



Consortium sur la climatologie régionale
et l'adaptation aux changements climatiques

Rapport Final du projet intitulé :
**« Adaptation et intercomparaison d'outils québécois et bavarois de gestion
intégrée de bassins versants dans un contexte de changements climatiques »**
(AQAGI)

Par:

Luc Vescovi, Ouranos
Jean François Cyr, CEHQ
Richard Turcotte, CEHQ
Louis-Guillaume Fortin, CEHQ
Ralf Ludwig, LMU
Marco Braun, LMU
Inga May, LMU

Mai 2008



Table des matières

Table des matières	3
1. Contexte et objectifs du Projet.....	5
2. Échéancier et partage des tâches entre partenaires	5
3. Échange d'expertises	6
3.1 Comparaison d'approches et d'outils	6
3.2 Échanges de chercheurs	9
3.3 Missions	10
4. Livrables	10
4.1 Projets dans Hydrotel et rapport final du CEHQ.....	10
4.2 Proposition d'un rationnel pour une phase II du projet.....	10
4.3 Applications Web-GIS	13
4.4 Présentations et publications	13
4.4.1 Posters scientifiques.....	13
4.4.2 Présentation du projet à l'EGU à vienne.....	14
4.4.3 Préparation de 3 manuscrits pour publication	14
5. Sommaire global.....	15
Annexe 1. Rapport final du CEHQ.....	A-1
Annexe 2. Présentations et Publications résultants du projet.....	A-2
Annexe 3. Interfaces Usagers	A-3
Annexe 4. Rapport final de LMU.....	A-4



Liste des tableaux et des figures

Tableau 1: Cédule des activités.....	6
Figure 1 Données nécessaires (encerclées) pour chaque modèle comparé Promet (également nommé Danubia light) vs Hydrotel.....	7
Figure 2 Différences entre les expériences de modélisation sur la Chateauguay et l'Ammer	8
Figure 3 Schématisation d'une démarche scientifique générale menant à l'adaptation aux changements climatiques	9
Figure 4 Thèmes de travail d'un cadre de collaboration long terme	11
Figure 5 Détails des volets de travail proposés au Québec sur l'Outaouais et la Châteauguay	12



1. Contexte et objectifs du Projet

Ce projet bilatéral aborde le développement d'une étude pilote dont l'objectif vise une comparaison des approches scientifiques développées par Ouranos et Glowa-Danube dans le domaine de la gestion intégrée de bassins versants, dans un contexte de changements globaux et climatiques. Il s'agit, à l'aide d'outils québécois et bavarois complémentaires, d'étudier les comportements hydrologiques, bio-physico-chimiques et socio-économiques de bassins situés de part et d'autre de l'océan Atlantique, en tenant compte des grandes disparités d'échelles spatiales et temporelles d'interventions. Au niveau plus spécifique de la modélisation hydrologique, chaque partie est restée maîtresse de son expertise. À partir de cette comparaison, il a été possible de mettre en lumière des synergies et de réfléchir sur des solutions nouvelles et adaptées au contexte spécifique des bassins étudiés.

Les objectifs spécifiques du projet sont de :

- développer un projet-pilote de dimension internationale dans le domaine de la gestion intégrée par bassin versant dans un contexte de changements climatiques;
- étudier les comportements hydrologiques, bio-physico-chimiques et socio-économiques de bassins situés de part et d'autre de l'océan Atlantique (tout en tenant compte des échelles spatiales et temporelles d'interventions bien différentes dans les deux régions d'étude) à l'aide d'outils québécois et bavarois complémentaires adaptés aux conditions physiques qui prévalent dans chacune des régions d'étude;
- développer des synergies (à partir d'une comparaison des deux approches scientifiques, l'une québécoise et l'autre bavaroise), trouver des solutions nouvelles et adaptées au contexte spécifique des bassins étudiés ainsi que les étendre à d'autres bassins au Québec et en Bavière.

2. Échéancier et partage des tâches entre partenaires

Suite à la signature d'un protocole d'entente entre Ouranos et l'Université de Munich (LMU) en aout 2006, les équipes bavaroises et québécoises se sont mises d'accord sur une cédule d'activités précise pour la durée du projet (voir tableau ci-dessous). Ainsi, il a été convenu de développer deux axes de collaboration.

- Le premier axe concerne l'exercice de modélisation hydrologique dans un contexte de climat actuel et futur sur deux sites sélectionnés : un au Québec et l'autre en Bavière. Le bassin de la rivière Châteauguay a été le bassin ciblé pour l'étude au Québec. En Bavière, le sous-bassin de la rivière Ammer (petit tributaire du Danube) a été considéré. La modélisation avec l'outil bavarois (PROMET également nommé Danubia-light) a été effectuée par l'équipe de l'Université de Ludwig Maximilian de Munich (LMU) sur les deux sites d'études. La modélisation avec le modèle québécois HYDROTEL a été effectuée par le centre d'expertise hydrologique du Québec (CEHQ) également sur les deux sites. Pour ce qui concerne les scénarios climatiques seul le modèle régional du climat canadien (MRCC) a été utilisé. Ouranos a fourni les scénarios pour les deux bassins. Plus de détails se trouvent au chapitre 3.1.
- Le second axe couvre une dimension plus méthodologique et vise à conceptualiser une démarche (commune innovante et structurante à long terme) d'évaluation des impacts et de développement de stratégies d'adaptation aux changements globaux et climatiques



de bassin versant. Chaque équipe a contribué au développement de cet axe d'intervention en définissant des cas d'études de part et d'autres de l'Océan. L'équipe bavaroise a de plus contribué à la conceptualisation de ces cas en langage UML, un formalisme structurant les idées très utilisé lors de l'élaboration de logiciel ou des bases de données.

La fin initiale du projet était prévue en décembre 2007 mais pour des raisons opérationnelles budgétaires, une prolongation à frais constant a été demandée au MDEIE et octroyée jusqu'au 31 mars 2008.

Tableau 1: Cédule des activités

	2006												2007											
	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N					
Axe 1: Modélisation hydrologique sur la chateauguay et la Ammer (avec scénarios de CC et CG)																								
1-1 Définition des besoins et livraisons des données																								
1-2 Mise en place des modèles sur chaque site																								
1-3 Calibration et validation																								
1-4 Développement et application de scénarios																								
1-5 Comparaison et discussion des résultats																								
1-6 Synthèse et rapport final																								
Axe 2: conceptualisation d'une démarche commune innovante et structurante à long terme (I&A)																								
2-1 Définition des deux études de cas																								
2-2 Formalisation des cas en utilisant le langage UML																								
2-3 Évaluation conjointe et structuration de recherches intégrées																								
2-4 Synthèse et rapport final (voir 1-6)																								

3. Échange d'expertises

3.1 Comparaison d'approches et d'outils

Dans le cadre de l'exercice de modélisation de l'axe 1, deux modèles hydrologiques ont été testés (PROMET et Hydrotel) sur les deux bassins (Ammer et Chateauguay). Pour ce qui concerne les scénarios climatique, le MRCC a été pris en compte. Les détails de l'expérience sont présentés à l'annexe 1 dans le rapport du CEHQ. En bref, les défis soulevés portaient sur les données observées disponibles pour faire tourner chaque modèle; Promet étant plus exigeant qu'Hydrotel comme le montre la figure 1. Pour tourner, hormis les paramètres géomorphologiques et d'utilisation du sol, PROMET a besoin au minimum des paramètres climatiques suivants aux 6 heures : précipitation, température, humidité relative, vitesse du vent; radiation global ou couverture nuageuse. Sur la Chateauguay, le réseau d'observation ne nous a pas permis de vérifier Promet avec des données observées. En termes de données climatiques, Hydrotel peut tourner avec la précipitation et la température quotidienne.

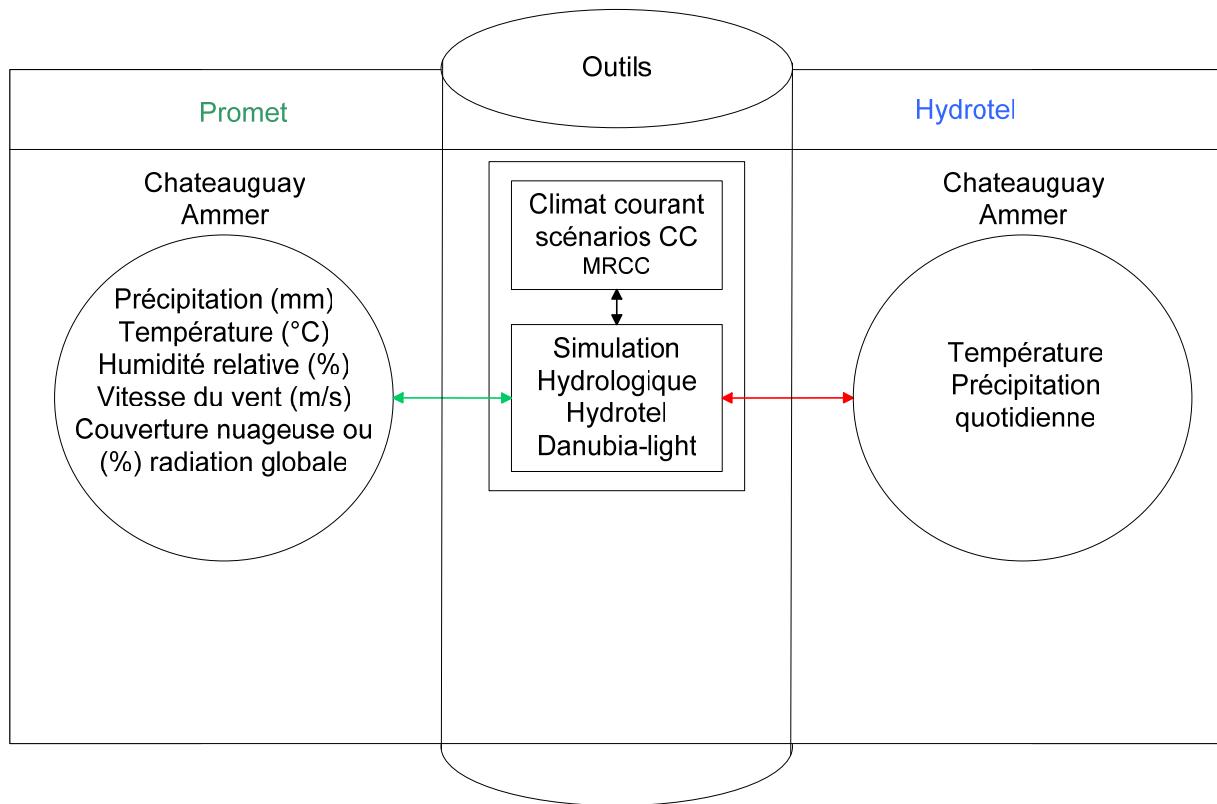


Figure 1 Données nécessaires (encercées) pour chaque modèle comparé Promet (également nommé Danubia light) vs Hydrotel

De plus, tel qu'illustré à la figure 2, pour ce qui concerne les scénarios climatiques, des versions différentes du MRCC ont été utilisées sur les deux bassins ce qui limite la comparaison. En effet, pour des raisons d'implantations différentes du MRCC en Europe et en Amérique du Nord, la version 4.1.1 a été utilisée sur la Chateauguay et la version 3.7.1 a été utilisée sur le bassin de l'Ammer. Une difficulté supplémentaire a été rencontrée par rapport à la disponibilité de différentes périodes de réalisation avec le MRCC contraint par ERA 40. Par ailleurs, toujours pour des raisons techniques d'implantation du modèle sur les deux continents, les horizons temporels futurs sont différents : horizon 2080 pour l'Ammer et 2050 pour la Châteauguay

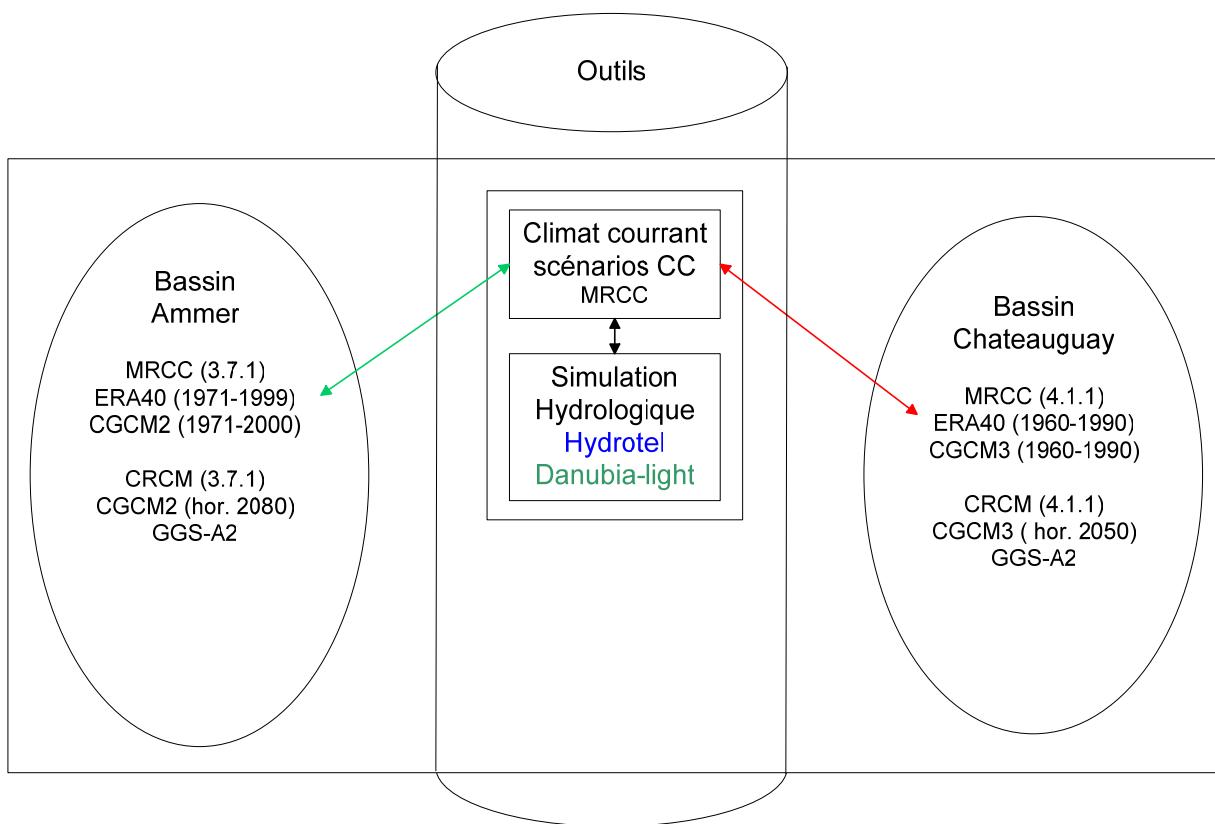


Figure 2 Différences entre les expériences de modélisation sur la Chateauguay et l'Ammer

Malgré ces contraintes, l'exercice de comparaison a permis de démontrer la grande flexibilité des mécanismes d'échange de données entre les équipes. Elle a permis de faire tourner chaque modèle dans deux contextes géographiques et de données disponibles différents. Des comparaisons positives et intéressantes ont été dressées. Les détails se retrouvent dans le rapport du CEHQ présenté à l'annexe1 ainsi que dans les articles en préparation (voir annexe3).

Pour ce qui concerne le deuxième axe de développement, des cas d'études à traiter ont été définis sur (1) l'hydrologie de l'archipel de Montréal en mettant l'emphase sur le bassin de la rivière des Outaouais et (2) une application agricole sur la Chateauguay. La contribution du CEHQ lors de la définition de ces études de cas a été primordiale et est clairement expliquée dans le chapitre 5 de leur rapport final (voir annexe). La réflexion amorcée dans le cadre de ce deuxième axe de recherche a également permis la définition d'une démarche scientifique globale et une identification des processus menant à l'adaptation aux changements climatiques. Cette démarche générale schématisée à la figure 3 reprend les grandes lignes des approches d'analyse de risques reliés aux changements climatiques que l'on retrouve dans la littérature. Elle distingue quatre (4) étapes clés : (1) Définition du contexte d'adaptation et des cas d'application; (2) Identification des risques globaux et ceux reliés aux CC; (3) Évaluations des risques globaux et ceux reliés aux CC; (4) Aide à la décision Communication & transfert des connaissances. Elle a été recadrée par rapport contexte de l'étude c'est-à-dire celui de gestion intégrée de l'eau à l'échelle des bassins versants dans un contexte de changements

climatiques. Du côté québécois, un meilleur cadrage par rapport à la démarche de gestion intégrée par bassin dans le cadre de la politique nationale de l'eau permettrait de coller encore plus à cette réalité.

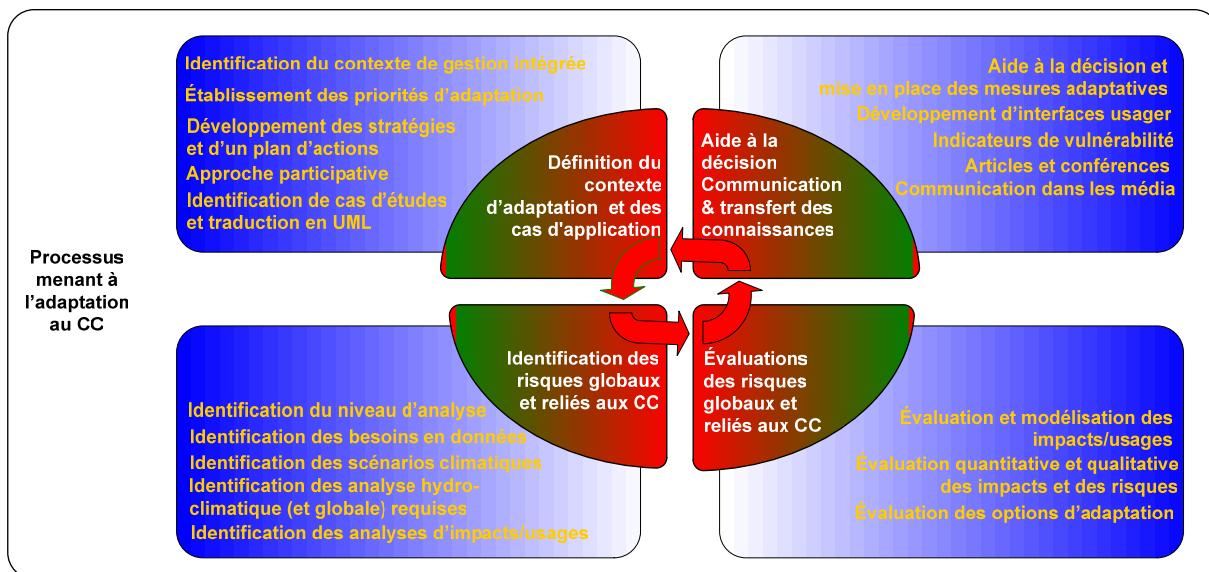


Figure 3 Schématisation d'une démarche scientifique générale menant à l'adaptation aux changements climatiques (basée sur les approches d'analyse de risques).

3.2 Échanges de chercheurs

Concernant l'échange d'expertises et le renforcement des capacités entre le Québec et la Bavière, une étudiante de l'Université de Munich officiellement inscrite à l'UQAM (avec Yves Baudoin) a réalisé à l'automne 2007 un stage (de 3 mois) à Ouranos. Dans le cadre de son stage, elle a réalisé les activités suivantes :

- brève revue de littérature sur la gestion intégrée de bassin versant dans un contexte de changement climatique
- construction d'espaces de travail avec des SIG sur les bassins de la Châteauguay et de la Ammer
- participation à la rédaction de posters présentés lors du 2^{ème} symposium d'Ouranos de novembre 2006
- présentation du projet auprès du comité de bassin de la rivière Chateauguay (SCABRIC)

À l'automne 2007, Marco Braun chercheur à LMU est venu passer un mois à Ouranos dans le but de formaliser en UML les études de cas développées au Québec.

Au printemps 2007, Luc Vescovi a passé une semaine (après la mission décrite ci-dessous) à Munich. Dans le cadre de cette semaine, des échanges avec les chercheurs de LMU lui ont permis de se familiariser à l'outil bavarois Danubia et d'en évaluer son niveau d'implantation dans les autorités compétentes bavaroises en matière de gestion de l'eau. Les éléments évalués de Danubia portaient sur son interface usager, sa flexibilité d'utilisation ainsi que son utilisation comme outil d'aide à la gestion intégrée en Bavière. À cette occasion, il a été constaté



que Danubia reste essentiellement un outil de recherche universitaire dont les cas d'application au sein de l'administration bavaroise sont peu nombreux. Notre partenaire bavarois (LMU) en est très conscient et ceci explique, en effet, sa grande motivation à la collaboration avec Ouranos.

3.3 Missions

Une mission à Berlin du 12-16 février effectuée par M. Musy a permis une prise de contact avec les décideurs européens de haut niveau en matière de gestion de l'eau adaptée aux changements climatiques.

Une mission a été réalisée en avril 2007. À cette occasion, une visite et un atelier de travail entre partenaires à l'Université de Munich (LMU) fut organisée. Par ailleurs, le projet a été présenté à Vienne dans le cadre de la conférence annuelle (2007) de l'EGU.

Une mission à Munich en avril 2008 est prévue pour faire le point sur cette première phase et s'entendre sur les grandes lignes de la phase deux (2).

Deux missions officielles bavaroises ont eu lieu (septembre 2006, septembre 2007) et une rencontre technique de travail a eu lieu à Québec au CEHQ en décembre 2007.

4. Livrables

4.1 Projets dans Hydrotel et rapport final du CEHQ

L'implantation d'Hydrotel sur le bassin de la Ammer a été effectué par l'équipe du CEHQ en décembre 06 et janvier 07. Un fichier Ammer_Calage.prj été livré par le CEHQ.

Une expérience impliquant l'usage de données provenant du MRCC dans Hydrotel pour la Ammer ainsi que la Chateauguay a été réalisée.

Les détails des expériences de modélisation se retrouvent dans le rapport du CEHQ présenté en annexe 1.

4.2 Proposition d'un rationnel pour une phase II du projet

En collaboration avec nos partenaires bavarois, nous nous sommes entendus sur un rationnel dressant un cadre de collaboration à plus long terme.

Ce cadre de collaboration à long terme, entre Ouranos et LMU, a pour objectif de poursuivre notre renforcement des capacités en matière de gestion intégrée par bassin versant du Québec méridional dans un contexte de changement climatique. Il est conçu pour établir les liens entre (ce qui s'appelle dans le domaine de l'adaptation au changement climatique) l'approche top-down et bottom-up.

Ainsi comme l'illustre la figure 3, trois thèmes de travail sont proposés :

- Le thème de travail 1 vise à travailler vers l'amélioration et l'intégration des processus de modélisation;

- Le thème de travail 2 vise à utiliser et adapter des outils existants pour évaluer les impacts et tester des stratégies d'adaptation des changements climatiques;
- Le thème de travail 3 vise à développer des stratégies d'adaptation aux changements climatiques dans le cadre d'une approche participative des intervenants.

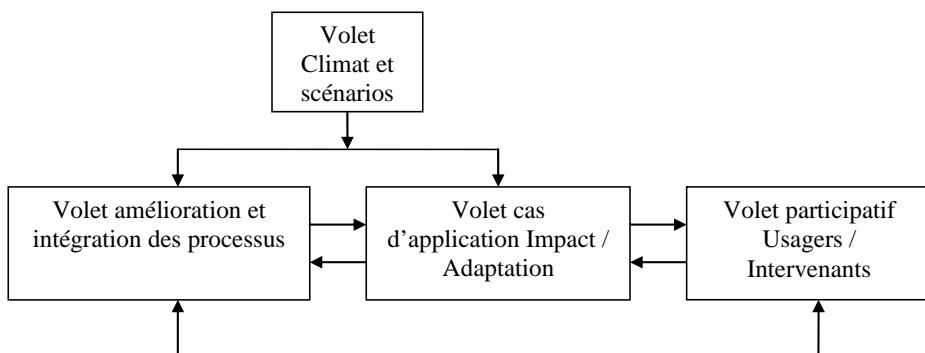


Figure 4 Thèmes de travail d'un cadre de collaboration long terme

Le rationnel derrière la structure de travail proposée est le suivant : les experts du thème de travail 1 améliorent les outils dont les modèles hydrologiques, de gestion de barrage, de qualité de l'eau et les intègrent pour faciliter une compréhension plus holistique des processus multisectoriels et des rétroactions affectant un bassin versant. À cet égard, un des défis scientifiques à relever porte sur le développement d'un système intégré de gestion de bassins. Les experts du groupe de travail 2 davantage préoccupés par des problématiques régionales/locales affectant des bassins spécifiques travailleront à l'adaptation d'outils existants pour résoudre des cas prioritaires d'application identifiés dans des bassins versants étudiés. Au Québec, deux bassins versants ont été identifiés: Celui de la rivière Outaouais et celui de la rivière Châteauguay. Pour aborder le contexte des changements climatiques et de ses incertitudes associées, les experts des groupes de travail 1 et 2 bénéficieront des scénarios fournis par des experts du climat et des scénarios. Davantage orienté vers un renforcement d'une approche participative de gestion de bassin versant, les experts (dans ce cas les professionnels impliqués dans la gestion du bassin) du thème de travail 3 identifieront des options d'adaptation à évaluer par le groupe de travail 2. Vice-versa toute option nouvelle développée par le groupe de travail 2 tiendra compte des préoccupations de terrains des professionnels responsables de la gestion du bassin. En outre, dans la limite du développement scientifique de la modélisation des acteurs (expertise développée par nos partenaires bavarois), il pourrait être envisagé de réfléchir à cet axe en vue d'améliorer notre connaissance au Québec en matière de barrières sociologiques vis-à-vis de l'adaptation aux changements climatiques anthropiques.

Les compétences complémentaires des partenaires se répartissent de la manière suivante au travers des thèmes proposés:

- LMU: principalement thème de travail 1 (amélioration, intégration de modèles et conceptualisation en UML)
- BSMoEPC: (Ministère bavarois de l'environnement et de l'eau) thèmes 2 et 3 (identification de cas d'études en Bavière encore à clarifier)

- Ouranos: Tous les thèmes avec des niveaux différent d'implication (Climat/scénarios, coordination du projet, plateforme pour l'implication des intervenants)
- CEHQ: principalement groupe de travail 2 et 3 (cas d'application des rivières Outaouais et Chateauguay)
- HQ: principalement groupe de travail 2 (cas d'application sur la rivière des Outaouais)
- Brace Mc Gill: principalement groupe de travail 1 (qualité de l'eau) et 2 (cas d'application sur la Châteauguay)
- CPRRO, CROO, MDDEP, MAPAQ: principalement groupe de travail 3 (cas d'application des rivières Outaouais et Chateauguay)

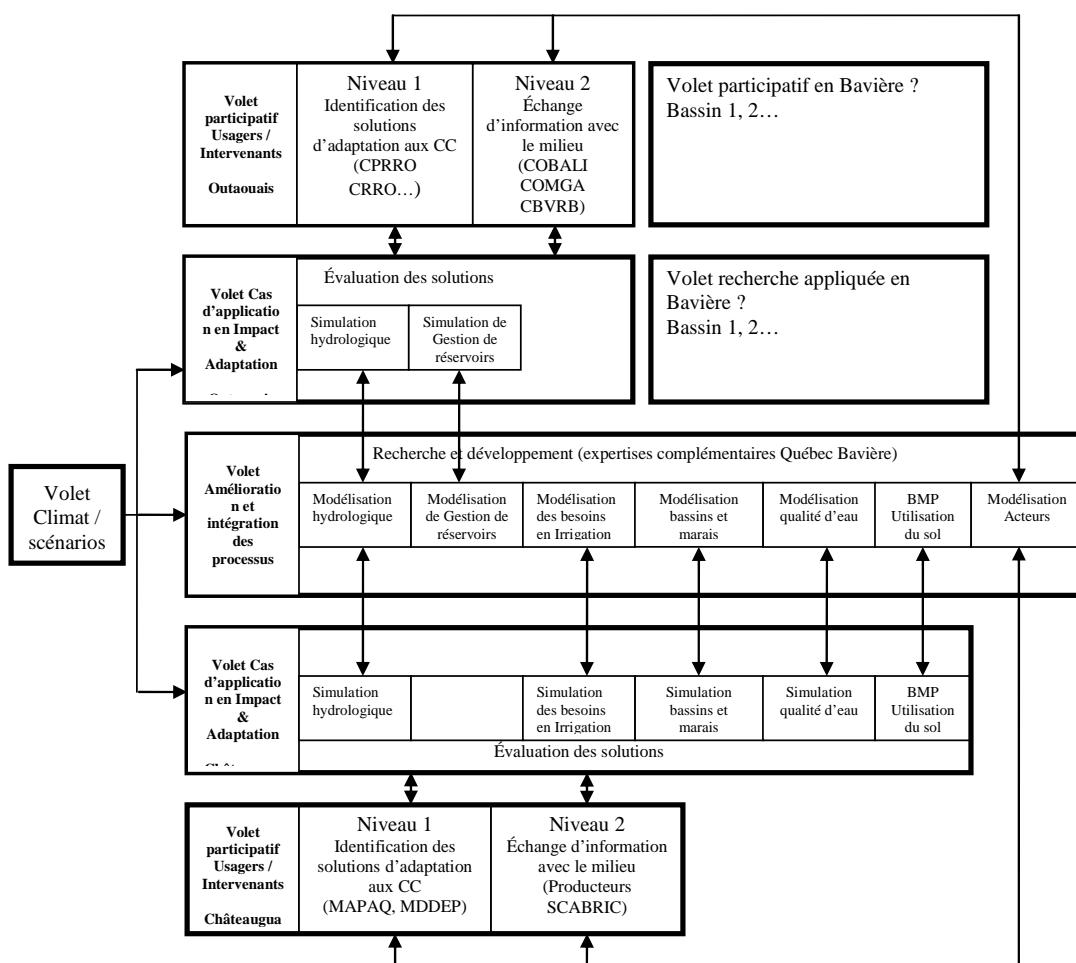


Figure 5 Détails des volets de travail proposés au Québec sur l'Outaouais et la Châteauguay



4.3 Applications Web-GIS

Deux espaces de travail (réalisés en partie par une stagiaire de LMU) présentant les deux sites d'études ont été implantés dans le web-GIS d'Ouranos.

- Le résultat est disponible sur :
http://www2.ouranos.ca:8090/pushnsee_4.7.1/ui/custom/demos/ouranos_demo/aqagiamm.jsp (usr :ouranos; pwd :pns2000)

Deux autres applications web GIS ont été testées de manière à identifier leur robustesse en tant qu'interface usagers.

- La première, développée par une équipe de géomatique de l'UQAM (département de géographie – groupe atlas) a permis de tester une application simple permettant de modifier les caractéristiques géomorphologiques des UHRH d'Hydrotel via une interface web et ainsi formuler de manière interactive et conviviale des scénarios d'utilisation du territoire.
<http://shaman.atlasduquebec.org> (utiliser firefox); login: ouranos; pwd: 4rw36h97
- La seconde application a été développée par une équipe de géomatique de l'Université laval (Chaire de recherche industrielle en BD géospatiales décisionnelles- Centre de recherche en géomatique). Elle a permis de tester les fonctionnalités d'intégration et de visualisation des caractéristiques d'UHRH à différents niveaux spatiaux (bassin niveau 1, 2 etc....) offertes par un outil SOLAP développé dans J-MAP. Cet outil sert déjà dans le cadre d'un autre projet à Ouranos.
<http://132.203.82.191:8085/UHRH/> login: uhrh, pwd: uhrh

Les visualisations des trois interfaces sont présentées à l'annexe 3

4.4 Présentations et publications

Le projet a été présenté à plusieurs occasions, entre autres dans le cadre du second symposium Ouranos en novembre 2006 et à la conférence 2007 de l'EGU. De plus, des manuscrits pour publication sont en cours de préparation. Les références sont présentées ci-dessous ainsi que dans l'annexe2.

4.4.1 Posters scientifiques (voir détails en annexe 2)

Vescovi, L., May, I., Roy, R., Turcotte, R., Cyr, J-F., Mauser, W. et Musy, A. (2006) - Poster 65-J. Integrative watershed modelling in the context of Climate Change – A comparison of major issues, research methods and problem solving strategies in Québec and Bavaria, 2^{ième} symposium Ouranos, Montreal, Canada

May, I. et Vescovi, L. (2006) Un Web GIS pour la gestion des données et l'implication des intervenants en support à la recherche intégrée sur les changements globaux et les ressources en eau, 2^{ième} symposium Ouranos, Montreal, Canada



4.4.2 Présentation du projet à l'EGU à Vienne (voir détails en annexe 2)

Deux présentations dans le cadre de l'EGU ont été tenues en 2007 et une l'est en 2008.

Vescovi, L., Roy, R., and Musy, A. (2007) Climate change sciences in support of vulnerability, impact and adaptation activities in Quebec, Canada. EGU, Vienne April 16-20, 2007

Vescovi, L., Musy, A., Roy, R., Turcotte, R., Cyr, J-F., Braun, M., Mauser, W., and Ludwig, R. (2007) Integrative watershed management under climate change conditions - A comparison of major issues, research methods and problem solving strategies in Quebec and Bavaria. EGU, Vienne April 16-20, 2007

Vescovi, L.; Cyr, J.F.; Turcotte, R.; Fortin, L.G.; Chaumont, D.; Ludwig, R.; Braun, M.; May, I. (2008) Climate Change Study on the Châteauguay River Watershed: Lessons Learned from a Multi Model Experiment, Vienne April 14-18, 2008.

4.4.3 Préparation de 3 manuscrits pour publication (voir annexe 3)

Trois manuscrits visant à synthétiser les points forts de notre étude sont en cours de préparation. Les objectifs de chaque manuscrit ont été décidés. Leur rédaction est en cours d'élaboration.

- Le premier manuscrit est orienté vers les aspects de modélisation hydrologique (axe1)
Titre suggéré: The Role of Hydrologic Model Complexity in Climate Change Scenario Analysis
Responsable: R. Ludwig

- Le second manuscrit vise une description de l'usage de scénarios hydro-climatique comme outils d'aide à l'adaptation (axe1 et 2)
Titre suggéré: Climate Change Study on the Châteauguay River Watershed: Lessons Learned from a Multi Model Experiment
Responsable: L. Vescovi

- Le troisième manuscrit est orienté vers la démarche méthodologique proposée de développement d'un outil intégré de gestion par bassin dans un contexte de changements climatiques (WP2)
Titre suggéré: Framework Design for an Integrated Watershed Model Under Climate Change Conditions
Responsable: M. Braun



5. Sommaire global

Ce rapport décrit les grandes étapes et les leçons apprises dans le cadre d'un projet pilote bilatéral entre Ouranos et l'Université Ludwig Maximilian de Munich (LMU). Évalué par le bureau de la Coopération Scientifique et Technologique Québec-Bavière, ce projet s'insère dans le cadre des collaborations entre le Québec et la Bavière. Il a bénéficié au Québec d'une subvention issue du « Programme de soutien à la recherche, volet : Soutien à des initiatives internationales de recherche et d'innovation » géré par la MDEIE. Du côté bavarois, le ministère de l'environnement (Bayerisches Landesamt für Umwelt) a supporté l'initiative.

Les objectifs spécifiques de la proposition au MDEIE étaient de :

- développer un projet-pilote de dimension internationale dans le domaine de la gestion intégrée par bassin versant dans un contexte de changements climatiques;
- étudier les comportements hydrologiques, bio-physico-chimiques et socio-économiques de bassins situés de part et d'autre de l'océan Atlantique (tout en tenant compte des échelles spatiales et temporelles d'interventions bien différentes dans les deux régions d'étude) à l'aide d'outils québécois et bavarois complémentaires adaptés aux conditions physiques qui prévalent dans chacune des régions d'étude;
- développer des synergies (à partir d'une comparaison des deux approches scientifiques, l'une québécoise et l'autre bavaroise), trouver des solutions nouvelles et adaptées aux contextes spécifiques des bassins étudiés ainsi que les étendre à d'autres bassins au Québec et en Bavière.

En cette fin de projet, les objectifs fixés décrits ci-dessus ont été atteints. Pour y parvenir les équipes bavaroises et québécoises se sont mises d'accord sur une cédule d'activités développées via deux axes de recherche.

- Le premier axe concerne l'exercice de modélisation hydrologique dans un contexte de climat actuel et futur sur les deux sites sélectionnés (le bassin de la Châteauguay et celui de la Ammer). La modélisation avec Hydrotel des bassins a été effectuée par le CEHQ. L'exercice de modélisation avec Danubia-ligth (module hydrologique de Danubia) sur les deux bassins a été opéré par LMU.
- Le second axe couvre une dimension plus méthodologique et vise à conceptualiser une démarche (commune innovante et structurante à long terme) d'évaluation des impacts et de développement de stratégie d'adaptation aux changements globaux et climatiques de bassin versant. Chaque équipe a contribué au développement de cet axe d'intervention en définissant des cas d'études de part et d'autres de l'Océan. L'équipe bavaroise a de plus contribué à la conceptualisation de ces cas en langage UML, un formalisme structurant les idées très utilisé lors de l'élaboration de logiciel ou des bases de données.

Malgré des différences en termes (1) de données requises pour faire tourner les modèles hydrologiques (dues entre autres à leur fonctionnement interne) et (2) de versions différentes du MRCC utilisées (3.7.1 sur l'Ammer et 4.1.1 sur la Châteauguay), l'exercice de comparaison a permis de démontrer l'adaptabilité des équipes à échanger des données et la transférabilité des outils pour obtenir des résultats dans des contextes nouveaux. Les résultats montrent des différences reliées entre autres aux niveaux de complexité des modèles. Promet a été surtout développé dans un contexte de recherche universitaire et d'amélioration des processus



hydrologiques. Hydrotel a aussi été développé par une équipe universitaire au Québec avec comme finalité d'être utilisable dans un contexte opérationnel (prévision hydrologique et gestion des bassins versants). La comparaison entre Promet et Hydrotel met surtout en lumière la complémentarité des deux outils lors d'études d'impacts (hydrologiques) des changements climatiques.

Pour ce qui concerne le deuxième axe de développement, des cas d'études à traiter ont été définis sur (1) l'hydrologie de l'archipel de Montréal en mettant l'emphase sur le bassin de la rivière des Outaouais et (2) une application agricole sur la Chateauguay. La contribution du CEHQ, lors de la définition de ces études de cas, a été primordiale et est clairement expliquée dans le chapitre 5 de leur rapport final. Pour ce qui concerne l'implication de LMU, il est à noter la conceptualisation en langage UML des études de cas. À cet égard la complémentarité des approches québécoises et bavaroises est nette. Au Québec, les experts impliqués dans ce deuxième axe ont orienté leur réflexion vers la définition d'études de cas en vue d'arrimer la gestion intégrée des bassins versants méridионаux dans un contexte de changements climatiques. Il s'agit de proposer un cadre de développement d'outils de modélisation classiques pouvant être utilisés de manière « opérationnelle » afin de répondre à des problématiques spécifiques d'adaptation aux changements climatiques (entre autres celles de comité de gestion des bassins et des barrages). Par ailleurs, dans le cadre de ce deuxième axe de travail, des interfaces usagers conviviales ont été testées comme outil de transfert et de visualisation de données (en particulier les données géomorphologiques des UHRH d'Hydrotel) entre autres dans l'optique de formuler des scénarios d'utilisation du territoire. Du côté bavarois, forte de son expérience avec Danubia, l'équipe bavaroise a mis l'emphase sur le développement d'une approche méthodologique d'un outil intégré de gestion par bassin versant qui tient compte de cas d'étude précis (traduit en UML) dès la conception et ceci dans un contexte participatif. Les cas d'études développés au Québec pourront tout à fait servir à cette fin. Force est de constater que les études de cas proposées en Bavière restent très académiques et qu'elles gagneraient (selon nous) à être affinées pour coller plus aux préoccupations du ministère bavarois de l'environnement et aussi à celles des intervenants québécois (CEHQ entre autres) impliqués dans le dossier.

De toute évidence, ce projet pilote a permis le renforcement des capacités et la formation de jeunes chercheurs en matière de gestion intégrée par bassin dans un contexte de changements globaux et climatiques tant au sein des équipes de recherche impliquées qu'au niveau, dans une certaine mesure, d'autres intervenants touchés par la thématique. Les leçons apprises dans le cadre du développement des deux axes de travail ont permis d'aboutir à un rationnel de recherche que nous proposons être la pierre angulaire de la prochaine phase du projet de collaboration. En effet, ce projet pilote a démontré les complémentarités des approches québécoise et bavaroise. Une preuve de concept a été élaborée.

Pour la phase deux du projet le Centre d'Expertise Hydrique du Québec prendra le leadership sur les questions hydrologiques afin de répondre directement à ses préoccupations. Ouranos gardera la gestion globale du projet et en particulier l'entente de collaboration bilatérale avec LMU. De plus, il est souhaité d'aller au delà dans la phase deux et d'opérationnaliser nos visions de part et d'autre de l'océan avant de, par la suite, proposer un projet dans le cadre du 7^{ème} programme cadre de recherche de l'EU.



Consortium sur la climatologie régionale
et l'adaptation aux changements climatiques

Annexe 1. Rapport final du CEHQ



Contribution du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ)

Adaptation et comparaison d'outils québécois et bavarois de gestion
intégrée de bassins versants dans un contexte de changements
climatiques

Rapport final Version bonifiée

Rédigé par

Jean-François Cyr
Louis-Guillaume Fortin
Richard Turcotte

Janvier 2008



Table des matières

1- Introduction	A-1
1.1 – Le CEHQ et les changements climatiques.....	A-1
1.2 - Contexte du présent projet et objectifs	A-2
1.3 - Résumé de la contribution et disposition contractuelle	A-2
2- Assistance pour l'échange de données avec le groupe Bavarois.....	A-3
3- Modélisation hydrologique sur le bassin de la rivière Ammer.....	A-3
3.1 – Structure d'écoulement et description physiographique du bassin versant	A-4
3.2 – Mise en place et calage du modèle hydrologique	A-11
4 – Application des sorties du MRCC aux bassins Ammer et Châteauguay	A-16
4.1 – Utilisation des données du MRCC.....	A-16
4.2 – Hydrologie sur le bassin de la rivière Ammer	A-19
4.2.1 – Période de référence.....	A-20
4.2.2 – Période future	A-24
4.2.3 - Discussion.....	A-27
4.3 – Hydrologie sur le bassin du ruisseau Norton	A-28
4.3.1 – Période de référence.....	A-28
4.3.2 – Période future	A-32
4.4 – Besoins en irrigation sur le bassin versant du ruisseau Norton	A-36
4.5 - Discussion.....	A-39
5 – Description de deux projets futurs sur les bassins versants des rivières des Outaouais et Châteauguay.....	A-40
5.1 – Axe appliqué au bassin versant de la rivière des Outaouais	A-41
5.1.1 Description du bassin versant et de l'archipel de Montréal.....	A-41
5.1.2 – Contexte et canevas de l'étude proposée	A-46
5.2 – Axe appliqué au bassin versant de la rivière Châteauguay	A-47
5.2.1 Description du bassin versant de la rivière Châteauguay	A-47
5.2.2 – Contexte et canevas de l'étude proposée	A-50
6 – Conclusion	A-51
Références	A-54
Annexe A	A-55
Annexe B	A-59
Annexe C	A-611



1- Introduction

1.1 – Le CEHQ et les changements climatiques

Le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) est une agence du ministère québécois du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (www.cehq.gouv.qc.ca) dont la mission globale est la gestion du régime hydrique du Québec avec une préoccupation de sécurité, d'équité et de développement durable.

Pour remplir cette mission, le CEHQ joue à la fois les rôles de responsable de la collecte de données relatives aux quantités d'eau de surface, d'expert gouvernemental pour ce qui touche l'hydrologie et l'hydraulique et d'exploitant des barrages publics. Dans cette perspective, le CEHQ a des activités diverses qui couvrent un spectre étendu allant des activités de terrain jusqu'à la modélisation mathématique, celle-ci étant déployée tant pour l'analyse en mode étude que pour le mode opérationnel en temps réel.

De plus en plus, le CEHQ sera confronté à la problématique des changements climatiques sous deux angles différents et souvent simultanés. D'abord, l'expertise du CEHQ peut être sollicitée pour répondre à des demandes externes portant sur l'analyse des effets des changements climatiques. On peut imaginer que plusieurs organismes externes pourraient être appelés à faire une pareille sollicitation mais l'exemple le plus parlant est celui des comités de bassins en formation ou déjà actifs dans les bassins versants jugés prioritaires par la Politique nationale de l'eau. Ensuite, le CEHQ lui-même, à travers ses propres projets et activités, notamment la gestion des barrages publics, est appelé à considérer les impacts des changements climatiques lors de ses exercices de planification à moyen et long terme. Le Centre est d'ailleurs en réflexion pour la définition d'un possible plan d'action en changements climatiques.

Le CEHQ, depuis sa création, est impliqué dans un bon nombre d'activités reliées aux changements climatiques. De ces activités, il apparaît intéressant de souligner la réalisation par le Centre en 2005-2006 de projets portant sur les besoins d'adaptation des plans de gestion des barrages du Haut-Saint-François (Fortin et al. 2007) et sur l'analyse de la capacité du ruisseau Norton à supporter les besoins en irrigation pour l'agriculture pour l'horizon 2050 (Pugin et al. 2005). Sans en être directement la continuité, le projet présenté ci-après s'inscrit dans la mouvance de ces deux projets qui représentent bien l'état d'avancement des activités portant sur l'impact et l'adaptation aux changements climatiques dans le domaine de la gestion quantitative de l'eau au Québec.



1.2 - Contexte du présent projet et objectifs

Le projet, à l'intérieur duquel s'inscrit la contribution présentée ci-après, porte sur une étude pilote dont l'objectif est de comparer des approches scientifiques développées au Québec et en Bavière dans le domaine de la gestion intégrée de bassins versants dans un contexte de changements climatiques. Le bassin de la rivière Châteauguay est le bassin ciblé pour l'étude au Québec. En Bavière, le bassin de la rivière Ammer (un tributaire du Danube) est considéré.

Les objectifs globaux du projet sont :

- de développer un projet pilote de dimension internationale dans le domaine de la gestion intégrée par bassin versant dans un contexte de changements climatiques;
- d'étudier les comportements hydrologiques, bio-physico-chimiques et socio-économiques de bassins situés de part et d'autre de l'océan (tout en tenant compte des échelles spatiale et temporelle d'intervention bien différentes dans les deux régions d'études) à l'aide d'outils québécois et bavarois complémentaires adaptés aux conditions physiques qui prévalent dans chacune des régions d'étude;
- de développer des synergies et de trouver des solutions nouvelles et adaptées aux contextes spécifiques des bassins étudiés en comparant les approches québécoises et bavaroises;
- de proposer un programme de collaboration de plus grande envergure à partir des conclusions du projet pilote.

Au Québec, le projet est sous la responsabilité du consortium Ouranos¹. La contribution du CEHQ, sous-contractant d'Ouranos, est limitée à un sous-ensemble d'activités dont la description fait l'objet de la section suivante.

1.3 - Résumé de la contribution et disposition contractuelle

Conformément à l'entente de contribution entre Ouranos et le CEHQ concernant le projet « Adaptation et comparaison d'outils québécois et bavarois de gestion intégrée de bassins versants dans un contexte de changements climatiques » et datée du 2 octobre 2006, les activités réalisées par le Centre ont porté sur :

- la participation au travail d'intégration de données hydro climatiques dans Danubia, outil développé dans le cadre de l'initiative fédérale allemande GLOWA-DANUBE, en fournissant son assistance pour l'échange de données avec le groupe bavarois;

¹ La responsabilité scientifique du projet est assumée par M. Luc Vescovi (chercheur principal du projet selon l'entente MDEIE-Ouranos) et l'encadrement global du projet est assumé par M. André Musy (gestionnaire du projet selon l'entente MDEIE-Ouranos) respectivement chercheur et directeur d'Ouranos.



- la modélisation hydrologique (mise en place et calage) du bassin versant de la rivière Ammer à l'aide du modèle Hydrotel;
- l'application des sorties du modèle régional de climat canadien MRCC aux bassins versants des rivières Ammer et Châteauguay.

Conformément à la même entente, Ouranos et le CEHQ ont convenu que le Centre pouvait, sur une base volontaire et selon ses propres disponibilités et intérêts, également contribuer au projet en participant :

- à la rédaction d'un projet d'envergure résultant de ce projet pilote
- aux discussions entre les intervenants locaux (comités de bassin et autres)
- à la rédaction de rapports et articles scientifiques sur le sujet

Le présent rapport fait état des activités du Centre sous les trois volets, qui font respectivement l'objet des sections 2, 3 et 4 du présent rapport, pour lesquels des engagements contractuels ont été pris. Dans la suite de la contribution volontaire du Centre, le rapport fait aussi état, à la section 5, d'une description d'un projet d'envergure qui pourrait faire suite au présent projet. Bien qu'ayant été développé en collaboration avec différents partenaires, le leadership que le CEHQ a pris dans la définition de ce projet d'envergure habilite à rédiger une première synthèse de ce dernier.

2- Assistance pour l'échange de données avec le groupe Bavarois

Des trois volets faisant partie de l'entente contractuelle, l'assistance pour l'échange de données est le seul volet pour lequel aucun livrable précis n'est identifié. De manière succincte, il est à rappeler que la participation du CEHQ au travail d'intégration de données hydro climatiques dans Danubia, outil développé dans le cadre de GLOWA-DANUBE, s'est faite concrètement en rassemblant, en préparant, en transmettant et en décrivant les données québécoises sous la propriété du MDDEP pour le bassin Châteauguay. Comme convenu au texte de l'entente, le CEHQ a mis à disposition son expertise technique pour faciliter l'échange de données d'un outil à l'autre.

3- Modélisation hydrologique sur le bassin de la rivière Ammer

La modélisation hydrologique est un outil indispensable pour l'étude du comportement des bassins versants dans un contexte changeant comme celui des changements climatiques. Les sections qui suivent décrivent l'implémentation du modèle Hydrotel sur le bassin de la rivière Ammer.

3.1 – Structure d’écoulement et description physiographique du bassin versant

Pour effectuer la modélisation hydrologique avec le modèle Hydrotel, il est d’abord nécessaire de définir une modélisation numérique de la structure d’écoulement du bassin versant et de certains paramètres physiographiques du bassin. Ce travail est facilité par l’emploi du logiciel Physitel (Turcotte et al. 2001).

Pour la définition de la structure d’écoulement, la donnée principale à utiliser est une matrice des altitudes du terrain. Cette matrice a été fournie par l’équipe bavaroise. La figure 3.1 montre la représentation des altitudes à l’intérieur du logiciel Physitel. Les figures 3.2 et 3.3 permettent de visualiser les pentes et les orientations d’écoulement déduites de ces matrices d’altitudes.

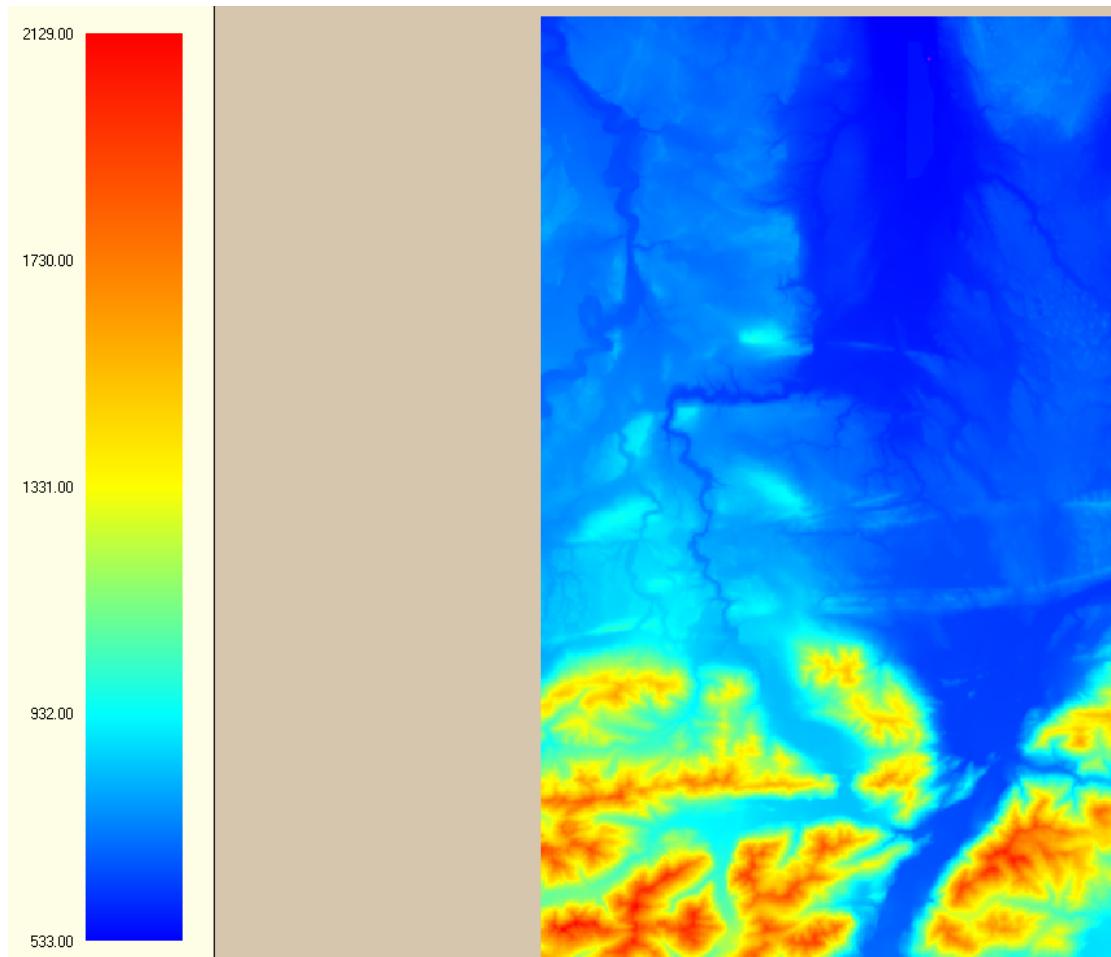


Figure 3.1 : Modèle numérique des altitudes (en m), intégré dans Physitel à une résolution spatiale de 100 m par 100 m, pour une région incluant le bassin versant de la rivière Ammer.

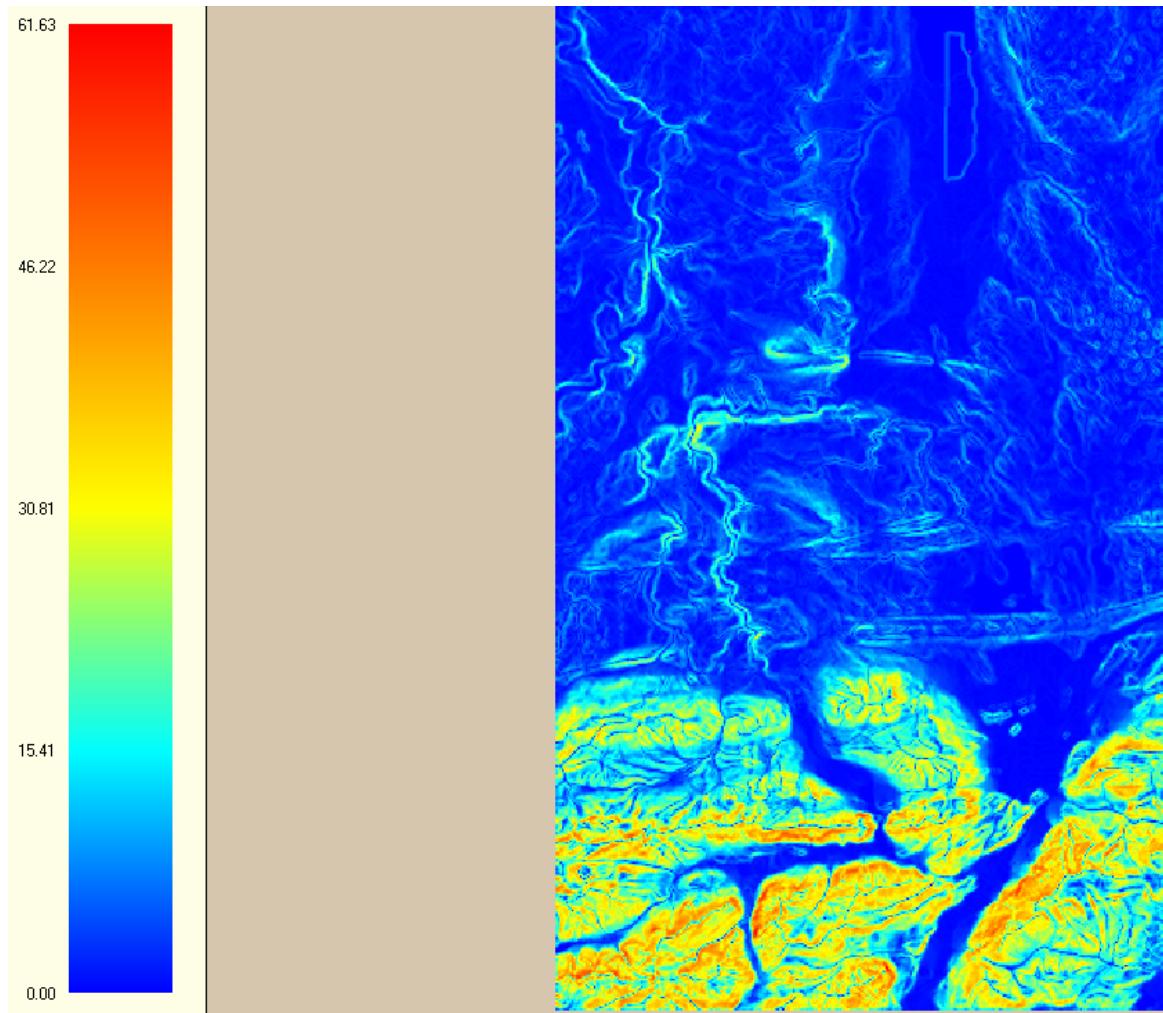


Figure 3.2 : Pentes de surface (en m), calculées par Physitel à une résolution spatiale de 100 m par 100 m, pour une région incluant le bassin versant de la rivière Ammer.

