

INSTRUCTIONS POUR PRÉPARER LE RAPPORT FINAL

SECTION A : RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX SUR LE PROJET

Cette section est pré-remplie et inclut : titre du projet, nom du chercheur principal et son affiliation, date de soumission du rapport, date de commencement et d'achèvement du projet, organismes partenaires et collaborateurs principaux, territoire couvert et horizon temporel visé ainsi que quelques mots clés. Ne modifier que les informations manquantes ou erronées.

SECTION B : RÉSUMÉ

Cette section contient le sommaire exécutif du projet. Il doit faire un **maximum de 2 pages**.

À noter que cette section pourra être retravaillée par Ouranos pour des fins de communication et de diffusion des résultats. Merci aussi de bien vouloir **identifier une ou deux figures** les plus pertinentes à inclure dans une fiche dont l'objectif sera de diffuser les résultats de votre projet auprès des usagers.

SECTION C : RAPPORT SCIENTIFIQUE

Cette section contient le rapport scientifique, selon les règles habituelles des domaines pertinents. Le contenu devrait permettre au lecteur de bien saisir comment les travaux ont été réalisés, les résultats ainsi que la portée et les retombées du projet. Dans les cas où la documentation en appui aux activités de transfert scientifique contient déjà toute l'information ou une partie substantielle de celle-ci (par exemple, sous forme d'article), il est possible de remplacer cette portion du rapport ou une partie de celui-ci par une copie de cette documentation.

À noter que, sauf exception, cette section sera publiée sur le site Internet d'Ouranos.

SECTION D : INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES

Cette section contient toute autre information concernant le projet et permettant d'en faire le bilan, soit des renseignements sur les collaborations, une liste complète des livrables ainsi que les leçons apprises et retombées du projet.

SECTION AUTRES INFORMATIONS ASSOCIÉES AU PROJET (*s'il y a lieu*)

Cette section est optionnelle. Elle peut inclure d'autres livrables qui ont été préparés dans le cadre du projet, y compris : la base de données des références consultées, les cartes produites, et tout autre produit ayant permis de réaliser le projet.

SECTION A : RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX SUR LE PROJET

Veillez compléter et/ou corriger cette section au besoin.

Numéro de projet : 554007-107

Titre du projet : **Modélisation hydrogéologique et modélisation des populations de salamandres sur le mont Covey Hill: perspectives pour la conservation des habitats en présence de changements climatiques**

Nom du chercheur principal et affiliation : Marie Larocque, département des sciences de la Terre et de l'atmosphère, UQAM

Date de soumission du rapport : 31 mars 2013 – version préliminaire
3 mai 2013 – version finale

Date de commencement et d'achèvement du projet : Octobre 2010 à mars 2013

Organismes partenaires et représentants identifiés comme collaborateurs principaux: Lael Parrott, dép. géographie, Université de Montréal
David Green, Musée Redpath, Université McGill
Martin Lavoie, Centre d'études nordiques, Université Laval
Stéphanie Pellerin, IRBV dép. Biologie, Université de Montréal
Ouranos
Marie-France Sottile, experte en scénarios climatiques, Ouranos

Membres du comité de suivi : Robert Siron (Ouranos)
Nathalie Desrosiers (MDDEFP)
Marie Larocque (UQAM)
Lael Parrott (Université de Montréal)
Carine Deland (Conservation de la nature Canada)

Territoire(s) couvert(s) :

<input type="checkbox"/>	Nord du Québec	<input type="checkbox"/>	Centre du Québec	<input type="checkbox"/>	Tout le Québec
<input checked="" type="checkbox"/>	Sud du Québec	<input type="checkbox"/>	Québec maritime	<input type="checkbox"/>	Extérieur du Québec

→Mont Covey Hill

Mots clés :

Salamandres; cycle de vie; espèces menacées / vulnérables / en péril; écosystèmes de ruisseaux; résurgences; aquifère; modélisation hydrogéologique; conservation des habitats; Mont Covey Hill

Les coûts relatifs aux travaux sont assumés par Ouranos grâce au Fonds vert dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec (PACC26-Ouranos).



SECTION B : RÉSUMÉ (maximum 2 pages)

➤ Contexte

Les écosystèmes sont naturellement adaptés pour faire face aux aléas du climat, mais cette capacité est menacée par la rapidité des changements climatiques actuels. Ce projet utilise le Laboratoire naturel du mont Covey Hill comme site expérimental afin d'apporter une meilleure compréhension de l'impact des changements climatiques sur les écosystèmes locaux et sur la dynamique des eaux souterraines qui les alimentent. Le mont Covey Hill est une importante zone de recharge pour l'aquifère régional de la rivière Châteauguay. Il abrite la salamandre sombre des montagnes (*Desmognathus ochrophaeus*), une espèce désignée menacée, ainsi que la salamandre pourpre (*Gyrinophilus porphyriticus*), une espèce désignée vulnérable. Les salamandres étant dépendantes de résurgences d'eau souterraine à différents stades de leur développement, elles sont particulièrement sensibles à tout facteur pouvant modifier la dynamique hydrogéologique de leur habitat.

➤ Objectifs

L'objectif général du projet est d'utiliser la modélisation hydrogéologique et écologique pour recommander des stratégies de conservation visant à promouvoir la résilience du milieu naturel du mont Covey Hill, particulièrement en ce qui a trait aux résurgences-habitats de la salamandre sombre des montagnes, en présence de changements climatiques.

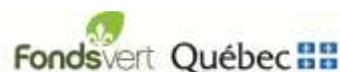
➤ Démarche

L'approche méthodologique utilisée dans ce projet est basée sur le développement et l'application de modèles permettant de définir et comprendre les processus hydrogéologiques sur le mont Covey Hill et les liens qui existent avec les populations de salamandres, dans les climats actuel, passé et futur. Le projet s'est déroulé en quatre étapes:

- développement de modèles d'écoulements souterrains permettant 1) de comprendre l'hydrosystème de l'ensemble de la colline et 2) de quantifier la dynamique hydrique des résurgences servant d'habitats pour les salamandres;
- élaboration d'un modèle centré sur l'individu permettant de simuler le cycle de vie et la distribution des salamandres des ruisseaux;
- combinaison des deux modèles afin d'évaluer les perspectives de résilience de ces salamandres sur le mont Covey Hill selon différents scénarios climatiques;
- formulation de recommandations de mesures de protection du territoire.

➤ Résultats

Selon les modèles hydrogéologiques développés pour le mont Covey Hill, les changements climatiques projetés génèrent une activité hydrique plus importante que celle observée dans



le climat passé récent (Figure 1). Le débit de la résurgence est plus important et le nombre de jours d'activité de la résurgence augmente en moyenne pour l'horizon 2041-2070. L'activité de la résurgence en climat futur est plus importante pendant l'hiver et au printemps et diminue à l'été et l'automne. Ces changements hydrologiques génèrent des conditions plus propices à la survie de la salamandre sombre des montagnes et mènent à une augmentation de son abondance simulée ainsi qu'à une réduction de la probabilité d'extinction de la population (des résultats similaires sont obtenus pour les autres résurgences simulées). Certains facteurs, notamment les pressions anthropiques, ne sont toutefois pas inclus dans les modèles et pourraient contrebalancer les impacts des changements climatiques. À cet effet, il est recommandé de poursuivre les efforts de conservation pour maintenir l'intégrité hydrique à l'échelle de la colline en élargissant les zones de conservation actuelles à l'ensemble de la colline. Toute mesure favorisant l'infiltration des précipitations, et conséquemment la recharge de l'aquifère, devrait également être privilégiée. Ces recommandations sont transposables à d'autres contextes géologiques et climatiques similaires.

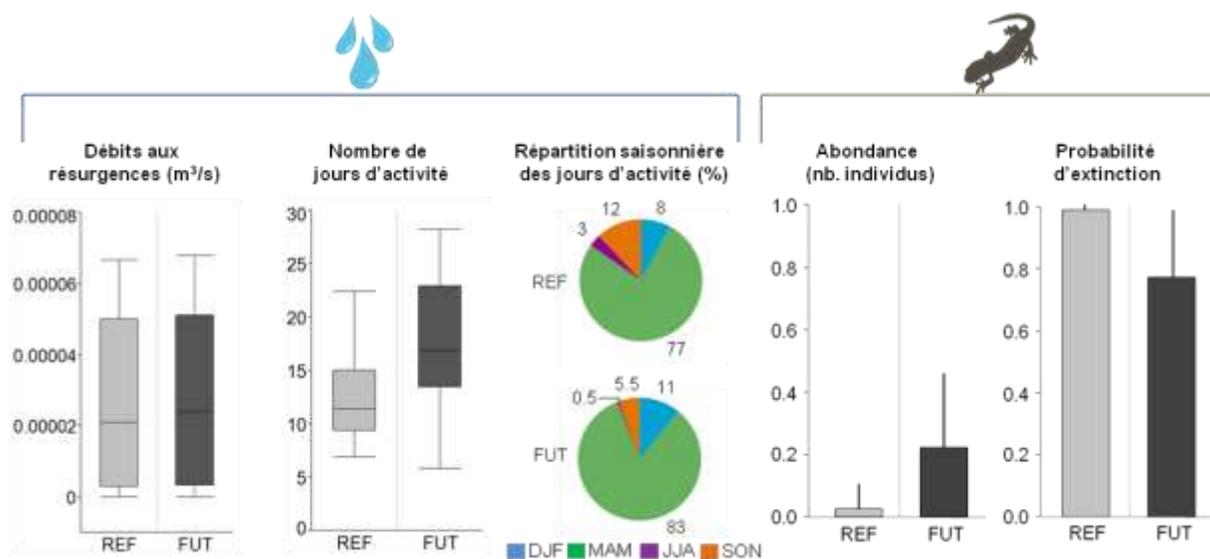


Figure 1 Activité hydrique d'une résurgence en climat passé récent (REF; 1971-2000) et en climat futur (FUT; 2041-2070), et impacts sur la dynamique des salamandres. La zone d'activité de la résurgence est de 4 m².

➤ Recommandations pour l'adaptation

Les suites recommandées au projet sont 1) de poursuivre la caractérisation du milieu et l'acquisition de données au mont Covey Hill, 2) d'identifier des scénarios d'évolution de l'occupation du territoire qui pourraient avoir un impact plus grand que les changements climatiques sur l'hydrologie et les habitats, 3) de développer un modèle entièrement couplé des écoulements de surface et souterrains pour l'ensemble de la colline et 4) d'intégrer les résultats aux outils de prise de décision existants en conservation. Ceci mènerait à des retombées concrètes pour l'adaptation aux changements climatiques.

SECTION C : RAPPORT SCIENTIFIQUE

[PAGE LAISSÉE INTENTIONNELLEMENT VIDE]

**MODÉLISATION HYDROGÉOLOGIQUE ET MODÉLISATION DES
POPULATIONS DE SALAMANDRES SUR LE MONT COVEY HILL:
PERSPECTIVES POUR LA CONSERVATION DES HABITATS EN
PRÉSENCE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES**

- RAPPORT FINAL -

Équipe de recherche et rédaction

Marie Larocque
Lael Parrott
David Green
Martin Lavoie
Stéphanie Pellerin
Jana Levison
Philippe Girard
Marie-Audray Ouellet

MAI 2013

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



AVANT-PROPOS

Depuis le début des années 1990, les initiatives de recherche et de caractérisation des habitats se sont multipliées sur le mont Covey Hill. À la faveur des travaux réalisés sur la colline et dans la région, différents instruments de mesure ont été mis en place de manière permanente, et une importante base de données concernant les espèces, les habitats et l'hydrologie de la colline est maintenant gérée par Conservation de la nature Canada (CNC). C'est donc tout naturellement que le mont Covey Hill est passé d'un site intéressant pour l'étude des salamandres à un Laboratoire naturel dédié au suivi à long terme des populations de salamandres de ruisseaux et des processus hydriques.

Le Laboratoire naturel a pour mission de favoriser la recherche multidisciplinaire sur les composantes des écosystèmes du mont Covey Hill afin de mieux comprendre leur fonctionnement, de connaître les impacts des pressions humaines et naturelles sur l'hydrologie, les habitats et sur les populations végétales et animales, et de favoriser la conservation du milieu. Il regroupe plusieurs partenaires scientifiques dont le département des sciences de la Terre et de l'atmosphère de l'UQAM, le département des sciences biologiques de l'Université de Montréal, le département de géographie de l'Université de Montréal, l'Institut de la recherche en biologie végétale, le département des sciences biologiques de l'Université McGill, le Centre d'études nordiques, le ministère des Ressources naturelles, le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, la Commission Géologique du Canada et Ouranos.

RÉSUMÉ

Les écosystèmes sont naturellement adaptés pour faire face aux aléas du climat mais cette capacité est menacée par la rapidité des changements climatiques actuels. Les changements climatiques observés et anticipés sont considérés comme une grave menace à la biodiversité. Déjà connues comme ayant un statut précaire, les espèces vulnérables ou menacées sont d'autant plus sensibles à des modifications de leur habitat. L'exemple de la salamandre sombre des montagnes (*Desmognathus ochrophaeus*) au mont Covey Hill est typique de cette problématique. L'habitat de cette salamandre est intimement lié aux résurgences d'eau souterraine dont la dynamique hydrologique est contrôlée indirectement par le climat, par l'entremise de la recharge en eau souterraine. Toutefois, le contrôle qu'exercent les variables hydrologiques sur le maintien de cette population de salamandres est à peu près inconnu. Ces connaissances sont nécessaires pour définir des stratégies d'adaptation aux changements climatiques qui permettront de maintenir ou d'améliorer les chances de survie des espèces visées. Les études à l'échelle locale sont particulièrement cruciales dans ces environnements vulnérables situés près de la source des cours d'eau (zones amont ou *headwater basins*) qui jouent un rôle hydrologique et écosystémique majeur.

Ce projet vise une application de la modélisation hydrologique et écologique sur le Laboratoire naturel du mont Covey Hill, un site d'environ 150 km² instrumenté pour le suivi de variables hydrologiques et des populations de salamandres. La colline abrite la salamandre sombre des montagnes (*Desmognathus ochrophaeus*), une espèce désignée menacée, ainsi que la salamandre pourpre (*Gyrinophilus porphyriticus*), une espèce désignée vulnérable. L'objectif général est d'utiliser la modélisation hydrogéologique et écologique pour recommander des stratégies de conservation visant à promouvoir la résilience du milieu naturel du mont Covey Hill en présence de changements climatiques.

L'analyse paléoécologique a mis en évidence la grande variabilité du climat passé. Certaines variations ont lieu à des échelles millénaires, mais d'autres se produisent à l'échelle séculaire. Par exemple, l'analyse des thécamoébiens et des précipitations nettes montre une tendance à la baisse de la recharge de 1900 à 2010. Cette évolution tend toutefois à s'inverser au cours des dernières décennies de la période. Ces résultats soulignent l'importance de maintenir en opération des sites de suivi écologique à long terme, dans le but de comprendre la gamme des conditions climatiques auxquelles un milieu naturel est adapté. Les dix scénarios climatiques fournis par Ouranos indiquent que le climat futur sera significativement plus chaud et également plus humide que ce que l'on connaît aujourd'hui. L'intensité des précipitations augmentera également de manière significative. Certains modèles projettent des précipitations nettes annuelles dépassant le maximum observé au cours du dernier siècle.

Une simulation des écoulements souterrains sur l'ensemble de la colline avec le modèle MODFLOW a montré que les niveaux piézométriques, les débits aux résurgences et les débits de base des cours d'eau sont sensibles à la recharge sur presque tout le mont Covey Hill. Lorsque le modèle a été utilisé avec les scénarios climatiques passés et futurs, les résultats montrent que ces variables pourraient augmenter significativement à l'horizon 2050, correspondant à la période 2041-2070.

Une simulation des écoulements souterrains réalisée à l'aide du modèle HydroGeoSphere sur une petite portion de la face nord de la colline a permis de simuler la dynamique des

résurgences, qui sont également des habitats de salamandres. Les résultats des simulations réalisées au moyen des scénarios climatiques passés et futurs montrent que le débit moyen des résurgences et le nombre de jours d'activité de celles-ci augmenteront pour la majorité des scénarios de climat futur étudiés. Plus particulièrement, le nombre de jours d'activité au cours de l'hiver et du printemps sera plus important à l'horizon 2050.

Un modèle de cycle de vie des salamandres de ruisseaux a été développé dans ce projet. Ce modèle permet de reproduire un ensemble de caractéristiques physiologiques, écologiques et comportementales typiques des salamandres de ruisseaux. Le modèle est également en mesure de reproduire la variabilité des durées de phases de développement des salamandres, de même que de reproduire convenablement les densités d'adultes observées en nature. La combinaison de ce modèle centré sur l'individu et d'un modèle environnemental développé notamment au moyen des résultats hydrologiques du modèle HydroGeoSphere a produit un modèle écologique hybride (MEH) dont le potentiel a été mis à profit dans le cadre de ce projet pour simuler la progression des populations de salamandres sombres des montagnes sur le mont Covey Hill en fonction des changements de température et d'activité hydrique des résurgences induits par les changements climatiques. Les résultats du MEH indiquent une augmentation significative de l'abondance des salamandres sombres des montagnes à toutes les résurgences étudiées. Cette augmentation s'accompagne d'une diminution significative de la probabilité d'extinction des salamandres aux résurgences aux plus hautes altitudes sur la colline. Le modèle a par ailleurs mis en évidence une accélération significative du cycle de vie des salamandres et un allongement de la période de reproduction.

Une modélisation entièrement couplée des écoulements de surface et souterrains permettrait de simuler l'ensemble du cycle hydrologique sur la colline et ainsi d'inclure la variété des habitats de la salamandre sombre des montagnes. Il serait ainsi possible d'étendre l'analyse des habitats aux cours d'eau où se trouvent d'autres espèces de salamandres de ruisseaux, dont la salamandre pourpre qui n'a pas été étudiée dans le présent projet. Avec cet outil, il serait pertinent d'étudier des scénarios d'évolution de l'occupation du territoire et d'impacts anthropiques. De tels scénarios n'ont pas été intégrés dans ce projet mais pourraient avoir un impact plus grand que celui des changements climatiques sur l'hydrologie et les habitats.

L'ensemble des résultats montre l'importance de mettre en place des mesures de conservation qui permettent de favoriser la recharge sur l'ensemble du mont Covey Hill, c.-à-d. au-delà des zones de protection immédiates entourant les sites où les salamandres ont été observées, et de manière plus continue que les zones de conservation prioritaires déjà identifiées. En raison des conditions favorables pour les salamandres dans un climat futur, les initiatives de conservation devraient être orientées vers la réduction des impacts des perturbations connues et déjà identifiées.

À la lumière des résultats obtenus dans ce projet de recherche, il est maintenant possible d'entrevoir le développement d'une approche intégrée pour la conservation du territoire à l'échelle locale. Cette approche devra être élaborée en étroite collaboration avec les organismes de conservation comme Conservation de la nature Canada, de manière à développer une approche qui soit compatible avec les outils existants de prise de décision (p. ex. plans de conservation). Une telle approche pourrait ainsi être utilisée dans une variété de contextes géologiques, hydrologiques et climatiques. Il en résultera des retombées concrètes pour l'adaptation aux changements climatiques.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	ii
Résumé	iii
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	xi
Liste des annexes.....	xii
1. Introduction	1
2. Contexte / objectifs.....	2
3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature	4
3.1. Eaux souterraines et changements climatiques.....	4
3.2. Écosystèmes locaux et changements climatiques	5
3.3. Présence de salamandres au Québec et perspectives en contexte de changements climatiques	6
3.4. Stratégies de conservation des écosystèmes menacés en contexte de changements climatiques	7
4. Méthodologie et données	9
4.1. Le Laboratoire naturel du mont Covey Hill	9
4.1.1. Présentation du site.....	9
4.1.2. Données in situ disponibles au Laboratoire naturel.....	11
4.2. Scénarios climatiques.....	12
4.2.1. Analyses préliminaires avec deltas saisonniers	12
4.2.2. Analyses des scénarios climatiques fournis par Ouranos	12
4.2.3. Analyses paléoécologiques et paléoclimatiques	15
4.2.4. Climat 1900-2010	17
4.3. Développement et calage du modèle hydrogéologique.....	18
4.3.1. Développement et calage du modèle MODFLOW en régime transitoire	18
4.3.2. Analyse de sensibilité du modèle MODFLOW	20
4.3.3. Développement et calage du modèle HydroGeoSphere	21
4.3.4. Simulations avec les scénarios climatiques	24
4.4. Modélisation écologique des populations de salamandres.....	26
4.4.1. Modèle orienté sur l'individu	26

4.4.2.	Environnement spatial	26
4.4.3.	Interactions entre individus et environnement.....	27
4.5.	Intégration du modèle de salamandres et de l'hydrosystème de la colline	28
4.5.1.	Construction numérique de l'hydrosystème	28
4.5.2.	Calibration du modèle écologique.....	28
4.5.3.	Simulations de l'impact des changements climatiques sur les populations de salamandres	29
5.	Résultats et discussion.....	31
5.1.	Scénarios climatiques.....	31
5.1.1.	Variables climatiques considérées.....	31
5.1.2.	Résultats des analyses paléoclimatiques	36
5.1.3.	Précipitations nettes et niveaux de nappe de 1900 à 2010	39
5.2.	Simulation de l'écoulement en conditions actuelles, passées et futures.....	42
5.2.1.	Modèle Modflow	42
5.2.2.	Modèle HydroGeoSphere	52
5.2.3.	La modélisation hydroclimatique: nuances et implications	58
5.3.	Simulation des populations de salamandres.....	60
5.3.1.	Simulation des salamandres en environnement synthétique	60
5.3.2.	Dynamique des populations à Covey Hill.....	61
5.3.3.	Le modèle écologique: nuances et implications.....	65
5.4.	Stratégies de conservation du territoire.....	66
6.	Conclusion et recommandations	73
7.	Références.....	76

LISTE DES FIGURES

Figure 4.1	Localisation du Laboratoire naturel de Covey Hill.	10
Figure 4.2	Deltas température et précipitations pour l'horizon 2050 pour les simulations de MRC sélectionnées (Levison <i>et al.</i> , soumis). Les simulations de MCG (triangles gris) sont présentées à titre indicatif, afin de situer les changements projetés par les modèles régionaux par rapport aux changements projetés par les modèles de circulation générale.....	14
Figure 4.3	Modèle conceptuel du mont Covey Hill présentant les zones de conductivité hydraulique (à gauche) et les zones de recharge (à droite) (Levison <i>et al.</i> , soumis).....	18
Figure 4.4	Charges mesurées et simulées en régime permanent à l'échelle du domaine du modèle représentant le mont Covey Hill pour représenter les conditions moyennes (p. ex. les niveaux piézométriques) du passé récent (Levison <i>et al.</i> , soumis).	19
Figure 4.5	Charges mesurées et simulées en régime transitoire à l'échelle du domaine du modèle représentant le mont Covey Hill, pour les années 2007 à 2010 (Levison <i>et al.</i> , soumis).....	20
Figure 4.6	Domaine du modèle MODFLOW (en beige) et domaine du modèle HGS (en mauve). L'emplacement des sources instrumentées est marqué par les points bleus contenus dans l'ellipse rouge. L'instrumentation supplémentaire sur le site est présentée à titre indicatif (triangles noirs : puits d'observation des niveaux de nappe; points rouges : stations limnimétriques).	22
Figure 4.7	Schéma conceptuel du domaine du modèle HGS présentant les fractures : a) vue oblique avec agrandissement de la partie centrale du modèle; b) vue latérale du modèle.	22
Figure 4.8	Exemples d'une résurgence à activité continue et d'une résurgence à activité intermittente, tel que mesurées sur le terrain entre mai 2010 et août 2011.	24
Figure 4.9	Sommaire du modèle orienté sur l'individu des salamandres. Le modèle représente les quatre phases du cycle de vie de manière distincte. Chacune de ces phases est associée à une série de fonctions biologiques qui lui est propre. Ces fonctions peuvent être influencées par le contenu en eau (noir), la température ambiante (gris pâle), la densité (gris foncé) et/ou le hasard (blanc). Un diagramme plus précis se trouve dans Girard <i>et al.</i> (soumis).	27
Figure 4.10	Construction numérique de la structure et du dynamisme de l'hydrosystème. L'environnement numérique est constitué d'une source unique, fermée à la migration, située au centre d'un environnement de 50 m x 50 m (pour les fins de l'image, les dimensions en (a) et (b) ont été réduites à 7 m x 7 m). Les	

	résurgences alternent entre activité (a) et inactivité (b). L'arrangement spatial des milieux secs (en blanc), humides (en gris) et hydrologiquement actifs (en noir) change ainsi au gré d'un profil d'activité binaire (c). L'environnement numérique est complété par un profil quotidien de température (d).	30
Figure 5.1	Normales climatiques mensuelles (a) température et (b) précipitations à la station météorologique de Hemmingford Four Winds pour la période 1971 à 2000.	32
Figure 5.2	Comparaison entre les a) températures et les b) précipitations moyennes simulées et observées pour la période de référence 1971-2000.	33
Figure 5.3	Changements de a) température et de b) précipitations moyennes projetés pour la période 2041-2070.	34
Figure 5.4	Datations au radiocarbone, stratigraphie, teneur en carbone organique, densité de la masse sèche et principaux groupes botaniques (exprimés en pourcentages) de la carotte analysée pour la reconstruction paléoécologique (Lavoie <i>et al.</i> , soumis).	37
Figure 5.5	Modèle âge-profondeur de la carotte sédimentaire. Les taux nets d'accumulation sédimentaire (cm an^{-1}) sont indiqués. Les symboles utilisés pour décrire la composition de la matière organique sont définis à la figure 5.4 (Lavoie <i>et al.</i> , soumis).	39
Figure 5.6	Évolution des apports verticaux (AV), de l'évapotranspiration (ETP) et de la précipitation nette (Pnet) de 1900 à 2010.	40
Figure 5.7	Évolution des précipitations nettes (Pnet) et des niveaux de nappe inférés par l'analyse des thécamoebiens dans carotte de tourbe de Covey Hill. La ligne pointillée représente la moyenne mobile centrée sur 10 ans.	41
Figure 5.8	Sensibilité des charges a) aux variations de conductivité hydraulique et b) aux variations de recharge; sensibilité des débits de base c) aux variations de conductivité hydraulique et d) aux variations de recharge; sensibilité des débits aux résurgences e) aux variations de conductivité hydraulique et f) aux variations de recharge.	44
Figure 5.9	Charges moyennes simulées et recharge annuelle de 1900 à 2010.	45
Figure 5.10	Débits aux résurgences moyens annuels simulés et recharges annuelles de 1900 à 2010.	46
Figure 5.11	Débits de base moyens annuels simulés dans le ruisseau Allen, dans la rivière aux Outardes et dans le ruisseau Schulman, et recharge annuelle de 1900 à 2010.	46
Figure 5.12	Recharge moyenne de l'aquifère. L'astérisque indique que la moyenne de l'ensemble des modèles en période future est significativement différente de	

	la moyenne de l'ensemble des modèles en période de référence selon le test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés ($\alpha=0,05$).	48
Figure 5.13	Niveaux piézométriques moyens mensuels. Les astérisques indiquent les modèles en période future qui présentent une différence significative par rapport à la période de référence selon le test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés ($\alpha=0,05$).....	48
Figure 5.14	Débits totaux des résurgences. Les astérisques indiquent les modèles en période future qui présentent une différence significative par rapport à la période de référence selon le test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés ($\alpha=0,05$).....	49
Figure 5.15	Débits de base a) au ruisseau Allen; b) à la rivière aux Outardes et c) au ruisseau Schulman. Les astérisques indiquent les modèles en période future qui présentent une différence significative par rapport à la période de référence selon le test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés ($\alpha=0,05$).....	51
Figure 5.16	Débit moyen lorsque les résurgences situées à a) 144 m; b) 150 m; c) 162 m; d) 177 m d'altitude sont actives pour les périodes de référence (observée et simulée) et future. Pour toutes les résurgences, les différences observées sont significatives ($\alpha=0.05$) selon un test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés.....	54
Figure 5.17	Nombre de jours d'activité des résurgences situées à a) 144 m; b) 150 m; c) 162 m; d) 177 m d'altitude pour les périodes de référence (observée et simulée) et future.	55
Figure 5.18	Durée moyenne des périodes d'activité des résurgences situées à a) 144 m; b) 150 m; c) 162 m; d) 177 m d'altitude pour les périodes de référence (observée et simulée) et future. Les lignes horizontales représentent les moyennes de l'ensemble des scénarios pour la période de référence et pour la période future.....	56
Figure 5.19	Répartition saisonnière des périodes d'activité des résurgences situées à a) 144 m; b) 150 m; c) 162 m; d) 177 m d'altitude pour les périodes de référence et future simulées. Les saisons sont identifiées par la première lettre des mois les composant, p. ex. DJF : décembre, janvier et février pour l'hiver, et ainsi de suite.....	57
Figure 5.20	Abondance moyenne de salamandres sombre des montagnes adultes à une résurgence de 4 m ² pour la période de référence et la période future, en fonction des cycles d'activité hydrologique simulés à 144, 150, 162 et 177 m d'altitude. Les valeurs correspondent aux moyennes pour l'ensemble des scénarios climatiques sélectionnés et pour toute la période. Les astérisques correspondent aux augmentations significatives ($\alpha=0,05$) d'abondance future par rapport à la période de référence selon un test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés.	62

- Figure 5.21 Probabilité d'extinction à une résurgence de 4 m² pour la période de référence et la période future, en fonction des cycles d'activité hydrologique simulés à 144, 150, 162 et 177 m d'altitude. Les valeurs correspondent aux moyennes pour l'ensemble des scénarios climatiques sélectionnés. Les astérisques correspondent aux diminutions significatives ($\alpha=0,05$) de la probabilité d'extinction future par rapport à la période de référence selon un test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés.....62
- Figure 5.22 a) Durée moyenne du développement d'un individu (cycle de vie complet de l'œuf à la maturité sexuelle) pour les deux périodes analysées; b) durée de la saison de reproduction attendue selon la température ambiante pour chacune des périodes. Les valeurs présentées correspondent aux moyennes pour l'ensemble des scénarios climatiques sélectionnés. Les astérisques indiquent que les différences observées sont significatives ($\alpha=0,05$) dans les deux cas selon un test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés.....64
- Figure 5.23 a) Proportion moyenne de la saison de reproduction où la résurgence est active pour chacune des altitudes simulées (reproduction effective, voir texte); b) nombre d'années pour lesquelles la reproduction est impossible en raison de l'inactivité des résurgences. Les valeurs présentées correspondent aux moyennes pour l'ensemble des scénarios climatiques sélectionnés. Les astérisques indiquent que les différences observées sont significatives ($\alpha=0,05$) dans les deux cas pour les résurgences situées à 162 et 177 m d'altitude selon un test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés.64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 Simulations climatiques utilisées dans le cadre de l'étude (cf. Mearns <i>et al.</i> , 2012 pour les détails associés aux acronymes).....	14
Tableau 4.2 Indices climatiques analysés dans le cadre de l'étude	15
Tableau 4.3 Caractéristiques et paramètres du modèle HGS.....	25
Tableau 5.1 Synthèse des analyses statistiques sur les variables et indices climatiques évalués.....	36
Tableau 5.2 Synthèse des résultats des analyses statistiques sur les résultats de MODFLOW.....	52
Tableau 5.3 Résultats de la modélisation hydrogéologique avec HGS pour les résurgences simulées au mont Covey Hill (moyennes interannuelles sur 30 ans de l'ensemble des scénarios climatiques)	58

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1 Étude paléoécologique de la tourbière de la réserve écologique du Pin-Rigide (Lavoie et Pellerin, 2011)
- Annexe 2 Analyses statistiques sur les indices climatiques
- Annexe 3 Synthèse de la littérature sur la prise en compte des changements climatiques dans les stratégies de conservation de la biodiversité

1. INTRODUCTION

Les écosystèmes sont naturellement adaptés pour faire face aux aléas du climat, mais cette capacité est menacée par la rapidité des changements climatiques actuels (Rio, 2012; Hamburg *et al.*, 2013). Très peu d'études se sont penchées sur l'impact des changements climatiques sur les écosystèmes locaux. C'est toutefois à cette échelle que les stratégies d'adaptation sont mises en œuvre et que les perturbations anthropiques peuvent amplifier les effets des changements climatiques (Studds et Marra, 2007; Locatelli *et al.*, 2011). Les études locales sont particulièrement cruciales dans les environnements vulnérables situés près de la source des cours d'eau (zones amont ou *headwater basins*) qui jouent un rôle hydrologique et écosystémique majeur (atténuation des crues, recharge des aquifères, maintien des habitats de nombreuses espèces) (Meyer *et al.*, 2007; Finn *et al.*, 2011). Les écosystèmes des zones amont sont essentiels pour maintenir la structure, les fonctions, la productivité et la complexité biologique des écosystèmes situés en aval (Haigh *et al.*, 1998; Lowe et Likens, 2005; Benstead et Leigh, 2012).

Le climat joue un rôle fondamental dans la répartition des espèces, ainsi que dans la croissance et le développement des organismes. Les changements climatiques observés et anticipés sont considérés comme une grave menace à la biodiversité (Omann *et al.*, 2009; Bellard *et al.*, 2012; Pettorelli, 2012). Déjà connues comme étant en situation précaire, les espèces vulnérables ou menacées sont d'autant plus sensibles à des modifications de leur habitat. L'exemple de la salamandre sombre des montagnes (*Desmognathus ochrophaeus*) à Covey Hill est typique de cette problématique. L'habitat de cette salamandre est intimement lié aux résurgences d'eau souterraine dont la dynamique hydrologique est contrôlée indirectement par le climat, par l'entremise de la recharge en eau souterraine. Toutefois, le contrôle qu'exercent les variables hydrologiques sur le maintien de cette population de salamandres est à peu près inconnu. Dans ce cas, comme dans de nombreux cas similaires où les habitats d'espèces vulnérables ou menacées sont intimement liés à l'hydrologie locale, il importe 1) de comprendre la dynamique hydrologique des habitats, 2) de définir comment l'hydrologie locale influence la dynamique de la population et 3) de quantifier l'impact des changements climatiques sur la dynamique hydrologique des habitats et sur les espèces. Ces connaissances sont nécessaires pour définir des stratégies d'adaptation aux changements climatiques qui permettront de maintenir ou d'améliorer les chances de survie des espèces visées.

La modélisation permet d'aborder tous les aspects de cette problématique: les modèles d'écoulement permettent de reproduire les processus hydrologiques, tandis que les modèles écologiques simulent les processus inhérents à la dynamique des populations étudiées. Les modèles climatiques génèrent des séries temporelles météorologiques futures plausibles selon divers scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Ces chroniques temporelles peuvent être utilisées, directement ou indirectement, dans des modèles simulant l'impact des changements climatiques sur diverses ressources, notamment les ressources en eau. Les réserves en eau de surface ont d'ailleurs fait l'objet de plusieurs études d'impact en lien avec les changements climatiques (Green *et al.*, 2011). En revanche, les ressources en eaux souterraines ont jusqu'ici reçu relativement peu d'attention (Green *et al.*, 2011; Holman *et al.*, 2012). Les eaux souterraines sont liées indirectement aux variables météorologiques par l'intermédiaire des processus de surface que sont l'évapotranspiration, le ruissellement et l'infiltration, lesquels donnent lieu à la recharge des aquifères. Il est donc clair que les eaux souterraines subiront l'impact des changements climatiques, mais la nature et l'importance de cet impact demeurent mal comprises. Il en découle que la dynamique hydrique des habitats de salamandres, directement alimentés par les eaux souterraine, est très incertaine dans un contexte de climat changeant.

2. CONTEXTE / OBJECTIFS

Ce projet utilise le Laboratoire naturel du mont Covey Hill (Larocque *et al.*, 2006) comme site expérimental dans l'étude de l'impact des changements climatiques sur les écosystèmes locaux. Le Laboratoire naturel du mont Covey Hill est une initiative de Conservation de la nature du Canada (CNC). Il a pour mission de favoriser la recherche multidisciplinaire sur les composantes de l'écosystème du mont Covey Hill afin de mieux comprendre son fonctionnement, de connaître les impacts des pressions humaines et naturelles sur l'hydrologie, sur les habitats et sur les populations végétales et animales, et de favoriser la conservation du milieu.

Le Laboratoire couvre un territoire d'environ 150 km² instrumenté pour le suivi des variables hydrologiques (Fournier, 2008; Gagné, 2010) et des populations de salamandres (Larocque et Pellerin, 2006; Lapointe et Lefebvre, 2008). La colline est une importante zone de recharge pour l'aquifère régional de la rivière Châteauguay (Croteau *et al.*, 2010). Elle abrite la salamandre sombre des montagnes (*Desmognathus ochrophaeus*) ainsi que la salamandre pourpre (*Gyrinophilus porphyriticus*) (Frenette, 2008). Les salamandres étant dépendantes de l'eau à différents stades de leur croissance (Green, 1997, 2003), elles peuvent servir d'espèces indicatrices de changements hydrologiques (Davic et Welsh, 2004). Le Laboratoire naturel comprend également la tourbière du mont Covey Hill et se trouve à proximité de la tourbière de la réserve écologique du Pin-Rigide, des tourbières parmi les plus anciennes de la province (Pellerin *et al.*, 2007). L'étude de ces tourbières offre l'opportunité de réaliser des reconstitutions paléoécologiques et paléoclimatiques sur une très grande plage temporelle, à l'échelle régionale. Le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP) est particulièrement intéressé à mieux comprendre l'histoire paléoécologique de la tourbière du Pin-Rigide, dans le but de mieux cibler les actions de conservation notamment pour la gestion du pin rigide (*Pinus rigida* Mill.), une espèce dont la dynamique est dépendante des feux. La tourbière du mont Covey Hill, située non loin du sommet du mont Covey Hill à la tête du ruisseau Allen et de la rivière aux Outardes, est en partie protégée par CNC.

L'objectif général du projet est d'utiliser la modélisation hydrogéologique et écologique pour recommander des stratégies de conservation visant à promouvoir la résilience du milieu naturel du mont Covey Hill en présence de changements climatiques. Les objectifs spécifiques du projet sont les suivants :

1. Développer un modèle d'écoulements souterrains reflétant la variabilité du climat récent et des conditions paléoclimatiques pour quantifier les conditions hydriques des habitats de salamandres;
2. Simuler la dynamique récente des populations de salamandres;
3. Quantifier les conditions hydriques et l'évolution des populations de salamandres en réponse aux changements climatiques;
4. Recommander des mesures de protection du territoire visant à atténuer les impacts des changements climatiques sur l'hydrologie et les populations de salamandres du mont Covey Hill.

Ce projet vise à mieux comprendre les processus d'écoulement des eaux souterraines sur le mont Covey Hill et leur vulnérabilité aux variations du climat. Il vise également à quantifier la dynamique des populations de salamandres et leur sensibilité aux variations de leur habitat en lien avec l'écoulement souterrain. La conservation du territoire pourrait être un outil important pour atténuer l'impact des changements climatiques sur les écosystèmes de ces régions (Matocha *et al.*, 2012). Toutefois, pour mettre en oeuvre de manière efficace des mesures d'atténuation, il est nécessaire de définir s'il existe des secteurs plus utiles à la conservation dans un contexte de changements climatiques rapides. Le projet permet de formuler des recommandations pour la conservation du territoire du mont Covey Hill spécifiquement, mais celles-ci pourront également s'appliquer à des contextes géologiques et climatiques similaires.

3. CADRE THÉORIQUE / COMPTE-RENDU DE LA REVUE DE LA LITTÉRATURE

3.1. Eaux souterraines et changements climatiques

Les changements climatiques pourraient affecter spatialement et temporellement la quantité et la qualité de plusieurs composantes cruciales du cycle hydrologique (Loaiciga *et al.*, 1996; Sherif et Singh, 1999; Milly *et al.*, 2005; Holman, 2006; Green *et al.*, 2011) telles que les précipitations, l'évapotranspiration, le couvert de neige et la fonte des glaces, la température et la teneur en eau du sol, le ruissellement de surface et les débits en rivière (Bates *et al.*, 2008). Ces changements aux conditions hydrologiques pourraient entraîner à leur tour de multiples effets sur les eaux souterraines (Dettinger et Earman, 2007) : modification des taux de recharge et de décharge des aquifères (Vaccaro, 1992; Brouyère *et al.*, 2004; Green *et al.*, 2007; Kundzewicz *et al.*, 2008; Aguilera et Murillo, 2009), changements au niveau de l'écoulement et du stockage de l'eau (Green *et al.*, 2011), altération de la qualité de l'eau (Alley, 2001; Dragoni et Sukhija, 2008) et modification des interactions avec les eaux de surface (van Dijk *et al.*, 2007; Goderniaux *et al.*, 2009). Ces changements pourraient engendrer des conséquences importantes sur l'usage des eaux souterraines et sur les écosystèmes qui dépendent de celles-ci (Bates *et al.*, 2008; Green *et al.*, 2011).

Les impacts des changements climatiques sur les ressources en eaux souterraines sont nettement moins étudiés que les impacts des changements climatiques sur les eaux superficielles (Green *et al.*, 2011). Ceci s'explique par un ensemble de facteurs. D'abord, les eaux souterraines sont peu visibles, souvent inaccessibles, et presque toujours moins connues et moins précisément cartographiées que les eaux de surface. De plus, les liens entre les eaux souterraines et le climat se font de manière indirecte via la recharge des aquifères, un processus encore mal défini. En outre, les temps de séjour des eaux souterraines peuvent varier de quelques jours à quelques dizaines de milliers d'années, ce qui induit une dispersion importante du signal climatique et limite l'observation de liens de causalité. Les eaux souterraines jouent pourtant un rôle primordial tant pour les écosystèmes que pour les activités anthropiques (Green, 2012). Elles soutiennent un large éventail de milieux humides et permettent l'alimentation en eau de 20 % de la population de l'ensemble du Québec et de 90 % de la population en région rurale (Rousseau *et al.*, 2004). Bien que l'étude de l'impact des changements climatiques sur les eaux souterraines représente un défi scientifique considérable, elle n'en demeure pas moins fondamentale à la gestion future de la ressource en eau et au maintien des écosystèmes qui en dépendent.

Les études qui se sont penchées sur l'impact des changements climatiques sur les eaux souterraines (Jyrkama et Sykes, 2007; Scibek *et al.*, 2008; Goderniaux *et al.*, 2009) démontrent des tendances variables, dépendant largement du contexte topo-géo-climatique. Certaines études prévoient une diminution de la recharge. Par exemple, Eckhardt et Ulbrich (2003) montrent que dans le contexte d'un changement de régime des précipitations, la recharge mensuelle moyenne pourrait diminuer de plus de 50 % en Europe centrale. D'autres études projettent plutôt une augmentation de la recharge (Jyrkama et Sykes, 2007; Döll, 2009; Gurdak et Roe, 2010; Green *et al.*, 2011). À titre d'exemple, Jyrkama et Sykes (2007) montrent que les changements climatiques pourraient entraîner une augmentation du taux de recharge résultant de la fonte printanière précoce dans un bassin versant de l'Ontario. Ces résultats, variables en fonction de la région étudiée, soulignent que la recharge des aquifères

demeure un phénomène très complexe dont les paramètres varient fortement selon le contexte géologique local et selon l'utilisation du sol (Green *et al.*, 2011).

