent approximativement de 9 à 3 $\text{kg N ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ de l'érablière à la pessière. Nous croyons cependant que d'aussi grandes différences dans les réponses des différents écosystèmes sont probablement dues aux types de forêts plutôt qu'aux variations de dépôts azotés.

Une autre étude, également réalisée dans une érablière (lac Clair), une sapinière (Lac Laflamme) et une pessière (Lac Tirasse) montrent sensiblement les mêmes résultats pour les sols organiques des trois écosystèmes (Figure 6.5) mais ajoute une information importante quant au potentiel de production du NH_4 et du NO_3 , alors que Boutin et al. (2005) se sont seulement intéressés au NO_3 . Les résultats montrent que les érablières ont un potentiel plus marqué pour la production de NO_3 que de NH_4 alors que les sapinières montrent un patron inverse. Ces observations indiquent que dans les érablières, le NH_4 produit par la décomposition de la matière organique est immédiatement converti en NO_3 alors que dans la sapinière la conversion du NH_4 en NO_3 est inhibée (voir plus bas) menant à l'accumulation de NH_4 . Dans le cas des sols de la pessière noire, le potentiel de production pour ces deux formes d'N inorganique apparaît quasi nul. Ces résultats nous permettent de mieux contraster le cycle de l'N dans ces trois types d'écosystèmes.

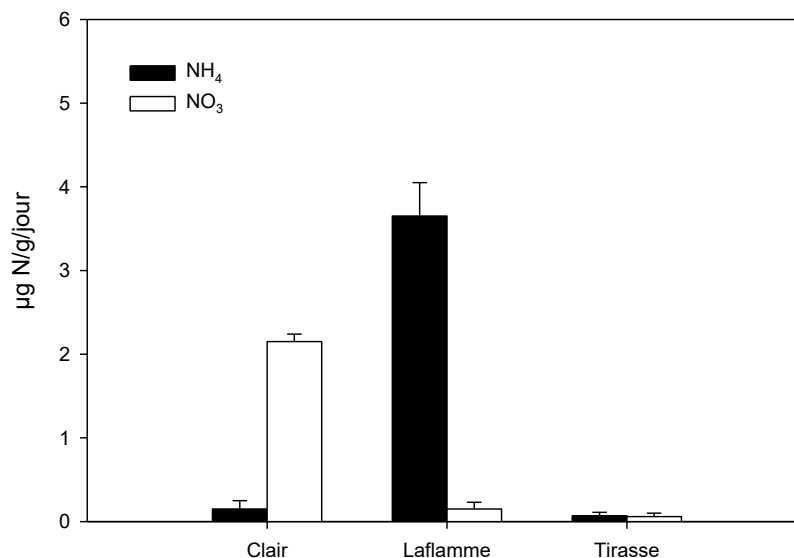


Figure 6.5 Taux de minéralisation en NH₄ et en NO₃ pour les sols organiques des sites Clair, Laflamme et Tirasse estimés avec la méthode des « buried bags » enfouis *in situ* pendant un mois. Adapté de Ste-Marie et Houle (2006).

Tableau 6.5 Dépôts atmosphériques azotés, accumulation annuelle d'azote dans la végétation et stocks d'azote dans le sol de 3 bassin-versants forestiers du Québec.

	Accumulation annuelle dans le bois (kg N ha ⁻¹ an ⁻¹) [‡]	Dépôts azotés (kg N ha ⁻¹ an ⁻¹) ⁱ	Stocks dans le sol organique (kg N ha ⁻¹)	Stocks dans le sol minéral (kg N ha ⁻¹)
Lac Clair	16.6	9	824.96 ± 573.86	19112.5 ± 2828.5
Lac Laflamme	16.7	6	2187.99 ± 567.24	11351.8 ± 2003.5
Lac Tirasse	6	3	731.99 ± 126.90	2166.8 ± 288.7

[‡] Sylvie Tremblay (communication personnelle) ; ⁱ Ste-Marie & Houle (2006)

6.4.2 Études expérimentales de déplacements et de réchauffement et de sols

Dans une étude réalisée par une équipe de la DRF (Sylvie Tremblay, communication personnelle), des carottes de sol, provenant de peuplements boréaux, ont été déplacées selon un gradient latitudinal (sols de pessière) et altitudinal (sols de sapinière) afin de simuler un réchauffement du sol de 3° C et d'en évaluer l'effet sur la respiration hétérotrophe du sol

après trois ans. La diminution de l'altitude a entraîné une augmentation de la respiration hétérotrophe de 14-38 % le premier été, de 50 % le deuxième été et de 42 %, le troisième été. D'autre part, le déplacement de sols à des sites plus au sud a entraîné une augmentation de la respiration hétérotrophe de 12-23 % le premier été, alors qu'aucune différence significative n'a été détectée le deuxième été. Ces résultats indiquent que des augmentations importantes de la respiration hétérotrophe du sol peuvent survenir à la suite d'un réchauffement du sol de 3° C. Étant donné que des réchauffements de sol de l'ordre de 3 à 5 °C sont projetés d'ici 2100 dans les sites les plus au nord (Houle et al. 2012), dans le domaine de la pessière à mousses, il est crucial d'évaluer avec plus de précision l'effet du réchauffement climatique sur la respiration hétérotrophe des sols boréaux.

Malgré l'augmentation notable de la respiration hétérotrophe qui indique une augmentation des taux de décomposition de la matière organique, les résultats préliminaires (Sylvie Tremblay, communication personnelle) obtenus avec la méthode du « buried bags » semblent indiquer une réponse très marginale sur la disponibilité en NH_4 et en NO_3 surtout dans le cas du déplacement latitudinal (sols de pessière). Cependant, les résultats doivent être analysés plus en profondeur avant de conclure à l'absence d'effets.