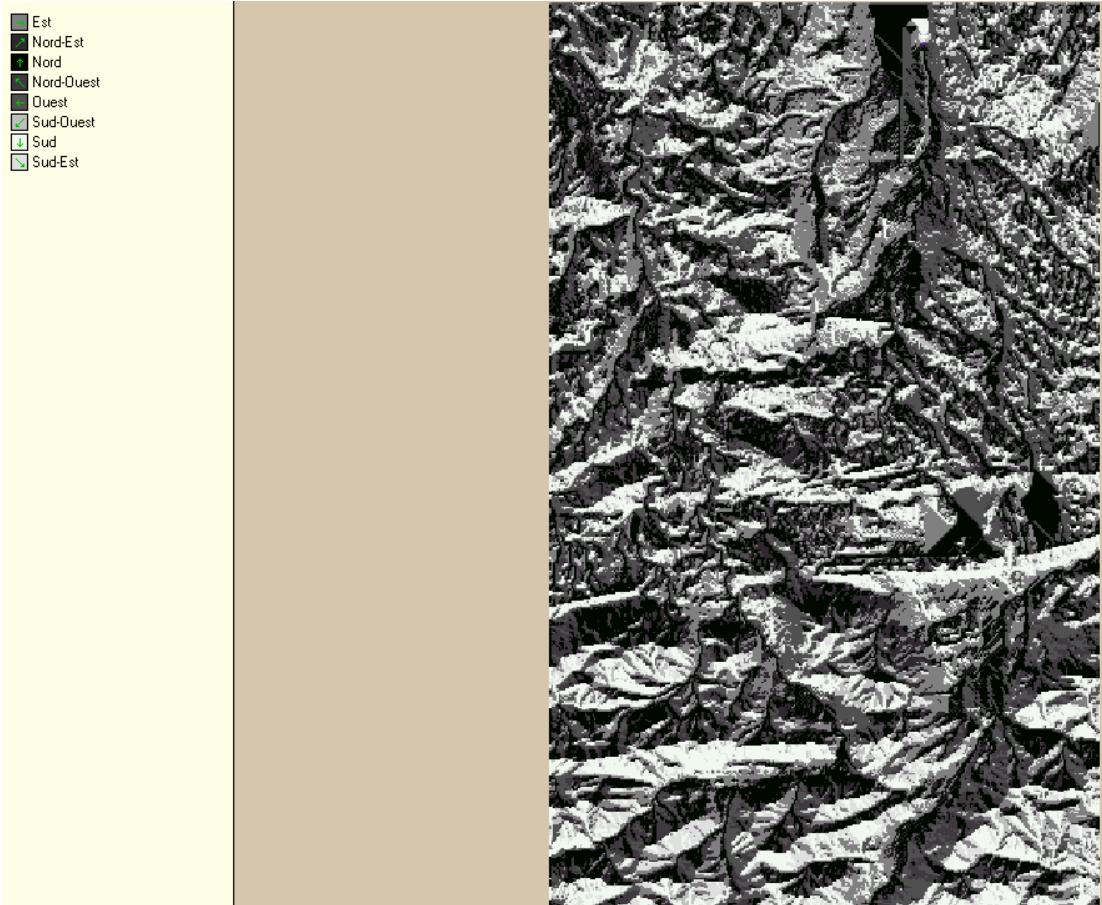


Figure 3.3 : Directions d'écoulement, modélisées par Physitel à une résolution spatiale de 100 m par 100 m, pour une région incluant le bassin versant de la rivière Ammer.

Les directions d'écoulement permettent de modéliser la structure interne d'écoulement du bassin versant et de déduire différentes matrices de données, dont la matrice des superficies drainées à chaque maille appartenant au bassin versant (figure 3.4), une matrice de mailles où l'écoulement se fait par un réseau de cours d'eau et les sous-bassins versants, aussi appelés unités hydrologiques, de ce réseau (figure 3.5). Les deux dernières matrices de données sont essentielles au fonctionnement d'Hydrotel. Il est à noter que la modélisation de la structure d'écoulement a conduit à une superficie de bassin versant de 713 km² et que le bassin a été subdivisé arbitrairement en 79 unités hydrologiques dont la superficie moyenne avoisine les 9 km².

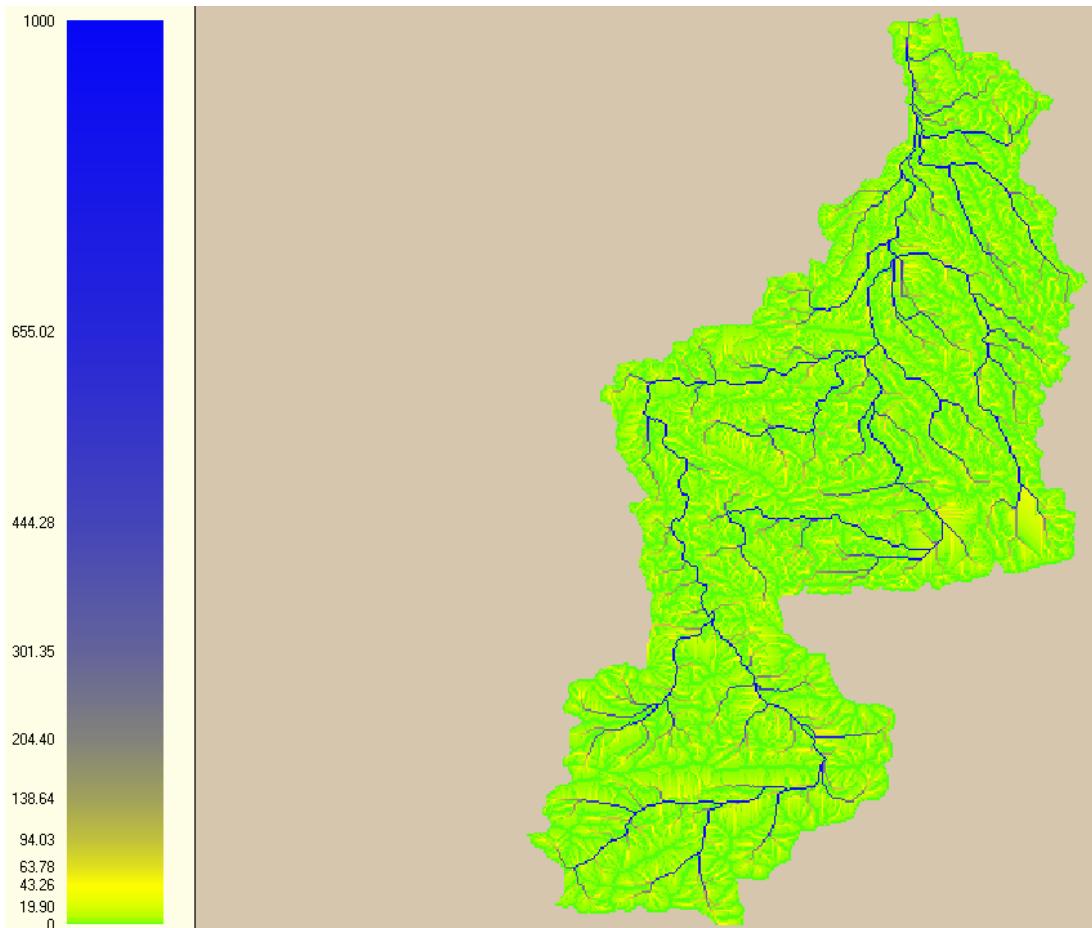


Figure 3.4 : Superficies drainées (en km^2) pour chacunes des mailles du bassin versant, modélisées par Phytitel à une résolution spatiale de 100 m par 100 m.

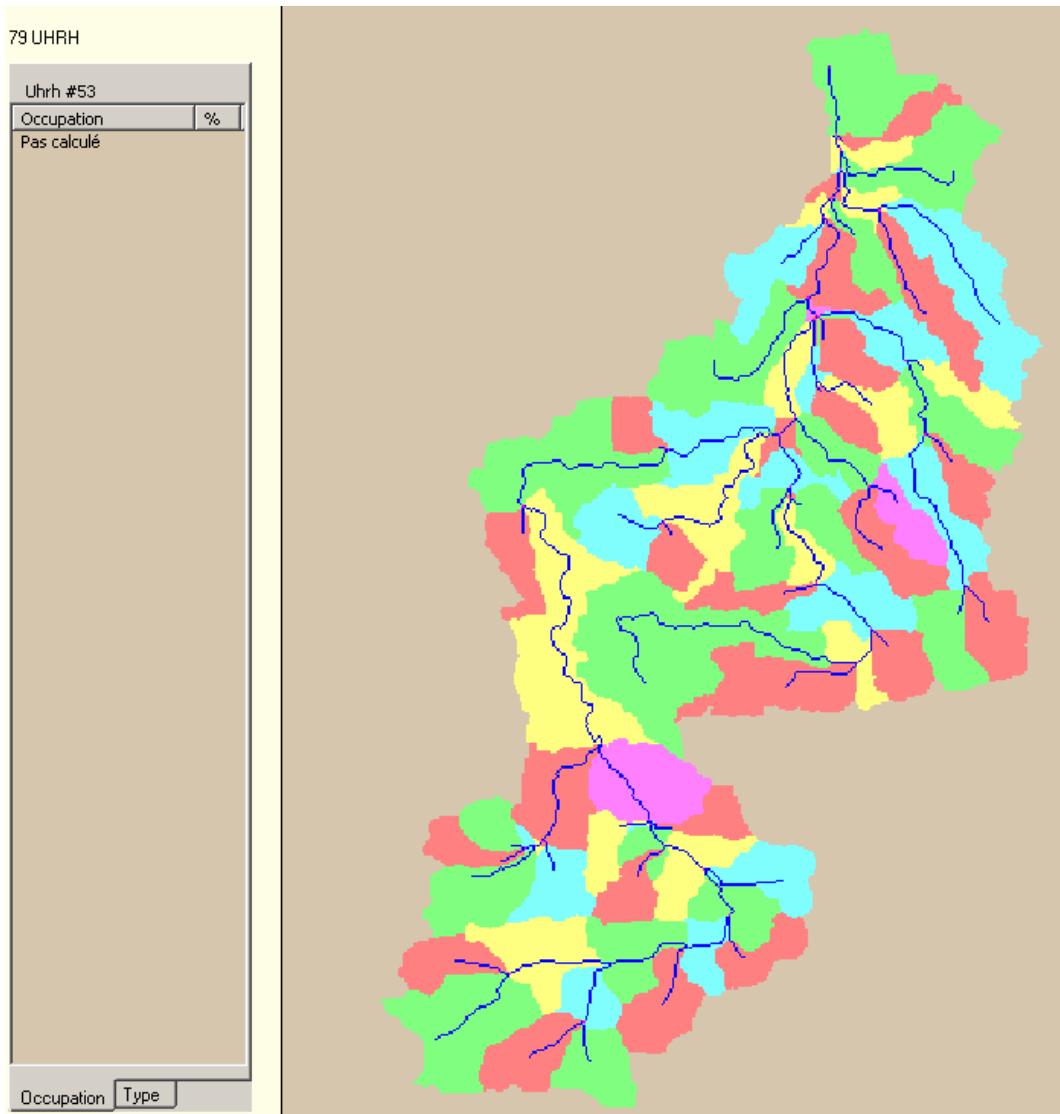


Figure 3.5 : Subdivision du bassin versant en unités hydrologiques modélisées par Physitel à une résolution spatiale de 100 m par 100 m.

La figure 3.6 regroupe quelques images fournies par l'équipe bavaroise et permettant de constater l'adéquation générale entre les deux représentations de la structure d'écoulement qui ont été modélisées. Il est à noter que l'équipe bavaroise utilise le logiciel Topaz (Martz et Garbrecht, 1992) plutôt que Physitel pour effectuer leur modélisation.

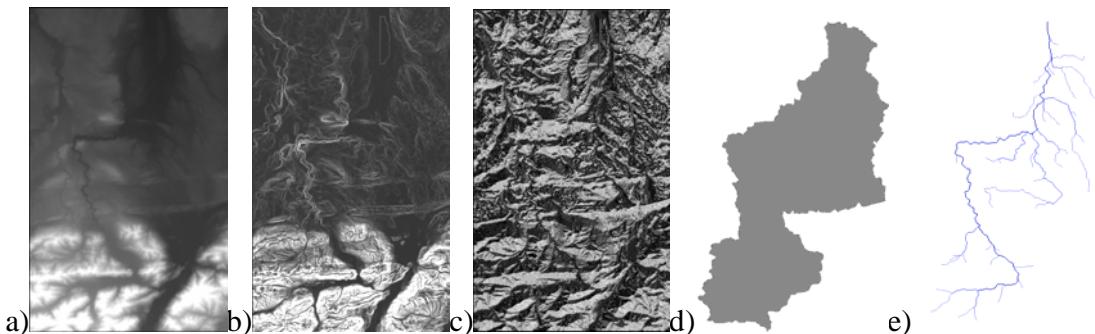


Figure 3.6 : Représentations graphiques de diverses données sur la structure d'écoulement tel que fournies par l'équipe bavaroise : a) modèle numérique des altitudes, b) pente de surface, c) directions d'écoulement, d) contour du bassin versant et e) réseau de cours d'eau.

Les unités hydrologiques sont les éléments spatiaux de base qui servent à agréger l'information physiographique descriptive du bassin versant. Parmi les informations qui doivent être agrégées à cette échelle, mentionnons les occupations du sol (dont la représentation graphique est fournie à la figure 3.7) et les textures de sol. Pour ce dernier cas, il a été nécessaire de procéder par approximation. En effet, au moment de faire la mise en place d'Hydrotel sur le bassin, le logiciel Physitel ne permettait pas de préparer adéquatement les données de types de sol. Les textures utilisées dans Hydrotel ont donc été obtenues après discussion avec l'équipe bavaroises et par essais et erreurs lors du calage.

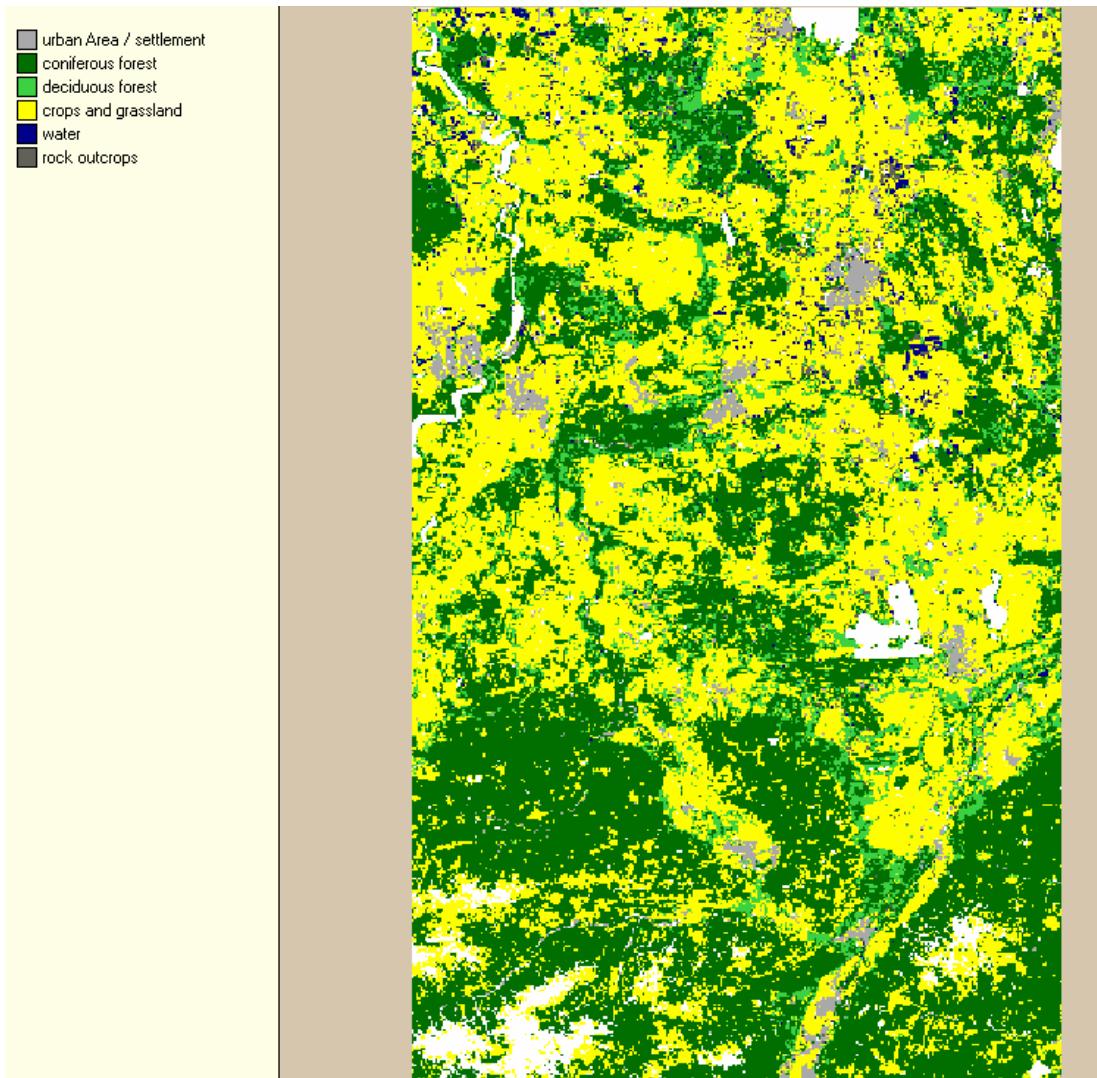


Figure 3.7 : Occupations du territoire, intégrées dans Physitel à une résolution spatiale de 100 m par 100 m, pour une région incluant le bassin versant de la rivière Ammer.

3.2 – Mise en place et calage du modèle hydrologique

La mise en place du modèle Hydrotel, en supplément des informations obtenues par Physitel, se fait en intégrant les données d'observations hydrométéorologiques. Ces données ont été fournies par l'équipe bavaroise et sont décrites brièvement au tableau 3.1. La figure 3.8 permet de localiser les stations hydrométéorologiques à l'intérieur et à proximité du bassin de la rivière Ammer.

Tableau 3.1 : Noms et localisations des stations hydrométéorologiques et périodes pour lesquelles des données sont disponibles

Nom	Localisation (longitude-latitude)	Altitude (m)	Type de station	Début des données	Fin des données
Kaufering	10° 52" - 48° 06"	585	météo	1968-01-01	2001-02-28
Maisach-Gernlinden	11° 18" - 48° 13"	509	météo	1983-11-01	2001-02-28
Oberstdorf (WSt)	10° 17" - 47° 24"	810	météo	1949-01-01	2001-02-28
Fischen (Kr. Oberallgäu)	10° 16" - 47° 28"	757	météo	1992-01-01	2001-02-28
Kaufbeuren	10° 36" - 47° 52"	716	météo	1970-05-01	2001-02-28
Schwangau-Horn	10° 43" - 47° 35"	796	météo	1949-01-01	2001-02-28
Zugspitze	10° 59" - 47° 25"	2960	météo	1949-01-01	2001-02-28
Garmisch-Partenkirchen	11° 04" - 47° 29"	719	météo	1949-01-01	2001-02-28
Mittenwald	11° 16" - 47° 26"	920	météo	1949-01-01	2001-02-28
Hohenpeissenberg	11° 01" - 47° 48"	977	météo	1949-01-01	2001-02-28
Raisting	11° 06" - 47° 55"	553	météo	1986-11-01	1999-01-31
Attenkam	11° 22" - 47° 43"	655	météo	1971-04-01	2001-02-28
Kohlgrub,Bad	11° 05" - 47° 40"	734	météo	1991-08-01	2001-01-31
Toelz,Bad	11° 33" - 47° 47"	640	météo	1949-01-01	2001-02-28
Holzkirchen	11° 42" - 47° 53"	685	météo	1982-12-01	2001-01-31
Rottach-Egern	11° 46" - 47° 41"	747	météo	1958-01-01	2001-02-28
Weilheim	11° 08" - 47° 51"	550	hydro	1970-01-01	2001-07-31

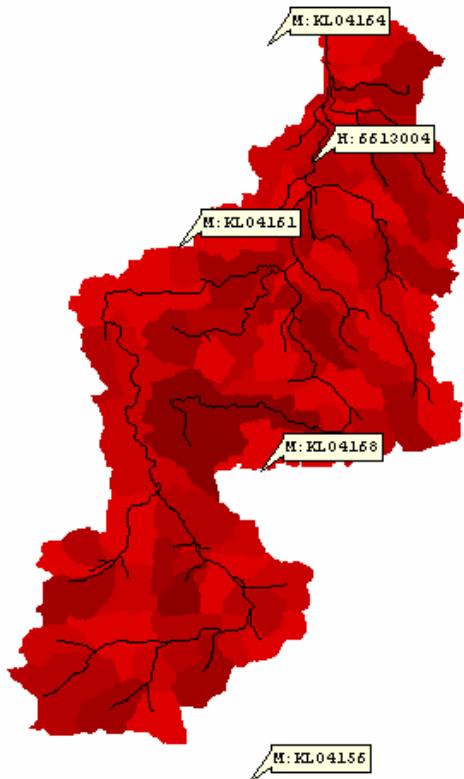


Figure 3.8 : Positions des stations météorologiques (étiquettes débutant par la lettre « M ») et de la station hydrométrique (étiquette débutant par la lettre « H »).

Pour ce qui est des chroniques de données à ces stations, les valeurs qui ont été rendues disponibles par l'équipe bavaroise sont des précipitations et des températures minimales et maximales à l'échelle journalière pour les stations météorologiques et des débits journaliers pour la station hydrométrique.

À partir de ces données, le modèle hydrologique Hydrotel a été utilisé pour simuler des débits. Par une méthode interactive d'essais et d'erreurs, les coefficients d'ajustements du modèle ont été calés pour tenter de reproduire au mieux les observations. La période 1985-1990 (figure 3.9) a été sélectionnée arbitrairement pour effectuer le calage. Cinq périodes de cinq ans (figures 3.10 à 3.14) ont servi à la vérification des performances du modèle. Les valeurs des coefficients de Nash-Sutcliffe correspondant à ces simulations sont données au tableau 3.2. On y note que les résultats obtenus sont bons bien que de qualité variable selon la période considérée. Il faut rappeler qu'il est difficile avec un bassin de petite dimension et dont les temps de réactions sont courts de produire des résultats d'une plus grande qualité que ceux obtenus lorsque les données d'entrée qui l'alimentent sont des chroniques quotidiennes. En ce sens, on peut considérer satisfaisant le calage du modèle.

Un graphique des débits moyens mensuels observés et modélisés est disponible à l'annexe C.

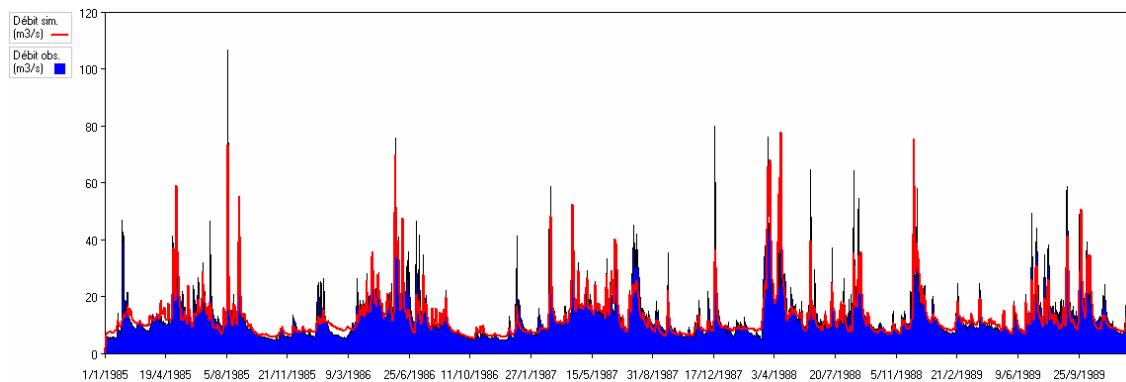


Figure 3.9 : Comparaison entre les débits simulés et observés au site de la station hydrométrique sur le bassin de la rivière Ammer sur la période 1985-1990 (période de calage des coefficients).

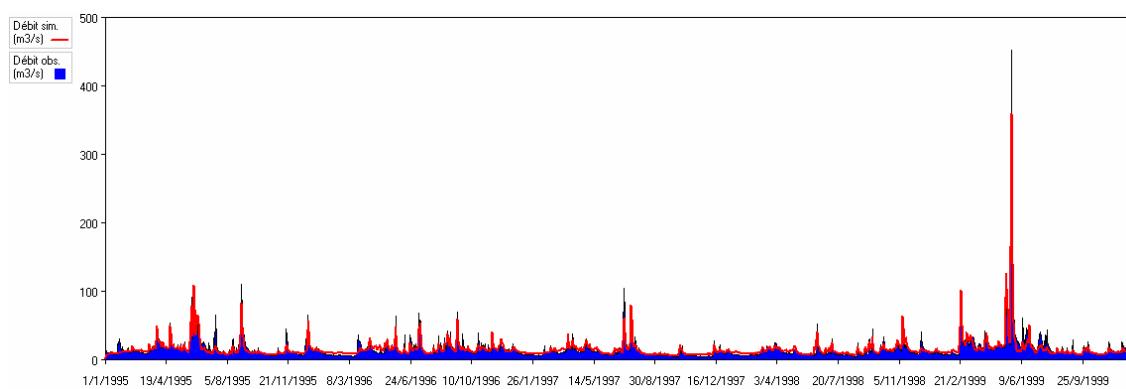


Figure 3.10 : Comparaison entre les débits simulés et observés au site de la station hydrométrique sur le bassin de la rivière Ammer sur la période 1995-2000 (période de vérification).

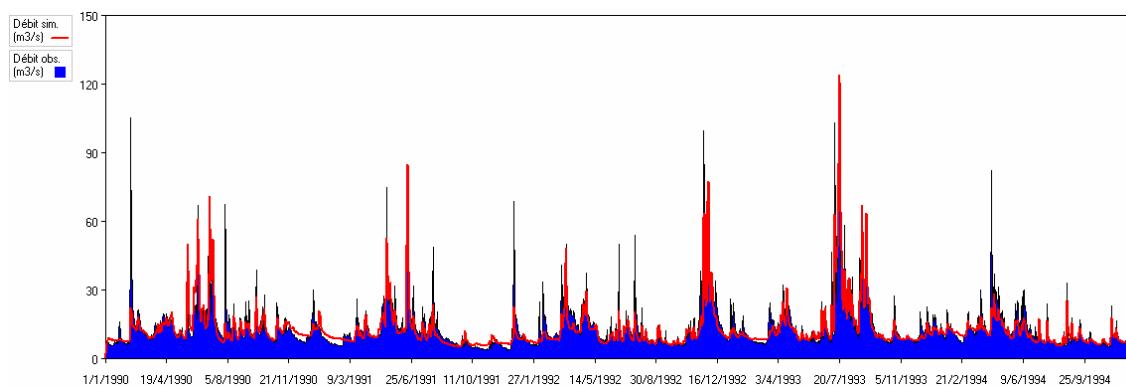


Figure 3.11 : Comparaison entre les débits simulés et observés au site de la station hydrométrique sur le bassin de la rivière Ammer sur la période 1990-1995 (période de vérification).

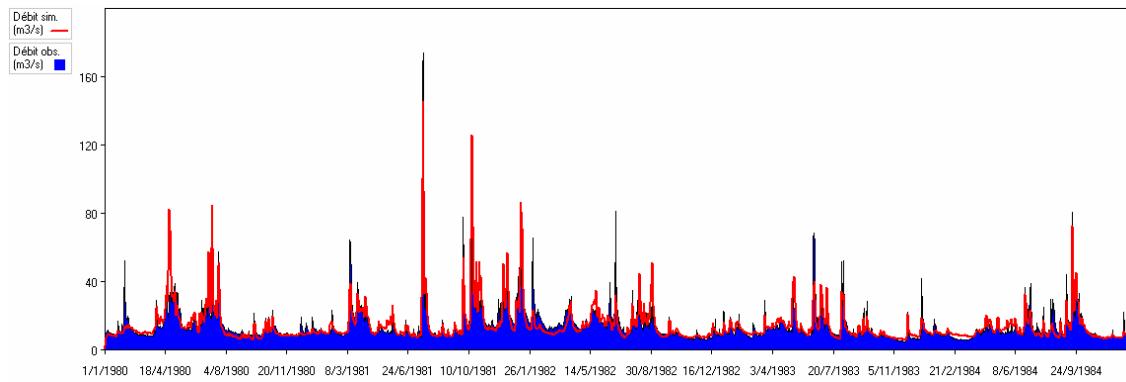


Figure 3.12 : Comparaison entre les débits simulés et observés au site de la station hydrométrique sur le bassin de la rivière Ammer sur la période 1980-1985 (période de vérification).

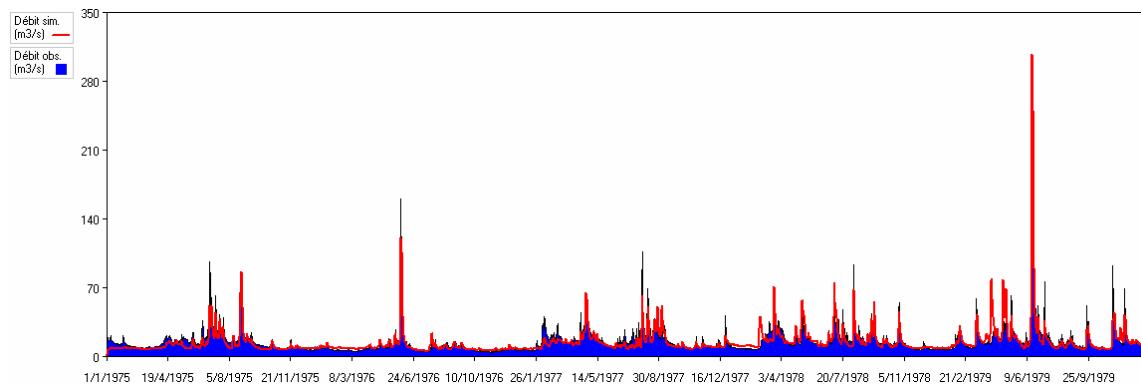


Figure 3.13 : Comparaison entre les débits simulés et observés au site de la station hydrométrique sur le bassin de la rivière Ammer sur la période 1975-1980 (période de vérification).

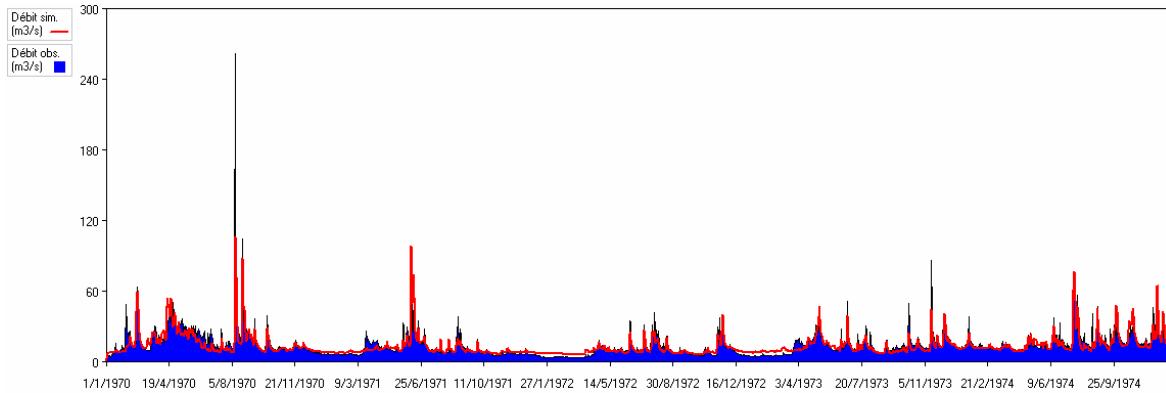


Figure 3.14 : Comparaison entre les débits simulés et observés au site de la station hydrométrique sur le bassin de la rivière Ammer sur la période 1970-1975 (période de vérification).

Tableau 3.2 : Coefficient de Nash-Sutcliffe en fonction de la période considérée

Période	Coefficient de Nash-Sutcliffe
1995-2000	0.83
1990-1995	0.65
1985-1990*	0.73
1980-1985	0.64
1975-1980	0.66
1970-1975	0.58

* période de calage des coefficients

4 – Application des sorties du MRCC aux bassins Ammer et Châteauguay

Les sections suivantes décrivent l'utilisation des résultats du modèle régional canadien du climat (MRCC) comme pilote du modèle hydrologique pour les bassins versants des rivières Ammer et Châteauguay.

4.1 – Utilisation des données du MRCC

Le modèle régional canadien du climat (MRCC) est un modèle qui permet de simuler l'évolution de différents champs climatiques dans le temps sur une grille quadrillée ayant

45 kilomètres de côté. Deux configurations spatiales du MRCC sont utilisées ici : une première qui couvre l'Amérique du Nord et une seconde qui couvre l'Europe.

Pour simuler l'hydrologie des deux bassins versants, il a fallu piloter le modèle Hydrotel avec des données de températures et de précipitations provenant du MRCC et simulées sur différents point de grille. Pour leur inclusion dans Hydrotel, les points de grille choisis ont été considérés comme s'ils étaient des stations climatiques. Les figures 4.1 et 4.2 permettent de voir quels points de grille ont été utilisés pour les simulations hydrologiques. Ainsi, dans le cas de la rivière Châteauguay, dix points de grille ont servi aux simulations, tandis que seulement cinq points de grille ont été utilisés pour la rivière Ammer.

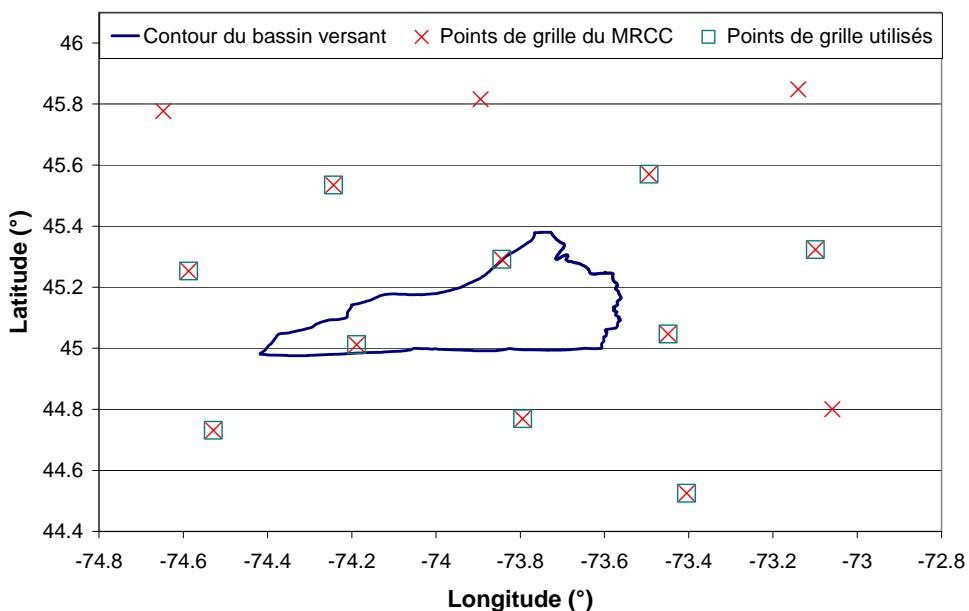


Figure 4.1 – Contour du bassin versant de la rivière Châteauguay (côté québécois) et points de grille du MRCC.

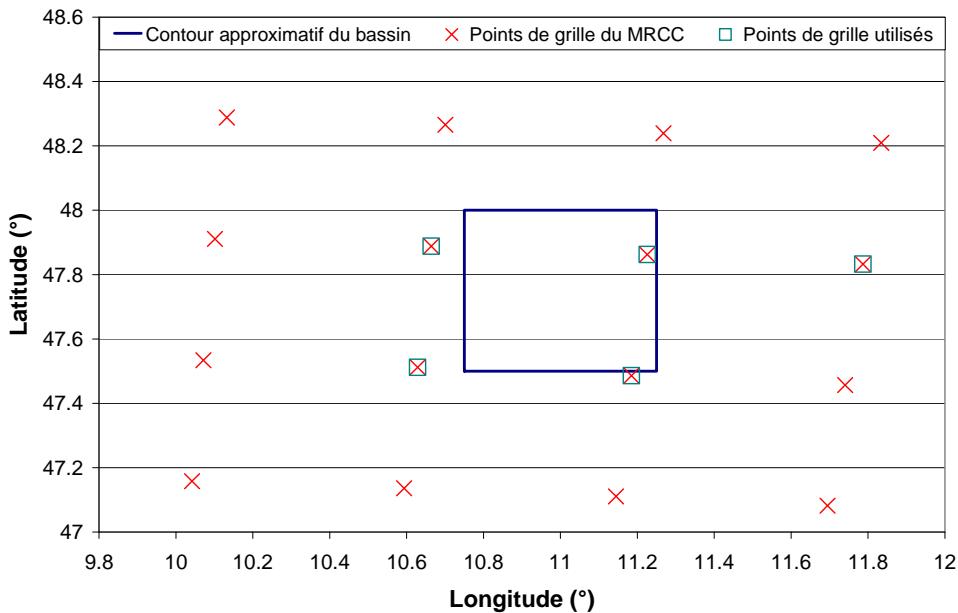


Figure 4.2 – Zone approximative du bassin versant de la rivière Ammer et points de grille du MRCC.

Le MRCC doit être piloté par des informations globales qui servent à donner les conditions aux limites de son domaine spatial de calcul. Le choix du pilote permet d'obtenir différentes séries de températures et précipitations. Les deux pilotes utilisés dans le cadre de cette étude sont les suivants : le modèle de climat global canadien (CGCM) et les réanalyses ERA40. Il est à noter que pour l'application en projection climatique, le CGCM a été contraint par le scénario de prospective d'émission de gaz à effet de serre « a2 » du GIEC. Il est à noter aussi que les réanalyses ERA40, qui sont des séries de données atmosphériques simulées en intégrant des observations historiques, ont été préparées par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT).

Les tableaux 4.1 et 4.2 montrent les différentes configurations utilisées pour les différentes séries de températures et précipitations utilisées.

Tableau 4.1 : Séries de données climatologiques utilisées sur le bassin versant de la rivière Ammer.

	1961-1990	2071- 2100
-----	Observations au sol*	Deltas avec CGCM2
MRCC (3.7.1)	ERA40**	
MRCC (3.7.1)	CGCM2	CGCM2

* Les débits observés couvrent une période décalée de 10 ans (1971-2000)

** Les réanalyses ERA40 couvrent la période 1970-1999

Tableau 4.2 : Séries de données climatologiques utilisées sur le bassin versant de la rivière Châteauguay.

	1961-1990	2041- 2070
-----	Observations au sol	Deltas avec CGCM3
MRCC (4.1.1)	ERA40	CGCM3
MRCC (4.1.1)	CGCM3	

Il est à noter aussi que, dû aux disponibilités des données, les périodes historiques des différentes simulations (observations, MRCC-CGCM, et MRCC-ERA40) sont décalées de quelques années. De même les versions du MRCC et du CGCM3 sont différentes selon les régions. Sur l'Europe, seule la version 3.7.1 du MRCC pilotée par le CGCM2 et par les réanalyses ERA40 est disponible. Sur le Québec par contre, la version 4.1.1 du MRCC est disponible, pilotée par le CGCM3 et par les réanalyses ERA40. Les versions les plus récentes (MRCC-4.1.1 et CGCM3) de modèles intègrent notamment le schéma de surface CLASS, ce qui représente une amélioration sur les anciennes versions.

L'utilisation de ces différentes configurations se fait en deux temps : leur utilisation sur la période historique de référence puis leur utilisation sur la période future. Le pilote MRCC-ERA40 ne comporte pas de période future. Les premières simulations pour chacun des bassins portent donc sur la période historique. Une simulation hydrologique pilotée par les observations faites au sol aux sites des stations a été comparée à des simulations hydrologiques pour la même période, mais pilotées par les sorties du MRCC. Deux configurations du MRCC peuvent être rattachées à la période de référence. Il s'agit du MRCC piloté par les réanalyses ERA40 et du MRCC piloté par le CGCM pour la période passée. Ceci permet une première illustration des défis découlant de l'utilisation des sorties du MRCC pour piloter un modèle hydrologique dans un contexte où l'estimation de l'évolution du climat n'ajoute pas de difficultés supplémentaires.

Les autres simulations hydrologiques sont effectuées en période future. Elles incluent l'incertitude supplémentaire associée à l'estimation des impacts des changements climatiques. Il est à noter qu'il n'y a qu'une seule configuration du MRCC pour la période future : il s'agit du MRCC piloté par le CGCM. Une deuxième option pour l'estimation d'un scénario en changements climatiques est aussi présentée, soit la définition de perturbations appliquées aux séries de données mesurées au sol à l'aide des deltas mensuels obtenus avec le CGCM. Les « deltas » sont estimés à partir des sorties du MRCC piloté par le CGCM entre la période de référence et la période future.

4.2 – Hydrologie sur le bassin de la rivière Ammer

La présente section regroupe les résultats des simulations hydrologiques sur le bassin de la rivière Ammer.

4.2.1 – Période de référence

La figure 4.3 montre le comportement du MRCC lorsqu'il est piloté par les réanalyses ERA40, par rapport aux observations au sol. À la base, il faut noter que les précipitations sont bien reproduites de octobre à mai, tandis qu'elles sont fortement sous-estimées pour la période allant de juin à septembre. La température est sous-estimée sur toute la période.

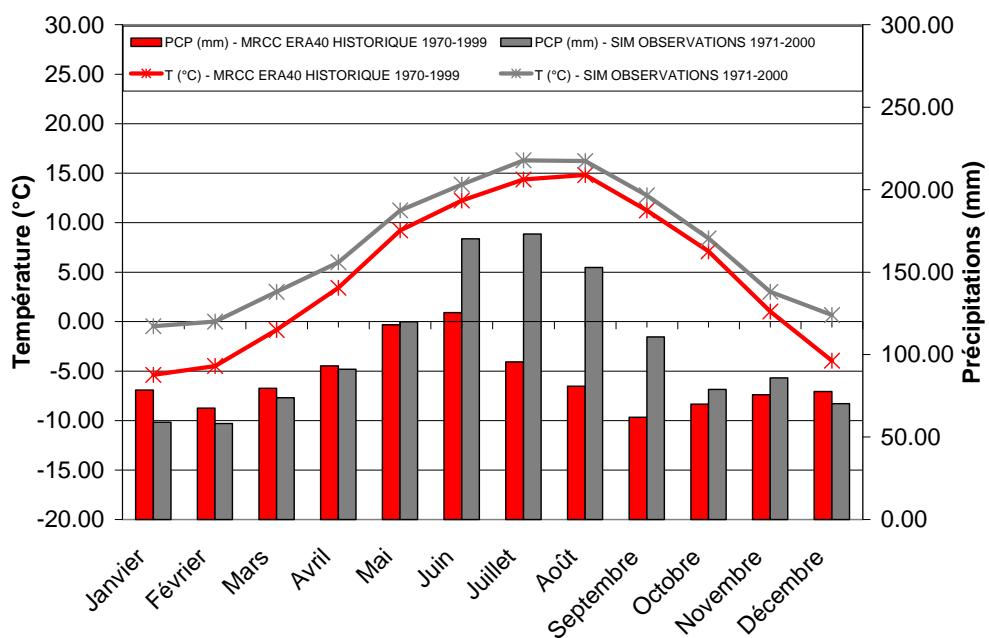


Figure 4.3 : Bassin versant de la rivière Ammer : Comparaison entre les moyennes mensuelles des données climatologiques de la période de référence pour les observations et pour le MRCC piloté par les réanalyses ERA40.

Lors des simulations hydrologiques, ces différences dans les intrants climatologiques ont, comme le montre la figure 4.4, un impact très clair. Les températures plus basses causent une accumulation plus importante de neige au sol et retardent la crue printanière. Lors de la fonte, cette plus grande accumulation de neige accroît les pointes de crues, les faisant passer d'une médiane de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ à $25 \text{ m}^3/\text{s}$. En été, le manque de précipitations est en partie la cause des sécheresses plus sévères. Il est aussi possible de voir que les sorties du

MRCC piloté par ERA40 produisent des simulations beaucoup plus uniformes entre chacune des années puisque l'espace interquartile est beaucoup plus petit. Il semble donc que la variabilité d'une année à l'autre produite par le MRCC est nettement moins importante que celle qui est observée.

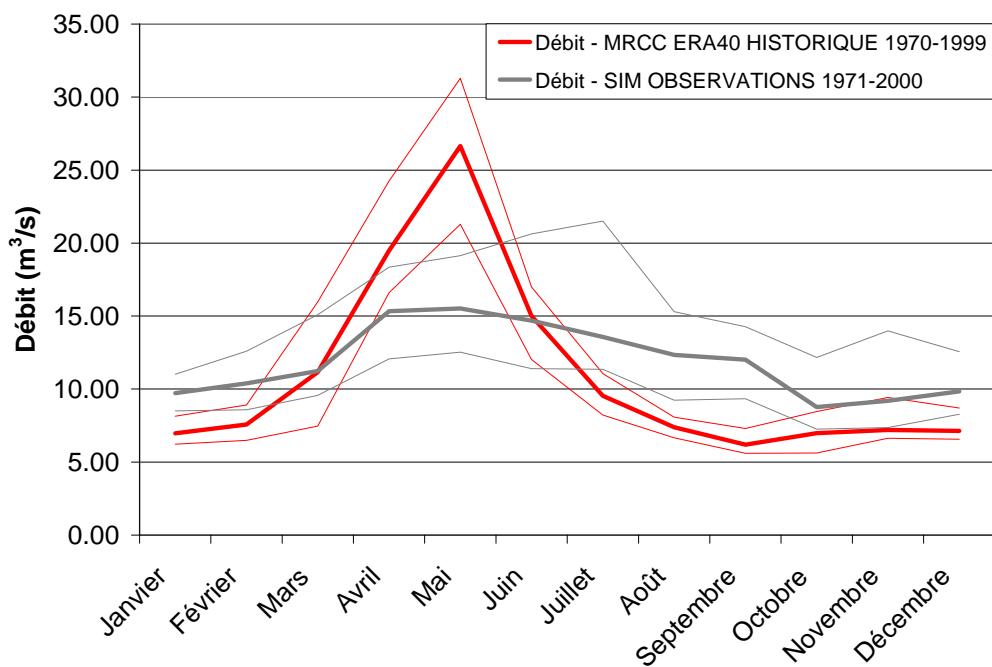


Figure 4.4 : Bassin versant de la rivière Ammer : Comparaison entre les débits médians mensuels simulés pour la période historique avec Hydrotel piloté par les observations puis par les sorties directes du MRCC, piloté lui-même par les réanalyses ERA40. L'espace interquartile est représenté par les traits fins.

À la figure 4.5, la climatologie moyenne sur le bassin versant de la rivière Ammer générée par le MRCC piloté par le modèle CGCM est représentée. Par rapport aux stations au sol, les températures y sont sous-estimées toute l'année, tout comme les précipitations. Ces précipitations sont même fortement sous-estimées durant les mois de juin à novembre alors que pour la même période la sous-estimation des températures est moins importante.

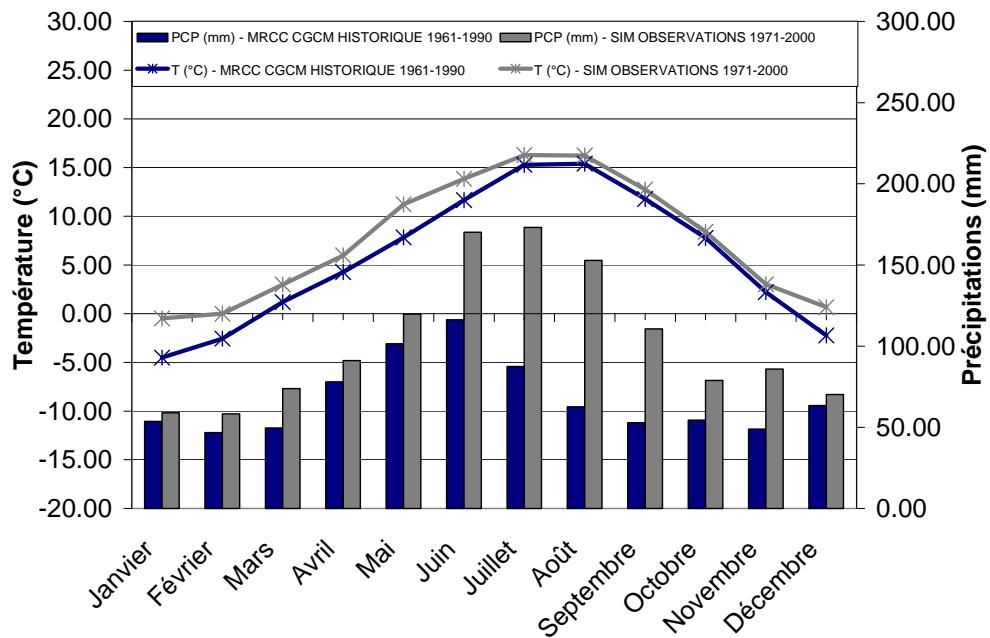


Figure 4.5 : Bassin versant de la rivière Ammer : Comparaison entre les moyennes mensuelles des données climatologiques de la période de référence pour les observations et pour le MRCC piloté par le MCG CGCM.

L'impact de ces différences est présent dans les simulations hydrologiques faites avec Hydrotel. La figure 4.6 représente les médianes des moyennes mensuelles des débits pour les 30 années de simulation. Les débits présentés pour les sorties d'Hydrotel lorsqu'il est piloté par les sorties du MRCC sont sous-estimés d'environ $4 \text{ m}^3/\text{s}$ tout au long de l'année. La variabilité simulée est beaucoup moindre que la variabilité mesurée. La crue de printemps est présente et relativement bien synchronisée. Par contre, l'augmentation des débits entre l'hiver et le printemps est plus grande avec les sorties du MRCC piloté par CGCM qu'avec l'utilisation des stations au sol. Les pointes demeurent toutefois inférieures aux pointes observées.

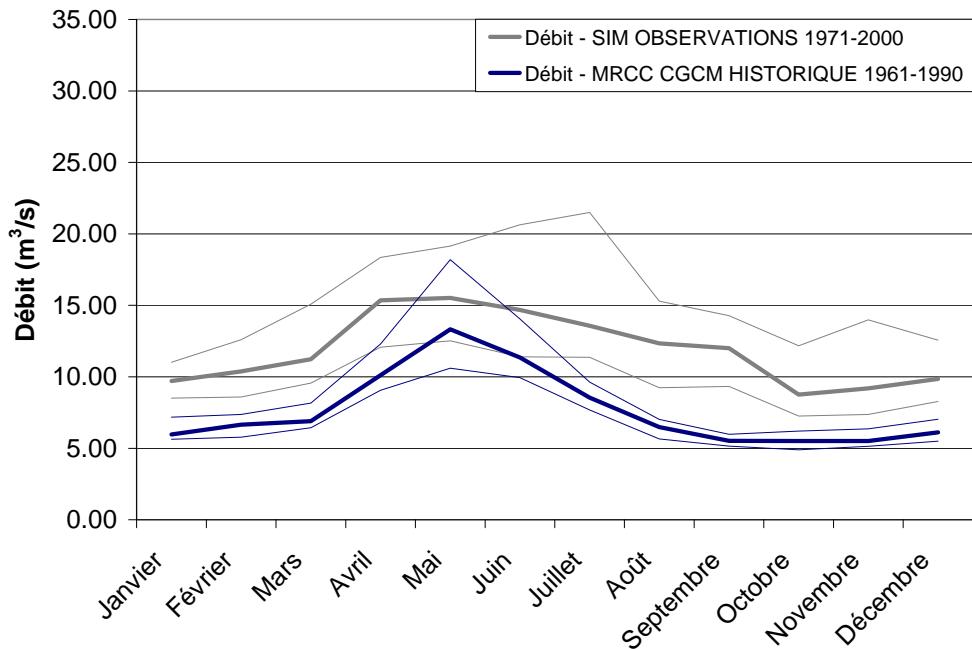


Figure 4.6 : Bassin versant de la rivière Ammer : Comparaison entre les débits médians simulés pour la période historique avec Hydrotel piloté par les observations puis par les sorties directes du MRCC, piloté lui-même par le MCG CGCM. L'espace interquartile est représenté par les traits fins.

En conclusion, l'utilisation des précipitations émanant du MRCC à titre d'intrants dans le modèle Hydrotel pour simuler des débits sur la période historique ne conduit pas à des résultats pleinement satisfaisants. L'approche conduit à une surévaluation de l'importance de la crue de printemps relativement aux débits mensuels moyens pour le reste de l'année, peu importe le pilote utilisé pour le MRCC. La méthode conduit aussi à une sous-évaluation de la variabilité d'une année à l'autre. Ces résultats ne sont d'ailleurs pas surprenants puisque la topographie du bassin de la Ammer, dont une partie se situe dans les Alpes, laisse supposer que des effets locaux importants en caractérisent la climatologie. Ces effets locaux peuvent difficilement être capturés par le MRCC à l'échelle spatiale de sa configuration actuelle. On peut aussi noter, à titre d'élément pouvant éventuellement contribuer à l'amélioration des résultats, le fait que les versions du MRCC et du CGCM disponibles sur l'Europe ne sont pas les plus récentes.

4.2.2 – Période future

Rappelons que pour ce qui est des comparaisons pour la période future, deux cas ont été retenus, soit les sorties du MRCC pilotées par le CGCM et la méthode des « deltas ».

Premièrement, les sorties du MRCC pilotées par le CGCM ont été utilisées pour piloter le modèle hydrologique pour la période de référence (1961-1990), puis la période future (2070-2099). La climatologie montrée sur la figure 4.7 indique que la période future sera caractérisée par des températures plus hautes durant toute l'année, par des précipitations légèrement supérieures de novembre à avril puis légèrement inférieures de mai à octobre.

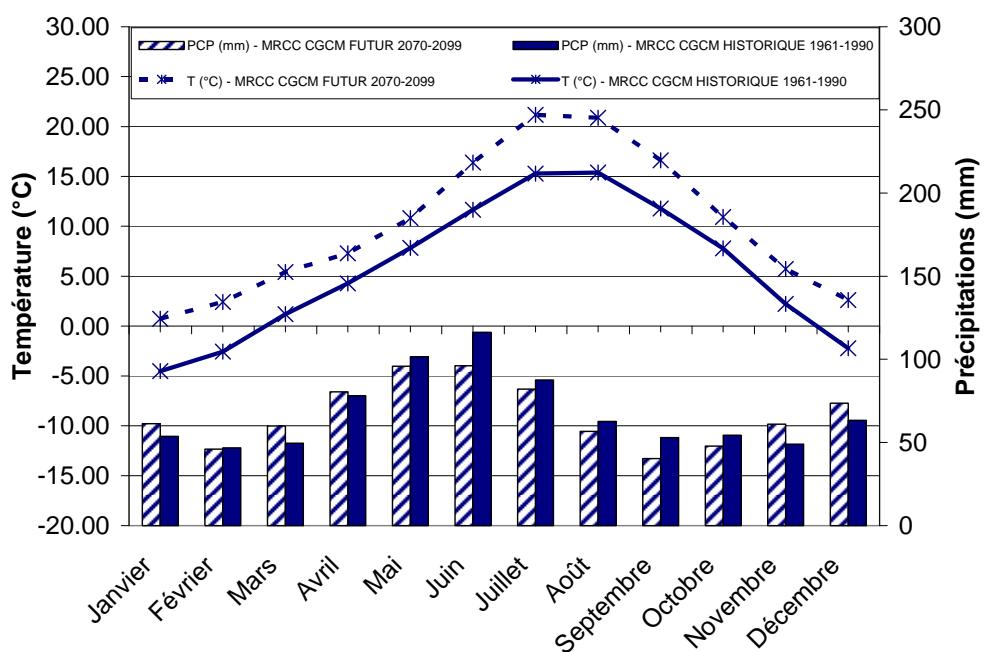


Figure 4.7 : Bassin versant de la rivière Ammer : comparaison entre les moyennes mensuelles des données climatologiques de la période de référence et la période future pour le MRCC piloté par le MCG CGCM.