La modélisation hydrogéologique s'avère fort utile pour évaluer l'impact des changements climatiques sur les eaux souterraines. Couplés à des modèles de circulations atmosphérique et océanique dont la paramétrisation et la résolution sont constamment améliorées, les modèles hydrogéologiques permettent de rendre compte de la dynamique des eaux souterraines dans différents contextes climatiques simulés. Le calage d'un modèle hydrogéologique est généralement réalisé sur les conditions passées récentes. Quand les données disponibles ne couvrent pas une longue période et ne permettent pas de représenter une large gamme de conditions hydrologiques, le modèle calé peut ne pas être représentatif du milieu étudié puisqu'une succession de plusieurs années très sèches ou très humides peut se traduire par de fausses tendances dans la recharge et dans les niveaux de nappe simulés (Rivard *et al.*, 2009). Une façon d'améliorer le calage et la robustesse d'un modèle d'écoulements souterrains est d'élargir l'ensemble des conditions hydrologiques connues au moyen de données indirectes. Dans ce contexte, les reconstitutions paléocéologiques et paléohydrologiques du milieu apportent une contribution significative, puisqu'elles permettent de comprendre l'évolution de la végétation et des conditions hydrologiques en lien avec le climat passé. Dans le sud du Québec, un nombre limité de travaux ont cherché à reconstituer les conditions paléoclimatiques (Lavoie et Richard, 2000; Muller *et al.*, 2003). Les données disponibles sont encore très incomplètes, à la fois dans l'espace et dans le temps.

3.2. Écosystèmes locaux et changements climatiques

En modifiant les niches écologiques de certaines espèces, les changements climatiques ont de multiples impacts sur les écosystèmes locaux. Parmi ceux-ci, la littérature scientifique rapporte notamment l'altération de la composition des espèces et des relations entre celles-ci, la perte de biodiversité, l'extinction des espèces les plus sensibles et la création de nouveaux écosystèmes (Hobbs *et al.*, 2006; Williams *et al.*, 2007; Schweiger *et al.*, 2008; Settele *et al.*, 2008; Essl *et al.*, 2012).

Longtemps considérés comme biologiquement pauvres (Finn *et al.*, 2011), les ruisseaux de tête situés en amont des bassins versants, de même que les écosystèmes qu'ils soutiennent, ont souvent été négligés par rapport aux cours d'eau situés en aval (Lowe et Likens, 2005; Meyer *et al.*, 2007). Or, ils constituent des habitats parfois uniques pour un grand nombre d'espèces tant microbiennes, végétales, qu'animales (Lowe et Likens, 2005; Meyer *et al.*, 2007), dont plusieurs invertébrés et amphibiens. Les cours supérieurs des ruisseaux assurent aussi plusieurs fonctions essentielles aux écosystèmes situés en aval : maintien des régimes naturels d'écoulement, régulation du transport des sédiments, rétention des nutriments et traitement de la matière organique (Gomi *et al.*, 2002; Lowe et Likens, 2005; MacDonald et Coe, 2007; Meyer *et al.*, 2007). Ils contribuent ainsi de manière importante au maintien de la biodiversité sur l'entièreté du réseau hydrologique ainsi qu'à l'intégrité physique du réseau (Wipfli *et al.*, 2007). Malgré toutes ces fonctions cruciales, très peu d'études ont été consacrées à ce type d'écosystème. En effet, malgré leur abondance, les cours supérieurs des ruisseaux sont fréquemment ignorés, ne sont pas cartographiés, ni nommés, documentés ou protégés (Lowe et Likens, 2005; Meyer *et al.*, 2007).

Par ailleurs, de par leur petite taille, les cours supérieurs des ruisseaux sont sensibles aux variations des conditions locales (Meyer *et al.*, 2007) et vulnérables aux perturbations terrestres et atmosphériques (Lowe et Likens, 2005). Par exemple, il est reconnu que ces petits cours d'eau sont plus susceptibles de subir les impacts d'étiages plus sévères que les systèmes fluviaux plus importants (Winter, 2007). Dans les parties amont des bassins, souvent associées à des aquifères rocheux, les eaux souterraines sont davantage vulnérables aux variations climatiques en raison des pentes fortes et du sol mince couvrant les formations géologiques de faible perméabilité qui favorisent le ruissellement au détriment de l'infiltration (Kosugi *et al.*, 2006). Toutefois, l'ampleur des changements hydrologiques qu'un système en tête de bassin versant peut supporter avant d'en subir les impacts négatifs, c.-à-d. sa résilience, est encore mal comprise. Ce manque de connaissances limite le développement et l'application de stratégies d'adaptation aux changements (p. ex. protection des milieux humides, réduction des ponctions d'eau souterraine, restriction du développement urbain et de la déforestation) dans ces systèmes.

3.3. Présence de salamandres au Québec et perspectives en contexte de changements climatiques

Malgré une relation généralement positive entre la température et la richesse en espèces (Mayhew *et al.*, 2012), il existe un consensus scientifique indiquant que les perturbations climatiques actuelles et futures entraîneront une perte importante de la biodiversité indigène d'une région (Heller et Zavaleta, 2009). Au sein du règne animal, les amphibiens sont considérés parmi les groupes taxonomiques les plus vulnérables (Wake et Vredenburg, 2008). En effet, plusieurs de ces espèces souffrent actuellement de déclin démographique substantiels, et ce, à travers le monde (Pounds *et al.*, 1997; Green, 2003; D'Amen et Bombi, 2009). Si plusieurs facteurs peuvent être mis en cause, les perturbations occasionnées par les changements climatiques ne peuvent être ignorées.

Les amphibiens sont hétérothermes, ce qui signifie que leur température corporelle, leurs caractères physiologiques et leurs processus métaboliques sont régulés en partie par la température ambiante, les rendant particulièrement sensibles aux changements climatiques. Par ailleurs, d'éventuelles modifications aux régimes de précipitations sont également appelées à modifier l'habitat de ces espèces. Généralement dépendants à différents degrés du taux d'humidité dans le sol, les amphibiens deviennent en effet extrêmement vulnérables à toutes modifications à la dynamique des eaux souterraines, des eaux de ruissellement ou à l'activité des sources résurgentes (Alvo et Bonin, 2003).

Au Québec, la salamandre sombre des montagnes est l'espèce de salamandres de ruisseaux la plus rare (Frenette, 2007). L'espèce est désignée comme menacée au Québec et en voie de disparition au Canada. Sa distribution canadienne connue se limite aujourd'hui aux gorges du Niagara dans le sud de l'Ontario (population carolinienne) et au mont Covey Hill en Montérégie (population des Grands Lacs et du Saint-Laurent) (Gouvernement du Canada, 2012). Dans ces deux régions, on trouve la salamandre sombre des montagnes essentiellement dans les petits ruisseaux intermittents et les sources alimentées par l'aquifère (Sharbel et Bonin, 1992). Ces habitats aquatiques ou semi-aquatiques sont particulièrement importants pour la survie des œufs et des larves, ainsi que pour la reproduction (Petranka, 1998). L'altération de ces habitats représente donc une menace directe à la résilience de l'espèce. Dans cette perspective, les impacts que pourraient avoir les changements

climatiques sur la population de Covey Hill, déjà vulnérable en raison de sa petite taille, inquiètent tout autant qu'ils sont méconnus.

3.4. Stratégies de conservation des écosystèmes menacés en contexte de changements climatiques

Les changements climatiques représentent un immense défi pour la conservation des écosystèmes et des populations qui y vivent. Une grande part d'incertitude subsiste quant aux effets précis des changements climatiques sur les écosystèmes, rendant très complexe la gestion et la conservation future de ceux-ci (Scott et Lemieux, 2005; Kostyack et Rohlf, 2008; Heller et Zavaleta, 2009; Game *et al.*, 2010; Wiens et Bachelet, 2010). Certains diront même que planifier à long terme dans un contexte de climat en pleine transformation se compare à tenter de protéger une cible en mouvement (Scott et Lemieux, 2005).

Or, il est aujourd'hui primordial d'intégrer les changements climatiques dans la gestion des aires protégées et le développement de nouvelles stratégies de conservation. Compte tenu de la gravité et du caractère irréversible des conséquences potentielles d'un climat changeant sur l'évolution des écosystèmes, différents auteurs s'entendent pour affirmer que l'inaction ne constitue pas une option envisageable (Hannah *et al.*, 2007; Kostyack et Rohlf, 2008; Heller et Zavaleta, 2009; Wiens et Bachelet, 2010). L'adoption du principe de précaution s'impose ainsi comme le minimum à adopter. C'est pourquoi une attention accrue est actuellement portée à l'intégration des changements climatiques dans la planification des efforts de conservation, que ce soit en ajustant les politiques et plans de conservation existants (Ruhl, 2007; Game *et al.*, 2010) ou en développant de nouvelles stratégies adaptées (McLachlan *et al.*, 2007). En effet, alors que les limites géographiques des aires protégées sont révisées et leur gestion repensée, les moyens d'augmenter la connectivité entre les aires protégées sont de plus en plus envisagés afin d'accroître la mobilité des espèces (Heller et Zavaleta, 2009).

Dans le cas du mont Covey Hill, un plan de conservation des salamandres de ruisseaux a été élaboré conjointement par CNC et l'Équipe de rétablissement des salamandres de ruisseaux en 2008 (Frenette, 2008). Ce plan vise à assurer la protection des habitats actuels et potentiels, en termes de quantité et de qualité, de quatre espèces de salamandres dont la salamandre sombre des montagnes. Il a également comme objectif de limiter l'impact des facteurs de perturbation hydrique de type anthropique (captage d'eau souterraine, déboisement, drainage, contamination, nouveaux développements, etc.) par une série de mesures, dont l'établissement de zones de conservation prioritaires (ZCP), la protection des habitats *in situ* par des zones de protection circulaires et riveraines ainsi qu'une bande de protection autour de la tourbière sommitale. Le Plan de conservation des salamandres de ruisseaux du mont Covey Hill ne tient cependant pas compte de l'impact des changements climatiques, bien qu'ils soient susceptibles d'affecter de manière importante, de façon néfaste ou bénéfique, les conditions de l'habitat de la salamandre sombre des montagnes.

Le mont Covey Hill est également ciblé par le Plan de conservation de la vallée du Saint-Laurent et du lac Champlain (Gratton, 2010). S'appuyant sur un exercice de planification écorégionale initié par CNC, ce plan détermine des cibles de conservation critiques à la biodiversité de la région, d'abord en catégorisant les milieux forestiers et humides selon une série d'attributs (taille, caractère irremplaçable, diversité biologique, présence d'espèces menacées ou vulnérables, niveau de fragmentation, fonctions écologiques, etc.), puis en

intégrant les écosystèmes reconnus comme rares, menacés et/ou vulnérables. Malgré le fait que la salamandre sombre des montagnes, de par son statut d'espèce menacée, constitue une des cibles prioritaires du plan de conservation, aucune mesure pour sa conservation n'est précisée dans le plan. Les impacts liés aux changements climatiques n'y sont par ailleurs pas considérés de façon explicite.

L'incertitude associée aux impacts potentiels des changements climatiques sur les écosystèmes complexifie grandement leur protection. La capacité à adapter adéquatement et rapidement les façons de faire aux changements climatiques déterminera le succès des stratégies de conservation futures.

4. MÉTHODOLOGIE ET DONNÉES

4.1. Le Laboratoire naturel du mont Covey Hill

4.1.1. Présentation du site

Le mont Covey Hill, dans le Laboratoire naturel du mont Covey Hill (Larocque *et al.*, 2006), est adjacent à la frontière canado-américaine dans le bassin transfrontalier de la rivière Châteauguay (Figure 4.1). Le mont Covey Hill représente l'extension la plus nordique de la chaîne de montagnes des Adirondacks. Son plus haut point culmine à 340 m au-dessus du niveau de la mer. La géologie du secteur correspond aux roches du Cambrien provenant de la séquence sédimentaire des Basses-Terres du Saint-Laurent. Le mont Covey Hill est constitué de grès appartenant au groupe de Potsdam (formation Covey Hill), déformé et fracturé lors de l'orogénèse des Appalaches (Globensky, 1986). L'eau souterraine circule dans cet aquifère de grès fracturé qui est par ailleurs pompé par quelques entreprises de transformation alimentaire, des pomiculteurs ainsi que les résidents des environs pour leur usage domestique.

L'absence de dépôts de surface sur de larges étendues près du sommet de la colline témoigne de l'ampleur de l'érosion durant la dernière avancée glaciaire il y a 12 Ma. D'autres endroits sur la colline sont recouverts d'une mince couche de till sableux de Saint-Jacques (Lasalle, 1981). Des sédiments glacio-lacustres se trouvent localement sous 220 m d'altitude (Parent et Occhietti, 1988) et des sédiments littoraux provenant de l'érosion du substrat rocheux par la mer de Champlain ainsi que du till sont abondants à la base du mont (Tremblay *et al.*, 2010). Ces sédiments, composés de sables et de graviers très perméables, sont en grande partie situés au pied de la face nord de la colline.

L'aquifère de grès est généralement en condition de nappe libre sur une grande partie de la région d'étude. Le till, les limons et les argiles dans la plaine au nord sont moins perméables que les dépôts sableux au pied du mont. L'écoulement de l'eau souterraine s'effectue le long de fractures ouvertes et de plans de litage ayant subi de la dissolution (Nastev *et al.*, 2008). Le mont Covey Hill est considéré comme une aire de recharge importante pour l'aquifère régional du bassin versant de la rivière Châteauguay, qui s'étend sur plus de 2500 km² (Croteau *et al.*, 2010). Lors du retrait des glaces, le déversement du paléo-lac Iroquois par le col de Covey y aurait érodé les dépôts meubles sur une large étendue, laissant le roc affleurant sur de grandes surfaces connues localement sous le nom de Flat Rocks (Franzi *et al.*, 2002). Les lacs Blueberry et du Gouffre, qui forment des réservoirs profonds stockant d'importants volumes d'eau le long du ruisseau Allen, sont des vestiges de cet événement catastrophique (Barrington *et al.*, 1992).

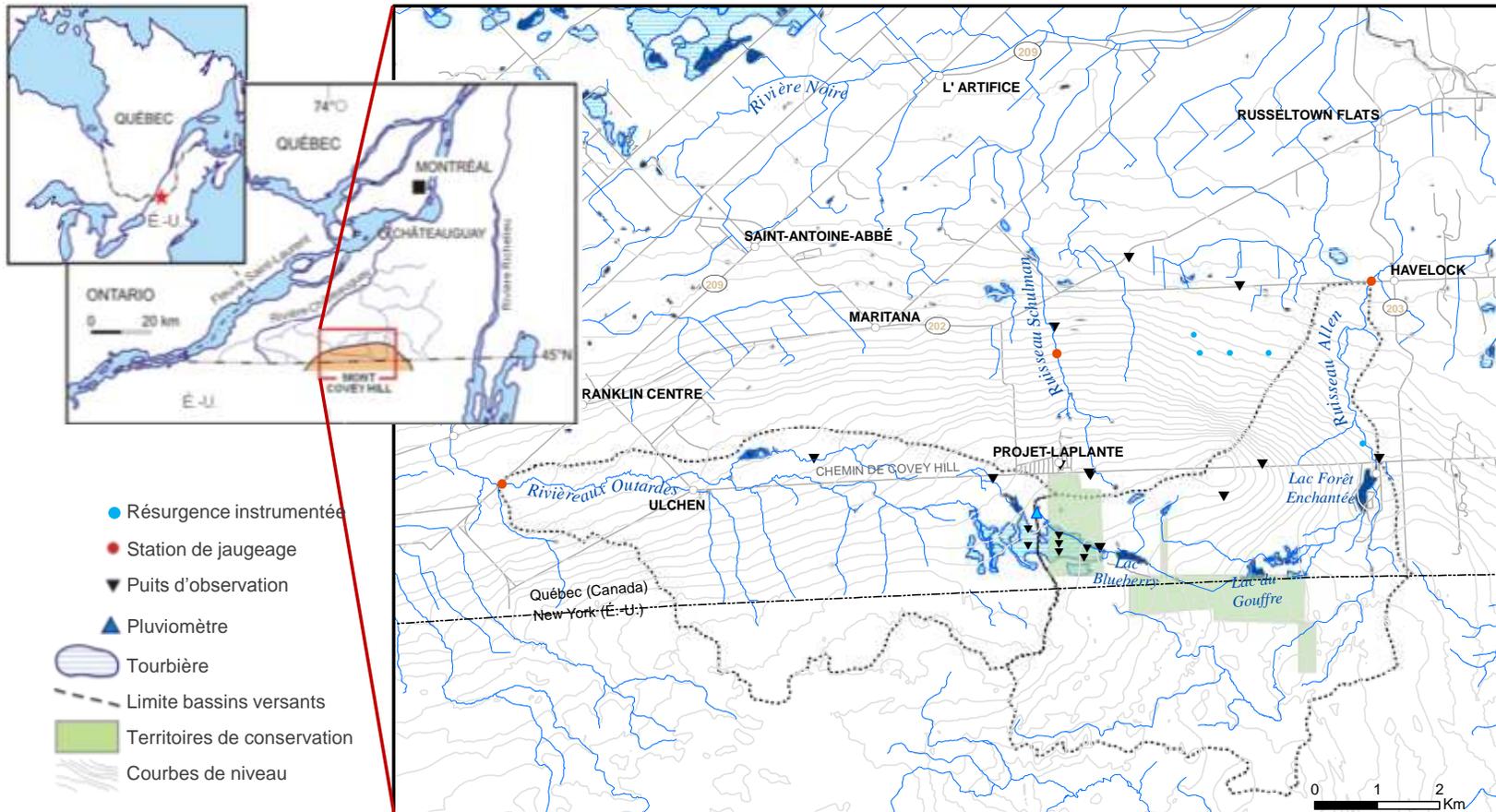


Figure 4.1 Localisation du Laboratoire naturel de Covey Hill.

Près du sommet de la colline se trouve une des plus vieilles tourbières connues à ce jour au Québec. La datation au ^{14}C de la tourbe à la base de la tourbière a suggéré que la matière organique aurait commencé à s'accumuler il y a environ 13 900 ans, soit peu de temps après le déversement du paléo-lac Iroquois (Pellerin *et al.*, 2007). La tourbière s'étend sur environ 0,51 km². L'épaisseur moyenne de la matière organique est de 1,4 m, mais elle peut atteindre 3,6 m à certains endroits (Rosa *et al.*, 2009). À l'ouest, la tourbière alimente la rivière aux Outardes (bassin versant de 26 km²) alors qu'à l'est, elle se décharge dans le ruisseau Allen (bassin versant de 29 km²). Au moyen d'un bilan hydrique de la tourbière, Fournier (2008) a démontré que la tourbière est alimentée par l'aquifère toute l'année. Une analyse de la végétation a également permis d'identifier une zone de transition minérotrophe (lagg) entre la forêt située sur le roc et le secteur ombrotrophe au centre de la tourbière (Pellerin *et al.*, 2009). Selon la carte piézométrique du mont Covey Hill, la zone d'alimentation en eau souterraine de la tourbière est estimée à 1,7 km² (Gagné, 2010).

4.1.2. Données *in situ* disponibles au Laboratoire naturel

Le suivi continu sur un site expérimental comme celui du Laboratoire naturel du mont Covey Hill est un outil de choix pour étudier à long terme une problématique ayant des objectifs multiples. Au cours de la dernière décennie, différents instruments de mesure ont été mis en place de manière permanente sur la colline afin de suivre certaines variables hydrologiques *in situ*. Trois stations de suivi des niveaux dans les cours d'eau (ruisseau Allen et rivière aux Outardes, ainsi que le ruisseau Schulman qui coule sur le côté nord de la colline, cf. figure 4.1) fournissent des données qui ont été utilisées dans ce projet. Onze stations de suivi des températures de l'eau sont également distribuées sur la colline, dont trois dans les principaux cours d'eau et cinq dans des résurgences. Ces données permettent, entre autres, d'identifier les périodes d'activités des résurgences. Neuf forages de particuliers sont instrumentés pour le suivi des températures et des niveaux de nappe souterraine, six piézomètres sont installés dans la tourbière (0,5 m de profondeur) et deux forages d'observation au roc ont été réalisés à proximité de la tourbière. Le Laboratoire naturel bénéficie également de la présence de trois forages du Réseau de suivi des eaux souterraines instrumentés pour le suivi automatisé du niveau de la nappe par le MDDEFP. L'ensemble de ces stations enregistre des données à un intervalle de temps horaire. Les chroniques de données météorologiques (température, précipitations) proviennent de la station d'Environnement Canada à proximité du site (Hemmingford Four Winds, ID 7023075).

Le présent projet a débuté avec le recensement complet des données hydrogéologiques, hydrologiques et météorologiques existantes pour le site d'étude. Bon nombre de ces variables sont mesurées *in situ* et font partie du suivi écologique et hydrométrique à long terme réalisé dans le cadre des activités de recherche du Laboratoire naturel du mont Covey Hill (Larocque *et al.*, 2006). Une base de données Access a été développée pour faciliter le stockage et l'accès à l'ensemble des données disponibles pour références futures. Elle peut être consultée en contactant les auteurs de ce rapport. Les données pertinentes au projet (précipitations nettes et niveaux de nappe) sont présentées dans la section résultats.

4.2. Scénarios climatiques

4.2.1. Analyses préliminaires avec deltas saisonniers

Des analyses climatiques préliminaires ont été effectuées à l'aide d'une série de scénarios climatiques issus de modèles de circulation générale (MCG) pour la région d'étude (accessibles à partir du site internet du *Pacific Climate Impacts Consortium*; PCIC, 2010). Ces modèles ont une résolution grossière de l'ordre de 200 à 400 km. Les simulations disponibles par l'entremise du PCIC sont tirées du projet CMIP3, une vaste initiative de comparaison des sorties des modèles climatiques, dont les résultats ont mené aux données publiées dans le cadre du 4^e rapport d'évaluation du Groupe intergouvernemental sur l'étude du climat (GIEC) en 2007. Les deltas saisonniers de température et de précipitations, qui consistent en des facteurs de mise-à-l'échelle constants pour chaque saison, ont servi à perturber les données climatiques observées pour la période de référence (1971-2000) qui ont ensuite servi au calcul de la recharge.

Seize scénarios ont été sélectionnés à partir des 111 scénarios disponibles pour la région de Covey Hill à l'horizon 2050 (2040-2069). Ces scénarios ont été choisis pour représenter l'ensemble des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et l'éventail de prévisions climatiques possibles pour le site d'étude. L'impact des changements climatiques sur l'eau souterraine a ensuite été étudié par l'entremise de l'impact sur la recharge en eau souterraine en utilisant des valeurs de précipitations nettes ($P_{net} = \text{précipitation} - \text{évapotranspiration}$) calculées à partir des chroniques de températures et de précipitations perturbées par la méthode des deltas (Fowler *et al.*, 2007). Les valeurs d'évapotranspiration (ETP) ont été obtenues à l'aide de la méthode décrite par Oudin *et al.* (2005). La recharge maximale possible est considérée égale à la précipitation nette. La recharge est toutefois plus faible que la précipitation nette puisqu'une certaine quantité d'eau disponible est d'abord dirigée vers le ruissellement de surface et le ruissellement hypodermique.

À la lumière des résultats obtenus suite à cette analyse, présentés par Marie-Audray Ouellet à la conférence de l'Association internationale des hydrogéologues en septembre 2012 (Ouellet *et al.*, 2012), les impacts hydrologiques attendus en climat futur ont été identifiés. Ces résultats ont ensuite servi à définir de façon plus précise les critères de sélection pour des scénarios issus d'un ensemble de modèles régionaux du climat (MRC), dont le Modèle régional du climat canadien (MRCC), fournis par Ouranos et utilisés pour nourrir les modèles hydrogéologique et écologique. Ce sont ces scénarios qui ont été utilisés pour simuler les conditions hydrogéologiques futures et la dynamique possible des populations de salamandres sur le mont Covey Hill.

4.2.2. Analyses des scénarios climatiques fournis par Ouranos

Une liste de critères a été transmise à Ouranos pour la sélection des scénarios de changements climatiques. Ces critères visaient à choisir des conditions climatiques diversifiées à l'échelle saisonnière, avec un intérêt particulier pour les saisons printanières et automnales (saisons clés pour la recharge en eau souterraine).

Suite aux discussions avec Ouranos, une méthode d'analyse multicritères par grappes a été adoptée. Puisque les variables de température et de précipitation représentent les variables les mieux simulées par les modèles, ce sont sur les valeurs saisonnières de ces variables qu'ont été établies les familles (ou grappes) selon l'approche de partitionnement de données des k-moyennes (Legendre et Legendre, 2012). Cette méthode vise à maximiser la couverture des futurs possibles tout en réduisant le nombre de simulations à traiter. Elle détermine un représentant par famille de réponses. De la vingtaine de simulations issues des MRC alors disponibles, 10 simulations ont été choisies (Figure 4.2). Six simulations proviennent du Modèle régional du climat canadien (MRCC; Music et Caya, 2007), alors que les quatre autres ont été générées dans le cadre du projet de comparaison multi-modèles NARCCAP (Tableau 4.1). Ces 10 simulations représentent 85 % de la variabilité climatique projetée pour le site d'étude, tel qu'établi par l'analyse par grappes. Elles ont une résolution de 50 km et le point de grille le plus près du mont Covey Hill a été choisi pour chaque modèle.

Neuf simulations ont été générées à partir du scénario d'émissions de gaz à effet de serre A2, alors qu'une simulation a été générée à partir du scénario A1B. Les scénarios d'émissions sont fondés sur des hypothèses du monde futur qui ont trait à la croissance de la population mondiale, aux développements technologiques, aux sources d'énergie et à la coopération internationale (GIEC, 2001). Les scénarios de la famille A2 représentent un monde dans lequel la population mondiale atteint 15 milliards d'individus en 2100 et où la croissance économique et l'introduction de nouvelles technologies sont très variables selon les régions. Les scénarios de la famille A1 correspondent à un monde où la croissance économique est très rapide, la population mondiale culmine en 2050 à 9 milliards d'habitants, l'introduction de nouvelles technologies écoénergétiques est rapide et le revenu par capita converge entre les régions. Le sous-groupe A1B fait référence à un monde où il existe un équilibre entre les sources d'énergie utilisées (fossiles et non-fossiles).

Ces scénarios intègrent deux formes de mise-à-l'échelle : une mise-à-l'échelle dynamique (utilisation de simulations issues de MRC) et une méthode de mise-à-l'échelle statistique appelée correction de biais (Mpelasoka et Chiew, 2009). La correction de biais a pour but de retirer le biais entre les variables climatiques simulées et observées.

À partir des chroniques de températures et de précipitations associées à chaque scénario climatique, plusieurs indices climatiques ont été calculés (période de référence et période future) afin de dégager les changements moyens projetés pour la fenêtre de 30 ans centrée sur l'horizon 2050, dont plusieurs sont inspirés de Karl *et al.* (1999) et Yagouti *et al.* (2008) (Tableau 4.2). Des analyses statistiques (test de tendance de Mann-Kendall et test de Wilcoxon-Mann-Whitney) ont été effectuées entre les séries de référence et les séries futures afin de déterminer si les projections futures présentaient des différences statistiquement significatives par rapport aux valeurs de la période de référence.

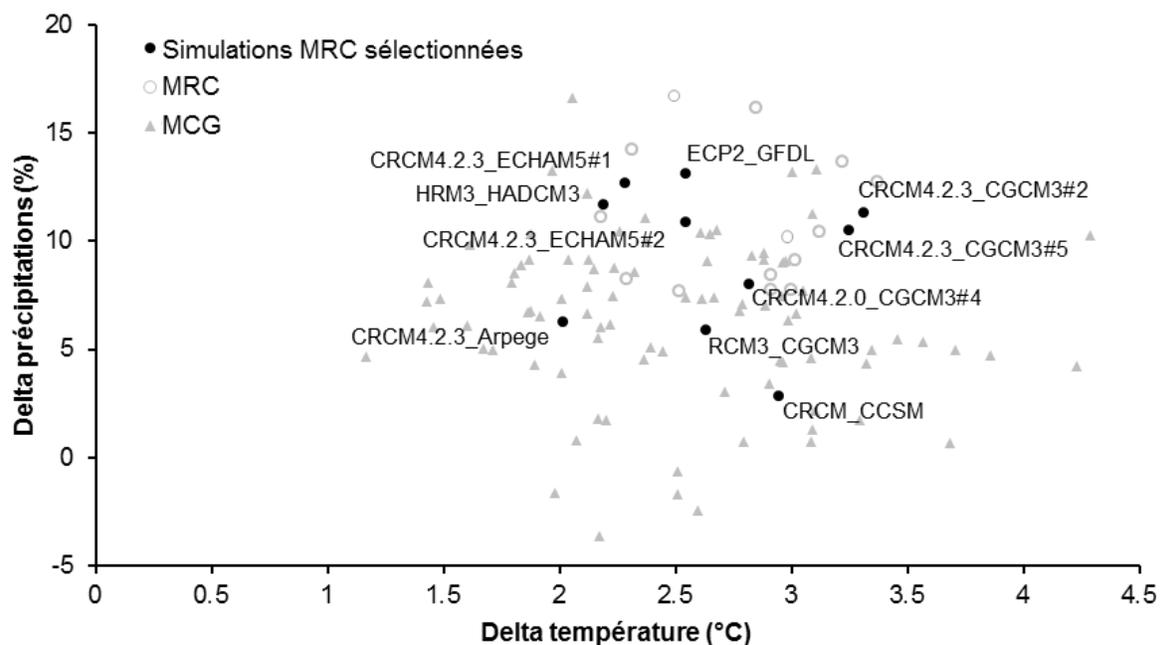


Figure 4.2 Deltas température et précipitations pour l'horizon 2050 pour les simulations de MRC sélectionnées (Levison *et al.*, soumis). Les simulations de MCG (triangles gris) sont présentées à titre indicatif, afin de situer les changements projetés par les modèles régionaux par rapport aux changements projetés par les modèles de circulation générale.

Tableau 4.1 Simulations climatiques utilisées dans le cadre de l'étude (cf. Mearns *et al.*, 2012 pour les détails associés aux acronymes)

MRC	MCG	Membre	Domaine	Scénario d'émissions
CRCM4.2.3	CGCM3	5	AMNO	A2
CRCM4.2.3	CGCM3	2	AMNO	A2
CRCM4.2.3	ECHAM5	1	AMNO	A2
CRCM4.2.3	ECHAM5	2	AMNO	A2
CRCM4.2.3	Arpège UnifS2	--	AMNO	A1B
CRCM4.2.0	CGCM3	4	AMNO	A2
HRM3	HADCM3	--	QC	A2
CRCM	CCSM	--	N. Amer.	A2
ECP2	GFDL	--	N. Amer.	A2
RCM3	CGCM3	--	N. Amer.	A2

Tableau 4.2 Indices climatiques analysés dans le cadre de l'étude

Indice	Définition	Unité
Indices de température		
Tmoy	Température moyenne mensuelle	°C
Jours de gel	Nombre de jours de gel	j
Degrés-jours de gel	Degrés-jours de gel cumulés	°C
Saison de gel	Longueur de la saison de gel	j
Indices de précipitations		
Pmoy	Précipitations moyennes mensuelles	mm
Intensité des précipitations	Précipitations moyennes les jours où P > 1 mm	mm/j
Pmax sur 24h (90 ^e p.)	90 ^e percentile des précipitations maximales annuelles sur 24 h	mm
Pmax sur 5 j. (90 ^e p.)	90 ^e percentile des précipitations maximales annuelles sur 5 jours consécutifs	mm
Jours sans précipitations	Nombre de jours consécutifs où les P < 1 mm	j
Jours avec précipitations	Nombre de jours consécutifs où les P > 1 mm	j

4.2.3. Analyses paléoécologiques et paléoclimatiques

Le Laboratoire naturel comprend la tourbière du mont Covey Hill et se trouve à proximité de la tourbière de la réserve écologique du Pin-Rigide, des tourbières parmi les plus anciennes de la province (Pellerin *et al.*, 2007). L'étude de ces tourbières offre l'opportunité de réaliser des reconstitutions paléoécologiques et paléoclimatiques sur une très grande plage temporelle, à l'échelle régionale. Les analyses paléoécologiques et paléoclimatiques permettent de comprendre l'évolution de la végétation et des conditions hydrologiques en lien avec le climat passé. En ce sens, elles fournissent des données indirectes qui permettent d'élargir la gamme de conditions environnementales connues pour une région, telle que celles du mont Covey Hill. Comme il arrive rarement que les séries temporelles de données disponibles pour le calage des modèles hydrogéologiques dépassent une période de 10 ans, les données paléoclimatiques ont la capacité de mettre en perspective ces données disponibles du passé récent utilisées pour caler les modèles et d'en évaluer la représentativité par rapport à des conditions hydrogéologiques déduites sur une période de temps beaucoup plus longue. Les détails de la méthodologie employée dans le cadre du volet paléoécologique peuvent être consultés dans Lavoie et Pellerin (2011; annexe 1) ainsi que dans Lavoie *et al.* (soumis).

Un des objectifs des analyses paléoécologiques consistait à reconstituer les étapes du développement de la tourbière de Covey Hill. Pour ce faire, des analyses des macrorestes végétaux de même que des datations au ¹⁴C et au ²¹⁰Pb pour la tourbière de Covey Hill et pour celle de la réserve écologique du Pin-Rigide (à 10 km au nord-ouest du mont Covey Hill) ont été effectuées afin d'identifier les conditions paléoclimatiques de la région, notamment sous l'angle hydroclimatique. L'analyse macrofossile est une méthode d'investigation paléobotanique par laquelle sont identifiés et dénombrés les restes végétaux de taille macroscopique (p. ex. feuilles, graines, bois, particules de charbon de bois) conservés dans

les sédiments et obtenus après tamisage de ceux-ci. Ce type d'analyse permet de reconstituer la succession temporelle des conditions trophiques de même que la composition de la flore et la structure du couvert végétal au sein de la tourbière.

Afin de fournir un cadre chronologique aux reconstitutions paléoécologiques, treize échantillons de la tourbière de Covey Hill et sept échantillons de la tourbière de la réserve écologique du Pin-Rigide ont été soumis à la datation radiochronologique par spectrométrie de masse par accélérateur. Pour chacune des tourbières, un modèle de l'âge de la tourbe en fonction de la profondeur a été établi par interpolation linéaire afin de calculer le rythme d'accumulation de la tourbe au cours du temps (cm/an), de même que la durée de temps représentée par l'accumulation d'un centimètre de tourbe (an/cm) aux différentes époques de la tourbière. Pour la tourbière de Covey Hill, la méthode de la datation au ^{210}Pb a été employée afin d'affiner le modèle d'âge pour les ~150 dernières années d'accumulation.

Un autre objectif du volet paléoécologique était de reconstituer quantitativement la position et les fluctuations passées de la nappe phréatique des tourbières au cours de leur histoire, conditions ayant participé à l'accumulation verticale de la tourbe. Des analyses de thécamoebiens ont été effectuées à cette fin. Il s'agit d'organismes unicellulaires (protozoaires) abondants dans la tourbe, notamment dans la tourbe de sphaignes. La composition et l'abondance des assemblages de thécamoebiens sont régies, en premier lieu, par la position de la nappe phréatique. Certaines espèces sont associées à des conditions d'humidité élevée, d'autres à des conditions plus sèches de la tourbe. Puisque les fluctuations de la nappe phréatique des tourbières ombrotrophes sont contrôlées en grande partie par le climat estival (ratio entre les précipitations et l'évapotranspiration), les assemblages fossiles des thécamoebiens livrent des informations quantitatives sur les fluctuations passées de la nappe phréatique et, indirectement, des conditions climatiques régionales. Une fonction de transfert développée par Lamarre (2011) a permis de reconstituer les positions passées de la nappe phréatique des deux tourbières à partir des assemblages fossiles des thécamoebiens. Dans le cas de la tourbière de Covey Hill, ces positions ont été comparées aux calculs de précipitations nettes effectués à partir des données d'apports verticaux et de températures pour la période 1900-2010 (*cf.* section 4.2.4).

Dans le cadre d'une étude récente (Pellerin *et al.*, 2007), une analyse pollinique a été effectuée pour reconstituer l'évolution post-glaciaire de la végétation de la région du mont Covey Hill. Les données polliniques ont ensuite été utilisées pour reconstituer quantitativement les conditions paléoclimatiques régionales à l'aide de la technique des meilleurs analogues (p. ex. Fréchette et de Vernal, 2013). Cette technique permet de comparer les assemblages polliniques fossiles d'une carotte sédimentaire avec les assemblages polliniques modernes disponibles au sein d'une grande base de données polliniques et climatiques pour l'Amérique de Nord et le Groenland (Whitmore *et al.*, 2005). Pour les 13 000 dernières années, les variables qui ont été reconstituées sont la température moyenne du mois le plus froid (janvier), la température moyenne du mois le plus chaud (juillet), les précipitations moyennes annuelles et l'évapotranspiration potentielle moyenne (Lavoie *et al.*, soumis). L'équipe a également comparé les résultats obtenus pour la tourbière de Covey Hill à ceux d'autres tourbières du sud du Québec et aux fluctuations passées du niveau d'eau des lacs dans le sud du Québec et dans les États du nord-est des États-Unis (Vermont, Maine).

4.2.4. Climat 1900-2010

Les apports verticaux (AV) journaliers de 1900 à 2010 fournis par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) ont été utilisés afin de comparer les données climatiques disponibles pour le dernier siècle avec les informations obtenues par l'entremise de l'analyse des thécamoebiens dans la tourbe. Les apports verticaux désignent les quantités d'eau provenant de la fonte des neiges et de la pluie (Poirier *et al.*, 2012). En l'absence de neige au sol et lorsque les précipitations tombent sous forme liquide, les apports verticaux correspondent aux précipitations. En tout temps, les apports verticaux correspondent à une estimation du volume d'eau disponible pour le ruissellement ou l'infiltration, et ce que la fonte de neige agisse ou non. L'évapotranspiration n'est pas considérée directement dans les calculs d'apports verticaux, elle doit donc être évaluée lors d'une étape subséquente. Par contre, les pertes par sublimation peuvent être partiellement prises en compte dans les résultats d'AV, par le biais de données nivométriques lorsque ces dernières sont disponibles. Les apports verticaux s'avèrent utiles pour la modélisation hydrologique (ou hydrogéologique) dans le cas où les modèles utilisés n'intègrent pas de module de fonte de la neige, comme c'est cas pour les modèles d'écoulements souterrains utilisés dans ce projet (cf. sections 4.3.1 et 4.3.3).

Le calcul des apports verticaux s'effectue par le biais du module de fonte extrait du modèle hydrologique HYDROTEL (Fortin et Royer, 2004) et imbriqué dans un algorithme visant à produire des apports verticaux au pas de temps journalier à partir des données de température et de précipitations observées aux stations météorologiques appartenant au MDDEFP. L'algorithme a été adapté pour des situations particulières du début du XX^e siècle, telle une faible densité des stations sur le territoire. Les relevés nivométriques de la Direction du suivi de l'état de l'environnement du MDDEFP et du Réseau météorologique coopératif québécois ont également été mis à profit lorsque disponibles pour corriger les estimations du couvert de neige faites par le module. Les données climatiques tirées des stations météorologiques sont interpolées par krigeage simple sur une grille de 0,1° (environ 11 km) couvrant le Québec méridional. Dans le cas du mont Covey Hill, deux points de grille couvrent l'ensemble du site. Les données des deux points de grille ont donc été intégrées afin d'obtenir une moyenne pour le site en entier.

Plusieurs analyses ont été réalisées dans ce projet sur les données d'apports verticaux. Dans un premier temps, les valeurs de température et d'apports verticaux ont été comparées à celles de la station météorologique de Hemmingford pour la période commune aux deux séries de données, soit 1961 à 2010. Les valeurs mensuelles moyennes et les tendances des séries temporelles annuelles pour la période entière ont été comparées. Hormis les différences attendues au cours des mois d'hiver (alors que les apports verticaux sont inférieurs aux précipitations enregistrées en raison du stockage sous forme de couvert de neige) et au printemps (alors que les apports verticaux sont supérieurs aux précipitations enregistrées en raison de la fonte du couvert de neige), la concordance des données a été jugée satisfaisante, justifiant ainsi l'utilisation des apports verticaux au lieu des précipitations dans le calcul des précipitations nettes utilisées pour simuler les écoulements souterrains de 1900 à 2010. Des analyses de tendance ont ensuite été réalisées sur les séries d'apports verticaux, d'évapotranspiration potentielle et de précipitations nettes.

4.3. Développement et calage du modèle hydrogéologique

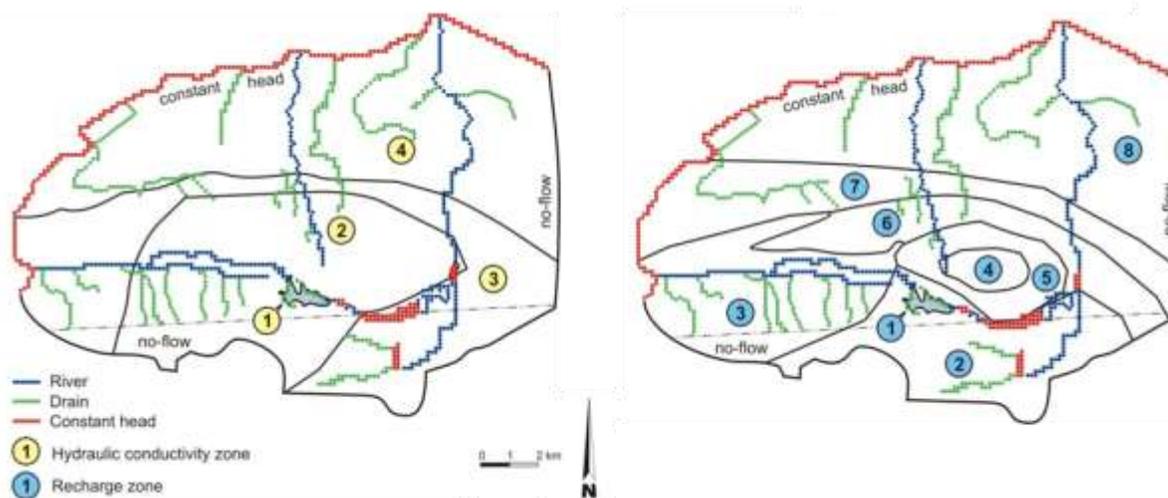
4.3.1. Développement et calage du modèle MODFLOW en régime transitoire

Les données de 2007 à 2010 disponibles au mont Covey Hill ont servi à la vérification et à l'ajustement du modèle d'écoulements souterrains développé pour cette région par Fournier (2008). Ces données sont jugées représentatives des conditions connues du passé récent. Ce modèle simule les charges sur des mailles de 135 m x 135 m (mailles raffinées de moitié dans le secteur de la tourbière) à l'aide des équations de l'écoulement en milieu poreux. Le modèle est composé de 16 couches et couvre une superficie de 173 km². Le ruisseau Allen et la rivière aux Outardes sont représentées au moyen du module *River* de MODFLOW (une rivière peut recevoir de l'eau de l'aquifère ou l'alimenter). Le ruisseau Schulman ainsi que les cours d'eau intermittents et les résurgences connues sont représentés au moyen du module *Drains* de MODFLOW (un drain ne peut que recevoir de l'eau de l'aquifère).