Trois études de réchauffement de sols ont été réalisées récemment au Québec, une dans une sapinière (D'Orangeville et al. 2013b) et deux dans des pessières (Lupi et al. 2012). Les températures des sols étaient maintenues à une température moyenne supérieure de 4°C à celle des sols témoins à l'aide de câbles chauffants enterrés à 5-10 cm, à l'interface entre le sol organique et minéral, autour d'arbres expérimentaux. À l'intérieur de ce dispositif expérimental, certains arbres étaient aussi soumis à une pluie artificielle appliquée directement sur la canopée qui contenait une concentration de N inorganique trois fois plus élevée que celle de la pluie ambiante à chaque site. Après trois années d'expérimentation, des sols ont été recueillis sous chaque arbre et analysés avec une méthode standard d'extraction des éléments nutritifs avec une solution de KCl. Les résultats n'ont montré aucuns changements significatifs dans les quantités de N minéral de la couche organique du sol (Figure 6.6B) et des sols minéraux (résultats non présentés). Autant le réchauffement du sol que l'ajout de N inorganique n'a eu d'effets sur le contenu en N foliaire de ces arbres (Figure 6.6A) indiquant un impact faible ou inexistant sur la nutrition azotée de ces peuplements.

L'effet limité du réchauffement du sol sur la disponibilité en N inorganique pourrait être dû à la condition particulière de ces sites qui sont très pauvres en azote minéral. Les niveaux de disponibilité en N pour le site du lac Laflamme ont été comparés avec des données publiées pour des sols de forêts boréales du Canada échantillonnés avec des membranes échangeuses d'ions identiques (PRS-probes) à celles utilisées par D'Orangeville et al. (2013b). Ces études comprenaient des parcelles non aménagées dans une forêt d'épinettes noires de l'Alberta (Jerabkova et Prescott, 2007), et des forêts de la Colombie-Britannique (Hope, 2009; Bengtson et al. 2007). Les résultats montrent, pour l'horizon de sol organique, 46% moins de NH_4 disponible (spectre 15-67%) et 62 % moins de NO_3 (spectre 30-77%) au lac Laflamme qu'à ces sites. Dans une autre expérience réalisée au Lac Laflamme et dans la pessière à mousses du bassin Tirasse, l'addition de 3 à 10 fois le dépôt d'N atmosphérique naturel pendant 3 ans n'a pas eu d'effets persistants sur les concentrations d'N inorganique dans la solution de sol excepté pour des augmentations transitoires qui ne duraient pas plus d'une semaine avec le résultat que 95 % du N ajouté était immobilisé au-dessus de la zone des racines (Houle & Moore, 2008). Mis ensemble, ces résultats suggèrent que les bas

niveaux de disponibilité d’N inorganique ainsi que la très forte proportion d’N contenu dans des réservoirs organiques réfractaires à la décomposition pourraient être responsable de la faible réponse de la disponibilité du N inorganique suite à trois ans de réchauffement du sol.

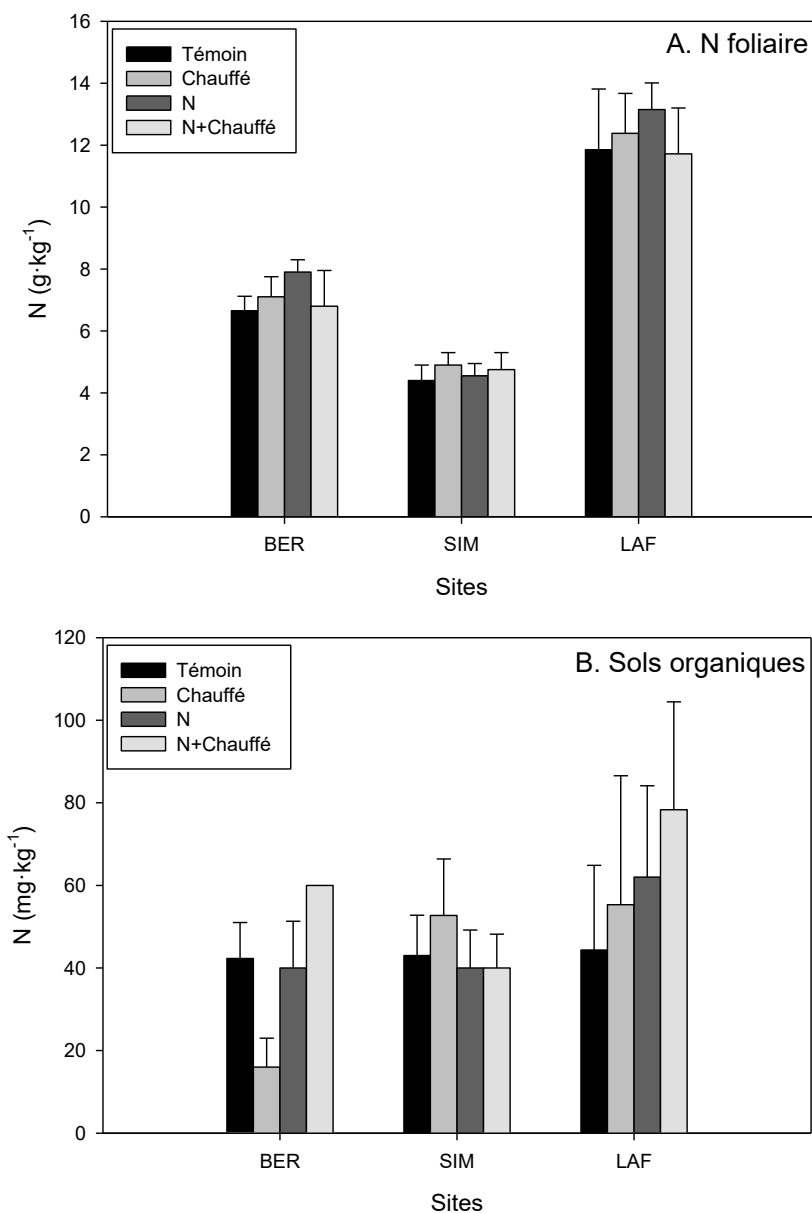


Figure 6.6 Teneurs en N total foliaire et en N minéral dans les sols organiques de trois sites (Bernatchez, Simoncouche, Laflamme) soumis à des expériences de chauffage de sol (+ 4 degrés oC) et d’ajouts en N via des précipitations artificielles pulvérisées sur la canopée d’arbres adultes (épinette noire pour BER et SIM et sapin baumier pour LAF). Les résultats illustrent l’absence d’effets des traitements. Les résultats sont tirés de Lupi et al. (2012) pour les sites SIM et BER et de D’Orangeville et al. (2013) pour le site LAF.