En utilisant les données climatologiques futures définies plus haut pour faire de la simulation hydrologique, on obtient que les débits mensuels correspondants seront plus bas que ceux de la période de référence tout au long de l'année, tandis que la crue de printemps sera pratiquement absente (figure 4.8).

Deuxièmement, la méthode des « deltas » a été utilisée afin de créer un scénario de températures et de précipitations pour la période future. Les « deltas » ont été estimés à partir des sorties du MRCC piloté par le CGCM entre la période de référence et la

période future (1961-1990 -> 2070-2099). Ces « deltas » calculés à l'échelle mensuelle ont été par la suite appliqués aux observations afin d'obtenir une climatologie future. À noter que les « deltas » de température sont absous, tandis que les « deltas » de précipitation sont relatifs.

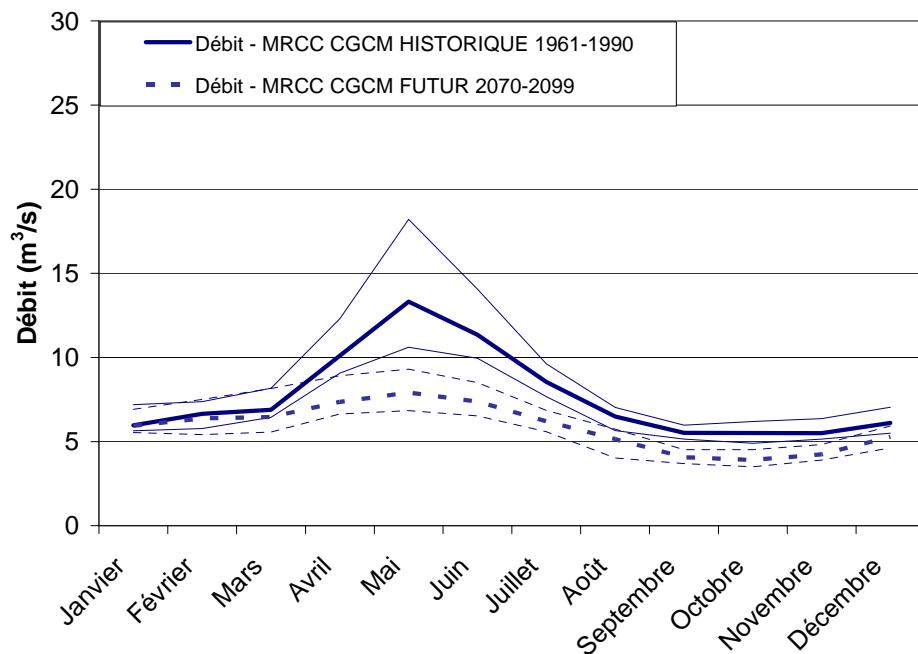


Figure 4.8 : Bassin versant de la rivière Ammer : comparaison entre les débits médians simulés pour la période historique et future avec Hydrotel piloté par les sorties directes du MRCC, piloté lui-même par le MCG CGCM. L'espace interquartile est représenté par les traits fins.

La climatologie produite à l'aide de la méthode des « deltas » est présentée à la figure 4.9. Cette figure possède les mêmes caractéristiques par rapport aux observations que celles de la figure 4.7 soient des températures plus élevées toute l'année et des précipitations supérieures de mai à octobre et inférieures pour le reste de l'année.

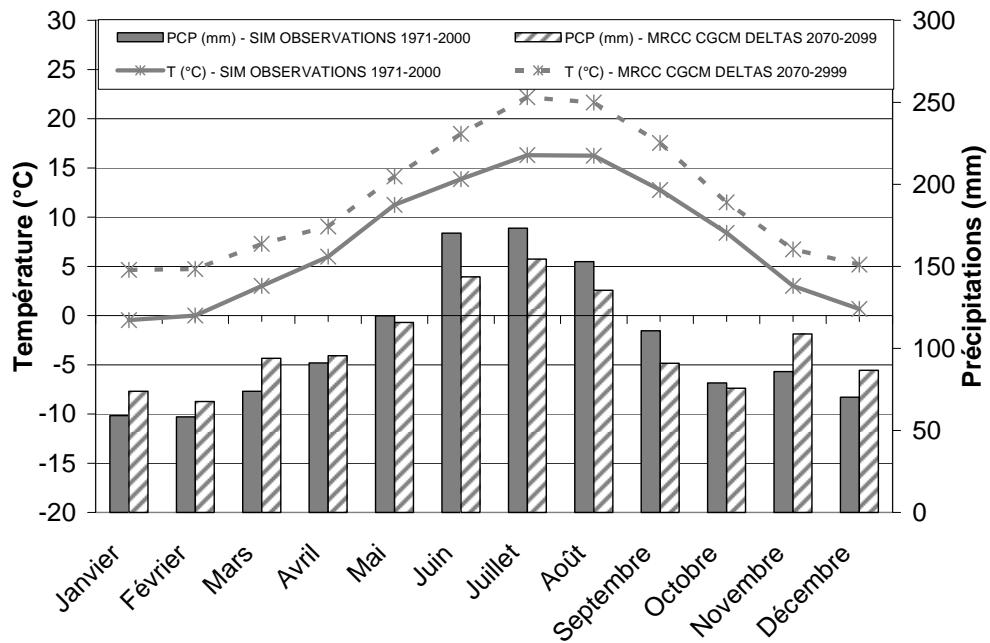


Figure 4.9 : Bassin versant de la rivière Ammer : Comparaison entre les moyennes mensuelles des données climatologiques de la période de référence (observations) et la période future (observations modifiées par les deltas calculés entre la période de référence et la période future pour le MRCC piloté par le MCG CGC).

La figure 4.10 présente les impacts sur l'hydrologie de la période future : la crue de printemps n'existe plus, les débits sont plus bas d'environ 5 m³/s en moyenne à partir du mois d'avril jusqu'au mois de novembre et la variabilité sur les débits est diminuée.

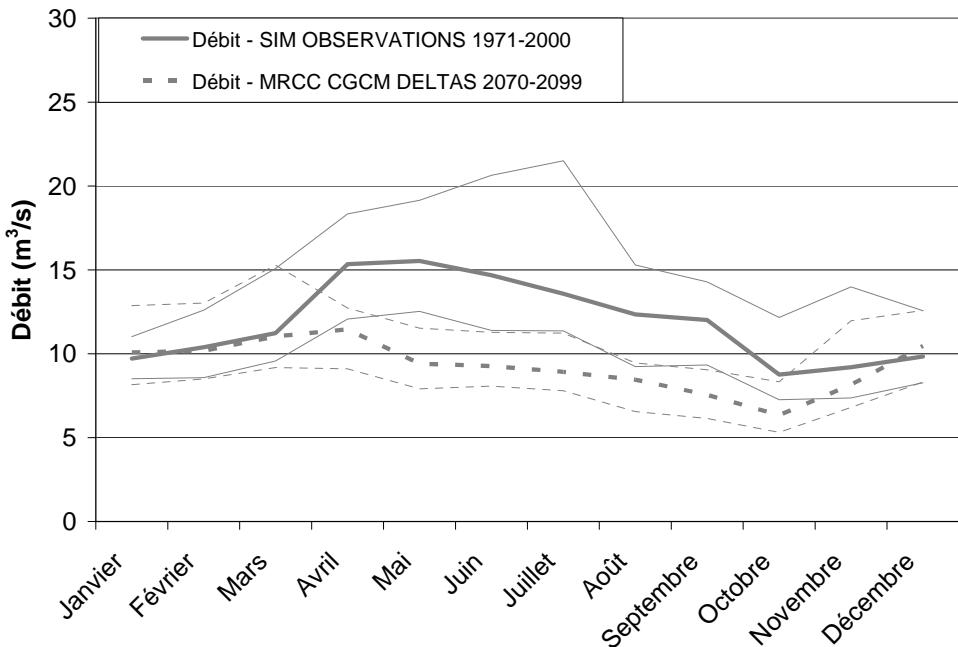


Figure 4.10 : Bassin versant de la rivière Ammer : Comparaison entre les débits médians simulés pour la période historique et future avec Hydrotel piloté par les observations et les observations modifiées par la méthode des deltas calculés sur les valeurs du MRCC piloté par le MCG CGCM. L'espace interquartile est représenté par les traits fins.

En conclusion, il est à noter que, même si elles produisent des résultats numériquement différents, les deux approches utilisées pour étudier les impacts des changements climatiques sur le bassin de la Ammer conduisent, relativement à leur propre simulation en période de référence, à des conclusions similaires. Ces conclusions sont une diminution du volume de la crue printanière, une diminution de l'écoulement annuel et une diminution de la variabilité d'une année à l'autre. Il demeure important de rappeler par contre que ce résultat a un caractère exploratoire et qu'une analyse complète des impacts possibles des changements climatiques nécessiterait le recours à un pilotage par différents modèles globaux et différents scénarios de prospective quant à l'émission de gaz à effet de serre.

4.2.3 - Discussion

Les sorties directes du MRCC ont été utilisées afin de piloter le modèle hydrologique Hydrotel. Les résultats obtenus démontrent que la méthodologie semble appropriée, quoique pas tout à fait à point. Par exemple, les réanalyses ERA40 utilisées pour la période historique devraient normalement permettre de reproduire fidèlement les

observations, ce qui n'est pas le cas. En effet, les températures étant fortement sous-estimées et les précipitations surestimées, l'hydrologie simulée est en réalité très différente de celle qui a été observée. La version plus ancienne du MRCC qui a été utilisée sur l'Europe ainsi que la faible densité de point de grille sur le bassin versant de la rivière Ammer peut expliquer en partie ce fait. Pour ce qui est des sorties du MRCC pilotées par CGCM, les résultats pour la période historique sont entachés du même genre d'erreur : biais négatif sur les températures, sous-estimation des précipitations estivales. Cependant, cette simulation couvrant à la fois une période historique et une période future permet de faire une comparaison qualitative sur les modifications hydrologiques envisageables pour la période centrée sur la décennie 2080. La méthode des deltas aussi utilisée afin de modéliser l'hydrologie future permet elle aussi de faire ce genre de comparaison. Il en ressort que, dans les deux cas cités, l'hydrologie semble être modifiée exactement de la même manière par rapport à la simulation historique de comparaison (figures 4.8 et 4.10). En bref, les deux simulations pointent vers le fait que la crue printanière tendra à être de moins en moins forte, les débits diminueront tout au long de l'année et la variabilité tendra à diminuer.

Des cartes montrant la distribution spatiale des précipitations, de l'évapotranspiration et du ruissellement sont disponibles en annexe B.

4.3 – Hydrologie sur le bassin du ruisseau Norton

La présente section regroupe les résultats des simulations hydrologiques de débit sur le bassin du ruisseau Norton, un cours d'eau drainant un bassin versant de 250 km² et localisé à l'intérieur du bassin de la Châteauguay. Il est à noter que des résultats équivalents, couvrant l'ensemble du bassin de la Châteauguay, sont fournis en annexe A.

4.3.1 – Période de référence

La figure 4.11 montre que le MRCC piloté par les réanalyses reproduit très bien le profil de température historique. Par contre, pour ce qui est des précipitations, elles sont surestimées tout au long de l'année et, plus particulièrement, de mai à août.

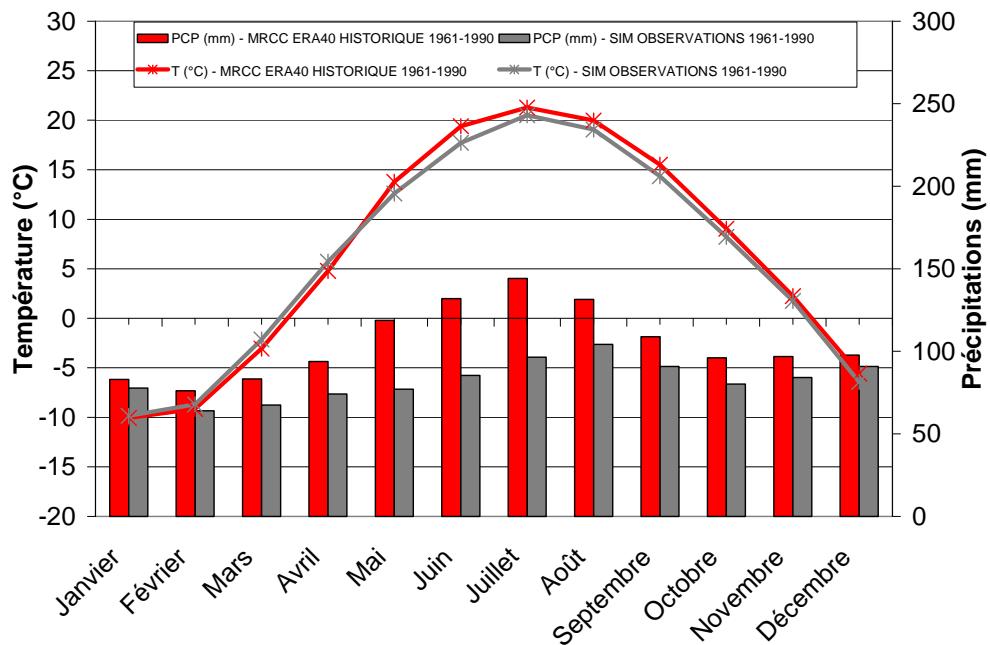


Figure 4.11 : (Bassin versant de la rivière Chateauguay) comparaison entre les moyennes mensuelles des données climatologiques de la période de référence pour les observations et pour le MRCC piloté par les réanalyses ERA40.

La figure 4.12 montre quant à elle les simulations hydrologiques des observations et des sorties du MRCC piloté par ERA40. Les débits sont surestimés tout au long de l'année, mais la forme générale est assez bien reproduite. En effet, la crue de printemps semble parfaitement synchronisée et les débits d'été/d'automne suivent le même profil.

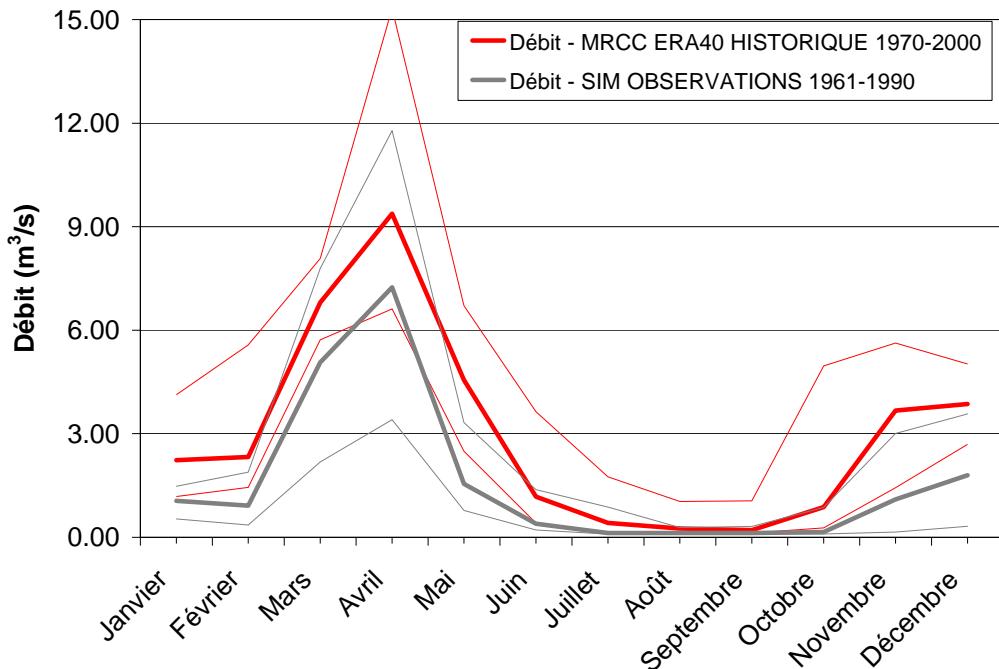


Figure 4.12 : Bassin versant du ruisseau Norton : Comparaison entre les débits médians mensuels simulés pour la période historique avec Hydrotel piloté par les observations puis par les sorties directes du MRCC, piloté lui-même par les réanalyses ERA40. L'espace interquartile est représenté par les traits fins.

La figure 4.13 illustre la climatologie simulée par le MRCC piloté par le CGCM pour la période historique. Dans ce cas, les températures sont légèrement sous-estimées de février à août et légèrement surestimées de septembre à janvier. Pour ce qui est des précipitations, les quantités sont bien reproduites d'octobre à avril, puis fortement surestimées de mai à septembre.

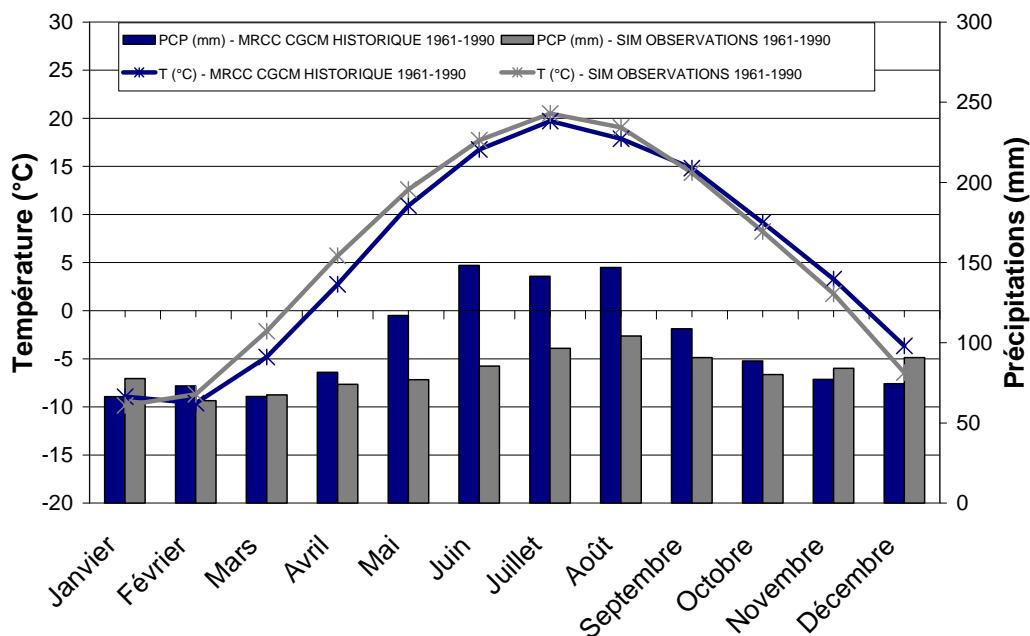


Figure 4.13 : (Bassin versant du ruisseau Norton) Comparaison entre les moyennes mensuelles des données climatologiques de la période de référence pour les observations et pour le MRCC piloté par le MCG CGCM.

Les débits simulés de la figure 4.14 montrent que les sorties du MRCC piloté par le CGCM permettent de simuler une hydrologie assez réaliste en périodes hivernale et printanière. En effet, les débits simulés sont semblables aux débits observés pour les mois de janvier, février et mars. Par contre, les débits mensuels d'été et d'automne, de même que leur variabilité d'une année à l'autre, sont grandement surestimés avec le MRCC piloté avec le CGCM, probablement en raison des précipitations qui sont mal reproduites.

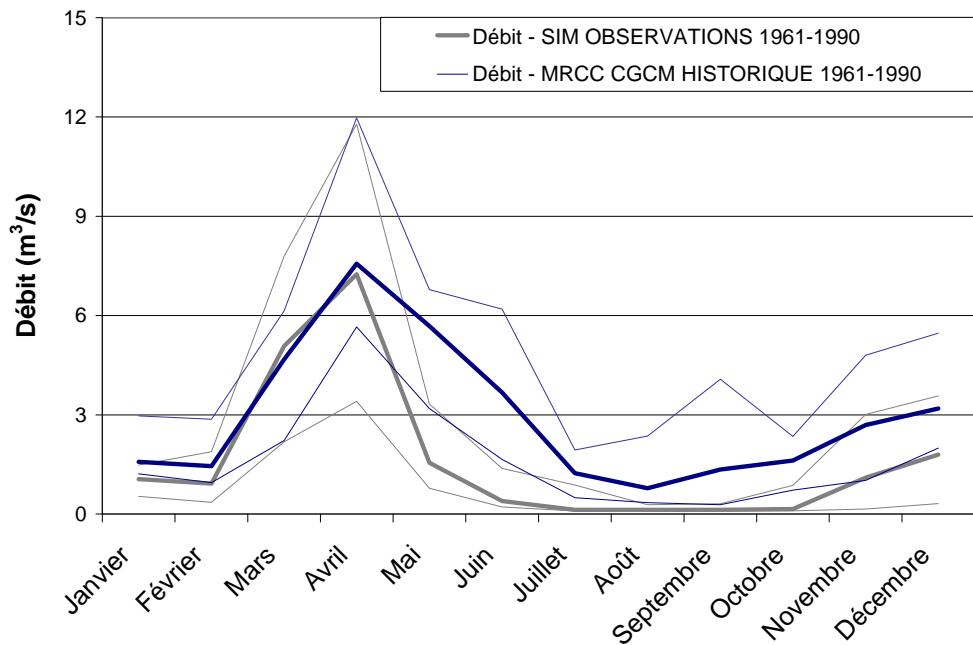


Figure 4.14 : Bassin versant du ruisseau Norton : Comparaison entre les débits médians simulés pour la période historique avec Hydrotel piloté par les observations puis par les sorties directes du MRCC, piloté lui-même par le MCG CGCM. L'espace interquartile est représenté par les traits fins.

En conclusion, les simulations avec le MRCC sur le ruisseau Norton s'approchent des simulations faites avec le réseau de stations au sol bien que des différences demeurent. On note entre autres que les débits et leurs variabilités estimés avec le MRCC sont en général trop élevés à l'exception de la crue de printemps avec le MRCC piloté avec le CGCM où débits et variabilités sont assez bien reproduits. Comme dans le cas du bassin de la rivière Ammer, l'échelle spatiale du bassin versant par rapport à la résolution du modèle peut être une source de différences bien que cette fois, les différentes caractéristiques topographiques sont mieux capturées que sur le bassin de la Ammer. De même, les versions du MRCC et du CGCM sont les plus à jour.

4.3.2 – Période future

La figure 4.15 montre les moyennes mensuelles de données météorologiques des sorties du MRCC piloté par le CGCM sur le bassin versant du ruisseau Norton. Ces données montrent que les températures devraient augmenter d'environ 3°C pour l'horizon 2050. Pour ce qui est des précipitations, il n'est pas possible d'établir une tendance fixe. Certains mois verront en moyenne leurs précipitations augmenter, tandis que d'autres les verront diminuer.

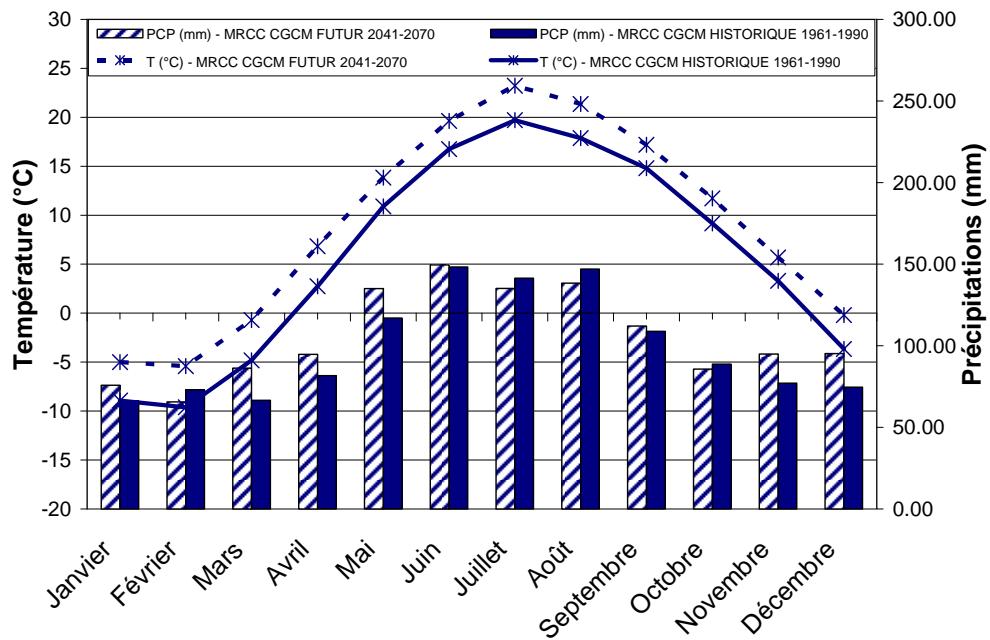


Figure 4.15 : Bassin versant du ruisseau Norton : Comparaison entre les moyennes mensuelles des données climatologiques de la période de référence et la période future pour le MRCC piloté par le MCG CGCM.

La figure 4.16 montre la comparaison entre les débits historiques et futurs.

Qualitativement, selon cette simulation, les étiages du ruisseau Norton seront plus sévères dans le futur. Les débits hivernaux, eux, seront plus importants en raison du temps plus doux qui limite l'accumulation de neige au sol. La variabilité augmentera légèrement durant la période de novembre à février, puis diminuera le reste de l'année.

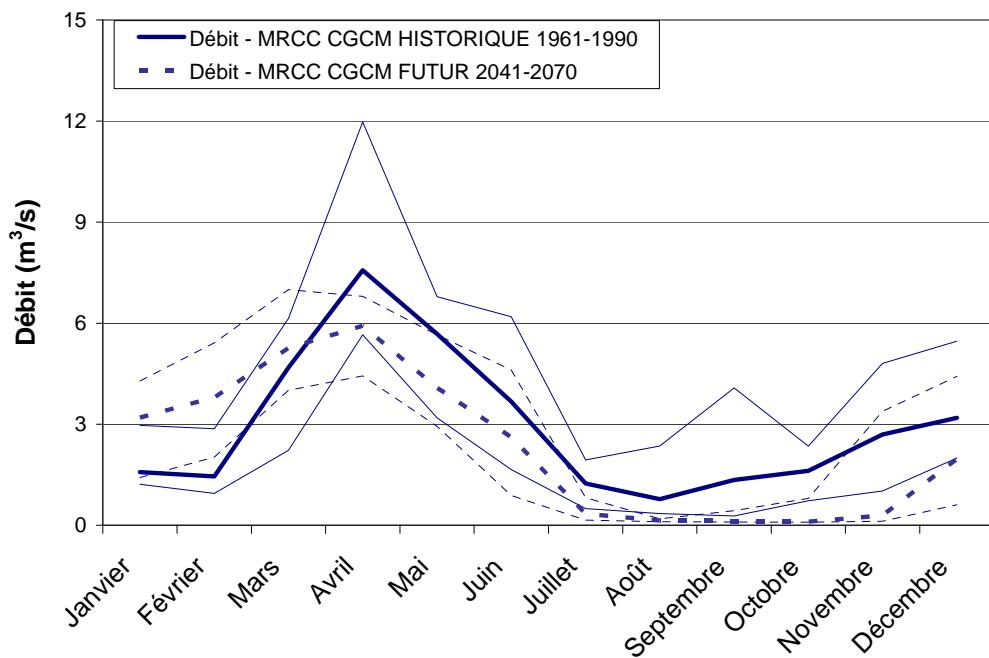


Figure 4.16 : Bassin versant du ruisseau Norton : Comparaison entre les débits médians simulés pour la période historique et future avec Hydrotel piloté par les sorties directes du MRCC, piloté lui-même par le MCG CGCM. L'espace interquartile est représenté par les traits fins.

Encore une fois, à titre de comparaison, la méthode des deltas (températures et précipitations) a ensuite été utilisée pour modifier les observations afin d'obtenir une climatologie future. Les deltas ont été calculés à partir des sorties du MRCC piloté par le CGCM. La climatologie obtenue pour le ruisseau Norton est représentée à la figure 4.17. De manière générale avec cette méthode, le futur sera caractérisé (figure 4.18) par une crue printanière devancée dans le temps par des étiages plus importants. La variabilité pourrait augmenter pour les mois de janvier, février et mars. Il faut rappeler que les de la présente section sont issus de l'analyse d'un seul scénario d'émission de gaz à effet de serre (a2) et d'un seul MCG et, en ce sens, ont un caractère exploratoire uniquement.

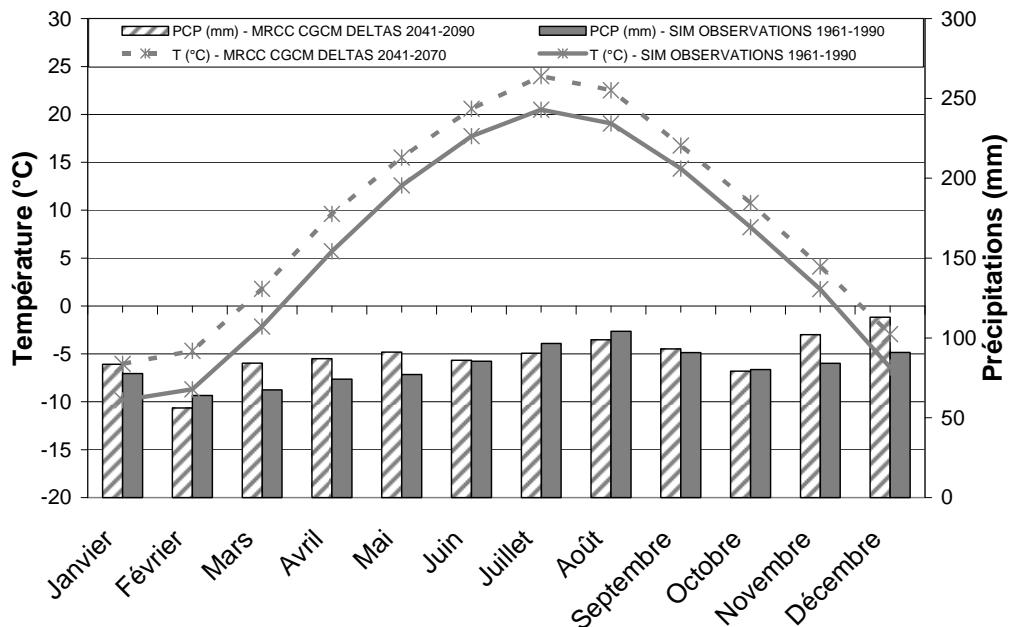


Figure 4.17: Bassin versant du ruisseau Norton : Comparaison entre les moyennes mensuelles des données climatologiques de la période de référence (observations) et la période future (observations modifiées par les deltas calculés entre la période de référence et la période future pour le MRCC piloté par le MCG CGC).

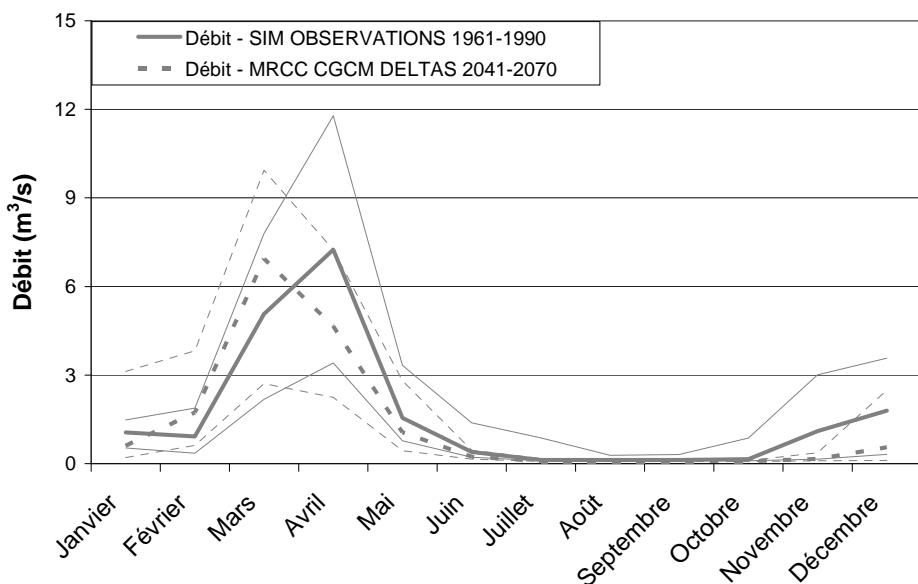


Figure 4.18 : Bassin versant du ruisseau Norton : Comparaison entre les débits médians simulés pour la période historique et future avec Hydrotel piloté par les observations et les observations modifiées par la méthode des deltas calculés sur les valeurs du MRCC piloté par le MCG CGCM. L'espace interquartile est représenté par les traits fins.

4.4 – Besoins en irrigation sur le bassin versant du ruisseau Norton

Les données climatologiques utilisées pour simuler les débits ont aussi servi à alimenter un modèle simulant les besoins en irrigation sur le bassin versant du ruisseau Norton. Le modèle utilisé pour estimer les doses d’irrigation requises en fonction du temps est celui de la Food and Agriculture Organization (FAO). À partir des températures, des précipitations, des superficies en cultures, des types de cultures et des types de sols, ce modèle peut bâtir une série de doses d’irrigation qui devront être appliquées à certaines dates. La somme de ces doses sur la saison des cultures permet d’estimer les besoins annuels en irrigation. Pour avoir plus d’information sur la méthode utilisée et sur son calage pour le ruisseau Norton, se référer à Pugin et al. (2005). Autrement, il est à noter que l’utilisation du modèle sur le bassin versant du ruisseau Norton a été alimentée par les scénarios décrits au tableau 4.2 de la section 4.1. La présente section montre les résultats obtenus.

La figure 4.19 représente les besoins en irrigation pour la période historique. Les sorties du MRCC tendent à sous-estimer les besoins réels pour la période passée. La surestimation des précipitations durant l’été notée aux figures 4.11 et 4.13 explique ce biais.

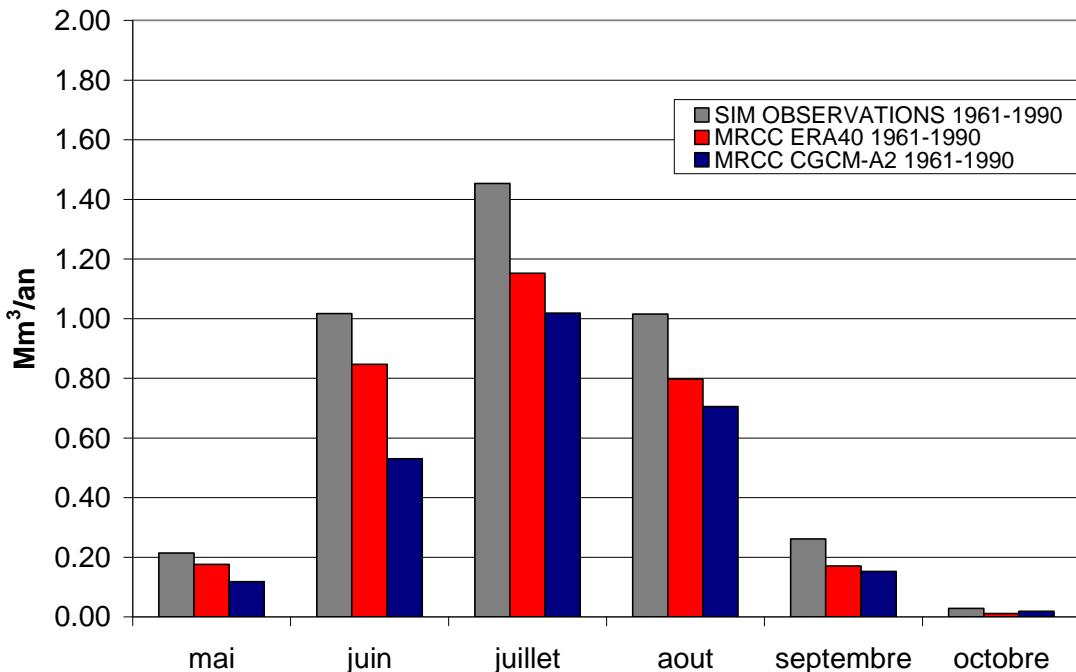


Figure 4.19 : Besoins en irrigation moyens annuels sur le bassin versant du ruisseau Norton. Les simulations sont pour la période de référence.

La figure 4.20 présente les besoins en irrigation obtenus à partir des données du MRCC piloté par le CGCM3 pour la période de référence et pour la période future. Selon cette situation, les besoins en irrigation pourraient augmenter de 33 % annuellement par rapport à la période historique. Les besoins supplémentaires se manifesteront surtout au mois de juillet, où les augmentations pourraient atteindre 45 %. Selon la figure 4.15, c'est durant ce mois que conjointement les températures seront les plus élevées et les précipitations baisseront légèrement. Ces deux faits combinés expliquent l'importante augmentation des besoins en eau pour l'agriculture durant ce mois.

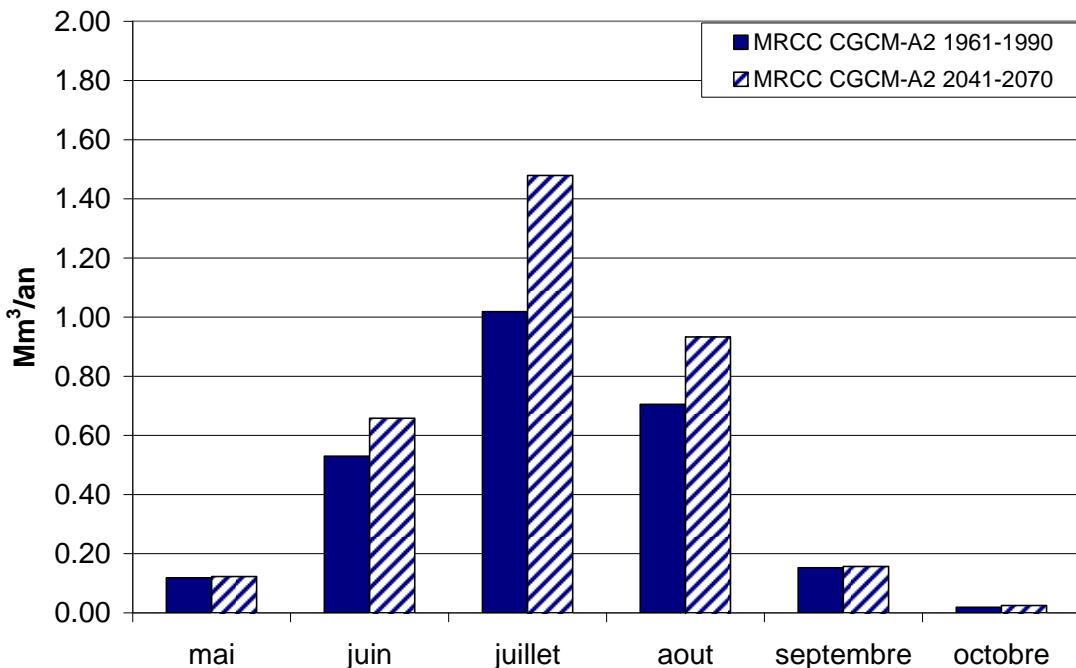


Figure 4.20 : Besoins en irrigation moyens annuels sur le bassin versant du ruisseau Norton pour la période de référence (1961-1990) et la période future (2041-2070) lorsque le modèle d'irrigation est alimenté par les sorties directes du MRCC piloté par CGCM.

La figure 4.21 présente les besoins en irrigation obtenus à partir des observations pour la période de référence et des observations perturbées par les deltas pour la période future. Selon cette situation, les besoins en irrigation pourraient augmenter de 25 % annuellement par rapport à la période historique. Dans ce cas, les augmentations maximales de besoin en irrigation se produiraient lors des mois de juillet et août principalement.

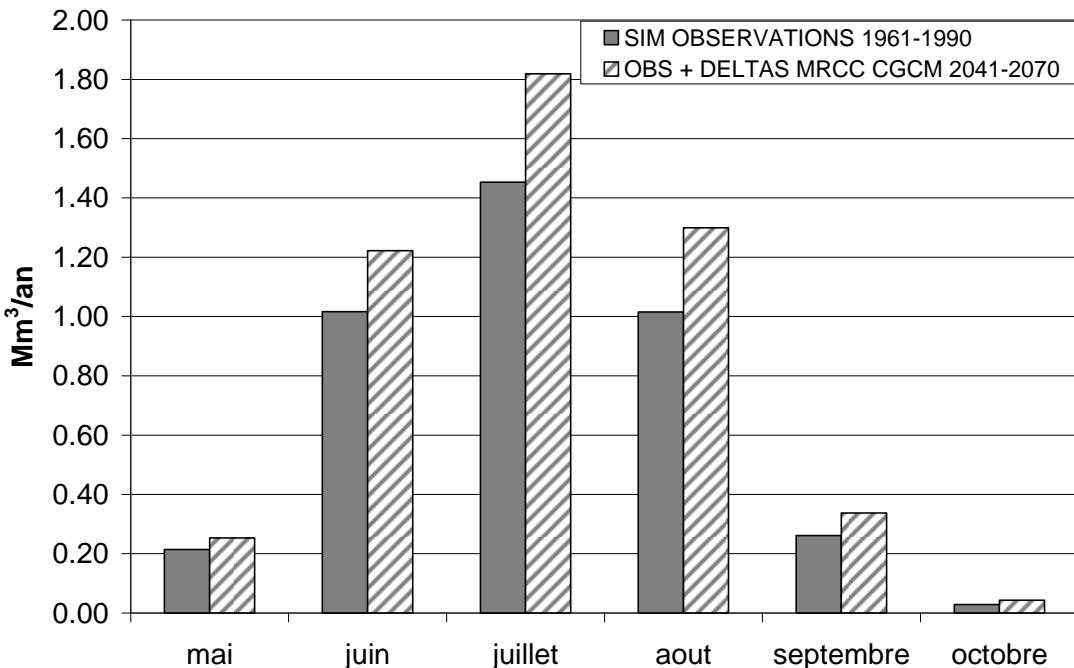


Figure 4.21 : Besoins en irrigation moyens annuels sur le bassin versant du ruisseau Norton pour la période de référence (1961-1990) et la période future (2041-2070) lorsque le modèle d'irrigation est alimenté par observations et les observations perturbées par les « deltas » utilisés venant des sorties du MRCC piloté par CGCM.

Il est à noter qu'une étude antérieure, réalisée par le CEHQ sur le bassin du ruisseau Norton (Pugin et al. 2005), à l'aide de modèles climatiques globaux et de la méthode des deltas, avait permis de prédire que les besoins en irrigation sur le bassin versant du ruisseau Norton, principalement destinés aux cultures maraîchères, seraient en augmentation dans une proportion variant entre 10 % et 20 % pour l'horizon 2050, par rapport aux besoins évalués pour l'historique 1961-1990. Les présents résultats laissent donc supposer une augmentation encore plus importante des besoins en irrigation.

4.5 - Discussion

Les sorties directes du MRCC ont été utilisées afin de piloter le modèle hydrologique Hydrotel. Les résultats obtenus démontrent que la méthodologie semble appropriée, quoique pas tout à fait à point. Par exemple, les réanalyses ERA40 utilisées pour la période historique devraient normalement permettre de reproduire assez fidèlement les observations, ce qui n'est pas le cas. Pour l'Europe, les températures et les précipitations

étant fortement sous-estimées, l'hydrologie simulée est en réalité très différente de celle qui a été observée. La version plus ancienne du MRCC qui a été utilisée sur l'Europe, la topographie accidentée de la région alpine ainsi que la faible densité de points de grille sur le bassin versant de la rivière Ammer peuvent expliquer en partie ce fait. Pour le bassin versant du ruisseau Norton, l'utilisation des réanalyses ERA40 comme pilote du MRCC a permis de reproduire de manière plus satisfaisante la climatologie observée. Les températures simulées sont très proches des observations, mais les précipitations sont cette fois surestimées. L'hydrologie simulée est entachée d'un biais, mais le patron annuel est bien reproduit.

Pour ce qui est des sorties du MRCC piloté par CGCM, la période historique peut être caractérisée par des mêmes similaires à celles obtenues lorsque le MRCC est piloté par les réanalyses. Cependant, les simulations utilisant le CGCM comme pilote couvrent à la fois une période historique et une période future et permettent ainsi de faire une comparaison qualitative sur les modifications hydrologiques envisageables. Les périodes considérées sont la période de 30 ans centrée sur la décennie 2080 pour la rivière Ammer et la période de 30 ans centrée sur 2050 pour le ruisseau Norton.

La méthode des deltas, aussi utilisée afin de modéliser l'hydrologie future, permet elle aussi de faire ce genre de comparaison. Il en ressort que l'hydrologie semble être modifiée selon le même patron que celui obtenu avec les résultats du MRCC piloté par le CGCM si l'on fait une comparaison relative à la simulation historique correspondante (figures 8 et 10 pour la rivière Ammer et figures 16 et 18 pour le ruisseau Norton). Pour la rivière Ammer, les deux simulations indiquent que la crue printanière tendra à être de moins en moins forte, les débits diminueront tout au long de l'année et la variabilité tendra à diminuer. Pour le ruisseau Norton, les deux simulations indiquent que la crue sera devancée, les étiages seront plus sévères et la variabilité augmentera en hiver et diminuera en été.

Des cartes montrant la distribution spatiale des précipitations, de l'évapotranspiration et du ruissellement sur tout le bassin versant de la rivière Châteauguay sont disponibles en annexe B.

5 – Description de deux projets futurs sur les bassins versants des rivières des Outaouais et Châteauguay

Les projets présentés ici font partie de la contribution additionnelle du CEHQ au projet de collaboration entre le consortium Ouranos et l'université Ludwig Maximilian de Munich. Cette contribution consiste notamment à travailler à un second bloc de travail du projet de collaboration. Ce dernier bloc vise le développement d'une vision conceptuelle touchant



la planification de mesures d'adaptation aux effets des changements climatiques par le biais de la gestion intégrée de l'eau par bassin versant.

Plus particulièrement, le travail consiste à établir les bases de deux axes d'application qui seraient réalisables sur un horizon d'environ trois ans.

Le premier de ceux-ci, appliqué au bassin versant de la rivière des Outaouais, a été proposé par le CEHQ qui, compte tenu de son expertise en matière de gestion opérationnelle, a proposé une étude reliée à la gestion quantitative de l'eau par bassin versant dans un contexte d'usages multiples des ressources hydriques. Il a, pour ce faire, identifié le système hydrique de la rivière des Outaouais et de l'archipel de Montréal en considérant spécifiquement une des problématiques de gestion rattachée à ce système, soit celle du soutien des étiages.

Le second axe, proposé par Ouranos et appuyé par le CEHQ et le Centre Brace de l'Université McGill, concerne le bassin versant de la rivière Châteauguay. Il porte sur la gestion de la qualité et de la quantité de l'eau en milieu agricole via l'utilisation d'aires de rétention multifonctionnelles et de leur potentiel comme mesures d'adaptation aux changements climatiques applicables à l'échelle du bassin versant.

5.1 – Axe appliqué au bassin versant de la rivière des Outaouais

La présente section décrit l'axe de recherche appliquée au bassin versant de la rivière Outaouais.

5.1.1 Description du bassin versant et de l'archipel de Montréal

D'une superficie de plus de 146 000 km², le bassin versant de la rivière des Outaouais se situe dans la partie sud-ouest du Québec (figure 5.1). Couvrant la région de Gatineau, de l'Outaouais et d'une partie de l'Abitibi-Témiscamingue, il chevauche également la frontière entre le Québec et l'Ontario.

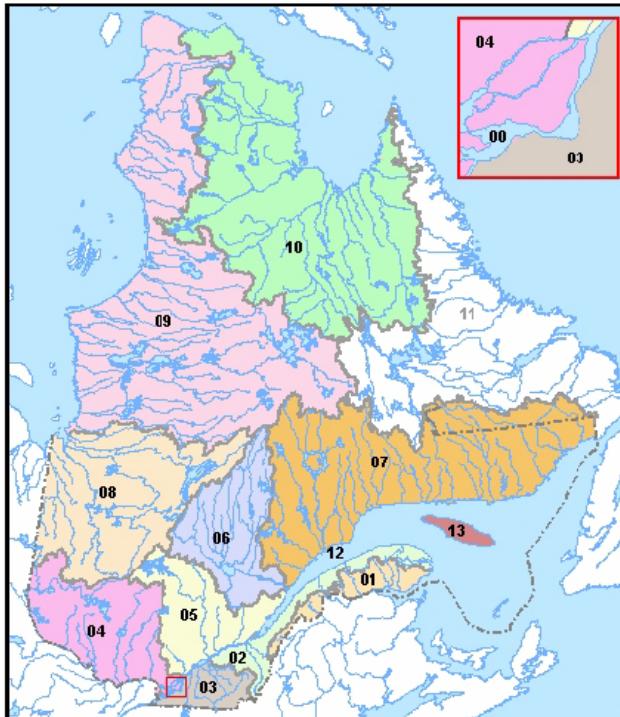


Figure 5.1 : Localisation du bassin versant de la rivière des Outaouais. La partie québécoise du bassin versant est identifiée par le chiffre 4.

Son occupation du sol est principalement caractérisée par la présence de forêts mixtes et feuillues (figure 5.2) et son portrait climatique est semblable à celui observé en général dans le sud du Québec (tableau 5.1).

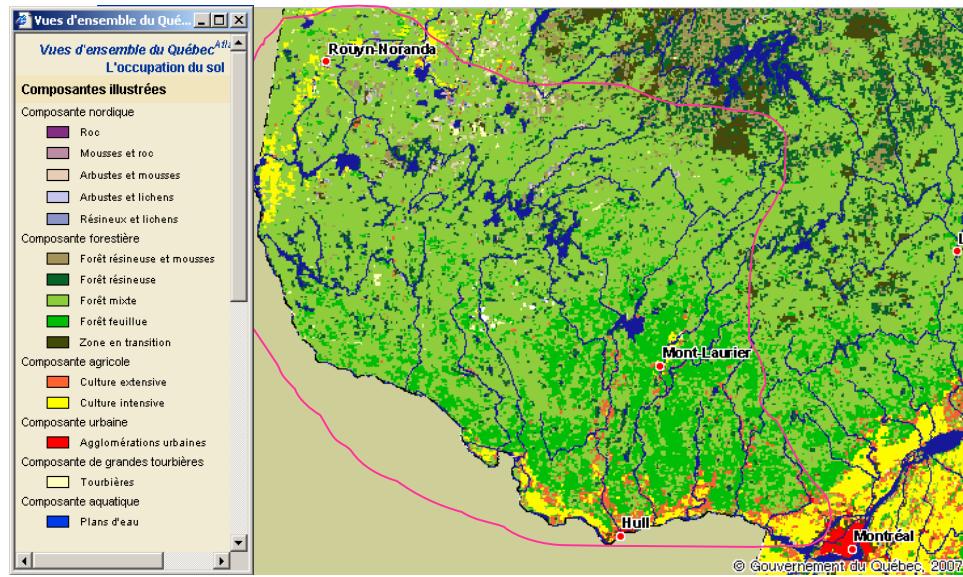


Figure 5.2 : Occupation du sol du bassin versant de la rivière des Outaouais.

Tableau 5.1 : Caractéristiques climatiques du bassin versant

Températures caractéristiques :

- Température moyenne de janvier : - 12 °C
- Température moyenne de juillet : 18°C

Bilan hydrique annuel moyen :

- Précipitation : environ 900 mm
- Ruisseaulement : environ 400 mm
- Évapotranspiration : environ 500 mm
- Moyenne des maximums annuels de neige au sol (équivalent en eau) : environ 220 mm

Particularités climatiques :

- Début et fin de la présence de neige au sol : 1^{er} décembre à mi-avril
- Importante variabilité entre la vallée de l'Outaouais et le nord du bassin versant

Le bassin versant comporte de nombreux barrages et réservoirs, dont les plus importants sont situés dans la moitié supérieure du bassin versant (figure 5.3). La rivière des Outaouais trouve son exutoire dans la région de l'archipel de Montréal. Tout juste après avoir traversé la centrale hydro-électrique de Carillon, exploitée par Hydro-Québec (figure 5.4), la rivière se jette dans le lac des Deux Montagnes. Ce dernier, alimenté à 90 % par l'Outaouais, se déverse ensuite dans le fleuve Saint-Laurent via cinq points de sortie : deux vers le lac Saint-Louis, les canaux de Vaudreuil et de Sainte-Anne-de-Bellevue, deux vers la rivière des Prairies, de part et d'autre de l'île Bizard et un vers la rivière des Mille Îles (figure 5.5).

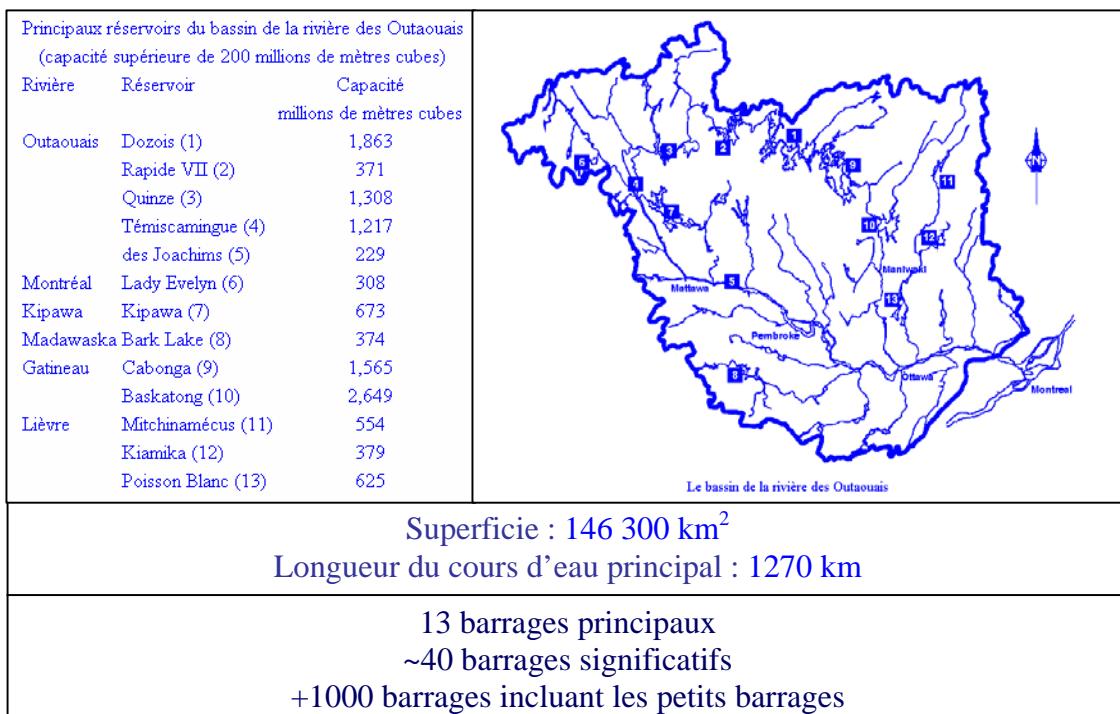


Figure 5.3 : Principaux barrages du bassin versant de la rivière des Outaouais.
 (source : Commission de planification de la régularisation de la rivière des Outaouais)



Figure 5.4 : Centrale hydro-électrique de Carillon à l'exutoire de la rivière des Outaouais.
(source : Hydro-Québec)

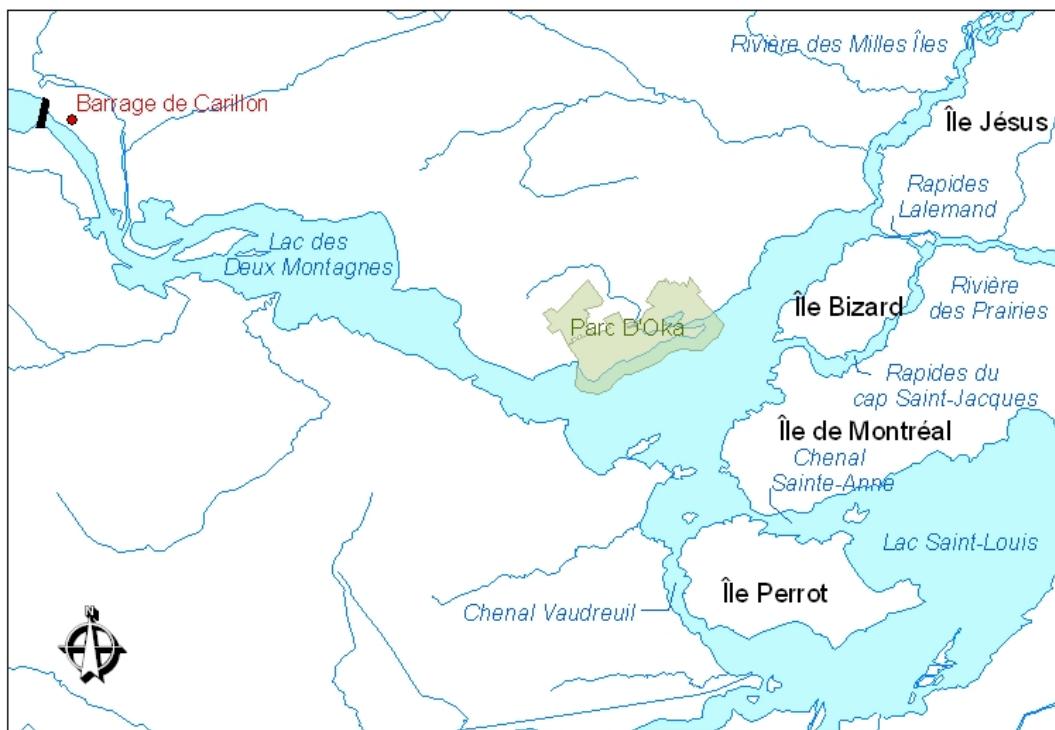


Figure 5.5 : Région de l'archipel de Montréal.