Les améliorations apportées au modèle de Fournier (2008) sont les suivantes:

1. Utilisation de la topographie fine LiDAR maintenant disponible par l'intermédiaire de l'agence de géomatique de la Montérégie (Belvisi, 2011);
2. Migration d'un modèle simulant les écoulements souterrains en régime permanent vers un modèle en régime transitoire avec un pas de temps mensuel;
3. Recalage du modèle en régime permanent à partir des données les plus récentes (2007-2010), puis en régime transitoire pour reproduire les variations temporelles de charges, de flux aquifère-tourbière, de débits de base des cours d'eau et de débits aux résurgences.

Le développement du modèle d'écoulements souterrains en régime transitoire est décrit en détails dans Levison *et al.* (soumis). La figure 4.3 présente le modèle conceptuel, incluant les zones de recharge (recharge distribuée) et les zones de conductivité hydraulique.



Le modèle calé a été utilisé pour simuler les écoulements souterrains à l'échelle régionale, de même que les flux aquifère-tourbière, les débits de base des cours d'eau et les flux aux résurgences dans les conditions actuelles. En régime permanent, la recharge de l'aquifère a été calée par zone, utilisant comme borne supérieure la précipitation nette moyenne estimée pour la période de calage, c.-à-d. 2007 à 2010. Il en résulte un coefficient d'infiltration (recharge divisée par la précipitation nette) pour chaque zone.

En régime transitoire, l'année est divisée en quatre périodes de recharge distinctes d'une durée de 91 jours (nommées *stress periods* dans MODFLOW), correspondant aux quatre saisons (printemps, été, automne, hiver). Suite à une période d'« échauffement » (*spinup*) de 20 ans, le modèle a été utilisé pour simuler les flux de 2007 à 2010, soit la période pendant laquelle un maximum de données hydrologiques et hydrogéologiques sont disponibles. La distribution temporelle de la recharge a été réalisée de la manière suivante : les Pnet sont d'abord calculées pour tous les mois et le total est calculé pour chaque saison de la période de simulation. La recharge hivernale étant considérée nulle en raison du gel, toute la Pnet hivernale est transférée au printemps. Pour les périodes estivales, les Pnet négatives (demande évaporative très grande) sont posées à zéro. La recharge pour chaque période et chaque zone est ensuite calculée en multipliant le coefficient d'infiltration déterminé plus haut par la Pnet de chaque saison. Cette méthode repose sur l'hypothèse que la distribution temporelle de la recharge est la même que celle des Pnet.

La figure 4.4 et la figure 4.5 présentent les charges mesurées et simulées en régimes permanent (conditions moyennes à long terme) et transitoire (période de 2007 à 2010). Les résultats détaillés du calage sont présentés dans Levison *et al.* (soumis).

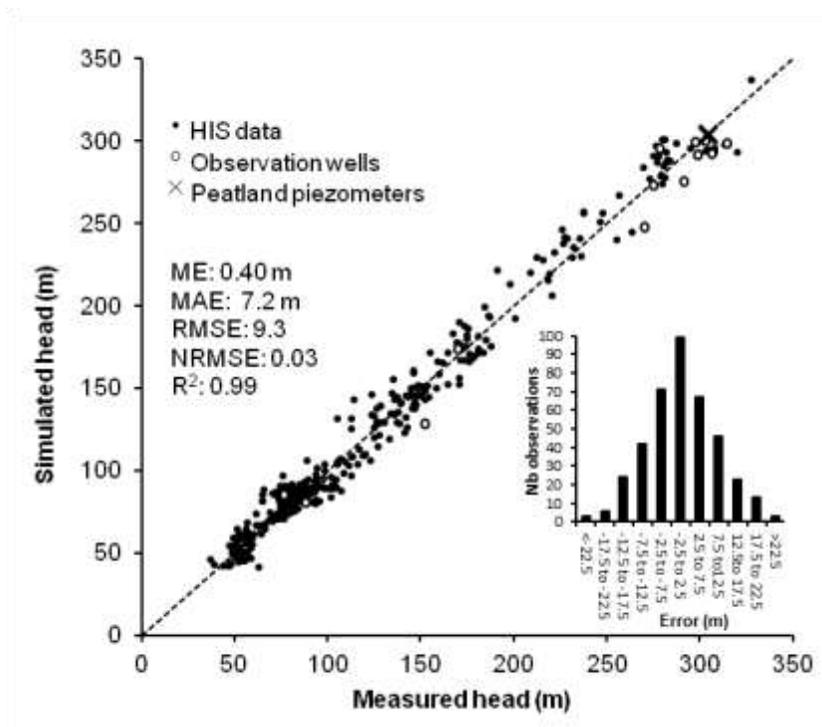


Figure 4.4 Charges mesurées et simulées en régime permanent à l'échelle du domaine du modèle représentant le mont Covey Hill pour représenter les conditions moyennes (p. ex. les niveaux piézométriques) du passé récent (Levison *et al.*, soumis).

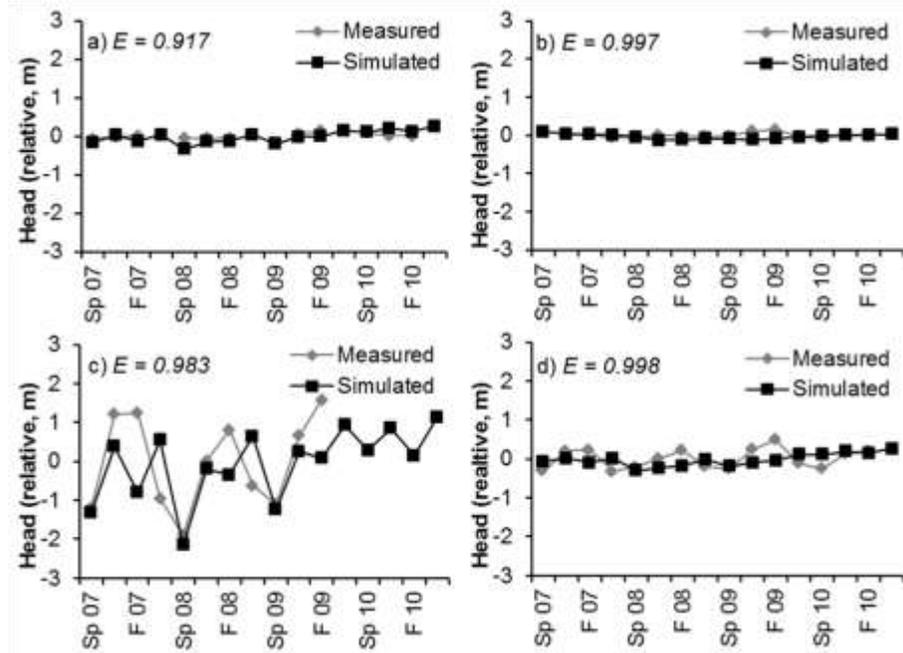


Figure 4.5 Charges mesurées et simulées en régime transitoire à l'échelle du domaine du modèle représentant le mont Covey Hill, pour les années 2007 à 2010 (Levison *et al.*, soumis).

4.3.2. Analyse de sensibilité du modèle MODFLOW

Une analyse de sensibilité a été réalisée sur le modèle MODFLOW, de manière à identifier les variables et paramètres qui contrôlent la dynamique des écoulements souterrains sur le mont Covey Hill. L'effet de variations de la conductivité hydraulique et de la recharge sur les niveaux de nappe, les débits de base des cours d'eau et les débits aux résurgences (cinq résurgences instrumentées et quatre autres résurgences dans les zones de présence potentielle) a été étudié.

La conductivité hydraulique a été réduite à 10 % et augmentée à 1000 % de sa valeur calée par Levison *et al.* (soumis), pour les quatre zones de conductivité hydraulique (Figure 4.3). La recharge a été réduite de 30 % et augmentée de 30 % par rapport à sa valeur calée par Levison *et al.* (soumis), pour les huit zones de recharge (Figure 4.3).

Le coefficient de sensibilité relative S_r (équation 1) est calculé pour comparer l'effet relatif des différents paramètres sur les résultats ciblés par l'analyse. Un S_r positif indique que le résultat augmente avec une augmentation du paramètre (et vice-versa) tandis qu'un S_r négatif indique que le résultat diminue lorsque la valeur du paramètre augmente. Plus le S_r augmente (en valeur absolue), plus le modèle est sensible au paramètre testé.

$$S_r = \left[\frac{(F' - F_{ref})}{F_{ref}} \right] / \left[\frac{(X' - X_{ref})}{X_{ref}} \right] \quad (1)$$

où,

S_r = coefficient de sensibilité relative

F' = résultat du modèle avec un paramètre X'

F_{ref} = résultat de référence du modèle X

X' = paramètre modifié

X_{ref} = paramètre de référence

4.3.3. Développement et calage du modèle HydroGeoSphere

Dans le but de représenter les débits des résurgences d'eau souterraine servant d'habitats aux salamandres et de simuler leurs flux à une échelle plus fine qu'avec le modèle MODFLOW, un second modèle d'écoulement souterrain a été développé à l'aide du modèle entièrement couplé HydroGeoSphere (HGS; Therrien *et al.*, 2010). Ce modèle permet de simuler le ruissellement de surface, de même que les écoulements dans les zones non saturée et saturée en régime transitoire dans un réseau d'écoulement fracturé, à l'échelle d'une tranche du mont Covey Hill où des résurgences-habitats sont connues et instrumentées. Cette démarche a été présentée au congrès international de l'AIH qui s'est tenu à Niagara en septembre 2012 (Levison *et al.*, 2012) et au colloque *La Recherche hydrologique au Québec dans un contexte de changements climatiques*, qui a eu lieu à Québec les 25 et 26 avril 2013 (Ouellet *et al.*, 2013).

Le modèle HGS a été utilisé pour développer un modèle entièrement couplé des écoulements de surface et souterrains en régime transitoire, incluant une représentation des fractures discrètes dans le roc, pour une tranche de la zone d'étude sur le mont Covey Hill. La figure 4.6 présente l'emplacement du domaine du modèle HGS par rapport au domaine du modèle MODFLOW et la figure 4.7 présente un schéma conceptuel du domaine fracturé. Le modèle HGS mesure 4 500 m en x (approximativement SO à NE), 100 m en y (approximativement SE à NO), sur une profondeur de 100 m. L'altitude varie uniquement le long de l'axe des x et non le long de l'axe des y (cf. Figure 4.7) et le dénivelé total est de 245 m. La matrice rocheuse est considérée imperméable, ce qui implique que les précipitations peuvent s'infiltrer dans le roc, circuler dans l'aquifère et resurgir aux sources uniquement par les fractures. La limite sud du modèle (en amont) ainsi que les limites latérales sont des conditions à flux nul. La limite nord du modèle (en aval) est une charge constante, imposée égale à la piézométrie régionale.

Un modèle hydrogéologique conceptuel de la formation de Covey Hill (grès de Potsdam) a été proposé par Nastev *et al.* (2008). Le modèle HGS a été développé à partir de cette conceptualisation. Des fractures sub-horizontales perméables sont rencontrées en moyenne à toutes les dizaines de mètres dans la formation de Covey Hill. La connectivité latérale se trouve dans une gamme entre plusieurs centaines de mètres à quelques kilomètres (Nastev *et al.*, 2008).

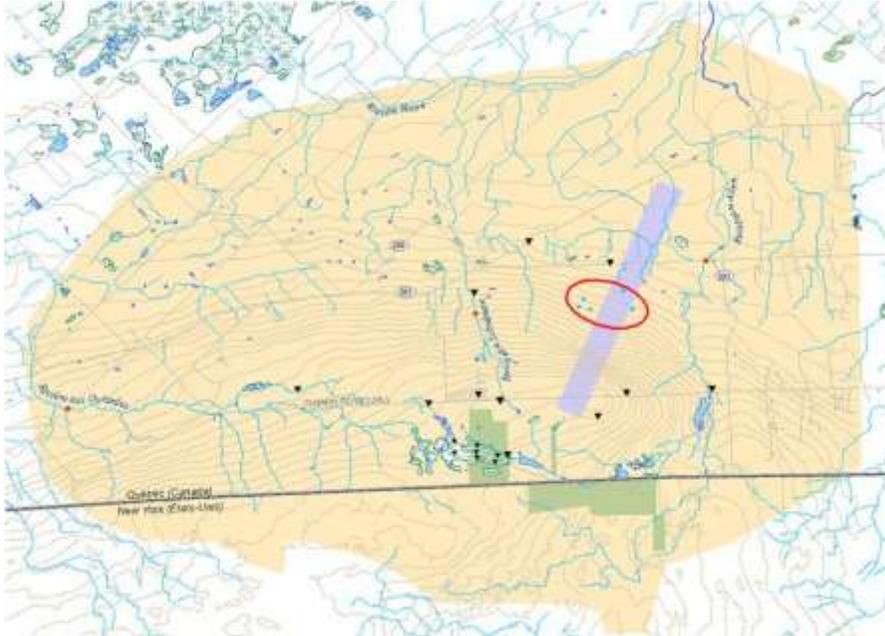


Figure 4.6 Domaine du modèle MODFLOW (en beige) et domaine du modèle HGS (en mauve). L'emplacement des sources instrumentées est marqué par les points bleus contenus dans l'ellipse rouge. L'instrumentation supplémentaire sur le site est présentée à titre indicatif (triangles noirs : puits d'observation des niveaux de nappe; points rouges : stations limnimétriques).

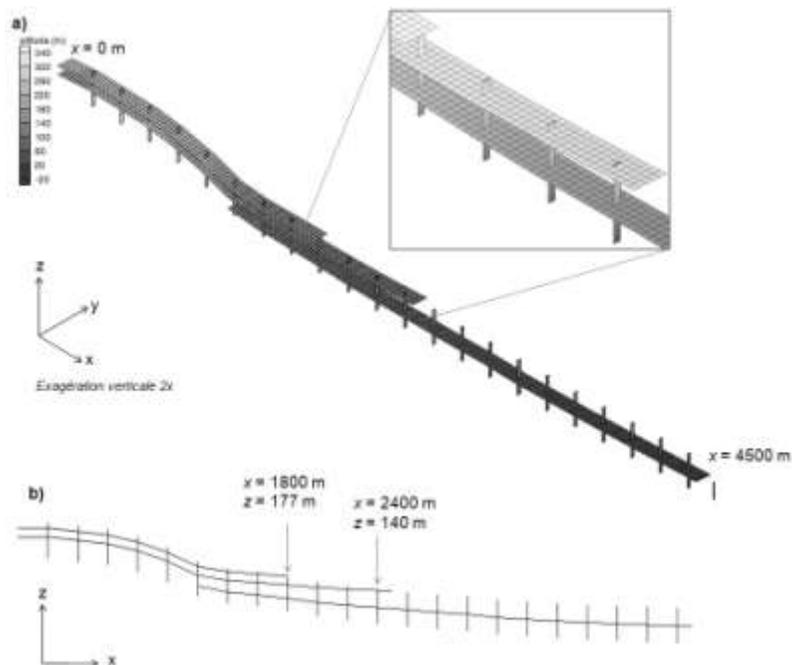


Figure 4.7 Schéma conceptuel du domaine du modèle HGS présentant les fractures : a) vue oblique avec agrandissement de la partie centrale du modèle; b) vue latérale du modèle.

La taille et l'espacement des fractures ont été modifiés afin 1) d'obtenir un débit sortant dans les zones où des résurgences sont observées sur le mont Covey Hill (p. ex. dans le secteur entre $x = 1800$ à 2400 m dans le modèle HGS; 2) d'obtenir des débits raisonnables à la sortie des fractures (c'est-à-dire des débits plus faibles que le débit de base mesuré dans le plus petit ruisseau dont le débit est mesuré dans le Laboratoire naturel) et 3) de produire à la fois des débits intermittents et continus typiques, tels que mesurés dans des résurgences instrumentées avec des sondes de température utilisées pour suivre l'activité des résurgences sur le terrain. Lavigne *et al.* (2010) ont réalisé des essais hydrauliques avec obturateurs dans la formation de Covey Hill qui ont mis en évidence des ouvertures de fractures hydrauliques de 10 à $675 \mu\text{m}$. La taille des fractures a été modifiée à partir de cette gamme de valeurs lors du développement du modèle HGS. Les valeurs des paramètres décrivant l'écoulement de surface proviennent du manuel de l'utilisateur du modèle HydroGeoSphere (Therrien *et al.*, 2010).

Depuis 2007, les périodes d'activité de cinq résurgences sont été mesurées à Covey Hill au moyen de sondes de température de l'eau (cf. Figure 4.6 pour la localisation de ces résurgences). Une température basse et variant de manière à peu près sinusoïdale dans le temps indique une alimentation en eau souterraine tandis qu'une température élevée et très variable est interprétée comme un assèchement de la résurgence. La figure 4.8 présente un échantillon des séries temporelles d'activité des résurgences utilisées pour caler le modèle. Cette figure montre que la résurgence à activité continue ($z=160$ m) coule pendant tous les mois de l'année (fluctuations atténuées des températures mesurées) tandis que la résurgence à activité intermittente ($z=185$ m) coule pendant les mois de septembre à juin et s'assèche en juillet et en août (les fluctuations importantes des températures observées en juillet et en août sont associées à la température de l'air, et non plus à celle de l'eau souterraine). Le calage du modèle HGS visait à reproduire la gamme des dynamiques des résurgences observées sur le terrain. Mis à part un débit de résurgence estimé à $0,00009 \text{ m}^3/\text{s}$ en mai 2010, très peu de débits ont été mesurés aux résurgences sur le mont Covey Hill. Il est supposé que les débits au moment de la fonte sont plus élevés que ceci. Les paramètres calés utilisés dans le modèle HGS sont résumés dans le tableau 4.3.

Suite au calage du modèle en régime permanent, des simulations en régime transitoire ont été réalisées, d'abord en utilisant les Pnet déduites des données mesurées à la station de Hemmingford pour la période 1971-2000. Ces Pnet mensuelles ont été appliquées directement à la surface du modèle pour représenter la pluie nette atteignant le sol. Le modèle répartit ensuite le ruissellement de surface et l'infiltration en fonction des propriétés des matériaux et de leur teneur en eau. En régime transitoire, le modèle utilise un pas de temps variable qui est fonction de la charge hydraulique.

Les débits des sources situées vis-à-vis des fractures verticales à $x = 1800$ m ($z = 177$ m), $x = 2000$ m ($z = 162$ m), $x = 2200$ m ($z = 150$ m), et $x = 2400$ m ($z = 144$ m) ont été simulés et analysés. Les sources situées à 177 m et à 144 m d'altitude sont également situées à l'intersection de fractures sub-horizontales avec la topographie. Des analyses statistiques sur la durée des périodes d'activité des résurgences ainsi que sur les valeurs de débit ont été réalisées et sont présentées à la section 5.2.2.

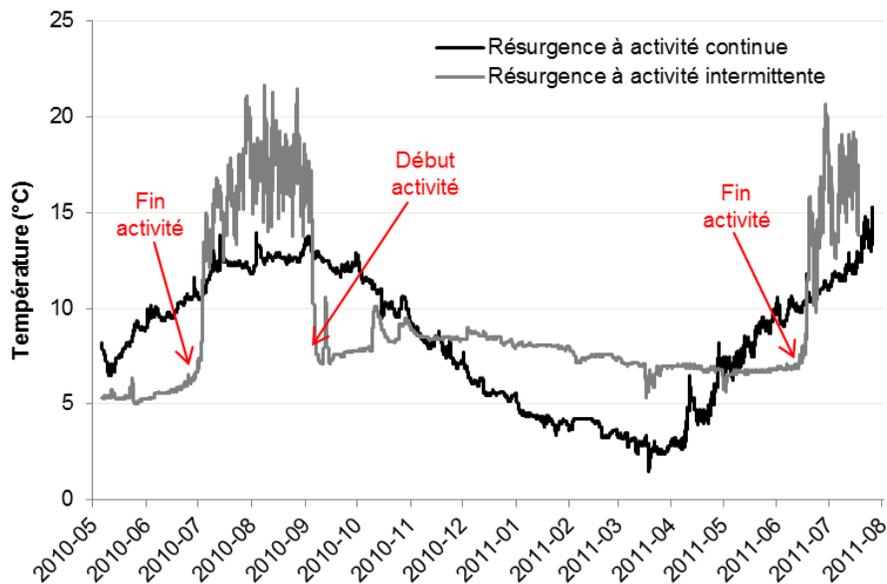


Figure 4.8 Exemples d'une résurgence à activité continue et d'une résurgence à activité intermittente, tel que mesurées sur le terrain entre mai 2010 et août 2011.

4.3.4. Simulations avec les scénarios climatiques

Le modèle MODFLOW a été utilisé pour simuler les conditions hydrologiques de 1900 à 2010, à l'aide des Pnet déduites des apports verticaux fournis par le CEHQ, afin de mieux comprendre la gamme des conditions de recharge auxquelles la colline a été exposée. Les simulations sont réalisées sur une base saisonnière (comme dans Levison *et al.*, soumis), en raison du grand nombre de pas de temps requis pour simuler les 110 années en régime transitoire. Les Pnet et les recharges sont calculées pour chaque saison, de la même manière que dans Levison *et al.* (soumis).

Les deux modèles (MODFLOW et HGS) ont été utilisés pour simuler les conditions hydrologiques du passé récent, qui correspond à la période de référence pour les scénarios climatiques (1971-2000). Les modèles hydrogéologiques ont également été utilisés pour l'éventail de scénarios climatiques futurs identifiés à partir des modèles régionaux du climat (2041-2070), tels que définis à la section 4.2.2. L'impact des changements climatiques sur les eaux souterraines a été simulé par l'entremise de la recharge. On présume que la recharge évoluera de la même manière que la précipitation nette, de sorte qu'une précipitation nette plus faible entraînera une diminution comparable en ruissellement et en infiltration.

Afin d'intégrer les variations du climat dans le modèle MODFLOW, les Pnet pour la période de référence et celles pour la période future sont utilisées pour calculer une recharge mensuelle au moyen des coefficients d'infiltration déterminés lors du calage du modèle en régime permanent. Des recharges mensuelles sont ainsi disponibles pour l'ensemble des 10 scénarios climatiques fournis par Ouranos. L'impact des changements climatiques a été étudié sur les charges, sur les débits de base des cours d'eau instrumentés et sur les débits

aux résurgences. Dans le modèle HGS, les scénarios de Pnet élaborés à partir des données de température et de précipitations des 10 scénarios climatiques ont été utilisés directement comme variable d'entrée au modèle qui répartit ensuite ce volume d'eau en ruissellement et en infiltration. L'impact des scénarios climatiques a été étudié sur la dynamique de quatre résurgences situées à 144, 150, 162 et 177 m. Pour chaque résurgence, les variables visées sont le nombre de jour d'activité par année, la durée moyenne des périodes d'activité, la répartition saisonnière des périodes d'activité et le débit moyen des résurgences.

Tableau 4.3 Caractéristiques et paramètres du modèle HGS

Caractéristiques générales	Valeur
Longueur	4500 m
Largeur	100 m
Épaisseur	100 m (altitude au sommet : 330 m ; altitude au pied de la colline : 85 m)
Taille des mailles	20 m x 20 m
Conditions limites au nord (altitude la plus basse)	Charge hydraulique spécifiée fixée à 75 m (10 m sous la surface)
Conditions limites au sud (altitude la plus élevée)	Flux nul
Conditions limites à l'est	Flux nul
Conditions limites à l'ouest	Flux nul
Conditions limites sur le dessus	Flux imposé (pluie) – des valeurs de Pnet mensuelles ont été utilisées
Caractéristiques des fractures	Valeur
Espacement entre les fractures verticales	200 m (le long de l'axe des x)
Taille des fractures verticales	600 µm
Taille des fractures horizontales	600 µm
Caractéristiques de la matrice rocheuse	Valeur
Conductivité hydraulique	1×10^{-20} m/an (essentiellement imperméable)
Porosité	0,001
Caractéristiques de l'écoulement de surface	Valeur
Facteurs de friction x et y	$1,585 \times 10^{-9}$
Hauteur des obstacles à l'emmagasinement de surface	0,001 m
Longueur de couplage	1×10^{-4} m

4.4. Modélisation écologique des populations de salamandres

Au cours de la dernière décennie, les modèles écologiques hybrides (MEH) combinant un modèle orienté sur l'individu et un modèle environnemental ont émergé comme des outils puissants en matière de conservation, de gestion et de planification (Grimm et Railsback, 2005; Stillman et Goss-Custard, 2010; McClain *et al.*, 2012; Metcalfe *et al.*, 2012). En tenant compte des variations individuelles, des cycles de vie, des interactions entre les individus et des variations de l'environnement immédiat, les MEH permettent d'obtenir des prévisions précises sur la viabilité locale des espèces en réponse à des processus environnementaux en évolution, modifiés par exemple par des changements climatiques. Le potentiel de ce type de modèle a été mis à profit dans le cadre de ce projet pour simuler la progression des populations de salamandres sombres des montagnes sur le mont Covey Hill en fonction des changements d'activité hydrique des résurgences et des températures induits par les changements climatiques.

4.4.1. Modèle orienté sur l'individu

Le modèle développé dans ce projet comprend quatre types d'individus, chacun d'eux associé à une phase particulière du cycle de vie de la salamandre (œuf, larve, juvénile et adulte). Toutes les phases sont caractérisées par une taille (niveau de développement pour les œufs) et un âge. Enfin, les adultes possèdent une variable supplémentaire associée au sexe, qui est défini de façon aléatoire après la maturation sexuelle des juvéniles.

Le modèle fonctionne par pas de temps quotidiens. Chaque jour, chacun des individus effectue une série de fonctions biologiques spécifiques à sa phase de développement (Figure 4.9). Les œufs et les larves sont sujets aux fonctions de mortalité et de croissance, dans cet ordre. Pour les juvéniles, une fonction associée au déplacement se trouve entre celles de mortalité et de croissance. Finalement, dans le cas des adultes, la séquence d'action est la même que pour les juvéniles, mais la fonction de croissance est remplacée par celle de la reproduction. Les transitions entre les phases du cycle de vie (éclosion, métamorphose et maturation sexuelle) sont induites par des seuils de taille définis par l'utilisateur. Le modèle exclut toutes interactions interspécifiques, mais les interactions interindividuelles sont considérées pour ce qui est du déplacement et de la reproduction. Des descriptions précises de la mécanique implantée pour chacune des fonctions biologiques sont disponibles dans Girard *et al.* (soumis).

4.4.2. Environnement spatial

L'environnement dans lequel évoluent les salamandres intègre une configuration spatiale en deux dimensions qui incorpore les caractéristiques hydriques du paysage ainsi qu'un profil quotidien de température ambiante. Tout autre aspect tel que la disponibilité des ressources, les abris ou la présence de prédateurs est ignoré dans le modèle. Les caractéristiques hydriques sont définies dans une grille où l'on attribue à chaque cellule de 1 m² l'un des trois états suivants: sec, humide et hydrologiquement actif. Les cellules humides sont définies comme étant toutes cellules à l'intérieur de 2 m d'une cellule hydrologiquement active. La configuration spatiale du paysage hydrique peut être dynamique ou non dans le temps. Les caractéristiques liées à la température sont pour leur part homogènes dans l'espace et correspondent à la température de l'air ambiant.

4.4.3. Interactions entre individus et environnement

La plupart des fonctions biologiques implantées dans le modèle orienté sur l'individu sont influencées par les conditions hydriques et de température de l'environnement (Figure 4.9). La mortalité des œufs et des larves est immédiate s'ils se trouvent sur des cellules sèches. Le taux de croissance des individus est corrélé positivement à la température ambiante. Le déplacement des juvéniles et des adultes est déclenché par la température et orienté vers les endroits maximisant la teneur en eau. La saison de reproduction est définie par la température, et une femelle ne peut pondre que si elle se trouve dans une cellule hydrologiquement active. Une description mécanistique de ces interactions est disponible dans Girard *et al.* (soumis).

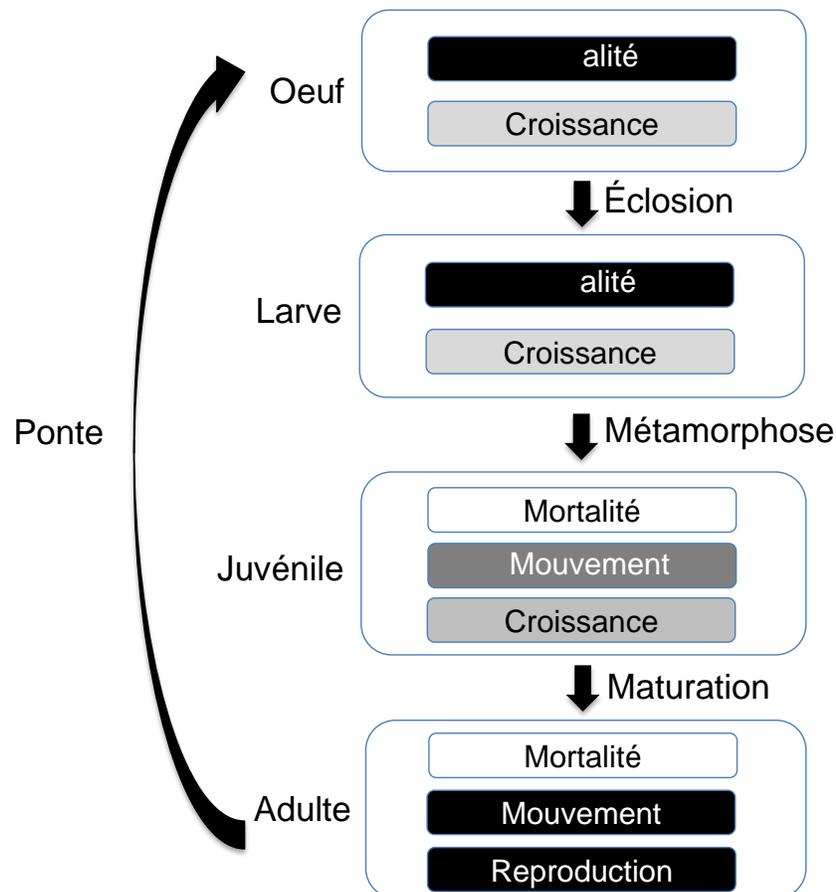


Figure 4.9 Sommaire du modèle orienté sur l'individu des salamandres. Le modèle représente les quatre phases du cycle de vie de manière distincte. Chacune de ces phases est associée à une série de fonctions biologiques qui lui est propre. Ces fonctions peuvent être influencées par le contenu en eau (noir), la température ambiante (gris pâle), la densité (gris foncé) et/ou le hasard (blanc). Un diagramme plus précis se trouve dans Girard *et al.* (soumis).

4.5. Intégration du modèle de salamandres et de l'hydrosystème de la colline

4.5.1. Construction numérique de l'hydrosystème

Une stratégie axée sur la création d'un environnement numérique simplifié, mais dans lequel les dynamiques hydrique et climatique simulées pour Covey Hill sont intégrées, a été sélectionnée. Cet environnement numérique a ainsi été bâti à partir des profils d'activité des résurgences provenant des simulations hydrogéologiques d'HydroGeoSphere et des températures quotidiennes simulées par les modèles climatiques sélectionnés.

La configuration spatiale de l'environnement numérique correspond à une résurgence de forme carrée de 1, 4 ou 9 m² au centre d'une grille de 50 m x 50 m. La résurgence suit un profil d'activité binaire dans lequel l'état de celle-ci alterne entre activité et inactivité. Lorsque la résurgence est active, sa surface est composée de cellules hydrologiquement actives et est entourée d'une bande de 2 m de cellules humides tel que prescrit plus haut. Le reste de la grille est composé de cellules sèches (Figure 4.10a). Lorsque la résurgence est inactive, sa surface est composée de cellules humides et tout le reste de la grille est composée de cellules sèches (Figure 4.10b). Ces deux configurations spatiales alternent en suivant les profils d'activité des résurgences obtenus des simulations hydrogéologiques à des altitudes de 144, 150, 162 et 177 m à Covey Hill (Figure 4.10c). L'environnement numérique est complété par un profil quotidien de température provenant des modèles climatiques (Figure 4.10d). Pour chacun de ces modèles, la période de référence (1971-2000) est comparée à la période future (2041-2070). En tout, 108 paires d'environnements numériques ont été créées.

4.5.2. Calibration du modèle écologique

Le MEH inclut 19 paramètres dont 11 proviennent de la littérature et huit qui doivent être calibrés par simulations. Des descriptions de chacun de ces paramètres se trouvent au tableau 1 dans Girard *et al.* (soumis). Dans le cas de Covey Hill, un environnement composite a été construit à partir des données de température et de précipitations observées dans la région de Covey Hill au cours de la période de référence. L'environnement composite est constitué d'une résurgence de 4 m² située à 150 m d'altitude (des conditions environnementales considérées comme intermédiaires dans l'univers des environnements à tester), mais pour lequel les variations interannuelles ont été éliminées. Tout d'abord, le profil de température appliqué à cet environnement est constitué des moyennes quotidiennes calculées à partir des données observées à la station d'Hemmingford entre les années 1971 et 2000. Ce profil est répété ensuite en boucle. Dans le cas du profil hydrique de la résurgence, un profil annuel type a été créé au moyen d'une simulation d'HydroGeoSphere effectuée pour la période de référence à partir des données de précipitations mesurées à la station d'Hemmingford.

Pour construire ce profil type, les profils annuels d'activité de la résurgence simulés pour chacune des années de la période de référence ont été superposés, permettant d'obtenir une distribution de fréquences d'activité quotidienne (c.-à-d. pour chaque jour julien, le nombre de fois où la résurgence était active sur la période de 30 ans). La durée moyenne de la période d'activité (c.-à-d. le nombre de jours entre la date de début d'activité et la date de fin d'activité de la résurgence) et l'écart-type de la durée ont été calculés ainsi que la date moyenne du milieu de la période. Le profil type a été construit en utilisant la date moyenne (le 12 mai) plus

trois écarts-types de chaque côté de la date moyenne, pour définir la période d'activité. Selon ce profil type, l'activité commence le 1^{er} mars et termine le 23 juillet. Ce profil est répété en boucle comme dans le cas des températures.

La calibration a été effectuée à partir de simulations de 40 000 jours (~110 ans). Une simulation débute avec 20 adultes distribués aléatoirement dans la zone d'influence de la résurgence (cellules hydrologiquement actives et humides incluses). Le sexe de ces individus est défini de manière aléatoire afin d'assurer un ratio sexuel équilibré. Une simulation débute le 1^{er} janvier. Les 10 000 premiers jours de la simulation sont traités dans un environnement hydrique fixe dans lequel la résurgence est constamment active afin de permettre à la population de salamandres d'atteindre un équilibre démographique. À partir du 10 001^e jour, le profil d'activité hydrique défini plus haut est intégré dans l'environnement numérique. Plus de 600 combinaisons de paramètres ont ainsi été testées à l'aide de 10 répliques. Deux critères de sélection ont été définis pour choisir la combinaison optimale: 1) la résilience de la population et 2) une densité moyenne (au cours des 10 000 derniers jours) se situant entre 0,6 et 1,2 adultes/m² dans les cellules hydrologiquement actives de la résurgence.

4.5.3. Simulations de l'impact des changements climatiques sur les populations de salamandres

L'impact des changements climatiques a été évalué par l'entremise d'une série de simulations issues du MEH calibré et des 108 paires d'environnements numériques. Chacune des simulations dure 21 900 jours. Encore une fois, une simulation débute le 1^{er} janvier avec 20 adultes distribués aléatoirement dans la zone d'influence de la résurgence (cellules hydrologiquement actives et humides incluses). Le sexe de ces individus est défini de manière aléatoire afin d'assurer un ratio sexuel équilibré. Les 10 950 premiers jours sont traités dans un environnement hydrique fixe où la résurgence présente une activité constante. Le profil de température utilisé pour cette première tranche correspond au profil de température moyen utilisé pour la calibration. La dynamique hydrique et les températures quotidiennes simulées sont ensuite implantées lors des 10 950 derniers jours (30 ans). Pour chacun des 216 environnements construits, 10 répliques ont été effectués. À la fin de chaque simulation, l'abondance d'adultes au cours des 5 000 derniers jours a été calculée. La probabilité d'extinction dans l'ensemble des 10 répliques d'un environnement numérique donné a également été évaluée.

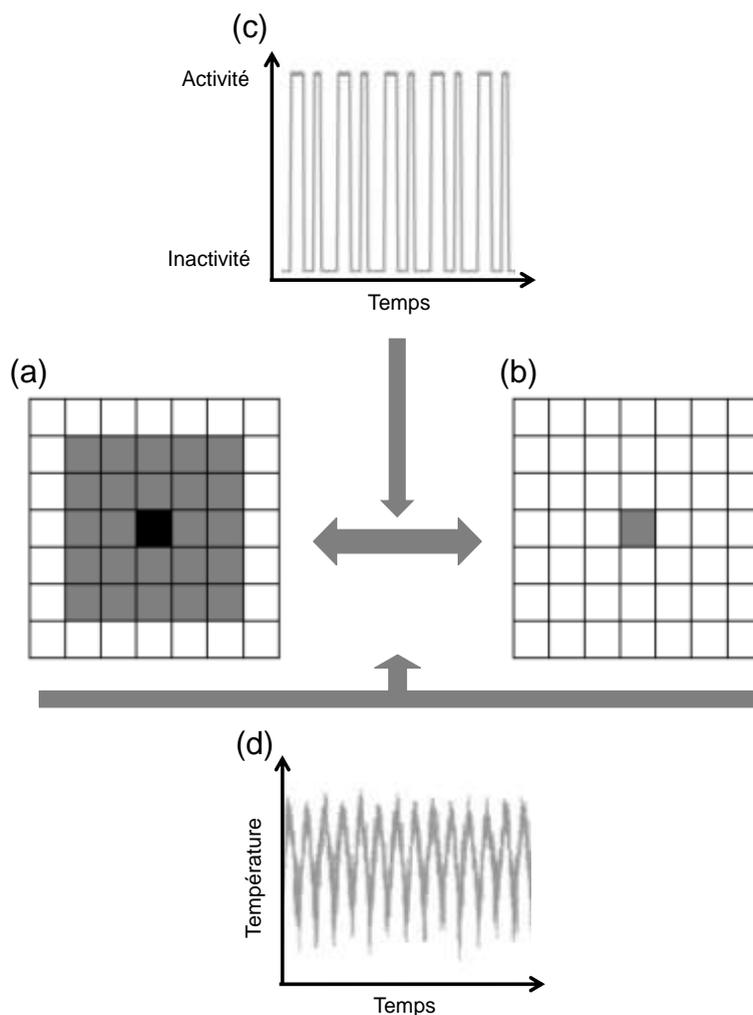


Figure 4.10 Construction numérique de la structure et du dynamisme de l'hydrosystème. L'environnement numérique est constitué d'une source unique, fermée à la migration, située au centre d'un environnement de 50 m x 50 m (pour les fins de l'image, les dimensions en (a) et (b) ont été réduites à 7 m x 7 m). Les résurgences alternent entre activité (a) et inactivité (b). L'arrangement spatial des milieux secs (en blanc), humides (en gris) et hydrologiquement actifs (en noir) change ainsi au gré d'un profil d'activité binaire (c). L'environnement numérique est complété par un profil quotidien de température (d).

5. RÉSULTATS ET DISCUSSION

5.1. Scénarios climatiques

5.1.1. Variables climatiques considérées

L'habileté des modèles climatiques à reproduire les conditions climatiques observées lors d'une période de référence n'est pas garante de résultats plus fiables pour le futur, mais demeure toutefois un aspect à vérifier avant toute interprétation de simulations climatiques. Selon les écarts observés entre les variables climatiques observées et simulées pour la période de référence, le biais correspondant peut ensuite être retiré des simulations climatiques futures afin d'obtenir des simulations qui concordent davantage avec la réalité. Il est toutefois important de noter que la correction de biais étant appliquée à une variable à la fois (c.à-d. aux précipitations et aux températures de façon séparée) la cohérence physique entre ces variables est en partie compromise par cette manipulation des données. Pour la présente étude, les résultats des 10 modèles sélectionnés ont été comparés aux données climatiques enregistrées à la station météorologique de Hemmingford Four Winds (ID : 7023075). Bien que plusieurs variables climatiques aient été considérées, la correction de biais a été effectuée sur la température moyenne journalière et les précipitations journalières.

a) Moyennes des températures et précipitations mensuelles sur 30 ans

Les moyennes mensuelles de température et de précipitations à Hemmingford de 1971 à 2000 sont présentées à la figure 5.1. La température moyenne mensuelle oscille entre -9,6 °C en janvier et 20,6 °C en juillet avec des minima pouvant aller jusqu'à -30,5°C l'hiver et des maxima de 30,3 °C l'été. La température moyenne annuelle se situe à 6,4 °C. Quant aux précipitations, elles sont relativement également distribuées au cours de l'année et oscillent entre 40,6 mm en février et 93,3 mm en juillet. La variabilité interannuelle est toutefois plus importante que celle des températures, comme le témoignent les grands écarts entre les valeurs minimales et maximales. La moyenne de précipitations mensuelles se situe à 72,7 mm pour un total annuel moyen de 872,4 mm.

Les sorties des modèles climatiques, une fois corrigées pour leur biais, réussissent à reproduire de façon satisfaisante les moyennes mensuelles de température et de précipitations, bien que de façon supérieure pour les températures par rapport aux précipitations (Figure 5.2). L'écart moyen entre la température moyenne annuelle observée et celle simulée par l'ensemble des simulations climatiques sur 30 ans est de 0,4 °C. L'écart moyen entre les précipitations annuelles observées et celles simulées par l'ensemble des simulations climatiques sur 30 ans s'élève quant à lui à 5,5 %.

Les résultats des simulations futures s'entendent toutes pour une augmentation ($\Delta > 0$) des températures de 1 à 5 °C pour la période 2041-2070 (Figure 5.3a). Cette augmentation varie en fonction du mois de l'année, mais l'enveloppe d'incertitude demeure relativement égale pendant toute l'année. Le consensus sur le changement concernant les précipitations est toutefois moins apparent (Figure 5.3b). La moyenne de l'ensemble prévoit une augmentation des précipitations ($\Delta > 0$) pour tous les mois de l'année à l'exception du mois de juin. Bien que la plupart des modèles s'entendent pour une hausse des précipitations au cours de l'hiver, l'enveloppe d'incertitude demeure importante (-3 à +47 %). Inversement, le signal est mitigé au sein de l'ensemble pour les mois d'été et d'automne.