En fait, la seule différence notable observée fut une augmentation de la disponibilité en NH_4 telle que mesurée avec les membranes d'échange d'ion au lac Laflamme dans le sol organique. Compte tenu de l'influence de la température sur le taux de nitrification (Sabey et al., 1956, Malhi & McGill, 1982), une augmentation en NO_3 aurait dû survenir suite à l'augmentation du NH_4 dans les sols chauffés. L'absence d'effet sur le NO_3 , malgré l'augmentation en NH_4 pourrait s'expliquer par un faible pH (3.03), et un contenu polyphénolique élevé, deux facteurs reconnus pour être des inhibiteurs de la nitrification (Olson & Reiners, 1983). Cependant, des conditions favorables à la nitrification sont rencontrées dans le sol minéral (i.e. haut pH, contenu polyphénolique bas), comme l'ont démontré une forte augmentation en NO_3 mesurée durant une épidémie de la tordeuse du bourgeon de l'épinette sur ce site entre 1981-1984 (Houle et al., 2009). L'absence d'augmentation de NO_3 dans l'horizon minéral des sites chauffés suggère que le surplus de NH_4 mesuré dans la couche organique n'a pas atteint le sol minéral sous-jacent où il aurait pu être transformé en NO_3 .

6.4.3 Relation temporelles

Les études réalisées aux trois bassins (rapports 2, 3 et 4), mettant en relation les concentrations de NO_3 et NH_4 dans les eaux de surface avec des variables de qualité et quantité des précipitations et de température (air et sols) ont montré des patrons cohérents quoique le comportement des espèces azotées inorganiques soit moins prévisible que celui des cations, particulièrement au bassin Tirasse (Tableau 6.6). Généralement, des relations inverses ont été observées entre la température (air, humus ou sols minéraux) et la disponibilité en NO_3 et NH_4 pour les bassins Clair et Laflamme. La relation inverse avec la température suggère un contrôle biologique important et à court terme de la disponibilité. Il est plausible que des températures plus élevées stimulent la croissance des plantes et/ou l'activité des microorganismes ce qui causerait une plus grande demande en N et réduirait ainsi sa disponibilité. Ces résultats nous aident à mieux comprendre l'absence d'effets des expériences de réchauffement et de transplantation de sol sur la disponibilité des formes inorganiques d'azotes et indiquent la complexité des interactions climat-cycle des éléments nutritifs. L'existence d'un impact négatif du climat sur les concentrations d'N inorganique dans les eaux de surface observé ici est cohérent avec les résultats d'autres études qui montrent que les concentrations de NO_3 sont généralement en diminution dans les eaux de surface malgré que les dépositions soient demeurées relativement stables ces dernières décennies. Une augmentation de la prise en charge de l'N inorganique dans les sols des bassins versants forestiers, possiblement dû à une tendance à la hausse des températures, pourrait expliquer ce phénomène, observé à plus grande échelle.

Tableau 6.6 Récapitulatif des variables explicatives apparaissant dans les 5 meilleurs modèles sélectionnés, de leur occurrence et de leur effet sur les concentrations en azote minéral dans les ruisseaux de chaque site. TC et TB : température horizon C et B respectivement. Pcp: précipitation. Les modèles pour le lac Laflamme excluent les variables de composition chimique de la pluie (Bouffard et al. 2013) pour éliminer une corrélation potentiellement fortuite due aux tendances synchrones du sulfate dans les précipitations et du nitrate dans le ruisseau. Les variations du nitrate dans le ruisseau au début de la série d'observation étant causées par une épidémie de tordeuse (Houle et al. 2009).

Clair		Laflamme			Tirasse				
Variables	Occurrence	Effet	Variables	Occurrence	Effet	Variables	Occurrence	Effet	
NO₃	Tair Pr	1/5	-	Pcp H	2/5	+	TC	1/5	-
	Tair Au	1/5	-	TC H	2/5	-	TC SC	1/5	-
	T hum Pr	1/5	-	T Hum Été	1/5	-	TB	1/5	+
	TB Pr	1/5	-	T Hum SC	1/5	-	TB Été	1/5	+
	TC Pr	1/5	-	T Hum H	1/5	-	Pcp	1/5	-
				Pcp Été	2/5	-	Pcp Été	1/5	-
			Pcp Pr	1/5	+	Pcp SC	1/5	-	
NH₄	TC	2/5	-				Pcp Pr	5/5	+
	TC Été	1/5	-				Pcp	2/5	-
	TB	1/5	-				Tair H	1/5	-
	TB Été	1/5	-				Pcp H	1/5	-

Pr : Printemps; Été : Été; Au : Automne; H : Hiver; SC : Saison de croissance.

Les résultats indiquent aussi un impact non négligeable des quantités de précipitations sur les formes inorganiques de N surtout aux bassins Laflamme et Tirasse. Cependant, les effets sont variés (influence positive ou négative sur la disponibilité) selon les saisons et les sites. Tel que mentionné précédemment, les résultats pour le bassin Tirasse sont plus compliqués à interpréter que pour les autres bassins, ce qui serait cohérent avec les observations faites ci-haut concernant la très faible sensibilité des sols des pessières aux variations climatiques, et plus particulièrement aux augmentations de température.