5.1.2 – Contexte et canevas de l'étude proposée

L'idée de proposer ce projet axé sur la problématique du soutien des étiages origine de la problématique vécue récemment liée au besoin de soutien du débit d'étiage de la rivière des Mille Îles, située dans l'archipel de Montréal. À l'été 2001, la rivière des Mille Îles a connu un étiage critique qui fut de nature à compromettre par endroits la sécurité d'approvisionnement en eau potable. Il est à noter que l'approvisionnement de plus de 400 000 personnes dépend de cette source. Les faibles débits presque records de cette rivière et la faible dilution des eaux usées déversées qui s'en est suivi ont alors entraîné un risque important en regard de la capacité de traitement des stations de traitement d'eau potable.

Comme cette rivière prend sa source dans le lac des Deux Montagnes, lui-même alimenté en très grande majorité par la rivière des Outaouais, des mesures d'urgence ont dû alors être entreprises pour soutenir le débit de la rivière des Mille Îles au moyen d'une vidange accrue de certains réservoirs du bassin versant de la rivière des Outaouais. Or, cette mesure prise en conditions d'urgence et qui devait être exceptionnelle a dû être répétée à quelques reprises au cours des années qui ont suivi. Bien que des solutions alternatives sont actuellement analysées et que les gestionnaires des barrages tentent de limiter au maximum ce type de soutien, il demeure que les changements climatiques risquent de rendre cette situation exceptionnelle de plus en plus fréquente et qu'une bonne compréhension des différents impacts climatiques et des différents leviers d'adaptation s'avère essentielle.

La Commission de planification de régularisation de la rivière des Outaouais est l'organisme chargé de la planification de la gestion intégrée des principaux réservoirs sur ce bassin versant. L'entente de gestion porte sur un ensemble de critères de gestion (tableau 5.2). Le critère du soutien du débit d'étiage s'applique à certains tronçons de rivières du bassin versant (soutien local seulement) mais ne comporte toutefois rien de tel pour la région de l'archipel de Montréal (soutien régional) puisqu'aucune problématique de la sorte n'avait été identifiée dans cette région avant les quelques épisodes de sécheresse vécus depuis 2001. L'expérience opérationnelle d'urgence vécue au cours de ces derniers montre que l'addition d'un tel critère comporte des inconvénients importants, surtout si l'on considère le faible rendement hydraulique d'une telle opération (moins de 5 % du débit provenant de la rivière des Outaouais parvient à la rivière des Mille Îles en période d'étiage sévère).

Par ailleurs, dans un contexte de changements climatiques, pour lequel on peut s'attendre à une perturbation plus ou moins importante du bilan hydrique des bassins versants du sud du Québec et, notamment à une baisse généralisée des débits d'étiage estivaux, il est pertinent de s'interroger sur les impacts que pourraient avoir les perturbations possibles du climat sur les conditions de cette gestion actuelle des débits d'étiage.

Par extension, il est aussi d'intérêt de voir de quelle manière les divers scénarios prédis de changements climatiques pourraient affecter la capacité actuelle de soutenir en plus le débit d'étiage de la rivière des Mille Îles par des opérations spécifiques de certains réservoirs du bassin de l'Outaouais, telles que celles réalisées à quelques reprises depuis l'été 2001.

Deux cas d'application sont donc proposés :

1. analyser l'impact des changements climatiques sur la gestion actuelle du soutien local des étiages sur le bassin versant de la rivière des Outaouais;
2. ajouter ensuite une couche additionnelle de contrainte de gestion consistant en un éventuel critère de soutien régional des étiages appliquée à la région de l'archipel de Montréal, plus spécifiquement au soutien du débit de la rivière des Mille Îles.

*Tableau 5.2 : Usage des principaux réservoirs et barrages
du bassin versant de la rivière des Outaouais*

Navigation
Soutien des étiages
Lutte contre les inondations
Hydro-électricité
Approvisionnement en eau potable
Dilution des effluents (eaux usées)
Navigation de plaisance
Flottage du bois
Protection de l'environnement

5.2 – Axe appliqué au bassin versant de la rivière Châteauguay

La présente section décrit l'axe de recherche appliquée portant sur le bassin versant de la rivière Châteauguay.

5.2.1 Description du bassin versant de la rivière Châteauguay

D'une superficie sans commune mesure avec celle du bassin versant de la rivière des Outaouais, le bassin versant de la rivière Châteauguay, qui s'étend sur quelque 2534 km² en Montérégie sur la rive sud de la région de Montréal, est d'ailleurs le bassin versant le plus méridional du Québec. Outre les nombreuses et diverses activités humaines qui s'y déroulent, c'est entre autre cette situation géographique qui en a fait l'un des territoires laboratoires identifiés par le Consortium Ouranos pour analyser et prévoir les effets des changements climatiques sur les divers aspects de la gestion de l'eau.

Occupant près des deux tiers de sa superficie, l'agriculture est l'une des activités les plus importantes du bassin versant. En termes de surfaces cultivées, les cultures à grandes interlignes (maïs, soya, etc.) occupent la moitié de la superficie (figure 5.6). Dans le

bassin de la rivière des Anglais, un affluent de la rivière Châteauguay, et plus particulièrement dans le sous-bassin du ruisseau Norton, la culture maraîchère occupe une large part des surfaces cultivées. Avec celle pratiquée aussi dans le bassin versant de la rivière L'Acadie, la culture maraîchère du bassin du ruisseau Norton représente la majorité des surfaces cultivées à cette fin en Montérégie, région où est d'ailleurs concentrée la presque totalité de ce type de culture au Québec.

Les cultures maraîchères sont réputées pour leurs besoins importants en eau d'irrigation de même qu'en engrais chimiques et pesticides. Ce faisant, elles constituent un enjeu important en matière de gestion de la quantité et de la qualité de l'eau des bassins versants où elles ont cours.

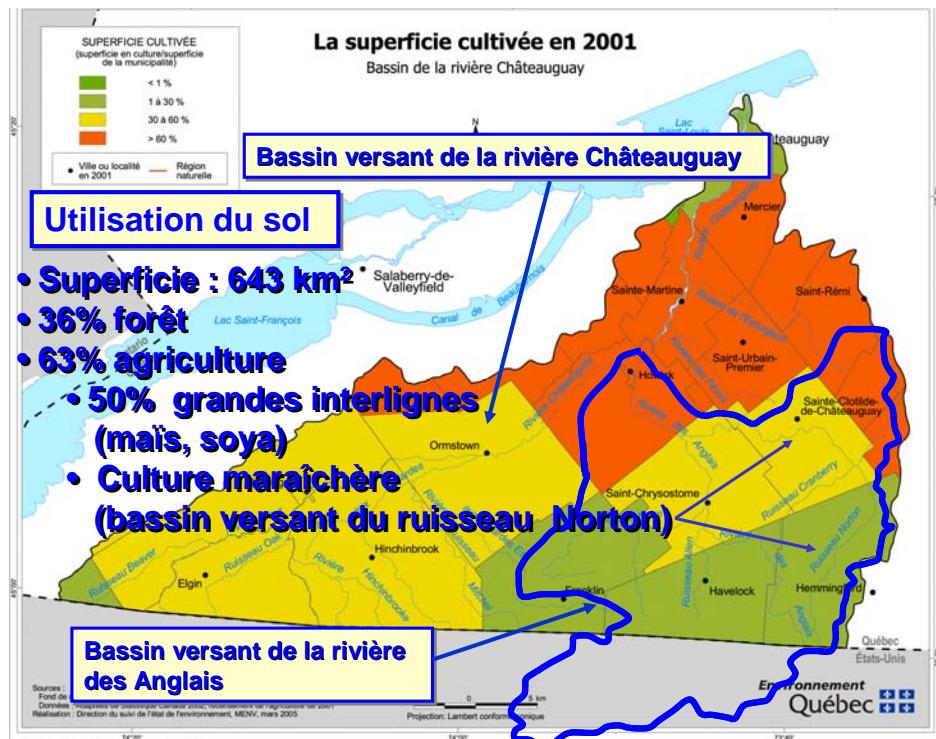


Figure 5.6 : Bassin versant de la rivière Châteauguay (utilisation du sol superficie cultivée).

D'une part, au plan quantitatif, le recours à un approvisionnement dans les eaux souterraines, assurant aux producteurs une eau généralement de bonne qualité, est de plus en plus questionné pour des raisons d'utilisation et de gestion de la ressource. Par ailleurs, l'utilisation non-concertée de multiples petites retenues de surface implantées sur les cours d'eau entraîne des diminutions de débit dramatiques de ceux-ci lors de sécheresse et peuvent être à l'origine de conflits d'usage de la ressource (figure 5.7). Une gestion améliorée et concertée des eaux de surface est donc souhaitable dans le but d'atteindre le meilleur compromis possible entre les besoins en eau des cultures et le maintien des écosystèmes.

De plus, des études de modélisation hydrologique réalisées par le CEHQ en matière d'impacts et adaptation aux changements climatiques indiquent que ces derniers accroîtront vraisemblablement le stress hydrique des bassins versants. Une de ces études, spécifiquement appliquée au bassin versant du ruisseau Norton, révèle, en effet, que tous les scénarios de changements climatiques utilisés prédisent, pour l'horizon 2050, une diminution des débits d'étiage estivaux, concomitante à une augmentation des besoins d'irrigation des cultures (Pugin et al. 2005).



Figure 5.7 : Ouvrages de retenue sur le bassin versant de la rivière des Anglais.

D'autre part, les terres noires comme celles qui caractérisent les sols du bassin du ruisseau Norton et qui sont d'une valeur inestimable par leur richesse en matière organique, sont sensibles à l'érosion hydrique superficielle et entraînent aux cours d'eau des quantités importantes de sédiments et de nutriments qui affectent grandement la qualité des écosystèmes. À cet égard, des débits d'étiage estivaux réduits et une température des cours d'eau accrue par le réchauffement climatique ne pourront faire autrement qu'exacerber ces problématiques.

Plusieurs intervenants des milieux agricole et environnemental sont convaincus qu'il y aurait grand avantage à aborder cette problématique de quantité et de qualité de façon intégrée via la gestion à l'échelle du bassin versant d'aménagements multifonctionnels combinant aires de rétention d'eau et marais épurateurs. Une telle approche aurait comme objectif ultime d'atteindre les meilleurs compromis possibles entre les besoins en

eau des productions agricoles et la protection et la mise en valeur des écosystèmes des cours d'eau des bassins versants concernés.

C'est donc partant de ces constats ainsi que de l'hypothèse, partagée par plusieurs, que l'approche de gestion intégrée à l'échelle du bassin versant constitue un cadre tout indiqué pour la planification de mesures d'adaptation de la gestion de l'eau aux impacts attendus des changements climatiques, que ce second projet a été proposé lors de rencontres et discussions entre les divers partenaires au projet Glowa-Ouranos.

5.2.2 – Contexte et canevas de l'étude proposée

Le bassin versant de la rivière Châteauguay fait l'objet de nombreuses études spécifiques appuyées entre autres par Ouranos. L'intégration et l'amélioration d'outils de modélisation des eaux de surface et souterraines sont les thèmes déjà abordés. L'axe qui est proposée vise à approfondir nos connaissances sur l'aspect qualitatif et l'arrimage des changements climatiques dans le contexte de gestion intégrée du bassin. Il s'agirait en particulier de voir si l'approche de gestion intégré par bassin offre un cadre d'application robuste permettant le développement de stratégies d'adaptation aux changements climatiques.

Dans le cadre du travail de réflexion du bloc 2, nous avons été en mesure de dresser les grandes lignes et les champs de l'étude proposée. Ils peuvent être divisés en deux grands volets : soit (1) le volet de la gestion quantitative et (2) celui de la gestion qualitative.

Compte tenu de la nature même du projet qui en est une d'intégration des problématiques et des approches, la plupart des champs de ces deux volets devront être menés de façon concertée. Le tableau 5.3 résume les divers champs explorés dans chacun des deux volets de l'étude.

Tableau 5.3 : Champs d'application de l'étude

Gestion quantitative de l'eau :
• Scénarios hydrologiques (climats actuel et futur)
• Simulation des besoins en irrigation
• Simulation de la gestion des aires de rétention
• Gestion à l'échelle du bassin versant :
• gestion hydrologique (crues, étiages, débits écologiques)
• gestion de la ressource
Gestion de la qualité de l'eau :
• Simulation des apports polluants (conditions actuelles et changements climatiques) :
• modélisation de la qualité de l'eau
• best Management Practices
• scénarios d'occupation du sol
• Contrôle de la pollution diffuse :
• simulation du rendement des marais artificiels



6 – Conclusion

De par sa mission reliée à la gestion du régime hydrique au Québec, le Centre d’expertise hydrique du Québec (CEHQ) est de plus en plus préoccupé par la question des effets des changements climatiques sur la gestion de l’eau et est en réflexion concernant la définition d’un possible plan d’action à mettre en œuvre en ce domaine dans le cadre de ses propres mandats et opérations, dont celui de la gestion des barrages. Par ailleurs, l’expertise du CEHQ est également sollicitée pour répondre à des demandes externes portant sur l’analyse des effets des conditions climatiques futures appréhendées.

Dans la mouvance de projets reliés aux impacts et à l’adaptation aux changements climatiques dans le domaine de la gestion de l’eau, auxquels participe le CEHQ depuis quelques années déjà, le présent projet porte sur une étude pilote dont l’objectif est de comparer des approches scientifiques développées au Québec et en Bavière dans le domaine de la gestion intégrée de bassins versants dans un contexte de changements climatiques. Dans cette étude, sollicitant l’expertise du CEHQ principalement en matière de modélisation hydrologique et de gestion de l’eau par bassin versant, les bassins versants pilotes ciblés sont, au Québec, celui de la rivière Châteauguay et, en Bavière, celui de la rivière Ammer (un tributaire du Danube).

Les engagements contractuels du CEHQ envers le consortium Ouranos concernaient les volets d’activités suivants :

- la participation au travail d’intégration de données hydro climatiques dans Danubia, outil développé par l’organisme GLOWA-DANUBE, en fournissant son assistance pour l’échange de données avec le groupe bavarois;
- la modélisation hydrologique (mise en place et calage) du bassin versant de la rivière Ammer à l’aide du modèle Hydrotel;
- l’application des sorties du modèle régional de climat canadien MRCC aux bassins versants des rivières Ammer et Châteauguay.

De plus, sur une base volontaire et selon ses propres disponibilités et intérêts, le CEHQ a également contribué aux activités suivantes :

- rédaction d’un projet d’envergure résultant de ce projet pilote;
- discussions entre les intervenants locaux (comités de bassin et autres);
- rédaction de rapports et articles scientifiques sur le sujet.

Le présent rapport fait état de l’ensemble de ces activités.

Concernant le premier volet d’activités, le CEHQ a, comme convenu au texte de l’entente, mis à disposition son expertise technique pour faciliter l’échange de données d’un outil à l’autre.



En regard du second volet, relatif à la modélisation hydrologique du bassin versant de la rivière Ammer, on constate tout d'abord que la structure d'écoulement et la description physiographique du bassin versant modélisé avec l'outil québécois Physitel correspond généralement à la représentation développée préalablement par l'équipe bavaroise à l'aide du logiciel Topaz.

En ce qui concerne la modélisation et le calage hydrologique, effectués du côté québécois à l'aide du logiciel Hydrotel, on peut considérer satisfaisant le calage du modèle, malgré les difficultés inhérentes à l'utilisation de chroniques quotidiennes comme données d'entrée pour un bassin versant de petite dimension et à courts temps de réactions.

Pour le troisième volet de l'étude, le CEHQ a appliqué, selon les règles de l'art, les sorties du MRCC pour piloter le modèle Hydrotel. La méthodologie a été appliquée de bout en bout et permet, comme le visait le projet, de réfléchir aux différentes forces et faiblesses des outils utilisés.

À ce sujet, lorsqu'il s'agit de reproduire le comportement hydrologique existant du bassin de la rivière Ammer en utilisant les précipitations émanant du MRCC (à titre d'intrants dans le modèle Hydrotel), les résultats ne sont pas pleinement satisfaisants et ce, peu importe le pilote utilisé pour le MRCC. Ces résultats sont notamment explicables par les effets topographiques locaux qui peuvent difficilement être capturés par le MRCC à l'échelle spatiale de sa configuration actuelle, de même que par, le fait que les versions du MRCC et celle du CGCM disponible sur l'Europe ne sont pas les plus récentes.

Sur le bassin versant de la rivière Châteauguay, les simulations avec le MRCC ont été analysées plus particulièrement sur le sous-bassin du ruisseau Norton. Celles-ci s'approchent des simulations faites avec le réseau de stations au sol bien que des différences demeurent à l'exception des résultats pour la crue de printemps avec le MRCC piloté avec le CGCM où les débits et variabilités sont assez bien reproduits. Comme dans le cas du bassin de la rivière Ammer, l'échelle spatiale du bassin versant par rapport à la résolution du modèle peut être une source de différences bien que cette fois, les différentes caractéristiques topographiques sont mieux capturées que sur le Ammer. De même, les versions du MRCC et du CGCM sont les plus à jour.

En mode projection sous le scénario de climat futur utilisé, deux cas ont été retenus, soit les sorties du MRCC piloté par le CGCM et la méthode des « deltas ». Sur le bassin de la rivière Ammer, même si elles produisent des résultats numériquement différents, les deux approches utilisées conduisent, relativement à leur propre simulation en période de référence, à des conclusions similaires. Ces conclusions sont une diminution du volume de la crue printanière, une diminution de l'écoulement annuel et une diminution de la variabilité d'une année à l'autre.

Pour le bassin du ruisseau Norton et la simulation de la période future avec les données du MRCC alimenté par le CGCM, les résultats indiquent que les étiages estivaux seront plus



sévères. Les débits hivernaux seront plus importants en raison du temps plus doux qui limite l'accumulation de neige au sol et la variabilité augmentera légèrement durant la période de novembre à février, puis diminuera le reste de l'année. Ces résultats sont similaires avec ceux de la méthode des deltas qui prédit notamment une crue printanière devancée et une variabilité qui pourrait augmenter pour les mois de janvier, février et mars.

Une étude antérieure, réalisée par le CEHQ sur le bassin du ruisseau Norton à l'aide de modèles climatiques globaux et de la méthode des deltas avait permis de prédire que les besoins en irrigation sur le bassin versant du ruisseau Norton, principalement dus aux cultures maraîchères, seraient en augmentation dans une proportion variant entre 10 % et 20 % pour l'horizon 2050 par rapport aux besoins évalués pour l'historique 1961-1990. Dans le cadre du présent projet, la même évaluation a été tentée à partir des données du MRCC piloté par le CGCM3 pour la période de référence et pour la période future. Selon cette situation, les besoins en irrigation pourraient augmenter de 33 % annuellement par rapport à la période historique. Les besoins supplémentaires auraient lieu surtout au mois de juillet, où les augmentations pourraient atteindre 45 %. Cette importante augmentation durant ce mois s'explique par le fait que les températures sont les plus élevées et que les précipitations baisseront légèrement.

Finalement, concernant la contribution additionnelle du CEHQ au projet de collaboration entre le consortium Ouranos et l'université Ludwig Maximilian de Munich, mentionnons que celle-ci consiste notamment à travailler à un second bloc de travail du projet de collaboration. Ce dernier bloc vise le développement d'une vision conceptuelle touchant la planification de mesures d'adaptation aux effets des changements climatiques par le biais de la gestion intégrée de l'eau par bassin versant.

Plus particulièrement, le travail consiste à établir les bases de deux axes d'application en ce sens et qui seraient réalisables sur un horizon d'environ trois ans.

Le premier de ceux-ci, appliqué au bassin versant de la rivière des Outaouais, a été proposé par le CEHQ qui, compte tenu de son expertise en matière de gestion opérationnelle, a proposé une étude reliée à la gestion quantitative de l'eau par bassin versant dans un contexte d'usages multiples des ressources hydriques. Il a, pour ce faire, identifié le système hydrique de la rivière des Outaouais et de l'archipel de Montréal en considérant spécifiquement une des problématiques de gestion rattachée à ce système, soit celle du soutien des étiages.

Le second projet, proposé par Ouranos et appuyé par le CEHQ et le Centre Brace de l'Université McGill, concerne le bassin versant de la rivière Châteauguay. Il porte sur la gestion de la qualité et de la quantité de l'eau en milieu agricole via l'utilisation d'aires de rétention multifonctionnelles et de leur potentiel comme mesures d'adaptation aux changements climatiques applicables à l'échelle du bassin versant.



Références

Fortin, L.G., Turcotte, R., Pugin, S., Cyr, J.F., Picard, F, (2007). Impact des changements climatiques sur les plans de gestion des réservoirs Saint-François et Aylmer au sud du Québec. Revue canadienne de génie civil. 34(8), 934-945.

Martz, L.W., Garbrecht, J.(1992). Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models, Computers & Geosciences, 18(6), 747-761.

Pugin, S., Cyr, J.F., Fortin, L.G., Turcotte, R. (2005). Une approche par bassin versant pour évaluer l'impact des changements climatiques et la capacité d'adaptation - Développements méthodologiques pour un bassin agricole du Québec méridional. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. Rapport technique.

Turcotte, R., Fortin, J.P., Rousseau, A.N., Massicotte, S., Villeneuve, J.P. (2001) Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. Journal of Hydrology. 240(3-4), pp. 232-249.

Annexe A

Figures des débits et de la climatologie sur tout le bassin versant de la rivière Châteauguay

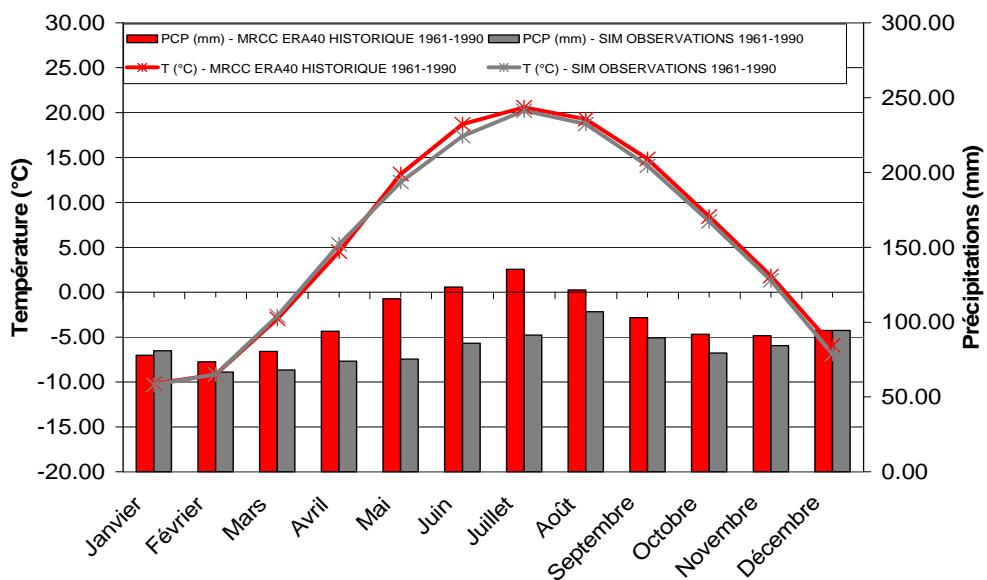


Figure A1 : Bassin versant de la rivière Châteauguay : Comparaison entre les moyennes mensuelles des données climatologiques de la période de référence pour les observations et pour le MRCC piloté par les réanalyses ERA40

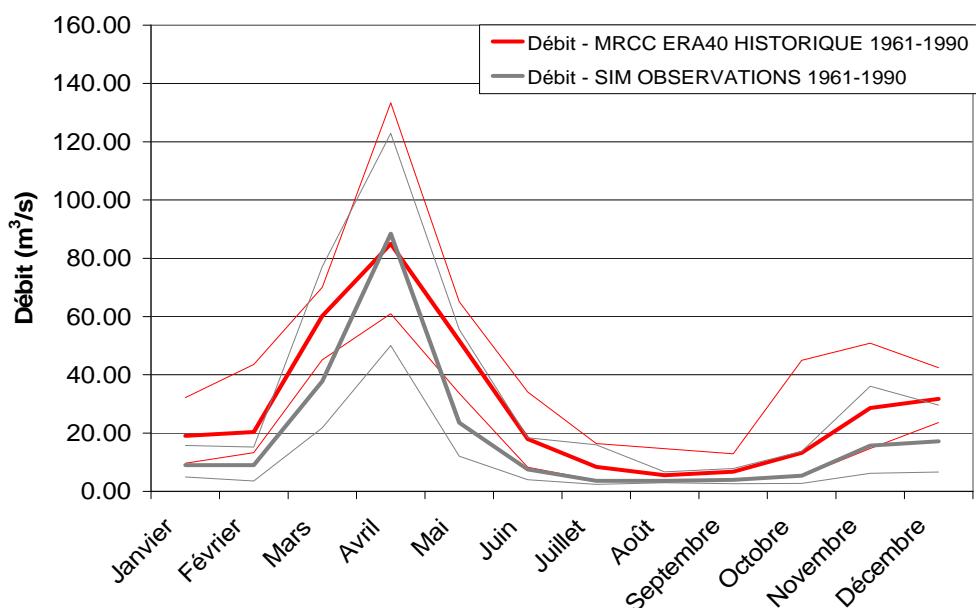


Figure A2 : Bassin versant de la rivière Châteauguay : Comparaison entre les débits médians mensuels simulés pour la période historique avec Hydrotel piloté par les observations puis par les sorties directes du MRCC, piloté lui-même par les réanalyses ERA40. L'espace interquartile est représenté par les traits fins.

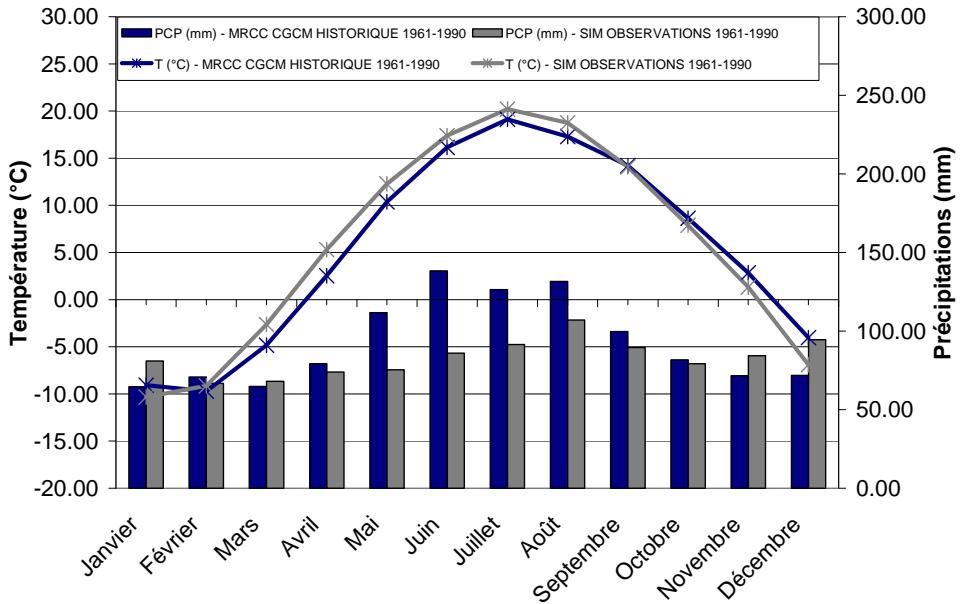


Figure A3 : Bassin versant de la rivière Châteauguay : Comparaison entre les moyennes mensuelles des données climatologiques de la période de référence pour les observations et pour le MRCC piloté par le MCG CGCM.

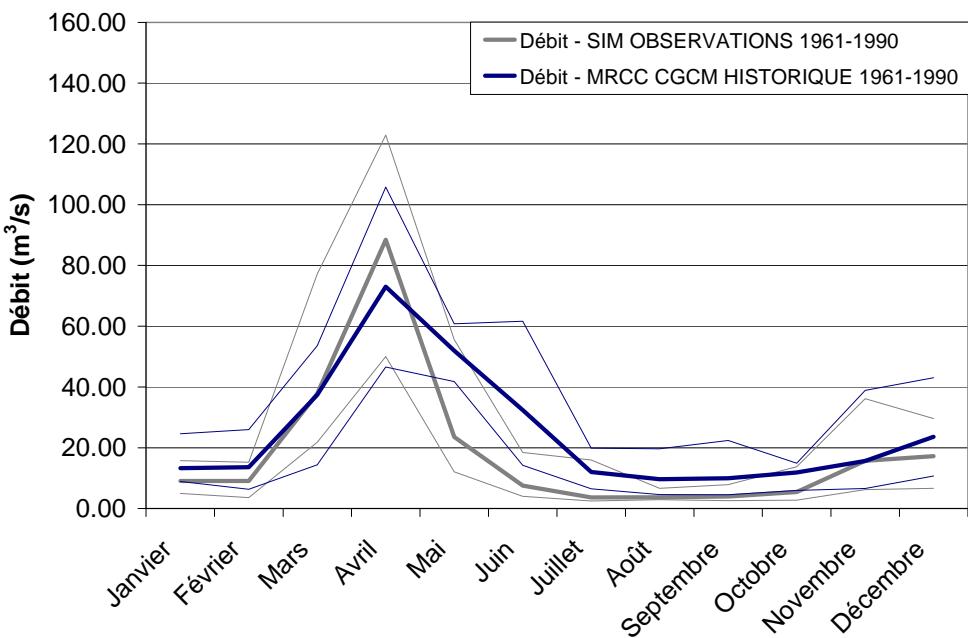


Figure A4 : Bassin versant du ruisseau Norton : Comparaison entre les débits médians simulés pour la période historique avec Hydrotel piloté par les observations puis par les sorties directes du MRCC, piloté lui-même par le MCG CGCM. L'espace interquartile est représenté par les traits fins.

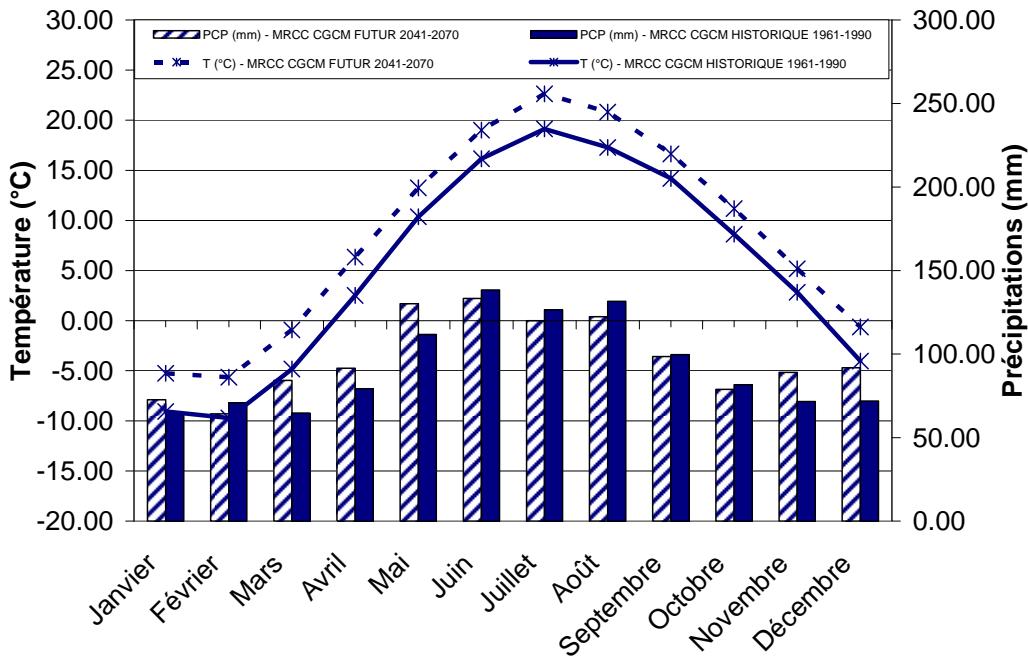


Figure A5 : Bassin versant de la rivière Châteauguay : Comparaison entre les moyennes mensuelles des données climatologiques de la période de référence et la période future pour le MRCC piloté par le MCG CGCM.

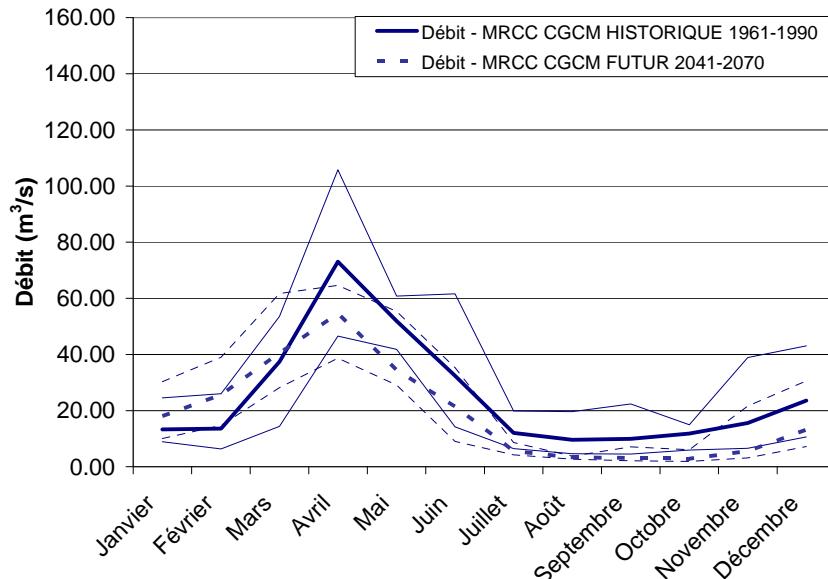


Figure A6 : Bassin versant de la rivière Châteauguay : Comparaison entre les débits médians simulés pour la période historique et future avec Hydrotel piloté par les sorties directes du MRCC, piloté lui-même par le MCG CGCM. L'espace interquartile est représenté par les traits fins.

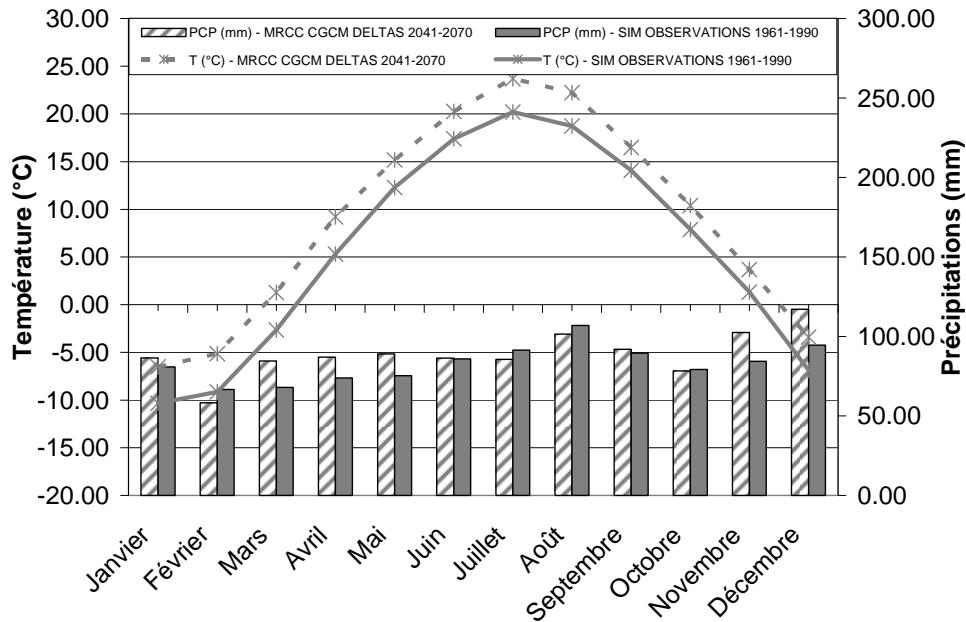


Figure A7: Bassin versant de la rivière Châteauguay : Comparaison entre les moyennes mensuelles des données climatologiques de la période de référence (observations) et la période future (observations modifiées par les deltas calculés entre la période de référence et la période future pour le MRCC piloté par le MCG CGC).

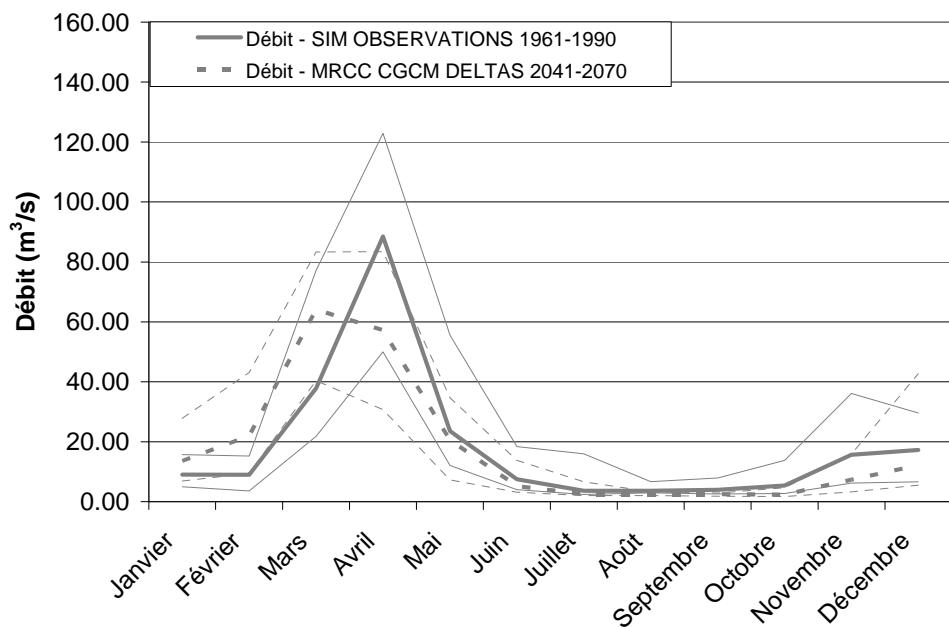


Figure A8 : Bassin versant de la rivière Châteauguay : Comparaison entre les débits médians simulés pour la période historique et future avec Hydrotel piloté par les observations et les observations modifiées par la méthode des deltas calculés sur les valeurs du MRCC piloté par le MCG CGCM. L'espace interquartile est représenté par les traits fins.

Annexe B

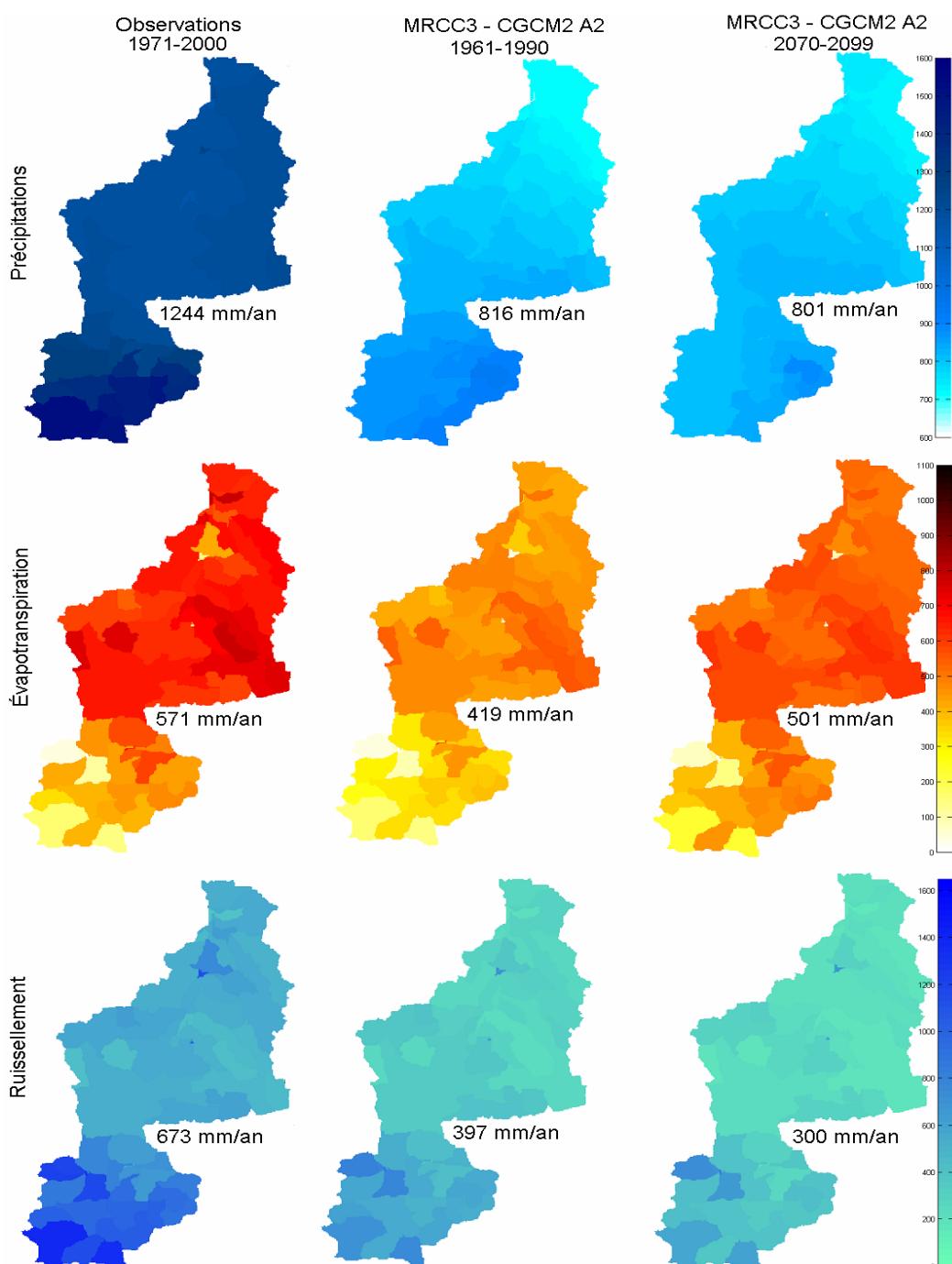


Figure B1 : Cartes des précipitations, de l'évapotranspiration et du ruissellement annuel tel que simulé dans Hydrotel pour le bassin versant de la rivière Ammer.

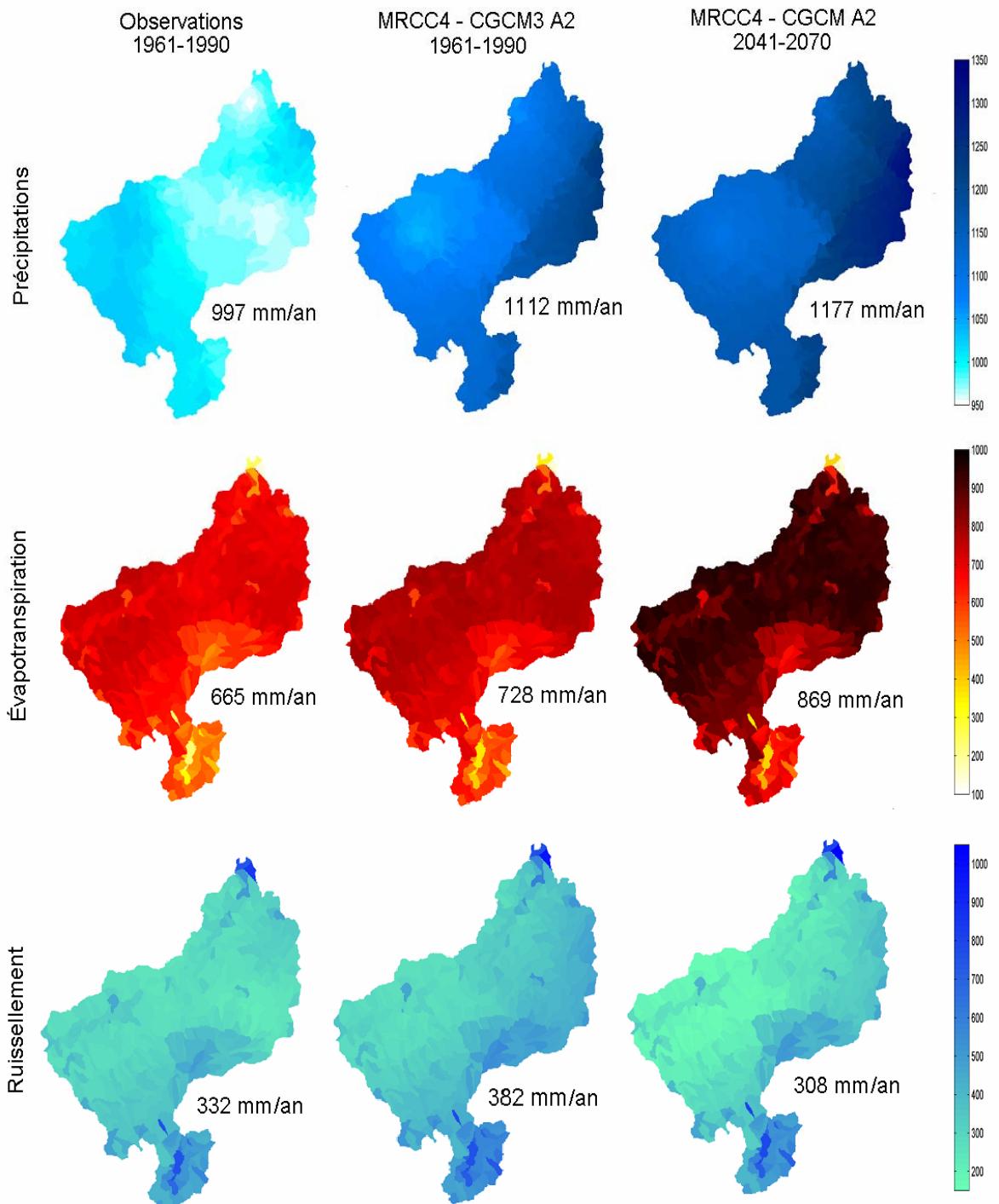


Figure B2 : Cartes des précipitations, de l'évapotranspiration et du ruissellement annuel tel que simulé dans Hydrotel pour le bassin versant de la rivière Châteauguay.

Annexe C

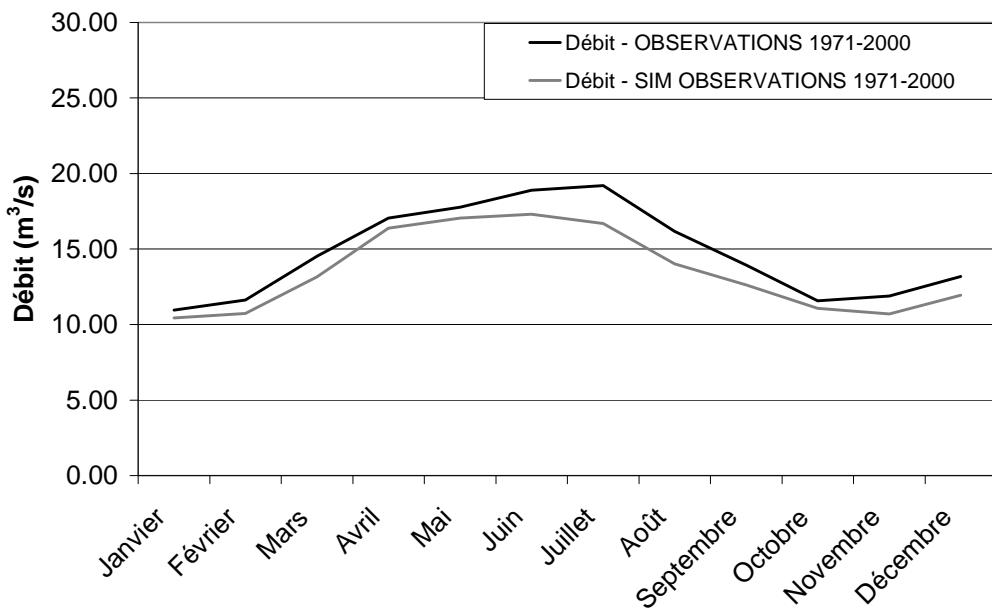


Figure C1 : Comparaison entre les débits mensuels moyens observés et modélisés avec Hydrotel pour la rivière Ammer.

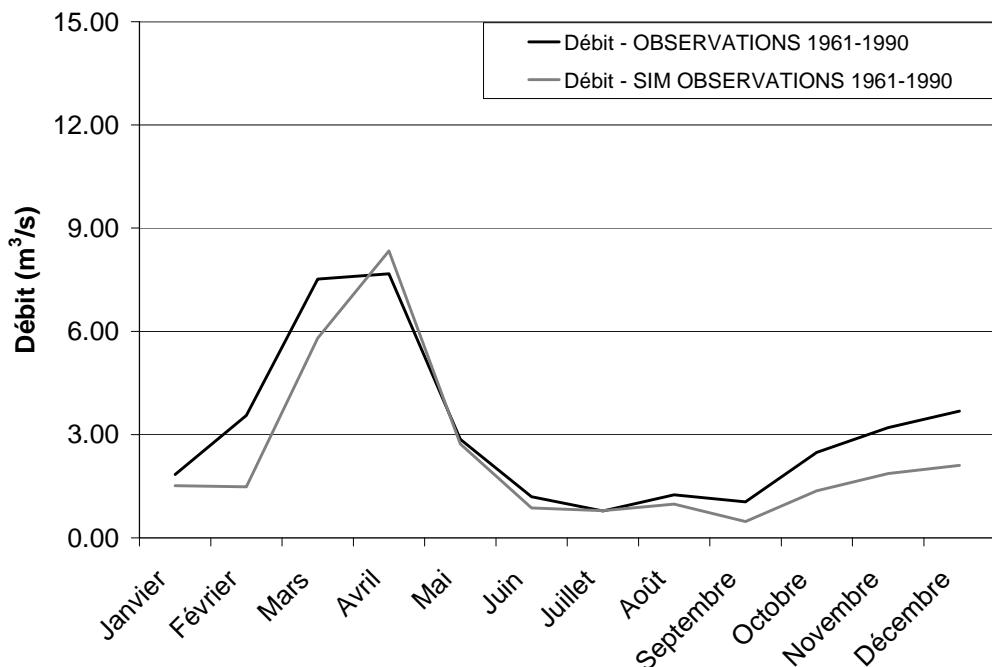


Figure C2 : Comparaison entre les débits mensuels moyens observés et modélisés avec Hydrotel pour le ruisseau Norton

Annexe 2. Présentations et Publications résultants du projet

Posters présentés lors du second Symposium d'Ouranos en novembre 2006



Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques



Un Web GIS pour la gestion des données et l'implication des intervenants en support à la recherche intégrée sur les changements globaux et les ressources en eau

Ingo May¹, Luc Verboom²
¹Universität Ludwig-Maximilians-Universität
²Université de Montréal, Québec, Canada

Context

Pour une gestion durable de l'eau, l'évaluation des impacts des changements globaux sur la ressource revêt une importance capitale. Le développement de stratégies d'adaptation adéquates passe par une connaissance fine des processus naturels et anthropiques, de leurs liens de causalité et de rétroaction qui sont très bien représentés par l'intermédiaire d'outils de simulation complexes. Ces outils nécessitent de nombreuses données d'entrée et produisent notamment de résultats dont la gestion, la présentation et l'interprétation sont toujours confrontées aux limites de l'objectivité et de l'impartialité (Sect.).

De ce contexte, l'utilisation des SIG sur deux objectifs : (1) la préparation des données pour des besoins scientifiques de modélisation et (2) une présentation transparente des données et des résultats modélisés pour une meilleure compréhension, par les intervenants et les usagers, des processus complexes. Ainsi, l'organisation et la mise à disposition conviviale des informations peuvent également aider la gestion des risques.

L'application WebGIS est un moyen très attractif qui offre aux chercheurs et aux usagers de différents domaines d'interventions la possibilité d'accéder facilement à l'information géofermée via Internet. Son développement passe par des interfaces adaptées et structurées qui doivent répondre aux besoins du charon (chercheurs/analystes). Une utilisation dingue de cet outil permet un échange des connaissances et des intérêts, encourage la collaboration interdisciplinaire et facilite la mise en place de stratégies intégrées de gestion des ressources.

Une application concrète du Web CIS sera développée dans le cadre du projet conjoint entre Curionus et l'Université de Munich qui sur la gestion intégrée de bassins versants dans un contexte de changements globaux et climatiques. Duré un premier temps, l'application Web CIS permettra de visualiser et de comparer les bascins versants de la Châtaraigouze et de l'Anne, ainsi que de présenter les résultats provenant de modélisations hydrologique. Elle offrira donc la possibilité d'informer les intervenants en leur permettant de suivre l'état d'avancement des travaux et d'interagir activement au cas échéant.

L'application WEB-GIS

L3 technologie Web-GIS

Le logiciel CIS choisi est celui de la compagnie Mapinfo. L'application WEB associée choisie est Push'n see qui est développée par la compagnie Korem. Le choix de la technologie utilisée répond aux critères suivants :

- Avec l'implémentation d'un système de gestion de la qualité, les compagnies peuvent améliorer leur performance et répondre plus efficacement aux besoins de leurs clients.

 - a. Le GIS et son application WFR sont développés par la même compagnie.
 - b. La compagnie assure un support technique de haute qualité et à long terme.
 - c. Le logiciel permet une cartographie interactive pour diffuser des données.
 - d. Le logiciel commercial utilisé est ouvert et ses formats suivent de normes reconnues.
 - e. Le logiciel peut interroger plusieurs bases de données différentes à travers un langage universel de requête tel SQL

I. Le GIS choisit rapidement et de manière conviviale à des objectifs plus spécifiques selon une approche modulaire.

<http://www.stylusbooks.com>

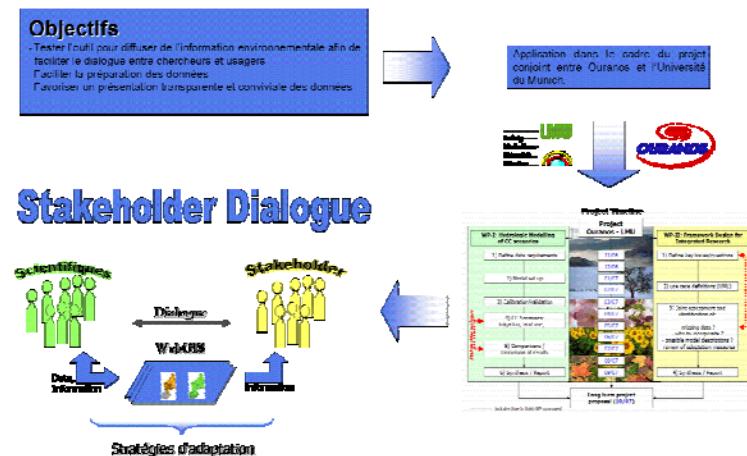
- L'architecture du systemic est relativement simple et bon marché. Elle repose sur une technologie libre et intégrée.
 - Linux (système d'exploitation), Apache (serveur Web) et MySQL (serveur base de données).
 - Développé dans un premier temps pour diffuser des métadonnées (figure ci dessous), l'outil (Vescov 2005) sera à diffuser les données homogénéisées résultant d'un projet interne à Ouranos.