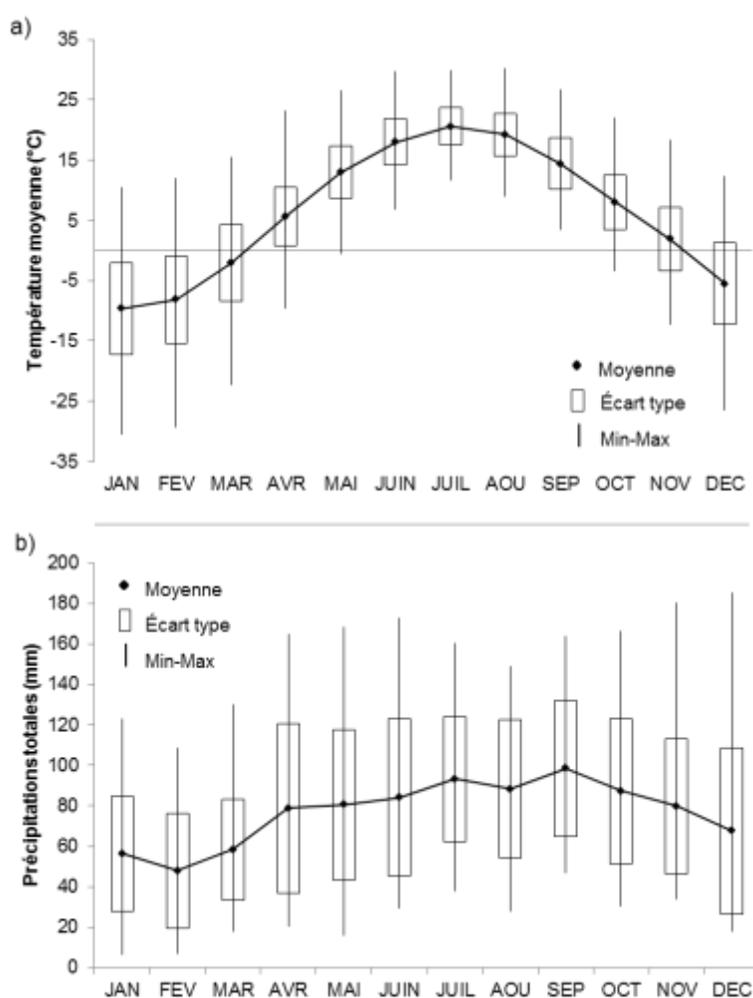


Figure 5.1 Normales climatiques mensuelles (a) température et (b) précipitations à la station météorologique de Hemmingford Four Winds pour la période 1971 à 2000.

Un test de Wilcoxon-Mann-Whitney a été réalisé pour déterminer si ces changements de températures et de précipitations moyennes mensuelles sont significativement différents ($\alpha=0,05$) de la période de référence (1971-2000) à la période future (2041-2070). Une différence significative a été identifiée pour les changements de température, mais pas pour les changements de précipitations.

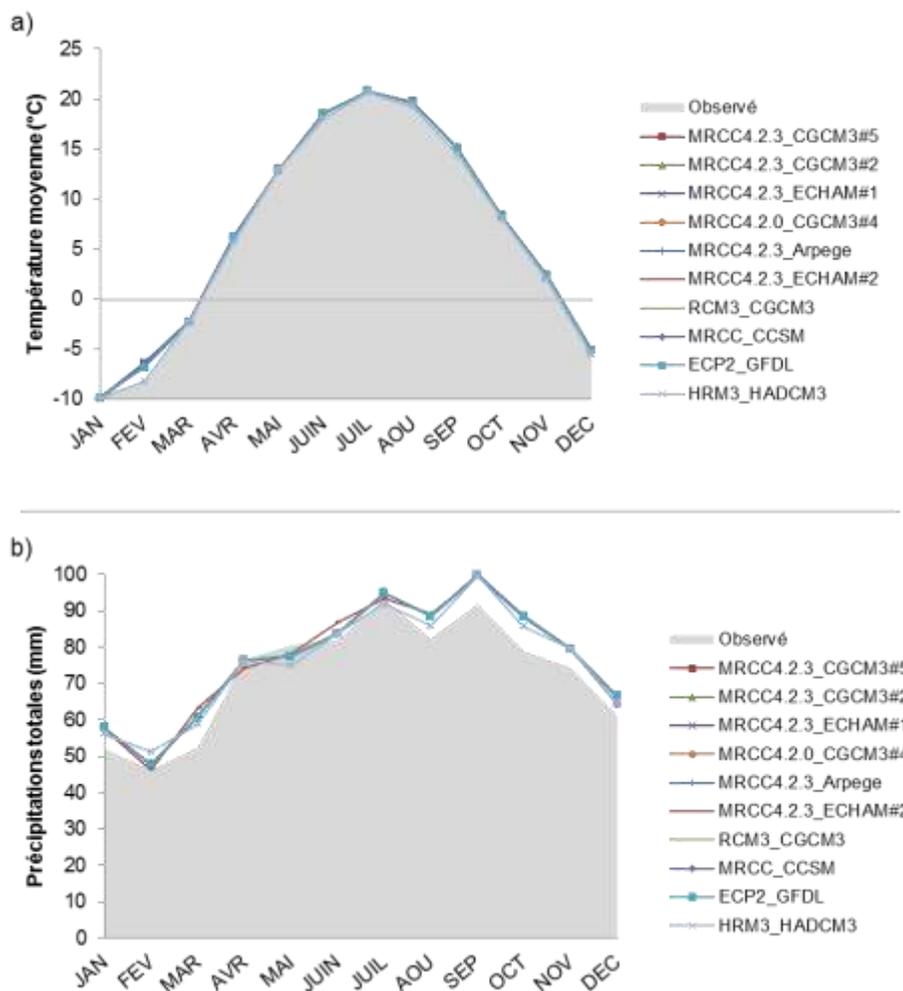


Figure 5.2 Comparaison entre les a) températures et les b) précipitations moyennes simulées et observées pour la période de référence 1971-2000.

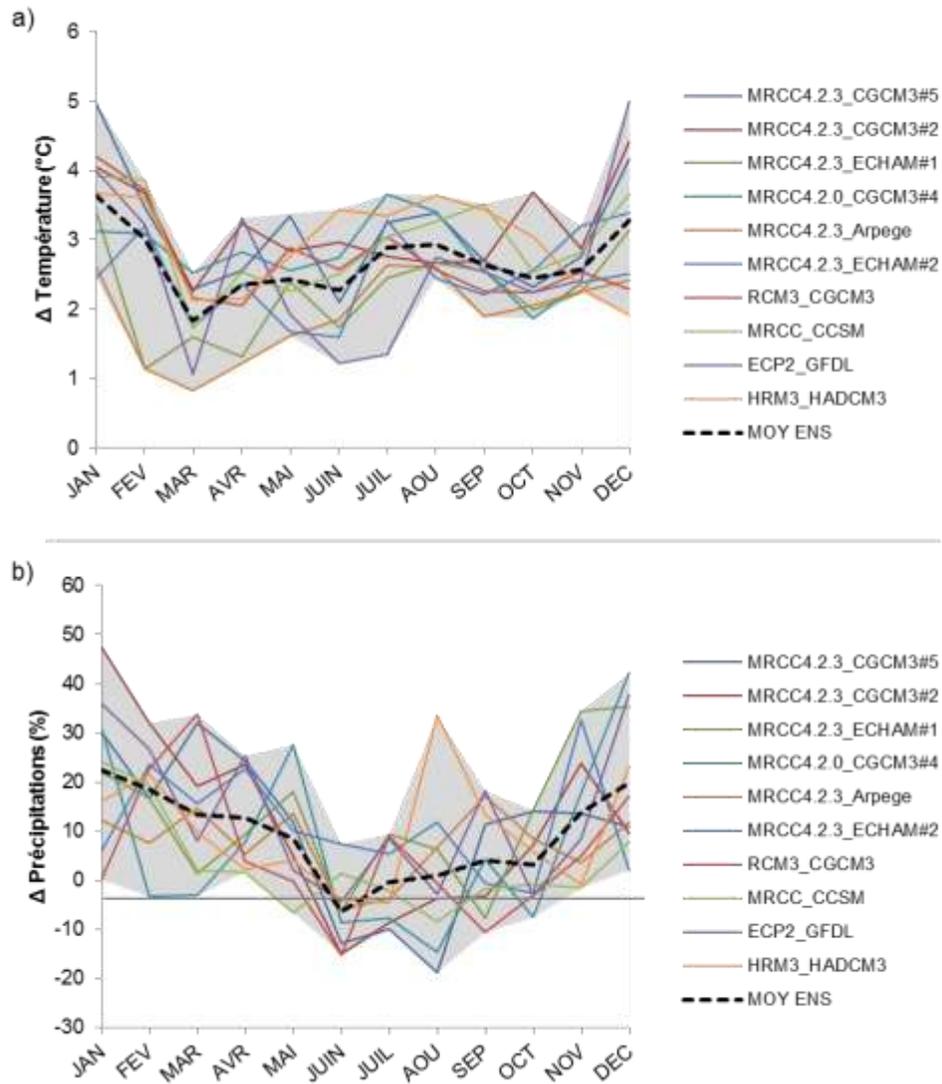


Figure 5.3 Changements de a) température et de b) précipitations moyennes projetés pour la période 2041-2070.

b) Synthèse des autres variables et indices climatiques évalués

Les résultats de l'ensemble des variables et indices climatiques évalués sont résumés au tableau 5.1. L'annexe 2 présente le détail de ces résultats. Les variables liées à la température montrent presque toutes des tendances significatives au cours de la période de référence 1971-2000 (pentes significativement différentes de zéro) selon le test de tendance de Mann-Kendall ($\alpha=0,05$), à l'exception de la baisse observée des degrés-jours de gel cumulés. La hausse observée dans les températures, surtout au cours de l'hiver, se traduit par une diminution de la longueur de la période de gel, ainsi qu'une atténuation générale de la rigueur de la saison hivernale (apparente dans la diminution du nombre de jours de gels et du nombre de jours de gel cumulés). Lorsque les distributions des simulations climatiques pour la période de référence et pour période future sont comparées, les différences au niveau des indices de température sont toutes significatives, selon le test de Wilcoxon-Mann-Whitney ($\alpha=0,05$).

Les variables et les indices liés aux précipitations ne présentent pas des tendances aussi marquées que celles des variables et indices liés à la température. Une augmentation générale des précipitations est présente dans les données observées (1971-2000), mais celle-ci n'est pas statistiquement significative. La différence entre les projections climatiques de référence et futures n'est pas non plus significative pour les précipitations moyennes annuelles. L'indice d'intensité des précipitations présente un cas particulier, dans la mesure où la tendance à la baisse observée dans les données observées est à l'inverse de la tendance à la hausse simulée par les modèles climatiques entre la période de référence et la période future. Toutefois, si la période observée est divisée en deux sous-périodes (1971-1985 et 1986-2000), la tendance à la baisse de la première moitié de la période s'inverse en tendance à la hausse dans la deuxième moitié de la période, ce qui concorde davantage avec les prévisions des modèles. Bien que les tendances à la hausse observées dans les données mesurées en termes de précipitations maximales (sur 24 h et sur cinq jours) ne s'avèrent pas significatives, les différences entre les projections climatiques de référence et futures vont dans le même sens que les tendances observées, et sont quant à elle significatives. Finalement, bien qu'une augmentation soit attendue au niveau des quantités de précipitations, aucune tendance significative n'est observée au niveau des jours consécutifs avec précipitations, tant dans la période observée que dans les périodes de référence et future simulées. Quant aux jours consécutifs sans précipitations, la tendance à la baisse présente dans les données observées ne s'accorde pas avec la légère augmentation (non significative) dans les simulations climatiques entre la période de référence et la période future.

Ces résultats indiquent des tendances davantage marquées pour les variables et les indices de température que pour les variables et les indices de précipitations. En ce qui concerne les précipitations, une augmentation générale des quantités est à prévoir, principalement l'hiver. La distribution temporelle des précipitations est également appelée à changer. Ces résultats vont dans le sens de ceux publiés par Mailhot *et al.* (2010) où un décalage des maxima annuels de précipitations de l'été vers le printemps et l'hiver ainsi qu'une période de retour diminuée de moitié par rapport aux valeurs historiques ont été suggérés pour le Québec à la fin du 21^e siècle.

Tableau 5.1 Synthèse des analyses statistiques sur les variables et indices climatiques évalués

	Tendance observée 1971-2000		Moyenne scénarios climatiques	
			REF	FUT
Variables et indices liés à la température				
Température moyenne (°C)		↑*	6,7	9,4*
Nombre de jours de gel		↓*	109	86*
Degrés-jours de gel cumulés		↓	849	579*
Longueur de la saison de gel (j)		↓*	116	92*
Variables et indices liés aux précipitations				
Précipitations totales (mm)		↑	920	992
Intensité des précipitations (mm/j)	1971-1985	↓*		
	1986-2000	↑	8,7	9,1*
Précipitations maximales sur 24 h (mm)		↑	43 64 (90 ^e p.)	46* 73 (90 ^e p.)*
Précipitations maximales sur 5 jours (mm)		↑	71 106 (90 ^e p.)	77* 119 (90 ^e p.)
Jours consécutifs avec précipitations	1971-1985	↑	7	7
	1986-2000	↓	10 (90 ^e p.)	10 (90 ^e p.)
Jours consécutifs sans précipitations		↓*	9	10
			14 (90 ^e p.)	14 (90 ^e p.)

* Les résultats statistiquement significatifs sont identifiés par un astérisque.

5.1.2. Résultats des analyses paléoclimatiques

Les grains de pollen, les macrorestes végétaux et les thécamoebiens présents dans la carotte de tourbe récoltée à la tourbière de Covey Hill ont été analysés. Les analyses ont été réalisées pour l'entièreté de la carotte sédimentaire (épaisseur de 350 cm). Les analyses des thécamoebiens ont été affinées (pas analytique plus serré) pour les 50 premiers centimètres de la carotte. Les résultats de l'analyse sont détaillés dans Lavoie *et al.* (soumis).

Les résultats de la reconstitution paléoclimatique quantitative déduite des assemblages polliniques apportent des informations complémentaires aux analyses microfossiles et des thécamoebiens (Figure 5.4). Les conditions climatiques les plus froides de la période post-glaciaire correspondent à l'époque tardiglaciaire, époque durant laquelle le couvert végétal régional correspondait à une toundra herbacée/arbustive. Les températures ont augmenté graduellement par la suite (entre -23 et -13 °C pour le mois de janvier; entre 13 et 19 °C pour le mois de juillet) jusque vers *ca* (*circa* : environ) 9 600 ans avant aujourd'hui (A.A.), avant de se stabiliser jusqu'à nos jours (moyenne de -11 °C pour le mois de janvier et de 19 °C pour le mois de juillet). Les précipitations moyennes annuelles étaient également minimales au Tardiglaciaire (420 mm an⁻¹), puis ont augmenté pour atteindre un maximum de 915 mm an⁻¹ vers 10 140 ans A.A. Elles sont demeurées stables par la suite jusque vers 7 300 ans A.A.

(moyenne de 810 mm an⁻¹). Finalement, une augmentation marquée caractérise les derniers 7 300 ans (moyenne de 1 030 mm an⁻¹). Les tendances d'évapotranspiration moyenne annuelle sont très similaires à celles de la température du mois de juillet, étant relativement stables depuis 9 000 ans A.A. (moyenne de 670 mm an⁻¹). Les augmentations de température projetées par les simulations climatiques pour l'horizon 2050 par rapport au passé récent (janvier : +3,5 °C; juillet : +3,0 °C) pourraient surpasser les températures les plus chaudes que la région ait connues depuis les derniers 13 000 ans. En revanche, l'augmentation de 9 % projetée pour les précipitations moyennes annuelles relativement au passé récent se situerait à l'intérieur de la gamme de précipitations connues sur la même période (moyenne annuelle de 950 mm à l'horizon 2050 par rapport à un maximum de 1 030 mm an⁻¹ au cours des derniers 7 300 ans).

La base (350-309 cm) de la carotte échantillonnée dans la tourbière est constituée de gytija silteuse contenant de la matière minérale. Cet horizon de gytija est ensuite surmonté de tourbe jusqu'au sommet de la carotte. Une tourbe d'herbacées domine de 309 à 50 cm. Les 50 cm supérieurs sont principalement composés de sphaignes. Un horizon de charbon de bois de quatre centimètres d'épaisseur (48-52 cm) marque la transition entre la tourbe d'herbacées et la tourbe de sphaignes. Cet horizon est présent sur l'entièreté de la tourbière à une profondeur similaire, approximativement 50 cm (Girard-Cloutier, 2007).

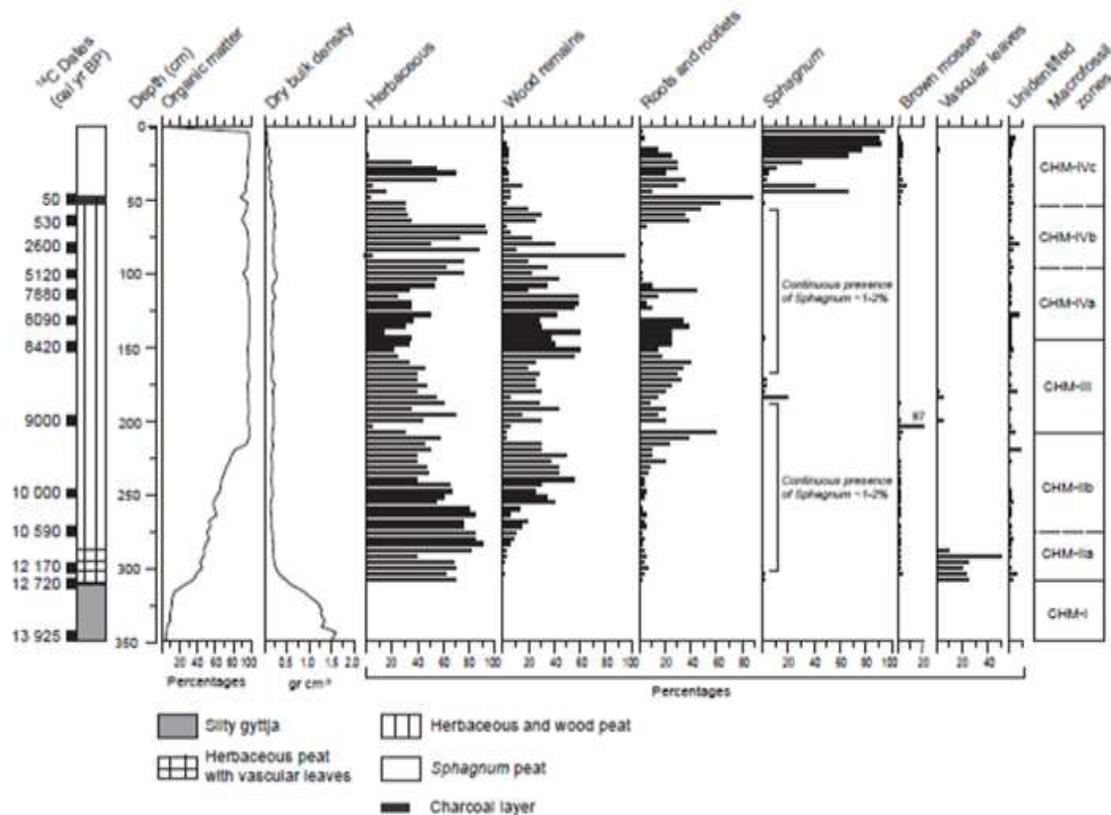


Figure 5.4 Datations au radiocarbone, stratigraphie, teneur en carbone organique, densité de la masse sèche et principaux groupes botaniques (exprimés en pourcentages) de la carotte analysée pour la reconstruction paléocologique (Lavoie *et al.*, soumis).

Un âge de 13 925 ans A.A. a été obtenu à la base de la gyttja silteuse. Toutefois, cette date est jugée pour le moment trop ancienne en comparaison à l'estimé du retrait des glaces et des inondations subséquentes (drainage du paléo-lac Iroquois) qui ont eu lieu entre 13 300 et 13 100 ans A.A. dans la région (Franzi *et al.*, 2007; Rayburn *et al.*, 2011; J. A. Rayburn, comm. pers.). L'âge maximal pour le commencement de l'accumulation de la gyttja silteuse a donc plutôt été estimé à 13 100 ans A.A. Le commencement de l'accumulation de la tourbe a été daté à 12 720 ans A.A. et il correspond à la constitution des premières forêts ouvertes (afforestation) dans la région du mont Covey Hill (12 900 ans A.A.) caractérisées par la présence de l'épinette noire (*Picea mariana*) du peuplier (*Populus sp.*).

Trois périodes principales subséquentes à l'accumulation de la gyttja silteuse ont été définies dans les taux d'accumulation sédimentaire de la tourbe selon le modèle âge-profondeur (Figure 5.5). Le taux d'accumulation a été élevé entre 12 720 et 7 800 ans A.A. (309-315 cm), avec une accumulation moyenne de 0,040 cm an⁻¹. Un ralentissement important s'est produit de 7 880 à 530 ans A.A. (115-60 cm; moyenne de 0,007 cm an⁻¹), associé à de la tourbe fortement décomposée. Le taux net d'accumulation a augmenté au sommet de la carotte, alors que la sphaigne devient la composante principale de la tourbe. Selon ce modèle, 194 cm de tourbe ont été accumulés au cours des premiers 4 840 ans de la tourbière (de 12 720 à 7 880 ans A.A.; suite à l'accumulation de la gyttja silteuse). Ceci correspond à 63 % de l'accumulation verticale, alors que les 37 % restants (115 cm) se sont accumulés au cours des derniers 7 880 ans.

À l'aide des données stratigraphiques, des assemblages macrofossiles, des assemblages des thécamoebiens et d'autres informations complémentaires (composantes botaniques principales de la tourbe, degrés de décomposition), quatre principales étapes ont été reconstituées dans le développement de la tourbière au point d'échantillonnage :

1. Phase d'étang - Zone CHM-I (350-310 cm; >12 720 ans A.A)
2. Phase de fen riche - Zone CHM-II (310-210 cm; 12 720 à ca 9200 ans A.A)
3. Phase de fen pauvre - Zone CHM-III (210-142 cm; ca 9200 à ca 8290 ans A.A)
4. Phase de bog - Zone CHM-IV (142-0 cm; ca 8290 ans A.A. à aujourd'hui).

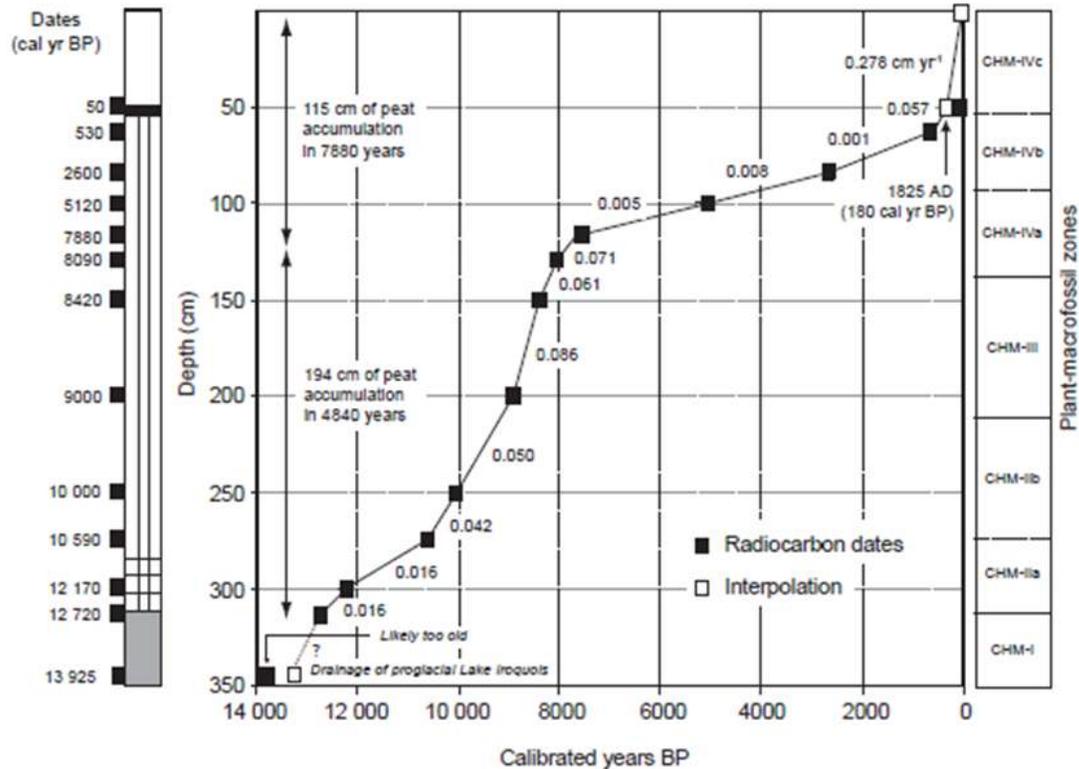


Figure 5.5 Modèle âge-profondeur de la carotte sédimentaire. Les taux nets d'accumulation sédimentaire (cm an^{-1}) sont indiqués. Les symboles utilisés pour décrire la composition de la matière organique sont définis à la figure 5.4 (Lavoie *et al.*, soumis).

5.1.3. Précipitations nettes et niveaux de nappe de 1900 à 2010

Les données d'apports verticaux (AV) et de température fournies par le CEHQ pour le dernier siècle ont permis de calculer les précipitations nettes pour cette période, c.-à-d. l'eau disponible pour le ruissellement de surface et la recharge en eau souterraine (Figure 5.6). Comme l'évolution de l'ETP présente des fluctuations interannuelles relativement faibles par rapport à celles des AV, l'évolution des Pnet se rapproche de celle des AV. Les Pnet varient beaucoup d'une année à l'autre, d'un minimum de 208 mm (1964) à un maximum de 754 mm (1918). Une tendance à la hausse (test de Mann-Kendall; $p < 0.001$) est détectable dans les données d'ETP sur toute la période. Cette tendance a pour effet de faire diminuer légèrement, mais significativement d'un point de vue statistique, les Pnet (test de Mann-Kendall; $p = 0.011$) sur toute la période compte tenu de la relative stationnarité des AV (test de Mann-Kendall; $p = 0.783$). La moyenne mobile des Pnet, centrée sur 10 ans et appliquée sur 100 ans de données, permet de faire ressortir les tendances dans la série temporelle (Figure 5.7). Ces données montrent une diminution des Pnet de 1900 à 1950, une accélération de cette diminution de 1950 à 1970, suivie d'une hausse entre 1965 et 1975, d'une baisse de 1975 à 1985 et d'une stabilisation de 1985 à 2010.

La moyenne mobile des Pnet a été associée aux niveaux de nappe inférés à partir des assemblages de thécamoebiens retrouvés dans la carotte de tourbe échantillonnée dans la tourbière de Covey Hill (Figure 5.7). Les profondeurs de nappe associées aux thécamoebiens varient de 13,7 à 24,0 cm sous la surface. Les thécamoebiens sont présents dans la tourbe depuis la phase de bog (Zone IV) dans l'évolution de la tourbière. Des conditions particulièrement sèches sont identifiées dans la carotte de tourbe entre 96 et 54 cm de profondeur, équivalant à des profondeurs de nappe entre 26 et 38 cm. Un niveau plus élevé de la nappe (profondeurs variant entre 14 et 24 cm de profondeur) caractérise la partie supérieure de la carotte correspondant aux derniers siècles.

Le fait que l'intervalle de temps diffère entre les données des deux séries représente un défi pour la quantification statistique (p. ex. par analyses corrélatoires croisées) du lien entre les Pnet et les niveaux de nappe déterminés à l'aide des thécamoebiens. Une évaluation qualitative peut néanmoins être réalisée. Les résultats montrent peu de liens entre la profondeur des niveaux de nappe et les Pnet entre 1900 et 1940. C'est aussi pendant cette période que l'estimation des AV pour la région de Covey Hill est la moins précise, en raison de la faible densité de stations nivométriques environnantes. Suivant le développement du réseau de stations, la fiabilité du calcul des AV s'améliore graduellement jusqu'aux années 1970 pour devenir très bonne à partir de 1980. Les séries temporelles d'AV et de Pnet montrent d'ailleurs un certain synchronisme entre 1950 et 2010 alors qu'une augmentation des Pnet entraîne généralement une élévation des niveaux de nappe.

Cette analyse permet de poser l'hypothèse que les variations de Pnet générées au moyen des AV sont représentatives des conditions climatiques ayant prévalu à Covey Hill au cours du dernier siècle. Ceci justifie l'utilisation de ces données pour simuler les conditions paléohydrologiques récentes sur le mont Covey Hill (voir section 5.2.1).

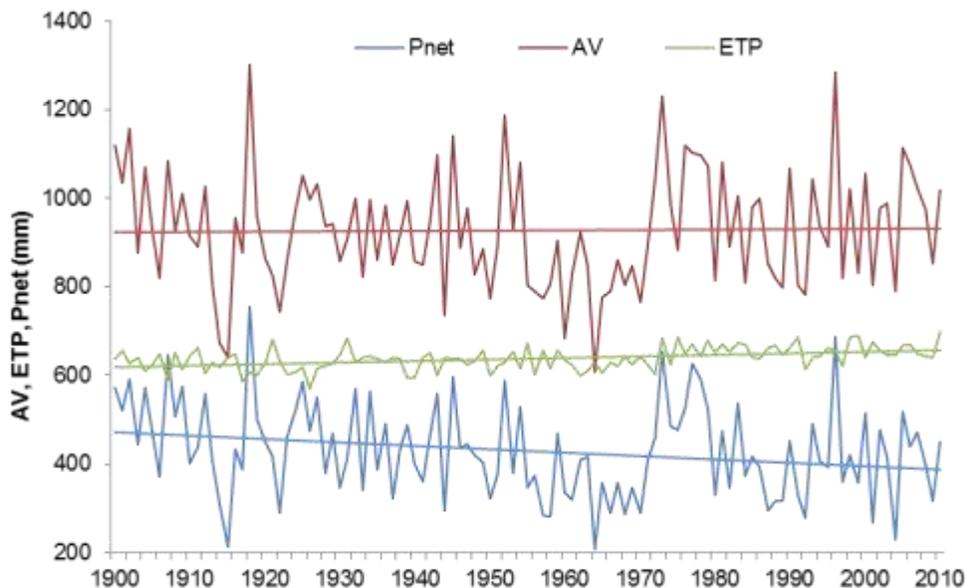


Figure 5.6 Évolution des apports verticaux (AV), de l'évapotranspiration (ETP) et de la précipitation nette (Pnet) de 1900 à 2010.

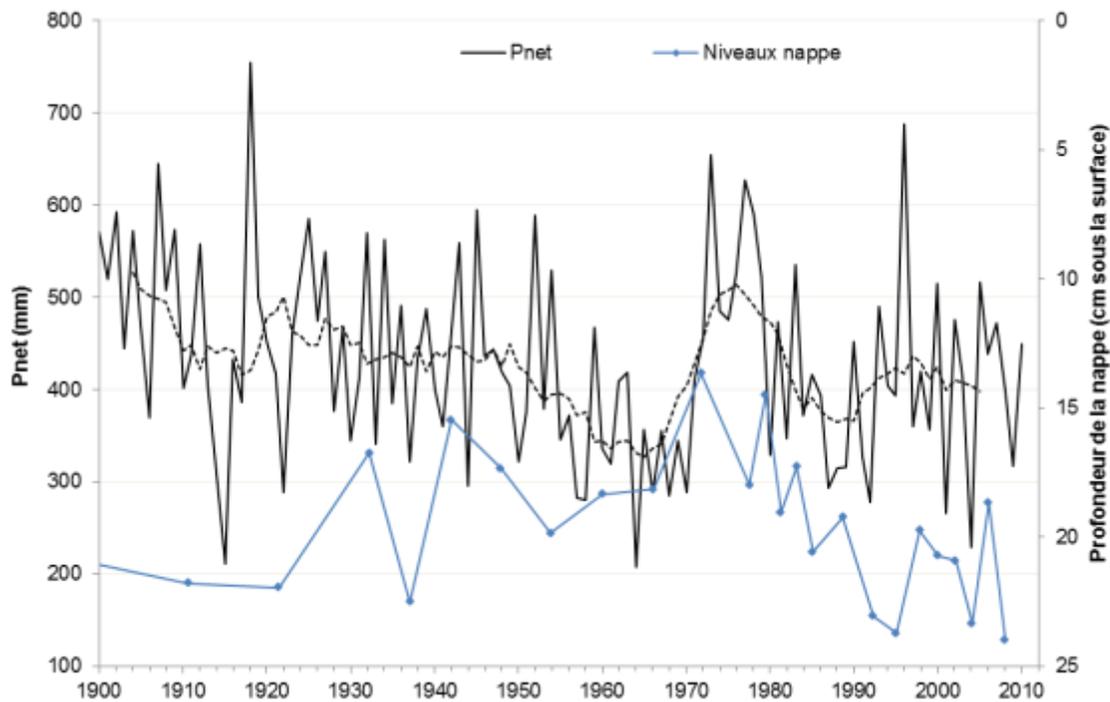


Figure 5.7 Évolution des précipitations nettes (Pnet) et des niveaux de nappe inférés par l'analyse des thécamoebiens dans carotte de tourbe de Covey Hill. La ligne pointillée représente la moyenne mobile centrée sur 10 ans.

5.1.4. Synthèse des données de nature climatique

Les approches utilisées dans ce projet permettent d'analyser les données climatiques sur différents horizons temporels (derniers millénaires, dernier siècle, passé récent et futur). En résumé, les données analysées permettent de faire les constats suivants :

- Selon l'analyse pollinique, les conditions de températures que l'on connaît aujourd'hui semblent s'être stabilisées il y a environ 9 600 ans, contrairement aux précipitations qui ont connu une augmentation marquée au cours des 7 300 dernières années.
- La dynamique du développement de la tourbière de Covey Hill suggère que les conditions climatiques régionales plus sèches pendant l'Holocène inférieur ne semblent pas avoir été un obstacle à l'entourbement puisque la tourbière présente un taux d'accumulation verticale important lors de cette période.
- L'accumulation verticale plus faible de la tourbe au cours de l'Holocène moyen et de l'Holocène supérieur pourrait être expliquée par les températures plus élevées entraînant des taux d'évapotranspiration plus importants qui auraient contrebalancé les précipitations plus importantes au cours de ces périodes.

- Les augmentations de température projetées par les simulations climatiques pour l'horizon 2050 (janvier : +3,5 °C; juillet : +3,0 °C) pourraient surpasser les températures les plus chaudes que la région ait connues depuis les derniers 13 000 ans. En revanche, l'augmentation de 9 % projetée pour les précipitations moyennes annuelles se situerait à l'intérieur de la gamme de précipitations connues sur la même période.
- Les tendances de températures et de précipitations qui se dégagent de l'analyse paléoclimatique pour l'Holocène supérieur concordent avec celles obtenues par l'analyse des Pnet et des thécamoebiens au cours du dernier siècle.
- L'analyse des Pnet et des thécamoebiens sur la période 1900-2010 indique une grande variabilité du climat au cours des derniers 110 ans, incluant une tendance à la baisse des Pnet sur cette période. Toutefois, si l'on divise la période en deux (1900-1965 et 1966-2010), une inversion de la tendance est observée dans la seconde moitié du siècle. Ceci suggère que l'augmentation des précipitations projetée pour l'horizon 2050 pourrait avoir comme effet de contrebalancer l'augmentation de la température (et de l'évapotranspiration) et n'occasionnerait donc pas de baisse importante de l'eau disponible à la recharge, ni par conséquent des niveaux piézométriques, sur le mont Covey Hill.
- Les données issues des scénarios climatiques indiquent une augmentation significative des températures entre la période de référence (1971-2000) et l'horizon 2041-2070.
- Les précipitations moyennes annuelles augmentent également entre ces deux périodes, mais pas de manière significative. L'intensité des précipitations (sur 24 heures et 5 jours) augmente toutefois significativement.

5.2. Simulation de l'écoulement en conditions actuelles, passées et futures

5.2.1. Modèle MODFLOW

a) Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité du modèle MODFLOW montre que les conductivités hydrauliques et la recharge ont un impact de même envergure sur la charge hydraulique moyenne (ou niveaux de nappe moyens), mais en sens opposé (Figure 5.8a et b). Une augmentation des conductivités hydrauliques entraîne une diminution des charges et vice-versa ($S_r < 0$). Ceci s'explique par le fait qu'une augmentation de la conductivité hydraulique facilite l'écoulement souterrain tandis qu'une baisse de la conductivité hydraulique limite l'écoulement et favorise des charges plus élevées. À l'inverse, une augmentation de la recharge entraîne une augmentation de la charge moyenne et vice-versa ($S_r > 0$). Les conductivités de la zone 1 (tourbière) influencent peu la charge moyenne qui est surtout déterminée par les conductivités hydrauliques des zones 2, 3 et 4. De manière similaire, la recharge sur la zone 1 a peu d'impact sur la charge moyenne. Il est important de souligner que la recharge sur la zone 1 a un impact direct sur les échanges aquifère-tourbière (cf. Levison *et al.*, soumis) mais que cette variable n'a pas été étudiée dans ce projet. La charge moyenne sur la colline est surtout influencée par la recharge dans les zones 2, 3 et 6 (noter que la recharge de la zone 8 n'apparaît pas sur les figures puisqu'elle est nulle). La recharge sur ces zones d'altitude moyenne contrôle donc la dynamique des niveaux de nappe sur la colline.

Les conductivités hydrauliques ont un effet plus limité que la recharge sur les débits de base des trois cours d'eau (Figure 5.8c et d). Les deux effets sont ici aussi en sens opposé, pour les mêmes raisons que mentionnées plus haut. C'est la conductivité hydraulique de la zone 4 qui a le plus grand impact sur les débits de base. Ceci s'explique par la position plus en aval de cette zone qui contrôle l'écoulement de l'eau provenant de l'amont. La recharge des zones 2, 3, 5 et 6 a un effet dominant sur les débits de base, en raison probablement de la proximité de ces zones avec les cours d'eau. Cette information est importante pour la protection des habitats de salamandres pourpres, qui n'ont pas été étudiées directement dans ce projet, mais qui dépendent directement de la dynamique des cours d'eau.

Les débits des résurgences sont très fortement influencés par une variation des conductivités hydrauliques des zones 2, 3 et 4 (c.-à-d. presque toute la zone simulée) et par la recharge des zones 4, 5, 6 et 7 (c.-à-d. les portions situées du côté nord de la colline) (Figure 5.8e et f). Une augmentation des conductivités hydrauliques de la zone 2 entraîne une augmentation des débits des résurgences ($S_r > 0$), tandis que l'effet est contraire pour les autres zones ($S_r < 0$). Ceci s'explique par le fait que les résurgences sont principalement situées dans la zone 2 et sont directement dépendantes des volumes d'eau transportés. Une augmentation des conductivités hydrauliques des zones 3 et 4, en aval des résurgences, a pour effet de faciliter l'écoulement souterrain, de réduire les charges, et donc de diminuer les débits aux résurgences. Une variation de la recharge entraîne une variation des débits aux résurgences dans le même sens pour toutes les zones ($S_r > 0$). Il est important de souligner que l'impact des zones de conductivité 3 et 4 et des zones de recharge 4, 5, 6 et 7 sur les débits des résurgences est très élevé ($S_r > 1$). Dans le modèle MODFLOW, les débits aux résurgences sont donc des variables très sensibles, à la fois aux variations de conductivité hydraulique et à la recharge. Il est possible que cette sensibilité très élevée soit due à la représentation des résurgences au moyen de drains dans ce modèle. Les résultats montrent néanmoins un lien de cause à effet très clair. Des initiatives de conservation visant à maintenir les débits aux résurgences devraient cibler prioritairement la recharge sur la portion nord de la colline.

Cette analyse de sensibilité montre que les principales variables du modèle (charges et débits) sont stables vis à vis une erreur dans l'estimation des conductivités hydrauliques et de la recharge. Le modèle est donc fiable pour ces variables. Les résultats montrent que le débit aux résurgences est la variable la plus sensible dans le modèle MODFLOW, particulièrement sensible à une variation de recharge. Cette sensibilité élevée provient sans doute du fait que les résurgences ne sont pas représentées explicitement comme des fractures atteignant la surface, mais plutôt indirectement comme des zones d'inondation locale. Il est important de rappeler ici que le modèle MODFLOW représente l'aquifère comme un milieu poreux et que la recharge est distribuée sur la surface au lieu d'être concentrée dans les zones de fracture. La modélisation avec HGS permet de palier à certaines de ces limites.

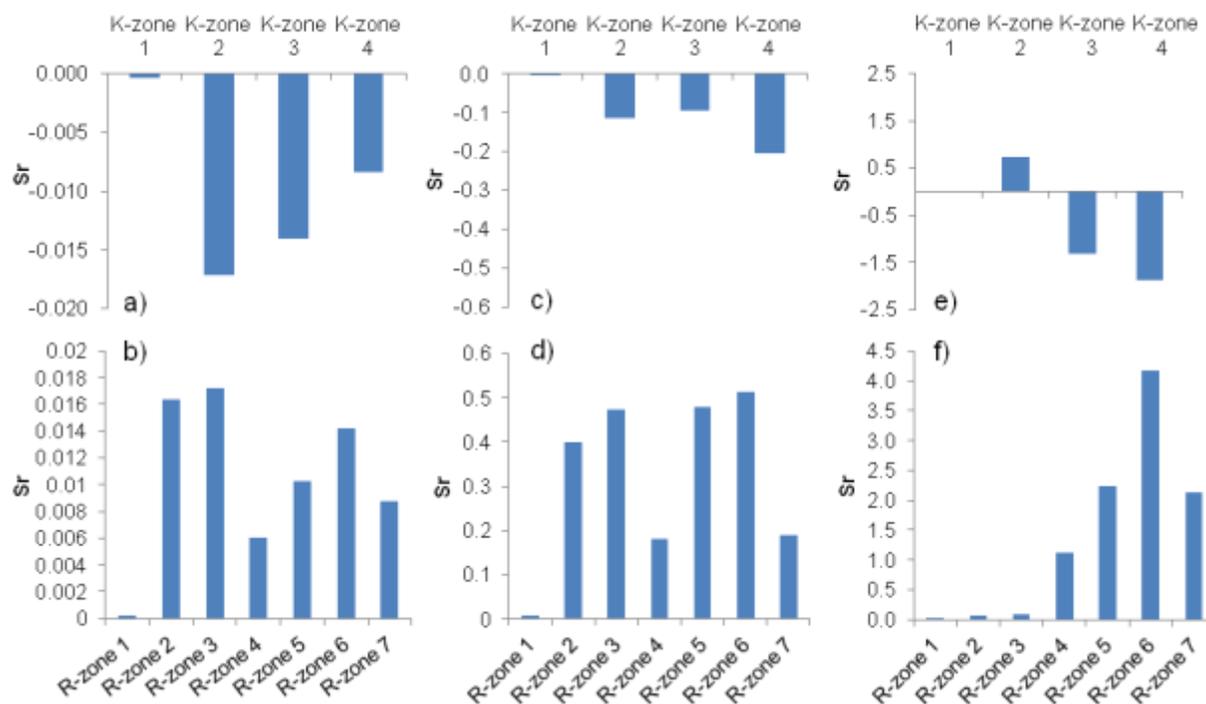


Figure 5.8 Sensibilité des charges a) aux variations de conductivité hydraulique et b) aux variations de recharge; sensibilité des débits de base c) aux variations de conductivité hydraulique et d) aux variations de recharge; sensibilité des débits aux résurgences e) aux variations de conductivité hydraulique et f) aux variations de recharge.

b) Simulation des conditions d'écoulement de 1900 à 2010

Les figures 5.9, 5.10 et 5.11 illustrent les recharges annuelles (calculées à partir des Pnet, suivant l'approche de Levison *et al.*, soumis), les charges moyennes annuelles (moyennes sur tout le domaine simulé), les débits moyens des résurgences ainsi que les débits de base des cours d'eau de 1900 à 2010. Toutes les chroniques montrent des variations similaires. Jusqu'au début des années 1950, les résultats montrent une grande variabilité temporelle. Tel que mentionné précédemment, la fiabilité des valeurs d'apports verticaux est limitée jusqu'au milieu du siècle. Leur fiabilité augmente par la suite au fur et à mesure que les stations météorologiques se sont multipliées.