6.5 Conclusion

Globalement, on observe une certaine stabilisation des concentrations de SO_4 et de NO_3 dans les précipitations, malgré l'existence de tendances à la baisse sur le plus long terme, qui sont surtout causées par de très fortes concentrations au début des observations. Dans ce contexte, le rôle du climat sur la disponibilité des éléments nutritifs devrait être appelé à augmenter dans un avenir rapproché.

Dans le cas des cations basiques, un ensemble cohérent émerge des observations reliant climat et concentration des cations dans les eaux de surface. En effet, les résultats de la plupart des études réalisées au Québec, qu'on s'intéresse à un gradient spatial ou temporel, montre que la température (air, humus, ou sols), la longueur de la saison de croissance et l'humidité du sol (ou quantité de précipitation) ont un effet positif sur la disponibilité en cations. En se basant sur des observations, on peut projeter qu'un climat plus chaud (et forcément une saison de croissance plus longue) et plus humide sera propice à une augmentation de la disponibilité des cations basiques dans le futur, principalement en raison de l'augmentation des taux d'altération.

Les projections futures indiquent une augmentation de la température des sols mais pas de changement significatif du contenu en eau sur une base annuelle (Houle et al. 2012). Lorsque ces données (sur une base annuelle) sont utilisées pour simuler les taux d'altération futurs à l'aide du modèle PROFILE, les résultats indiquent une hausse des taux d'altération d'environ 20-25% pour la période 2070-2100. Ces résultats suggèrent un impact potentiellement positif sur la disponibilité en cations des sols. Si on considère cependant les changements de température et de contenu en eau des sols projetés pour la période de croissance (juin-octobre), qui indiquent une hausse de température mais une baisse marquée du contenu en eau, on se retrouve dans une situation où ces deux variables exerceront un effet antagoniste sur les taux d'altération. Un exercice de modélisation a été réalisé afin de quantifier l'effet combiné de ces deux variables. Les résultats indiquent qu'une diminution du contenu en eau de 30% est suffisante pour éliminer tous les gains éventuels qui pourraient survenir en considérant des scénarios de hausses de températures de sol entre 2 et 5 °C. Vu sous cet angle, et considérant les scénarios pour les sols décrits dans Houle et al. (2012) où des baisses de contenu en eau de cet ordre sont projetés, il semble qu'une augmentation des taux d'altération et ainsi de la disponibilité des cations basiques soit peu probable dans le futur contrairement à ce que peuvent laisser croire les études faites en considérant seulement les changements annuels.

En ce qui a trait à la dynamique de l'N dans les sols forestiers, les peuplements dominés par l'érable à sucre, le sapin baumier et l'épinette noire ont des caractéristiques très différentes. Globalement, le potentiel de respiration des sols et de minéralisation de l'N décroît très rapidement respectivement pour ces trois types de forêt (Ste-Marie et Houle 2006; Boutin et al. 2005). Plus spécifiquement, les érablières ont un potentiel plus marqué pour la production de NO_3 vs NH_4 alors que les sapinières montrent un patron inverse. Dans le cas des sols de la pessière noire, le potentiel de minéralisation pour ces deux formes de N inorganique apparaît quasi nul.

On peut s'attendre à ce que la réponse des sols forestiers aux CC soit fortement influencée par leurs caractéristiques inhérentes au cycle de l'N. Les expériences de réchauffement ou de transplantation des sols concordent avec cette hypothèse. Ainsi la disponibilité en azote inorganique dans les sols des pessières ne réagit pas à une

augmentation de la température (Lupi et al. 2012; Ste-Marie et Houle 2006) en accord avec la faible réactivité des réservoirs d’N organique de ces écosystèmes. Pour la sapinière, une expérience de réchauffement de sols *in situ* et une autre expérience dans laquelle des sols ont été exposés à la température ambiante au laboratoire, comparé à la température *in situ*, montre un accroissement de la disponibilité en NH_4 dans l’humus forestier (seulement avec la méthode des membranes échangeuses d’ions par contre pour l’expérience *in situ*) mais pas de changements pour le nitrate dans la sapinière (D’Orangeville et al. 2013; Ste-Marie et Houle 2006). Quant aux sols des érablières, ils réagissent à une augmentation de la température du sol par une production accrue de nitrate (Ste-Marie et Houle 2006; Rustad et al. 2001). A notre connaissance, les résultats décrivant les impacts des changements climatiques sur les sols des érablières sont moins nombreux que pour la pessière et la sapinière. Étant donné la plus grande réactivité des sols sous érablière, il serait pertinent de s’y intéresser davantage.

En général, les effets des variations de température du sol sur la disponibilité des formes de N inorganiques (via les processus de décomposition) sont relativement mieux connus que les effets des variations du contenu en eau. A partir d’un certain seuil minimal de contenu en eau, l’effet de la température sur la décomposition de la matière organique devient inexistant. Les projections indiquant une baisse marquée du contenu en eau des sols forestiers dans le futur, il est urgent de s’intéresser davantage aux effets potentiels sur la nutrition azotée des forêts.

En conclusion, la faible réactivité des réservoirs d’N organique dans les sols des forêts boréales laisse croire que l’augmentation de température des sols aura peu d’impact, du moins à court terme, sur la nutrition azotée des forêts. Bien que plusieurs études suggèrent une hausse de la productivité des forêts en réponse à une hausse de la disponibilité en N, cela apparaît peu probable du moins pour la forêt boréale québécoise, et plus particulièrement pour la pessière. Par contre, des études à plus long terme sont nécessaires afin de confirmer si l’absence d’effets à court terme se maintiendra dans le futur.

Section 7. Conclusions générales

Ce projet s’est intéressé aux sols, une composante fondamentale des écosystèmes forestiers.