Objectifs

- Tester l'outil pour diffuser de l'information environnementale, afin de faciliter le dialogue entre chercheurs et usagers
 - Faciliter la préparation des données
 - Favoriser un présentation transparente et conviviale des données

Application dans le cadre du projet conjoint entre Ouranos et l'Université de Munich.



Premiers Résultats

- Créeation d'un workspace pour le bassin versant de la Châteauguay.
 - Stockage et diffusion de données diverses du bassin.

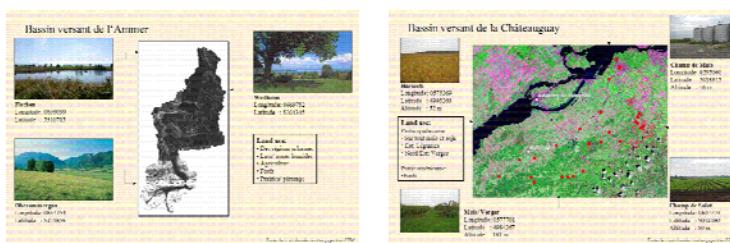


Prochaines Étapes

- Créeation d'un workspace pour le bassin versant de l'Ammer
 - Préparation et présentation des données dans ces workspaces
 - Tester l'utilisation de la technologie de GOI API sur le bassin de la rivière Chateauguay (Kenops, 2005; Rivest et al. 2005)
 - Développement d'une page web incluant les workspaces



[View recommendations](#) [Write a review](#) [Enter location](#)





Présentations à l'EGU à Vienne (Avril 2007 et 2008)

Integrative watershed management under climate change conditions - A comparison of major issues, research methods and problem solving strategies in Quebec and Bavaria

L. Vescovi (1), A. Musy (1), R. Roy (1,2), R. Turcotte (3), J.F. Cyr (3), M. Braun (4), W. Mauser (4), R. Ludwig (5)

(1) Ouranos Consortium Montréal, Québec, Canada (vescovi.luc@ouranos.ca, +1-514-282-7131), (2) Hydro-Québec, Montreal, Canada, (3) Centre Expertise Hydrologique du Québec, Quebec City, Canada, (4) Department of Geography, University of Munich, Germany, (5) Department of Geography, University of Kiel, Germany

Climate change is in progress and affects many economic, social and ecological developments on various temporal and spatial scales and patterns. Reliable assessment of the potential CC-impacts is necessary on a regional level to develop suitable adaptation strategies to minimize adverse effects and to optimize possible benefits. The poster presents the recently launched joint research initiative between the Consortium Ouranos (Quebec, Canada) and the University of Munich (Bavaria, Germany), conjointly funded by the Quebec Ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation (MDEIE) and the Bavarian Ministry of the Environment. The study is intended to:

- (a) compare key issues and technologies in assessing natural and socio-economic impacts of regional climate change
- (b) identify issues and working fields for scientific and technical exchange of core competences
- (c) evaluate the possibilities for coupling existing modelling techniques for integrative water resources management
- (d) perform the required adaptations of modelling systems to the hydrologic and socio-economic conditions (land use, industry, etc)

The work flow is divided in two parallel working packages:

WP-1: Integrated hydro-meteorologic modelling in selected test-areas in Quebec and Bavaria

WP-2: Conceptualization and design of a framework and network for integrated global change research

The study shall provide the basis for a long-term collaboration in research and development of integrative watershed management tools. These shall be based on simulation models to retrieve optimized adaptation strategies and decision alternatives for a sustainable utilization of natural resources under conditions of global and climate change. The strategies for a concise science-stakeholder-dialogue are emphasized and preliminary hydrological modelling results of two tested sites (Chateauguay, Ammer) will be presented.



Climate change sciences in support of vulnerability, impact and adaptation activities in Quebec, Canada

Luc Vescovi (1), René Roy (2-1) and André Musy (1)

(1) Ouranos Consortium Montréal, Québec, Canada (vescovi.luc@ouranos.ca,
+1-514-282-7131), (2) Hydro-Québec, Montreal, Canada,

Reducing the adverse impacts of climate change requires both adaptation and mitigation efforts. An adaptation strategy implies an estimate of biophysical vulnerability (i.e. of climate hazard combined to social vulnerability). Adaptive measures require time to put into place. If postponed, some options may be lost for ever. Regional and institutional adaptation actions should be anticipatory and planned so as to minimize costs and optimize profitability.

In Canada, Ouranos a consortium in climatology and adaptation to climate change was launched by the Government of Québec, Hydro-Québec and the Meteorological Service of Canada. Québec's decision makers have identified Vulnerability and Impacts assessment and the study Adaptation strategies (VI&A) as a priority and are supporting Ouranos' scientific research programs to this end. More than nine ministries and agencies of Québec are collaborating with four universities. The aim is to develop a structure for analysis and to promote synergistic work in the search for solutions to climate change adaptation issues in a North American context. Ouranos has developed several tools to support VI&A assessment and analysis. These include the Canadian Regional Climate Model, (regional) and climate change scenarios. By working at a regional scale and enabling direct links between various developers of impact and adaptation strategies, Ouranos provides a unique opportunity for innovative multidisciplinary and multi-organisational dialogue.

This presentation aims to show how the science developed at Ouranos is being transferred into practice. Concrete examples taken from Ouranos' ongoing VI&A projects will be discussed. A specific emphasis will address integrated watershed management projects in southern Quebec and discuss a recently launched joint research initiative

between Ouranos and the University of Munich (conjointly funded by the Québec ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation (MDEIE) and the Bavarian Ministry of the Environment). This project intends to identify commonalities and differences in assessing regional consequences of climate and global change and developing innovative adaptive strategies. Furthermore, it aims to investigate the opportunities to couple the core competences to add value to the existing systems. Depending on positive outcome, we expect to prepare a larger joint project for the development of an integrative modeling system for the sustainable management of water resources under climate change conditions.



Geophysical Research Abstracts,
Vol. 10, EGU2008-A-09783, 2008
SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-09783
EGU General Assembly 2008
© Author(s) 2008



Climate Change Study on the Châteauguay River Watershed: Lessons Learned from a Multi Model Experiment

L. Vescovi (1), J.-F. Cyr (2), R. Turcotte (2), L.-G. Fortin (2), D. Chaumont (1), R. Ludwig (3), L. M. Braun (3), I. May (3).

(1) Consortium Ouranos, Montréal, Canada, (2) Centre d'Expertise Hydrique du Québec, Québec, Canada (3) Department of Geography, University of Munich, Germany (Vescovi.luc@ouranos.ca/ fax: +1 514 282 7131).

Climate change (CC) is in progress and affects many economic, social and ecological developments. In Southern Québec Yagouti et. al (2007) show that the surface air temperature has increased over 1960-2005 and that this warming is significantly evident in the western, southern and central parts of the province. In the summer significant increasing temperature trends are found and precipitation indices indicate decreasing trends. Climate change scenarios produced at Ouranos show that in the future summer temperature shall increase while no significant change are obtained on precipitation amount. This could lead to dramatic consequences on water budget. Thus, reliable assessment of the potential CC-impacts is necessary on a regional level to develop suitable adaptation strategies to minimize adverse effects and to optimize possible benefits on water management issues. One of these issues, that is discussed in that paper, concerns increasing agriculture water requirements under stressed water conditions to optimize possible benefit.

The scope of the study is to investigate how a hydro-climatological modelling exercise could be used to assess specific water issues in a southern Québec watershed: the Châteauguay watershed. Thus, it aims to look at different model responses regarding summer water shortages and irrigation needs and to stimulate water authorities and managers thoughts about climate change adaptive planning options. The methodologies developed in this study involve (1) the use a regional climate model providing climate information that is subsequently incorporated as forcing input (a) to two hydrological models (HydroTEL (Fortin et al. 2001) and Promet (Mauser 2000) and (b) to the FAO irrigation model (Allen et al. 1998); (2) an assessment of climate change uncertainties via a sensibility analysis performed by using different climate scenarios techniques (delta from different GCMs vs direct RCM output).

Irregardless of the different climate scenarios techniques and the hydrological model used, results show that under 2050 climate change scenarios summer flows are projected to decrease while irrigation need might increase dramatically. Therefore, the lesson learned stemming from this modelling exercise reinforces the principle of forward thinking adaptive watershed management strategies (in this case irrigation) and also shows that before proposing any adaptive solution the issue needs to be assessed scientifically (in terms of water budget) as well as socio-economically thus respecting the multi-use and integrated watershed management contexts in southern Quebec.

Manuscrits en préparation

#1 Hydrological modelling oriented (WP1)

Working Title: The Role of Hydrologic Model Complexity in Climate Change Scenario Analysis

Responsible: R. Ludwig

Objective: Demonstrate the differences observed when using DANUBIA-light and Hydrotel with the same inputs, where and why they behave similar or different. Quantify and qualify uncertainties due to model concepts.

Key words: catchment hydrology, model complexity and uncertainty, PROMET, Hydrotel, Climate Change Scenarios,...

Option: Add HSAMI or MOHYSE modelisation, if Isabelle does the job; else CEHQ may do it.

Introduction: Project context, LMU-Ouranos collaboration, climate change impact on hydrological watershed response, key hypothesis, model concepts and complexity

Case Study: watershed description, datasets, modeling framework (MRCC linked to Hydro-Models)

Model Concepts: short!, refer to publications, stress differences (application purpose, data preparation/interpretation, process descriptions), scale (data model: raster vs UHRH, timestep)

Intercomparison of Results: calibration/validation using observation data, not a valid projection of future catchment hydrology!, compare indicators (average daily streamflow in the modeled period, flood frequency, low flow frequency, streamflow at outlet, NM7Q...)

Discussion of Results: Wrap up complexity of models, relate results to model complexity,

Conclusion: Implication of results, usability of certain models under certain conditions, lessons learned

#2 Climate Change Application (WP1)

**Working Title: Climate Change Study on the Châteauguay River Watershed:
Lessons Learned from a Multi Model Experiment**

Responsible: L. Vescovi

Objective: Evaluation and Analysis of the Sequence from Climate Modelling via Hydrological Modelling to Impact Assessment and Adaptation (topic: Irrigation)

Key words: climate change, model complexity, model application, PROMET, Hydrotel, CRCM, impact and adaptation, irrigation, watershed management

Introduction: climate change context, impact and adaptation, multiple hydrological models, MRCC, objective, model complexity vs application

Hydrological model descriptions: only differences

Comparison of results: [PROMET, Hydrotel, CRCM]

- maps (P, AET, R) (>Châteauguay outlet)



- graphs (streamflows) (>Châteauguay outlet)

Application in irrigation: > Norton River Watershed

Conclusion:

- management context for adaptation
- conclusion about complexity, data, robustness

#3: Framework Layout (WP2)

Working Title: Framework Design for an Integrated Watershed Model Under Climate Change Conditions

Responsible: M. Braun

Objective: Description of our Process for the development of an application oriented integrated watershed model by consideration of stakeholder requirements and interests; Discussion of Necessities and Benefits of the next generation of watershed management tools.

Key words: Case studies, UML use cases, framework, integrated watershed model, software development,

Introduction: LMU-Ouranos collaboration background, climate change context, key issues, the role of modelling in integrated watershed research, integrated research (GLOWA-Danube), stakeholder involvement,

Definition of Key Issues:

Context of watershed management under Climate Change Conditions: Case studies: Ottawa-Mille Îles, Châteauguay, Bavaria???, need for diagnostic watershed tools, integrated watershed models: state of the art (GLOWA experience)

Layout of our Integrated Watershed Model: conception of our IWM (onion model, stressing of stakeholder involvement), use of UML industry standard, Modules identified, role of interfaces

Use Cases of our Integrated Watershed Model: Why use cases? Use Cases of an IWM for the case studies, Lessons learned from elaboration of use cases,

Challenges for IWM: Communication of necessity/awareness of IWM, data provision, technical constraints, complexity of models (uncertainty and the usual suspects), user interface,

Chances of the proposed framework for integrated watershed management: capacities (experts around the table, communication), stakeholder involvement (use cases, key issues), decision support for adaptation strategies, assessment of CC impacts,

Conclusion:



Annexe 3. Interfaces Usagers

http://www2.ouranos.ca:8090/pushnsee_4.7.1/ui/custom/demos/ouranos_demo/aqagiamm.jsp
usr :ouranos; pwd :pns2000

Les deux espaces de travail ci-dessous ont été réalisés dans le cadre du stage d'Inga May. L'objectif principal était de montrer via la technologie web-GIS utilisée à Ouranos les deux sites d'études.

Figure A3-1 Espace de travail du bassin de la Chateauguay dans le web-GIS d'Ouranos

The screenshot shows a Microsoft Internet Explorer window displaying a web-based Geographic Information System (GIS) application. The title bar reads "AQAGI - Windows Internet Explorer". The address bar shows the URL "http://www2.ouranos.ca:8090/pushnsee_4.7.1/ui/custom/demos/ouranos_demo/aqagiamm.jsp". The page content is in French and includes the following elements:

- Header:** Features the OURANOS logo and navigation links: Accueil, Menu principal, Plan du site, Pour nous joindre, English.
- Breadcrumbs:** Bassin versant de l'Ammer > Bassin versant de la Chateauguay.
- Information sur le projet:** A section providing project details, including the responsible parties (Luc Vescovi, Ouranos; Inga May, LMU) and a note about viewing data by entering a password.
- Documents joints:** A section stating "Aucun document attaché; disponible."
- Carte du bassin:** A map of the Chateauguay basin, shaded in various green tones to represent different land use or elevation categories. A scale bar indicates 10 km. The word "Ouranos" is visible in the bottom right corner of the map area.
- Footer:** Includes a date (2005-10-31), a link to update the page (Mise à jour : 2005-11-11), and a link to obtain the password (Pour obtenir le mot de passe: webmestre@ouranos.ca).



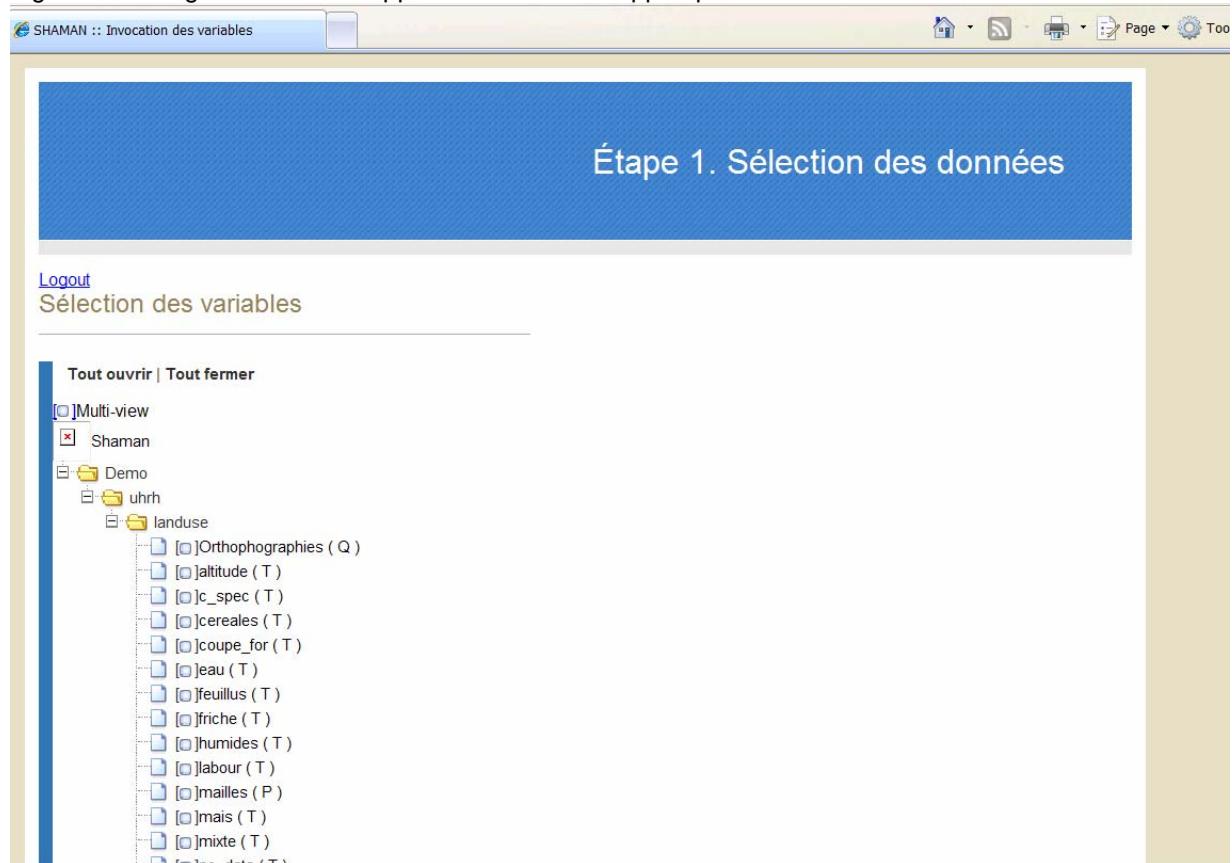
Figure A3-2 Espace de travail du bassin de la Ammer dans le web-GIS d'Ouranos

The screenshot shows a Microsoft Internet Explorer window displaying the Ouranos web-GIS interface. The title bar reads "AQAGI - Windows Internet Explorer". The address bar shows the URL "http://www2.ouranos.ca:8090/pushnsee_4.7.1/u/custom/demos/ouranos_demo/aqagamm.jsp". The menu bar includes "File", "Edit", "View", "Favorites", "Tools", and "Help". The toolbar includes "Envoyer", "PageRank", "Mes favoris", "Orthographe", "Traduire", "Envoyer à", "Paramètres", and "Google". The main content area has a header with "Accueil", "Menu principal", "Plan du site", "Pour nous joindre", and "English". Below this, there are two tabs: "Bassin versant de l'Ammer" (selected) and "Bassin versant de la Chateaugay". The left panel under "Information sur le projet" contains text about the project's purpose, responsible parties (Luc Vescovi, Ouranos; Inga May, LMU), and a link to obtain the password ("Pour obtenir le mot de passe: webmestre@ouranos.ca"). The right panel, titled "Carte du bassin", shows a map of the Ammer catchment area with various colored regions (green, yellow, blue) and a scale bar indicating 6 km. The bottom status bar shows the URL "javascript:if(document.layers) updateMap('http://www2.ouranos.ca:8090/pushnsee_4.7.1/u/custom/navigator/jsp/history/zoom1.do?m=1')". The taskbar at the bottom of the screen shows multiple open windows, including Microsoft Word, Internet Explorer, and Microsoft Visio.

<http://shaman.atlasduquebec.org> (utiliser firefox de préférence); login: ouranos ; pwd: 4rw36h97

L'espace de travail ci-dessous a été réalisé par une équipe de l'UQAM (département de géographie – groupe atlas) dans le but de tester une interface web simple permettant de modifier les caractéristiques géomorphologique d'un UHRH d'Hydrotel et ainsi formuler des scénarios d'utilisation du territoire.

Figure A3-3 Page d'entrée de l'application web développée par l'UQAM



The screenshot shows a web browser window titled "SHAMAN :: Invocation des variables". The main content area has a blue header bar with the text "Étape 1. Sélection des données". Below this, there is a "Logout" link and the title "Sélection des variables". On the left, a sidebar contains a tree view of data layers. The visible branches include "Multi-view", "Shaman", "Demo", "uhrh", "landuse", and several sub-categories under "landuse" such as "Orthophographies (Q)", "altitude (T)", "c_spec (T)", "cereales (T)", "coupe_for (T)", "jeau (T)", "feuillus (T)", "friche (T)", "humides (T)", "labour (T)", "mailles (P)", "mais (T)", "mixte (T)", and "lacs_dots (T)".

Figure A3-4 Visualisation des caractéristiques des UHRH dans l'application web développée par l'UQAM

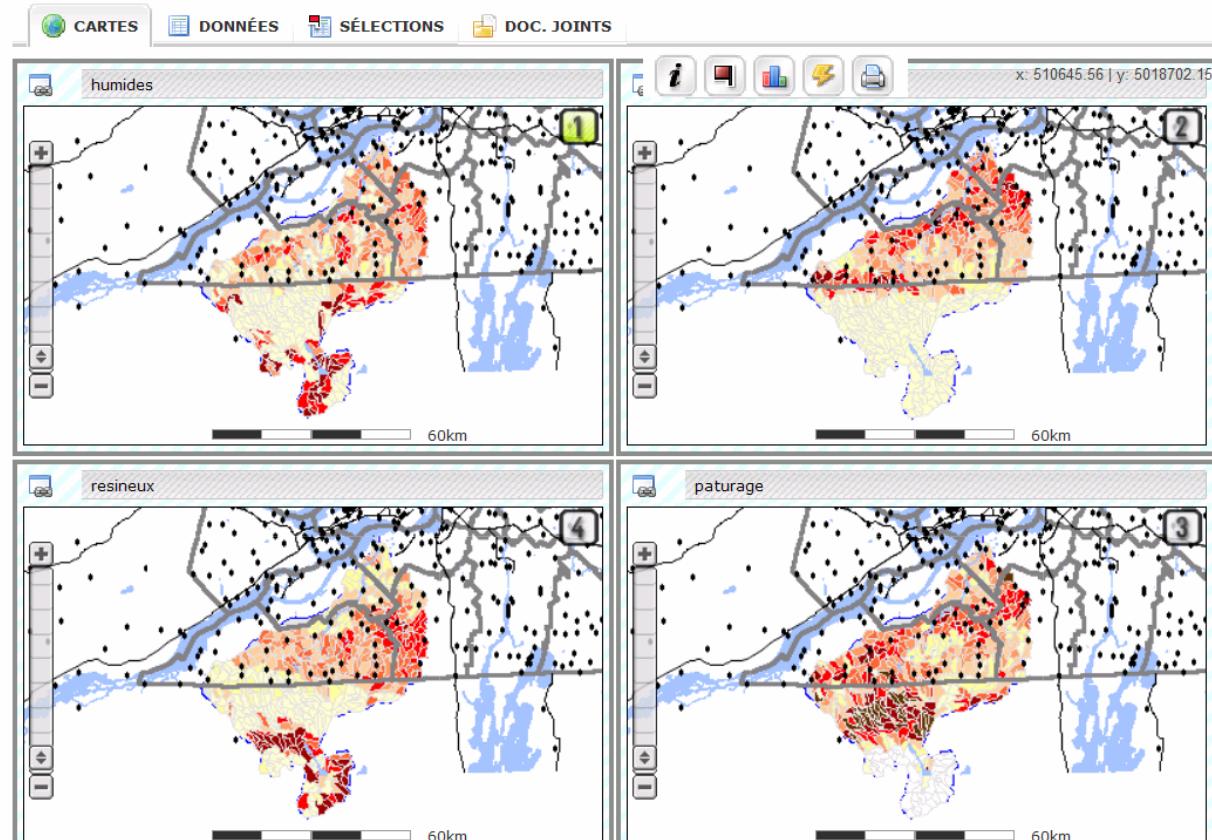
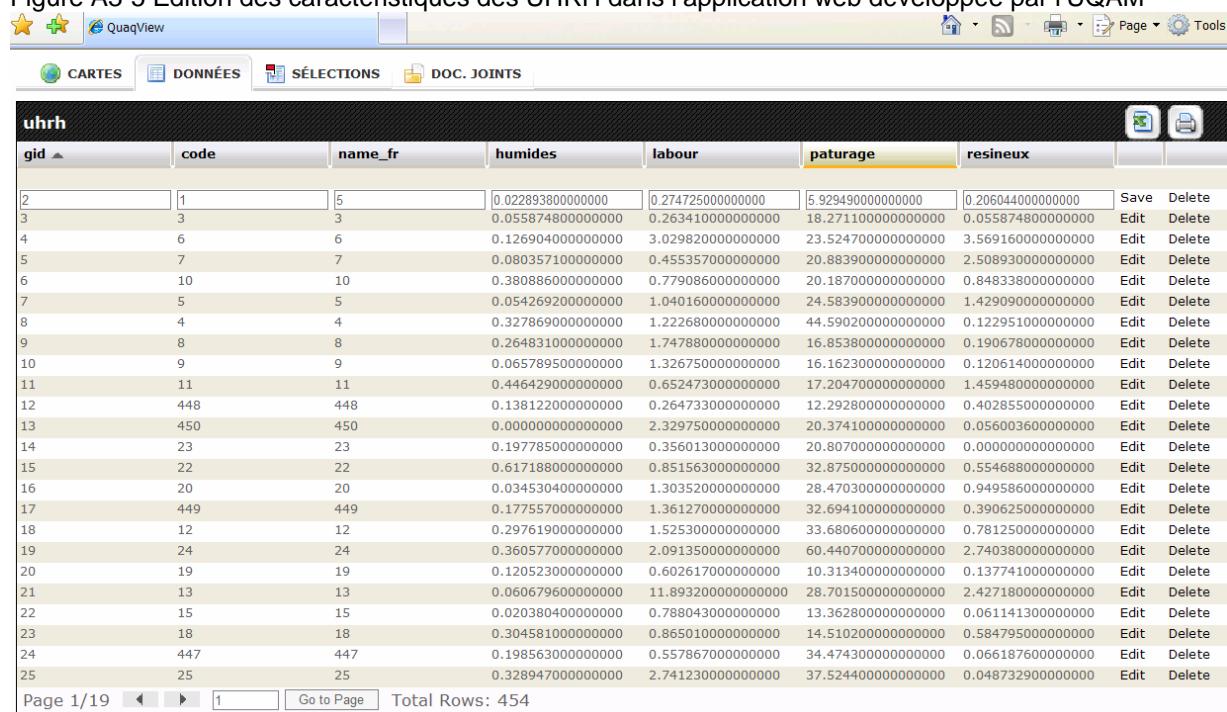


Figure A3-5 Édition des caractéristiques des UHRH dans l'application web développée par l'UQAM



The figure shows a screenshot of the QuaqView application interface, specifically the 'uhrr' table. The table lists various characteristics (gid, code, name_fr) and their corresponding values for four categories: humides, labour, paturage, and resineux. The 'paturage' column is highlighted in yellow. The table includes a header row and 25 data rows. At the bottom, there are navigation buttons for page 1/19 and a total row count of 454.

gid	code	name_fr	humides	labour	paturage	resineux	Save	Delete
2	1	5	0.0228938000000000	0.274725000000000	5.92949000000000	0.206044000000000	Edit	Delete
3	3	3	0.0558748000000000	0.263410000000000	18.27110000000000	0.0558748000000000	Edit	Delete
4	6	6	0.1269040000000000	3.02982000000000	23.52470000000000	3.56916000000000	Edit	Delete
5	7	7	0.0803571000000000	0.455357000000000	20.88390000000000	2.50893000000000	Edit	Delete
6	10	10	0.3808600000000000	0.779086000000000	20.18700000000000	0.848338000000000	Edit	Delete
7	5	5	0.0542692000000000	1.040160000000000	24.58390000000000	1.429090000000000	Edit	Delete
8	4	4	0.3278690000000000	1.222680000000000	44.59020000000000	0.122951000000000	Edit	Delete
9	8	8	0.2648310000000000	1.747880000000000	16.85380000000000	0.190678000000000	Edit	Delete
10	9	9	0.0657895000000000	1.326750000000000	16.16230000000000	0.120614000000000	Edit	Delete
11	11	11	0.4464290000000000	0.652473000000000	17.20470000000000	1.459480000000000	Edit	Delete
12	448	448	0.1381220000000000	0.264733000000000	12.29280000000000	0.402855000000000	Edit	Delete
13	450	450	0.0000000000000000	2.329750000000000	20.37410000000000	0.056003600000000	Edit	Delete
14	23	23	0.1977850000000000	0.356013000000000	20.80700000000000	0.000000000000000	Edit	Delete
15	22	22	0.6171880000000000	0.851563000000000	32.87500000000000	0.554688000000000	Edit	Delete
16	20	20	0.0345304000000000	1.303520000000000	28.47030000000000	0.949586000000000	Edit	Delete
17	449	449	0.1775570000000000	1.361270000000000	32.69410000000000	0.390625000000000	Edit	Delete
18	12	12	0.2976190000000000	1.525300000000000	33.68060000000000	0.781250000000000	Edit	Delete
19	24	24	0.3605770000000000	2.091350000000000	60.44070000000000	2.740380000000000	Edit	Delete
20	19	19	0.1205230000000000	0.602617000000000	10.31340000000000	0.137741000000000	Edit	Delete
21	13	13	0.0606796000000000	11.89320000000000	28.70150000000000	2.42718000000000	Edit	Delete
22	15	15	0.0203804000000000	0.788043000000000	13.36280000000000	0.061141300000000	Edit	Delete
23	18	18	0.3045810000000000	0.865010000000000	14.51020000000000	0.584795000000000	Edit	Delete
24	447	447	0.1985630000000000	0.557867000000000	34.47430000000000	0.066187600000000	Edit	Delete
25	25	25	0.3289470000000000	2.741230000000000	37.52440000000000	0.048732900000000	Edit	Delete

<http://132.203.82.191:8085/UHRH/> login: uhrh, pwd: uhrh

L'espace de travail ci-dessous a été réalisé par une équipe de l'Université Laval (Chaire de recherche industrielle en BD géospatiales décisionnelles- Centre de recherche en géomatique) dans le même but que précédemment de tester une interface web simple permettant de modifier les caractéristiques géomorphologique d'un UHRH d'Hydrotel. Dans ce cas des cubes dans le SOLAP ont été élaborés.

Figure A.3-6. Pourcentage de résineux (carte = au niveau des UHRH, tableau = pour 3 régions spécifiques)

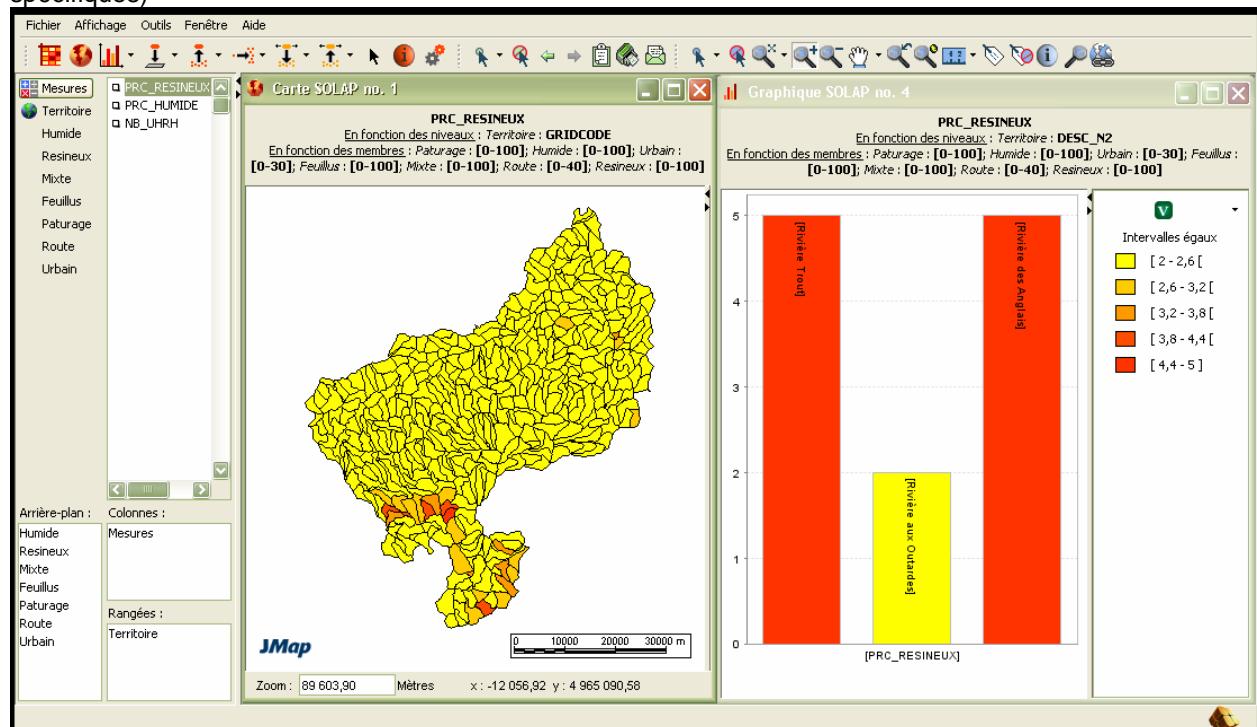


Figure A 3-7. Analyse du nombre d'UHRH par région en fonction du % de territoire MIXTE.

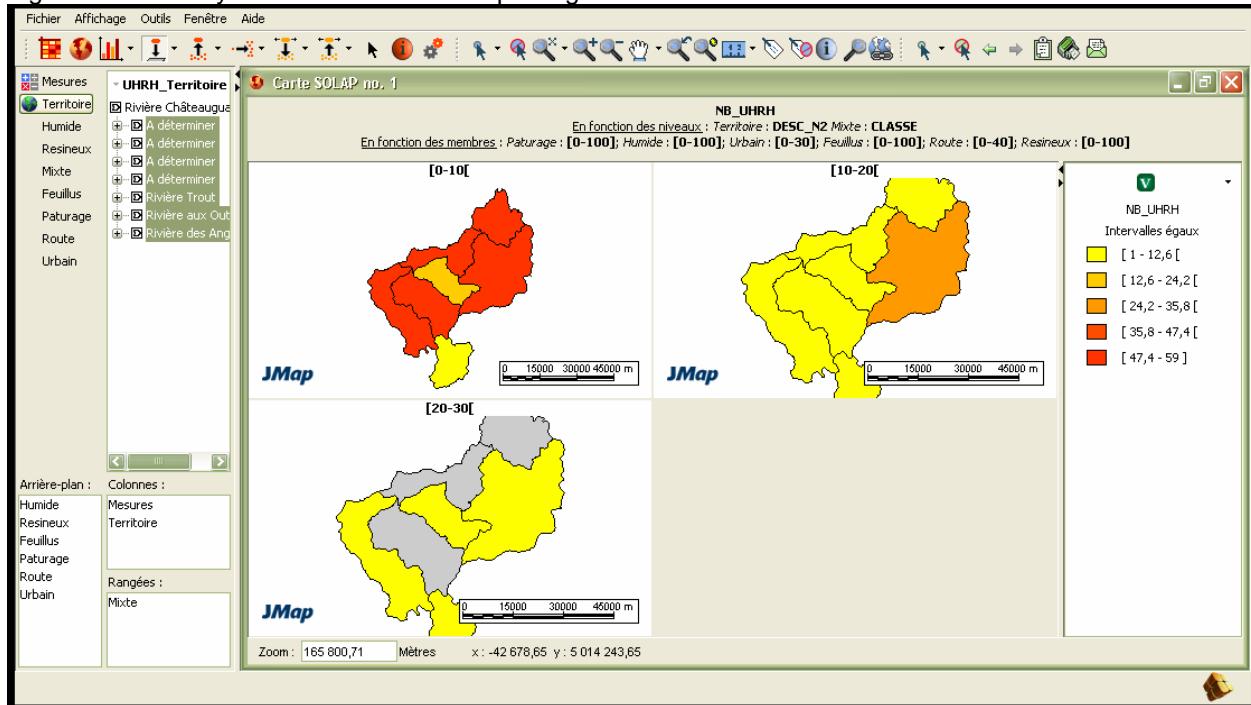
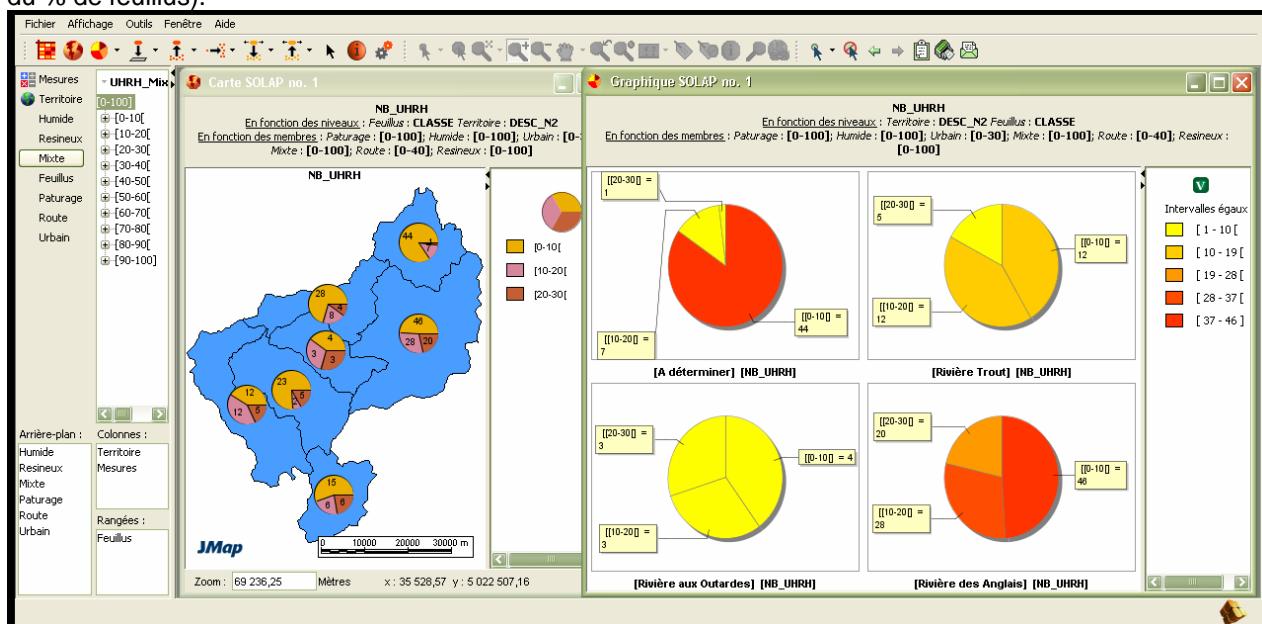


Figure A 3-8. Analyse du nombre de UHRH par Région en fonction du % du territoire FEUILLUS (mode cartographique : chaque pointe de tarte représente le nombre d'UHRH par classe de % de la région sur laquelle le camembert est superposé, mode graphique : un camembert par région, découpé en fonction du % de feuillus).





Consortium sur la climatologie régionale
et l'adaptation aux changements climatiques

Annexe 4. Rapport final de LMU

Integrative Einzugsgebietsmodellierung im Kontext des Klimawandels - Vergleich und An- passung von Techniken aus Quebec und Bayern



Abschlußbericht zur Pilotstudie

**Prof. Dr. Ralf Ludwig
Dr. Marco Braun**

März 2008

Inhalt

Inhalt.....	2	
1	Zusammenfassung des Projekts: Integrative Einzugsgebietsmodellierung im Kontext des Klimawandels – Vergleich von Problemstellungen, Forschungsansätzen und Lösungstechniken aus Quebec und Bayern (GLOWA-Ouranos)	4
1.1	Gesamtziele von GLOWA-Ouranos	4
1.2	Motivation des Projekts.....	5
1.3	Ziele der Pilotstudie	6
1.4	Bewilligte Mittel	8
1.5	Personelles.....	8
1.6	Meetings im Projektzeitraum	8
1.7	Publikationen.....	9
2	Workpackage I: Hydrologische Modellierung von Klimawandel-Szenarien in den Einzugsgebieten von Châteauguay River und Ammer	12
2.1	Die Untersuchungsgebiete.....	12
2.1.1	Ammer.....	12
2.1.2	Châteauguay	13
2.2	Datenbeschaffung.....	14
2.2.1	Ammer.....	14
2.2.2	Châteauguay	15
2.3	Modellierung	16
2.3.1	PROMET	16
2.3.2	Hydrotel.....	17
2.4	Ergebnisse	18
2.4.1	Validierung.....	18
2.4.2	Modellläufe auf der Basis eines Regionalen Klimamodells	23
3	Workpackage II: Konzeptualisierung und Design eines Frameworks für integrative Forschung zum Klimawandel in Québec und Bayern.....	31
3.1	Identifikation von Kernthemen	31
3.2	System der Stakeholder.....	32
3.3	Konzeption der Use Cases.....	33
3.3.1	Beschreibung der Use Cases	33
3.3.2	Darstellung der Use Cases als UML Diagramm	34
3.4	Allgemeines Framework für ein Integriertes Einzugsgebietsmodell in UML	36
3.4.1	Architektur des Modellverbunds.....	36
3.4.2	Rollen der Modellentwickler.....	37

3.4.3	Rollen der Teilmodelle	38
3.4.4	Setup-Anforderungen	39
3.5	Use Cases am Ottawa River	39
3.5.1	Allgemeine Beschreibung der Situation am Ottawa River	39
3.5.2	Struktur und Interessen der Stakeholder im Einzugsgebiet des Ottawa River.	40
3.5.3	Use Case: Einfluß des Klimawandels auf Niedrigwasser am Rivière de Mille Île.....	41
3.5.4	Use Case: Speicherbewirtschaftung am Ottawa River unter Einfluß des Klimawandels.....	42
3.6	Use Cases am Châteauguay River.....	43
3.6.1	Allgemeine Beschreibung der Situation am Châteauguay River	43
3.6.2	Struktur und Interessen der Stakeholder im Einzugsgebiet des Châteauguay River	43
3.6.3	Use Case: Niedrigwasser am Châteauguay River unter Einfluss des Klimawandels	44
3.6.4	Use Case: Wasserqualität am Châteauguay River unter Einfluss des Klimawandels	45
3.7	Use Cases der Stadtwerke München	46
3.7.1	Use Case: Chlorung des Trinkwassers unter Einfluss des Klimawandels	47
3.7.2	Use Case: Einfluss des Biolandbaus auf die Wasserqualität des Münchener Trinkwassers.....	47
3.7.3	Use Case: Energiegewinnung unter Einfluß des Klimawandels	48
3.8	Benutzerschnittstelle	49
3.9	Datenanforderungen	49
4	Literatur	51

Appendix

1 Zusammenfassung des Projekts: Integrative Einzugsgebietsmodellierung im Kontext des Klimawandels – Vergleich von Problemstellungen, Forschungsansätzen und Lösungstechniken aus Quebec und Bayern (GLOWA-Ouranos)

1.1 Gesamtziele von GLOWA-Ouranos

Die erwarteten Folgen des globalen Klimawandels werden auch im Freistaat Bayern zu deutlich veränderten natur- und kulturräumlichen Verhältnissen führen und damit die Rahmenbedingungen für die zukünftige Land-, Wasser- und Energiewirtschaft im Freistaat maßgeblich beeinflussen. Die Bereitstellung von integrativen Modell-, Analyse- und Szenariowerkzeugen ist Grundvoraussetzung für die frühzeitige Entwicklung von geeigneten Adaptationsstrategien, um auf die veränderten Rahmenbedingungen vorbereitet zu sein und sich in den genannten Wirtschaftszweigen optimal positionieren zu können. Eine Etablierung des Freistaates Bayern an der internationalen Spitze der Umweltwissenschaften und Umweltforschung kann dabei durch die Zusammenarbeit mit kompetenten internationalen Partnern erheblich profitieren. Die Zusammenarbeit mit dem Consortium Ouranos aus Québec soll in zwei Phasen zur Realisierung der genannten Ansprüche führen.

Die langjährige Perspektive von GLOWA-Ouranos ist der Aufbau einer Wissenschaftskooperation mit dem Ziel, die beteiligten Verwaltungseinheiten (Provinz Québec, Freistaat Bayern), vertreten durch die beteiligten Projektpartner, an der internationalen Spitze innovativer und integrativer Umweltwissenschaften zu etablieren. Diese Entwicklung wird durch die komplementäre Bündelung der Kernkompetenzen von Ouranos (regionale Klimamodellierung, Entwicklung von Adoptionsstrategien, institutionelle Einbindung, Stakeholderbeteiligung) und dem Department für Geographie der LMU (integratives Entscheidungsunterstützungssystem DANUBIA, prozessbasierte Modellierung natürlicher Prozesse und Kreisläufe, akteursbasierte Modellierung in den Sozialwissenschaften, Fernerkundung) in einen gemeinsamen Modellverbund ermöglicht.

Zentrales Forschungsziel ist die gemeinschaftliche Entwicklung eines regionalisierbaren, integrativen Management-Werkzeugs für die Bereitstellung von Entscheidungsalternativen für die nachhaltige Nutzung und Bewirtschaftung von Wasserressourcen. Schwerpunkte bilden dabei die Untersuchung und Bewertung der:

- Entwicklung von Extremwertereignissen (Hochwasser, Niedrigwasser, Dürre) und ihrer ökologischen, ökonomischen und sozialen Folgen für die Länder der beteiligten Projektpartner (Québec, Bayern)
- Methoden nachhaltigen Wasser- und Landmanagements (Wasserqualität, Energieversorgung, Landnutzungsmanagement, landwirtschaftliche Produktion)
- Analyse der zukünftigen Funktion von Landnutzung in den untersuchten Regionen

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt liegt in der gemeinsamen Forschung und Entwicklung von Methoden zur Übertragbarkeit eines gekoppelten, integrativen Modellsystems auf andere Regionen der Erde. Die gemeinsame Auswertung der Modellergebnisse soll die zukünftige Positionierung der Provinz Québec in Nordamerika bzw. des Freistaates Bayern innerhalb der Europäischen Union als Folge des Globalen Wandels ermöglichen.

Sowohl *Ouranos* als auch die *LMU* arbeiten mit unterschiedlichen Ansätzen und Methoden an der Umsetzung dieser Ziele im Bereich der Klimafolge- und Global Change-Forschung. Beide Einrichtungen konzentrieren sich dabei mit Hilfe von numerischen Modellen auf die Betrachtung der Auswirkungen großräumiger Veränderungen auf der regionalen und lokalen Skala. Während *Ouranos* zentrale Arbeitsschwerpunkte in der regionalen Klimamodellierung und der Entwicklung von regionalen Anpassungsstrategien an den Klimawandel in Quebec legt, konzentriert sich die *LMU* z.B. mit *Glowa-Danube* auf die Entwicklung des transdisziplinären Entscheidungsunterstützungssystems DANUBIA für die Region der Oberen Donau. Im Mittelpunkt der jeweiligen Betrachtungen steht die Prognose der zukünftigen Verfügbarkeit und Funktion der Naturressource Wasser im Kontext eines interdisziplinären und integrativen Flussgebietsmanagements aus Sicht der Wasser-, Land- und Energiewirtschaft.

1.2 Motivation des Projekts

Ziel der wissenschaftlichen Untersuchungen im Rahmen des Projektes ist die Erzeugung von Synergieeffekten bei der gemeinsamen Entwicklung neuer Technologien zur Prognose der regionalen Folgen des globalen Wandels und der Bereitstellung von spezifischen Anpassungs- und Managementstrategien auf Einzugsgebietsebene. Die Pilotstudie vergleicht die Fragestellungen, Arbeitsmethoden und Kenntnisse der beteiligten Institutionen auf dem Gebiet der regionalen Folgen des Globalen Klimawandels in Bayern und Quebec, identifiziert die für beide Seiten Gewinn versprechenden Felder von wissenschaftlich-technischem Austausch sowie wissenschaftliche Problemfelder von großer zukünftiger Relevanz und entwickelt auf Basis der Ergebnisse eine Strategie für eine weitere gemeinsame Arbeit. Dabei legt die Pilotstudie den Grundstein für eine langfristige Partnerschaft zwischen *Ouranos* und der *LMU*, deren Ziel die Entwicklung eines regionalisierbaren, integrativen Management-Werkzeugs für die Bereitstellung von Entscheidungsalternativen für die nachhaltige Nutzung von Naturressourcen am Beispiel von Wasser unter Bedingungen des Globalen Wandels ist. Diese Entwicklung erfordert die Bündelung der Kernkompetenzen des Consortium *Ouranos* und der *LMU* in einen gemeinsamen Modellverbund. Der erste Schritt der Zusammenarbeit behandelt die Durchführung einer gemeinsamen Studie zur Analyse der Auswirkungen des klimatischen Wandels im Bereich des integrativen Flussgebietsmanagements in Quebec und Bayern. Zunächst sollte ein grundlegender Vergleich bestehender Modellsysteme durchgeführt werden. Dieser Vergleich dient der Ermittlung der jeweils erforderlichen Anpassungen an die hydrologischen, biogeochemischen und sozio-ökonomischen Bedingungen in den jeweils betrachteten Untersuchungsräumen in Quebec (Chateauguay) und Bayern (Ammer) und ist gleichzeitig Voraussetzung für die Entwicklung von Schnittstellen zur Kopplung der Modelle. Von großem Interesse ist dabei eine systematische Untersuchung der Bewertung der unterschiedlichen Komplexität der eingesetzten Modellsysteme für die Klimafolgenforschung; ein weiterer Hauptaugenmerk liegt auf der Analyse der jeweils dominanten raum-zeitlichen Skalen der natur- und sozialwissenschaftlichen Prozesse und Wirkungen. Auf Grundlage dieser Analyse soll die Struktur eines neuen Modellierungskonzeptes entwickelt werden, das explizit auf der Auswertung der Angaben zu den Interessen und Einflussmöglichkeiten von verschiedenen Stakeholdern aus Bayern und Québec berücksichtigt. Oberstes Ziel dieser weiteren gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsarbeit sind regionalisierbare, integrative Management-Werkzeuge in Form von Simulationsmodellen zur Ermittlung optimaler Anpassungsstrategien und Entscheidungsalternativen für die nachhaltige Nutzung von Naturressourcen unter Bedingungen des Globalen Klimawandels.

1.3 Ziele der Pilotstudie

Die Pilotstudie dient dem Vergleich der wissenschaftlichen Entwicklungen der beteiligten Partner *Ouranos* und der *LMU* im Bereich der Klimafolge- und Global Change-Forschung. Die Möglichkeiten zur Kopplung der bestehenden Modellierungsansätze für ein integratives Flussgebietsmanagement wurden evaluiert. Mögliche Anpassungen und Weiterentwicklungen der bestehenden Modellsysteme an die hydrologischen und sozio-ökonomischen Verhältnisse (Landnutzung, Industrie, Haushalte) im Partnerland wurden erarbeitet und dokumentiert. Die bilateralen Untersuchungen wurden an je einem ausgewählten Testgebiet in Quebec (Chateauguay) und Bayern (Ammer) durchgeführt, das jeweils eine deutliche Sensitivität auf die Veränderungen durch den globalen und klimatischen Wandel erwarten lässt. Dabei war aus Sicht des Antragstellers eine aktive Begleitung der Umweltverwaltung am Pilotprojekt für das Gelingen des Vorhabens von ausschlaggebender Bedeutung.

In der hier beantragten einjährigen Pilotstudie werden die von beiden Seiten verfolgten Fragestellungen und Ansätze verglichen und gemeinsam an konkreten Beispielen prototypisch getestet. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Bewertung der Relevanz der Komplexität von Modellen für die Aussagegenauigkeit der hydrologischen Modellanwendungen als Reaktion auf die Projektionen von Klimaszenarien. In einem zweiten Arbeitsschwerpunkt wurde auf der Grundlage von Expertenbefragungen die Struktur eines integrativen Einzugsgebietsmodells konzipiert, deren Umsetzung ein Kernelement einer langfristigen Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern werden soll.

Der durch die Pilotstudie unmittelbar erwirtschaftete akademische Mehrwert liegt im bilateralen Wissenstransfer zwischen den beteiligten Partnern im Bereich der integrativen Einzugsgebietsmodellierung, der internationalen Sichtbarkeit dieser wissenschaftlichen Kooperation durch gemeinsame Publikationen sowie der Aus- und Weiterbildung von Nachwuchswissenschaftlern im Bereich der Klimawandel- und Global Change-Forschung.

Gemäß des Forschungsantrages wurde dabei zunächst folgendes Arbeitsprogramm und –zeitplan vorgeschlagen.

- Literaturrecherche und Analyse ähnlicher Modellansätze, Kick-off-Meeting (1 Monat)
- Ermittlung des Datenbedarfs für die Anwendung der bestehenden Modellsysteme im jeweiligen Partnerland (1 Monat)
- Vergleich der bestehenden Modellierungsmethoden und Definition der jeweils erforderlichen Anpassungen (3 Monate)
- Definition der Schnittstellen zur Kopplung der Modellierungsansätze (3 Monate)
- Definition möglicher Benutzerschnittstellen (1 Monat)
- Präsentation und Diskussion der Erkenntnisse im wissenschaftlichen Umfeld (-)
- Entwicklung eines Projektantrags zur Umsetzung der langfristigen Kooperationsziele (2 Monate)
- Gemeinsame Veröffentlichungen über die Ergebnisse der Pilotstudie (1 Monat)

Im Rahmen eines Workshops zur Vorbereitung und Planung der gemeinsamen Forschungsarbeiten im September 2006 wurden die zentralen Aufgaben in zwei übergeordnete Arbeitspakete (Workpackage I & II, vgl. Abb. 1.1) zur parallelen Bearbeitung gebündelt:

Workpackage I	Hydrologic Modelling of Climate Change Scenarios in the Chateauguay and Ammer River Basins
Workpackage II	Conceptualization and Design of a Framework for Integrated Global Change Research in Québec and Bavaria

Arbeitspaket I dient dabei der vergleichenden Modellierung der Hydrologie in den Untersuchungsgebieten Châteauguay (Québec) und Ammer (Bayern) mit den hydrologischen Modellen PROMET (LMU) und Hydrotel (Ouranos, CEHQ). Es beinhaltet folgende Aufgaben:

- Definition der Datenanforderungen der Modelle in den Untersuchungsgebieten und Bereitstellung der Daten
- Aufbau der Modellstrukturen in den jeweiligen Untersuchungsgebieten
- Kalibrierung und Validierung der Modelle
- Entwicklung und Anwendung einfacher Klimaszenarien
- Vergleich und Diskussion der Modellergebnisse
- Synthese und Bericht

Arbeitspaket II schafft die Grundlage für eine langfristige gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsaufgabe der beteiligten Partner. Hier werden die Kernkompetenzen gebündelt und für die Konzeptionierung eines integrativen Einzugsgebietsmodells eingesetzt. Durch Befragungen möglicher Stakeholder wird zunächst deren Anspruch an ein solches Werkzeug erhoben und in sogenannten Use Cases (Anwendungsfälle) gefasst. Das Arbeitspaket beinhaltet folgende Aufgaben:

- Definition der jeweiligen Kernthemen im Kontext des Klimawandels
- Definition und Formalisierung der Anwendungsfälle unter Verwendung der Unified Modeling Language UML
- Gemeinsame Erfassung und Aufbau einer Rahmenstruktur für integrative Forschung im Kontext des Klimawandels
- Synthese und Bericht

1.4 Bewilligte Mittel

Vom LfU wurden für die Projektlaufzeit von 01/07 bis 03/08 folgende Mittel veranschlagt:

	2007 €	2008 €	Gesamt €
Bewilligung des LfU	36.000,00	14.000,00	50.000,00
davon			
für Personalkosten	30.500,00	12.000,00	42.500,00
für Sachkosten (Rk)	5.500,00	2.000,00	7.500,00
Eigenmittel der LMU:			32.500,00
davon			
für Personalkosten			26.200,00
für Sachkosten			6.300,00
Summe:			82.500,00

1.5 Personelles

Im Berichtszeitraum wurden eine studentische Hilfskraft und ein Projektmitarbeiter eingestellt. Frau Inga May wurde von Januar 2007 bis einschließlich Juni 2007 als studentische Hilfskraft beschäftigt. Während der gesamten Projektlaufzeit war Herr Marco Braun als Projektmitarbeiter mit den Arbeiten zu Workpackage I und II betraut.

1.6 Meetings im Projektzeitraum

Im Projektzeitraum wurden 3 Meetings der Projektpartner veranstaltet:

Stakeholder-Workshop, 14.-15. April 2007, LMU, München

Bei diesem Workshop wurden potentielle Nutzer und Interessenten für ein projektiertes integriertes Einzugsgebietsmodell geladen. Neben der Vorstellung der Projektpartner und der Projektziele wurden mit möglichen Stakeholdern auf bayerischer Seite intensiv die Anwendungspotentiale diskutiert.

Stakeholder-Workshop, 17.-19. September, Ouranos, Montreal

Auf dem Workshop in Montreal wurden Stakeholder auf quebecer Seite geladen und informiert. Erste Ergebnisse von Workpackage I und II wurden vorgestellt und diskutiert. Erste Planungen einer zweiten Projektphase wurden vorgenommen.

Arbeitstreffen, 7.-8. Dezember, CEHQ Quebec

Es wurden die finalen Ergebnisse von Workpackage I und II diskutiert. Drei Veröffentlichungen zu den Ergebnissen der Pilotstudie wurden konzipiert und skizziert.

Während der Projektlaufzeit reiste Herr Marco Braun für einen vierwöchigen Arbeitsaufenthalt nach Montreal (01.05.-28.05.2007). Wesentliche Arbeiten im Hinblick auf die Umsetzung der UML-Modellierung wurden in diesem Zeitraum durchgeführt. Dies umfasste die Einführung der kanadischen Partner in die UML-Methodik, die Kontaktierung verschiedener Stakeholder in Quebec sowie das Erarbeiten von UML Use Cases für Problemstellungen in Quebec.