La recharge moyenne varie de 0,052 à 0,248 m/année (Figure 5.9). Les valeurs varient de façon importante d'une année à l'autre, mais incluent la recharge moyenne de 0,113 m/année calée par Levison *et al.* (soumis). Comme pour les Pnet, la recharge diminue généralement de 1900 à 1950 et la baisse s'accélère ensuite jusqu'en 1965. La recharge augmente ensuite pendant une décennie (1965 à 1975), pour diminuer au cours de la décennie suivante (1975-1985) et ensuite se stabiliser. La tendance à la baisse sur le siècle, tant pour la recharge que pour les charges moyennes, est significativement différente de zéro selon le test de tendance de Mann-Kendall ($\alpha=0,05$). Lorsque la période est étudiée en deux sous-périodes distinctes, de 1900 à 1965 et de 1966 à 2010, les tendances sont quelque peu différentes. La tendance à la baisse de 1900 à 1965 est toujours significative, alors que la deuxième portion du siècle,

de 1966 à 2010, présente plutôt une légère tendance à la hausse, mais celle-ci est non significative.

Les débits moyens annuels simulés aux résurgences varient de 0,00013 à 0,00195 m³/s, ce qui est supérieur à la valeur de 0,00009 m³/s estimée sur le terrain en mai 2010 (il est supposé que les débits au moment de la fonte sont plus élevés que ceci) (Figure 5.10). Vu l'absence de mesures de débits fiables, ces résultats sont considérés acceptables. La période de recharge plus faible de 1950 à 1965 a un effet marqué très visible sur les débits des résurgences qui diminuent significativement. Les résultats des tests de tendance sont identiques à ceux sur la recharge et les charges moyennes, c'est-à-dire une tendance à la baisse significative sur le siècle entier et sur la période 1900-1965, et une tendance à la hausse non significative de 1966 à 2010.

Les débits de base moyens annuels simulés au ruisseau Allen varient de 0,031 à 0,130 m³/s. À la rivière aux Outardes, ils varient de 0,027 à 0,071 m³/s, tandis que pour le ruisseau Schulman, ils varient de 0,005 à 0,013 m³/s (Figure 5.11). Ces débits se comparent aux intervalles de 0,08-0,20 m³/s (ruisseau Allen), 0,05-0,24 m³/s (rivière aux Outardes) et 0,006-0,22 m³/s (ruisseau Schulman) déterminés au moyen de la séparation des hydrogrammes par Levison *et al.* (soumis). Comme pour les débits aux résurgences, la période de recharge plus faible de 1950 à 1965 a un effet marqué très visible sur les débits de base qui diminuent significativement. Les résultats des tests de tendance sont identiques à ceux pour la recharge, les charges moyennes et les débits aux résurgences. Il est important de souligner qu'aucun des trois cours d'eau ne s'assèche pendant les 110 années simulées. Ces résultats revêtent une importance particulière puisque les cours d'eau du mont Covey Hill sont des habitats pour la salamandre pourpre.

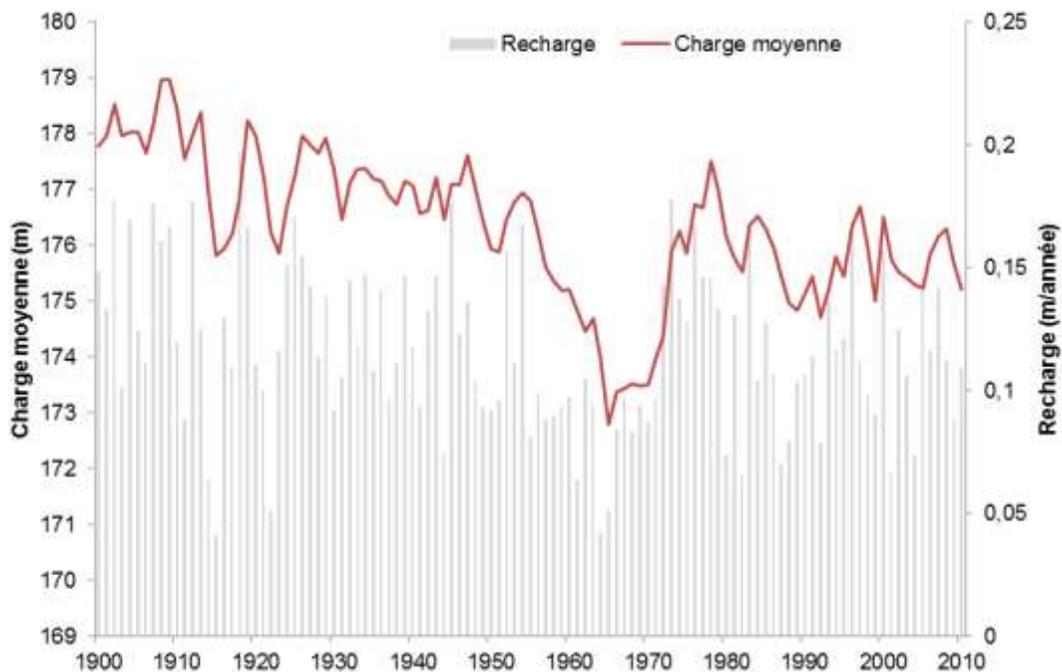


Figure 5.9 Charges moyennes simulées et recharge annuelle de 1900 à 2010.

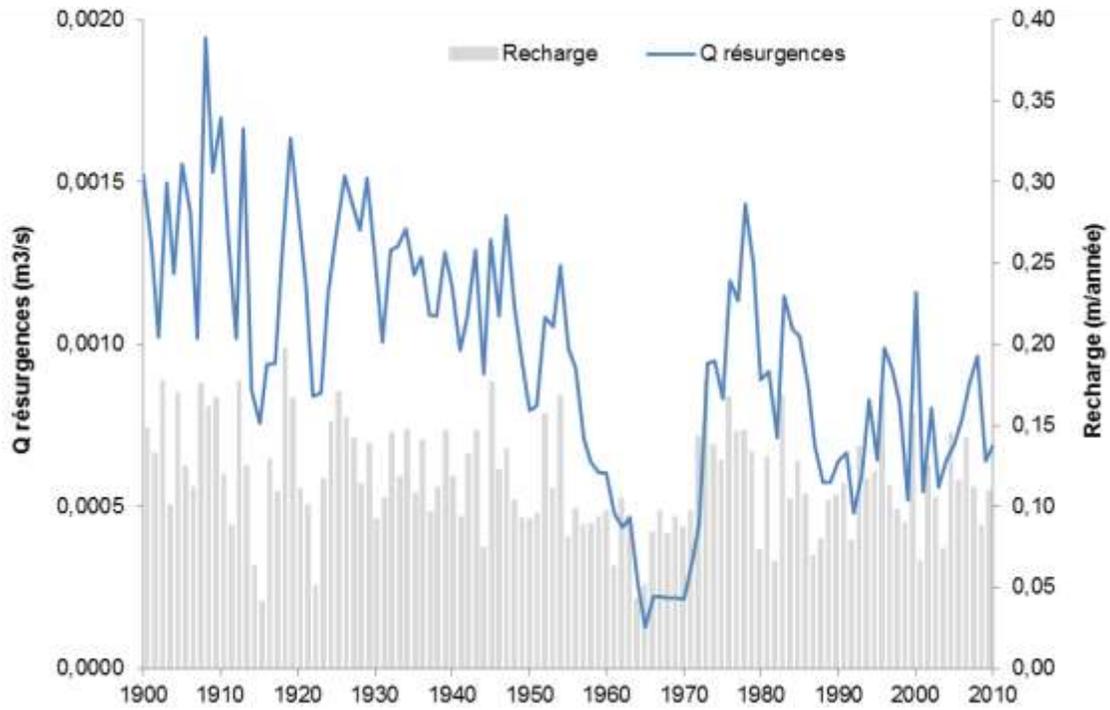


Figure 5.10 Débits aux résurgences moyens annuels simulés et recharges annuelles de 1900 à 2010.

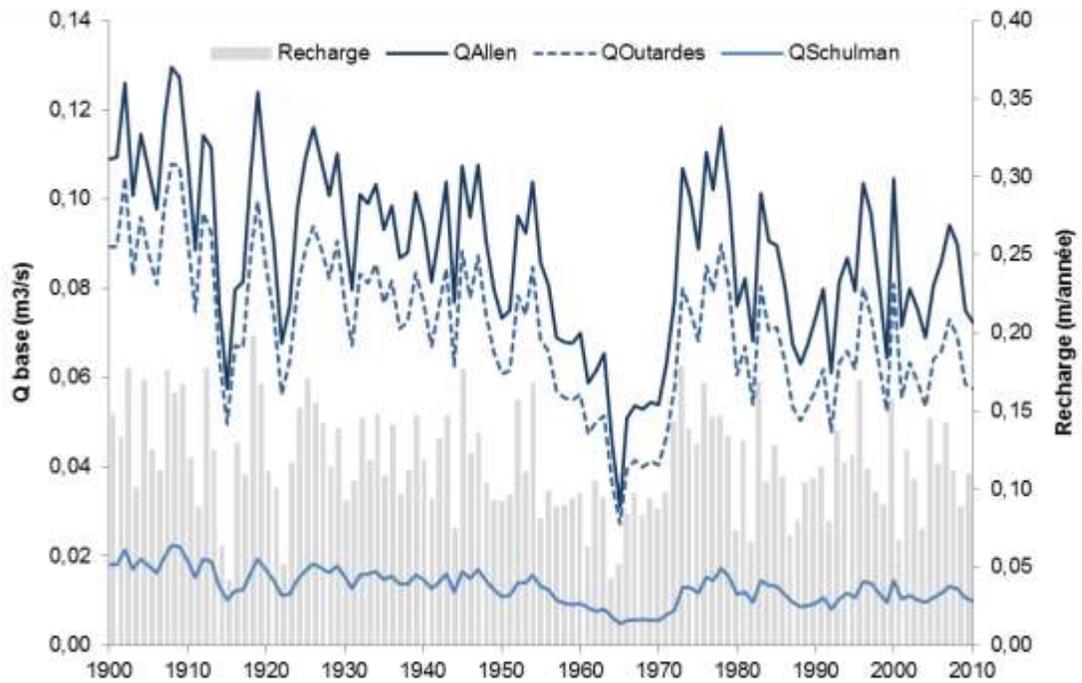


Figure 5.11 Débits de base moyens annuels simulés dans le ruisseau Allen, dans la rivière aux Outardes et dans le ruisseau Schulman, et recharge annuelle de 1900 à 2010.

c) Simulation des scénarios climatiques

Le modèle MODFLOW a été utilisé pour simuler les charges et les débits pour les 10 scénarios climatiques pour la période de référence (1971-2000) et la période future (2041-2070). Les résultats des deux périodes sont comparés entre eux dans le but de vérifier s'il existe une différence statistiquement significative entre les deux périodes. Une différence significative est alors interprétée comme un impact possible des changements climatiques sur cette variable. Les résultats des scénarios climatiques sont également comparés à ceux obtenus pour la période 1971-2000 avec les données de la station de Hemmingford, de même qu'à ceux provenant de la simulation 1900-2010.

1. Recharge moyenne de l'aquifère

La recharge moyenne obtenue à partir des données observées pour la période de référence est de 0,124 m/année (Figure 5.12). La recharge moyenne obtenue sur la période de 1900 à 2010 est légèrement inférieure, se chiffrant à 0,117 m/année. La variabilité observée sur le dernier siècle est toutefois plus importante que sur la période de 1971 à 2000, passant d'un minimum de 0,041 m/année à un maximum de 0,198 m/année, alors que l'étendue de 1971 à 2000 varie de 0,052 à 0,170 m/année. En période de référence, les simulations climatiques réussissent à bien représenter les données observées (moyenne de 0,128 m/année), mais présentent une variabilité un peu plus importante que celle obtenue avec les valeurs observées de 1971 à 2000. La variabilité de l'ensemble des simulations climatiques en période de référence est également plus importante que celle observée sur le dernier siècle. En climat futur, la majorité des simulations (sept sur dix) projettent une augmentation de la recharge, mais cette augmentation n'est pas statistiquement significative lorsque les simulations sont analysées séparément. Il est toutefois reconnu que la moyenne d'un ensemble de simulations est plus fiable que chacune des simulations considérées séparément. Dans ce cas-ci, la moyenne de l'ensemble indique une augmentation de 0,008 m/année par rapport à la période de référence. Cette augmentation est significative à $\alpha=0,05$ selon le test de Wilcoxon-Mann-Whitney.

2. Niveaux piézométriques (charges) moyens

La moyenne des niveaux piézométriques lors de la période de référence observée est de 176,56 m (Figure 5.13). Bien que la différence soit non significative, cette valeur est légèrement supérieure à la valeur moyenne obtenue pour le dernier siècle de 176,33 m. Comme l'on peut s'y attendre, la variabilité sur la période 1900 à 2010 est plus importante que celle sur la période 1971 à 2000. La variabilité des niveaux piézométriques sur le dernier siècle est également supérieure à celle simulée par les simulations climatiques en période de référence, bien que ces derniers représentent tout de même bien la tendance centrale des niveaux avec une valeur moyenne de l'ensemble de 176,48 m. En climat futur, les niveaux issus de l'ensemble des simulations climatiques sont passablement variables (allant d'une valeur médiane de 176,07 m pour le modèle MRCC_CCSCM à une valeur médiane de 178,47 m pour le modèle MRCC4.2.3_CGCM3#5). La moyenne de l'ensemble prévoit une augmentation de 0,78 m. Les différences entre la période de référence et la période future est statistiquement significative selon le test de Wilcoxon-Mann-Whitney ($\alpha=0,05$) pour tous les modèles à l'exception du modèle HRM3_HADCM3.

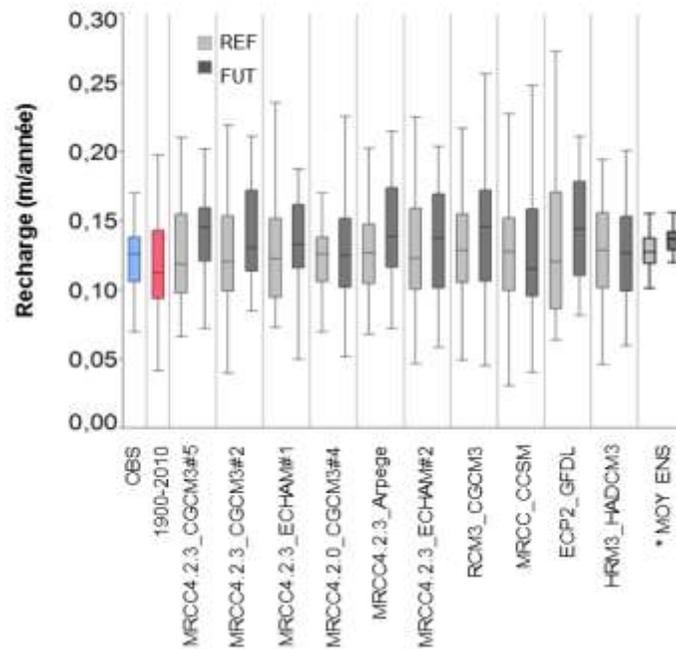


Figure 5.12 Recharge moyenne de l'aquifère. L'astérisque indique que la moyenne de l'ensemble des modèles en période future est significativement différente de la moyenne de l'ensemble des modèles en période de référence selon le test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés ($\alpha=0,05$).

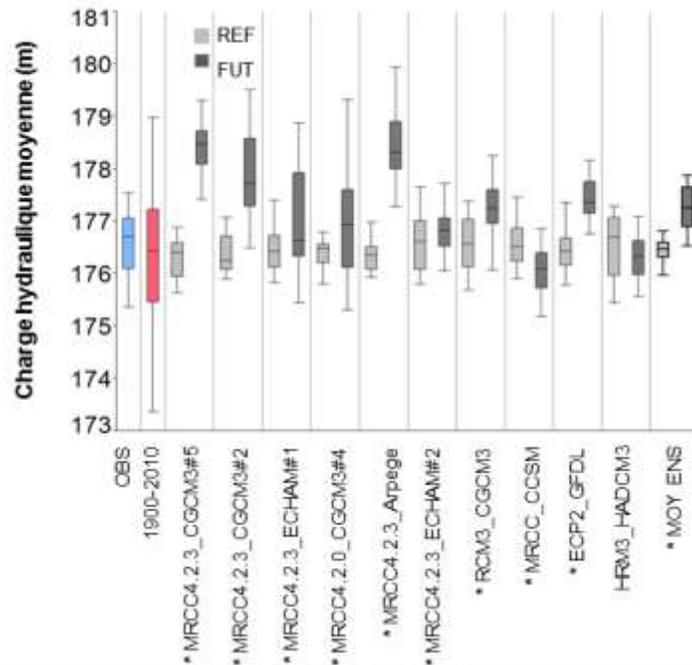


Figure 5.13 Niveaux piézométriques moyens mensuels. Les astérisques indiquent les modèles en période future qui présentent une différence significative par rapport à la période de référence selon le test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés ($\alpha=0,05$).

3. Débit total des résurgences (moyenne des neuf résurgences étudiées)

Au cours de la période de référence observée, les résultats indiquent une valeur médiane de débit aux résurgences de $1,09 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, mais allant d'un minimum de $0,67 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ à un maximum de $1,51 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (Figure 5.14). La médiane des débits aux résurgences sur la période de 1900 à 2010 est légèrement inférieure à la médiane de la période observée, se chiffrant à $0,96 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, mais la variabilité internannuelle sur la période est plus importante, passant de $0,13 \times 10^{-3}$ à $1,95 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Les simulations climatiques, en période de référence, reproduisent de façon satisfaisante la médiane et la variabilité internannuelle des données observées entre 1971 et 2000, la moyenne de l'ensemble s'élevant à $1,09 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ pour cette période. La majorité des simulations climatiques, à l'exception des modèles MRCC_CCSM et HRM3_HADCM3, indiquent une augmentation des débits aux résurgences en période future. La moyenne de l'ensemble des simulations projette une augmentation de $0,23 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, une augmentation relative de 21,1 %. Les différences entre la période de référence et la période future sont statistiquement significatives selon le test de Wilcoxon-Mann-Whitney ($\alpha=0,05$) pour tous les modèles à l'exception des modèles MRCC4.2.3_ECHAM#2 et HRM3_HADCM3.

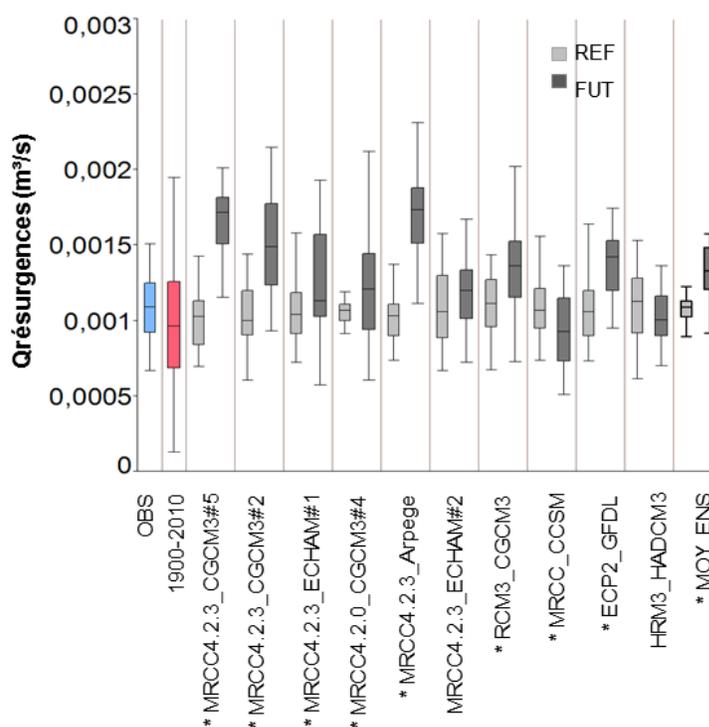


Figure 5.14 Débits totaux des résurgences. Les astérisques indiquent les modèles en période future qui présentent une différence significative par rapport à la période de référence selon le test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés ($\alpha=0,05$).

4. Débit de base des trois cours d'eau étudiés

Les débits de base des trois cours d'eau étudiés présentent des tendances similaires à celles observées pour les débits aux résurgences (Figure 5.15). De 1971 à 2000, les données observées indiquent des valeurs médianes de 0,095, 0,076 et 0,014 m³/s pour le ruisseau Allen, la rivière aux Outardes et le ruisseau Schulman, respectivement. Les valeurs médianes des débits sur la période de 1900 à 2010 sont légèrement inférieures à ces valeurs (Allen : 0,089 m³/s; Outardes : 0,071 m³/s ; Schulman : 0,013 m³/s). Dans les trois cas, la variabilité interannuelle sur le dernier siècle est plus importante que celle entre 1971 et 2000, tel qu'attendu. Les simulations climatiques reproduisent adéquatement tant la tendance centrale que la variabilité annuelle observée au cours de la période de référence, les moyennes de l'ensemble en climat de référence se chiffrant à 0,094, 0,074 et 0,014 m³/s pour le ruisseau Allen, la rivière aux Outardes et le ruisseau Schulman, respectivement. En période future, les simulations climatiques projettent les mêmes tendances pour les trois cours d'eau, c.-à-d. la majorité des simulations projettent une augmentation, au même titre que la moyenne des simulations climatiques (Allen : +0,008 m³/s ou +8 % ; Outardes : +0,008 m³/s ou +10,8 %; Schulman : +0,002 m³/s ou 14,3 %). Les différences entre la période de référence et la période future sont statistiquement significatives selon le test de Wilcoxon-Mann-Whitney ($\alpha=0,05$), à l'exception des modèles MRCC4.2.3_ECHAM#2, MRCC_CCSM et HRM3_HADCM3.

e) Synthèse

Le tableau 5.2 présente une synthèse des résultats de l'analyse statistique avec MODFLOW. En résumé, les résultats de la modélisation avec MODFLOW permettent de faire les observations suivantes :

- Les différents résultats du modèle MODFLOW sont sensibles à la recharge partout sauf au sommet et à la base de la colline (charges moyennes), dans les secteurs près des cours d'eau (débits de base) et dans la portion nord de la colline (débits aux résurgences). Pour une protection des niveaux actuellement observés de toutes ces variables, des mesures de conservation devraient être implantées sur l'ensemble de la colline.
- Au cours de la période 1900-2010, la recharge montre une tendance générale à la baisse qui se reflète dans les charges, les débits aux résurgences et les débits de base.
- La tendance de ces mêmes variables pour la deuxième portion du siècle, de 1966 à 2010, semble par contre indiquer une inversion vers une légère augmentation. Ceci suggère que l'augmentation des précipitations projetée pour l'horizon 2050 pourrait avoir comme effet de contrebalancer l'augmentation de la température (et de l'évapotranspiration) et n'occasionnerait donc pas de baisse importante de l'eau disponible à la recharge, ni par conséquent des niveaux piézométriques, sur le mont Covey Hill.
- Cette tendance à la hausse vers la fin du 20^e siècle correspond aux changements projetés par les simulations climatiques en climat futur (période 2041-2070), c.-à-d. que pour toutes les variables, les simulations climatiques projettent une augmentation par rapport à la période de référence de 1971-2000.

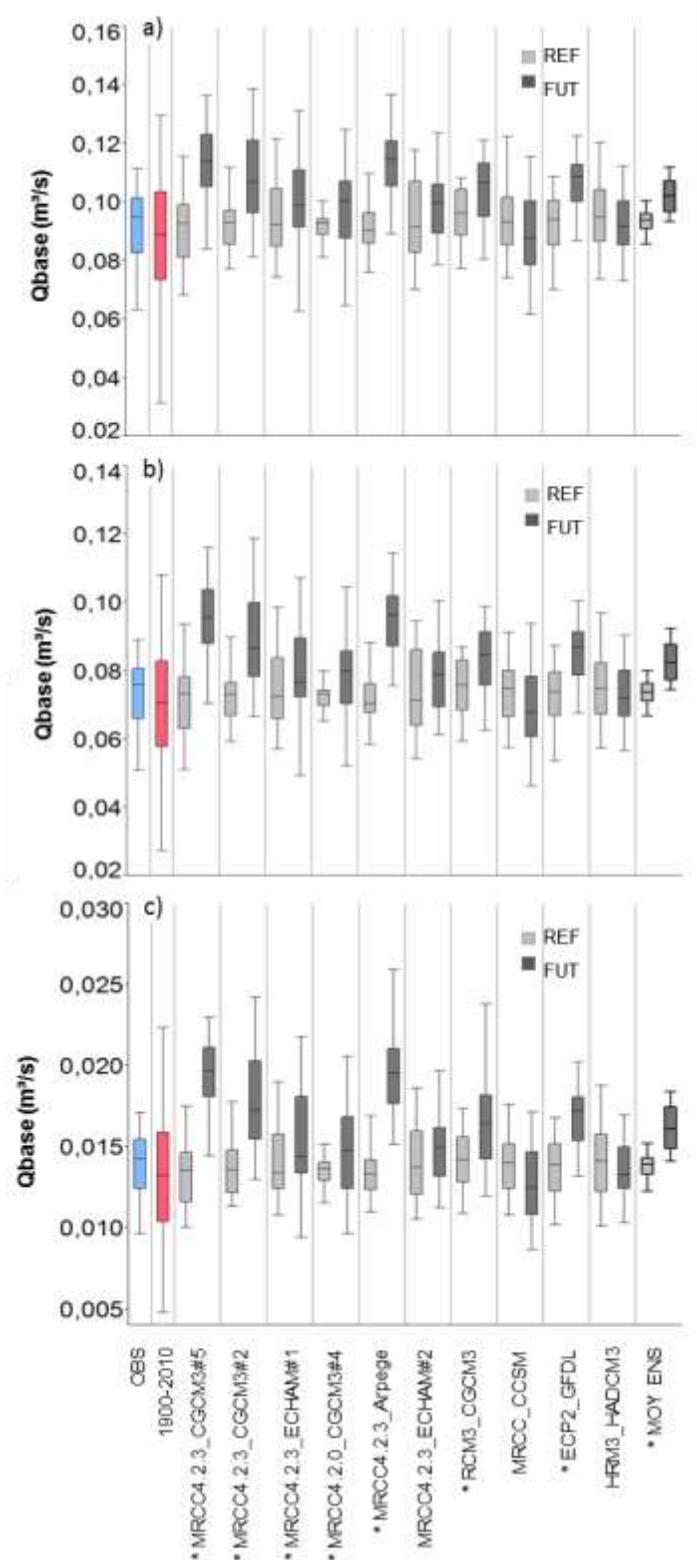


Figure 5.15 Débits de base a) au ruisseau Allen; b) à la rivière aux Outardes et c) au ruisseau Schulman. Les astérisques indiquent les modèles en période future qui présentent une différence significative par rapport à la période de référence selon le test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés ($\alpha=0,05$).

- Les scénarios de référence et futurs ne reflètent pas toute la variabilité des flux simulés pendant la période 1900-2010 en ce qui concerne les charges moyennes, les débits aux résurgences et les débits de base aux trois cours d'eau étudiés. Pour ces variables, les simulations climatiques se situent plutôt dans la portion supérieure de la gamme de valeurs observées sur le dernier siècle, alors que les valeurs plus faibles – ou plus sèches – de cette gamme sont peu représentées par les simulations, ceci notamment en raison de la résolution grossière des simulations climatiques par rapport aux observations ponctuelles à l'échelle d'une station météorologique ainsi que des limites des méthodes de correction de biais.

Tableau 5.2 Synthèse des résultats des analyses statistiques sur les résultats de MODFLOW

	Tendances 1900-2010		Moyenne scénarios climatiques	
	1900-1965	1966-2010	REF	FUT
Recharge (m)	↓*	↓*	0.128	0.136
Niveaux piézométriques (m)	↓*	↓*	176.46	177.25*
Débits aux résurgences (m ³ /s)	↓*	↓*	0.0011	0.0013*
Débits de base rivière Allen (m ³ /s)	↓*	↓*	0.094	0.103*
Débits de base rivière Outardes (m ³ /s)	↓*	↓*	0.074	0.083*
Débits de base ruisseau Schulman (m ³ /s)	↓*	↓*	0.014	0.016*

* Les résultats statistiquement significatifs sont identifiés par un astérisque.

5.2.2. Modèle HydroGeoSphere

a) Simulations avec les scénarios climatiques

Le modèle HydroGeoSphere permet une analyse beaucoup plus fine de la dynamique des résurgences que MODFLOW. Il a été utilisé pour étudier la dynamique des résurgences à $x = 1800$ m ($z = 177$ m), $x = 2000$ m ($z = 162$ m), $x = 2200$ m ($z = 150$ m), et $x = 2400$ m ($z = 144$ m) pour les 10 scénarios climatiques de référence (1971-2000) et futurs (2041-2070). Les variables étudiées sont les suivantes: 1) les débits moyens des résurgences (lorsque celles-ci sont actives), 2) le nombre de jours d'activité des résurgences par année, 3) la durée moyenne des périodes d'activité des résurgences et 4) la répartition saisonnière des jours d'activité des résurgences. Chaque variable est analysée dans les paragraphes qui suivent.

1. Débits moyens des résurgences lorsqu'elles sont actives

La figure 5.16 présente les débits aux quatre résurgences, telles que simulées à partir des Pnet déduites des données observées à la station météorologique de Hemmingford (OBS), des Pnet calculées avec les données de précipitations et de température des 10 scénarios climatiques pour la période 1971-2000 (REF) et pour la période 2041-2070 (FUT). Ces résultats montrent que les débits simulés par l'ensemble des scénarios climatiques sont du même ordre de grandeur que les débits estimés sur la colline pour la période de référence puisque les débits simulés à partir des données de la station météorologique de Hemmingford sont incluses dans l'intervalle des valeurs simulées à partir des scénarios climatiques. Généralement, les résurgences à 177 m (à la plus haute altitude) et à 144 m (à la plus basse altitude) présentent des débits d'un ordre de grandeur plus grand (approx. $2,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$) que les résurgences à 150 et 162 m (à mi-pente) dont le débit moyen se situe entre $2,6 \times 10^{-5}$ et $5,8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. Dans un milieu poreux, il serait *a priori* attendu que le débit varie en fonction de la position altitudinale de la résurgence (et donc de la charge hydraulique); les résurgences à basses altitudes présenteraient alors des débits plus importants que les résurgences à plus hautes altitudes. Les caractéristiques de la fracturation locale doivent cependant également être considérées dans le contrôle de l'écoulement aux résurgences. Ainsi, les plus grands débits observés aux résurgences à 144 et 177 m d'altitude s'expliquent par le fait qu'elles se trouvent à l'intersection à la fois de fractures sub-horizontales et de fractures verticales avec la topographie, contrairement aux deux autres résurgences dont la présence est uniquement due à des fractures verticales. Les débits les plus importants sont observés au printemps, à la résurgence à la plus basse altitude (Figure 5.16a). Le débit maximal qui y est observé est de $4,3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, alors que le débit minimal de $1,0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ est observé à la résurgence à 162 m. Ces débits sont légèrement plus faibles, quoique du même ordre de grandeur, que ceux simulés avec MODFLOW. Ils sont également cohérents avec la valeur de débit estimée sur le terrain.

Les débits aux quatre résurgences simulées sont appelés à augmenter en climat futur selon l'ensemble de scénarios climatiques. Cette augmentation, qui s'avère significative selon le test de Wilcoxon-Mann-Whitney ($\alpha=0,05$) effectué sur les distributions, est de l'ordre de 5 à 6 %, selon la résurgence sélectionnée. Les résultats obtenus avec le modèle HGS sont beaucoup plus détaillés que ceux de MODFLOW présentés précédemment. Néanmoins, les tendances observées sont les mêmes.

2. Nombre de jours d'activité des résurgences par année

Pour le nombre de jours d'activité des résurgences, les valeurs observées qui varient entre 10 pour la résurgence à 162 m et 275 pour la résurgence à 144 m se situent dans la gamme de valeurs simulées par les scénarios climatiques en période de référence. L'activité des résurgences simulées varie ainsi considérablement d'une résurgence à l'autre, la résurgence à la plus basse altitude étant active plus de 75 % de l'année et la résurgence à 162 m n'étant active que 3 % de l'année (Figure 5.17). À l'instar des débits aux résurgences, la présence d'une fracture sub-horizontale à la résurgence à 177 m explique son activité plus importante malgré sa position altitudinale élevée par rapport aux autres résurgences. La moyenne du nombre de jours d'activité pour les quatre résurgences (de la plus basse à la plus haute altitude) pour la période de référence est de 282, 57, 12 et 24 jours. Les résultats pour la période future sont de 289, 66, 18 et 29 jours, indiquant une augmentation du nombre de

jours d'activité pour toutes les résurgences, bien que l'ampleur de cette augmentation varie considérablement selon la résurgence (p. ex. +2 % pour la résurgence à 144 m et +46 % pour la résurgence à 162 m).

Les différences observées entre la période de référence et la période future sont significatives selon le test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés ($\alpha = 0,05$). La résurgence à plus basse altitude (144 m) est la plus active au cours d'une année, alors que la résurgence la moins active est généralement celle à 162 m. La différence maximale de jours d'activité se trouve généralement entre les scénarios MRCC4.2.3_ECHAM#1 (plus humide) et MRCC_CCSSM (plus sec).

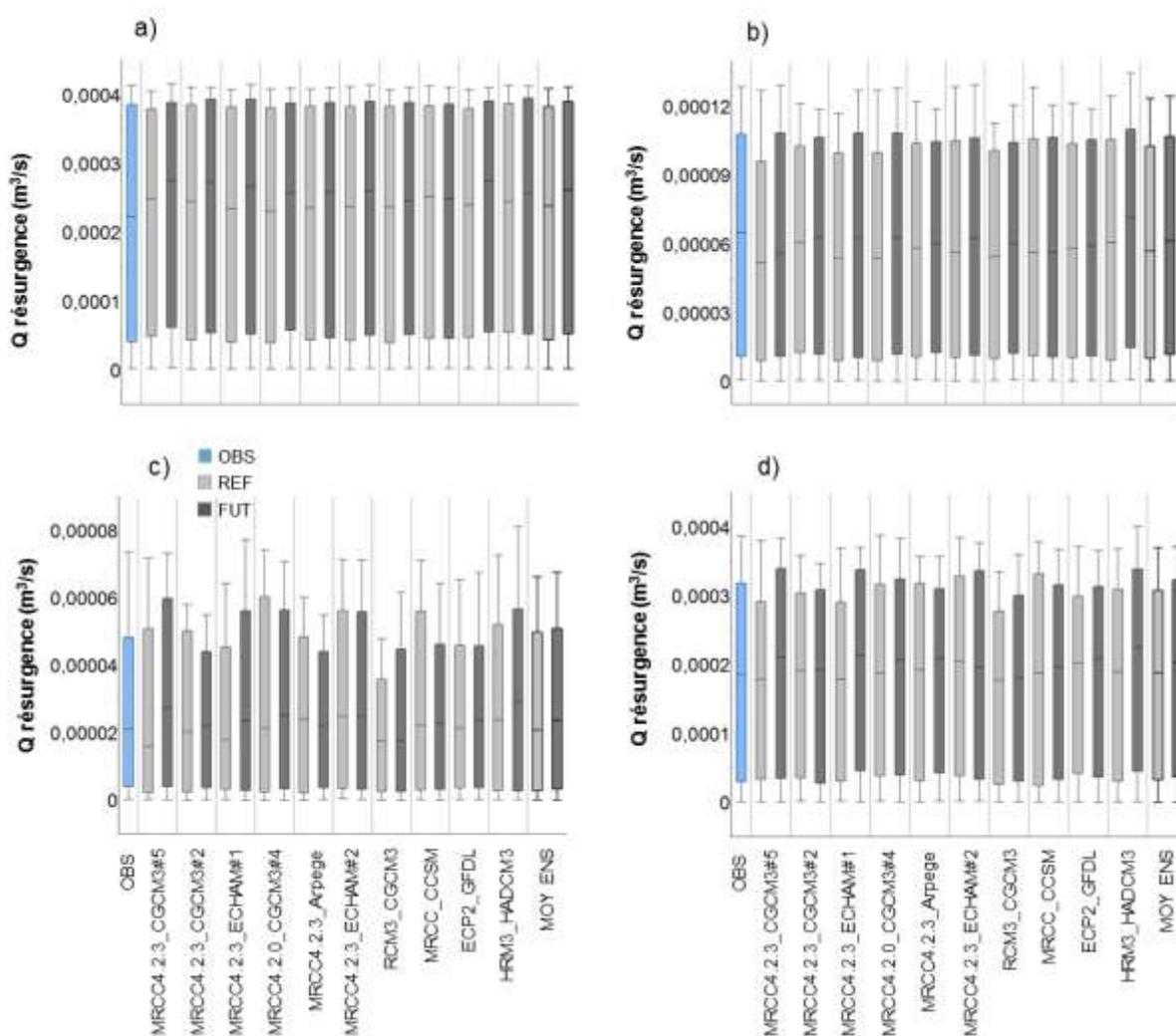


Figure 5.16 Débit moyen lorsque les résurgences situées à a) 144 m; b) 150 m; c) 162 m; d) 177 m d'altitude sont actives pour les périodes de référence (observée et simulée) et future. Pour toutes les résurgences, les différences observées sont significatives ($\alpha=0.05$) selon un test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés

3. Durée moyenne des périodes d'activité des résurgences

Les résultats issus des scénarios climatiques pour la durée moyenne des périodes d'activité s'accordent généralement bien avec ceux simulés à partir des données météorologiques observées pour la période 1971-2000. Il n'y a qu'à la résurgence à 150 m où la variabilité dans les données observées surpasse celle des scénarios climatiques (Figure 5.18b). À l'instar du nombre de jours d'activité des résurgences, la plus longue durée des périodes d'activité est observée à la résurgence à la plus basse altitude, où une période d'activité en période de référence est en moyenne de 55 jours consécutifs (Figure 5.18a). La résurgence à 162 m présente quant à elle les périodes d'activité les moins longues. En climat futur, le signal est mitigé. Les deux résurgences à plus haute altitude présentent une augmentation de l'ordre de 2 à 3 jours alors que les deux résurgences à plus basse altitude présentent un raccourcissement des période d'activité de 1 à 2 jours. À l'exception de la résurgence située à 162 m, les différences observées entre la période de référence et la période future ne sont pas significatives ($\alpha=0,05$) selon un test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés.

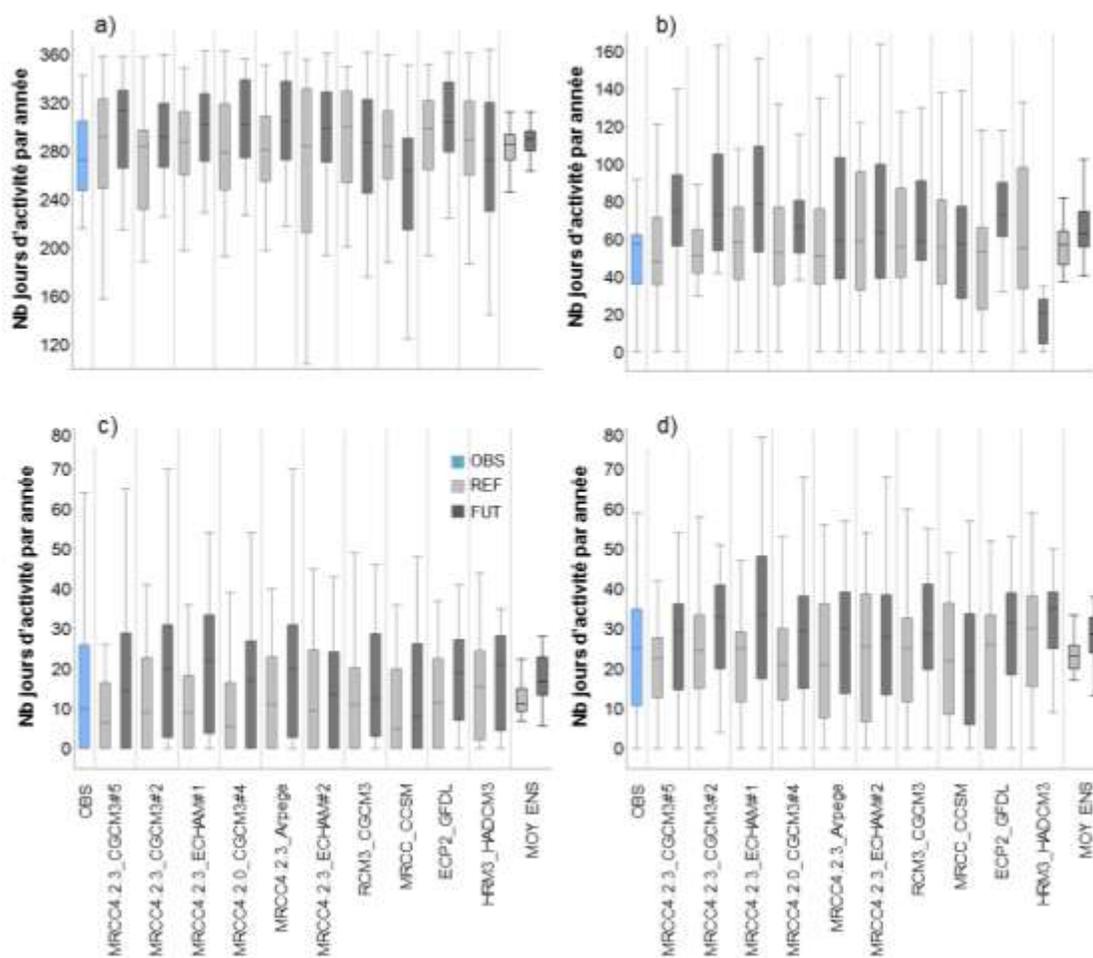


Figure 5.17 Nombre de jours d'activité des résurgences situées à a) 144 m; b) 150 m; c) 162 m; d) 177 m d'altitude pour les périodes de référence (observée et simulée) et future.

4. Répartition saisonnière des jours d'activité des résurgences

La figure 5.19 illustre la répartition saisonnière de l'écoulement des résurgences. Ces résultats représentent la moyenne de la somme des jours d'activité par saison sur 30 ans. Pour toutes les résurgences, les différences observées sont significatives entre la période de référence et la période future pour les saisons d'hiver (DJF) et du printemps (MAM) selon un test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés ($\alpha=0,05$). Les différences observées pour les saisons de l'été (JJA) et de l'automne (SON) ne sont quant à elles pas significatives.