Dans un premier temps, les caractéristiques physiques des sols telles que la température et le contenu en eau ont été abordés. Après avoir calibré le modèle hydrologique et thermique FORHYM_FORSTEM sur les données observées à trois sites représentatifs des grands écosystèmes de la forêt québécoise, soit l’érablière (Lac Clair), la sapinière (Lac Laflamme) et la pessière (Lac Tirasse), nous avons réalisé des projections pour le futur à partir d’une série de scénarios climatiques. À partir des résultats obtenus, il est possible de conclure que les changements climatiques auront un effet significatif sur l’humidité et la température du sol. Sur une base annuelle, les changements seront importants pour la température mais pas pour le contenu en eau. Néanmoins, les patrons saisonniers du contenu en eau subiront des changements marqués. La fonte printanière sera devancée causant ainsi une augmentation

du contenu en eau dans le sol à la fin de l'hiver et au début du printemps. Par la suite, le sol pourrait s'assécher, et ce, pendant les mois de juin, juillet et août. Ces mois sont cruciaux puisqu'ils englobent la saison de croissance des plantes. Des températures estivales plus élevées combinées à une faible teneur en eau dans le sol auront tendance à créer des conditions propices à l'apparition de stress hydriques pour les plantes. À plus long terme, des changements dans l'humidité du sol pourraient aussi avoir un impact sur la distribution et la composition des forêts. Ce projet a été parmi les premiers à faire une démonstration robuste de la forte probabilité d'une diminution du contenu en eau des sols forestiers dans le futur.

Afin d'être mieux outillés pour comprendre comment ces changements influenceront la dynamique forestière à grande échelle, il était (et est toujours) nécessaire de produire des scénarios explicites pour l'ensemble du Québec forestier. Dans cette optique, deux étapes cruciales ont été franchies dans le cadre de ce projet. En premier lieu, les champs géophysiques du MRCC qui provenaient de Webb et al (1993) ont été fortement améliorés à partir de données à haute résolution provenant du MRN. Les changements ont été apportés pour des variables clés telles que la présence d'une couche de sol organique et le contenu en argile des sols. En deuxième lieu, le Schéma de Surface Canadien (Canadian Land Surface Scheme, CLASS), qui est en fait un module spécialisé dans le calcul des variables de surface liées aux processus thermodynamiques et hydrologiques, couplé au MRCC, a été validé et calibré en mode colonne sur des données observées de température et de contenu en eau des sols. Cet exercice a permis de modifier des éléments importants des composantes de CLASS, dont la conductivité thermique du couvert nival et la vitesse de drainage latéral à la base du profil de sol, ce qui a permis d'améliorer la capacité du modèle à reproduire les observations. Ces deux dernières étapes ont cependant été plus longues que prévues et une dernière simulation du MRCC4 couplée à CLASS contenant les dernières améliorations est présentement en cours et n'était malheureusement pas disponible au moment de conclure ce rapport. Parmi les retombées directes de ce projet, il y a une amélioration de la capacité du MRCC à prédire la température et l'humidité du sol, et notamment leurs cycles saisonniers. Ces améliorations demeurent et vont servir dans le futur à faire des prédictions de plus en plus sophistiquées. L'équipe de modélisation du climat chez Ouranos en conservera des acquis durables. Les retombées des possibilités améliorées de simulation de la température et du contenu en eau des sols pourront aussi être utiles pour d'autres secteurs d'intérêts comme par exemple, les sols agricoles.

Un autre aspect qui a été abordé dans ce projet est celui de la fertilité des sols forestiers. En effet, des changements de température et de contenu en eau des sols peuvent aussi avoir des impacts indirects sur la dynamique forestière en affectant plusieurs processus biologiques et chimiques importants pour l'écologie des forêts, dont le cycle des éléments nutritifs. Dans cette étape, des mesures de la disponibilité des éléments nutritifs à des bassins versants forestiers ont été mis en relation avec des variables climatiques. La disponibilité en cations basiques (Ca, Mg, K et Na) était affectée positivement par la température (air, humus, ou sols), la longueur de la saison de croissance et le contenu en eau du sol (ou quantité de précipitation). En se basant sur des observations, on peut projeter qu'un climat plus chaud (et forcément une saison de croissance plus longue) et plus humide sera propice à une augmentation de la disponibilité des cations dans le futur, principalement en raison de l'augmentation des taux d'altération des minéraux. Par contre, une diminution du contenu en eau de 30% pendant la saison de croissance est suffisante pour éliminer tous les gains éventuels qui pourraient survenir en considérant des scénarios de hausses de températures

de sol entre 2 et 5 °C. Vu sous cet angle et considérant les baisses de contenu en eau des sols projetées dans le futur, il semble qu'une augmentation des taux d'altération et ainsi de la disponibilité des cations basiques soit peu probable. De façon similaire, une augmentation de température des sols aura peu d'impact, du moins à court terme, sur la nutrition azotée des arbres. Ceci est principalement dû à la faible réactivité des réservoirs d'N organique dans les sols forestiers et plus particulièrement des sols des forêts boréales. En revanche, des études à plus long terme sont nécessaires afin de confirmer si l'absence d'effets à court terme se maintiendra sur une plus longue échelle de temps.

Globalement, les résultats de ce projet montrent l'importance de s'intéresser aux impacts d'une diminution du contenu en eau des sols forestiers et devraient inciter plusieurs projets de recherche à en faire un élément important de leurs investigations. Il semble en effet que des hausses potentielles de croissance de la forêt, qui auraient pu être dues aux hausses de température et à l'allongement de la saison de croissance, risquent d'être annulées par une diminution du contenu en eau des sols et, incidemment, des sécheresses plus fréquentes.

Il est aussi important de pouvoir projeter les changements de température et d'humidité des sols à l'intérieur de modèles couplés comme nous avons tenté de le faire dans ce projet. Il reste plusieurs voies à explorer dans ce domaine. Une meilleure intégration de ces variables vitales pour la forêt, permettra éventuellement de jeter une base pour modéliser davantage de phénomènes à l'intérieur même de simulations couplées tels qu'une végétation dynamique dont la composition pourrait évoluer dans le temps et aussi d'intégrer des composantes du cycle du carbone.