1.7 Publikationen

Die in der Pilotstudie durchgeführten Arbeiten werden in mehreren Publikationen der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Im Einzelnen handelt es sich um Vorträge und Poster auf der European Geosciences Union (EGU) 2007 und 2008 in Wien und um drei Beiträge in Fachzeitschriften, die derzeit fertiggestellt werden.

Beiträge zur EGU 2007:

Vescovi, L., Roy, R., Musy, A. (2007): Climate change sciences in support of vulnerability, impact and adaptation activities in Québec, Canada, Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, EGU2007-A-08202 (ORAL)

Vescovi, L.; May, I.; Roy, R.; Chartier, I.; Turcotte, R.; Cyr, J.F.; Mauser, W.; Ludwig, R. (2007): Integrated watershed management under climate change conditions – A comparison of major issues, research methods and problem solving strategies in Quebec and Bavaria, Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, EGU2007-A-05090 (POSTER)

Cyr, J.F.; Turcotte, R.; Fortin, L.G. (2007): Two pilot projects on climate change impacts and adaptation of watershed management in Southern Quebec, Canada, Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, EGU-A-04680 (POSTER)

Beiträge zur EGU 2008:

Ludwig, R.; Turcotte, R.; Vescovi, L.; Braun, M.; May, I.; Cyr, J.F.; Fortin, L.G.; Chaumont, D.; Biner, S.; Chartier, I. (2008): The role of hydrological model complexity and uncertainty in climate change impact assessment, Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-02303 (POSTER)

Braun, M.; Cyr, J.-F.; Ludwig, R.; Turcotte, R.; Vescovi, L. (2008): Framework design for an integrated watershed model for climate change impact assessment, Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-10942 (POSTER)

Vescovi, L.; Cyr, J.F.; Turcotte, R.; Fortin, L.G.; Chaumont, D.; Ludwig, R.; Braun, M.; May, I. (2008): Climate Change Study on the Châteauguay River Watershed: Lessons Learned from a Multi Model Experiment, Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-09783 (ORAL)

Darüber hinaus werden derzeit 3 Publikationen vorbereitet, die die wesentlichen Erkenntnisse der Projektarbeiten wissenschaftlich zusammenfassen :

Thema 1: Hydrologische Modellierung (WP1)

Titel: *The Role of Hydrologic Model Complexity in Climate Change Scenario Analysis*

Autoren: **Ludwig, R.**; Turcotte, R.; Vescovi, L.; Braun, M.; May, I.; Cyr, J.F.; Fortin, L.G.; Chaumont, D.; Biner, S.; Chartier, I.

Inhalte: Demonstrate the differences observed when using PROMET and Hydrotel with the same inputs, where and why they behave similar or different. Comparison of results to simple models MOHYSE/HSAMI. Quantify and qualify uncertainties due to model concepts.

Key words: catchment hydrology, model complexity and uncertainty, PROMET, Hydrotel, Climate Change Scenarios

Journal: *Journal of Hydrology* (Einreichung im April 2008)

Thema 2: Modellanwendungen zur Folgewirkung des Klimawandels (WP1)

Titel: *Climate Change Study on the Châteauguay River Watershed: Lessons Learned from a Multi Model Experiment*

Autoren: **Vescovi, L.**; Cyr, J.F.; Turcotte, R.; Fortin, L.G.; Chaumont, D.; Ludwig, R.; Braun, M.; May, I.

Inhalte: Evaluation and Analysis of the Sequence from Climate Modelling via Hydrological Modelling to Impact Assessment and Adaptation (Irrigation)

Key words: climate change, model complexity, model application, PROMET, Hydrotel, CRCM, impact and adaptation, irrigation, watershed management

Journal: *Global Change Research* (Einreichung im April 2008)

Thema 3: Framework Layout (WP2)

Titel: *Framework Design for an Integrated Watershed Model under Climate Change Conditions*

Autoren: **Braun, M.**; Cyr, J.-F.; Ludwig, R.; Turcotte, R.; Vescovi, L.

Inhalte: Description of our Process for the development of an application oriented integrated watershed model by consideration of stakeholder requirements and interests; Discussion of Necessities and Benefits of the next generation of water shed management tools.

Key words: Case studies, UML use cases, framework, integrated watershed model, software development

Journal: *Global Change Research* (Einreichung im April 2008)

2 Workpackage I: Hydrologische Modellierung von Klimawandel-Szenarien in den Einzugsgebieten von Châteauguay River und Ammer

Die Arbeiten zum Workpackage I beinhalten die Durchführung der Modellierung hydrologischer Prozesse in den beiden Test-Einzugsgebieten Ammer in Bayern und Châteauguay in Québec. Dabei betreiben die Partner beim Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ) das Modell Hydrotel, an der LMU kommt das Modell PROMET (DANUBIA-light) zum Einsatz. Es soll gezeigt werden, daß beide Modelle im Einzugsgebiet des jeweiligen Partnerlandes betrieben werden können und ein Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Modellansätze erfolgen. Die dazu erforderlichen Arbeitsschritte umfassen die Definition der erforderlichen Daten und deren Austausch zwischen den Partnern in Bayern und Quebec, das Aufsetzen der Modelle für die jeweiligen Einzugsgebiete, die Kalibrierung und Validierung der Modellläufe sowie das experimentelle Betreiben der Modelle mit Klimasimulationen des Canadian Regional Climate Models (CRCM, Modèle Regional du Climat Canadien – MRCC). Ein Vergleich der Ergebnisse der Modellierungen mit Hydrotel und PROMET und deren Diskussion runden die angestrebten Arbeiten von Workpackage I ab.

2.1 Die Untersuchungsgebiete

2.1.1 Ammer

Das Einzugsgebiet der Ammer befindet sich 50 km südwestlich von München im oberbayerischen Voralpenraum und erstreckt sich weitere 50 km nach Süden bis in die Ammergauer Alpen. Mit einer West-Ost Ausdehnung von 30 km ergibt sich insgesamt eine Einzugsgebietsfläche von 709 km². Von der höchsten Erhebung in dem Gebiet (Kreuzspitze 2185 m) bis zur Mündung der Ammer in den Ammersee (533 m) wird eine Reliefenergie von 1652 m erreicht. Das Einzugsgebiet ist begrenzt durch das Gebiet der Loisach im Südosten und das des Lechs im Westen.

Das Gebiet weist in geophysikalischer Hinsicht eine relativ starke breitengradabhängige Heterogenität und sich eine dementsprechende Änderung der Landnutzung von Süden nach Norden auf. Bedingt durch den Höhengradienten nehmen die Niederschläge mit Alpennähe zu wohingegen die Temperaturen abnehmen. Die durchschnittliche Niederschlagssumme liegt nach Aufzeichnungen des Deutschen Wetterdienstes im gesamten Gebiet beträgt 1380 mm/a und die Durchschnittstemperatur liegt bei 7-8°C. Als Folge der klimatischen Gegebenheiten ist die dominierende Landnutzung im Süden die Viehzucht und die Forstwirtschaft welche nordwärts zu Gunsten des Ackerbaus weicht.

Geologisch gesehen lässt sich das Gebiet in vier Einheiten unterteilen: Diese sind von Süden nach Norden die Kalkalpine Zone, die Flyschzone, der Bereich der gefalteten und der Bereich der ungefalteten Molasse. Insgesamt ist das Gebiet stark eiszeitlich geprägt und es lassen sich viele glaziale Landschaftsformen wie z.B. Moränen und Drumlins erkennen.

Die Ammer gehört dem Gewässernetz der Donau an und wird als Einzugsgebiet der 4. Ordnung kategorisiert. Der mittlere langjährige Abfluss am Pegel Weilheim beträgt 15.5 m³/s, (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT 2000) wobei die höchsten Wasserstände während eines Jahres in den Sommermonaten erreicht werden.

2.1.2 Châteauguay

Das Flussgebiet des Châteauguay erstreckt sich südlich von Montréal Richtung Süden und umfasst eine Fläche von 2543 m². Es liegt zu 55 % in der kanadischen Provinz Québec und zu 45 % im US- Bundesstaat New York (SAHEBI et al. 2002).

Im Gegensatz zum Gebiet der Ammer weist das Gebiet des Châteauguay nur einen Höhengradienten von 1136 m auf und liegt auch insgesamt wesentlich niedriger. Der höchste Punkt ist der Mount Lyon mit 1158 m, die Mündung in den St. Lorenz liegt auf 22 m.

Das Gebiet lässt sich grob in zwei Landschaftseinheiten unterteilen: Der Bereich des St. Lorenz Flachlandes, überwiegend im kanadischen Teil, und der Bereich der Adirondack Mountains, überwiegend auf der amerikanischen Seite. Beide Einheiten sind glazial überformt und weisen dementsprechende Oberflächenformen auf. Der Übergang von der einen Landschaftseinheit zu der anderen fällt ziemlich genau mit der Landesgrenze zusammen und auch die Landnutzung lässt sich in diesen zwei Einheiten zuordnen: Das Landschaftsbild des südlichen Teils, in den Adirondack Mountains, ist geprägt von Nadel- und Laubwäldern, wohingegen im Norden der Ackerbau, insbesondere Maisanbau, dominiert.

Niederschlag und Temperatur variieren nur sehr schwach in dem Gebiet. Die jährliche Niederschlagssumme erreicht Werte um 1000 mm/a und die mittlere Jahrestemperatur liegt bei 6.3 ° C (Coté et al. 2006).

Der Abflussgang des Châteauguay über das Jahr zeigt eine relativ hohe Amplitude, von bis zu 100 m³/s. Spitzenabflüsse werden in den Frühjahrsmonaten März, April und Mai durch die Schneeschmelze erreicht. Der mittlere langjährige Abfluss liegt bei ca. 40 m³/s.

Abbildung 2.1 zeigt die räumliche Lage und die wesentlichen Gebietskennwerte der Einzugsgebiete in der Übersicht.

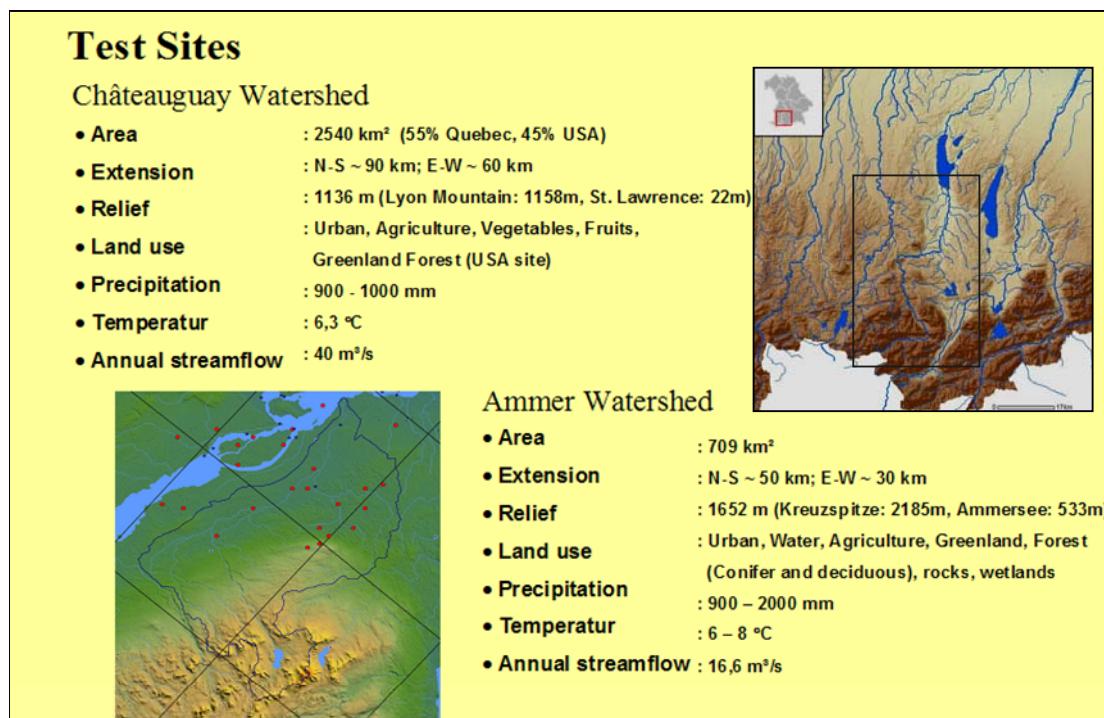


Abb. 2.1: Die Untersuchungsgebiete des Châteauguay und der Ammer

2.2 Datenbeschaffung

Für die Realisierung der Modellläufe mit Hydrotel und PROMET war zunächst die Definition der Datenanforderungen und der Austausch dieser Daten für das jeweilige Einzugsgebiet des Projektpartners erforderlich. Diese wurden auf bayerischer Seite als Rasterdatensätze bereitgestellt. Die Daten aus Québec wurden aus unterschiedlichen Quellen zusammengestellt. Die für PROMET erforderlichen Rasterdatensätze wurden teilweise aus den von den kanadischen Projektpartnern bereitgestellten Vektordatensätzen erzeugt.

2.2.1 Ammer

Flächendaten

Die für Hydrotel erforderlichen Flächendaten wurden als ASCII Datensätze weiter gegeben. Alle Raster besitzen eine horizontale Auflösung von 100m setzen sich wie folgt zusammen:

- Digitales Geländemodell (DGM) [m]
vertikale Auflösung: 1m
Das Geländemodell wurde händisch nachbearbeitet, um im norden des Einzugsgebiets den kanalisierten Zufluss zum Ammersee korrekt abzubilden. Die manuell eingefügten Dämme erlauben eine realistische physikalische Parameterisierung des Einzugsgebiets.
- Gefälle [%]
Der Gefälle-Datensatz wurde aus dem DGM generiert.
- Einzugsgebietsgrenzen
Die Einzugsgebietsgrenzen wurden mit dem Topographischen Analyseprogramm TOPAZ aus dem DGM erzeugt.
- Fließvektoren (aus TOPAZ)
- Oberliegergebiete (aus TOPAZ)
- Fließgewässernetz (aus TOPAZ)
- Landnutzung
Gewonnen aus Satellitendaten, 8 Klassen
- Bodenarten
12 Klassen

Meteorologische Daten

Die meteorologischen Eingabedaten für das Einzugsgebiet der Ammer stammen von 19 Stationen die in und nahe um das Einzugsgebiet liegen (vgl. . Die Daten umfassen Messwerte der Temperatur, der relativen Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Bewölkungsgrad, Sichtweite sowie Niederschlag und Niederschlagsart, jeweils nach Mannheimer Stunden.

Tabelle 2.1: Liste der Klimastationen für das Einzugsgebiet der Ammer

Kennung	von	bis	geogr. Breite	geogr. Länge	Höhe	Name
KL04126	19680101	20010228	4806	1052	585	Kaufering
KL04131	19831101	20010228	4813	1118	509	Maisach-Gernlinden
KL04144	19490101	20010228	4724	1017	810	Oberstdorf (WSt)

KL04146	19920101	20010228	4728	1016	757	Fischen (Kr. Oberallgäu)
KL04149	19700501	20010228	4752	1036	716	Kaufbeuren
KL04151	19490101	20010228	4735	1043	796	Schwangau-Horn
KL04155	19490101	20010228	4725	1059	2960	Zugspitze
KL04156	19490101	20010228	4729	1104	719	Garmisch-Partenkirchen
KL04157	19490101	20010228	4726	1116	920	Mittenwald
KL04161	19490101	20010228	4748	1101	977	Hohenpeissenberg
KL04164	19861101	19990131	4755	1106	553	Raisting
KL04166	19710401	20010228	4743	1122	655	Attenkam
KL04168	19910801	20010131	4740	1105	734	Kohlgrub,Bad
KL04169	19490101	20010228	4747	1133	640	Toelz,Bad
KL04172	19821201	20010131	4753	1142	685	Holzkirchen
KL04176	19580101	20010228	4741	1146	747	Rottach-Egern

Die Datensätze stammen aus vorhergehenden Arbeiten am Lehrstuhl für Geographie und Geographische Fernerkundung und konnten somit gleich zu Beginn der Projektlaufzeit übermittelt werden.

2.2.2 Châteauguay

Für das Betreiben des PROMET-Modells wurden die Eingabedaten für das Einzugsgebiet des Châteauguay Rivers zusammengestellt und in einem GIS-System abgelegt. Die Daten gruppieren sich in (i) die räumliche statische Datengrundlage und (ii) die meteorologischen Daten zum Treiben des Modells. Die räumlichen Daten umfassen das digitale Geländemodell (DGM) und dessen Ableitungen Gefälle und Exposition, die Einzugsgebietsgrenze, eine digitale Bodenkarte sowie die Landnutzung. Als meteorologischen Input benötigt das Modell den Grad der Bewölkung[1/8], den Niederschlag [mm], die Temperatur [°C], die relative Feuchte [%] und die Windgeschwindigkeit [m/s].

Die räumlichen Daten wurden wie folgt beschafft und aufbereitet.

Digitales Geländemodell (DGM): Das DGM für das Einzugsgebiet des Châteauguay wurde aus Daten der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) gewonnen. Dieser Datensatz steht unprojiziert mit einer Auflösung von 3 Bogensekunden weltweit frei zur Verfügung. Die Daten wurden auf die Projektion UTM 18N transformiert und auf eine räumliche Auflösung von 100m geresampled. Als Datum/Ellipsoid für die Projektion wurde das in Noramerika gebräuchliche NAD 1983 verwendet (equivalent WGS84). Aus dem so gewonnenen Höhendatensatz wurden das Gefälle und die Exposition errechnet.

Einzugsgebietsgrenze: Mit dem gewonnenen DGM wurde das Topographische Parameterisierungsmodell TOPAZ des US Departments of Agriculture (<http://ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=7834>) betrieben um die Einzugsgebietsgrenze zu gewinnen. Im flachen Relief des nördlichen Teils des Châteauguaybeckens wurden dabei vom Modell zunächst die Fließwege nicht korrekt wiedergegeben. Es konnten zwei Stellen im Datensatz identifiziert werden an denen eine Manipulation des DGMs bewirkten, daß die Einzugsgebietsgrenzen richtig berechnet wurden.

Digitale Bodenkarte: Der erforderliche Datensatz zur Bodeninformation wurde aus einem Polygondatensatz produziert, der auch für die Modellierung mit Hydrotel Verwendung findet. Dazu wurden die Vektordaten passend zum DGM aufgerastert.

Landnutzung: Als Landnutzung standen aus den vom CEHQ übermittelten Daten zunächst drei Varianten zur Verfügung, von denen aber keine im Auslieferungszustand geeignet ist, für die hydrologische Modellierung mit PROMET herangezogen zu werden. Die erste Landnutzung liegt in einer räumlichen Auflösung von 30m vor, differenziert jedoch keine landwirtschaftlichen Feldfrüchte. Die zweite differenziert zwar Feldfrüchte, deckt jedoch nur den nördlichen Teil des Einzugsgebietes ab. Die dritte besitzt eine räumliche Auflösung von nur 200m und überdeckt mit Lücken den südlichen Teil des Einzugsgebietes. Um die Landnutzung zur Modellierung des Châteauguay bereit zu stellen wurde daher aus den ersten beiden Datensätzen ein Landnutzungsdatensatz synthetisiert. Da im ersten Landnutzungsdatensatz die landwirtschaftlich genutzten Flächen als „offener Boden“ ausgewiesen wurden, bestand die Möglichkeit der Generierung einer synthetischen Landnutzung darin, diese Flächen durch die Feldfruchtinformation der zweiten Landnutzung zu substituieren. Restliche, nach diesem Vorgehen noch undefinierte Flächen wurden interaktiv basierend auf einer Beurteilung nach der Geländehöhe und Flächeninformationen aus Google-Earth mit Mais bzw. Soja „be-pflanzt“. Nach der Veränderung der Auflösung von 30m auf 100m erfüllt die somit gewonnene Landnutzung die erforderlichen Kriterien für die Modellierung mit PROMET.

Die Datenlage der meteorologischen Messdaten für das Gebiet des Châteauguay River wurde analysiert. Aus dieser Analyse ergab sich, daß das kanadische Messnetz keine ausreichende Datengrundlage für das Betreiben von PROMET liefert. Zwar stehen im Gebiet eine Reihe von Meßstationen zur Verfügung, jedoch liefern diese mit täglichen Meßwerten die Daten nicht in ausreichender Dichte (stündlich oder Mannheimer Stunden).

Beurteilung:

Die Erstellung der Datensätze für die Modellierung des Châteauguay Einzugsgebietes zeigt, daß bereits die Bereitstellung der Eingabedaten für Modelle unterschiedlicher Komplexität bereits erhebliche Barrieren darstellen kann. Bereits an dieser Stelle tritt der Konflikt zwischen dem Wunsch einer realistischen Prozessabbildung und der Datenverfügbarkeit deutlich zu Tage. Es ist genau zu prüfen, welche Modellierungsverfahren unter der jeweiligen Datenlage sinnvoll eingesetzt werden können und in welchem Umfang Modellanpassungen erforderlich sind.

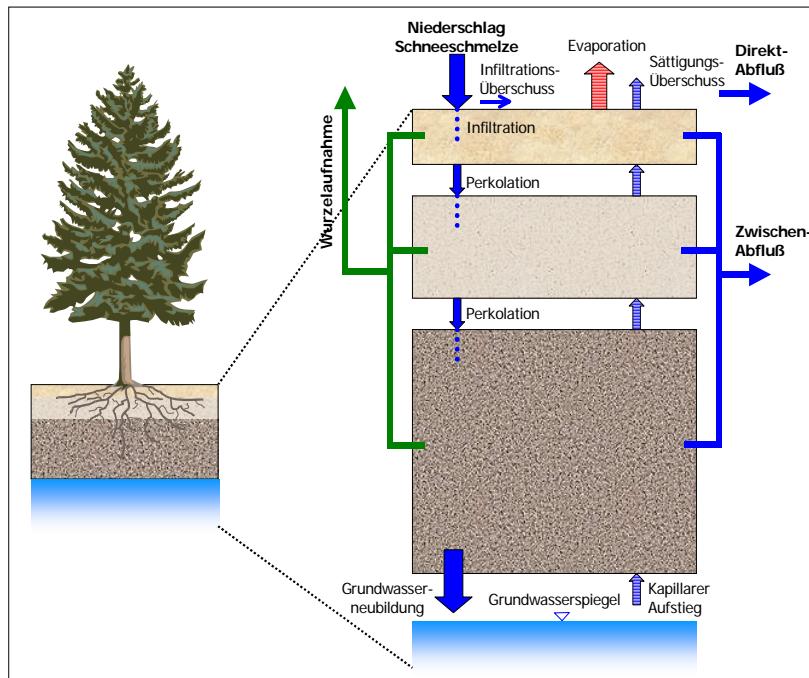
2.3 Modellierung

PROMET und Hydrotel sind zwei physikalisch basierte Modelle zur Simulation der Wasserhaushaltskomponenten in einem Einzugsgebiet. Dennoch unterscheiden sich die Modelle in mehreren Punkten fundamental.

2.3.1 PROMET

PROMET (Prozessorientiertes multiskaliges Evapotranspirationsmodell) ist ein SVAT-Modell (Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer Scheme) und wurde von MAUSER (1989) entwickelt und seitdem ständig erweitert (z.B. Ludwig und Mauser 2000, Mauser und Bach 2008). Das Modell berechnet die aktuelle Verdunstung mit Hilfe der Penman-Monteith Gleichung als Funktion von Strahlungsbilanz, Wasserverfügbarkeit und spezifischen Parametern der Landoberfläche. Durch seine Eigenschaft als white-box Model garantiert es Regionalisierbarkeit und lässt sich dementsprechend ohne Kalibrierung in anderen Gebieten und unter anderen Umweltbedingungen einsetzen. Aufgrund der Annahme, dass der PENMAN-MONTIETH-Ansatz auf allen Skalen Gültigkeit findet, ist die angewandte Skala alleine von der räumlichen Auflösung der bereitgestellten Datensätzen abhängig. PROMET arbeitet also mit einer komplexen Prozessbeschreibung, die dabei hohe Ansprüche an die Datenverfügbarkeit stellt. Das

Modell arbeitet mit einer einfachen Rastergeometrie, die leicht an die erforderliche Skale der Modellierung angepasst werden kann (hier beträgt die Maschenweite 100m). Die zeitliche Auflösung der Modellschrittweite beträgt 1 Stunde, es stehen mehrere Interpolationsalgorithmen zur Verfügung mit denen die verfügbaren meteorologischen Daten an diesen Bedarf angepasst werden können.



PROMET besteht aus den fünf Teilmodellen zu Strahlung, Bodenwasser, Vegetation, Aerodynamik und Schnee. Jedes der einzelnen Teilmodelle ist für die Bereitstellung eines spezifischen Teiles der benötigten Parameter für die Lösung der steuernden Prozessgleichungen zuständig.

Abb. 2.2: Das Prozessgefüge von PROMET

Bestimmung der aktuellen Verdunstung über pflanzenspezifische Widerstände, wird das theoretisch verfügbare Wasservolumen durch die explizite Berechnung der Bodenwasserflüsse und Abflussbildung in einem Mehrschicht-Bodenmodell über die Philip-Gleichung (1960) berechnet. Die laterale Abflusskomponente aus jeder Rasterzelle ergibt sich in Abhängigkeit des stärksten hydraulischen Gefälles. Abbildung 2.2 zeigt schematisch das Prozessgefüge von PROMET.

2.3.2 Hydrotel

Hydrotel wurde vom INRS-eau (Institut National de la Recherche Scientifique) in Quebec City entwickelt und dient sowohl wissenschaftlichen Zwecken als auch der operationellen Anwendung für tägliche Vorhersagen. Dazu nutzt Hydrotel einfachere Prozessbeschreibungen zur Bestimmung der Wasser- und Energieflüsse, der Datenbedarf ist damit deutlich geringer.

Als Simulationseinheiten dienen hydrologisch relativ homogene hydrologische Einheiten (RHHU = relative homogeneous hydrological units), die vor den Modellläufen für das jeweilige Untersuchungsgebiet definiert werden müssen.

Hydrotel besteht aus den zwei Programmen Physitel und Hydrotel. Physitel ist Hydrotel vorgeschalten und ist für die Datenaufbereitung zuständig. Hier werden die Einzugsgebietsgrenzen, die RHHU und die Fließwege berechnet, sowie die benötigten Informationen über Landnutzung und Bodeneigenschaften im Gebiet bereitgestellt. Durch die polygonale Struktur (in der Regel Teileinzugsgebiete) ergeben sich durch Veränderungen der Randwerte jeweils neue Prozessgeometrien.

Nach der Aggregierung der benötigten Datensätze wird mit dem Programm Hydrotel die eigentliche hydrologische Modellierung durchgeführt. Das Zeitinkrement kann dabei jeder Teiler der Zahl 24 sein. Ähnlich wie bei PROMET werden die benötigten Parameter mit unterschiedlichen Teilmodellen berechnet. Dafür gibt es je nach Anwendungszweck und verfügbaren Datenmengen unterschiedliche Ansätze die sich in erster Linie durch ihre Komplexität unterscheiden (TURCOTTE et al. 2005, FORTIN et al. 2006). Im Gegensatz zu PROMET sieht Hydrotel zur Anpassung des simulierten Abflussganges eine semiautomatisierte Kalibrierung nach der Shuffled Complex Evolution – University of Arizona (SCE-UA) vor. Die nachfolgenden Ergebnisse der Anwendungen von Hydrotel für die Einzugsgebiete entstammen einer Gebietsparametrisierung, die durch die Kollegen des CEHQ durchgeführt wurde.

Tabelle 2.2: Wesentliche Unterschiede im Aufbau und Datenbedarf der Modelle PROMET und Hydrotel

Hydrologische Prozesse	PROMET	Hydrotel
Interpolation der meteorologischen Größen Niederschlag Temperatur Strahlung Feuchte Wind	Räumlich: Höhenregression + IDW der Residuen Zeitlich: N: Verteilungsfunktion in Abhängigkeit des Niederschlags- typs Alle anderen: cubic spline	Räumlich: N: Thiessen-Polygone Alle anderen: Mittelwert der 3 benachbarten Stationen Zeitlich: - -
Schneedecke	Energiebilanz mehrere Schichten	Grad-Tag-Verfahren
Evapotranspiration	Penman-Monteith (1965)	Thornthwaite (1948) oder Hydro-Québec oder Linacre (1977) oder Priestley-Taylor (1972)
Bodenwasserbilanz und Abflussbildung	Philip-Gleichung (1960) Green-Ampt-Verfahren (1911)	Speicherkaskade 3 Schichten
Landoberflächenabfluss	-	Kinematische Welle
Gerinneabfluss	-	Kinematische Welle Wellendiffusion

2.4 Ergebnisse

In der vorliegenden Untersuchung sollte zunächst die Anwendbarkeit der vorgestellten Modelle für unterschiedliche Natur- und Kulturräume dargelegt werden. Des Weiteren wurde geprüft, wie die jeweiligen Modelle auf einen veränderten klimatologischen Antrieb aus Daten eines regionalen Klimamodells reagieren und ob die resultierenden Ergebnisse zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Hintergrund dieser Untersuchung war die Frage, ob die Anwendbarkeit der hydrologischen Modelle unter veränderten Randwertbedingungen gewährleistet bleibt und ob die unterschiedliche Komplexität der Prozessbeschreibungen zu systematischen Abweichungen in den Ergebnissen führt.

Für die Modellläufe standen verschiedene klimatologische Antriebsdaten zur Verfügung (vgl. Tab. 2.3). Sie sind in der Folge kurz beschreiben:

Tabelle 2.3: Klimatologischer Antrieb für die hydrologischen Modelle

Gebiet	Modell	Klimadaten	Zeitraum
Ammer	PROMET	Messdaten DWD	1971 - 2000
Ammer	HYDROTEL	Messdaten DWD	1971 - 2001
Ammer	PROMET	ERA-40	1970 - 1996
Ammer	HYDROTEL	ERA-40	1970 - 1999
Ammer	PROMET	CGCM 2 Past	1961 - 1987
Ammer	HYDROTEL	CGCM 2 Past	1961 - 1990
Ammer	PROMET	CGCM 2 Future	2070 - 2096
Ammer	HYDROTEL	CGCM 2 Future	2070 - 2099
Châteauguay	HYDROTEL	Messdaten	1961 - 1990
Châteauguay	PROMET	ERA-40	1961 - 1990
Châteauguay	HYDROTEL	ERA-40	1961 - 1990
Châteauguay	PROMET	CGCM 3 Past	1961 - 1987
Châteauguay	HYDROTEL	CGCM 3 Past	1961 - 1990
Châteauguay	PROMET	CGCM 3 Future	2041 - 2066
Châteauguay	HYDROTEL	CGCM 3 Future	2041 - 2070

- Messdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD): Daten von insgesamt 12 synoptischen Stationen; vorliegend als Werte zu den Mannheimer Stunden; zeitlich interpoliert durch Anpassung der Messdaten an eine kubische Splinefunktion; räumlich interpoliert durch IDW der Residuen zu einer höhenabhängigen Ausgleichsfläche
- ERA-40 (European Research Area): Reanalyse-Daten für einen 40-Jahreszeitraum; entstanden durch die Assimilierung von Messdaten (inkl. Stations- und Satellitendaten) mit den Daten globaler Zirkulationsmodelle; zeitliche Auflösung 6 Stunden; horizontale Maschenweite 120 km, herunterskaliert auf 45 km; Zentrumskoordinate jeder Rasterzelle wird als Stationswert interpretiert, danach Interpolation der ‚virtuellen Stationswerte‘ wie oben.
- CGCM2/3 Past: Ergebnisse von historischen Modellläufen des Canadian Regional Climate Model (Version 3.7.1 bzw. 4) für die Domäne „Europa“, angetrieben durch das Coupled Global Climate Model (CGCM Vers. 2 bzw. 3); räumliche Auflösung 45 km; zeitliche Auflösung 6 Stunden; Zentrumskoordinate jeder Rasterzelle wird als Stationswert interpretiert, danach Interpolation der ‚virtuellen Stationswerte‘ wie oben.
- CGCM2/3 Future: Ergebnisse eines Szenario-Modelllaufes des Canadian Regional Climate Model (Version 3.7.1 bzw. 4) für die Domäne „Europa“, angetrieben durch das Coupled Global Climate Model (CGCM Vers. 2 bzw. 3) auf Basis des Emissions-szenarios A2 (nach IPCC); räumliche Auflösung 45 km; zeitliche Auflösung 6 Stunden; Zentrumskoordinate jeder Rasterzelle wird als Stationswert interpretiert, danach Interpolation der ‚virtuellen Stationswerte‘ wie oben.

2.4.1 Validierung

Die Kalibrierung und Validierung der Modelle (bei PROMET nur Validierung) ist nur für das Einzugsgebiet der Ammer möglich, da für das Gebiet des Châteauguay keine ausreichende meteorologische und hydrologische Datenbasis zur Verfügung steht. Für die Gegenüberstellung von tatsächlichen Abflussmesswerten und Modellergebnissen steht somit für die Ammer die 30-jährige Periode 1971-2000 zur Verfügung. In einem ersten Vergleich wird die mittlere

Wasserbilanz dieses Zeitraumes dargestellt (Abb. 2.3a und 2.3b). Bei einem mittleren Abfluss von 777 mm (Pegel Weilheim) ergeben sich nur kleine Abweichungen, wobei PROMET die gemessenen Abflüsse leicht überschätzt (ca. 5%) und Hydrotel die gemessenen Abflüsse systematisch unterschätzt (ca. -8%) (vgl. Abb. 2.4). Dabei weisen die Modelle, in Abhängigkeit der jeweils eingesetzten Interpolationsverfahren, nur leicht unterschiedliche Gebietsniederschläge auf (1289 zu 1244 mm). Große Diskrepanzen ergeben sich jedoch bei den Gebietswerten der Evapotranspiration (478 vs. 571 mm). Bemessen an den Erfahrungswerten des bayerischen Alpenvorlandes (und insbesondere des Gebirgsanteils) erscheint der Hydrotel-Wert zu hoch.

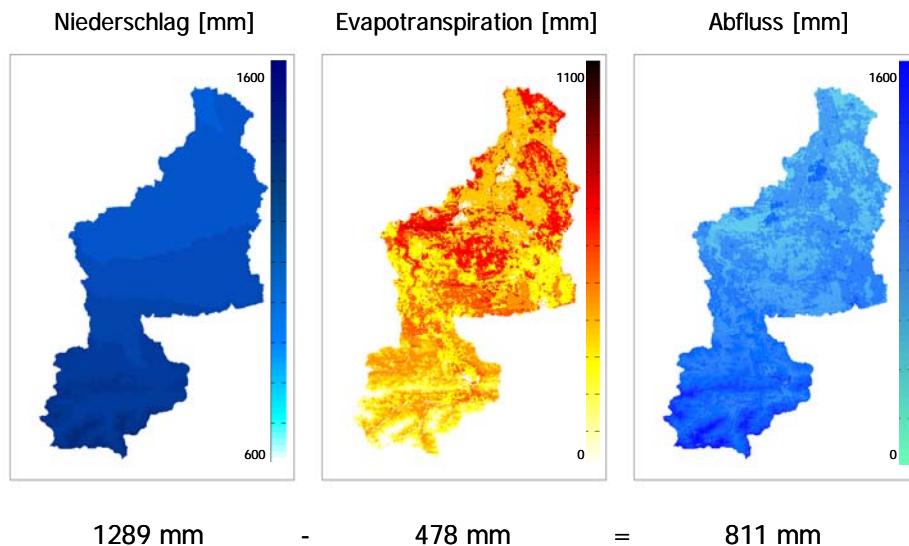


Abbildung 2.3a: Flächenhafte Verteilung der Wasserhaushaltsskomponenten Niederschlag, Verdunstung und Abfluss im Ammergebiet (PROMET, Stationsdaten)

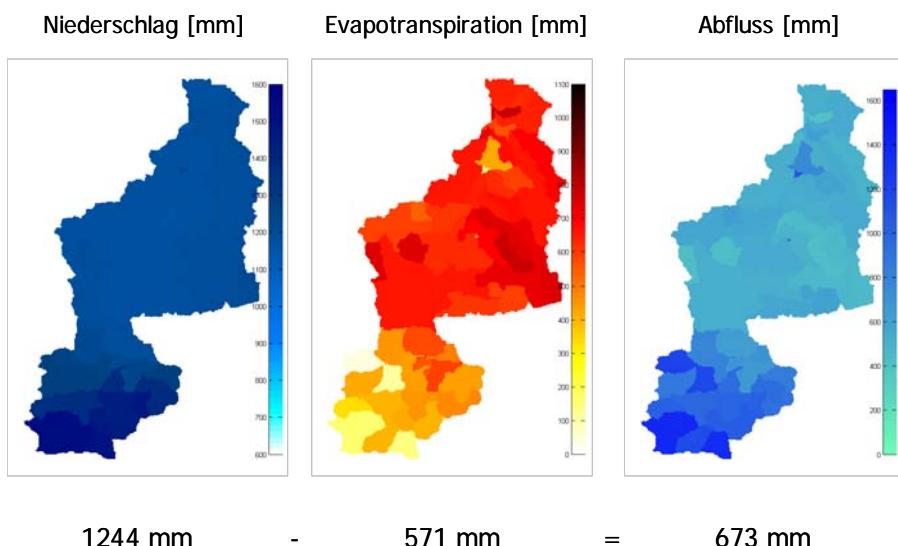


Abbildung 2.3b: Flächenhafte Verteilung der Wasserhaushaltsskomponenten Niederschlag, Verdunstung und Abfluss im Ammergebiet (Hydrotel, Stationsdaten)

Es entsteht der Eindruck, dass die in Hydrotel eingesetzten Verfahren zur Berechnung der potentiellen Verdunstung nicht ausreichend auf einen realistischen Wert der aktuellen Evapotranspiration reduziert werden. Die unterschiedlichen räumlichen Muster in allen Wasserhaushaltstermen sind die Folge der unterschiedlichen Raumrepräsentanz der Modelle (Raster (PROMET) vs. Polygonale RHHUs (Hydrotel)). Sie erklärt auch die geringere räumliche Dynamik der Modellergebnisse mit Hydrotel. In den direkten Gegenüberstellung der Einzeljahre (Abb. 2.4, Tabelle 2.4) wird sichtbar, dass die Schwankungsbreite der PROMET-Modellierung um den gemessenen Abflusswert geringer ausfällt ($R^2 = 0.91$ gegenüber $R^2 = 0.8$), was als Indiz für eine insgesamt etwas verbesserte Prozessbeschreibung zu werten ist, da selbst auffallend trockene bzw. feuchte Jahre mit hinreichender Genauigkeit beschrieben werden können.

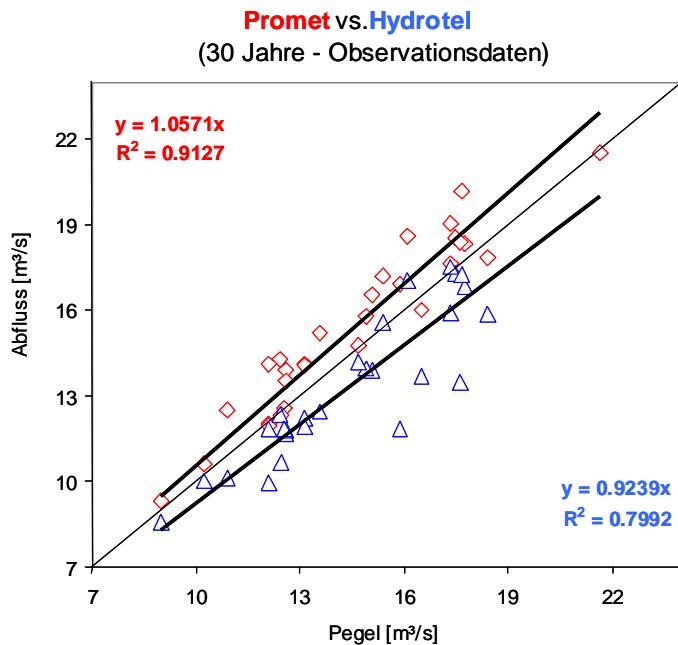


Abbildung 2.4: Jährliche Gebietsabflüsse der Ammer [m^3/s] im Zeitraum 1971-2000. Simuliert von PROMET (rot) und Hydrotel (blau) gegen die Messdaten am Pegel Weilheim

Tabelle 2.4: Gegenüberstellung einzelner hydrologischer Jahre

Jahr	Pegel [m^3/s]	Promet [m^3/s]	Differenz	Abw. [%]
1974	17,36	17,64	-0,28	-1,63
1982	17,72	18,36	-0,63	-3,57
1991	12,56	12,57	-0,02	-0,13
1994	12,46	12,37	0,09	0,75
1999	21,67	21,54	0,13	0,61

Jahr	Pegel [m^3/s]	Hydrotel [m^3/s]	Differenz	Abw. [%]
1974	17,36	15,90	1,46	8,41
1982	17,72	16,80	0,92	5,19
1991	12,56	11,86	0,70	5,57
1994	12,46	10,68	1,78	14,29
1999	21,67	18,05	3,62	16,71

In der direkten Gegenüberstellung des saisonalen Verlaufs des Abflussganges (Abflussregime) zeigen beide Modelle, bei den bereits erwähnten Offsets, einen weitgehend parallelen Verlauf, der den gemessenen Abflussgang sehr gut wiedergibt. Die systematische Überschät-

zung durch PROMET könnte durch eine zu starke Niederschlagskorrektur begründet werden, die eigentlich der Kompensation des systematischen Messfehlers an den Stationen dienen soll (und die in Hydrotel nicht eingesetzt wird). Auffallend ist der Einbruch des Abflussvolumens im Monat Mai. Als Begründung ist hier eine fehlerhafte Prozessbeschreibung der Schneedeckendynamik möglich. Der in PROMET implementierte Energiebilanzansatz führt unter gewissen Rahmenbedingungen (hoher Strahlungsinput, hohe Temperaturen) zu einem raschen Abschmelzen der Schneedecke, wodurch der unerwartet hohe Abfluss im Monat April und das fehlende Schneesmelzabfluss im Mai erklärt werden könnte (für diese Annahme sprechen auch hier nicht dargestellte Analysen auf Teileinzugsgebietsebene, die v.a. in den Gebirgsregionen ähnliche Effekte zeigen).

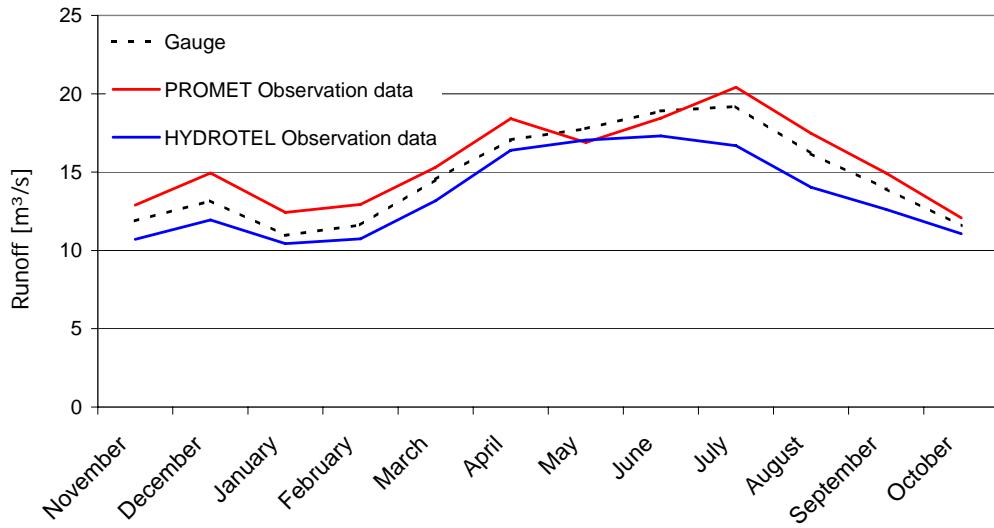


Abb. 2.5: Mittlere monatliche Abflüsse der Ammer [m^3/s] für den Zeitraum 1971-2000 (PROMET (rot), Hydrotel (blau)) gegen die Messdaten am Pegel Weilheim

Im unmittelbaren Vergleich der Abflussganglinien zeigt sich ein etwas anderes Bild, was sicherlich auf den vollständigen Verzicht auf das Gerinnerouting bei PROMET zurückgeführt werden kann. Für eine umfassende Bewertung wurde der Gesamtzeitraum in insgesamt sechs 5-Jahreszeiträume unterteilt. Exemplarisch zeigt Abb. 2.6 den gemessenen gegen den modellierten Abflussgang für den Zeitraum 1995-1999, Abb. 2.7 für das hydrologische Jahr 1999.

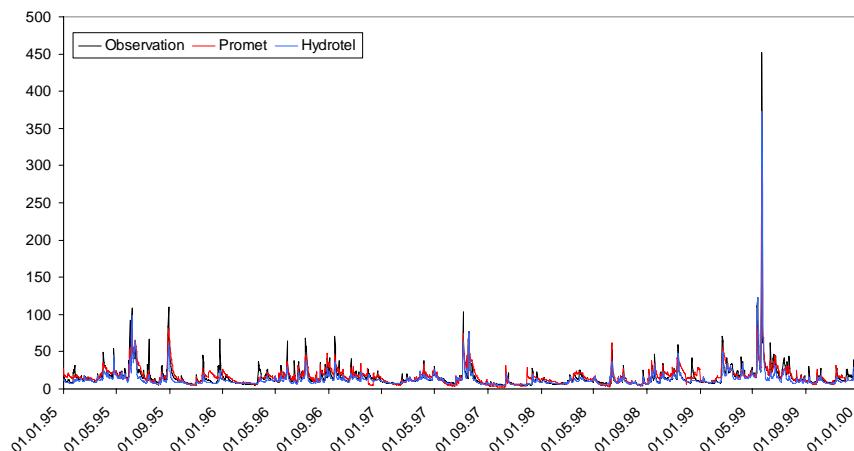


Abb. 2.6: Gemessener (schwarz) vs. modellierter Abflussgang für den Zeitraum 1995-1999 mit PROMET (rot) und Hydrotel (blau)

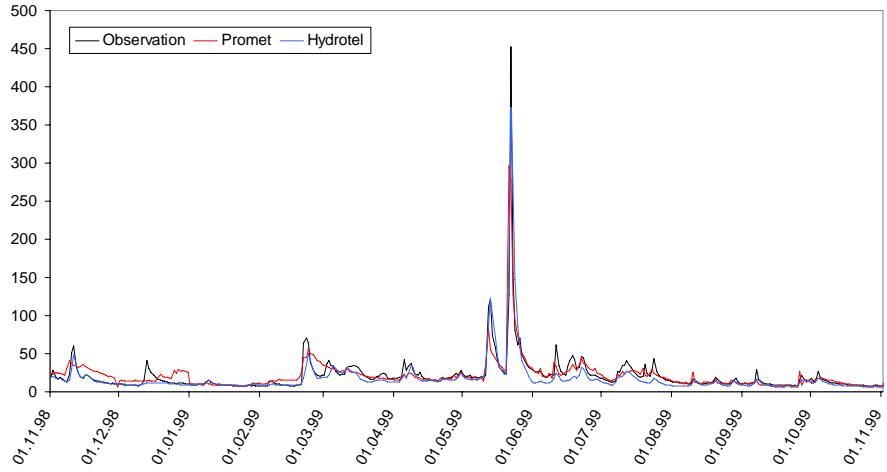


Abb. 2.7: Gemessener (schwarz) vs. modellierter Abflussgang für das hydrologische Jahr 1999 mit PROMET (rot) und Hydrotel (blau)

Zeitraum	Modell	NSC
01.01.1971- 01.01.1975	PROMET	0,58
	HYDROTEL	0,67
01.01.1975- 01.01.1980	PROMET	0,76
	HYDROTEL	0,66
01.01.1980- 01.01.1985	PROMET	0,60
	HYDROTEL	0,64
01.01.1985- 01.01.1990	PROMET	0,55
	HYDROTEL	0,73
01.01.1990- 01.01.1995	PROMET	0,60
	HYDROTEL	0,65
01.01.1995- 01.01.2000	PROMET	0,74
	HYDROTEL	0,83
01.11.1998 - 31.10.1999	PROMET	0,71
	HYDROTEL	0,65

In Tabelle 2.5 sind die sechs 5-Jahreszeiträume (und 1999 als Einzeljahr) mit den jeweiligen Nash-Sutcliffe-Koeffizienten dargestellt. Trotz der Abweichungen kann damit beiden Modellen eine zufrieden stellende Performanz attestiert und die Validierung als hinreichend gegeben angesehen werden. Es soll hierbei nochmals darauf verwiesen werden, dass es sich bei PROMET um ein unkalibriertes Modell handelt. Auf dieser Grundlage werden die Modelle nunmehr mit Daten eines regionalen Klimamodells betrieben und die unterschiedlichen Reaktionen auf veränderte Randwertbedingungen getestet.

Tabelle 2.5: Nash-Sutcliffe-Effizienz der Modelle für einzelne 5-Jahreszeiträume und das hydrologische Jahr 1999

2.4.2 Modellläufe auf Basis eines Regionalen Klimamodells

Ammer

Nach der weitgehend erfolgreichen Validierung der hydrologischen Modelle auf der Grundlage von meteorologischen Messdaten, wird im nächsten Arbeitsschritt zunächst untersucht, inwieweit die Resultate mit den Reanalyse-Daten ERA-40 reproduziert werden können. In der Folge werden die Daten eines historischen Klimalaufes (CGCM2 Past, d.h. regionale Klimatologie des Canadian Regional Climate Model CRCM vers. 3.7, angetrieben durch das Coupled Global Circulation Model Vers. 2) und eines Klimaszenarios auf Grundlage des Emissionszenarios A2 nach IPCC (CGCM2 Future, s.o.) eingespeist. Hiermit soll zum einen gezeigt werden, ob ein regionales Klimamodell imstande ist die vergangene Klimatologie abzubilden und zum anderen die (dramatischen) Veränderungen des durch dieses Szenario projektierten Zukunftsklimas aufgezeigt werden. In allen Beispielen liegen die meteorologischen Daten in einer zeitlichen Auflösung von 6 Stunden vor. Um die Daten die in einem sehr groben

Raster einer horizontalen Maschenweite von 45 km von den kanadischen Projektpartnern geliefert wurden, auf die wesentlich höher aufgelöste hydrologische Modellskala herunter zu brechen (PROMET 100m, Hydrotel gemäß RHHU), wird die Zentrumskoordinate jeder CRCM-Rasterzelle als (virtueller) Stationswert interpretiert. Danach setzen die jeweiligen Interpolationsalgorithmen an (PROMET – Höhenregression + IDW der resultierenden Residuen; Hydrotel – Thiessen-Polygone bzw. Mittelwertsbildung der 3 nächstgelegenen Stationen) um die regionale Klimatologie flächendifferenziert abzubilden. Abbildung 2.8 zeigt zunächst die Ergebnisse des PROMET-Modellaufes unter Verwendung der ERA-40-Daten in Form der langjährigen Wasserbilanz für das Einzugsgebiet der Ammer. Im Vergleich zu den Ergebnissen auf Grundlage der gemessenen Meteorologie fallen erhebliche Abweichungen auf, die sich sowohl in einem deutlich reduzierten Gebietsniederschlag (981 vs. 1289 mm) als auch in erheblich verminderten Verdunstungswerten äußern (321 vs. 478 mm). Die vergleichsweise gute Übereinstimmung im mittleren Gebietsabfluss ist demzufolge aus der Überlagerung der großen Fehler bei den anderen Wasserbilanztermen zu erklären.

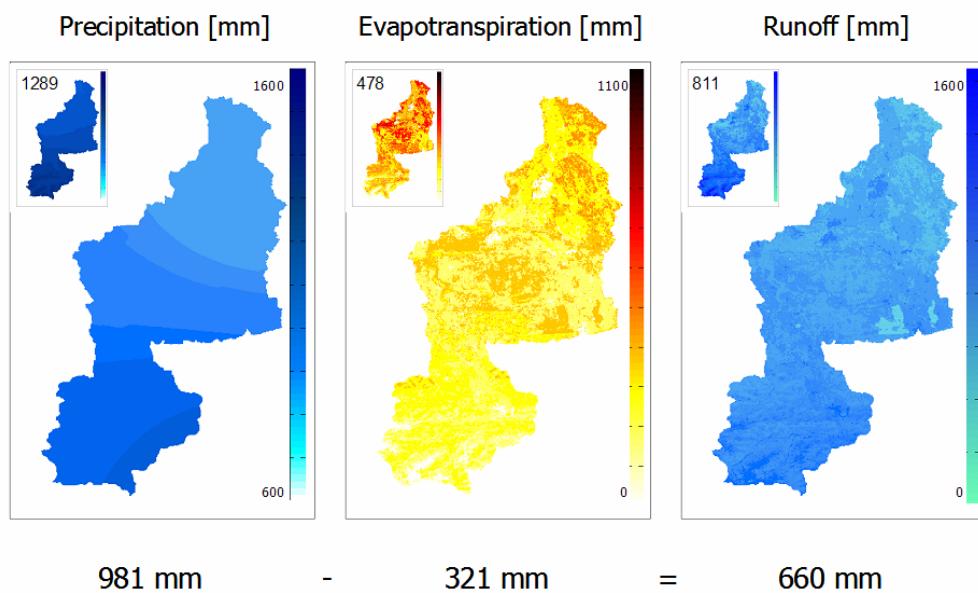


Abb. 2.8: Flächenhafte Verteilung der Wasserhaushaltskomponenten Niederschlag, Verdunstung und Abfluss im Ammergebiet (PROMET, ERA-40)

Eine genauere Interpretation der Abweichungen ergibt sich aus den mittleren monatlichen Abflusswerten, die in Abbildung 2.9 für beide Modelle dargestellt sind. Dabei fallen im ERA-40-Lauf zum einen die jeweils deutlich höheren Abflusswerte in den Frühjahrsmonaten März-Mai und die erheblich reduzierten Abflüsse in den Sommermonaten Juli-September auf. Dabei setzt auch hier Hydrotel mit der Schneeschmelze etwas später ein, erzeugt dadurch aber einen deutlich höheren Spitzenabfluss im Monat Mai (vs. April bei PROMET). Die Ursachen für diese Diskrepanzen finden sich in den meteorologischen Eingangsdaten für die Modellierung (Abb. 2.10). Während sich bei den monatlichen Niederschlägen im Winterhalbjahr gute Übereinstimmung feststellen lässt, klaffen in den Sommermonaten erhebliche Lücken, in denen bisweilen nicht einmal die Hälfte des tatsächlichen Niederschlags angegeben werden. Eine Begründung für diese Abweichungen kann in einer Nichtbeachtung des während der Sommermonate großen Anteils an Konvektivniederschlägen am Nordrand der Alpen liegen. Dazu scheint die Stauwirkung des Alpenkörpers bei der schlechten räumlichen Auflösung der Eingangsdaten (und der damit einhergehenden Unterschätzung der Topographie im Untersuchungsraum) nicht abgebildet zu werden. Ein zweiter wesentlicher Aspekt ist die schwerer zu begründende systematische Unterschätzung der monatlichen Mitteltemperatur. Besonders in

den Wintermonaten ist diese Abweichung eklatant. Da es sich bei den ERA-40-Daten um Assimilationsprodukte unter Berücksichtigung von Messdaten handelt, ist diese Unterschätzung eigentlich nicht zu erwarten. In der Folge akkumuliert während der frühen Wintermonate regelmäßig zu viel Schnee, der sich im Frühjahr in einer schmelzwasserinduzierten Abflussüberschätzung widerspiegelt. Die Ergebnisse der ERA-40-Modellierung müssen demzufolge als absolut unzureichend eingestuft werden.