Pour chacune des résurgences, le nombre de jours d'activité pendant l'hiver augmente, une indication potentielle de dégel printanier plus hâtif. Au printemps, le nombre de jours d'activité augmente également, à l'exception de la résurgence à la plus haute altitude (Figure 5.19d). Pour chacune des résurgences, le nombre de jours d'activité pendant l'été et l'automne sont moindres dans le futur par rapport à la période de référence.

Ces résultats de modélisation hydrogéologique avec HGS, plus précisément le nombre de jours d'activité des résurgences, aux quatre altitudes et pour les 10 scénarios climatiques, ont été utilisés dans la modélisation des populations de salamandres.

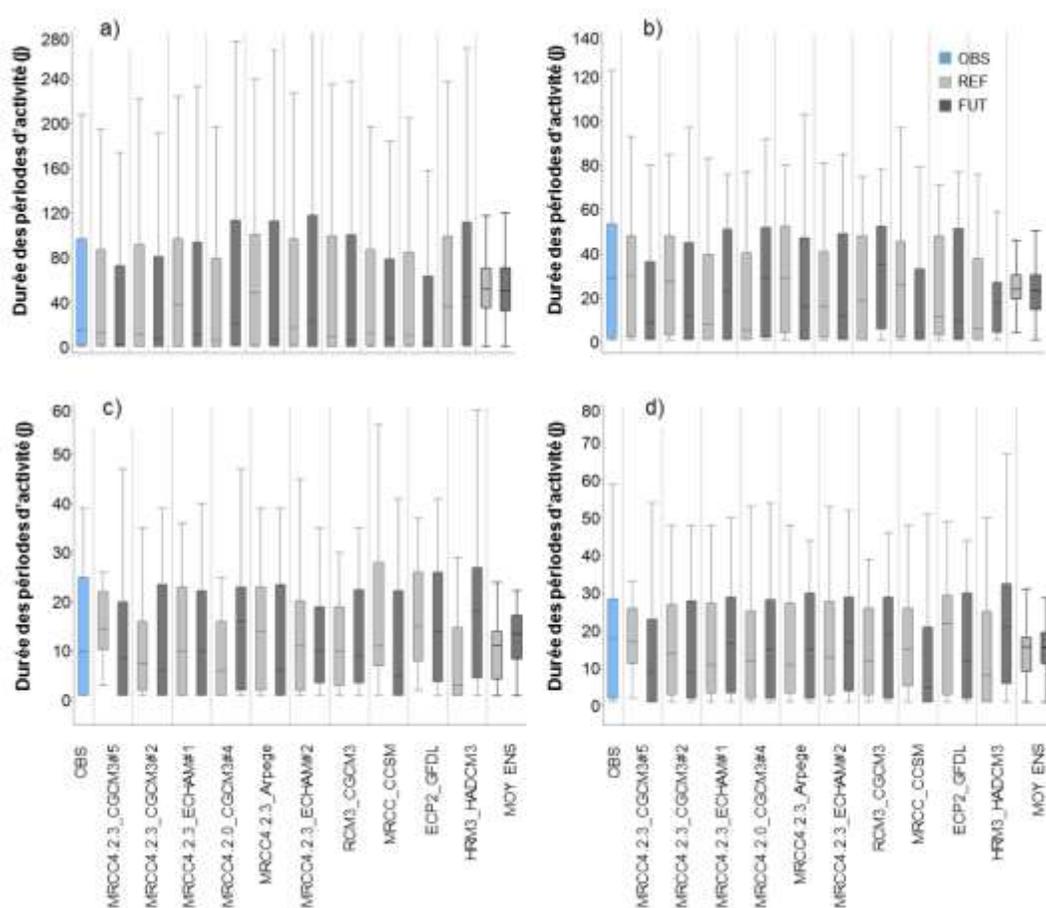


Figure 5.18 Durée moyenne des périodes d'activité des résurgences situées à a) 144 m; b) 150 m; c) 162 m; d) 177 m d'altitude pour les périodes de référence (observée et simulée) et future. Les lignes horizontales représentent les moyennes de l'ensemble des scénarios pour la période de référence et pour la période future.

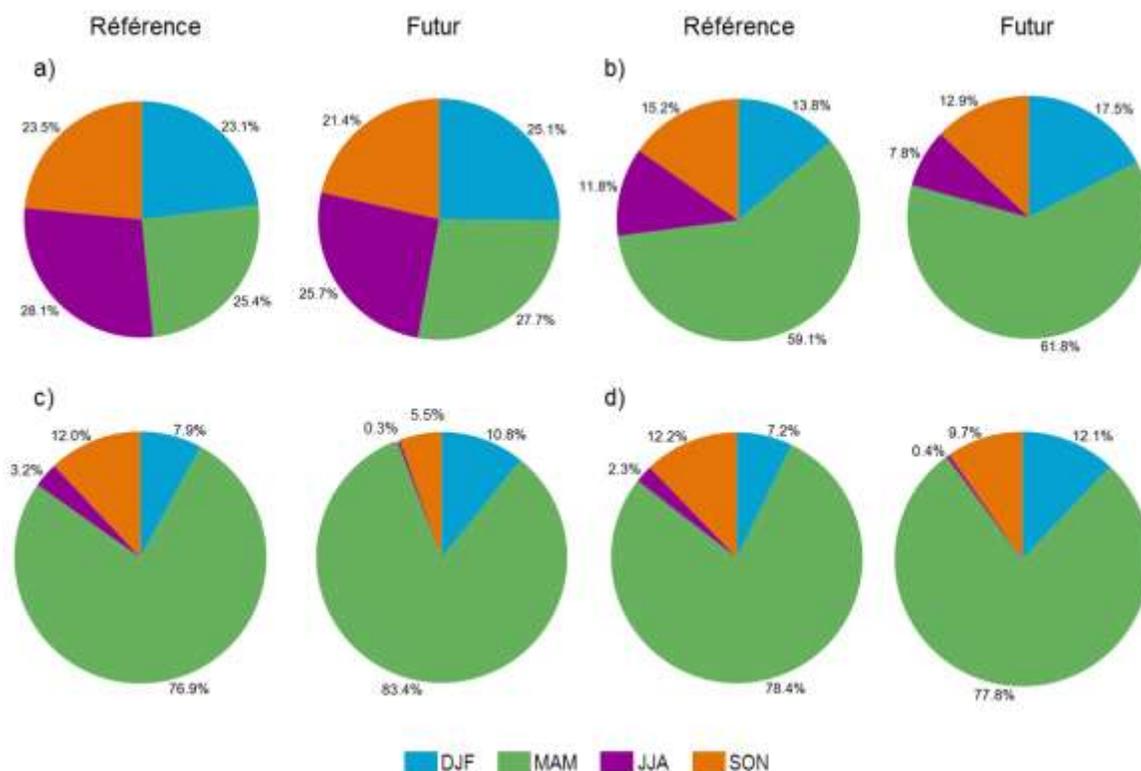


Figure 5.19 Répartition saisonnière des périodes d'activité des résurgences situées à a) 144 m; b) 150 m; c) 162 m; d) 177 m d'altitude pour les périodes de référence et future simulées. Les saisons sont identifiées par la première lettre des mois les composant, p. ex. DJF : décembre, janvier et février pour l'hiver, et ainsi de suite.

c) Synthèse

Le tableau 5.3 présente une synthèse des résultats obtenus avec HGS :

- Augmentation significative du débit moyen à toutes les résurgences.
- Augmentation significative du nombre de jours d'activité pour toutes les résurgences.
- À l'exception de la résurgence à 162 m, impact non significatif des changements climatiques sur la durée des périodes d'activité.
- Augmentation significative du nombre de jours d'activité à l'hiver et au printemps pour toutes les résurgences.
- Changements généralement non significatifs pour les saisons d'été et d'automne.

Tableau 5.3 Résultats de la modélisation hydrogéologique avec HGS pour les résurgences simulées au mont Covey Hill (moyennes interannuelles sur 30 ans de l'ensemble des scénarios climatiques)

	144 m		150 m		162 m		177 m		
	REF	FUT	REF	FUT	REF	FUT	REF	FUT	
Débit moyen ($10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$)	2,26	2,41*	0,57	0,61*	0,24	0,26*	1,81	1,93*	
Nb jours activité (j)	282	289*	57	66*	12	18*	24	29*	
Durée périodes d'activité (j)	55	53	24	23	10	13*	14	16	
	DJF	23,1	25,1*	13,8	17,5*	7,9	10,8*	7,2	12,1*
	MAM	25,4	27,7*	59,1	61,8*	76,9	83,4*	78,4	77,8*
Répartition saisonnière (%)	JJA	28,1	25,7*	11,8	7,8	3,2	0,3	2,3	0,4
	SON	23,5	21,4	15,2	12,9	12,0	5,5	12,2	9,7

* Différence significative à $\alpha=0,05$ selon test de Wilcoxon-Mann-Whitney.

Ces résultats suggèrent donc une intensification de l'activité hydrique des résurgences sur le mont Covey Hill en contexte de changements climatiques à l'horizon 2050. Cette intensification est notable tant au niveau des quantités d'écoulement que du nombre de jours où de l'écoulement se produit aux résurgences. Cette activité accrue est entre autres due au raccourcissement de la période hivernale et, par conséquent, à la venue plus hâtive de la fonte printanière.

5.2.3. La modélisation hydroclimatique: nuances et implications

Une incertitude est introduite à plusieurs étapes du processus de modélisation des impacts des changements climatiques sur les systèmes hydrogéologiques. Les sources d'incertitude sont multiples : 1) la variabilité naturelle du climat, 2) les hypothèses concernant les émissions futures de gaz à effet de serre, 3) la sélection du modèle régional et de son pilote, 4) le choix de la simulation climatique, 5) la méthode de mise-à-l'échelle, 6) la méthode de transfert utilisée pour convertir les données issues du modèle climatique aux données utilisées dans le modèle hydrogéologique, 7) le modèle hydrogéologique.

Comme l'incertitude est inhérente au processus de modélisation, il est important de tenter d'en réduire les effets ou à tout le moins de tenir compte de ces effets dans l'interprétation des résultats. La plus grande source d'incertitude provenant de la structure et de la physique même des MCG (Fowler *et al.*, 2007), celle-ci doit inévitablement être considérée. Par exemple, le recours à des ensembles multi-modèles, qui incorporent les simulations de plusieurs MCG ou MRC, est fréquent (Fowler *et al.*, 2007; Mareuil *et al.*, 2007; Goderniaux *et al.*, 2009; Toews et Allen, 2009) et c'est l'approche qui a été privilégiée dans le cadre de ce

projet, avec l'utilisation d'un ensemble de 10 scénarios climatiques incluant plusieurs MCG et MRC.

À l'incertitude inhérente aux modèles climatiques s'ajoute également l'incertitude associée aux scénarios d'émissions. Ces scénarios constituent des représentations des émissions de gaz à effet de serre (p. ex. CO₂, CH₄, N₂O, CFC) et de particules (p. ex. suie) possibles qui sont fondées sur des hypothèses d'un monde futur. Ces hypothèses ont trait à la croissance de la population mondiale, aux développements technologiques, aux sources d'énergie et à la coopération internationale. Quatre grandes familles de scénarios d'émissions (A1, A2, B1 et B2) ont été élaborées par le Groupe intergouvernemental sur l'étude du climat (GIEC), chacune décrivant une évolution différente du monde (GIEC, 2001). Dans le cadre de ce projet, deux scénarios d'émissions, A2 et A1B, ont été utilisés.

La mise-à-l'échelle des données issues des MRC a été effectuée selon une seule méthode, la correction de biais selon Mpelasoka et Chiew (2009). Cette méthode s'est avérée efficace non seulement pour la représentation des changements moyens des variables étudiées, mais également au niveau de la représentation de la distribution *intégrale* de ces variables, c.-à-d. des changements aux extrêmes. Dans le cas de cette étude, les comparaisons entre les observations et les simulations après le post-traitement (correction de biais et mise à l'échelle) montrent une bonne concordance. Toutefois, comme cette étape demeure l'aspect le plus important dans l'utilisation de résultats de MCG ou de MRC, l'utilisation de plusieurs méthodes de mise-à-l'échelle aurait permis de faire état de l'incertitude liée à cette étape de la modélisation.

Les incertitudes inhérentes à la modélisation des écoulements souterrains sont également nombreuses. L'échelle à laquelle les processus sont simulés joue un rôle important dans la précision des flux simulés. Pour pallier cette difficulté, deux outils de modélisation ont été utilisés dans ce projet: 1) le modèle MODFLOW qui simule les flux sur l'ensemble de la colline et permet d'estimer l'impact des changements climatiques à l'échelle du Laboratoire naturel et 2) le modèle HGS qui simule les débits aux résurgences à l'échelle locale. Ces deux approches permettent d'avoir une compréhension plus complète de la dynamique hydrogéologique du mont Covey Hill.

L'estimation de la recharge est un défi de taille dans toute étude de l'eau souterraine. Ce défi est particulièrement grand lorsque l'aquifère est un aquifère fracturé dans lequel la recharge peut varier significativement dans l'espace. Dans ce projet, la recharge n'a pas été simulée explicitement dans le modèle MODFLOW. Elle a été calée en régime permanent puis répartie dans l'année à partir de la variation temporelle des précipitations nettes. Cette approche, qui a l'avantage d'être relativement simple, est basée sur l'hypothèse que l'évolution temporelle de la recharge est la même que celle des précipitations nettes. Il se peut que cette hypothèse ne soit pas conforme à la réalité si l'intensité des précipitations augmente ou si les quantités de neige reçues au cours de l'hiver diminuent. En raison de la formulation entièrement couplée de l'écoulement qui est utilisée dans HGS, la recharge de l'aquifère n'a pas à être quantifiée explicitement dans ce modèle. Celui-ci répartit les précipitations nettes en ruissellement et infiltration en fonction des teneurs en eau et des propriétés des matériaux superficiels.

Le pas de temps mensuel utilisé dans les deux modèles pour les précipitations nettes est tout à fait adapté à la simulation des écoulements souterrains, mais pourrait ne pas être suffisamment fin pour représenter les événements de précipitations extrêmes qui génèrent

beaucoup de ruissellement. L'augmentation des événements très intenses de précipitations (se produisant à un pas de temps inférieur à une journée) a été identifiée pour le sud-ouest du Québec (Mailhot et al., 2007; 2010; Huard et Chaumont, 2011). Une telle augmentation aurait pour effet de réduire les coefficients d'infiltration considérés stables dans le temps dans ce projet. Il pourrait en résulter une réduction de la recharge au profit du ruissellement de surface. Pour vérifier ces processus, un modèle entièrement couplé tel que HGS devrait être développé et calé pour l'ensemble de la colline, en utilisant un pas de temps inférieur à une journée. Une telle démarche nécessiterait une caractérisation plus exhaustive du site d'étude et des temps de calcul beaucoup plus importants.

Finalement, l'approche de modélisation utilisée dans ce projet (avec les deux modèles) est basée sur l'hypothèse qu'il n'y aura aucune modification anthropique au paysage, à l'utilisation du sol ou au pompage de l'eau souterraine entre l'horizon de référence (1971-2000) et l'horizon futur utilisé pour les scénarios climatiques (2041-2070). De telles modifications pourraient avoir des impacts significatifs sur l'hydrologie de la colline, possiblement plus importants que les impacts des changements climatiques quantifiés ici.

5.3. Simulation des populations de salamandres

5.3.1. Simulation des salamandres en environnement synthétique

Les travaux accompagnant le développement du modèle ont montré que lorsque celui-ci est correctement calibré pour un environnement synthétique donné, il permet de reproduire une série de caractéristiques physiologiques, écologiques et comportementales typiques des salamandres des ruisseaux. Par exemple, dans le cas de la salamandre sombre des montagnes, Girard *et al.* (soumis) ont montré que les durées des phases du cycle de vie simulées par le modèle en fonction d'un profil donné de températures quotidiennes concordent remarquablement bien avec les observations empiriques. Le modèle reproduit adéquatement les grandes variations régionales des durées de phases, dans la mesure où celles-ci sont le résultat de la température.

Le modèle est également apte à reproduire convenablement les densités d'adultes observées en nature. Des tests effectués sur un environnement numérique constitué d'un ruisseau linéaire de 50 m de longueur et de 1 m de largeur ont montré que le modèle simule des densités moyennes d'environ 1,3 adultes/m de ruisseau, un résultat légèrement au-dessus des observations en nature. Cependant, considérant l'absence de compétition interspécifique et de prédation dans le modèle, une densité légèrement plus élevée s'avère somme toute raisonnable.

Finalement, les salamandres numériques présentent des comportements de recherche d'habitat et de déplacement correspondant à ce qui est attendu en fonction des conditions environnementales intégrées dans le système. Des tests effectués sur un environnement fixe ont montré que les salamandres adultes se retrouvent essentiellement dans les ruisseaux et sur leurs abords. Peu d'individus se retrouvent en forêt. Si un certain dynamisme au niveau de la qualité des habitats est introduit dans l'environnement numérique, les salamandres numériques y répondent de manière cohérente. Par exemple, des densités plus importantes de salamandres sont mesurées dans les habitats combinant qualité et stabilité. Ces plus

grandes densités s'opèrent au détriment des habitats de bonne qualité, mais qui présentent une certaine instabilité de cette qualité dans le temps. Ceux-ci vont plutôt entraîner une probabilité d'extinction d'autant plus grande que l'habitat sera instable. Ces différents résultats sont présentés en détails dans Girard *et al.* (soumis).

5.3.2. Dynamique des populations à Covey Hill

a) Simulations avec les scénarios climatiques

La figure 5.20 montre que l'abondance simulée de la population de salamandres pour la période de référence diminue avec l'altitude: l'abondance est maximale à 144 m (~2.2 adultes en moyenne pour une résurgence de 4 m²) et presque nulle à 162 m. Ces résultats reflètent l'activité décroissante des résurgences avec l'altitude qui résulte directement de la variabilité plus grande des niveaux de nappe (qui alimentent les résurgences) avec l'altitude. Il en résulte une probabilité d'extinction très grande pour les résurgences situées à 162 et 177 m (Figure 5.21).

Les résultats des simulations hydrogéologiques suggèrent que les changements climatiques se traduiront par une augmentation des températures et des précipitations, lesquelles se traduiront par une augmentation du nombre de jours d'activité hydrologique des résurgences à toutes les altitudes. Selon le MEH, ceci aura des conséquences favorables sur la population de salamandres sombres des montagnes pour la période future.

Les changements anticipés se feront sur deux fronts. D'abord, aux altitudes où la présence des salamandres a été principalement observée pour la période de référence (144 et 150 m), une augmentation de la taille de la population (abondance) d'environ 20 % est simulée par le MEH (Figure 5.20). Pour le climat futur, le modèle prévoit la création de nouveaux habitats viables à 162 m et 177 m, où la résilience des populations était très faible pendant la période de référence. L'augmentation de l'abondance est significative pour toutes les résurgences testées. Cette création de nouveaux habitats permet une diminution significative de la probabilité d'extinction à 162 m et 177 m (Figure 5.21). Les changements ne sont pas significatifs à 144 et 150 m.

L'augmentation des températures et de l'activité hydrique explique en grande partie l'amélioration des conditions de vie des salamandres simulées. L'augmentation des températures permet tout d'abord d'accélérer sensiblement le cycle de vie. Selon le MEH, il se passera 4,5 années en moyenne lors de la période de référence entre le moment où l'œuf est pondu et celui où l'individu arrivera à maturité sexuelle. Cette période est réduite de manière significative de 0,4 année en moyenne pour la période future (Figure 5.22a). Cette réduction n'est pas sans importance. En nature, les phases immatures (œufs, larves et juvéniles) sont de loin les plus vulnérables (Petranka, 1998). Toute accélération du développement de ces phases permet ainsi d'améliorer les chances de survie des individus jusqu'à la phase adulte (Werner, 1986; Bruce, 2005). Elle permet d'améliorer la probabilité qu'un individu puisse contribuer à la reproduction. La reproduction elle-même est également favorisée par l'élargissement statistiquement significatif de la saison propice à la ponte d'une dizaine de jours en moyenne (Figure 5.22b). L'augmentation du nombre d'individus contribuant à la reproduction au cours d'une saison allongée explique en grande partie l'augmentation de la taille des populations de salamandres pour la période 2041-2070.

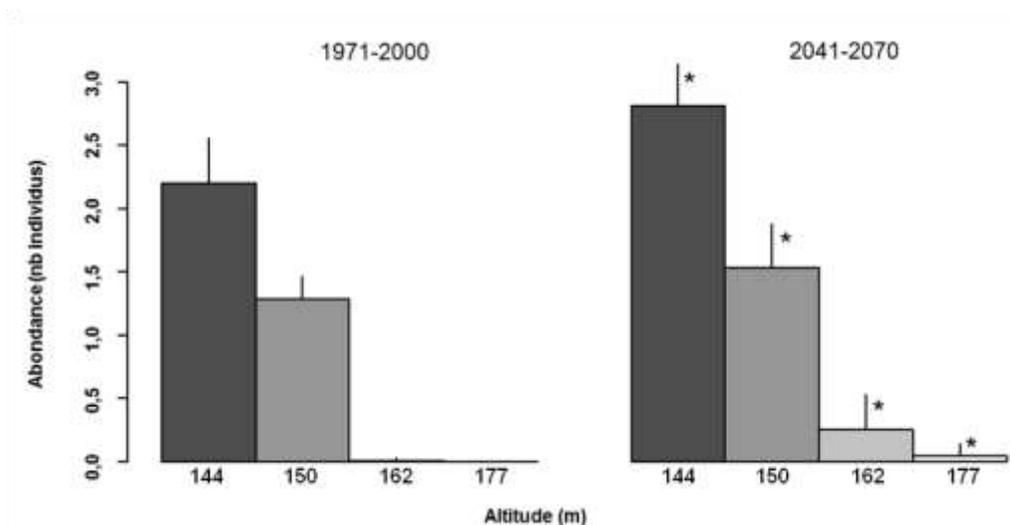


Figure 5.20 Abondance moyenne de salamandres sombre des montagnes adultes à une résurgence de 4 m² pour la période de référence et la période future, en fonction des cycles d'activité hydrologique simulés à 144, 150, 162 et 177 m d'altitude. Les valeurs correspondent aux moyennes pour l'ensemble des scénarios climatiques sélectionnés et pour toute la période. Les astérisques correspondent aux augmentations significatives ($\alpha=0,05$) d'abondance future par rapport à la période de référence selon un test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés.

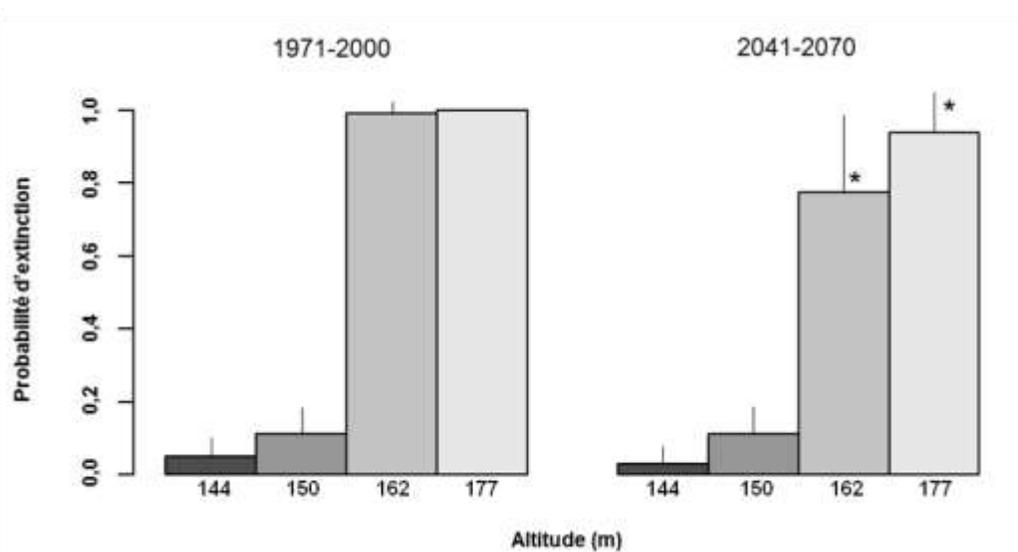


Figure 5.21 Probabilité d'extinction à une résurgence de 4 m² pour la période de référence et la période future, en fonction des cycles d'activité hydrologique simulés à 144, 150, 162 et 177 m d'altitude. Les valeurs correspondent aux moyennes pour l'ensemble des scénarios climatiques sélectionnés. Les astérisques correspondent aux diminutions significatives ($\alpha=0,05$) de la probabilité d'extinction future par rapport à la période de référence selon un test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés.

L'augmentation de l'activité hydrique des résurgences projetée pour la période future joue quant à elle un rôle important principalement en raison de la dépendance entre l'activité de la résurgence et la reproduction des salamandres. Selon le MEH, la ponte ne peut s'opérer si la résurgence est inactive, et ce même si les températures ambiantes sont propices à la reproduction. Le chevauchement entre la période d'activité de la source et la saison de reproduction permet ainsi de délimiter la période de reproduction effective. Or, l'allongement de cette période représente un facteur central expliquant la présence de salamandres à 162 et 177 m lors de la période 2041-2070. En effet, on remarque qu'à ces altitudes, en période de référence, les résurgences n'étaient actives que durant moins de 2 % de la saison de reproduction, rendant impossible l'établissement de salamandres à ces résurgences (Figure 5.23a). Or, l'augmentation de l'activité des résurgences et le synchronisme avec la saison de reproduction permet de doubler cette proportion dans la période future (Figure 5.23a). Combiné à l'allongement absolu de la saison de reproduction mentionné plus haut (en raison des températures plus élevées), la synergie entre les impacts des changements climatiques sur les températures et l'activité hydrique des résurgences sur Covey Hill crée une saison de reproduction *effective* suffisamment longue pour permettre le maintien de populations de salamandres à des endroits qui en sont actuellement dépourvus. L'amélioration des conditions hydrogéologiques n'est cependant pas limitée à la longueur de la saison de reproduction effective, elle a également trait à la diminution de la variabilité interannuelle. Les simulations montrent en effet que le nombre d'années où la ponte n'a pas été possible à cause de l'inactivité de la résurgence au moment de la saison de reproduction diminue de manière significative au cours de la période future au niveau des altitudes les plus élevées (Figure 5.23b), favorisant d'autant plus le maintien des populations à ces endroits. Cette activité accrue des résurgences les plus élevées en altitude résulte directement de l'augmentation des niveaux de nappe engendrée par une précipitation nette plus importante.

b) Synthèse

Les résultats des simulations hydroclimatiques utilisées comme intrants pour le MEH entraînent de façon générale des conditions favorables sur la population de salamandres sombres des montagnes dans le futur (horizon 2050) à Covey Hill. Le modèle prévoit ainsi :

- Une augmentation significative de l'abondance à toutes les résurgences.
- Une diminution significative de la probabilité d'extinction aux résurgences situées à 162 et 177 m.
- Une accélération significative du cycle de vie des salamandres.
- Un allongement de la période de reproduction effective.

L'interprétation des résultats du MEH appelle toutefois à un certain niveau de circonspection, tel que précisé dans la section suivante.

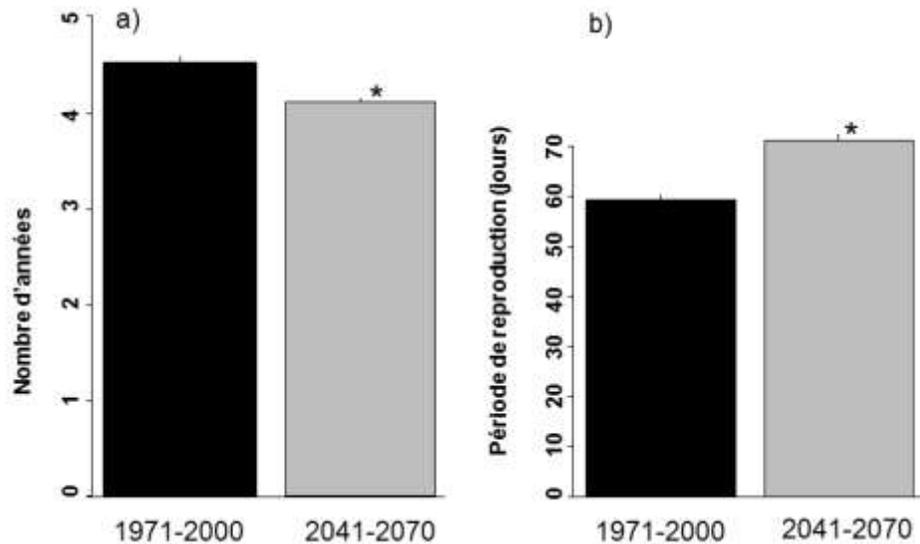


Figure 5.22 a) Durée moyenne du développement d'un individu (cycle de vie complet de l'œuf à la maturité sexuelle) pour les deux périodes analysées; b) durée de la saison de reproduction attendue selon la température ambiante pour chacune des périodes. Les valeurs présentées correspondent aux moyennes pour l'ensemble des scénarios climatiques sélectionnés. Les astérisques indiquent que les différences observées sont significatives ($\alpha=0,05$) dans les deux cas selon un test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés.

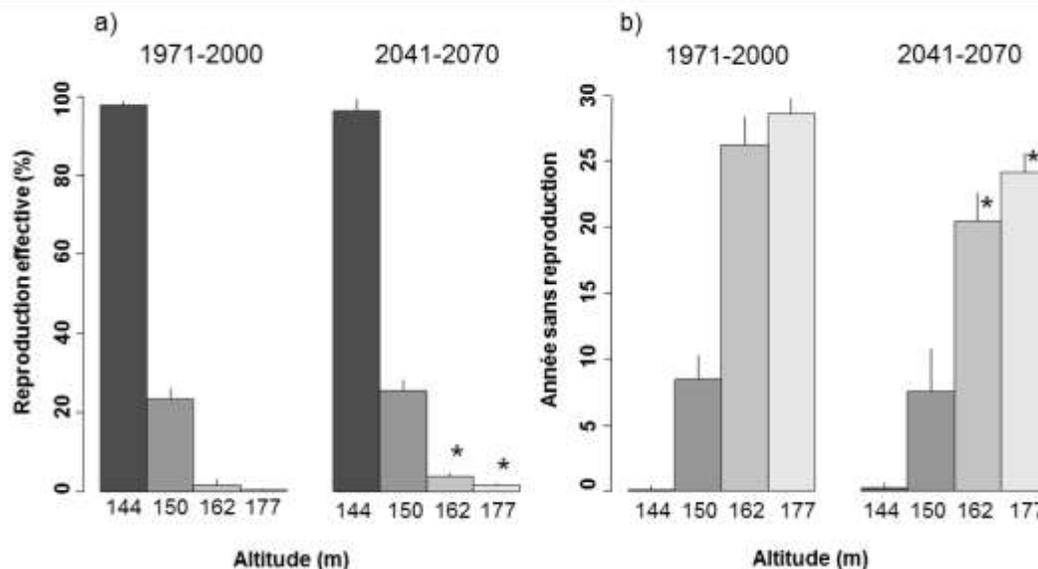


Figure 5.23 a) Proportion moyenne de la saison de reproduction où la résurgence est active pour chacune des altitudes simulées (reproduction effective, voir texte); b) nombre d'années pour lesquelles la reproduction est impossible en raison de l'inactivité des résurgences. Les valeurs présentées correspondent aux moyennes pour l'ensemble des scénarios climatiques sélectionnés. Les astérisques indiquent que les différences observées sont significatives ($\alpha=0,05$) dans les deux cas pour les résurgences situées à 162 et 177 m d'altitude selon un test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés.

5.3.3. Le modèle écologique: nuances et implications

Le modèle écologique prévoit des conditions plus favorables pour la salamandre sombre des montagnes au mont Covey Hill. Ces résultats doivent toutefois être nuancés. En effet, les résultats obtenus ici doivent être considérés à travers le prisme des limites du MEH.

Par exemple, le modèle ne tient pas compte des relations interspécifiques, bien que la compétition interspécifique soit reconnue comme ayant des impacts sur la structure des communautés de salamandres des ruisseaux (Hairston, 1949; Jaeger, 1971; Smith et Pough, 1994). Une telle limite n'est pas sans conséquence, particulièrement puisque la salamandre sombre des montagnes est généralement considérée comme une espèce peu compétitive (Krzysik, 1979). De fait, lorsqu'il y a coexistence de deux espèces de salamandres dans un même environnement, des phénomènes de ségrégation spatiale ou de réduction des niches écologiques ont été observés de manière empirique (Organ, 1961; Krzysik, 1979; Keen, 1982; Grover, 2000). La prédation (principalement à la phase larvaire) par les poissons, les couleuvres, les oiseaux, les petits mammifères ou d'autres espèces de salamandres a également été signalée à plusieurs reprises, jouant ainsi un rôle de régulation démographique (Petranka, 1998). Les changements climatiques sont sans doute appelés à modifier ces dynamiques écologiques, mais dans quelle mesure, cela reste très difficile à déterminer.

Par ailleurs, il convient de souligner le fait que les simulations ont été réalisées dans des environnements synthétiques simplifiés qui s'apparentent aux conditions observées sur le terrain, mais qui ne les reproduisent pas intégralement. Les recensements récents des salamandres qui devaient à l'origine être utilisés pour valider les simulations du modèle de salamandres ne se sont pas avérés adaptés à ces fins. Le protocole actuel de suivi de la salamandre sombre des montagnes au mont Covey Hill permet de faire état de la variabilité de la densité de la salamandre dans des parcelles fixes où elle a été observée, mais il n'inclut pas de réelle mesure d'abondance, qui aurait servi à la validation du MEH.

Ces limites commandent ainsi la prudence lors de l'interprétation des résultats du MEH: l'amélioration des conditions de vie de la salamandre sombre des montagnes en fonction des changements climatiques demeure fondée sur des simulations rendant compte de façon partielle de l'environnement réel dans lequel elles évoluent. Les prévisions du modèle dans le cadre de ce projet sont ainsi qualitatives et conservatrices (la résilience est surestimée). Néanmoins, le fait que la salamandre sombre des montagnes se trouve actuellement à la limite nordique de l'aire de répartition de l'espèce peut laisser entrevoir qu'une augmentation des conditions hydriques – telle que projetée par les modèles hydrogéologiques – associée à une augmentation concurrente des températures, soit généralement bénéfique pour ses conditions de vie.

5.4. Stratégies de conservation du territoire

Les changements climatiques auront des impacts indéniables sur la biodiversité, tant au niveau de la répartition des espèces, de leur phénologie et de l'organisation des écosystèmes et des communautés naturelles qui les constituent. Bien qu'il demeure difficile d'attribuer de façon claire certaines réponses écologiques observées aux changements climatiques seuls, le fait que les changements climatiques aient été identifiés comme une des menaces les plus importantes à la biodiversité commande l'urgence d'agir (Secrétariat de la convention sur la diversité biologique, 2007). Les changements climatiques actuels sont en outre particuliers parce qu'ils se produisent dans un contexte sans précédent de destruction, de fragmentation et de dégradation des habitats.

En tentant de développer des solutions pour faire face aux défis liés à la préservation de la biodiversité, les travaux des chercheurs sont souvent entravés par un manque d'informations sur les systèmes biologiques, en particulier en ce qui concerne les tendances à long terme, qui sont cruciales à une compréhension de ces systèmes et à leur réponse aux changements environnementaux globaux. De telles lacunes dans les connaissances rendent difficile le développement de politiques et de lois fondées sur des principes scientifiques (Collen *et al.*, 2013).

L'utilisation de modèles climatiques et de modèles écologiques est une avenue intéressante pour informer la prise de décision en conservation. Des modèles basés sur les processus, qui utilisent les réponses physiologiques d'une espèce aux variables du climat ou des modèles de populations spatialement explicites associés à des modèles hydrologiques— telle que la méthode développée dans le cadre de ce projet— peuvent représenter une alternative adaptée à l'échelle des actions de conservation (Carroll, 2007).

Les pistes de solutions qui suivent sont tirées d'une synthèse de la littérature portant sur la prise en compte des changements climatiques dans les stratégies de conservation de la biodiversité. Une version détaillée de cette synthèse se trouve à l'annexe 3. Les implications de ces pistes de solutions pour le mont Covey Hill sont ensuite explorées et contribuent à l'élaboration des recommandations globales pour l'ensemble du projet présentées au chapitre 6.

Pistes de solutions – Le statu quo

Certaines recommandations peuvent être émises pour renforcer les stratégies de conservation de l'espèce dans un contexte de changements climatiques (cf. annexe 3 pour analyse complète). En règle générale, une saine gestion de la biodiversité diffère peu selon que le climat change ou qu'il soit stable. Les principes de conservation déjà connus demeurent donc valables : protection des habitats, établissement de couloirs de déplacement lorsque les habitats sont fragmentés, exploitation des populations en fonction de leur capacité de croissance, maintien de la diversité génétique et écosystémique, etc. (Bertheaux, 2005). Les changements climatiques imposent toutefois d'augmenter l'intensité des mesures existantes de protection de la biodiversité. À l'échelle locale, les recommandations de *statu quo* (« business as usual ») sont effectivement fréquentes dans la littérature (p. ex. atténuer les menaces actuelles, telles que les espèces envahissantes et la perte d'habitat; implanter

ou poursuivre des programmes de suivi; gérer les populations en fonction des perturbations naturelles) (Heller et Zavaleta, 2009).

Toutefois, d'autres études soulignent que le *statu quo* n'est probablement pas suffisant dans plusieurs cas (Peters et Darling, 1985; Buckland *et al.*, 2001). Pour citer un exemple en lien plus direct avec la protection des salamandres, une étude en Caroline du Nord a révélé que les bandes riveraines réglementaires de 10 m n'étaient pas suffisantes pour préserver les populations de salamandres de ruisseaux dans de petits écosystèmes riverains au sein de paysages fortement anthropisés (Willson et Dorcas, 2003). Ces données suggèrent que dans des écosystèmes dépendants de petits cours d'eau, tels que l'habitat de la salamandre sombre des montagnes à Covey Hill, une simple zone tampon forestière est insuffisante pour maintenir les conditions hydrologiques pouvant supporter d'importantes populations de salamandres. D'autres études ont estimé de 164 à 275 m la largeur nécessaire des bandes riveraines pour protéger les populations de reptiles et d'amphibiens semi-aquatiques (Burke et Gibbons, 1995; Semlitsch, 1998). Bien que la superficie des zones tampon doive varier en fonction de la taille, de la géographie et de l'habitat soutenu par le plan d'eau, certains chercheurs suggèrent même des zones tampons jusqu'à 300 m de largeur afin de maintenir les microclimats associés aux petits ruisseaux du nord-ouest Pacifique (Chen *et al.*, 1995). Il a par ailleurs été avancé que les efforts de conservation qui ciblent les populations de salamandres dans les cours supérieurs des bassins versants doivent tenir compte de l'aménagement du territoire dans la totalité des bassins versants, et non seulement au sein de zones tampon riveraines (Willson et Dorcas, 2003).

Pistes de solution – Perspectives futures

En plus de maintenir et de renforcer les efforts actuels de conservation, quelques principes supplémentaires doivent être considérés pour favoriser l'adaptation des espèces aux changements climatiques.

a) Diversité et hétérogénéité

L'idée de la protection d'une diversité de conditions bioclimatiques vient du fait que les impacts des changements climatiques dépendent de la relation entre les modifications dans le temps du milieu physique et des populations, et l'hétérogénéité climatique spatiale. À l'échelle régionale, des espaces protégés présentant une hétérogénéité spatiale riche devraient offrir de meilleures opportunités de migration et de réorganisation des communautés. Les distances de dispersion nécessaires pour suivre les conditions changeantes seraient ainsi plus courtes, alors que les limites à la dispersion seraient moins contraignantes. De façon générale, des paysages hétérogènes supporteraient également une plus grande diversité génétique et spécifique (Vellend et Geber, 2005).

L'intégration d'éléments abiotiques (attributs du paysage tels que la pente, l'altitude, la productivité des sols, le climat) dans un processus de planification de la conservation peut s'effectuer de plusieurs façons. Une méthode proposée est celle des filtres grossier et fin (Schloss *et al.*, 2011). C'est celle qui est mise de l'avant par CNC dans son Plan de conservation pour l'écorégion de la vallée du Saint-Laurent et du Lac Champlain (Gratton, 2010). L'analyse par filtre grossier est d'abord effectuée à partir de valeurs d'irremplaçabilité et de représentativité. L'analyse par filtre fin vise ensuite à saisir les cibles qui n'auraient pas

été captées par le filtre grossier, telles les communautés et les écosystèmes rares considérés prioritaires pour la région. Généralement, les éléments abiotiques dégagés lors de l'analyse par filtre grossier servent à raffiner la priorisation des éléments biotiques (p. ex. les espèces menacées à protéger) lors de l'analyse par filtre fin. Autrement dit, lors du choix entre l'achat de deux propriétés qui offrent des bénéfices similaires pour la biodiversité, le terrain qui contribue davantage à l'objectif de représentation d'une diversité d'éléments abiotiques serait privilégié.

b) Gestion de risques

Les changements climatiques placent les acteurs de la conservation face au besoin de répondre à la fois à un changement directionnel rapide et à une incertitude très importante. L'adaptation aux changements climatiques nécessite donc la mise sur pied d'une gamme de mesures ayant différents horizons temporels (court, moyen et long termes), et de différents niveaux de risque (de prudentes à plus risquées), toutes spécifiquement anticipatives (Heller et Zavaleta, 2009), c'est-à-dire tenant compte des prévisions disponibles sur les conditions qui prévaudront dans le futur. Jusqu'à un certain point, la tolérance au risque des acteurs guidera la sélection des stratégies.

Chaque type d'approche comporte son lot d'avantages et d'inconvénients. Des mesures de précaution, telles que la restauration de sites naturels, un suivi accru de la distribution des espèces et des investissements accrus pour les aires protégées ne requièrent pas nécessairement de prévisions climatiques extrêmement certaines et précises. De telles actions peuvent permettre aux gestionnaires de répondre aux menaces actuelles pour la biodiversité tout comme aux menaces qui émergeront dans le futur. Toutefois, des mesures de précaution seules ne répondront pas aux changements directionnels rapides du climat. Ce type de mesures ne capitalise d'ailleurs pas sur l'information sur les projections futures qui est accessible.

En revanche, des interventions basées sur des prévisions comportent leur lot de risques si elles sont trop déterministes, insuffisamment robustes à des futurs alternatifs ou ont le potentiel de mener à des conséquences négatives non anticipées (Suffling et Scott, 2002). Elles peuvent par contre se solder en bénéfices importants et devraient être évaluées à l'aide d'analyses de sensibilité et de scénarios, testées dans le cadre de projets pilotes et implantées initialement à l'échelle locale (McLachlan *et al.*, 2007). L'élaboration de scénarios qui se prêtent aux contraintes locales en termes de données et qui soient utiles pour les décideurs et les gestionnaires, est particulièrement adaptée pour explorer la gamme des tendances futures possibles, sans engagement à une seule et unique prévision (Brown, 2006; Millar *et al.*, 2007).

c) Gestion de la faune et des espèces en péril

Dans une récente revue de la littérature portant sur l'adaptation de la faune aux changements climatiques, Mawdsley *et al.* (2009) décrivent 16 stratégies d'adaptation proposées dans la littérature scientifique et dans la documentation associée aux politiques publiques. Quatre mesures concernant plus spécifiquement la gestion de la faune et des espèces en péril se retrouvent dans la liste :

1. Concentrer les efforts de conservation sur des espèces qui pourraient s'éteindre;
2. Déplacer les espèces à risque d'extinction des sites devenus inadéquats en raison des changements climatiques à des sites plus favorables à leur survie;
3. Établir des populations captives d'espèces qui autrement s'éteindraient (conservation *ex situ*);
4. Réduire les pressions autres que climatiques sur les espèces.