Mis ensemble, ces résultats laissent présager des impacts négatifs sur la croissance des arbres dont les gestionnaires de la forêt peuvent dorénavant tenir compte dans leur évaluation de la productivité future des forêts. Déjà, le MRN met sur pied des projets de recherche visant à mieux comprendre les effets des sécheresses non seulement sur la croissance des arbres mais aussi sur le succès de régénération qui est crucial dans la dynamique forestière. À brève échéance, les résultats obtenus ici serviront d'outils d'aide à la prise de décisions et d'aide pour mieux interpréter les projections de productivité et de composition forestière dans le futur ce qui permettra éventuellement d'améliorer les prédictions de possibilité forestière.

Finalement, les membres de l'équipe mise sur pied dans le cadre de ce projet sont déterminés à continuer le travail afin de terminer les étapes qui n'ont pas encore été complètement réalisées. En effet, ce genre de projet soulève des questions autant qu'il apporte des réponses. Une suite de ce projet qui fait l'objet d'une nouvelle entente entre le MRN et Ouranos. L'équipe restera donc intacte et poursuivra les recherches au moins jusqu'à l'automne 2014.

Section 8. Références

Aerts R, Chapin FI. 2000. The Mineral Nutrition of Wild Plants Revisited: A Re-evaluation of Processes and Patterns. *Advances in ecological research* 30: 1–67.

Almagro, M., J. Lopez, J. I. Querejeta, and M. Martinez-Mena, 2009: Temperature dependence of soil CO₂ efflux is strongly modulated by seasonal patterns of moisture availability in a Mediterranean ecosystem. *Soil Biol. Biochem.*, 41, 594–605. Anderson et al., 2002

Arp, P.A., and Yin, X.W. 1992. Predicting water fluxes through forests from monthly precipitation and mean monthly air temperature records. *Canadian Journal of Forest Research* 22: 864-877.

Augustin, F., Houle, D., Gagnon, C., et Courchesne, F. 2013a. The influence of climate and soil mineralogy on long-term mineral weathering in forested catchments of the Canadian Shield, Québec. (en préparation)

Augustin, F., Houle, D., Gagnon, C., et Courchesne, F. 2013b. Relative importance of climate in the variability of budgets and concentrations of base cations in lake waters of forested catchments. (soumis)

Bailey, S.W., Buso, D.C. and Likens, G.E., 2003. Implications of sodium mass balance for interpreting the calcium cycle of a forested ecosystem. *Ecology*, 84: 471-484.

Balland, V., J. Bhatti, R. Errington, M. Castonguay, and P. A. Arp, 2006: Modeling snowpack and soil temperature and moisture conditions in a jack pine, black spruce and aspen forest stand in central Saskatchewan(BOREASSSA). *Can. J. Soil Sci.*, 86, 203–217.

Becker, R., 1999. Critical load - PROFILE 4.2. Manual for the international PC version. OEKO-DATA, Strausberg.

Bedison, J.E., and Johnson, A.H. 2010. Seventy-Four Years of Calcium Loss from Forest Soils of the Adirondack Mountains, New York. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 74(6): 1–9.

Bélanger N., Paré D., Courchense F. (2004): Regression equations for estimating throughfall nutrient fluxes using wet deposition data and their applicability for simulating the soil acid-base status using the dynamic forest soil-atmosphere model SAFE. *Ecological Modelling*, 175: 151–167.

Bengtson, P., Basiliko, N., and Prescott, C. E., and Grayston, S. J. 2007. Spatial dependency of soil nutrient availability and microbial properties in a mixed forest of *Tsuga heterophylla* and *Pseudotsuga menziesii*, in coastal British Columbia, Canada, *Soil Biol. Biochem.*, 39, 2429–25 2435.

Bhatti, J. S., R. Fleming, N. W. Foster, F.-R. Meng, C. P. A. Bourque, and P. A. Arp, 2000: Simulations of pre- and post- harvest soil temperature, soil moisture, and snowpack for jack pine: Comparison with field observations. *For. Ecol. Manage.*, 138, 413–426.

Bouffard, A. Houle, D. Duchesne. L. 2013. Les effets du climat et des dépôts atmosphériques sur la concentration en éléments nutritifs des eaux de surface. 2- Le cas du bassin Laflamme. Rapport remis au MRN. Direction de la recherche forestière.

Boutin, R. Foster, J. Lavigne, M. B. et Paré, D. 2005. N mineralization rates in eastern Canadian forest sites. Acid Rain Assessment Report. Dans le chapitre 5. p. 175-180. ISBN 0-662-38754-6. Cat. no. En4-46/2004E-MRC

Campbell, J. L., M. J. Mitchell, P. M. Groffman, L. M. Christenson, and J. P. Hardy, 2005: Winter in northeastern North America: A critical period for ecological processes. *Front. Ecol. Environ.*, 3, 314–322.

Caya, D. and R. Laprise, 1999: A semi-implicit semi-lagrangian regional climate model: The Canadian RCM, *Mon. Wea. Rev.*, 127(3), 341-362.

Comité d'experts sur la prospection pédologique d'Agriculture Canada, 1987

Courchesne, F., Côté, B., Fyles, J.W., Hendershot, W.H., Biron, P.M., Roy, A.G., and Turmel, M.C. 2005. Recent change in soil chemistry in a forested ecosystem of southern Québec, Canada. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 1298–1313.

Curiel, Y. J., D. D. Baldocchi, A. Gershenson, A. Goldstein, L. Misson, and S. Wong, 2007: Microbial soil respiration and its dependency on carbon inputs, soil temperature and moisture. *Global Change Biol.*, 13, 2018–2035. Davidson et al. 1998

DeLuca TH, Zackrisson O, Nilsson MC, Sellstedt A. 2002. Quantifying nitrogen-fixation in feather moss carpets of boreal forests. *Nature* 419: 917–920.