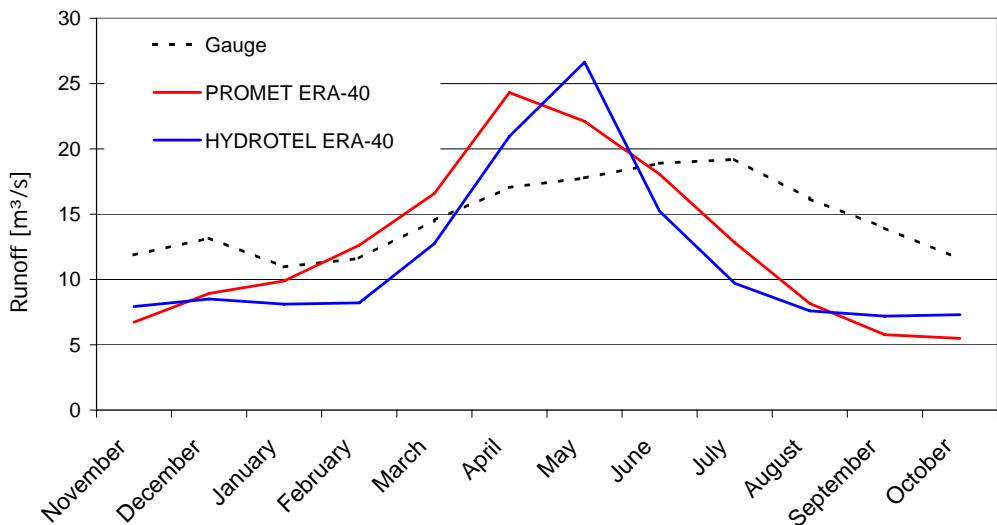


Abb. 2.9: Modellierte Abflussregime im Vergleich zu den Messdaten am Pegel Weilheim auf Basis der ERA-40-Daten

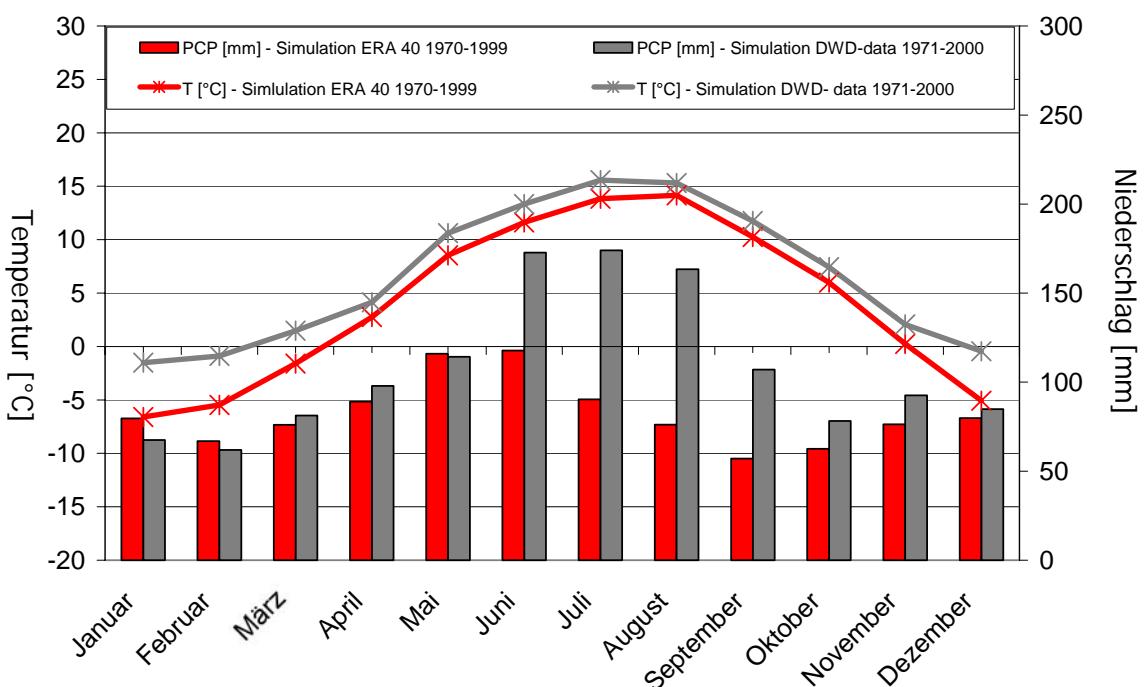


Abb. 2.10: Saisonale Verteilung der mittleren monatlichen Gebietsniederschläge und Lufttemperaturen (ERA-40 vs. DWD-Messdaten)

Ähnliche Effekte werden auch bei der Auswertung der ‚stand-alone‘-CGCM2-Läufe offensichtlich. Auch hier kommt es im historischen Lauf CGCM2 Past zu einer dramatischen Unterschätzung der Niederschlagssummen und der Lufttemperatur. Abbildung 11 zeigt die flächendifferenzierten Wasserhaushaltsterme in der Übersicht. Dabei werden die modellierten Wasserbilanzen für beide Modelle in Spaltenrichtung dargestellt (Messdaten, CGCM2 Past und CGCM2 Future). Interessant sind hierbei v.a. die spezifischen Veränderungen zwischen dem historischen Modellauf und dem Klimaszenario auf Basis von IPCC-A2, da hier ein unmittelbarer, wenn auch relativer Vergleich der Ergebnisse zulässig ist.

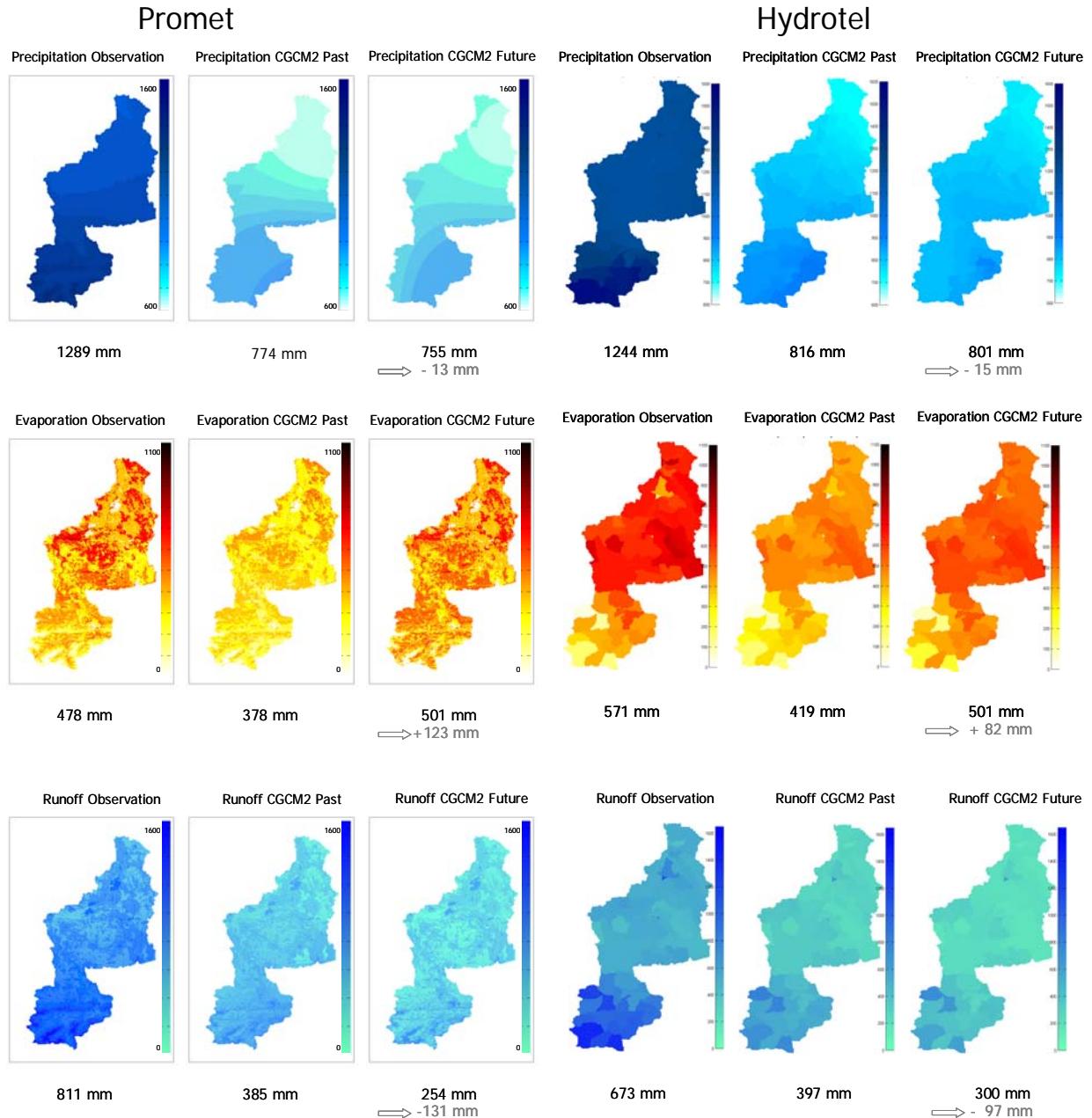


Abb. 2.11: Gegenüberstellung der flächendifferenzierten Wasserbilanzen für die Modellläufe unter Verwendung von Messdaten, CGCM2 Past und CGCM2 Future (in Spaltenrichtung von links nach rechts) für beide hydrologischen Modelle

Es zeigt sich, dass bei den Modellläufen auf Basis des regionalen Klimamodells (wie erwartet) auf insgesamt viel zu niedrigem Niveau marginale Veränderungen in der Jahressumme des Niederschlags bei geringfügigen saisonalen Verschiebungen auftreten (vgl. Abb. 2.12). Im historischen Klimalauf CGCM2 Past verursacht eine wiederum viel zu geringe Temperatur (vgl. Abb. 2.12) einen deutlichen Einbruch der Verdunstungswerte gegenüber den Modellläufen auf Basis der Messwerte, die besonders bei der Hydrotel–Modellierung auffallen. Hier weist dieses Modell eine deutlich höhere Sensitivität auf, was wiederum als Indiz für eine nicht zureichende Erfassung der die Verdunstung steuernden Prozesse gewertet werden kann. Im Gegenzug bewirkt die erhebliche Temperaturzunahme zwischen CGCM2 Past und CGCM2 Future eine deutliche Zunahme der Evapotranspiration in beiden Modellen. Als Folge des bei PROMET niedrigeren Gebietsniederschlags ergibt sich hier bei gleichen Verdunstungswerten des CGCM2 Future Datensatzes eine deutlich reduzierte Abflusssumme (254 mm vs. 300 mm). Während der historische Klimalauf bei erheblich reduzierten Absolutwerten zumindest relativ vergleichbare Dynamiken zu den Messwerten aufweist, fällt auf, dass der modellierte Abflussgang im Zukunftslauf in beiden Modellen eine deutlich niedrigere Amplitude aufweist (vgl. Abb. 2.13). Markante Unterschiede in den flächendifferenzierten Mustern der Wasserhaushaltsterme ergeben sich zwischen historischem und Zukunftslauf kaum. Insgesamt spiegelt der Modellvergleich wiederum die Abhängigkeit von der Raumrepräsentanz wieder – für eine Bewertung der räumlichen Unterschiede und Verortbarkeit der hydrologischen Prozesse hat hier der rasterbasierte Ansatz von PROMET sicherlich Vorteile. Dennoch scheinen beide Modelle sehr ähnlich auf den veränderten klimatologischen Antrieb zu reagieren. Eine absolute Bewertung der Modellperformanz für Fragstellungen im Kontext des Klimawandels kann deshalb nicht abschließend gegeben werden. Durch die deutlich höhere Rechenleistung und dem erheblich geringeren Parametrisierungsaufwand von Hydrotel gegenüber PROMET hat dieses Modell hier sicherlich auch deutliche Vorteile aufzuweisen, die in weiterführenden Untersuchungen analysiert werden müssen.

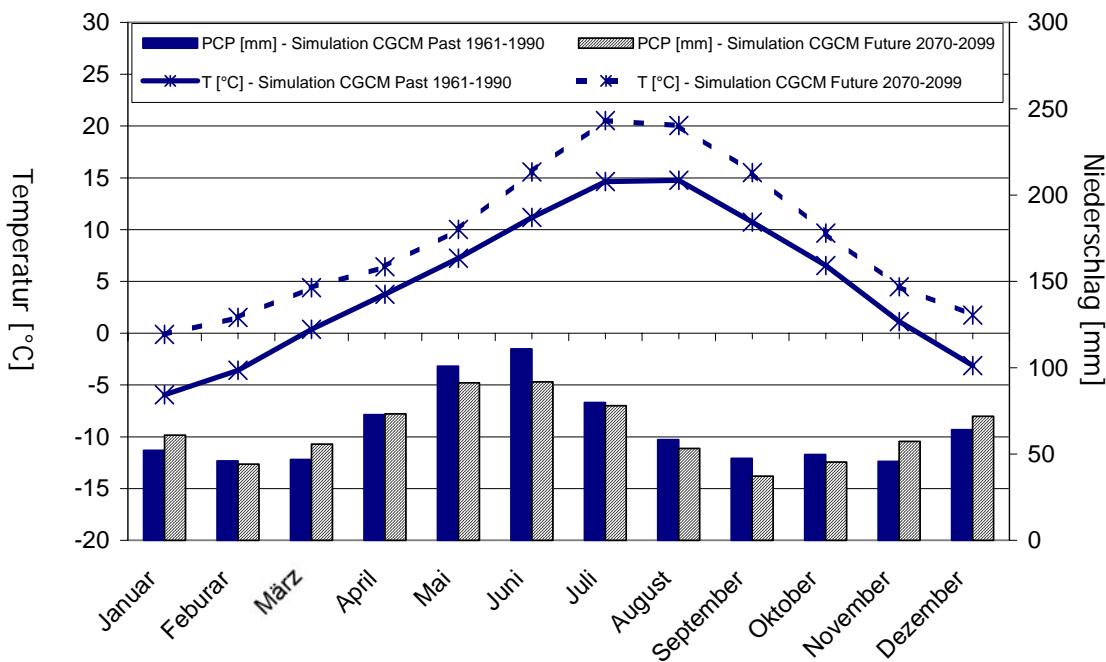


Abb. 2.12: Saisonale Verteilung der mittleren monatlichen Gebietsniederschläge und Lufttemperaturen (CGCM2 Past vs. CGCM2 Future)

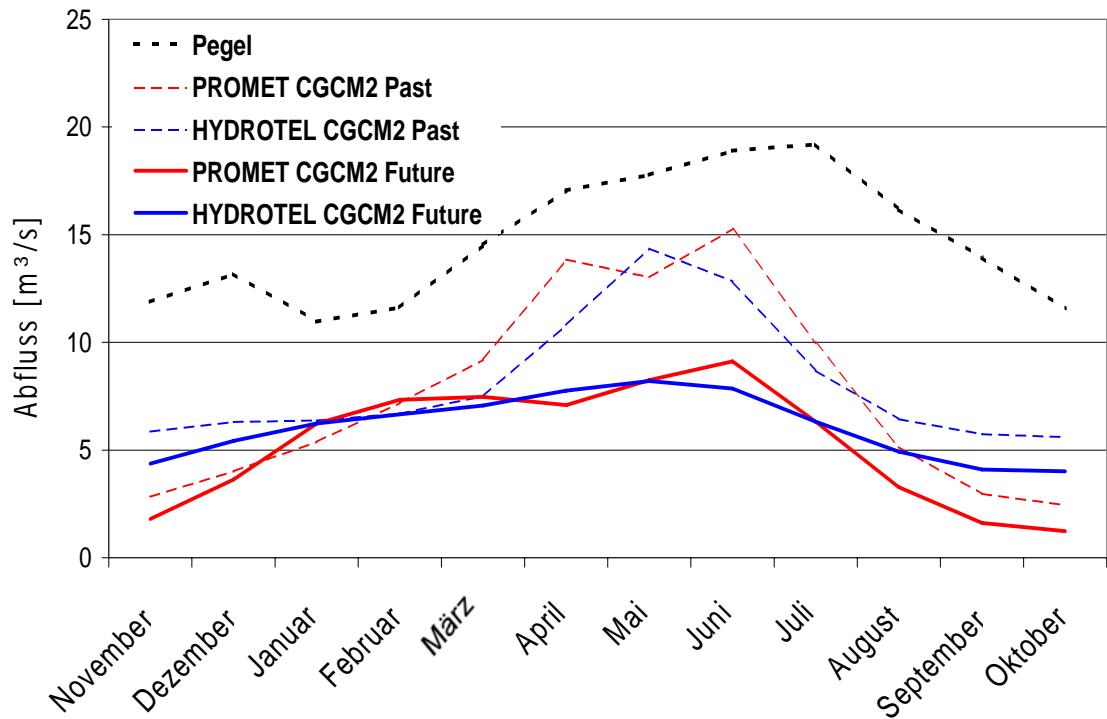


Abbildung 2.13 Abflussganglinien simuliert von PROMET und Hydrotel auf Basis von CGCM2- Past und CGCM2- Future Daten gegenüber den Pegelaufzeichnungen

Châteauguay

Für das Einzugsgebiet des Châteauguay standen leider keine meteorologischen Messdaten zur Verfügung, die den Anforderungen des Modells PROMET hätten gerecht werden können. Modelliert werden konnten jedoch mehrere Läufe auf Grundlage der regionalen Klimamodelldaten, für die im Einzugsgebiet des Châteauguay Daten einer aktuelleren Modellversion zur Verfügung standen (CRCM4, angetrieben durch das CGCM der Modellversion 3). Die verfügbaren Daten erwecken den Anschein, dass hier mit weit weniger gravierenden Einschnitten in den Wasserhaushalt durch einen Klimawandel gerechnet werden kann. Es ist klar, dass auf der Grundlage eines einzelnen Klimamodelllaufes keine eindeutigen Aussagen zulässig sind. Hier müssen weiterführende Untersuchungen mit Ensemble-Simulationen zu einer belastbareren Aussage verhelfen. Dennoch lassen sich einige Auffälligkeiten festhalten, die im Folgenden in einigen Abbildungen zusammengefasst werden. Der geringere Datenbedarf von Hydrotel ermöglicht hierbei die Simulation einer 30-jährigen Zeitreihe auf der Basis von Messdaten. In Abbildung 2.14 sind die Resultate dieses Laufes den Ergebnissen des historischen und zukünftigen Laufes gegenübergestellt. Abbildung 2.15 zeigt die Ergebnisse der Modellierung mit PROMET auf der Basis des regionalen Klimamodells. Auch hier wird die zunehmende Verdunstung als Folge der Temperaturerhöhung weitgehend durch eine Zunahme der Gesamtniederschläge kompensiert. Sehr stark auffallend ist jedoch das deutlich niedrigere Niveau der Abflüsse in der Hydrotel-Modellierung bzw. die dort wesentlich höhere Verdunstung, die allerdings in Anbetracht des dargestellten Wertebereichs (fast 900 mm im Falle der Projektion eines zukünftigen Klimas) als unrealistisch einzustufen ist. Tabelle 2.6 fasst die Ergebnisse für die Modellierungen im Gebiet des Châteauguay in der Übersicht zusammen.

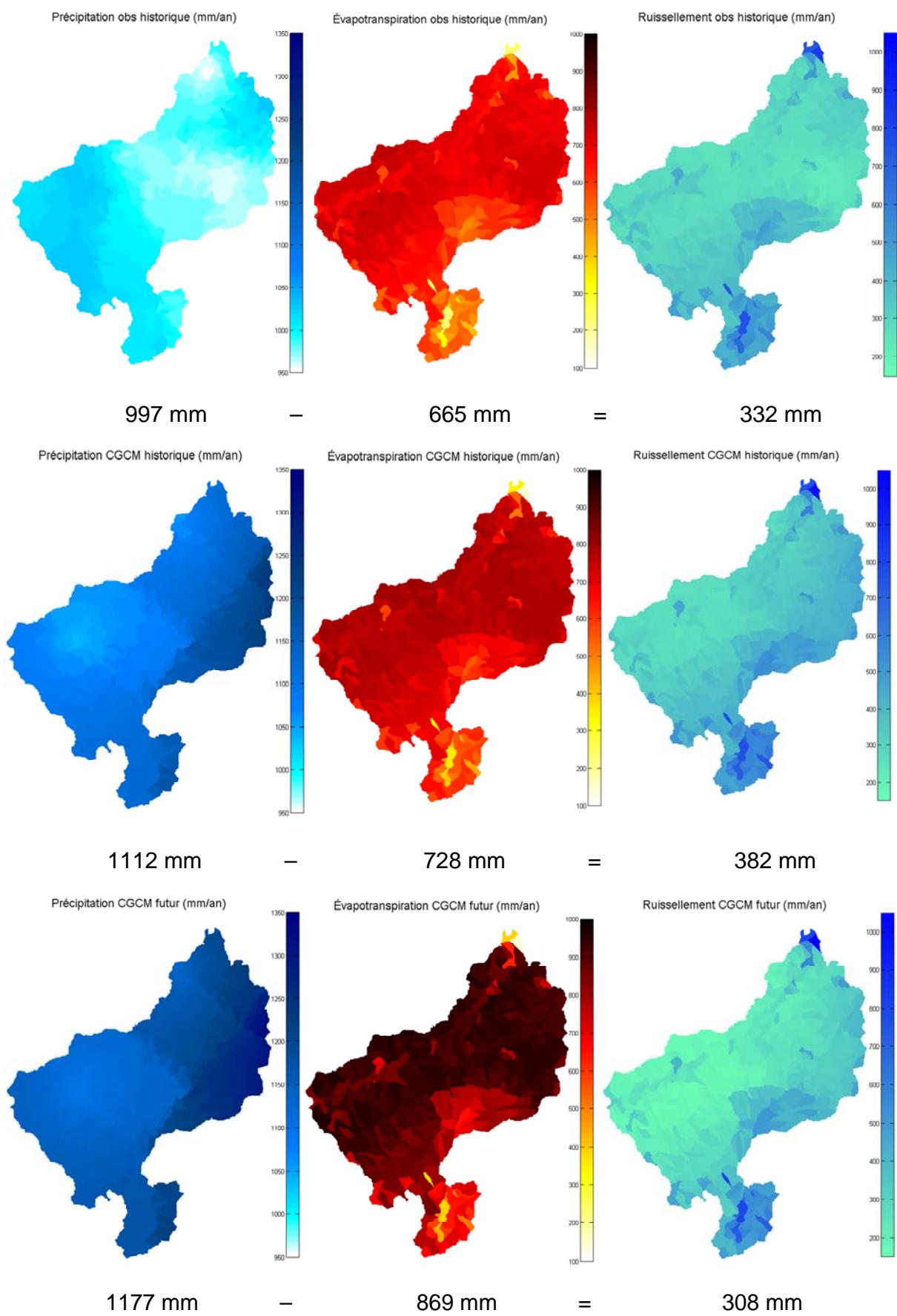


Abb. 2.14: Flächenhafte Verteilung der Wasserhaushaltskomponenten Niederschlag, Verdunstung und Abfluss im Châteauguaygebiet (Hydrotel mit Messdaten (oben), historischem Klima (CRCM4-CGCM3 past, Mitte) und projektiertem Klima (CRCM4-CGCM3 future))

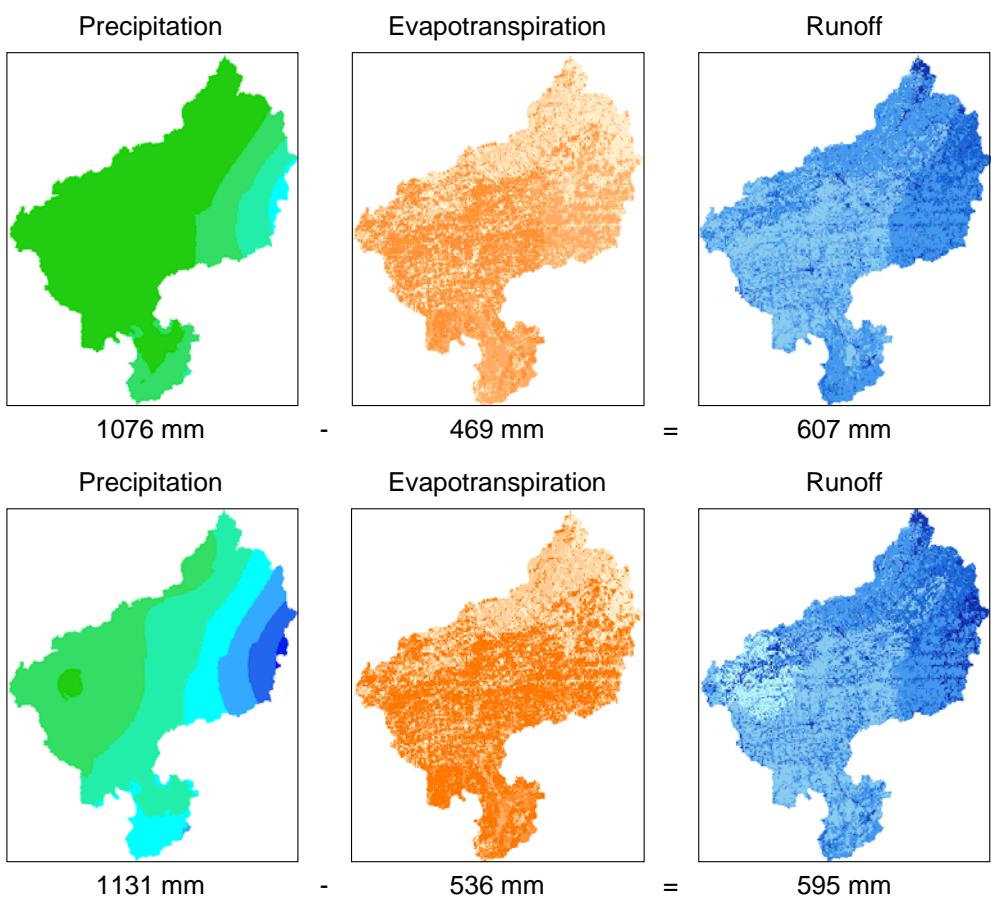


Abbildung 2.15 Flächenhafte Verteilung der Wasserhaushaltskomponenten Niederschlag, Verdunstung und Abfluss im Châteauguaygebiet (PROMET auf Basis der Daten von CGCM3-Past (oben) und Future (unten))

Tabelle 2.6: Zusammenfassung der Modellläufe für das Châteauguay-Gebiet

Referenzzeitraum (1961-90)	Niederschlag (mm)	Evapotranspiration (mm)	Abfluss (mm)
Hydrotel (obs)	997	665	332
Hydrotel (ERA/40)	1202	750	452
Promet (ERA/40)	1145	457	688
Hydrotel (CRCM4)	1112	728	382
Promet (CRCM4)	1076	469	607

Zukunftsszenario (2040-2070)	Niederschlag (mm)	Evapotranspiration (mm)	Abfluss (mm)
Hydrotel (CRCM4)	1117	869	308
Promet (CRCM4)	1131	536	596

3 Workpackage II: Konzeptualisierung und Design eines Frameworks für integrative Forschung zum Klimawandel in Québec und Bayern

Die Bedeutung von Workpackage II liegt in der Konzeptualisierung und des Designs eines Frameworks für eine längerfristig angelegte Initiative zur integrativen Forschung im Bereich der Klimafolgenforschung und der Entwicklung von Anpassungsstrategien und Entscheidungsunterstützung in den Ländern beider beteiligter Partner. Die Arbeiten in diesem Workpackage verlangten eine enge Kooperation zwischen den Partnern zur wechselseitigen intensiven Nutzung von Kernkompetenzen im integrativen Modelldesign (LMU) und der Einbindung von Stakeholdern (Ouranos) sowie den Expertises in Simulationstechnologien und der Kenntnis von Prozessen im Zusammenhang mit dem globalen Klimawandel (beide Partner).

Ziel der Zusammenarbeit in Workpackage II war die Herausarbeitung der Anforderungen an ein Integratives Einzugsgebietsmodell in Québec und Bayern unter Berücksichtigung der jeweiligen Akteure in den Partnerländern. Dies umfasst zum Einen die Identifikation der Kernthemen im Hinblick auf Fragestellungen, die sich aus den Folgen des globalen Klimawandels ergeben. Zum Anderen wurde ein Framework entwickelt, welches die Funktionsweise eines angepassten Einzugsgebietsmodells aufzeigt und die Rollen der Akteure entwickelt, sowohl auf der Entwicklerseite als auch auf Seiten der Nutzer eines solchen zukünftigen Modells.

Die Darstellung der Ergebnisse dieser Arbeiten erfolgte mit Hilfe der graphischen Modellierungssprache UML (Unified Modeling Language). In der Synthese der gewonnenen und dargestellten Erkenntnisse entstand eine klare Strukturierung der beabsichtigten zukünftigen Zusammenarbeit der Partner LMU und Ouranos, wobei auf beiden Seiten der Kollaboration die Bedeutung einer engen Zusammenarbeit mit den Akteuren auf Seiten der Länderverwaltung deutlich wird.

3.1 Identifikation von Kernthemen

Zur Eingrenzung der zu berücksichtigenden Themenbereiche für die durchgeführte Pilotstudie wurden von den Projektpartnern Kernthemen festgelegt auf die sich die vorliegenden Studien beziehen. Die Kernthemen wurden zu Beginn der Zusammenarbeit erarbeitet und spiegeln die vorrangigen Bereiche wieder, die sich (i) durch besondere Vulnerabilität hinsichtlich des globalen Klimawandels auszeichnen und die (ii) Ihrem Umfang nach im Rahmen der Pilotstudie berücksichtigt werden konnten. Sie dienten als Leitfaden für die Erstellung der Use Cases und finden sich daher in den unten dargestellten möglichen Anwendungsfällen für ein zukünftiges integriertes Einzugsgebietsmanagementwerkzeug wieder. Die identifizierten Kernthemen umfassen

- Niedrigwasser: Mit der Betrachtung dieses Kernthemas sollen die Folgen des Klimawandels hinsichtlich der Veränderung der Häufigkeiten problematischer Niedrigwassерstände untersucht werden. Die diesbezüglichen Fragestellungen umfassen die bekannten ökonomischen und ökologischen Auswirkungen von Niedrigwassern sowie deren Veränderung durch ein sich wandelndes Klima. Die Thematik wurde von beiden Projektpartnern als prioritäres Kernthema identifiziert und stellt sich in den Regionen von Bayern und Québec gleichermaßen als für die Zukunft zunehmend problembehaftet dar.

- Hochwasser: Das Kernthema Hochwasser wurde ebenso wie Niedrigwasser als prominente Fragestellung in Bezug auf die Klimaveränderung identifiziert. Die Erfassung der Gefährdungspotentiale durch Hochwässer sowie deren ökonomische Folgen liegen im zentralen Interesse der Untersuchung von Klimafolgen beider Projektpartner. Die numerische Modellierung solcher zukünftiger Extremereignissen unterliegt jedoch Einschränkungen, die sich aus der Dynamik ergeben die mit heutigen Klimamodellen dargestellt werden kann. Einzelne Extremniederschläge werden von diesen nicht erfasst, so daß sich die Betrachtung dieses Kernthemas auf die Veränderung jährlicher Amplituden beschränken muß.
- Landnutzungsänderungen: Veränderungen der Landnutzung werden sowohl als Folge der Klimaerwärmung als auch aus diversen ökonomischen Gründen (auch mit Klimabezug) in beiden Partnerländern erwartet. Die Untersuchung der Art der Veränderungen sowie deren hydrologische Folgewirkung stehen im Zentrum der Betrachtung dieses Kernthemas. Die zu berücksichtigenden Änderungen der Landnutzung umfassen dabei sowohl einen natürlichen Wandel aufgrund veränderter klimatischer Verhältnisse als auch anthropogene Reaktionen und Eingriffe, die die Landbedeckung betreffen. In diesen Kernthemenbereich fallen zudem die Analyse möglicher Adoptionsstrategien die durch Beeinflussung der Landnutzung auf den Klimawandel reagieren (z.B. Aufforstung, künstliche Feuchtgebiete).
- Kommunikation von Ergebnissen: Dieses Kernthema widmet sich der Untersuchung der Verbesserung der Möglichkeiten der Außenkommunikation der im Bereich der Klimafolgenforschung erlangten Erkenntnisse. Es wird dabei ermittelt, in welche Ergebnisse nach außen getragen werden sollen und in welche Formen der Darstellung und Informationsvermittlung sich am besten für diese Kommunikation eignen.

Vor dem Hintergrund dieser Kernthemen wurden die Arbeiten für das Workpackage II durchgeführt. Die im Folgenden aufgeworfenen Fragestellungen und Anwendungsfälle für ein zukünftiges integriertes Einzugsgebietsmodell lassen sich jeweils einem der Kernthemen zuordnen.

3.2 System der Stakeholder

Im Zuge der Entwicklung eines Frameworks für integrative Einzugsgebietsmodellierung ist die Einbindung der beteiligten Akteure ein bedeutender Bestandteil. Um die Anwendungsmöglichkeiten eines integrierten Einzugsgebietsmodells zu entwickeln ist daher die Identifizierung der tragenden Stakeholder und deren Rollen ein entscheidender Schritt. Involviert sind dabei Stakeholder von verschiedenen Institutionen, Verwaltungsstellen und Akteure aus dem privaten Sektor. Abbildung 3.1 veranschaulicht, wie diese einzelnen Stakeholder schalenartig um das integrierte Einzugsgebietsmodell gruppiert werden können, mit jeweils varierend enger Verbindung zum Modell. Je nach Abstand zum Modell haben die Stakeholder unmittelbar oder mittelbar Zugriff auf das Modell.

Im Kern der Konzeption des Systems der Stakeholder wird das integrierte Einzugsgebietsmodell plaziert und bezeichnet den Modell-Level (*model level*). Die Stakeholder mit der engsten Verbindung zum Modell selbst sind die Entwickler und Betreiber des Modells die sich im Entwickler-Level vereinen (*developer level*). Dieser Level umfasst alle direkt mit der Forschung und Entwicklung sowie der Operation des Modells befassten Gruppen. In enger Zusammenarbeit mit den Akteuren des Entwickler-Levels besteht für die Akteure des nächsten Levels die Möglichkeit, das Modell für ihre Zwecke in privaten und öffentlichen Institutionen

anzuwenden. Als Nutzer und/oder Käufer des Modells sind diese Stakeholder platziert auf der Ebene des Nutzer-Levels (*user level*). Die Stakeholder dieses Levels umfassen alle Akteure, die aus der Verwendung des Modells einen Mehrwert erzeugen können. Auf einer weiteren Ebene außerhalb des Nutzer-Levels umfasst der Wirkungsbereich der Beurteilung und Bewertung von Klimafolgen eine entferntere Gruppe von Stakeholdern. Diese Gruppe umfasst all diejenigen die unmittelbar oder mittelbar von der Erfassung von Klimafolgeerscheinungen auf Einzugsgebietsebene profitieren und wird als Nutznießer-Level bezeichnet (*beneficiary level*).

Die im Folgenden präsentierten Anwendungsfälle (Use Cases) konzentrieren sich auf die drei inneren Ringe des Zwiebelschalenmodells der Stakeholder. Sie beinhalten dabei Darstellungen der inneren Funktionsweise des Modells auf der Ebene des Modell-Levels, die Rollen der Stakeholder auf der Ebene des Entwickler-Levels sowie die Wünsche und Anforderungen der Stakeholder auf dem Benutzer-Level. Während die Ausarbeitung der Anwendungsfälle der beiden inneren Level den Erfahrungen aus dem GLOWA-Danube Projekt an der LMU entlehnt ist, wurde die Entwicklung der Use Cases auf dem Nutzer-Level stark durch die Expertise von Ouranos im Bereich der Einbindung von Stakeholdern unterstützt.

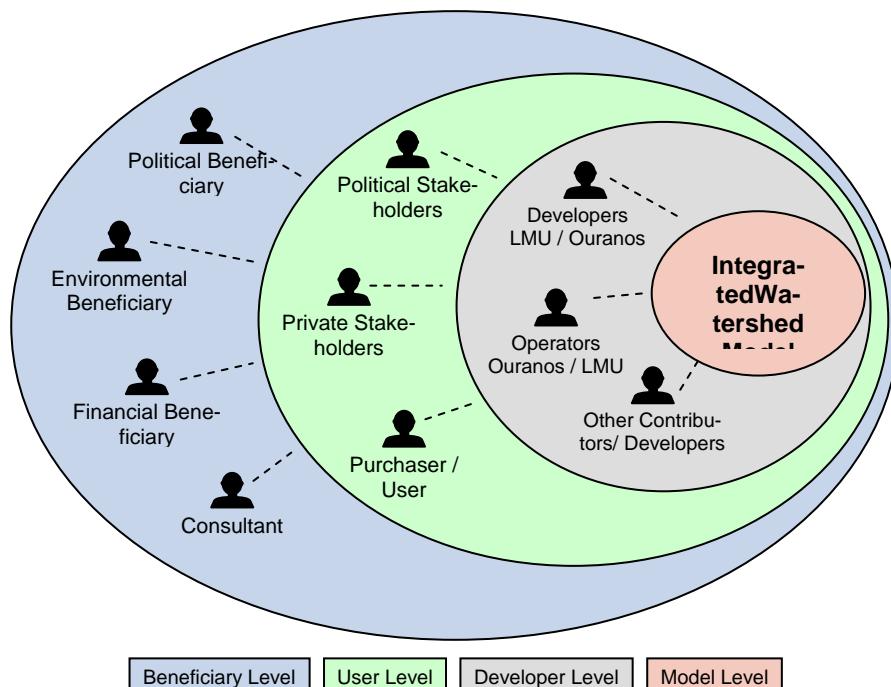


Abbildung 3.1: Zwiebelschalenmodell der Stakeholder eines integrativen Einzugsgebietsmodells

3.3 Konzeption der Use Cases

Use Cases stellen ein höchst effizientes Werkzeug zur Anforderungsdefinition von Software dar. Sie vermitteln eine Vorstellung davon wofür eine zu programmierende Software gedacht ist und was sie letztendlich tun soll. Use Cases beinhalten dabei den Akteur der die Software für sich einsetzt und stellen dar, was das Resultat der Softwarenutzung sein soll. Die Beschreibung von Use Cases stellt somit einen Ausschnitt aus dem Wirken eines Akteurs dar. Sie erfassen das Verhältnis eines Stakeholders zu einem System sowie dessen Verhalten unter varierenden Bedingungen..

Die Kommunikation der Aufgaben die eine Software lösen soll ist grundlegend bei Entwurf und Entwicklung eines jeden größeren Computerprogramms. Für das Unterfangen der Integration mehrerer numerischer Modelle mit Wasserbezug zur integrierten Einzugsgebietsmodel-

lierung ist daher die Erarbeitung von Use Cases ein Schritt von herausragender Bedeutung. Use Cases stellen dabei eine entscheidende Hilfe bei der Ermittlung der erforderlichen Komplexität eines solchen Modells dar, damit es in der Lage ist, die Nutzeranforderungen zu bedienen, die sich aus den Fragestellungen ergeben, die der Klimawandel aufwirft. Gleichzeitig soll dabei höchstmögliche Simplizität des Modells erreicht werden, um Rechenzeiten und – kosten minimal zu halten. Mit der Hilfe von Use Cases kann der Umfang dieses Softwareprojektes beschrieben werden und eine klare Darstellung dessen erreicht werden, was genau die Software leisten muß und welche Teile nicht erforderlich sind.

In den folgenden Beschreibungen der Anforderungen an ein integriertes Einzugsgebietsmodell werden zwei Möglichkeiten der Darstellung von Use Cases verfolgt und miteinander kombiniert. Die erste ist die schriftliche Erfassung der Use Cases, welche in kurzen prägnanten Worten wiedergibt, wer die Software benutzt und was das Ergebnis der Nutzung sein soll. Die andere Möglichkeit nutzt die Notation der Unified Modeling Language (UML) um die Akteure, die Anwendungsfälle und ihre Beziehungen auf anschauliche graphische Art darzulegen. Jeder Use Case wird in beiden Notationen dargelegt um die Anwendung des zu entwickelnden integrierten Einzugsgebietsmodells zu verdeutlichen. Die vorliegenden Use Cases wurden in enger Kollaboration mit den Projektpartnern von Ouranos erstellt und sind daher in der gemeinsamen Projektprache Englisch gehalten.

3.3.1 Beschreibung der Use Cases

Die schriftlichen Darlegungen der Use Cases wurden in Anlehnung an ein von Cockburn (2001) vorgeschlagenes Schema erstellt. In ihnen wird ein primärer Akteur (*primary actor*) in den Use Cases aufgeführt und dessen Interessen (*interest*) beschrieben. Dabei wird der Geltungsbereich (*scope*) des Use Cases markiert sowie eine Zuordnung hinsichtlich des Stakeholder-Levels im System der Stakeholder vorgenommen (Abbildung 3.1). Die Vorbedingungen (*preconditions*) für den Anwendungsfall werden zusammengefasst, um die Dinge darzulegen, die geschehen sein müssen, damit der Use Case operabel wird. Ebenso werden die Minimalen Anforderungen (*minimum requirements*) für den Anwendungsfall identifiziert sowie eine minimale Gewähr (*minimal guarantee*) und eine Erfolgsgewähr (*success guarantee*) über das Leistungsspektrum der Software formuliert. Der Auslöser (*trigger*) für alle Use Cases wird dabei sehr allgemein als „Klimawandel“ identifiziert. Schließlich listen die tabellarischen Beschreibungen der Use Cases die Schritte auf, die erforderlich sind um das Erfolgsszenario (*success scenario*) des Softwareeinsatzes zu erreichen. Das Erfolgsszenario kann dabei Erweiterungen aufweisen (*extensions*) die unter bestimmten Bedingungen aufgegriffen werden und in Varianten (*variations*) aufgelöst werden, die Veränderungen des Use Cases beinhalten.

3.3.2 Darstellung der Use Cases als UML Diagramm

Die Unified Modeling Language (UML) ist eine Sprache zum Spezifizieren, Konstruieren, Visualisieren und Dokumentieren der Teile eines softwareintensiven Systems (Booch et.al., 2005). Ihr Hauptzweck liegt in der Abstrahierung von tatsächlichem Programmcode einer hochentwickelten objektorientierten Programmiersprache (OOP) und erlaubt eine stärker intuitive Beschreibung des Aufbaus objektorientierter Computersoftware. UML stellt eine Methode dar, konzeptionell ebenso wie konkret Entwürfe eines Systems zu erstellen und dabei Geschäftsprozesse, Systemfunktionalität, Klassen einer Programmiersprache, Datenbanken und wiederverwendbare Softwarekomponenten abzubilden. UML verwendet eine graphische Notation, deren Inhalte des Layouts und der Interaktion von Objekten eines Sofwaresystems direkt und automatisch in objektorientierte Programmiersprachen wie Java, C++ oder .NET übersetzt werden können. UML ist dabei ein Industriestandard der Object Management Group

(OMG www.omg.org) und ist von besonderem Nutzen in Bereichen wo intensive Kommunikation über ein in der Entwicklung befindliches System erforderlich ist. Um eine solche Kommunikation zu ermöglichen unterstützt die derzeitige UML Version 2.1 eine Schar von 13 verschiedenen Diagrammtypen zur Modellierung verschiedener Aspekte der Software mit varierender Detailgenauigkeit. Zwei dieser Diagrammtypen kommen im Folgenden zur Anwendung: Klassendiagramme und Use Case Diagramme.

Wie jede Art von Modellierung ist die Modellierung von Software per UML eine Vereinfachung der Realität. Diese Vereinfachung hilft beim Verständnis eines komplexen Systems welches anderenfalls in seiner Gesamtheit kaum erfasst werden kann. UML Softwaremodelle unterstützen die Visualisierung des gewünschten Systems und erlauben die Spezifikation seiner Struktur und seines Verhaltens. Während einerseits eine Vorlage für das System erstellt wird, dient das Modell gleichermaßen als Dokumentation des Systems und seiner Entwicklung. Da die meisten interessanten Systeme eine Tendenz haben mit der Zeit zunehmend komplexer zu werden, ist insbesondere diese Dokumentation von besonderem Nutzen.

Ein Werkzeug zur Modellierung eines Systems zu verwenden hat einen grundsätzlichen Einfluß darauf, wie das Problem adressiert wird und wie sich die Lösung gestaltet. Für die Entwicklung eines integrierten Einzugsgebietsmodells ist die Verwendung objektorientierter Softwareentwicklung ein entscheidender Faktor. Die Verwendung eines Standards wie UML stellt dazu ein anspruchsvolles und etabliertes Werkzeug zur Verfügung. Es erlaubt die Darstellung der Teile des zu entwickelnden Systems auf unterschiedlichen Ebenen der detailtreue sowie varierende Blickwinkel auf das System während es direkt mit dem tatsächlichen Programmcode gekoppelt ist.

Die hier gezeigten UML Diagramme erfüllen unterschiedliche Zwecke und liefern Informationen für verschiedene Ebenen des Systems. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt der Entwicklung ist jedoch zu viel Detail der Implementierung nicht wünschenswert. Daher werden Klassendiagramme verwendet um eine sehr allgemeine Darstellung sehr allgemeiner Klassen des Systems zu erstellen, die noch weitestgehend unabhängig von der Implementierung sind. Der Schwerpunkt in diesem Stadium liegt in der Analyse und Beschreibung der Nutzung eines integrierten Einzugsgebietsmodells. Diese wird mit Hilfe von UML Use Case Diagrammen erreicht.

UML Use Case Diagramme werden aus wenigen einfachen Elementen erstellt: Akteure, Use Cases und Beziehungen dazwischen. Wie in Abbildung 3.2 gezeigt, werden Akteure als Strichmännchen gezeichnet und Use Cases als Ellipsen. Die Beziehungen werden in vier Typen unterteilt:

- Assoziationen – interaktion zwischen Akteuren und/oder Use Cases
- Generalisierungen – eine Beziehung zwischen einer allgemeineren Basis und einer spezifischeren Unterordnung eines Akteurs oder eines Use Cases
- <<include>> – das Verhalten eines eingeschlossenen (included) Use Cases wird in das Verhalten des einschließenden Use Cases eingefügt
- <<extend>> – ein erweiternder (extending) Use Case definiert eine Anzahl modularer Verhaltenserweiterungen die unter bestimmten Bedingungen die Ausführung des erweiterten Use Cases verändern

Die UML Use Cases werden in Kombination mit den Beschreibungen der Use Cases dargestellt. Sie illustrieren und formalisieren die schriftliche Niederlegung der Use Cases

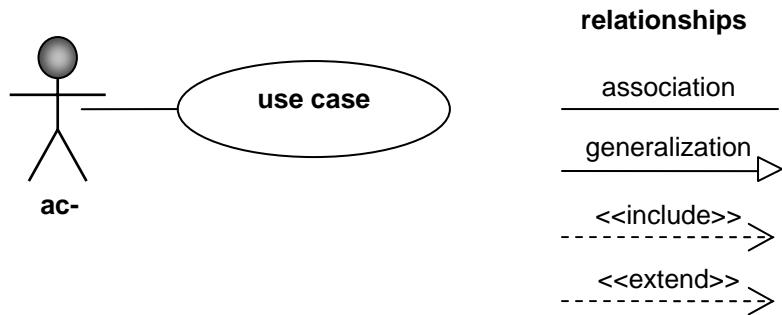


Abbildung 3.2: Elemente von UML Use Case Diagrammen

3.4 Allgemeines Framework für ein Integriertes Einzugsgebietsmodell in UML

Die allgemeine Struktur eines integrierten Einzugsgebietsmodells wurde anhand von UML Diagrammen entwickelt. Das Framework illustriert den modularen Aufbau eines Modellverbunds, dessen Elemente über Interfaces (Schnittstellen) lose gekoppelt sind. In den Folgenden Abschnitten werden verschiedene Sichten auf das Modell, seine Entwicklung und das Betreiben gezeigt. Das allgemeine Framework wird dabei zunächst in seiner Architektur als UML Klassendiagramm dargestellt. Welche Rollen die Akteure des Entwickler-Levels bei der Umsetzung des Vorhabens einnehmen, wird daraufhin in einem UML Use Case Diagramm entwickelt. Die Aufgaben der einzelnen Teilmodele wird mit einem ebensolchen Diagramm erläutert, in dem die Modelkomponenten die Akteursrolle einnehmen. Abschließend wird ein Überblick vermittelt über die Setup-Anforderungen die für ein Betreiben des Modells erfüllt werden müssen.

In den darauffolgenden Kapiteln 3.5-3.7 werden explizite Anwendungsfälle (use cases) in UML-Notation dargestellt. Ein Komposit dieser Anwendungsfälle faßt die ermittelten Anforderungen an ein Wasserhaushaltsmodell der nächsten Generation zusammen und wurde ebenfalls in UML erstellt. Es ist im Anhang einzusehen.

3.4.1 Architektur des Modellverbunds

Ein gründliches Design der zu entwickelnden Software stellt einen fundamentalen Schritt für die erfolgreiche Implementierung eines Nutzerorientierten integrierten Einzugsgebietsmodells dar. Allerdings ist für den Rahmen der vorliegenden Pilotstudie kein umfassender Entwurf möglich. Eine generelle Konzeption der Architektur des Modell wird jedoch in Abbildung 3.3 gezeigt. Sie stellt die Komponenten des Modells dar und die Wege der Interaktion zwischen den Modellen über die zu entwickelnden Interfaces. Die einzelnen Module umfassen eine Komponente zur Bereitstellung von Klimaszenarien wie sie in Klimamodellen generiert werden, eine Komponente die die Simulation der hydrologischen Prozesse steuert, ein Modell zur Beschreibung der Speicherbewirtschaftung sowie eine Modul zur Modellierung der Wasserqualität. Die Komponenten arbeiten parallel und sind über die als runde Symbole dargestellten Interfaces verbunden. Über diese Interfaces tauschen die Modelle die erforderlichen Daten aus. Die Details der Interfaces werden in der Art der Darstellung vernachlässigt. Ebenso werden die aus jeweils einer eigenen objektorientierten Klassenarchitektur bestehenden Teilmodele als eine einzige Klasse abstahiert.

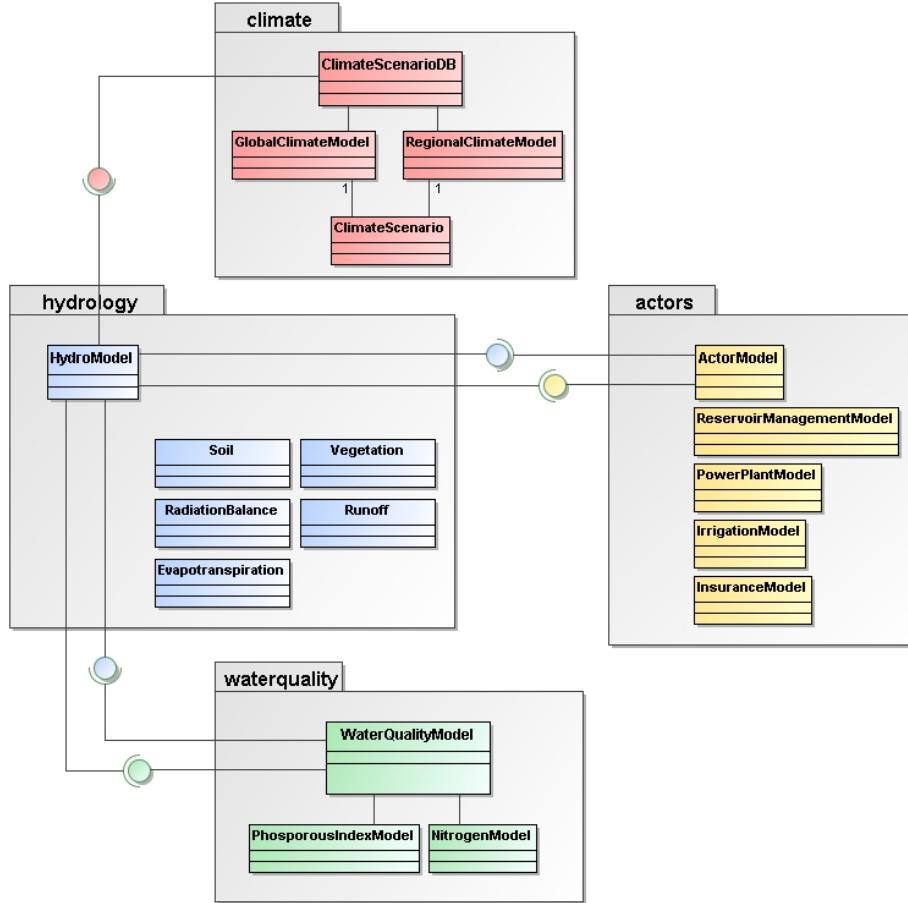


Abbildung 3.3: Architektur des Modellverbunds (Modell-Level)

3.4.2 Rollen der Modellentwickler

Um die Rollen und Verantwortlichkeiten bei der Umsetzung des Vorhabens der Entwicklung eines nutzerorientierten integrierten Einzugsmodells zu illustrieren, wurde UML verwendet um diese Rollen der Stakeholder des Entwickler-Levels zu definieren. Die Modellkomponenten aus Abbildung 3.3 finden sich dabei als Entwickleraufgaben der Projektbeteiligten wieder. Weiterentwicklungen bestehender Modelle werden zu einem einzigen Modellverbund integriert. LMU und Ouranos übernehmen dabei eine herausragende Rolle bei Management und Antrieb des Integrationsprozesses aus unterschiedlichen Perspektiven, wie in Abbildung 3.4 gezeigt. Dabei wird die synergetisch wirkende unterschiedliche Herangehensweise an „Integration“ der Projektpartner deutlich: Während die Interpretation von Integration von Seiten der LMU den Schwerpunkt auf die technische Integration von numerischen Modellen legt, interpretiert die Perspektive von Ouranos „Integration“ als den Prozess der Einbindung von Stakeholdern in den Entwicklungsprozess. Dieser Zusammenhang wird im Diagramm als die Erweiterungen (<<extend>>) des zentralen Use Cases „integrate“ dargestellt. Beide Herangehensweisen an den Integrationsprozess sind von herausragender Bedeutung für eine längerfristige internationale Zusammenarbeit von LMU und Ouranos.

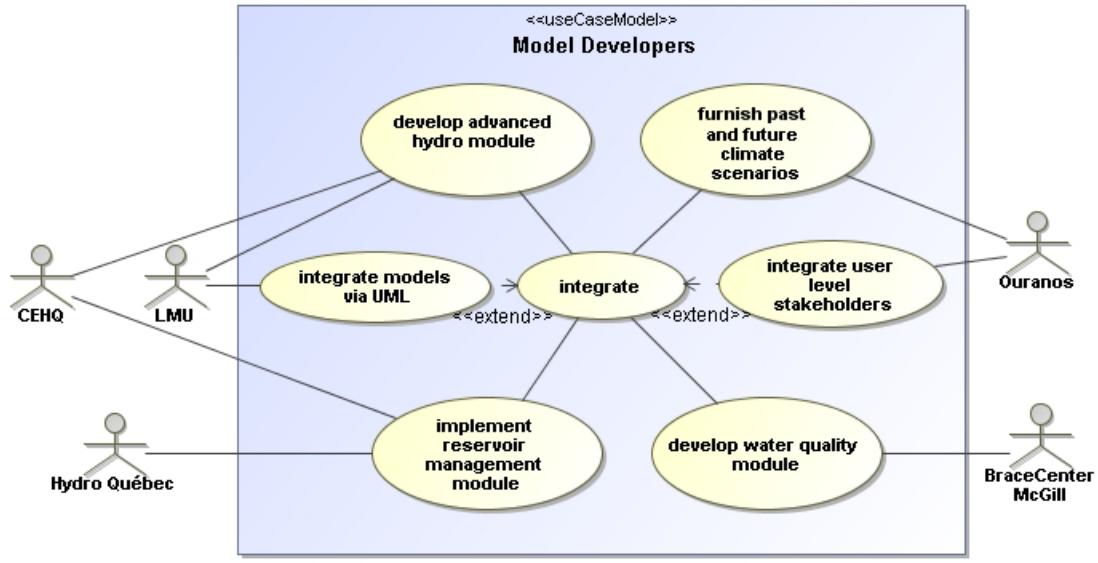


Abbildung 3.4: Rollen der Modellentwickler (Entwickler-Level)

3.4.3 Rollen der Teilmodelle

Im Verbund der Teilmodelle eines integrierten Einzugsgebietsmodells übernimmt jedes Modul Teilaufgaben der Simulation der nutzerrelevanten Aspekte eines unter veränderten Klimabedingungen stehenden Einzugsgebiets. Diese Teilaufgaben auf der Modellebene werden in Abbildung 3.5 dargestellt. Die Use Cases illustrieren für welche Berechnungen jedes einzelne Modell zuständig ist. In diesem UML Diagramm wird die explizite Interaktion der Module ausgeblendet. Sie wird allein durch die Assoziationen zwischen den Teilmodellen im Zentrum des Diagramms festgehalten.