Plusieurs efforts allant dans le sens de ces recommandations existent déjà au Québec. De fait, le but principal des stratégies de conservation actuelles s'aligne particulièrement bien avec la quatrième recommandation, mais la perte d'habitats et la fragmentation demeurent malgré cela les causes les plus probables d'extinction pour certains groupes d'espèces (p. ex. les amphibiens et les reptiles). La loi québécoise sur les espèces menacées ou vulnérables (L.R.Q. 1989, c. E-12.01) et la loi canadienne sur les espèces en péril (L.C. 2002, ch. 29) permettent de protéger en terres publiques les espèces dont le statut est désigné comme particulier. Cependant, la plupart des espèces à risque sont situées dans le sud de la province, où la propriété des terres est majoritairement privée et où les aires protégées sont rares, ce qui limite la portée de certaines actions. Par ailleurs, les moyens financiers et l'appui politique manquent parfois pour des actions adéquates, et un manque de coordination entre les institutions responsables de la conservation des espèces empêche la stratégie d'être pleinement efficace. Il n'en demeure pas moins que de telles actions de protection sont à privilégier avant de procéder au déplacement des populations ou à l'établissement de populations captives, des solutions nécessitant des connaissances souvent non disponibles et dont l'acceptabilité n'est pas garantie. Elles peuvent par ailleurs s'avérer bien coûteuses à long terme, tant sur le plan financier qu'écologique.

Il est donc impératif d'évaluer et de renforcer les programmes de suivi de la faune et des écosystèmes. Des moyens pour renforcer les programmes de suivi de la biodiversité dans un contexte de changements climatiques sont actuellement analysés par le gouvernement du Québec, en collaboration avec des chercheurs universitaires (p. ex. projet CC-Suivi, mené par Pedro Peres-Neto dans le cadre du programme Éco-Bio-CC, PACC-26). Toutefois, les coûts relatifs au suivi de la biodiversité sur une superficie faiblement peuplée, telle que celle du territoire québécois, peuvent être prohibitifs. Engager davantage les naturalistes et autres interprètes de la nature à l'échelle de la province dans ce suivi pourrait représenter une option intéressante. Il faut également mettre à jour les plans, programmes et activités d'aménagement du territoire afin d'y intégrer les impacts projetés des changements climatiques. L'existence d'Ouranos, qui met en lien les utilisateurs des données, les planificateurs et les décideurs, et qui favorise la mise sur pied de nouveaux projets de recherche par l'entremise du Plan d'action sur les changements climatiques contribue à faire avancer cette stratégie. Des plans de conservation à l'échelle du paysage répondant explicitement aux besoins d'adaptation au climat de la faune et de la biodiversité doivent être développés, et ce, malgré la perception persistante du peu de bénéfices associés à la conservation. De tels plans existent (p. ex. Plan de conservation des salamandres de ruisseaux, Plan de conservation pour l'écorégion de la vallée du Saint-Laurent et du Lac Champlain), mais ils tardent à être intégrés aux schémas d'aménagement des MRC. Par ailleurs, ces plans n'incluent généralement pas de façon explicite les changements climatiques à leurs actions, bien que ceux-ci soient identifiés comme une menace imminente à la biodiversité.

Les implications spécifiques pour Covey Hill

Le mont Covey Hill demeure un milieu où le développement des activités humaines est relativement limité. L'affectation agro-forestière, qui caractérise la majorité de la colline, permet toutefois des activités qui peuvent entrer en conflit avec la conservation des milieux naturels : la construction résidentielle, l'exploitation de carrières et de sablières, l'exploitation de l'eau souterraine, l'établissement de campings, l'exploitation de commerces à vocation agro-touristique et la présence de hameaux (Frenette, 2008; MRC Le Haut-Saint-Laurent, 2012). Le Plan de conservation des salamandres de ruisseaux du mont Covey Hill (Frenette, 2008) établit par ailleurs un certain nombre de problématiques présentes dans la région ayant le potentiel d'affecter les salamandres : les perturbations hydriques (captage d'eau souterraine, déboisement, drainage, contamination, développement résidentiel), la fragmentation des habitats, la tenure des terres (majoritairement privée), le contexte social et économique (qui repose essentiellement sur les activités agricoles) et les zones de conflits d'usage (affectation agro-forestière, captage et risque de contamination de l'eau souterraine). Comme l'habitat de la salamandre sombre des montagnes au mont Covey Hill est limité aux petites résurgences en milieu forestier, il pourrait être compromis par un captage accru de la nappe pour des usages résidentiels, agricoles ou industriels dans un contexte de réchauffement climatique où le cycle de l'eau est appelé à s'intensifier, certes, mais où la distribution temporelle des précipitations est appelée à être davantage variable que ce que l'on connaît aujourd'hui.

Il a été avancé que les efforts de conservation qui ciblent les populations de salamandres dans les cours supérieurs des bassins versants (le type d'habitat rencontré au mont Covey Hill) doivent tenir compte de l'aménagement du territoire dans la totalité des bassins versants, et non seulement au sein de zones tampon riveraines. Idéalement, ces efforts doivent être coordonnés avec ceux des plans de développement et de conservation à l'échelle régionale afin d'en assurer une efficacité optimale. Dans le cas de la région de Covey Hill, ces plans sont entre autres le Plan métropolitain d'aménagement et de développement (PMAD ; région du Grand Montréal) ainsi que le Plan de conservation pour l'écorégion de la vallée du Saint-Laurent et du lac Champlain (Gratton, 2010). Les efforts de Conservation de la Nature Canada pour protéger un nombre grandissant de terrains sur la colline (p. ex. la tourbière sommitale) se conjuguent donc bien aux zones de protection circulaires et riveraines établies par le plan de conservation des salamandres de ruisseaux et les interventions en ce sens devraient être poursuivies dans le futur.

Bien que les changements climatiques soient identifiés comme pouvant altérer le régime hydrique à long terme, le Plan de conservation de Frenette (2008) se limite aux facteurs de perturbation hydrique actuellement mesurables. Le présent projet a permis d'aborder la question des changements climatiques pour la première fois au mont Covey Hill. Afin de gérer les risques et l'incertitude associés aux changements climatiques, l'approche par scénarios a été privilégiée dans le cadre de ce projet. Les variables climatiques de température et de précipitations de 10 scénarios climatiques fournis par Ouranos ont servi à alimenter les modèles hydrogéologiques et hydrologiques dont les résultats ont ensuite été intégrés au modèle de salamandres. Il est ainsi possible d'évaluer tant le scénario moyen projeté pour le futur que la gamme complète d'impacts possibles sur la salamandre sombre des montagnes à l'horizon 2050.

Les résultats de la modélisation MODFLOW montrent que les débits aux résurgences sont très sensibles à une modification de la recharge dans la portion nord de la colline. Les débits de base des cours d'eau sont quant à eux influencés par la recharge dans les secteurs près des cours d'eau. Seules la tourbière et la partie sommitale de la colline n'ont pas un impact significatif sur des variables hydrologiques qui influencent les habitats de salamandres. Il s'avère donc important de favoriser l'infiltration et la recharge sur l'ensemble du territoire, et non pas uniquement sur des zones très ciblées autour des résurgences ou le long des cours d'eau. Actuellement, le Plan de conservation des salamandres de ruisseaux du mont Covey Hill prévoit deux types de zones de protection entourant les sites où ont été observées des salamandres : des zones circulaires de 150 m de rayon et des zones riveraines de 60 par 500 m (Frenette, 2008). Certaines activités sylvicoles demeurent permises à l'intérieur de ces zones. Cette stratégie de conservation est issue d'une revue de littérature (Semlitsch et Bodie, 2003) et de recommandations issues par le MRNF (2006). Des zones de conservation prioritaires (ZCP) ont également été identifiées par Frenette (2008). Bien qu'elles couvrent une portion plus importante du territoire, et notamment une partie de la zone de recharge identifiée comme cruciale pour les résurgences, les ZCP ne couvrent pas toutes les zones de recharge identifiées par la modélisation comme étant importantes pour les habitats de salamandres. C'est la protection de ces zones de recharge qui devrait orienter les efforts de conservation futurs dans le secteur.

Selon les résultats de la modélisation, la tourbière du mont Covey Hill ne semble pas influencer significativement les variables hydrologiques qui soutiennent les habitats de salamandres. La démonstration de l'importance de protéger la tourbière n'est néanmoins plus à faire. Étant l'une des plus anciennes au Québec, elle héberge de précieuses archives écologiques et climatiques qui s'avèrent non seulement utiles pour reconstituer les conditions hydroclimatiques des derniers millénaires, mais également pour nous renseigner sur la résilience et la capacité d'adaptation de l'écosystème face au climat futur. Comme tout milieu humide situé en tête de bassin, cette tourbière joue un rôle écologique majeur localement et contribue au maintien de deux cours d'eau importants sur la colline, arguments largement suffisants pour commander sa protection.

L'analyse paléoécologique et la modélisation MODFLOW ont également mis en évidence la variabilité intrinsèque du climat au cours de la période 1900-2010. Ceci souligne l'importance pour la recherche visant à développer de nouvelles approches de conservation de disposer de sites expérimentaux voués au suivi à long terme des processus hydrologiques et des populations. Ce projet permet de mettre en évidence la contribution d'un site comme le Laboratoire naturel du mont Covey Hill, à la fois pour développer les connaissances locales et pour mettre au point des approches qui puissent être utilisées dans d'autres contextes. Les données recueillies dans de pareils sites sont cruciales pour ajuster les modèles afin qu'ils soient en mesure de mieux représenter la réalité observée dans le but d'enrichir la compréhension des processus hydrologiques et biologiques qui sous-tendent la résilience des espèces et pour développer des approches intégrées de conservation du territoire.

Les résultats de la modélisation HydroGeoSphere montrent quant à eux des conditions hydrologiques plus humides et le modèle écologique hybride (MEH) des habitats favorables à la survie des salamandres sombres des montagnes au mont Covey Hill à l'horizon 2050. Ces résultats *a priori* positifs sont très importants pour la conservation du territoire, non pas parce qu'ils limitent le besoin de protéger le territoire, mais bien parce qu'ils réduisent l'incertitude sur les conditions futures possibles (le climat n'agira pas au détriment de la population de

salamandres sombres des montagnes du mont Covey Hill). Ces résultats permettent également de focaliser les initiatives locales de conservation vers les perturbations connues et déjà identifiées.

Il n'en demeure pas moins que les modèles sont des représentations simplifiées du monde réel qui ne peuvent tenir compte de l'entière complexité des processus ayant cours dans la nature. Ils représentent des outils qui peuvent guider les initiatives de conservation, mais dont les résultats doivent être interprétés en considérant leur caractère partiel. La modélisation réalisée dans le cadre de ce projet pour le mont Covey Hill s'est particulièrement intéressée aux impacts des changements climatiques sur la dynamique des résurgences et des conditions de vie des salamandres. Elle a permis de démontrer qu'un climat plus humide et plus chaud favorisera les salamandres de ruisseaux. Il est toutefois très probable que les changements climatiques ne s'avèrent pas le seul moteur de changement pour la colline. D'autres pressions anthropiques concomitantes, telles que l'intensification de l'usage du sol ou du pompage de l'eau souterraine, pourraient agir de façon à amplifier ou à contrebalancer les impacts positifs des changements climatiques sur le régime hydrique des résurgences-habitats des salamandres. D'ici à ce que des modèles qui intègrent plusieurs de ces facteurs soient développés pour le mont Covey Hill, le principe de précaution doit prévaloir. Le renforcement des mesures existantes de conservation du territoire (p. ex. protection des habitats de salamandres et des zones préférentielles d'infiltration et de recharge) et le développement de nouvelles initiatives visant à augmenter la résilience de l'écosystème demeurent à privilégier.

6. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif général de ce projet était d'utiliser la modélisation hydrogéologique et écologique pour recommander des stratégies de conservation visant à promouvoir la résilience du milieu naturel du mont Covey Hill en présence de changements climatiques. Le projet s'est déroulé en quatre étapes.

1. Développement de modèles d'écoulements souterrains permettant 1) de comprendre l'hydrosystème de l'ensemble de la colline et 2) de quantifier la dynamique hydrique des résurgences servant d'habitats pour les salamandres;
2. Élaboration d'un modèle centré sur l'individu permettant de simuler le cycle de vie et la distribution des salamandres des ruisseaux;
3. Combinaison des deux modèles en un modèle écologique hybride afin d'évaluer les perspectives de résilience de ces salamandres sur le mont Covey Hill selon dix simulations climatiques régionales fournies par Ouranos (climat de référence 1971-2000, climat futur 2041-2070);
4. Formulation de recommandations de mesures de protection du territoire visant à atténuer les impacts des changements climatiques sur l'hydrologie et les populations de salamandres.

Conclusions

Les résultats du projet sont multiples pour chacune des étapes, ils sont originaux et apportent des contributions scientifiques importantes à la discipline de l'écohydrologie. Plusieurs résultats ont déjà fait l'objet de publications (Girard *et al.*, soumis; Lavoie *et al.*, soumis; Levison *et al.*, soumis) et d'autres articles scientifiques sont présentement en préparation. Le projet a fait l'objet de nombreuses présentations orales et affiches dans plusieurs congrès.

Par ailleurs, aucune analyse paléoclimatique, ni du climat passé récent ou du climat futur n'avait jusqu'ici été réalisée au mont Covey Hill. La gamme des conditions climatiques possibles était donc jusqu'ici à peu près inconnue. L'analyse paléoécologique a mis en évidence la grande variabilité du climat passé. Les augmentations de température projetées par les simulations climatiques pour l'horizon 2050 pourraient toutefois surpasser les températures les plus chaudes que la région ait connues depuis les derniers 13 000 ans. En revanche, l'augmentation de 9 % projetée pour les précipitations moyennes annuelles se situerait à l'intérieur de la gamme de précipitations connues. Par ailleurs, l'analyse des thécamoebiens et des précipitations nettes montre une tendance à la baisse de la recharge de 1900 à 2010. Cette évolution tend toutefois à s'inverser au cours des dernières décennies de la période. Ceci suggère que l'augmentation des précipitations projetée pour l'horizon 2050 aurait pour effet de contrebalancer l'augmentation de la température (et de l'évapotranspiration) et n'occasionnerait donc pas de baisse importante de l'eau disponible à la recharge, ni par conséquent des niveaux piézométriques sur le mont Covey Hill. Ces résultats soulignent toutefois l'importance de maintenir en opération des sites de suivi écosystémique à long terme, dans le but de comprendre la gamme des conditions climatiques auxquelles un milieu naturel est adapté. Les dix scénarios climatiques fournis par Ouranos

indiquent que le climat futur sera significativement plus chaud et également plus humide que ce que l'on connaît aujourd'hui. L'intensité des précipitations augmentera également de manière significative.

Le modèle MODFLOW qui représente l'ensemble de la colline est issu du développement d'un modèle existant qui simulait les écoulements en régime permanent. Le nouveau modèle permet de simuler adéquatement les conditions hydrogéologiques récentes observées, et ce en régime transitoire. L'analyse de sensibilité du modèle a montré que les niveaux piézométriques, les débits aux résurgences et les débits de base des cours d'eau sont sensibles à la recharge sur presque tout le mont Covey Hill. Lorsque le modèle a été utilisé avec les scénarios climatiques passés et futurs, les résultats montrent que ces variables pourraient augmenter significativement à l'horizon 2050.

Le modèle HydroGeoSphere a été développé entièrement pour les besoins de ce projet, dans le but de représenter plus en détails la dynamique des résurgences-habitats de salamandres qui sont présentes sur la face nord de la colline. La simulation à cette échelle de la dynamique de résurgences au moyen d'un modèle aussi précis qu'HydroGeoSphere est une première. Les résultats des simulations réalisées à partir des scénarios climatiques passés et futurs montrent que le débit moyen des résurgences et le nombre de jours d'activité de celles-ci augmentera pour la majorité des scénarios de climat futur étudiés. Plus particulièrement, le nombre de jours d'activité au cours de l'hiver et du printemps sera plus important à l'horizon 2050.

Le modèle de cycle de vie des salamandres développé dans ce projet permet de reproduire un ensemble de caractéristiques physiologiques, écologiques et comportementales typiques des salamandres de ruisseaux. Le modèle est également en mesure de reproduire les variations entre les durées de phases de développement des salamandres, de même que de reproduire convenablement les densités d'adultes observées en nature. La combinaison de ce modèle centré sur l'individu et d'un modèle environnemental développé notamment à partir des résultats hydrologiques du modèle HydroGeoSphere a produit un modèle écologique hybride (MEH). Le potentiel de celui-ci a été mis à profit dans le cadre de ce projet pour simuler la progression des populations de salamandres sombres des montagnes sur le mont Covey Hill en fonction des changements de température et d'activité hydrique des résurgences induits par les changements climatiques. Ce modèle nouveau et original constitue une contribution majeure dans le domaine de la modélisation écosystémique.

Le MEH indique une augmentation significative de l'abondance des salamandres sombres des montagnes à toutes les résurgences simulées. Cette augmentation s'accompagne d'une diminution significative de la probabilité d'extinction des salamandres aux résurgences aux plus hautes altitudes sur la colline. Le modèle a par ailleurs mis en évidence une accélération significative du cycle de vie des salamandres et un allongement de la période de reproduction.

L'ensemble des résultats montre l'importance de mettre en place des mesures de conservation qui permettent de favoriser la recharge sur l'ensemble du mont Covey Hill, c.-à-d. au-delà des zones de protection immédiates entourant les sites où les salamandres ont été observées, et de manière plus continue que les zones de conservation prioritaires déjà identifiées. En raison des conditions favorables pour les salamandres dans un climat futur, les

initiatives de conservation devraient être orientées vers la réduction des impacts des perturbations connues et déjà identifiées.

Recommandations

À la lumière des résultats obtenus dans ce projet de recherche, il est maintenant possible d'entrevoir le développement d'une approche intégrée pour la conservation du territoire à l'échelle locale. Cette approche devra être élaborée en étroite collaboration avec les organismes de conservation comme Conservation de la nature Canada, de manière à développer une approche qui soit compatible avec les outils existants de prise de décision. Une telle approche pourrait ainsi être utilisée dans une variété de contextes géologiques, hydrologiques et climatiques. Il en résultera des retombées concrètes pour l'adaptation aux changements climatiques.

Le développement d'une telle approche devra être réalisé sur un site connu, pour ensuite être transféré dans des conditions similaires ailleurs. Pour y parvenir, il est essentiel de maintenir en opération et d'approfondir la caractérisation de sites expérimentaux multidisciplinaires tel que le Laboratoire naturel du mont Covey Hill. Sur le mont Covey Hill, une caractérisation géologique détaillée tant des dépôts de surface que de la fracturation du roc permettrait de mieux définir la circulation de l'eau souterraine. Également, la mise en oeuvre d'une méthode d'échantillonnage systématique des salamandres (p. ex. données sur la dispersion des individus, sur les interactions intra- et inter-espèces, sur les taux de mortalité et de reproduction) permettant d'obtenir des statistiques d'abondance sur la colline fournirait des informations essentielles pour mieux calibrer et valider le modèle de salamandres. De tels laboratoires naturels permettent à la fois de développer les connaissances locales et de mettre au point des approches qui puissent être utilisées dans d'autres contextes. Les données qui y sont recueillies sont cruciales pour comprendre les processus hydrologiques et biologiques qui sous-tendent la résilience des espèces et pour développer des approches intégrées de conservation du territoire. Il est donc important d'investir les ressources nécessaires afin de poursuivre le suivi à long terme, tant des populations de salamandres que des variables hydrologiques.

L'approche développée devra être basée sur la mise en place d'un modèle entièrement couplé des écoulements de surface et souterrains pour l'ensemble de l'hydrosystème. Ce type de modèle présente plusieurs avantages, notamment l'utilisation d'un pas de temps inférieur à une journée qui permet de mieux représenter les phénomènes ayant cours à une échelle temporelle fine et donc de simuler de manière plus réaliste la recharge de l'aquifère. De plus, cette approche permettrait de simuler l'ensemble du cycle de l'eau sur la colline et ainsi d'inclure la variété des habitats des salamandres de ruisseaux. Il serait ainsi possible d'étendre l'analyse des habitats aux cours d'eau où se trouvent des espèces de salamandres de ruisseaux autres que la salamandre sombre des montagnes, dont la salamandre pourpre qui n'a pas été étudiée dans le présent projet. Les futurs travaux de recherche devront prendre en compte des scénarios d'évolution de l'occupation du territoire et d'autres impacts anthropiques. Ceux-ci n'ont pas été intégrés dans ce projet mais pourraient avoir un impact plus grand que celui des changements climatiques sur l'hydrologie et les habitats.

7. RÉFÉRENCES

- Aguilera, H., et J. M. Murillo. 2009. «The effect of possible climate change on natural groundwater recharge based on a simple model: a study of four karstic aquifers in SE Spain». *Environmental Geology*, vol. 57, no 5, p. 963-974.
- Alley, R. B. 2001. «The key to the past?». *Nature*, vol. 409, no 6818, p. 289.
- Alvo, R., et J. Bonin. 2003. «Rapport sur la situation de la salamandre sombre des montagnes (*Desmognathus ochrophaeus*) au Québec ». Société de la faune et des parcs du Québec.
- Barrington, S., H. Pillion et J. Bonin. 1992. «An evaluation of the water reserve potentials: the ecological region of the Covey Hill "Gulf"». Montreal, Faculty of Agriculture and Environmental Sciences, McGill University, 53 p.
- Bates, B., Z. W. Kundzewicz, S. Wu et J. Palutikof. 2008. «Climate change and water». Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Bellard, C., C. Bertelsmeier, P. Leadley, W. Thuiller et F. Courchamp. 2012. «Impacts of climate change on the future of biodiversity». *Ecology Letters*, vol. 15, no 4, p. 365-377.
- Belvisi, J. 2011. «Acquisition des données LiDAR - Secteurs de la Vallée-du-Haut-Saint-Laurent et Châteauguay & Vallée-du-Richelieu». Agence de géomatique de la Montérégie - GéoMont. Ste-Hyacinthe, Québec.
- Benstead, J. P., et D. S. Leigh. 2012. «An expanded role for river networks». *Nature Geoscience*, vol. 5, no 10, p. 678-679.
- Berteaux, D. 2005. «Impacts des changements climatiques sur la faune du Québec». *FrancVert - Le webzine environnemental*, vol. 2, no 3, p. 1-7.
- Brouyère, S., G. Carabin et A. Dassargues. 2004. «Climate change impacts on groundwater resources: Modelled deficits in a chalky aquifer, Geer basin, Belgium». *Hydrogeology Journal*, vol. 12, no 2, p. 123-134.
- Brown, I. 2006. «Modelling future landscape change on coastal floodplains using a rule-based GIS». *Environmental Modelling & Software*, vol. 21, p. 1479-1490.
- Bruce, R. C. 2005. «Theory of complex life cycles: application in plethodontid salamanders». *Herpetological Monographs*, vol. 19, no 1, p. 180-207.
- Buckland, S. M., K. Thompson, J. G. Hodgson et J. P. Grime. 2001. «Grassland invasions: effects of manipulations of climate and management». *Journal of Applied Ecology*, vol. 38, p. 301-309.

- Burke, J. J., et J. W. Gibbons. 1995. «Terrestrial buffer zones and wetland conservation: a case study of freshwater turtles in a Carolina bay». *Conservation Biology*, vol. 9, p. 1365-1369.
- Carroll, C. 2007. «Interacting effects of climate change, landscape conversion, and harvest on carnivore populations at the range margin: Marten and Lynx in the northern Appalachians». *Conservation Biology*, vol. 21, p. 1092-1104.
- Chen, J., J. F. Franklin et T. A. Spies. 1995. «Growing season microclimatic gradients from clearcut edges into old-growth douglas-fir forests». *Ecological Applications*, vol. 5, p. 74-86.
- Collen, B., N. Pettorelli, J. E. M. Baillie et S. M. Durant. 2013. *Biodiversity monitoring and conservation: Bridging the gap between global commitment and local action*: John Wiley & Sons, Ltd, 464 p.
- Croteau, A., M. Nastev et R. Lefebvre. 2010. «Groundwater recharge assessment in the Châteauguay River watershed». *Canadian Water Resources Journal*, vol. 35, no 4, p. 451-468.
- D'Amen, M., et P. Bombi. 2009. «Global warming and biodiversity: evidence for climate-linked amphibian declines in Italy.». *Biological Conservation*, vol. 142, p. 3060-3067.
- Davic, R. D., et H. H. Jr Welsh. 2004. «On the ecological role of salamanders». *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, vol. 35, p. 405-434.
- Dettinger, M.D., et S. Earman. 2007. «Western ground water and climate change—pivotal to supply sustainability or vulnerable in its own right». *Ground Water*, vol. 4, no 1, p. 4-5.
- Döll, P. 2009. «Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment». *Environmental Research Letters*, vol. 4, no 3, 035006.
- Dragoni, W., et B. S. Sukhija. 2008. «Climate change and groundwater: a short review». *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 288, no 1, p. 1-12.
- Eckhardt, K., et U. Ulbrich. 2003. «Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range». *Journal of Hydrology*, vol. 284, no 1-4, p. 244-252.
- Essl, F., S. Dullinger, D. Moser, W. Rabitsch et I. Kleinbauer. 2012. «Vulnerability of mires under climate change: Implications for nature conservation and climate change adaptation». *Biodiversity and Conservation*, vol. 21, no 3, p. 655-669.
- Finn, D. S., N. Bonada, C. Múrria et J. M. Hughes. 2011. «Small but mighty: headwaters are vital to stream network biodiversity at two levels of organization». *Journal of the North American Benthological Society*, vol. 30, no 4, p. 963-980.

- Fortin, J.-P., et A. Royer (2004). «Le modèle hydrologique HYDROTEL: bases théoriques». Manuel d'utilisation, rapport INRS-ÉTÉ, Sainte-Foy.
- Fournier, V. 2008. «Hydrologie de la tourbière du mont Covey Hill et implications pour la conservation». M. Sc. Terre, Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère, Université du Québec à Montréal, Montréal.
- Fowler, H. J., S. Blenkinsop et C. Tebaldi. 2007. «Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling». *International Journal of Climatology*, vol. 27, no 12, p. 1547-1578.
- Franzi, D., J. A. Rayburn, P. I. K. Knuepfer et T. M. Cronin. 2007. «Late Quaternary history of Northeastern New York and adjacent parts of Vermont and Quebec». 70th Reunion, Northeastern Friends of the Pleistocene, 1-3 juin 2007. Plattsburgh, New York.
- Franzi, D., J. A. Rayburn, C. H. Yansa et P. I. K. Knuepfer. 2002. «Late glacial water bodies in the Champlain and Hudson lowlands, New York». New York State Geological Association/New England Intercollegiate Geological Conference Joint Annual Meeting, 1-23 p.
- Fréchette, B., et A. de Vernal. 2013. «Evidence for large-amplitude biome and climate changes in Atlantic Canada during the last interglacial and mid-Wisconsinan periods». *Quaternary Research (United States)*, vol. 79, no 2, p. 242-255.
- Frenette, M. 2007. «Bilan des actions de l'Équipe de rétablissement des salamandres de ruisseaux du Québec». Conservation de la nature Canada, Montréal.
- Frenette, M. 2008. «Plan de conservation des salamandres de ruisseaux au mont Covey Hill, Montérégie». Présenté à l'Équipe de rétablissement des salamandres de ruisseaux, 55 p.
- Gagné, S. 2010. «Apport de l'eau souterraine aux cours d'eau et estimation de la recharge sur le mont Covey Hill». M. Sc. Terre, Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère. Université du Québec à Montréal, Montréal.
- Game, E. T., C. Groves, M. Andersen, M. Cross, C. Enquist, Z. Fernaña, E. Girvetz, A. Gondor, J. Hall, J. Higgins, R. Marshall, K. Popper, S. Schill et S.L. Shafer. 2010. «Incorporating climate change adaptation into regional conservation assessments». The Nature Conservancy, Arlington, Virginia.
- GIEC, 2001. Changements climatiques 2001: Rapport de synthèse. Résumé à l'intention des décideurs. Troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Genève, 37 p.
- Girard, P., L. Parrott, C. A. Caron et D. Green. soumis. «Pattern-oriented hybrid ecological models and their value for understanding stream salamander viability in changing hydrological regimes». *Ecological Modelling*.

- Globensky, Y. 1986. «Géologie de la région de Saint-Chrysostome et de Lachine (sud)». Ministère de l'énergie et des ressources, 167 p.
- Goderniaux, P., S. Brouyère, H. J. Fowler, S. Blenkinsop, R. Therrien, P. Orban et A. Dassargues. 2009. «Large scale surface-subsurface hydrological model to assess climate change impacts on groundwater reserves». *Journal of Hydrology*, vol. 373, no 1-2, p. 122-138.
- Gomi, T., R. C. Sidle et J. S. Richardson. 2002. «Understanding Processes and Downstream Linkages of Headwater Systems». *BioScience*, vol. 52, no 10, p. 905-916.
- Gouvernement du Canada. 2012. «Profil d'espèce - Salamandre sombre des montagnes Population des Grands Lacs et du Saint-Laurent». Registre public des espèces en péril. En ligne. Consulté le 29 janvier 2013.
<http://www.registrelep.gc.ca/search/advSearchResults_f.cfm?stype=species&advkey words=salamandre%20sombre%20des%20montagnes>.
- Gratton, L. 2010. «Plan de conservation pour l'écorégion de la vallée du Saint-Laurent et du lac Champlain. La société canadienne pour la conservation de la nature - Région du Québec». Conservation de la nature Canada, Montréal, 150 p.
- Green, D. M. 1997. «Temporal variation in abundance and age structure in Fowler's toads (*Bufo woodhousii fowleri*) at Long Point, Ontario». *Herpetological Conservation*, vol. 1, p. 45-56.
- . 2003. «The ecology of extinction: population fluctuation and decline in amphibians». *Biological Conservation*, vol. 111, p. 331-343.
- Green, T. R., M. Taniguchi, H. Kooi, J. J. Gurdak, D. M. Allen, K. M. Hiscock, H. Treidel et A. Aureli. 2011. «Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater». *Journal of Hydrology*, vol. 405, no 3-4, p. 532-560.
- Green, T. R. 2012. «Ground water and climate change». *Nature Climate Change*.
- Green, T. R., M. Taniguchi et H. Kooi. 2007. «Potential impacts of climate change and human activity on subsurface water resources». *Vadose Zone Journal*, vol. 6, no 3, p. 531-532.
- Grimm, V., et S. F. Railsback. 2005. *Individual-based Modeling and Ecology*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 428 p.
- Grover, M. C. 2000. «Determinants of salamander distribution along moisture gradients.». *Copeia*, vol. 2000, p. 156-168.
- Gurdak, J. J., et C. D. Roe. 2010. «Review: Recharge rates and chemistry beneath playas of the High Plains aquifer, USA». *Hydrogeology Journal*, vol. 18, no 8, p. 1747-1772.

- Haigh, M. J., R. B. Singh et J. Krecek. 1998. «Headwater control: Matters arising». In *Headwaters: Water Resources and Soil Conservation*, M. J. Haigh, J. Krecek, G. S. Rajwar et M. P. Kilmartin. Rotterdam, Pays-Bas: A.A. Balkema, p. 3-24.
- Hairston, N. G. 1949. «The local distribution and ecology of the Plethodontid salamanders of the southern Appalachian.». *Ecological Monographs*, vol. 19, p. 47-73.
- Hamburg, S. P., M. A. Vadeboncoeur, A. D. Richardson et A. S. Bailey. 2013. «Climate change at the ecosystem scale: A 50-year record in New Hampshire». *Climatic Change*, vol. 116, no 3-4, p. 457-477.
- Hannah, L., G. Midgley, S. Andelman, M. Araújo, G. Hughes, E. Martinez-Meyer, R. Pearson et P. Williams. 2007. «Protected area needs in a changing climate». *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 5, no 3, p. 131-138.
- Heller, N. E., et E. S. Zavaleta. 2009. «Biodiversity management in the face of climate change: A review of 22 years of recommendations». *Biological Conservation*, vol. 142, p. 14-32.
- Hobbs, R. J., S. Arico, J. Aronson, J. S. Baron, P. Bridgewater, V. A. Cramer, P. R. Epstein, J. J. Ewel, C. A. Klink, A. E. Lugo, D. Norton, D. Ojima, D. M. Richardson, E. W. Sanderson, F. Valladares, M. Vilà, R. Zamora et M. Zobel. 2006. «Novel ecosystems: theoretical and management aspects of the new ecological world order». *Global Ecology and Biogeography*, vol. 15, no 1, p. 1-7.
- Holman, I. P., D. M. Allen, M. O. Cuthbert et P. Goderniaux. 2012. «Towards best practice for assessing the impacts of climate change on groundwater». *Hydrogeology Journal*, vol. 20, no 1, p. 1-4, 2012/02/01.
- Holman, I. P. 2006. «Climate change impacts on groundwater recharge-uncertainty, shortcomings, and the way forward?». *Hydrogeology Journal*, vol. 14, no 5, p. 637-647.
- Huard, D., et D. Chaumont (2011). «Extrêmes de précipitations en climat futur sur les régions agricoles du Québec». Ouranos, Montréal, 65 p.
- Jaeger, R. G. 1971. «Competitive exclusion as a factor influencing the distributions of two species of terrestrial salamanders.». *Ecology*, vol. 52, p. 632-637.
- Jyrkama, M. I., et J. F. Sykes. 2007. «The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the grand river watershed (Ontario)». *Journal of Hydrology*, vol. 338, no 3-4, p. 237-250.
- Karl, T. R., N. Nicholls et A. Ghazi. 1999. «CLIVAR/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes - Workshop summary». *Climatic Change*, vol. 42, no 1, p. 3-7.
- Keen, W. H. 1982. «Habitat selection and interspecific competition in two species of plethodontid salamanders.». *Ecology*, vol. 63, p. 94-102.

- Kostyack, J., et D. Rohlf. 2008. «Conserving endangered species in an era of global warming». *ELR News & Analysis*, vol. 38, no 4, 10203.
- Kosugi, K., S. Katsura, M. Katsuyama et T. Mizuyama. 2006. «Water flow processes in weathered granitic bedrock and their effects on runoff generation in a small headwater catchment». *Water Resources Research*, vol. 42, no 2.
- Krzysik, A. J. 1979. «Resource allocation, coexistence, and the niche structure of a streambank salamander community.». *Ecological Monographs*, vol. 49, p. 173-194.
- Kundzewicz, Z. W., L. J. Mata, N. W. Arnell, P. Döll, B. Jimenez, K. Miller, T. Oki, Z. Şen et I. Shiklomanov. 2008. «The implications of projected climate change for freshwater resources and their management». *Hydrological Sciences Journal*, vol. 53, no 1, p. 3-10
- Lamarre, A. 2011. «Développement d'une fonction de transfert au moyen des thécamoebiens et reconstitution des conditions paléoenvironnementales holocènes d'une tourbière à paises, Kuujuarapik, Québec nordique». M. Sc. Géographie. Université du Québec à Montréal, Montréal.
- Lapointe, F. J., et I. Lefebvre. 2008. «Protocole d'échantillonnage de la salamandre sombre des montagnes (*Desmognathus ochrophaeus*) à Covey Hill à des fins de suivi à long terme des populations». Rapport rédigé pour l'Équipe de rétablissement des salamandres de ruisseaux. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 30 p.
- Larocque, M., G. Leroux, C. Madramootoo, F. J. Lapointe, S. Pellerin et J. Bonin. 2006. «Mise en place d'un Laboratoire naturel sur le mont Covey Hill (Québec, Canada)». *Vertigo*, vol. 17, no 1, p. 1-11.
- Larocque, M., et S. Pellerin. 2006. «Dynamique hydrologique des habitats de la salamandre sombre des montagnes et de la salamandre pourpre sur la colline de Covey». Rapport soumis à la WWF-ESRF, 40 p.
- Lasalle, P. 1981. «Géologie des sédiments meubles de la région St-Jean-Lachine». Ministère de l'Énergie et des ressources du Québec.
- Lavigne, M.-A., M. Nastev et R. Lefebvre. 2010. «Numerical simulation of groundwater flow in the Chateauguay River Aquifers». *Canadian Water Resources Journal*, vol. 35, no 4, p. 469-486.
- Lavoie, M., et S. Pellerin. 2011. «Étude paléoécologique de la tourbière de la réserve écologique du Pin-Rigide». Rapport final présenté au MDDEP, Direction du patrimoine écologique et des parcs, Québec.
- Lavoie, M., S. Pellerin et M. Larocque. soumis. «Late glacial and Holocene vegetation dynamics, climate and peatland development in the northward extension of the Adirondack Mountains». *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*.

- Lavoie, M., et P. J. H. Richard. 2000. «Postglacial water-level changes of a small lake in southern Québec, Canada». *The Holocene*, vol. 10, p. 621-634.
- Legendre, P., et L. Legendre. 2012. *Numerical Ecology*, 3^e édition. Coll. «Developments in Environmental Modelling»: Elsevier Science.
- Levison, J., M. Larocque, V. Fournier, S. Gagné, S. Pellerin et M.-A. Ouellet. soumis. «Dynamics of a headwater system and peatland under current conditions and with climate change». *Hydrological Processes*.
- Levison, J., M. Larocque et M.-A. Ouellet. 2012. «Simulating the hydrological dynamics of bedrock springs under current conditions and climate change scenarios». Congrès de l'Association internationale des hydrogéologues, 16-21 Septembre 2012, Niagara Falls, ON.
- Loaiciga, H. A., J. B. Valdes, R. Vogel, J. Garvey et H. Schwarz. 1996. «Global warming and the hydrologic cycle». *Journal of Hydrology*, vol. 174, no 1-2, p. 83-127.
- Locatelli, B., V. Evans, A. Wardell, A. Andrade et R. Vignola. 2011. «Forests and climate change in latin America: Linking adaptation and mitigation». *Forests*, vol. 2, no 1, p. 431-450.
- Lowe, W. H., et G. E. Likens. 2005. «Moving Headwater Streams to the Head of the Class». *BioScience*, vol. 55, no 3, p. 196-197.
- MacDonald, L. H., et D. Coe. 2007. «Influence of Headwater Streams on Downstream Reaches in Forested Areas». *Forest Science*, vol. 53, no 2, p. 148-168.
- Mailhot, A., S. Duchesne, D. Caya et G. Talbot. 2007. «Assessment of future change in intensity-duration-frequency (IDF) curves for southern Quebec using the Canadian regional climate model (CRCM)». *Journal of Hydrology*, vol. 347, no 1-2, p. 197-210.
- Mailhot, A., A. Kingumbi, G. Talbot et A. Poulin. 2010. «Future changes in intensity and seasonal pattern of occurrence of daily and multi-day annual maximum precipitation over Canada». *Journal of Hydrology*, vol. 388, no 3-4, p. 173-185.
- Mareuil, A., R. Leconte, F. Brissette et M. Minville. 2007. «Impacts of climate change on the frequency and severity of floods in the Châteauguay River basin, Canada». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 34, no 9, p. 1048-1060.
- Matocha, J., G. Schroth, T. Hills et D. Hole. 2012. «Integrating Climate Change Adaptation and Mitigation Through Agroforestry and Ecosystem Conservation». In *Agroforestry - The Future of Global Land Use*, P. K. R. Nair et D. Garrity. Advances in Agroforestry: Springer Netherlands, vol. 9, p. 105-126.
- Mawdsley, J. R., R. O'Malley et D. S. Ojima. 2009. «A review of climate-change adaptation strategies for wildlife management and biodiversity conservation». *Conservation Biology*, vol. 23, p. 1080-1089.

- Mayhew, P. J., M. A. Bell, T. G. Benton et A. J. McGowan. 2012. «Biodiversity tracks temperature over time». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 109, no 38, p. 15141-15145
- McClain, C. R., J. C. Stegen et A. H. Hurlbert. 2012. «Dispersal, environmental niches and oceanic-scale turnover in deep-sea bivalves». *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 279, no 1735, p. 1993-2002.
- McLachlan, Jason S., Jessica J. Hellmann et Mark W. Schwartz. 2007. «A Framework for Debate of Assisted Migration in an Era of Climate Change». *Conservation Biology*, vol. 21, no 2, p. 297-302.
- Mearns, L. O., R. Arritt, S. Biner, M. S. Bukovsky, S. McGinnis, S. Sain, D. Caya, J. Correia Jr, D. Flory, W. Gutowski, E. S. Takle, R. Jones, R. Leung, W. Moufouma-Okia, L. McDaniel, A. M. B. Nunes, Y. Qian, J. Roads, L. Sloan et M. Snyder. 2012. «The north american regional climate change assessment program overview of phase I results». *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 93, no 9, p. 1337-1362.
- Metcalfe, J. D., W. J. F. Le Quesne, W. W. L. Cheung et D. A. Righton. 2012. «Conservation physiology for applied management of marine fish: an overview with perspectives on the role and value of telemetry». *Philosophical transactions of the Royal Society B*, vol. 367, no 1596, p. 1746-1756.
- Meyer, J. L., D. L. Strayer, J. B. Wallace, S. L. Eggert, G. S. Helfman et N. E. Leonard. 2007. «The Contribution of Headwater Streams to Biodiversity in River Networks¹». *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 43, no 1, p. 86-103.
- Millar, C. I., N. L. Stephenson et S. L. Stephens. 2007. «Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty». *Ecological Applications*, vol. 17, p. 2145-2151.
- Milly, P. C. D., K. A. Dunne et A. V. Vecchia. 2005. «Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate». *Nature*, vol. 438, no 7066, p. 347-350.
- Mpelasoka, F. S., et F. H. S. Chiew. 2009. «Influence of rainfall scenario construction methods on runoff projections». *Journal of Hydrometeorology*, vol. 10, no 5, p. 1168-1183.
- MRC Le Haut-Saint-Laurent. 2012. «Schéma d'aménagement révisé». Préparé par le conseil de la MRC Le Haut-Saint-Laurent et le service d'aménagement.
- MRNF. 2006. «Protection des espèces menacées ou vulnérables en forêt publique - Les salamandres de ruisseaux: la salamandre pourpre (*Gyrinophilus porphyriticus*), la salamandre sombre des montagnes (*Desmognathus ochrophaeus*) et la salamandre sombre du Nord (*Desmognathus fuscus*), Québec». Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 43 p.
- Muller, S. D., P. J. H. Richard, J. Guiot, J.-L. de Beaulieu et D. Fortin. 2003. «Postglacial climate in the St. Lawrence lowlands, southern Quebec: pollen and lake-level

- evidence». *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 193, no 1, p. 51-72.
- Music, B., et D. Caya. 2007. «Evaluation of the hydrological cycle over the Mississippi River Basin a simulated by the Canadian regional climate model (CRCM)». *Journal of Hydrometeorology*, vol. 8, no 5, p. 969-988.
- Nastev, M., R. Morin, R. Godin et A. Rouleau. 2008. «Developing a conceptual hydrological model for Potsdam sandstones in southwestern Quebec, Canada». *Hydrogeology Journal*, vol. 16, p. 373-388.
- Omann, I., A. Stocker et J. Jäger. 2009. «Climate change as a threat to biodiversity: An application of the DPSIR approach». *Ecological Economics*, vol. 69, no 1, p. 24-31.
- Organ, J. A. 1961. «Studies of the local distribution, life history, and population dynamics of the salamander genus *Desmognathus* in Virginia. ». *Ecological Monographs*, vol. 31, p. 189-220.
- Oudin, L., F. Hervieu, C. Michel, C. Perrin, V. Andréassian, F. Anctil et C. Loumagne. 2005. «Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling». *Journal of Hydrology*, vol. 303, no 1-4, p. 290-306.
- Ouellet, M.-A., M. Larocque et J. Levison. 2012. «Linking climate change and groundwater: impact of climate model uncertainty on predicted recharge». International Association of Hydrogeologists 2012 Congress. Niagara Falls, Sept. 16-21 2012.
- . 2013. «Changements climatiques et résurgences d'eau souterraine: une bonne nouvelle pour les salamandres de ruisseaux?» La Recherche hydrologique au Québec dans un contexte de changements climatiques. Québec, 25 et 26 avril 2013.
- Parent, M., et S. Occhietti. 1988. «Late Wisconsinan Deglaciation and Champlain Sea Invasion in the St. Lawrence Valley, Québec». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 42, no 3, p. 215-246.
- Pellerin, S., L. A. Lagneau, M. Lavoie et M. Larocque. 2009. «Environmental factors explaining the vegetation patterns in a temperate peatland». *Comptes Rendus - Biologies*, vol. 332, no 8, p. 720-731.
- Pellerin, S., M. Larocque et M. Lavoie. 2007. «Rôle hydrologique et écologique régional de la tourbière de Covey Hill». Rapport présenté à la Fondation EJLB, 63 p.
- Peters, R. L., et J. D. S. Darling. 1985. «The greenhouse-effect and nature reserves». *BioScience*, vol. 35, p. 707-717.
- Petranka, J. W. 1998. *Salamanders of the United States and Canada*. Washington and London: Smithsonian Institution Press, 587 p.