D'Orangeville, L., Houle D., Côté B. 2013a. Three years of increased soil temperature and atmospheric N deposition on soil available nutrient. (en préparation)

D'Orangeville, L., Houle D., Côté B., Duchesne L., et Morin H. 2013b. Three years of increased soil temperature and atmospheric N deposition have no effect on the N status and growth of a mature balsam fir forest. *Soumis à Biogeoscience*

Duchesne, L., and Houle, D. 2006. Base cation cycling in a pristine watershed of the Canadian boreal forest. *Biogeochemistry* 78: 195-216.

Duchesne, L., and Houle, D. 2008. Impact of nutrient removal through harvesting on the sustainability of the boreal forest. *Ecological Applications* 18: 1642-1651.

Flato, G.M. and G.J. Boer, 2001: Warming Asymmetry in Climate Change Simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 195-198.

Garrels, R. M. and Mackenzie, F. T.: *Evolution of Sedimentary Rocks*, W.W. Norton, New York, 1971.

Gessler, A., Keitel, C., Nahm, M., and Rennenberg, H. 2004. Water shortage affects the water and nitrogen balance in Central European beech forests. *Plant Biology* 6: 289-298.

Gislason, S.R., Oelkers, E.H., Eiriksdottir, E.S., Kardjilov, M.I., Gisladottir, G., Sigfusson, B., Snorrason, A., Elefsen, S., Hardardottir, J., Torssander, P., and Oskarsson, N. 2009. Direct evidence of the feedback between climate and weathering. *Earth and Planetary Science Letters* 277: 213-222.

Hernandez-Santana, V., Martinez-Vilalta, J., Martinez-Fernandez, J., and Williams, M. 2009. Evaluating the effect of drier and warmer conditions on water use by *Quercus pyrenaica*. *Forest Ecology and Management* 258: 1719-1730.

Hodson, M. E. and Langan, S. J.: Considerations of uncertainty in setting critical loads of acidity of soils: the role of weathering rate determination, *Environ. Pollut.*, 106, 73–81, 1999a.

Hodson, M. E. and Langan, S. J.: The influence of soil age on calculated mineral weathering rates, *Appl. Geochem.*, 14, 387–394, 1999b.

Hope, G. D. 2009. Clearcut harvesting effects on soil and creek inorganic nitrogen in high elevation forests of southern interior British Columbia, *Can. J. Soil Sci.*, 89, 35–44, 2009.

Houle, D., Lamoureux, P., Bélanger, N., Bouchard, M., Gagnon, C., Couture, S., and Bouffard, A. 2012. Soil weathering rates in 21 catchments of the Canadian Shield. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 685–697, DOI:10.5194/hess-16-1-2012

Houle, D., Couture, S., et C. Gagnon. 2010. The relative role of decreasing precipitation sulfate and climate on recent lake recovery. *Sous-presse pour la revue Global Biogeochemical Cycles*. « on-line first » DOI:10.1029/2009GB003757

Houle, D., and Moore, J.-D. 2008. Soil solution, foliar concentrations and tree growth response to 3-year of ammonium-nitrate addition in two boreal forests of Québec, Canada. *Forest Ecology and Management* 255: 2049-2060.

Houle D., Duchesne, L., Ouimet, R., Paquin, R., Arp, P.A., & F.R. Meng. 2002. Evaluation of the FORHYM2 model for prediction of hydrologic fluxes and soil temperature at the Lake Clair Watershed (Duchesnay, Quebec). *Forest Ecology and Management*. 159 :249-260.

Houle, D., Paquin, R., Camiré, C., Ouimet, R., and Duchesne, L. 1997. Response of the Lake Clair Watershed (Duchesnay, Quebec) to changes in precipitation chemistry (1988-1994). *Canadian Journal of Forest Research*. 27: 1813-1821.

Houle D., Dermont G., et Gagnon C. 2013. Projections of future forest soils weathering rates in response to climatic change. (en préparation)

IPCC. 2007. *Climate change 2007: the physical science basis*. In: Solomon S, Qin D, Manning Z, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL, Eds. *Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press. p 996.

Jerabkova, L. and Prescott, C. E. 2007 Post-harvest soil nitrate dynamics in aspen- and sprucedominated boreal forests, *Forest Ecol. Manag.*, 242, 209–216.

Johnson, A.H., Moyer, A., Bedison, J.E., Richter, S.L., and Willig, S.A. 2008. Seven Decades of Calcium Depletion in Organic Horizons of Adirondack Forest Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72: 1824–1830.

LeBauer DS, Treseder KK. 2008. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. *Ecology* 89: 371–379.

Likens, G. E. and Bormann, F. H.: *Biogeochemistry of a Forested Ecosystem*, 2nd Edn., Springer-Verlag, NewYork, 147 pp., 1995.

Logan, T., D. Houle, D. Caya. 2008. Future changes in soil temperature and soil moisture as simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM 4.1.1). Présentation orale. Congrès de La Société canadienne de météorologie et d'océanographie (SCMO) 2008.

Logan T., I. Charron, D. Chaumont, D. Houle. 2011. Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise. Ouranos et MRNF. 55 pp +annexes.

Lupi, C., Morin, H., Deslauriers, A., and Rossi, S. 2012. Xylogenesis in black spruce: does soil temperature matter?, *Tree Physiol.*, 32, 74–82.

Luxmoore, R.J., Wullschleger, S.D., and Hanson, P.J. 1993. Forest responses to CO₂ enrichment and climate warming. *Water, Air, and Soil Pollution* 70: 309-323.

Malhi, S. S. and McGill, W. B. 1982. Nitrification in three Alberta soils: effect of temperature, moisture and substrate concentration, *Soil Biol. Biochem.*, 14, 393–399, 1982.