- Pettorelli, N. 2012. «Climate change as a main driver of ecological research». *Journal of Applied Ecology*, vol. 49, no 3, p. 542-545.
- Poirier, C., T.-C. Fortier Filion, R. Turcotte et P. Lacombe. 2012. «Apports verticaux journaliers estimés de 1900-2010 - version avril 2012». Contribution au Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES). Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), Direction de l'expertise.
- Pounds, J. A., M. P. L. Fogden, J. M. Savage et G. C. Gorman. 1997. «Tests of null models for amphibian declines on a tropical mountain». *Conservation Biology*, vol. 11, no 6, p. 1307-1322.
- Rayburn, J. A., T. M. Cronin, D. A. Franzi, P. L. K. Knuepfer et D. A. Willard. 2011. «Timing and duration of North American glacial lake discharges and the Younger Dryas climate reversal». *Quaternary Research*, vol. 75, no 3, p. 541-551.
- Rio, C. R. 2012. «The Role of Ecosystems in Building Climate Change Resilience and Reducing Greenhouse Gases». In *Integrating Ecology and Poverty Reduction*, J. C. Ingram, F. DeClerck et C. R. Rio. Springer New York, p. 331-352.
- Rivard, C., H. Vigneault, A. R. Piggott, M. Larocque et F. Ancil. 2009. «Groundwater recharge trends in Canada». *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 46, no 11, p. 841-854.
- Rosa, E., M. Larocque, S. Pellerin, S. Gagné et B. Fournier. 2009. «Determining the number of manual measurements required to improve peat thickness estimations by ground penetrating radar». *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 34, no 3, p. 377-383.
- Rousseau, A. N., A. Mailhot, M. Slivitzky, J.-P. Villeneuve, M. J. Rodriguez et A. Bourque. 2004. «Usages et approvisionnement en eau dans le sud du Québec Niveau des connaissances et axes de recherche à privilégier dans une perspective de changements climatiques». *Canadian Water Resources Journal*, vol. 29, no 2, p. 121-134.
- Ruhl, J. B. 2007. «Climate Change and the Endangered Species Act». *Boston University Law Review*, vol. 88, no 1, p. 1-62.
- Schloss, C. A., J. J. Lawler, E. R. Larson, H. L. Papendick, M. J. Case, D. M. Evans, J. H. DeLap, J. G. R. Langdon, S. A. Hall et B. H. McRae. 2011. «Systematic conservation planning in the face of climate change: Bet-hedging on the Columbia Plateau». *PLoS ONE*, vol. 6, no 12, p. 1-9.
- Schweiger, O., J. Settele, O. Kudrna, S. Klotz et I. Kühn. 2008. «Climate change can cause spatial mismatch of tropically interacting species». *Ecology*, vol. 89, no 12, p. 3472-3479.
- Scibek, J., D. M. Allen et P. H. Whitfield. 2008. «Quantifying the impacts of climate change on groundwater in an unconfined aquifer that is strongly influenced by surface water». *Geological Society of London Special Publications*, vol. 288, no 1, p. 79-98.

- Scott, D., et C. Lemieux. 2005. «Climate change and protected area policy and planning in Canada». *The Forestry Chronicle*, vol. 81, no 5, p. 696-703.
- Secrétariat de la convention sur la diversité biologique. 2007. La diversité biologique et les changements climatiques. En ligne. Consulté le 25 février 2013. <<http://www.cbd.int/doc/bioday/2007/ibd-2007-booklet-01-fr.pdf>>.
- Semlitsch, R. D. 1998. «Biological delineation of terrestrial buffer zones for pond-breeding salamanders». *Conservation Biology*, vol. 12, p. 1113-1119.
- Semlitsch, R. D., et J. R. Bodie. 2003. «Biological Criteria for Buffer Zones around Wetlands and Riparian Habitats for Amphibians and Reptiles». *Conservation Biology*, vol. 17, no 5, p. 1219-1228.
- Settele, J., J. Biesmeijer et R. Bommarco. 2008. «Switch to ecological engineering would aid independence». *Nature*, vol. 456, no 7222, p. 570.
- Sharbel, T. F., et J. . *Journal of Herpetology*, vol. 26, no 4, p. 505-508.
- Sherif, M. M., et V. P. Singh. 1999. «Effect of climate change on sea water intrusion in coastal aquifers». *Hydrological Processes*, vol. 13, no 8, p. 1277-1287.
- Smith, E. M., et F. H. Pough. 1994. «Intergeneric aggression among salamanders». *Journal of Herpetology*, vol. 28, p. 41-45.
- Stillman, R. A., et J. D. Goss-Custard. 2010. «Individual-based ecology of coastal birds». *Biological Reviews*, vol. 85, p. 413-434.
- Studds, C. E., et P. P. Marra. 2007. «Linking fluctuations in rainfall to nonbreeding season performance in a long-distance migratory bird, *Setophaga ruticilla*». *Climate Research*, vol. 35, no 1-2, p. 115-122.
- Suffling, R., et D. Scott. 2002. «Assessment of climate change effects on Canada's national park system». *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 74, p. 117-139.
- Therrien, R., R. G. McLaren, E. A. Sudicky et S. M. Panday. 2010. «HydroGeoSphere: A three-dimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and surface flow and solute transport - User's Manual». Groundwater Simulations Group, 457 p. En ligne. <http://www.ggl.ulaval.ca/fileadmin/professeurs/rethe1/hydrosphere_01.pdf>.
- Toews, M. W., et D. M. Allen. 2009. «Evaluating different GCMs for predicting spatial recharge in an irrigated arid region». *Journal of Hydrology*, vol. 374, no 3-4, p. 265-281.
- Tremblay, T., M. Nastev et M. Lamothe. 2010. «Grid-based hydrostratigraphic 3D modelling of the Quaternary sequence in the Châteauguay River watershed, Quebec». *Canadian Water Resources Journal*, vol. 35, no 4, p. 377-398.

- Vaccaro, J. J. 1992. «Sensitivity of groundwater recharge estimates to climate variability and change, Columbia Plateau, Washington». *Journal of Geophysical Research*, vol. 97, no D3, p. 2821-2833.
- Van Dijk, A. I. J. M., P. B. Hairsine, J. P. Arancibia et T. I. Dowling. 2007. «Reforestation, water availability and stream salinity: A multi-scale analysis in the Murray-Darling Basin, Australia». *Forest Ecology and Management*, vol. 251, no 1–2, p. 94-109.
- Vellend, M., et M. A. Geber. 2005. «Connections between species diversity and genetic diversity». *Ecology Letters*, vol. 8, p. 767-781.
- Wake, D. B, et V. T. Vredenburg. 2008. «Are we in the midst of the sixth mass extinction? A view from the world of amphibians». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 105, no Suppl.1, p. 11466-11473.
- Werner, E. E. 1986. «Amphibian metamorphosis: growth rate, predation risk, and the optimal size at transformation.». *American Naturalist*, vol. 128, p. 319-341.
- Whitmore, J., K. Gajewski, M. Sawada, J. W. Williams, B. Shuman, P. J. Bartlein, T. Minckley, A. E. Viau, T. Webb III, S. Shafer, P. Anderson et L. Brubaker. 2005. «Modern pollen data from North America and Greenland for multiscale paleoenvironmental applications». *Quaternary Science Reviews*, vol. 24, p. 1828-1848.
- Wiens, J. A., et D. Bachelet. 2010. «Matching the multiple scales of conservation with the multiple scales of climate change: Special section». *Conservation Biology*, vol. 24, no 1, p. 51-62.
- Williams, J. W., S. T. Jackson et J. E. Kutzbach. 2007. «Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD». *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 104, no 14, p. 5738-5742.
- Willson, J. D., et M. E. Dorcas. 2003. «Effects of Habitat Disturbance on Stream Salamanders: Implications for Buffer Zones and Watershed Management». *Conservation Biology*, vol. 17, no 3, p. 763-771.
- Winter, T. C. 2007. «The role of ground water in generating streamflow in headwater areas and in maintaining base flow». *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 43, no 1, p. 15-25.
- Wipfli, M. S., J. S. Richardson et R. J. Naiman. 2007. «Ecological Linkages Between Headwaters and Downstream Ecosystems: Transport of Organic Matter, Invertebrates, and Wood Down Headwater Channels¹». *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 43, no 1, p. 72-85.
- Yagouti, A., G. Boulet, L. Vincent, L. Vescovi et É. Mekis. 2008. «Observed changes in daily temperature and precipitation indices for Southern Québec, 1960-2005.». *Atmosphere - Ocean*, vol. 46, no 2, p. 243-256.

SECTION D : INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES

4.1 Progrès lié au processus de réalisation du projet

i) Sommaire des étapes

Décrire, en vous appuyant notamment sur le tableau Excel de la proposition initiale, les principales étapes et activités qui ont contribué à l'atteinte des objectifs du projet. Pour chacune des étapes abandonnées, décrire brièvement les principaux problèmes rencontrés. Identifier également les étapes et activités qui n'avaient pas été prévues dans la proposition initiale.

Thème 1 : Modélisation de l'écoulement souterrain

- Construction du modèle hydrologique
- Calage du modèle sur les données actuelles et sur le passé récent
- Échantillonnage de tourbe, datations et analyses des thécamoebiens
- Test du modèle avec les données qualitatives du paléoclimat
- Élaboration d'une base de données pour le Laboratoire naturel

Les travaux liés à ce thème ont débuté par le recensement complet des données hydrogéologiques, hydrologiques et météorologiques existantes pour le site d'étude. Une base de données Access a été élaborée pour faciliter le stockage et l'accès à ces données pour la durée du projet et pour références futures. Ces données ont servi à la vérification et à l'ajustement du modèle d'écoulements souterrains qui avait été mis en place pour le mont Covey Hill. Ce modèle, calé avec des données mesurées *in situ* et fonctionnant en mode permanent, s'est avéré une juste représentation de l'hydrosystème général de la colline. Une analyse de sensibilité du modèle d'écoulements souterrains MODFLOW aux changements à la recharge (selon trois scénarios de variations de +10 %, -15 % et -30 %) a d'abord indiqué des impacts significatifs au niveau de l'hydrologie du mont Covey Hill. Par exemple, une réduction de 30 % de la recharge annuelle a induit un déclin important des niveaux d'eau souterraine, l'assèchement de certains ruisseaux et l'arrêt de l'apport en eau souterraine de l'aquifère à la tourbière au sommet de la colline.

Le développement de ce modèle a permis de le rendre apte à simuler des écoulements souterrains en mode transitoire, avec un pas de temps saisonnier, puis mensuel. Bien que l'intégration au modèle des séries temporelles issues des scénarios climatiques du MRCC fournies par Ouranos ait permis de déterminer l'impact des changements climatiques sur le mont Covey Hill en général, le modèle MODFLOW ne s'est pas avéré suffisamment précis pour simuler l'activité des résurgences qui représentent l'habitat de la salamandre sombres de montagnes. C'est la raison pour laquelle un autre type de modèle permettant de représenter l'écoulement des sources à partir de fractures distinctes dans le roc a été développé. Ce modèle, Hydrogeosphere (HGS), est un modèle 3D qui fonctionne en régime transitoire et qui, dans le cadre de cette étude, représente une tranche du mont Covey Hill où l'activité des résurgences est suivie. Les résultats du modèle sont les périodes d'activité des sources, les



débites de celles-ci de même que la proportion des précipitations qui s'infiltrer. Ces résultats ont été intégrés au modèle de salamandres.

Des analyses des macrorestes végétaux et des thécamoebiens (organismes unicellulaires utilisés comme indicateurs biologiques permettant de reconstituer les variations d'humidité dans les sols) de même que des datations ^{14}C et ^{210}Pb pour la tourbière de Covey Hill et de celle de la réserve écologique du Pin-Rigide ont été effectuées afin d'identifier les conditions paléoclimatiques de la région, notamment sous l'angle hydroclimatique. Une fonction de transfert a été appliquée pour les assemblages fossiles des thécamoebiens de la tourbière et les positions passées de la nappe phréatique ont été reconstituées. Par ailleurs, une reconstitution paléoclimatique quantitative a été réalisée pour le site de Covey Hill à partir des données polliniques (fonction de transfert pollen-climat). Pour les 13 000 dernières années, les variables qui ont été reconstituées sont : température moyenne du mois le plus froid (janvier), température moyenne du mois le plus chaud (juillet), précipitations totales annuelles et évapotranspiration potentielle.

Les apports verticaux de 1900 à 2010 fournis par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) en cours de projet ont été utilisés afin de comparer les données climatiques disponibles pour le dernier siècle avec les informations obtenues par l'entremise de l'analyse des thécamoebiens dans la tourbe. Les apports verticaux se sont avérés utiles pour la modélisation hydrogéologique comme le modèle MODFLOW n'intègre pas de module de fonte de la neige. L'utilisation des apports verticaux au lieu des précipitations dans le calcul des précipitations nettes (Pnet) alimentant le modèle MODFLOW pour la période 1900-2010 a permis une comparaison plus juste des niveaux de nappe inférés par l'analyse des thécamoebiens avec les conditions simulées par le modèle d'écoulements souterrains pour le dernier siècle.

En cours de route, certains aspects du projet liés au thème 1 ont donc dû être modifiés pour des raisons techniques :

1. En raison de la divergence de résolution spatiale irrécyclable entre le modèle d'écoulements souterrains MODFLOW (cellules de 165 m) et l'environnement numérique bâti pour les salamandres (1 m), les résultats du modèle d'écoulements souterrains n'ont pas pu être utilisés directement dans le modèle de salamandres. Cependant, ce modèle est demeuré utile à l'investigation de l'impact des changements climatiques sur les écoulements souterrains de la colline.
2. Les options de routage de l'eau en rivière n'ont pas été incluses dans le modèle MODFLOW. Cette option aurait compliqué le modèle au-delà de nos capacités à le caler et à valider les résultats.
3. Par ailleurs, les flux de recharge simulés à l'aide du modèle d'infiltration HELP n'ont pas été utilisés dans le modèle MODFLOW. Les imprécisions inhérentes au modèle HELP ont été jugées trop importantes pour que le modèle soit utile dans la présente étude. La recharge utilisée dans MODFLOW a plutôt été calculée à partir de la précipitation nette mensuelle modifiée pour tenir compte d'un coefficient de ruissellement déterminé à partir du modèle HGS.



4. Les débits des résurgences ayant servi d'intrants au modèle de salamandres sont issus des résultats de HGS plutôt que de ceux de MODFLOW. Puisque ces résurgences sont essentiellement des habitats pour la salamandre sombre des montagnes, les simulations couplées hydrologie-population pour la salamandre pourpre n'ont pas été réalisées.

La décision d'utiliser HGS pour simuler l'activité aux résurgences a entraîné des étapes supplémentaires à celles prévues à l'origine du projet :

- Construction d'un modèle d'écoulement couplé surface/sous-surface avec HGS permettant la représentation de l'écoulement de l'eau souterraine au sein de fractures distinctes;
- Calage du modèle HGS sur les cinq dernières années;
- Simulation des débits aux résurgences pour la période 1971-2000 à partir des données climatiques mesurées à la station de Hemmingford;
- Intégration des scénarios climatiques pour simuler l'impact sur l'activité des sources pendant la période de référence (1971-2000) et pour la période future (2041-2070).

Le modèle HGS présente des avantages pour la modélisation des écoulements souterrains en milieu fracturé par rapport à d'autres modèles qui représentent le sous-sol comme un milieu poreux et homogène (i.e. MODFLOW). Sa mise en œuvre a permis d'investiguer les mécanismes qui régissent l'écoulement des résurgences qui supportent les habitats des salamandres et de déterminer comment ces sources peuvent être représentées de façon numérique afin d'obtenir une capacité de projection en fonction d'éventuels changements du climat. Les résultats ont été comparés à ceux obtenus par MODFLOW pour évaluer les divergences entre les deux types de modèles.

Similairement à l'application qui a été faite du modèle MODFLOW, le modèle HGS a été calé sur les cinq dernières années. Il a ensuite fait l'objet de simulations pour reproduire la dynamique des résurgences pour les différents scénarios climatiques passés et futurs. Ces tâches n'avaient pas été prévues dans la proposition de recherche initiale.

Il est important de signaler que la stagiaire postdoctorale Jana Levison, qui était impliquée dans la modélisation des écoulements à partir de janvier 2011, a quitté l'UQAM en mai 2012 pour occuper un poste de professeure en hydrogéologie à l'Université de Guelph. Les simulations des scénarios climatiques avec le modèle MODFLOW ont été réalisées par une stagiaire de premier cycle en génie de l'environnement de l'Université de Waterloo (stage de septembre à décembre 2012). Cette étudiante a travaillé à l'Université de Guelph et a été dirigée directement par Jana Levison, sous la coordination de Marie Larocque à l'UQAM.



Thème 2 : Modélisation de la dynamique des populations de salamandres

- Compilation de toutes les données existantes sur la dynamique des populations de salamandres
- Développement d'une approche de modélisation multi-échelles*
- Validation du modèle à l'aide d'une approche basée sur les patrons de distribution connus des espèces de salamandres*

La première partie du travail de modélisation des salamandres a consisté à développer un modèle général représentant le cycle de vie complexe des salamandres sans poumon à l'échelle de l'individu. Plusieurs semaines de recherche et de synthèse de la littérature ont permis de construire ce modèle. Le modèle développé permet de reproduire les cycles de vie des salamandres des ruisseaux, indépendamment de l'espèce considérée.

La deuxième partie du travail de modélisation a consisté à intégrer ce modèle centré sur l'individu dans un environnement numérique représentant l'hydrosystème de la colline et la température quotidienne pour créer un modèle écologique hybride. Cet environnement a été construit afin d'accueillir les données d'écoulement simulées par le modèle HGS (résultats de la modélisation décrite au Thème 1) et les scénarios climatiques. Comme ce sont les données d'activité aux résurgences qui ont été intégrées au MEH, le modèle simule spécifiquement l'habitat de la salamandre sombre des montagnes. L'introduction de salamandres dans un environnement spatial a en outre permis de complexifier le modèle centré sur l'individu en y intégrant les comportements de dispersion et les processus de régulation de la densité des salamandres. L'intégration des simulations hydrogéologiques dans le MEH a ensuite permis de comprendre les effets des stress hydriques sur la résilience de la salamandre sombre des montagnes dans des sources résurgentes typiques de celles retrouvées sur la colline de Covey Hill.

Les recensements récents des salamandres qui devaient à l'origine être utilisés pour valider les projections du modèle de salamandres ne se sont avérés adaptés à ces fins. Le protocole actuel de suivi de la salamandre sombre des montagnes au mont Covey Hill permet de faire état de la variabilité de la densité de la salamandre dans des parcelles où elle a été observée, mais il n'inclut pas de réelle mesure d'abondance, qui aurait servi à la validation du MEH. Les environnements numériques utilisés se sont également avérés trop simplifiés pour permettre une comparaison quantitative avec les milieux réels. De plus, le modèle de salamandres n'inclut pas les interactions interspécifiques, faute de connaissances écologiques suffisantes. Le rôle potentiellement significatif au niveau de la régulation de la densité et de la distribution des espèces de ces interactions est donc ignoré, ce qui a empêché les comparaisons quantitatives directes entre les sorties du modèles et les recensements sur le terrain. Les prévisions du modèle dans le cadre de ce projet sont ainsi qualitatives et conservatrices (la résilience est surestimée).

Thème 3 : Impact des changements climatiques

- Reconstitution qualitative du paléoclimat
- Analyse des variables météorologiques simulées pour les scénarios de changements climatiques
- Simulation des scénarios de changements climatiques avec le modèle hydrologique et avec le modèle de salamandres

Des analyses climatiques préliminaires ont d'abord été effectuées à l'aide d'une série de scénarios climatiques issus de MCG pour la région d'étude (facilement accessibles à partir du site internet du *Pacific Climate Impacts Consortium*; PCIC, 2010). Les deltas de température et de précipitations ont servi à perturber les données météorologiques de la période de référence qui ont ensuite servi au calcul de la recharge. Les changements climatiques ont initialement été simulés par l'entremise de leur impact sur la recharge en eau souterraine (scénarios de +10%, -15% et -30% par rapport à la recharge de la période de référence). Les scénarios de recharge ont démontré un effet important sur l'hydrosystème, induisant notamment un rabattement significatif des niveaux de nappe suite à une diminution de la recharge de 30 %. Dans ce cas, les petits ruisseaux de la colline, habitats de choix pour les salamandres, deviennent perchés par rapport à l'aquifère et s'assèchent.

Ces analyses préliminaires ont permis de déterminer quels impacts hydrologiques pouvaient être attendus d'un éventail de scénarios futurs. Elles ont servi à définir de façon plus précise des critères de sélection pour les simulations régionales du climat qui nous ont été fournies par Ouranos et qui ont été utilisés pour simuler les conditions hydrogéologiques futures pour ensuite simuler la dynamique possible des populations de salamandres sur le mont Covey Hill. La simulation des impacts des changements climatiques sur l'hydrologie générale de la colline a été effectuée avec le modèle MODFLOW alors que la simulation des impacts des changements climatiques sur l'activité des sources résurgentes a été réalisée avec HGS.

Diffusion des résultats

- Atelier de mi-projet
- Publications scientifiques et de vulgarisation
- Participation à des colloques
- Mise à jour du site web du Laboratoire naturel du mont Covey Hill

Plusieurs activités de diffusion des résultats ont eu lieu au cours du projet et certaines autres sont toujours prévues dans les mois suivants la fin du projet. La mise à jour du site web du Laboratoire naturel a été réalisée de façon périodique tout au long du projet. Un atelier de mi-projet s'est tenu à la fin du mois de mai 2012 afin de présenter l'avancement des travaux aux partenaires et utilisateurs principaux des résultats de recherche. Les échanges qui ont eu lieu au cours de cette journée se sont avérés forts instructifs tant pour les membres de l'équipe de recherche que pour les partenaires. Les discussions ont permis de cibler de manière efficace les directions à suivre pour les derniers mois du projet. Les membres de l'équipe de recherche ont également participé à nombre de conférences et de colloques, tant dans leur



discipline respective (c.-à.-d. hydrogéologie ou biologie) que dans des événements multidisciplinaires (p. ex. ACFAS, Symposium d'Ouranos). Des articles scientifiques ont également été soumis à des revues traitant de disciplines spécifiques. D'autres publications sont prévues dans les mois suivant la fin du projet.

ii) *Sommaire des livrables*

Décrire, en vous appuyant notamment sur le tableau Excel de la proposition initiale, les résultats obtenus (tangibles et intangibles). Pour les résultats non atteints, expliquez-en brièvement les raisons. Identifier également les résultats qui n'avaient pas été prévus dans la proposition initiale.

Résultats tangibles :

Une base de données Access a été élaborée afin de regrouper et d'uniformiser les données hydrologiques disponibles pour le mont Covey Hill. Cette base de données est entreposée au département des sciences de la Terre et de l'atmosphère de l'UQAM. Toute personne intéressée par ces données peut s'adresser à Marie Larocque pour y avoir accès. La mise à jour du site web du Laboratoire naturel du mont Covey Hill a permis d'actualiser les informations concernant les dernières activités de recherche et de conservation ayant cours sur la colline. L'atelier de mi-projet décrit un peu plus haut et regroupant les participants au projet et les principaux intervenants du milieu concernés par la thématique du projet s'est avéré un franc succès. Le présent rapport constitue le principal livrable du projet. Il comprend une synthèse de la démarche méthodologique ainsi que des recommandations sur les secteurs à prioriser pour la conservation du territoire.

Résultats intangibles :

Une contribution méthodologique à l'utilisation conjointe de la modélisation hydrologique et de la modélisation écologique pour la conservation du territoire constitue un des résultats intangibles de ce projet. De nouvelles connaissances concernant la protection des écosystèmes face aux changements climatiques, tant à l'échelle locale que pour le Québec méridional, ainsi qu'à la protection des salamandres de ruisseaux sur le mont Covey Hill représentent également des apports significatifs du projet.



Veillez compléter le tableau ci-contre en y intégrant les documents produits **depuis le début du projet** et les transmettre **par courriel ou autre support adéquat (clé usb/CD)**.

Type de document (Titre, année de publication, liste des auteurs, nom de la revue ou de l'organisme ou du congrès)	Prévu ou soumis (date)	Accepté / Publié (date)	Présenté (date)	Nbre approx participants	Reçu (oui / non)
Articles dans une publication avec comité de lecture					
«Holocene dynamics of two temperate peatlands: paleohydrological implications», 2011, M. Lavoie, S. Pellerin, M. Larocque, GeoHydro 2011 Proceedings, 5 p.		Juin 2011			Oui (rapport d'étape 1)
« Dynamics of a headwater system and peatland under current conditions and with climate change » J. Levison, M. Larocque, V. Fournier, S. Gagné, S. Pellerin, M.-A. Ouellet, <i>Hydrologic Processes</i> .	Soumis septembre 2012	Déc. 2012			Oui (rapport final)
« Late glacial and Holocene vegetation dynamics, climate, and peatland development in the northward extension of the Adirondack Mountains ». M. Lavoie, S. Pellerin, M. Larocque. <i>Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology</i> .	Soumis octobre 2012				Oui (rapport final)
«Pattern-oriented hybrid ecological models and their value for understanding stream salamander viability in changing hydrological regimes». P. Girard, L. Parrott, C.A. Caron et D. Green. <i>Ecological Modelling</i> .	Soumis janvier 2013				Oui (rapport final)
Exposés à l'occasion de conférence ou affiches					
«Impact des changements climatiques sur l'écoulement souterrain d'un bassin amont», J. Levison, M. Larocque, M.A. Ouellet, V. Fournier, S. Gagné, colloque <i>Les ressources en eau à l'ère des changements climatiques</i> , ACFAS, U. de Sherbrooke, 9 mai 2011.			9 mai 2011	50	Oui (rapport d'étape 1)
«Holocene dynamics of two temperate peatlands: paleohydrological implications», M. Lavoie, S. Pellerin, M. Larocque, congrès GeoHydro 2011, Québec, 31 août 2011.			31 août 2011	30	Oui (rapport d'étape 1)
«Groundwater discharge and habitat protection : a local-scale investigation of the impacts of climate change», J. Levison, M. Larocque, M.A. Ouellet, <i>NGWA Focus Conference on Fractured Rock and Eastern Groundwater Regional Issues</i> , Burlington, Vermont, 26-27 septembre 2011.			26 et 27 sept 2011	40	Oui (rapport d'étape 1)
« The contribution of pattern-based modelling for hybrid ecological models: the example of stream salamanders viability in changing hydrological regimes ». P. Girard, L. Parrott, D.M. Green. <i>World Congress of Herpetology</i> . Vancouver, C.-B.			14 août 2012	50	Oui (rapport d'étape 2)
« Modélisation hydrogéologique et écologique sur le mont Covey Hill: perspectives pour la conservation des habitats en présence de changements climatiques » M. Larocque, J. Levison, P. Girard, M.-A. Ouellet, L. Parrott, M. Lavoie, D. Green, S. Pellerin. Colloque			9 mai 2012	50	Oui (rapport d'étape 2)

ÉcoBioCC, <i>Congrès Acfas 2012</i> , Montréal.					
« Linking climate change and groundwater : impact of climate model uncertainty on predicted recharge ». M.-A. Ouellet, M. Larocque, J. Levison. <i>International Association of Hydrogeologists 2012 Congress</i> . Niagara Falls, ON.			17 septembre 2012	100	Oui (rapport d'étape 2)
« Simulating the hydrological dynamics of bedrock springs under current conditions and climate change scenarios ». J. Levison, M. Larocque, M.-A. Ouellet. <i>International Association of Hydrogeologists 2012 Congress</i> . Niagara Falls, ON.			20 septembre 2012	60	Oui (rapport d'étape 2)
"Effects of climate change on the hydrodynamics and groundwater-dependent ecosystem of Covey Hill, Quebec". L. van Waterschoot, J. Levison, M. Larocque. <i>A.D. Latonell Conservation Symposium</i> . Alliston, ON.			14 novembre 2012	50	Non
« Modélisation hydrogéologique et modélisation des populations de salamandres sur le mont Covey Hill: perspectives pour la conservation des habitats en présence de changements climatiques ». M. Larocque, L. Parrott, D. Green, M. Lavoie, S. Pellerin, J. Levison, P. Girard, M.-A. Ouellet. <i>5^e Symposium scientifique Ouranos</i> , Montréal.			19 novembre 2012	60	Oui (rapport final)
« Changements climatiques et résurgences d'eau souterraine : une bonne nouvelle pour les salamandres de ruisseaux? » M.-A. Ouellet, J. Levison, M. Larocque. <i>Colloque La Recherche hydrologique au Québec dans un contexte de changements climatiques</i> , Québec.			25-26 avril 2013		Non
Exposés ou rapports aux partenaires ou usagers					
«Étude paléoécologique de la tourbière de la réserve écologique du Pin-Rigide», 2010, M. Lavoie, S. Pellerin. Rapport d'étape présenté au MDDEP, 10 p.		Octobre 2010			Oui (rapport d'étape 1)
«Modélisation hydrogéologique et modélisation des populations de salamandres sur le mont Covey Hill» M. Larocque, L. Parrott, J. Levison, M.A. Ouellet, P. Girard. Présentation lors de la rencontre de l'équipe de rétablissement des salamandres de ruisseaux, bureaux du MDDEP, Longueuil, 24 février 2011.			24 févr 2011	15	Oui (rapport d'étape 1)
«Étude paléoécologique de la tourbière de la réserve écologique du Pin-Rigide», M. Lavoie, S. Pellerin. Rapport final présenté au MDDEP, 28 p.		Déc. 2011			Oui (rapport final)
Atelier de mi-projet réunissant les principaux utilisateurs des résultats du projet. Présentations des résultats scientifiques, des attentes des partenaires et périodes de discussion. UQAM.			30 mai 2012	16	Oui (rapport d'étape 2)
Autres (incluant les rapports techniques, les articles sans comité de lecture, les feuillets techniques, sites internet etc.)					
Mise-à-jour site internet Laboratoire naturel (http://www.escer.uqam.ca/covey_hill/accueil.html)					s/o

iii) *Leçons apprises*

Décrire les principales leçons apprises (succès, échecs) dans la réalisation du projet et revenir sur les choix d'indices, d'indicateurs et de variables lorsqu'applicables.

Un projet de recherche tel que celui-ci donne lieu à un ensemble de défis autant scientifiques que techniques. La plupart des défis rencontrés ont été relevés avec succès, mais certaines difficultés ont entraîné des changements à la méthodologie initialement proposée (voir section i).

- Il est crucial de choisir de manière avertie les modèles utilisés pour simuler des processus locaux. La limitation au modèle MODFLOW mentionnée plus haut était connue au début du projet, mais les mesures compensatoires mises en oeuvre (raffinement du maillage) ont échoué. Le modèle HGS est particulièrement bien adapté à la simulation de la dynamique des résurgences en milieu fracturé. Ce choix a toutefois limité la capacité à simuler la dynamique des populations de salamandres pourpres qui sont principalement retrouvées dans les cours d'eau permanents.
- Il est très difficile de modéliser la recharge d'un aquifère fracturé en raison de l'hétérogénéité du milieu et de la simplification des méthodes disponibles. Une solution acceptable et adaptée à la finalité du projet a toutefois été trouvée avec l'utilisation de la précipitation nette.
- Les données d'inventaire des salamandres telles que récoltées actuellement ne sont pas adaptées pour calibrer et valider un modèle d'abondance des salamandres tel que développé dans ce projet.
- Finalement, les données de scénarios climatiques fournies par Ouranos constituent des résultats scientifiques qui doivent être vérifiés et validés avant leur utilisation pour d'autres fins de recherche. Un protocole de vérification est nécessaire et doit être un préalable à l'utilisation de ces données afin d'en inspecter la qualité et de confirmer que les données reçues sont appropriées pour les fins auxquelles elles sont destinées.

iv) *Obstacles et solutions*

Décrire tous les obstacles importants rencontrés et la manière dont ils ont été ou pourraient être surmontés.

- Arrimage des échelles différentes du modèle hydrogéologique et du modèle écologique
 - Solution : développement d'un modèle utilisant une échelle spatiale plus fine permettant de simuler l'activité hydrique des habitats de salamandres nécessaire à la modélisation écologique.
- Représentation de la recharge dans les modèles hydrogéologiques à partir du peu de connaissances disponibles sur ce maillon de la modélisation
 - Solution : la recharge utilisée dans MODFLOW a été calculée à partir de la précipitation nette mensuelle modifiée pour tenir compte d'un coefficient de



ruissellement déterminé à partir du modèle HGS.

- Validation du modèle de salamandres à partir de données de suivi récoltées sur le terrain qui ne sont pas adaptées à des fins de validations de modèle
 - Solution : malgré le fait que les données de recensement des salamandres ne puissent être utilisées directement comme validation du modèle, ce dernier est néanmoins validé à partir de diverses statistiques issues de ces recensements.

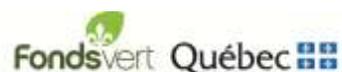
v) *Retombées du projet*

Décrire de quelle manière les résultats, ou les méthodologies du projet, ont ou pourraient servir à d'autres usagers.

Les principaux résultats du projet, c.-à-d. la variabilité climatique au mont Covey Hill, l'impact possible des changements climatiques sur l'hydrogéologie de la colline et sur les habitats de salamandres, la dynamique des salamandres dans un climat changeant et les recommandations qui en découlent pour la conservation sur la colline, sont des avancées importantes pour les sciences de l'hydrogéologie et de la modélisation écosystémique. Les nombreuses publications (soumises et en préparation), de même que les présentations dans plusieurs congrès permettront de diffuser ces nouvelles connaissances qui contribueront à soutenir le développement des connaissances.

Le ministère des Ressources naturelles Québec (MRN), de même que l'Équipe de rétablissement des salamandres de ruisseaux travaillent depuis plusieurs années de concert avec Conservation de la nature Canada (CNC) à assurer le suivi des populations de salamandres au mont Covey Hill et à développer un plan de conservation du territoire. Les recommandations issues de ce projet de recherche pourraient contribuer à cibler leurs efforts de suivi et de protection des populations dans les années à venir.

Le secteur de Covey Hill héberge des tourbières parmi les plus anciennes de la province. Le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP) est particulièrement intéressé à mieux comprendre l'histoire paléoécologique de celles-ci dans le but de mieux cibler les actions de conservation, notamment pour la gestion de la réserve écologique du Pin-Rigide qui abrite cette espèce dont la dynamique est dépendante des feux et du climat.



vi) *Futures activités*

Décrire toutes les activités de transfert des connaissances prévues après la fin du projet et toutes les nouvelles initiatives basées sur le travail réalisé.

Quatre publications scientifiques sont également prévues au cours des prochains mois: la première détaillera la méthodologie de la modélisation hydrogéologique avec le modèle HGS, la seconde présentera les résultats de MODFLOW à l'échelle de toute la zone d'étude dans un contexte climatique, la troisième résumera la variabilité climatique au cours du dernier siècle et la quatrième alliera les enjeux et défis de la modélisation couplée hydrologie-écologie à des fins de conservation.

vii) *Recommandations*

Ajouter toute autre recommandation pour des suites au projet, la réalisation de projets similaires, les futurs besoins en recherche ou encore concernant la gestion et l'administration des programmes de financement.

Ce projet a mené à des résultats novateurs à plusieurs égards. La combinaison des expertises des équipes de recherche a permis d'obtenir des résultats probants et de mener à des recommandations scientifiques qui sont résumées au Chapitre 6. Ce projet a également permis d'identifier certaines recommandations plus techniques pour la réalisation de projets similaires.

- Il est important de favoriser les projets de recherche qui regroupent des chercheurs provenant de plusieurs disciplines, horizons et qui portent des intérêts différents. La mise en commun qui résulte de telles rencontres est hautement bénéfique pour la production de connaissances multidisciplinaires et holistiques.
- Il est important de favoriser les projets de recherche qui visent à développer des modèles qui tiennent compte des changements climatiques et des modifications anthropiques de façon conjointe car les impacts de telles modifications pourraient s'avérer plus importants que ceux des changements climatiques considérés seuls.
- Pour que ces modèles puissent être validés, il est important de développer, de concert avec les responsables du suivi et de la protection des espèces, des méthodes d'échantillonnage systématique qui soient également utilisables et profitables pour le milieu de la recherche (p. ex. pour des fins de modélisation).
- Il est important d'investir les ressources nécessaires afin de maintenir des sites expérimentaux multidisciplinaires comme le Laboratoire naturel du mont Covey Hill, afin d'y poursuivre le suivi à long terme, tant des salamandres que des variables hydrologiques qui sont essentielles aux études prospectives utilisant la modélisation.

4.2 Aspects administratifs du projet

i) Réunions du comité de suivi

Veillez compléter le tableau ci-contre en y intégrant les informations demandées **depuis le début du projet**. Veillez transmettre **par courriel** les comptes-rendus disponibles.

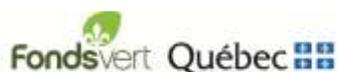
Date de réunion	Compte-rendu transmis à Ouranos (oui/non)
Judi 15 septembre	Oui
Mardi 2 octobre	Oui

ii) Formation

Inscrivez, **pour toute la durée du projet**, chaque stagiaire associé au projet (des étudiants de premier, deuxième ou troisième cycle, des stagiaires postdoctoraux ou des assistants de recherche) sur une ligne distincte du tableau ci-dessous et indiquez : a) l'université au sein de laquelle a lieu le stage, b) les dates de début et de fin prévues du stage, c) le nombre d'heures par mois pendant lesquelles le stagiaire a participé au projet et d) le nom du superviseur.

Type de stagiaire	(a) Université	(b) Date de début/de fin	(c) Nbre d'heures par mois	(d) Nom du superviseur
Marie-Audray Ouellet, agente de recherche	UQAM	Sep 2011/Mars 2013	17.5 h/sem	Marie Larocque
Alexandre Lamarre, technicien	UQAM	Avril 2011/Sept 2011	17.5 h/sem	Martin Lavoie
Jana Levison, stagiaire post-doc	UQAM	Jan 2011/Mai 2012	35 h/sem	Marie Larocque
Philippe Girard, stagiaire post-doc	U. Montréal	Mai 2011/Mai 2013	35 h/sem	Lael Parrott
Étudiant maîtrise 1	Prévu dans la proposition initiale, mais plutôt remplacé par une étudiante post-doctorale			
Charles-André Caron, étudiant bac	U. Montréal	1 Mai 2011/31 Aout 2011	35 h/sem	Lael Parrott
Véronique Gallant, étudiante bac	Laval	Jan 2011/Avril 2011	10 h/sem	Martin Lavoie
Nicolas Bourgeois, étudiant Master I	Université de Montpellier	Avril 2012/Août 2012	17.5 h/sem	Marie Larocque
Lisa van Waterschoot, étudiante bac	Université de Waterloo	Sep 2012/Déc 2012	37.5 h/sem	Jana Levison et Marie Larocque

iii) Collaboration des partenaires



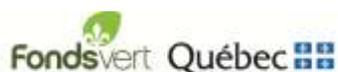
Pour toute la durée du projet, précisez la manière dont les partenaires ont participé au projet (inscrivez oui lorsque applicable et complétez au besoin).

Nom des partenaires	MRNF	MDDEP	CNC	Ouranos
Le partenaire a contribué en espèces au projet		X		X
Le partenaire a contribué en nature au projet				Scénarios climatiques
Le partenaire était disponible aux fins de consultation				X
Le partenaire a participé aux réunions du comité de suivi.	X		X	X
Le partenaire a discuté sur une base régulière avec l'équipe universitaire.				X
Si oui, indiquez le nombre de réunions tenues au cours de la période visée par le présent rapport				1
Les partenaires ont participé à la recherche (analyse, rédaction, organisation d'ateliers...).				X
Autre type de participation (précisez)				

Pour toute la durée du projet, lorsqu'applicable, entrez dans le premier tableau le montant des contributions **en espèces**, et dans le deuxième tableau le nombre d'heures des contributions **en nature** reçues de chacun des partenaires.

Contributions en espèces	Montant total contribué à ce jour (\$)
Ouranos	280 000,00\$

Rappel : un rapport financier dûment signé doit également être soumis par le service des finances



Contributions en nature	Nbre de représentants ayant participé au projet	Nbre total d'heures contribuées à ce jour par ces représentants	Nom de la personne contact
Ouranos	2	350	Robert Siron et Marie-France Sottile
MDDEFP	1	10	Réal Carpentier
MRN	1	15	Nathalie Desrosiers
CNC	1	15	Caroline Béclair/Carine Béland

iv) *Liste des usagers et bénéficiaires des résultats*

- MRN
- MDDEFP
- CNC
- Communauté des chercheurs travaillant sur les questions d'écohydrologie

AUTRES INFORMATIONS ASSOCIÉES AU PROJET
[S'IL Y A LIEU]