Marty, A. Houle, D. Duchesne. L. 2013. Les effets du climat et des dépositions atmosphériques sur la concentration en éléments nutritifs des eaux de surface du bassin Tirasse. Rapport remis au MRN. Direction de la recherche forestière.

Melillo, J.M., Steudler, P.A., Aber, J.D., Newkirk, K., Lux, H., Bowles, F.P., Catricala, C., Magill, A., Ahrens, T., and Morrisseau, S. 2002. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. *Science* 298: 2173-2176.

Mellor, M. 1977. Engineering properties of snow. *J. Glaciol.*, 19 (81), 15-66.

Monson, R. K., D. A. Lipson, S. P. Burns, A. A. Turnipseed, A. C. Delany, M. W. Williams, and S. K. Schmidt, 2006: Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition. *Nature*, 439, 711–714.

Moriasi, D. N., J.G. Arnold, M.W. Van Liew, R.L. Bingner, R.D. Harmel, and T.L. Veith. 2007 Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *Transactions of the ASABE* 50 (3), 885-900.

Mpelasoka, F. S., and F. H. S. Chien, 2009: Influence of rainfall scenario construction methods on runoff projections. *J. Hydrometeor.*, 10, 1168–1183.

- Music, B., and D. Caya, 2007: Evaluation of the Hydrological Cycle over the Mississippi River Basin as Simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *J. Hydromet.*, 8(5), 969-988. DOI: 10.1175/JHM627.1
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V.: River flow forecasting through conceptual models. 1970. Part I - A discussion of principles, *J. Hydrol.*, 10, 282–290.
- Näsholm T, Ekblad A, Nordin A, Giesler R, Högberg M, Högberg P. 1998. Boreal forest plants take up organic nitrogen. *Nature* 392: 914–916.
- Nicolardot, B., Fauvet, G., and Cheneby, D. 1994. Carbon and nitrogen cycling through soil microbial biomass at various temperatures. *Soil Biol. Biochem.* 26: 253-261.
- Olson RK and Reiners WA. 1983. Nitrification in subalpine balsam fir soils: Tests for inhibitory factors. *Soil Biology and Biochemistry* 15:413-418.
- Plummer, D.A., D. Caya, A. Frigon, H. Coté, M. Giguere, D. Paquin, S. Biner, R. Harvey, R. De Elia. 2006, Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM, *J. Climate* 19: 3112–3132.
- Rennenberg, H., Loreto, F., Polle, A., Brillì, F., Fares, S., Beniwal, R.S., and Gessler, A. 2006. Physiological responses of forest trees to heat and drought. *Plant Biology* 8: 556-571.
- Reich PB, Hobbie SE, Lee T, Ellsworth DS, West JB, Tilman D, Knops JMH, Naeem S, Trost J. 2006. Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO₂. *Nature* 440: 922–5.
- Rustad, L.E., Campbell, J.L., Marion, G.M., Norby, R.J., Mitchell, M.J., Hartley, A.E., Cornelissen, J.H.C., Gurevitch, J., and Gcte, N. 2001. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia* 126: 543-562.
- Sabey, B. R., Bartholomew, W. V., Shaw, R., and Pesek, J. 1956. Influence of temperature on nitrification in soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 20, 357–360.
- Salzmann, N., C. Frei, P.-L. Vidal, and M. Hoelzle, 2007: The application of Regional Climate Model output for the simulation of high-mountain permafrost scenarios. *Global Planet. Change*, 56, 188–202.
- Scinocca, J. F., N. A. McFarlane, M. Lazare, J. Li, and D. Plummer, 2008: Technical Note : The CCCma third generation AGCM and its extension into the middle atmosphere. *Atmos. Chem. Phys*, 8, 7055-7074. www.atmos-chem-phys.net/8/7055/2008/.
- Schmidt, S. K., and D. A. Lipson, 2004: Microbial growth under the snow: Implications for nutrient and allelochemical availability in temperate soils. *Plant Soil*, 259, 1–7.
- Ste-Marie C, Houle D. 2006. Forest floor gross and net nitrogen mineralization in three forest types in Quebec, Canada. *Soil Biology & Biochemistry* 38: 2135–2143.

Sturm M, Holmgren J, König M and Morris K. 1997. The thermal conductivity of seasonal snow; *J. Glaciol.* 43(143) 26–41.

Szeto, K.K., T. Motchalova, and P. Vivier (Updated by M. Law); 2000 (update 2008). On the preparation of a 1-km resolution gridded soil texture dataset - A CRB internal report. Environment Canada, Downview, Ontario.

Taylor, A. B. and Velbel, M. A.: Geochemical mass balances and weathering rates in forested watersheds of the southern Blue Ridge, II: Effects of botanical uptake terms, *Geoderma*, 51, 29– 50, 1991.

Verseghy, D.L. (1991). CLASS: A Canadian Land-Surface Scheme for GCMS, I. Soil model. *International Journal of Climatology* 11: 111-133.

Verseghy, D.L., McFarlane, N.A., and Lazare, M. (1993). CLASS: A Canadian Land-Surface Scheme for GCMS, II. Vegetation model and coupled runs. *International Journal of Climatology* 13: 347-370.

Vitousek, P. M. & Howarth, R. W. (1991). "Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur?" *Biogeochemistry* 13(2): 87-115.

Watmough SA, Dillon PJ (2003) Mycorrhizal weathering in base-poor forests. *Nature* 423:823–824

Webb, R. S., C. E. Rosenzweig, et E. R. Levine (1993), Specifying land surface characteristics in general circulation models: Soil profile data set and derived water-holding capacities, *Global Biogeochem. Cycles*, 7(1), 97–108, doi:10.1029/92GB01822.

White, A. F., and A. E. Blum, 1995: Effects of climate on chemical weathering rates in watersheds. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 1729–1747.

Yin, X.W., and Arp, P.A. 1993. Predicting forest soil temperatures from monthly air temperature and precipitation records. *Canadian Journal of Forest Research* 23: 2521-2536.