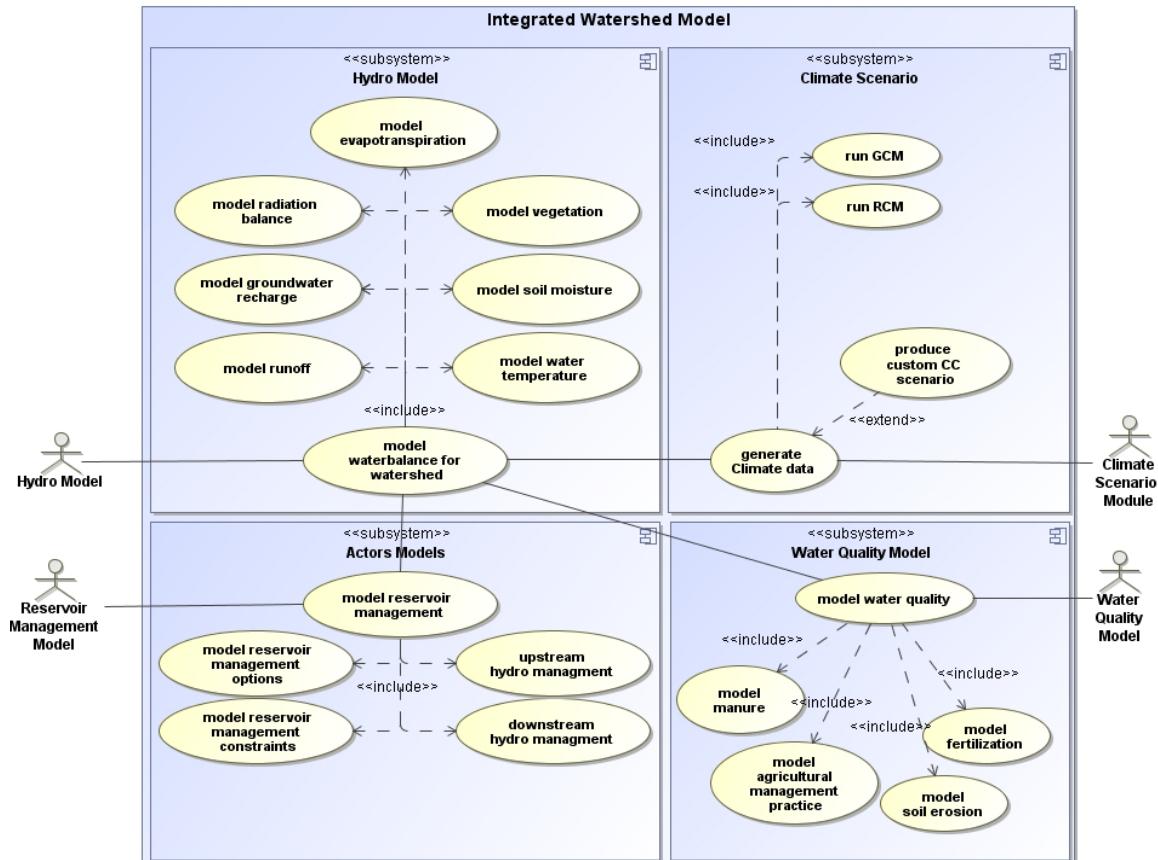


Abbildung 3.5: Rollen der Teilmodelle (Modell-Level)

3.4.4 Setup-Anforderungen

Weiter Details des Modellverbunds werden deutlich bei der Focussierung auf die Anforderungen der Teilmodelle hinsichtlich der Eingabedaten und des Setups. Vor dem Betreiben des Modells für ein bestimmtes Einzugsgebiet sind einige Einstellungen und Konfigurationen erforderlich, die mit dem Use Case Diagramm in Abbildung 3.6 erfasst werden. Dabei werden hier die technischen Details und Datenquellen vernachlässigt. Das Diagramm zeigt die Anforderungen an Eingabedaten die für das Betreiben des Modells unerlässlich sind. Selbstverständlich stellen die einzelnen Use Cases des Diagramms jeweils in sich umfangreiche Aufgaben dar, wie beispielsweise die Aufbereitung von Landnutzungsinformationen oder die Bereitstellung einer Auswahl von Klimaszenarien.

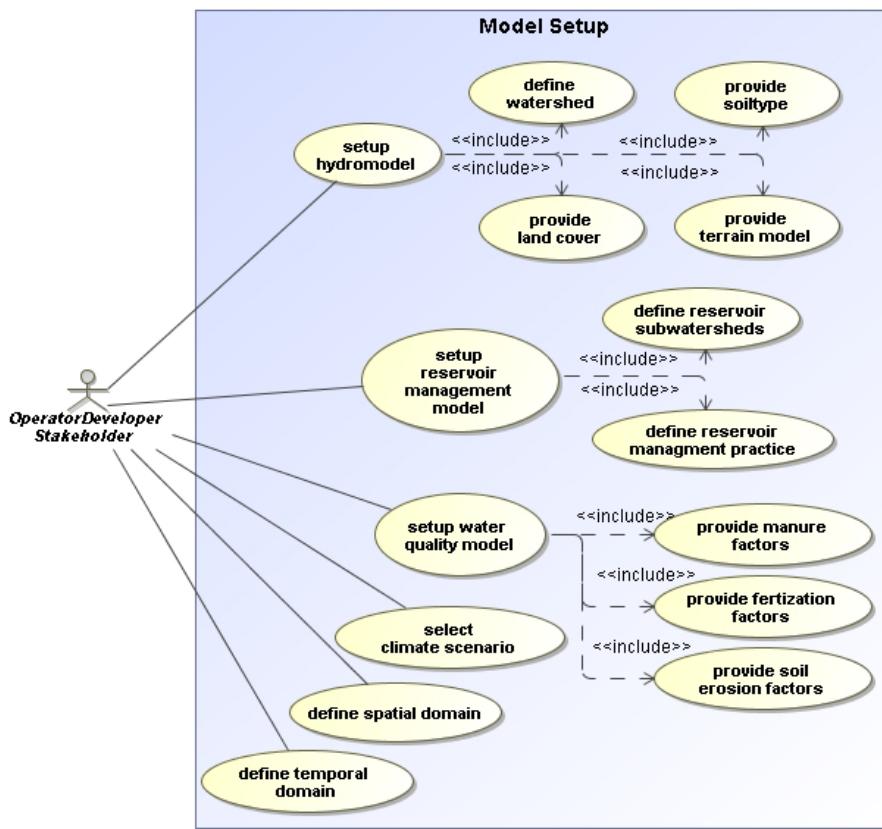


Abbildung 3.6: Setup-Anforderungen (Model-Level)

3.5 Use Cases am Ottawa River

3.5.1 Allgemeine Beschreibung der Situation am Ottawa River

Der Ottawa River entspringt am Lac Capimitchigama im Laurentiden Gebirge im Zentrum Québecs und fließt zunächst westwärts in den Lac Témiscamigue an der Grenze zu Ontario. Hier wendet er sich nach südosten um vorbei an den Städten Ottawa und Gatineau westlich von Montreal den Sankt Lorenz Strom durch den Lac des Deux-Montagnes zu erreichen. Mit einer Gesamtflußlänge von 1271km erstreckt sich sein Einzugsgebiet über etwa 179 000km². Seine mittlere Abflußspende am Carillon Damm, wo er in den Lac des Deux-Montagne mündet, beläuft sich auf etwa 1900m³/s mit Niedrigwasserabflüssen von 500 m³/s und Hochwasserabflüssen von 8000m³/s. Das gesamte Becken wird durch Hydro Québec und Ontario Po-

wer Generation intensiv zur Gewinnung von Elektrizität aus Wasserkraft genutzt. Im Einzugsgebiet finden sich 40 bedeutende Speicher die durch etwa 1000 kleinere Wehre unterstützt werden. Die Wässer des Flusses stellen die Hauptquelle des Trink- und Brauchwassers von Montreal dar.

Die Interessen der Stakeholder konzentrieren sich einerseits auf das integrierte Management der Speicher und deren Anfälligkeit für die Auswirkungen des Klimawandels und andererseits auf die Folgen des Klimawandels für das gesamte Einzugsgebiet und die dadurch bedingten stromabwärtigen Auswirkungen. Die Konflikte der Wassernutzung stellen dabei ein zentrales Thema dar, da Wasserversorgung, Hochwasserschutz, Freizeit und Erholung, Umweltschutz und nicht zuletzt die Nutzung der Wasserkraft auf diesem Feld interagieren. Die Use Cases für ein integriertes Einzugsgebietsmanagementwerkzeug für den Ottawa River müssen daher im Lichte von Konfliktmanagement und –verhinderung gesehen. Sie sollen vermitteln, wie ein solches zukünftiges Werkzeug bei dieser Aufgabe genutzt werden kann.

3.5.2 Struktur und Interessen der Stakeholder im Einzugsgebiet des Ottawa River

Die Stakeholder im Einzugsgebiets des Ottawa River lassen sich in einer hierarchischen Gliederung zusammenfassen. Die Dachorganisation stellt dabei das Ottawa River Regulation Planning Board (ORRPB) dar unter der sich die Haupt- und Nebenakteure für dieses Einzugsgebiet vereinen.

Die folgenden Stakeholder wurden für das Einzugsgebiet des Ottawa River identifiziert:

Dachorganisation:	ORRPB - Ottawa River Regulation Planning Board
Hauptakteure:	<p>Hydro Québec</p> <p>Ontario Power Generation</p> <p>CEHQ/MDDEP - Centre d'expertise hydrique du Québec am Ministère de du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs</p> <p>Traveaux Public Canada</p>
Nebenakteure	<p>COBALI - Comité du bassin versant de la rivière du Lièvre</p> <p>COMGA - Comité du bassin versant de la rivière Gatineau</p> <p>CBVRB - Comité de bassin versant de la rivière Bourlamaque</p>

- ORRPB - Ottawa River Regulation Planning Board
- CEHQ - Centre d'expertise hydrique du Québec
- ROBVQ - Regroupement des organisations de bassin versant du Québec
- COBALI - Comité du bassin versant de la rivière du Lièvre
- COMGA - Comité du bassin versant de la rivière Gatineau

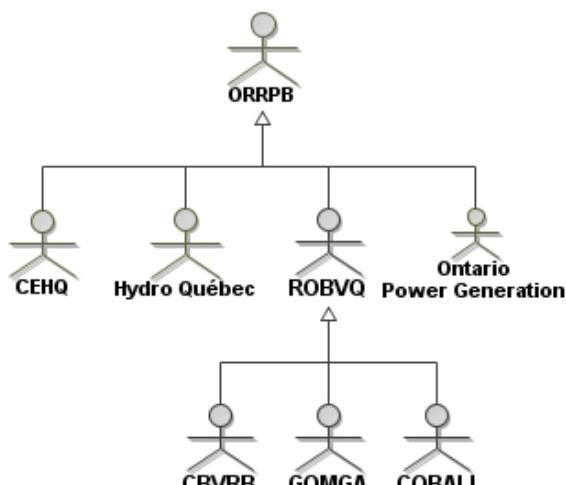


Abbildung 3.7: Hierarchische Struktur der Stakeholder am Ottawa River

Interessen der Stakeholder:

- ORRPB – Einigung aller Haupt und Nebenakteure, eruieren ob der Einfluß des Klimawandels eine Anpassung der Managementstrategien erfordert
- Hydro Quebec – Aufrechterhaltung hoher Stromproduktion zu Bedarfszeiten unter Einfluß des Klimawandels
- Ontario Power Generation – Aufrechterhaltung hoher Stromproduktion zu Bedarfszeiten unter Einfluß des Klimawandels
- CEHQ/MDDEP – Wassersicherheit, Verteilungsgerechtigkeit, Hochwasserkontrolle unter Einfluß des Klimawandels
- Traveaux Public Canada – Aufrechterhaltung von Infrastruktur, Gefährdungspotentiale durch den Klimawandel
- COBALI, COMGA, CBVRA – Umweltschutz, Wasserqualität, nachhaltige Ökonomische Nutzung

3.5.3 Use Case: Einfluß des Klimawandels auf Niedrigwasser am Rivière de Mille Île

Primary Actor: CEHQ / MDDEP

Scope: Ottawa watershed and the Montreal Archipelago

Level: User Level

Stakeholders and Interests:

- CEHQ / MDDEP – assess the evolution of Mille Île low flow conditions under CC conditions; maintain sufficient water supply in the Mille Île River for drinking water intake and sewage dilution
- ORRPB – assess possibilities for the balancing of interests of Ottawa River basin stakeholders
- Dam Operators (Hydro Québec, Ontario Power Generation) – assess if low flow threat at Mille Île will affect reservoir management under CC conditions
- COBALI, COMGA, CBVRB – assess the impact of CC to the conditions in subwatersheds of the Ottawa River

Precondition: full availability of physical watershed description and parameterization

Minimal Guarantee: Model compound delivers output of watershed behavior

Success Guarantee: Obtain results that provide valuable information about essential changes to current management practice

Trigger: Climate Change

Main Success Scenario:

1. CRCM provides future scenario of climate on the Ottawa River basin for a defined time period
2. Model setup (see model setup use case)
3. Definition of sub watersheds determined by dam locations
4. Hydro model computes runoff estimates for sub watersheds of the Ottawa basin
5. Hydro model interacts with Reservoir Management Model that determines amounts of water released from reservoirs
6. Determine runoff from reservoir to underlying watershed (cascade)
7. Compute final runoff at Carillon Dam.
8. ARCHIPEL Model determines flow into Mille Île
9. Obtained flow suffices for water demand at Mille Île
10. Go back to (5) to optimize management

11. Go back to (1) to perform different CC scenario

Extensions:

Changes/civil works to Mille Île inlet change conditions in the Montreal-Archipelago

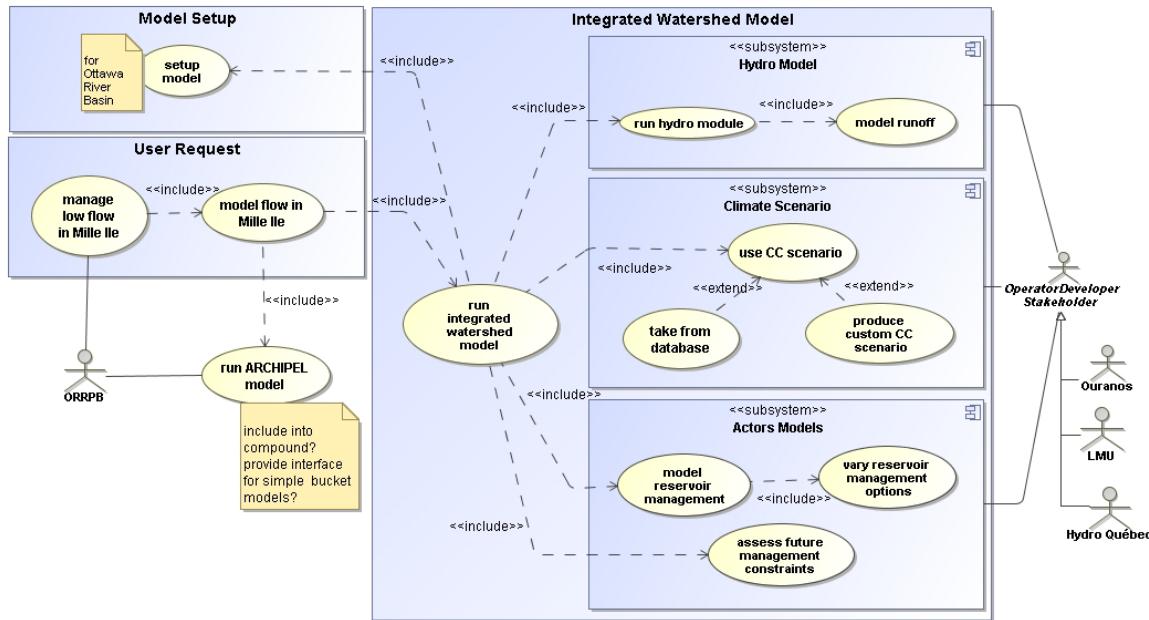


Abbildung 3.8: UML Use Case Diagramm - Einfluß des Klimawandels auf Niedrigwasser am Rivière de Mille Île

3.5.4 Use Case: Speicherbewirtschaftung am Ottawa River unter Einfluß des Klimawandels

Primary Actor: Dam Owner

Scope: Reservoir within the Ottawa watershed

Level: User Level

Stakeholders and Interests: “Dam Owner” (Hydro Quebec / Ontario Power Generation) – assess the hydro-power potential and possible conflicts with watershed stakeholders under CC conditions

Precondition: full availability of physical watershed description and parameterization

Minimal Guarantee: Model compound delivers output of watershed behavior

Success Guarantee: Model provides valuable information about future power output potential and necessary changes to current management practice in order to optimize production without interfering with other stakeholder interests

Main Success Scenario:

1. CRCM provides future scenario of climate on the Ottawa River basin for a defined period (Ouranos)
2. Set up model (see model setup use case)
3. Definition of subwatersheds determined by dam locations
4. Definition of management practice for major reservoirs
5. Hydromodel computes runoff volume for sub watersheds of the Ottawa subbasins defined by dam locations
6. Reservoir model computes runoff between sub watersheds

Variation 1: hydropower potential

7. select dam for this evaluation
8. asses the total volume of water available for power generation at that dam
9. determine summer drought period extend

Variation 2: degree of future water conflicts

7. assess possible conflicts with other stakeholders upstream and downstream (ORRPB, recreational activities, flood, low flow,)
8. assess possible conflicts with downstream stakeholders (International Joint Commission, ORRPB/Mille île)

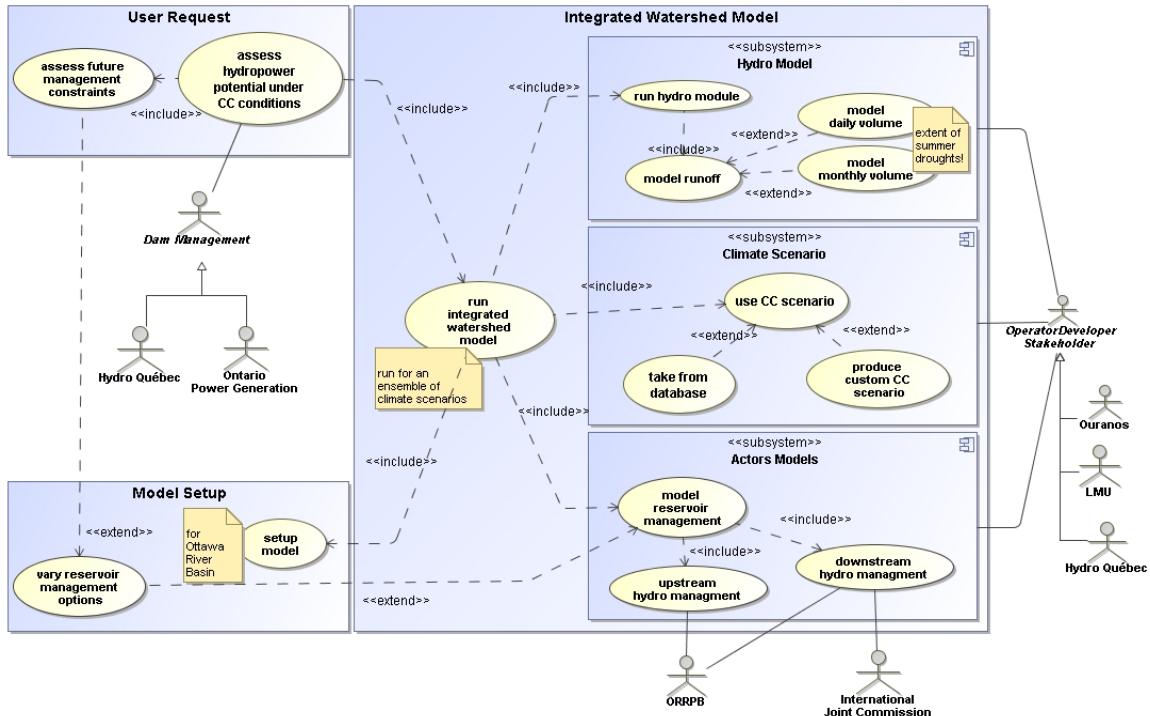


Abbildung 3.9: UML Use Case Diagram - Speicherbewirtschaftung am Ottawa River unter Einfluß des Klimawandels

3.6 Use Cases am Châteauguay River

3.6.1 Allgemeine Beschreibung der Situation am Châteauguay River

Da der Châteauguay River eines der Testgebiete für die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Modellierungen ist sei für die naturräumliche Beschreibung des Einzugsgebietes auf Kapitel 2.1 verwiesen. Hinsichtlich der Vulnerabilität des Gebietes im Einfluß des Klimawandels spielt insbesondere die intensive landwirtschaftliche Nutzung des nördlichen Teils des Beckens eine herausragende Rolle. In diesem Zusammenhang tritt auch die Problematik der Wasserqualität in den Vordergrund. Die hohen Nährstoffausträge aus der Landwirtschaft stellen eine starke Belastung des Flusses dar, welche bei sommerlichen Niedrigwasserständen besonders gravierendes Ausmaß annehmen können. Die Entwicklung dieser Niedrigwasserstände und/oder deren Häufigkeiten unter Einfluß des Klimawandels sowie die daraus folgenden Konsequenzen für die Wasserqualität sind in diesem Gebiet die zentralen Fragestellungen und Use Cases, die mit Hilfe eines integrierten Einzugsgebietsmodells untersucht werden sollen.

3.6.2 Struktur und Interessen der Stakeholder im Einzugsgebiet des Châteauguay River

Die folgenden Stakeholder wurden für das Einzugsgebiet des Ottawa River identifiziert:

Hauptakteure

CEHQ/MDDEP -

Centre d'expertise hydrique du Québec at the Ministère de du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs

	MAPAQ	-	Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation
Nebenakteure:	SCABRIC	-	Société de Conservation et d'Aménagement du Bassin de la Rivière Châteauguay

Eine Organisationsstruktur der Stakeholder im Einzugsgebiet des Châteauguay konnte nicht identifiziert werden

Interessen der Stakeholder

- MDDEP – Wasserverfügbarkeit; Verbesserung der Wasserqualität; Berücksichtigung landwirtschaftlicher Praxis in einer integrierten Betrachtung von Wasserqualität und Verfügbarkeit
- MAPAQ – nachhaltige landwirtschaftliche Praxis; landwirtschaftliche Bedingungen; Wasserverfügbarkeit
- SCABRIC – Verbesserung von Wasserqualität und Böden; Gruppierung betroffener Parteien

3.6.3 Use Case: Niedrigwasser am Châteauguay River unter Einfluß des Klimawandels

Primary Actor: A Châteauguay River Stakeholder (MDDEP, MAPAQ, SCABRIC)

Scope: Châteauguay River basin

Level: User Level

Stakeholders and Interests:

MAPAQ (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec) – future opportunities for agriculture, water availability, sustainable practices

MDDEP (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs) – water availability, integrated view on water, enhance water quality, agricultural practice

SCABRIC (Société de conservation et d'aménagement du bassin de la rivière Châteauguay) – preserve and improve quality of water and soils, protect and develop the basins resources, education, recreation, tourism

Precondition: full availability of physical watershed description and parameterization

Minimal Guarantee: Model compound delivers output of watershed behavior

Success Guarantee: Model provides valuable information about the reaction of the watershed to CC, the impact on low flow frequencies and peculiarity and allows adjustment of management decisions

Main Success Scenario:

1. CRCM provides future scenario of climate on the Châteauguay River basin for a defined period (Ouranos)
2. Set up model (see model setup use case)
3. Set up phosphorus index; includes agricultural management practice
4. Hydromodel computes runoff for the Châteauguay basin
5. Go to (1) to compute different scenario (climate, management...)

Variation: Include the modeling of irrigation water demand

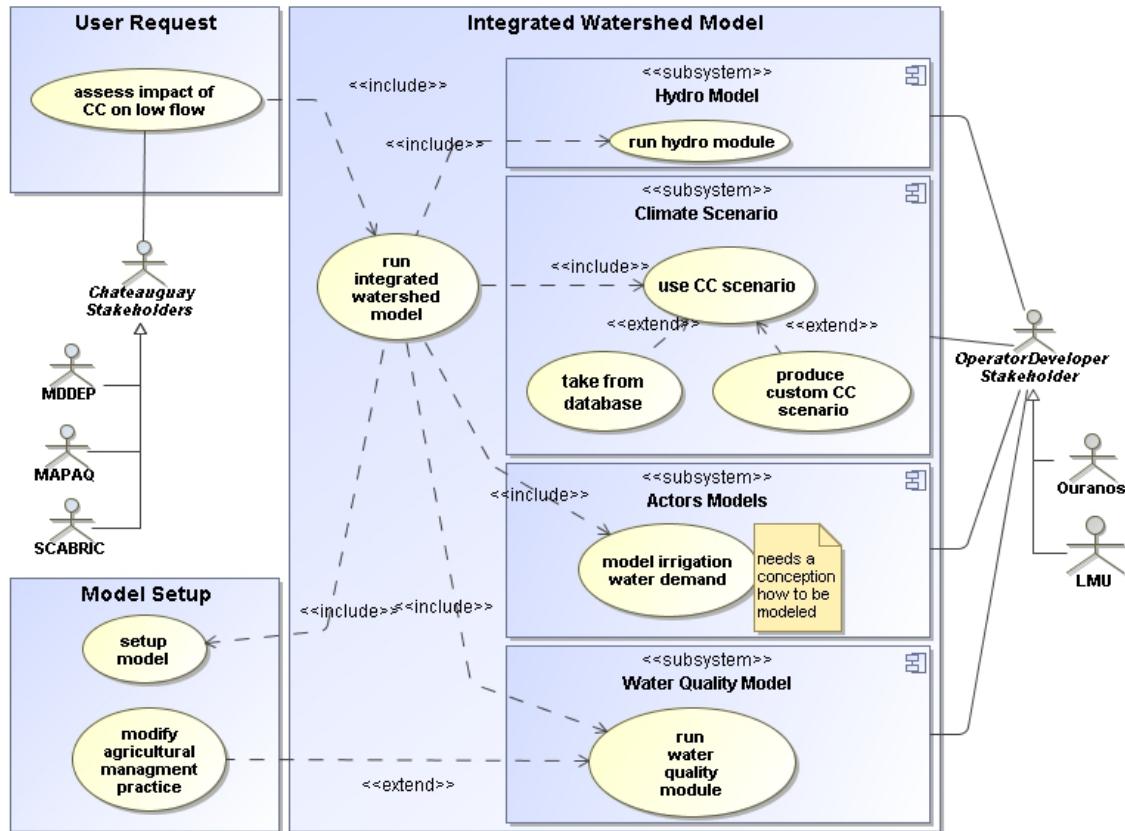


Abbildung 3.10: UML Use Case Diagram - Niedrigwasser am Châteauguay River unter Einfluß des Klimawandels

3.6.4 Use Case: Wasserqualität am Châteauguay River unter Einfluß des Klimawandels

Primary Actor: A Châteauguay River Stakeholder (MDDEP, MAPAQ, SCABRIC)

Scope: Châteauguay River basin

Level: User Level

Stakeholders and Interests:

- MAPAQ (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec) – future opportunities for agriculture, water availability, sustainable practices
- MDDEP (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs) – water availability, integrated view on water, enhance water quality, agricultural practice
- SCABRIC (Société de conservation et d'aménagement du bassin de la rivière Châteauguay) – preserve and improve quality of water and soils, protect and develop the basins resources, education, recreation, tourism

Precondition: full availability of physical watershed description and parameterization

Minimal Guarantee: Model compound delivers output of watershed behavior

Success Guarantee: Model provides valuable information about the impact of CC on the water quality of the Châteauguay watershed and allows the assessment of optimal adaptation strategies and improvement of water quality

Main Success Scenario:

1. CRCM provides future scenario of climate on the Châteauguay River basin for a defined period (Ouranos)
2. Set up model (see model setup use case)
3. Set up phosphorus index; includes agricultural management practice
4. Hydromodel computes runoff for the Châteauguay basin

5. Phosphorus index model computes distributed phosphorus loads within the Chateauguay basin
6. Go to (1) to compute different scenario (climate, management...)

Variation 1: change land use: crops

6. change the land use in the basin by changing agricultural crops
7. Go to (3) to assess the impact of land use change

Variation 2: change land use: wetlands

6. change the land use by the introduction of artificial constructed wetlands
7. go to (3) to assess the impact of this land use change
8. change location of constructed wetlands to assess optimal sites
9. go to (3) to assess the impact of this land use change

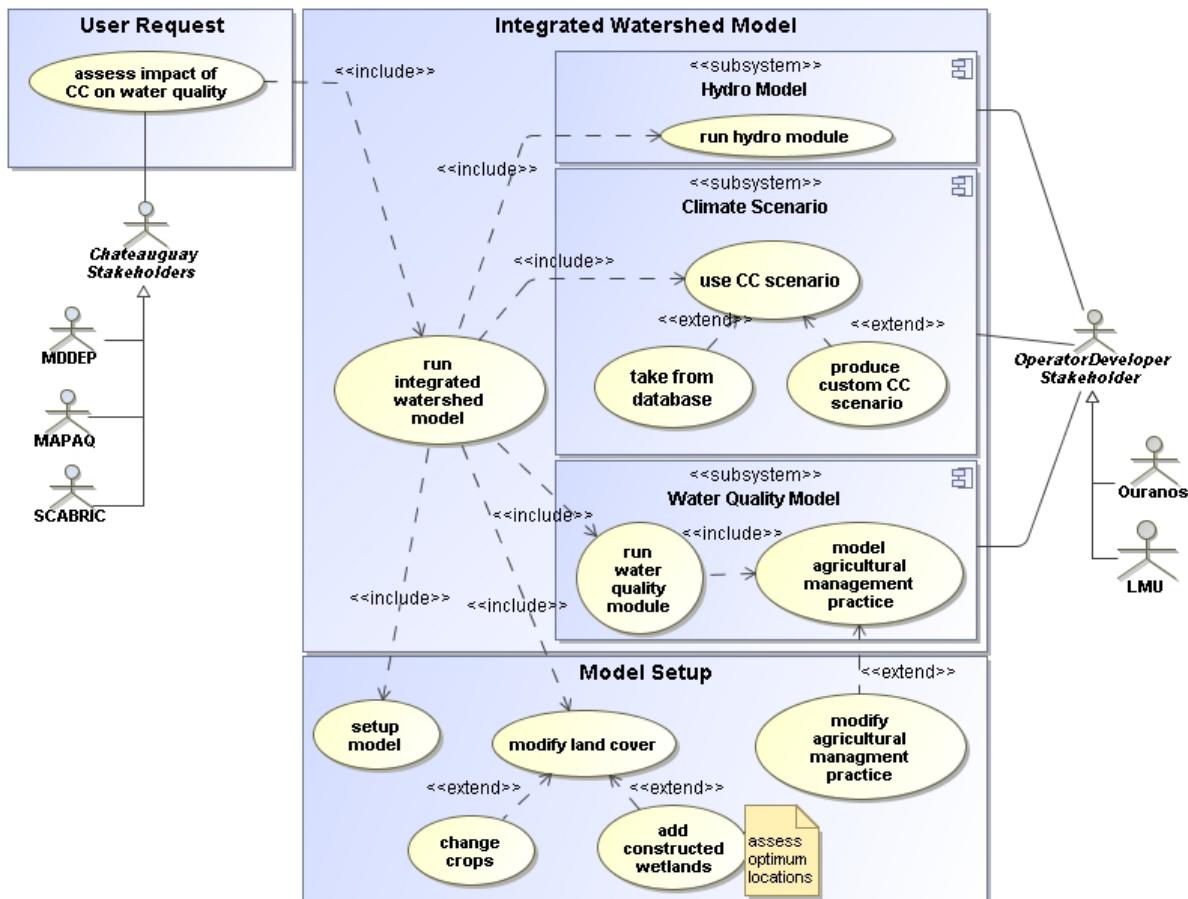


Abbildung 3.11: UML Use Case Diagram - Wasserqualität am Châteauguay River unter Einfluß des Klimawandels

3.7 Use Cases der Stadtwerke München

In Zusammenarbeit mit den Stadtwerken München konnten aus zwei Themenbereichen Use Cases für das geplante integrative Einzugsgebietsmodell erarbeitet werden. Als kommunaler Versorger der Stadt München stehen die Stadtwerke in zweierlei Hinsicht im Spannungsfeld der Folgen des globalen Klimawandels: zum einen im Hinblick auf die Wasserversorgung und zum Anderen bezüglich der Energieversorgung. Daher wurden sowohl Interviews mit Vertretern der Wassergewinnung der Stadtwerke München geführt als auch auf einem Workshop mit Mitarbeitern der Abteilung Energiestrategie die Anwendungsmöglichkeiten und Anforderungen an ein integratives Einzugsgebietsmodell erörtert.

3.7.1 Use Case: Chlorung des Trinkwassers unter Einfluß des Klimawandels

Primary Actor: Munich City Utilities – SWM, Water Supply Section

Scope: Mangfall Basin, Intakes near Thalham

Level: User Level

Stakeholders and Interests:

- Munich City Utilities – SWM – assess impact of CC on the frequency of exigence of chlorination of drinking water
- City Administration – desire for no chlorine in the city's drinking water

Precondition: full availability of physical watershed description and parameterization

Minimal Guarantee: Model compound delivers output of watershed behavior

Success Guarantee: Model provides valuable information about the impact of CC on the frequency of situations where heavy rain hits dried out soils, resulting in high amounts of suspended matter in the water and requiring chlorination of the drinking water

Main Success Scenario:

1. CRCM provides future scenario of climate in southern Bavaria for a defined period (Ouranos)
2. Set up model (see model setup use case)
3. Hydromodel computes soil moisture and surface runoff
4. Model records precipitation rates in concordance to soil moisture
5. Determine frequency of events that typically lead to exigence of chlorination
6. Go to (1) to compute different scenario

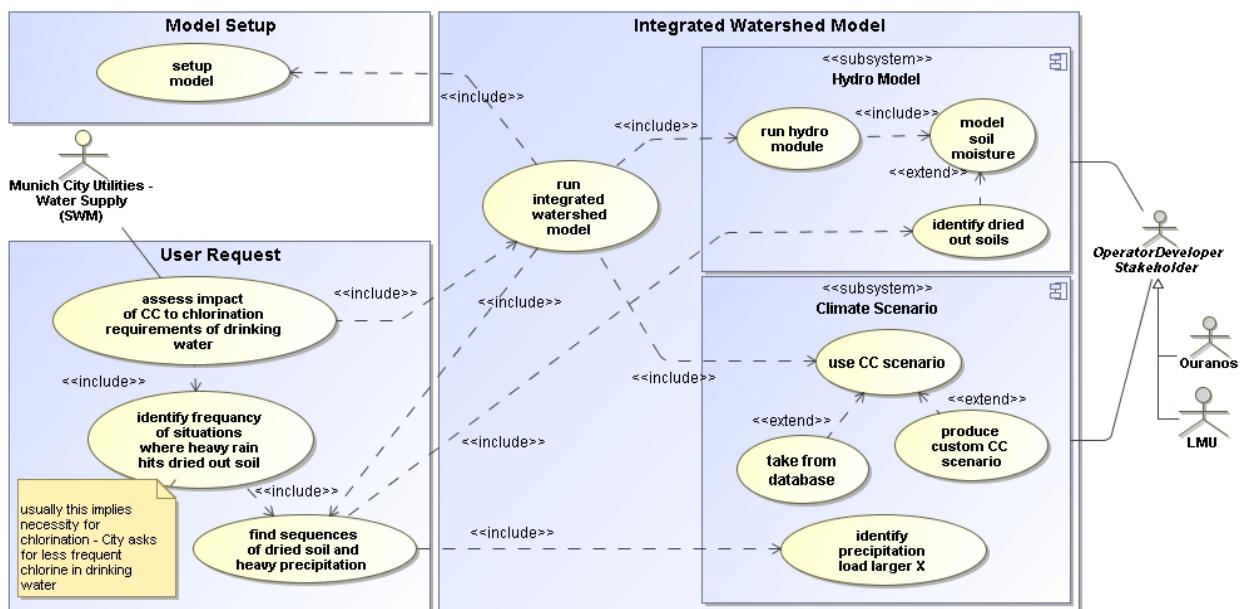


Abbildung 3.12: UML Use Case Diagramm – Häufigkeit der Notwendigkeit der Chlorung des Münchener Trinkwassers unter Einfluß des Klimawandels.

3.7.2 Use Case: Einfluß des Biolandbaus auf die Wasserqualität des Münchener Trinkwassers

Primary Actor: Munich City Utilities – SWM, Water Supply Section

Scope: Mangfall Basin

Level: User Level

Stakeholders and Interests:

- Munich City Utilities – SWM, Water Supply Section – assess impact of Organic Farming on water quality at the Mangfall intakes.
- Munich City Utilities – SWM – reduce subsidization of organic farms in the Mangfall area

Precondition: full availability of physical watershed description and parameterization, high resolution required

Minimal Guarantee: Model compound delivers output of watershed behavior

Success Guarantee: Model provides valuable information about the impact of organic farming on the water quality in the Mangfall intakes

Main Success Scenario:

1. CRCM provides future scenario of climate in southern Bavaria for a defined period (Ouranos)
2. Set up model, including parameterization of water quality module for organic farming
3. Hydromodel computes runoff in the Mangfall basin
4. Water quality module determines water quality at SWM water intakes.
5. Change the parameterization of agriculture in water quality model to non-organic farming
6. Change the land cover information from organic to non-organic
7. Go to (3) to compute non-organic farming scenario

Variation 1: Compute scenario with historic station data

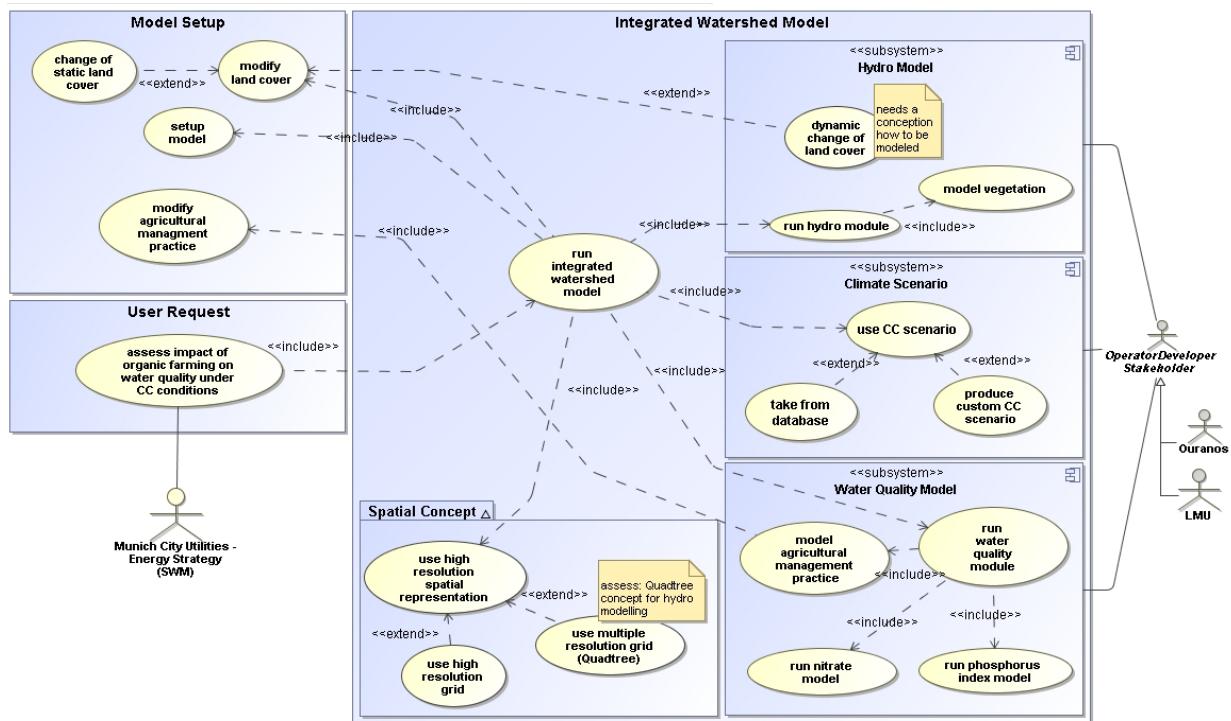


Abbildung 3.13: UML Use Case Diagramm – Ermittlung des Einflusses von Biolandbau auf die Wasserqualität des Münchener Trinkwassers

3.7.3 Use Case: Energiegewinnung unter Einfluß des Klimawandels

Primary Actor: Munich City Utilities – SWM, Energy Strategy

Scope: Isar

Level: User Level

Stakeholders and Interests:

- Munich City Utilities – SWM, Energy Strategy – assess impact of CC on hydro power generation and cooling water in Bavaria

Precondition: full availability of physical watershed description and parameterization

Minimal Guarantee: Model compound delivers output of watershed behavior

Success Guarantee: Model provides valuable information about CC impact and changes on water availability for hydro power generation and power plant cooling

Main Success Scenario:

1. CRCM provides future scenario of climate on the watershed for a defined period (Ouranos)
2. Set up model (see model setup use case)
3. Definition of power plant locations, Delineation of hydro power plant subwatersheds
4. Hydromodel computes runoff volume and water temperature for the Isar watershed
5. Reservoir model computes runoff between sub watersheds
6. Model provides information on water availability (hydro power) and water temperatures (cooling water)

Variation 1: assess impact of land cover changes

7. change the land cover in the simulation (change the dataset or change land cover dynamically over simulated period)

8. select hydropower plant for evaluation
9. asses the total volume of water available for power generation with changed land cover
10. determine summer drought period extend

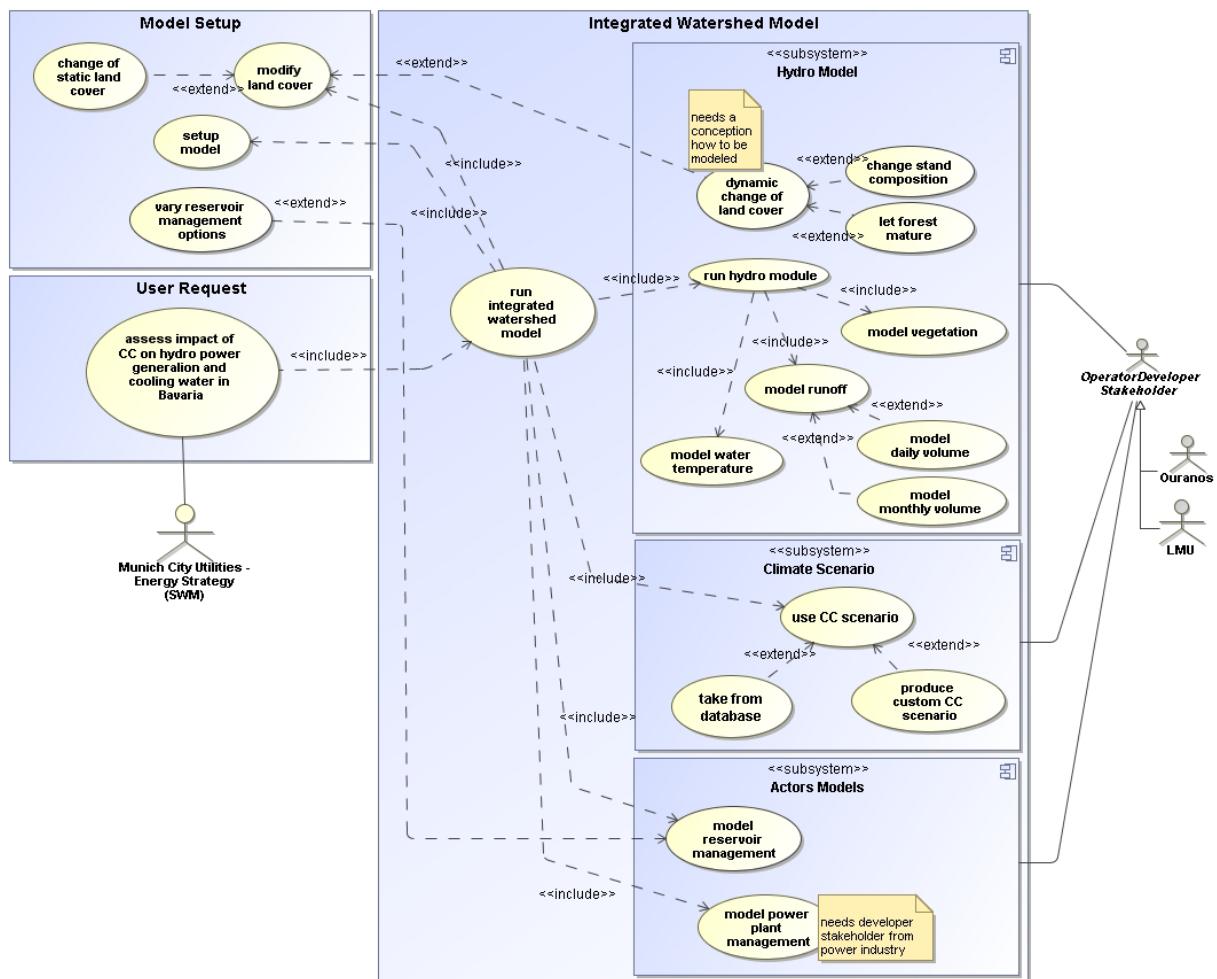


Abbildung 3.14: UML Use Case Diagramm - Energiegewinnung unter Einfluss des Klimawandels

3.8 Benutzerschnittstelle

Ansätze für eine mögliche Benutzerschnittstelle wurden von der Arbeitsgruppe bei Ouranos erarbeitet. Dabei konnten wertvolle Anregungen von verschiedenen bei Ouranos entwickelten Web-GIS Anwendungen gewonnen werden sowie die Benutzerschnittstellen bestehender Modellierwerkzeuge die beim CEHQ betrieben werden als Grundlage herangezogen werden. Die UML Use Cases liefern insbesondere aus dem Bereich des Model Setups wichtige Hinweise für den Entwurf einer Benutzerschnittstelle. Eine konkrete Umsetzung einer solchen Schnittstelle wurde noch nicht vorgenommen.

3.9 Datenanforderungen

Eine zentrale Fragestellung für die Entwicklung eines neuen integrierten Einzugsgebietsmodells liegt in der Gestaltung der Datenanforderungen des Modells. Deutliche Unterschiede in

den Datenanforderungen der in Workpackage I zum Einsatz gekommenen Modelle weisen darauf hin, daß auch mit geringerem Datenbedarf (Hydrotel) vergleichbare Ergebnisse modelliert werden können wie mit höherem Anspruch an die Datenbereitstellung (PROMET). Für das projektierte integrierte Einzugsgebietsmodell ist es zielführend, mit einer möglichst einfachen Datenbasis optimale Ergebnisse erzielen zu können. Dies ergibt sich aus dem Anspruch, ein übertragbares Werkzeug bereit zu stellen, welches auch in Gebieten geringerer Datendichte anwendbar bleibt. Ein Gefälle zwischen der Datenverfügbarkeit konnte bereits für die Testgebiete der Pilotstudie (Ammer, Châteauguay) diagnostiziert werden. Insbesondere das bei der Modellierung zum Einsatz kommende Raumkonzept spielt in diesem Zusammenhang eine herausragende Rolle. Neben dem semi-verteilten (Polygone, Hydrotel) und dem verteilten Ansatz (Raster, PROMET) besteht für ein zukünftiges integriertes Einzugsgebietsmodell die Möglichkeit einen räumlichen Ansatz unter der Nutzung von Quadtrees zu verfolgen. Mit diesem Ansatz können räumlich unterschiedlich strukturierte Gebiete ihrer räumlichen Dynamik angepasst auf unterschiedlichen Skalen abgebildet werden.

4 Literatur

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1978): Verzeichnis der Bach- und Flußgebiete in Bayern, mit einem Gewässeratlas 1:200000. München.

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (Ed.) (2000): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Donaugebiet 2000. München.

BOOCH, G., RUMBAUGH, J. and JACOBSON, I., (2005): The Unified Modelling Language User Guide – 2nd Edition, Reading

CLARK, T.H. (1966): Châteauguay area. Ministère des Resources Naturelles du Québec, Geological Report, Nr. 122, 63 p.

COCKBURN, A. (2001): Writing Effective Use Cases, Boston

COTE, M.-J. LACHANCE, Y., LAMONTAGNE, C., NASTEV, M., PLAMONDON, R., ROY, R.(2006) : Atlas de la bassin versant de la rivière Châteauguay. Collaboration étroite avec la Commission géologique du Canada et l'institut national de la recherche scientifique – Eau, Terre et Environnement. Québec : ministère du Développment durable, de l'Environnement et des Parcs. 64p.

DOBEN, K., FRANK, H. (1983): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25000, Blatt Nr. 8333 Murnau. Bayerisches Geologisches Landesamt, München.

ENVIRONMENT CANADA (2004) : Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis – Models. <http://www.cccma.ec.gc.ca/models/models.shtml>. version dated 13.11.2007

ENVIRONMENT CANADA (2007): Climate Change Scenarios Network- Prairie Node. http://csee.eenv.uregina.ca/Help_and_Contact/GCM_Comparison-e.html. version dated 12.12.2007

FORTIN, J.-P. (2004) : Le modèle hydrologique HYDROTEL. Bases théorique. INRS- Eau. Quebec.

FORTIN, J.-P., MOUSSA, R., TURCOTTE, R., ROUSSEAU, J.-P., VILLENEUVE, J.-P. (2006) : The HYDROTEL distributed model : a simulation and forecasting model making good use of GIS and RS data.. Geophysical Research Abstracts, Vol. 8; 08186, 2006. European Geosciences Union 2006.

GLOWA- DANUBE PROJEKT (ED.) (2006) : Global Change Atlas, Einzugsgebiet der oberen Donau. GLOWA- Danube Projekt, Universität München.

GOUVERNEMENT DU QUEBEC (2003): Le Centre d'expertise d'hydraulique à Quebec. <http://www.cehq.gouv.qc.ca/mission/index.htm>. Version dated 08.06.2007.

GOUVERNEMENT DU QUEBEC (2002) : Développement durable, Environment et Parcs. http://www.mddep.gouv.qc.ca/ministere/inter_en.htm. Version dated 08.06.2007.

INRS-Eau (1998): The HYDROTEL hydrological model. INRS- Eau, Quebec. <http://www.ete.inrs.ca/activites/modeles/hydrotel/en/accueil.htm>. Version dated 06.05.2007.

IPPC (2001) : Climate Change 2001 : The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton, J.T. Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A., (eds) Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge New York.

KALLBERG, P., BERRISFORD, P., HOSKINS, B., SIMMONS, A., UPPALA, S., LAMY-THÉPAUT, S., HINE, R. (2005): ECMWF ERA-40 Project Report Series. 19. ERA-40 Atlas. European Centre for Medium Range Weather Forecasts, Shinfield Park, England

LUDWIG, R (2000): Die flächenverteilte Modellierung von Wasserhaushalt und bflussbildung im Einzugsgebiet der Ammer, In: Münchener Geographische Abhandlungen. Bd. B 32.

LUDWIG, R., MAUSER, W. (2000): Modelling the water-balance within a GIS-based SVAT-model framework. In: *Hydrology and Earth System Sciences*, HESS, Vol. 4(2), p. 239-249.

MAUSER, W. (1989): Die Verwendung hochauflösender Satellitendaten in einem Geographischen Informationssystem zur Modellierung von Flächenverdunstung und Bodenfeuchte. Habilitationsschrift, Albert- Ludwigs Universität, Freiburg i.Br.

MAUSER, W., SCHÄDLICH, S. (1998): Modelling the Spatial Distribution of Evapotranspiration Using Remote Sensing Data and PROMET. In: *J. of Hydrol.* Vol. 213, p. 250-267.

MONTEITH, J.L. (1965): Evaporation and Environment. Symp. Soc. expl. Biol, 19, p. 205-234.

MORIN, G., FORTIN, J.P., LARDEAU, J.P., SOCHANSKA,W., PAQUETTE, S. (1981) : Modèle CE-QEAU :manual d'utilisation. INRS- Eau, Rapport scientifique No 93, p. 449.

NASH, J.E. & SUTCLIFF, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models. Part Ia – Discussion of principles. In: *Journal of Hydrology*, Nr. 10 (3).

OURANOS (2004): Strategic Plan 2004-2009. Ouranos, Montréal

PENMAN, H.L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy.Meteorol. Soc. A 193, p. 145-151.

PHILIP, J. R. (1960) : General Extract Solution of the Concentration- Dependent Diffusion Equation. In: *Aust. J. Phys.*, Nr. 13, p. 1- 12.

PLUMMER, D.A, CAYA, D., FRIGON, A., CÔTÈ, H., GIGUÈRE, M., PAQUIN, D, BINER, S., HARVEY, R., DE ELIA, R. (2006) : Climate and Climate Change over North America as Simulated by the Canadian RCM. In: *Journal of Climate*, Nr. 19, p. 3112-3132.

QUEBEC. MINISTÈRE DES RESOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE (2001) : Système sur les découpages administratifs. Québec : Le Ministère. Fichiers informatiques. 1:20 000.

RICHARDS, L.A. (1931): Capillary Conduction of Liquids through Porous Mediums. In: *Physics*, 1, p. 318- 333.

ROUSSEAU, A., DE SLOOVER, M., DUCHEMIN, M., TURCOTTE, R., FORTIN, J.-P. (2000) : Projet AGRORISQUE. Application du système de modélisation intégré GIBSI. Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau

STRASSER, U. and MAUSER, W. (2001): Modelling the Spatial and Temporal Variations of the Water Balance for the Weser Catchment 1965-1994. In: *J. Hydrol.*, Vol. 254/1-4, p. 199-214.

TORNTHWAITE, C.W. (1948): An approach toward a rational classification of climate. *Geog. Rev.* , 38, p. 55- 94.

TURCOTTE, R. FORTIN, L.-G., PUGIN, S., CYR, J-F., PICARD, F., POIRIER, C., LACOMBE, P., CHAUMONT, D., DESROCHERS, G., VESCOVI, L., ROY, R. (2005) : Impact des changements climatiques sur les plans de gestion des réservoirs Saint- Francois et Aylmer : résultats préliminaires. Canadian Dam Association.

UNITED NATIONS CONFERENCE ON THE HUMAN ENVIRONMENT (1992): Rio Declaration on Environment and Development. <http://habitat.igc.org/agenda21/rio-dec.html>. (30.08.2007).

US GLOBAL CHANGE RESEARCH PROGRAMM (2003): Images from our Changing Planet FY 2003. www.usgcrp.gov/usgcrp/images/ocp2003/ocpfy2003-fig5-1.htm. Version dated 31.12.2007.

5 Anhang

Überblick über alle erarbeiteten Use Cases in UML

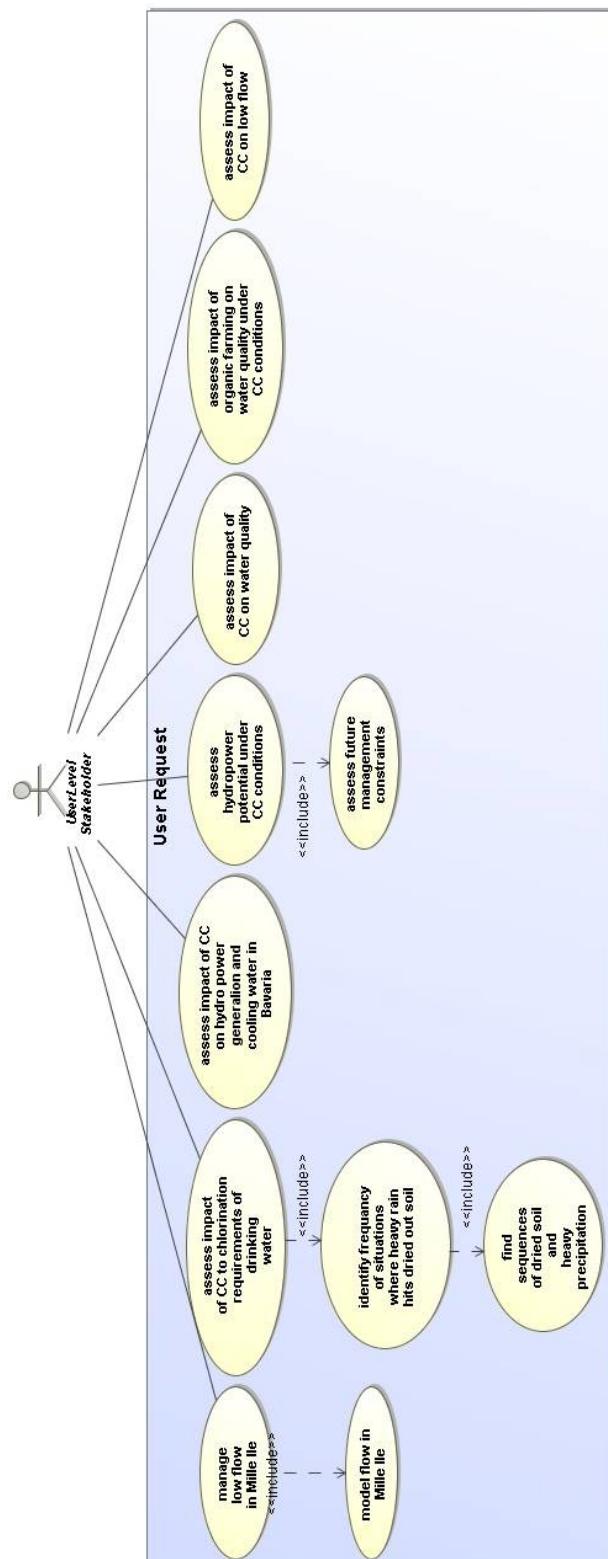


Abbildung A1: Stakeholder eines integrierten Einzugsgebietsmodells und deren Anwendungsfälle

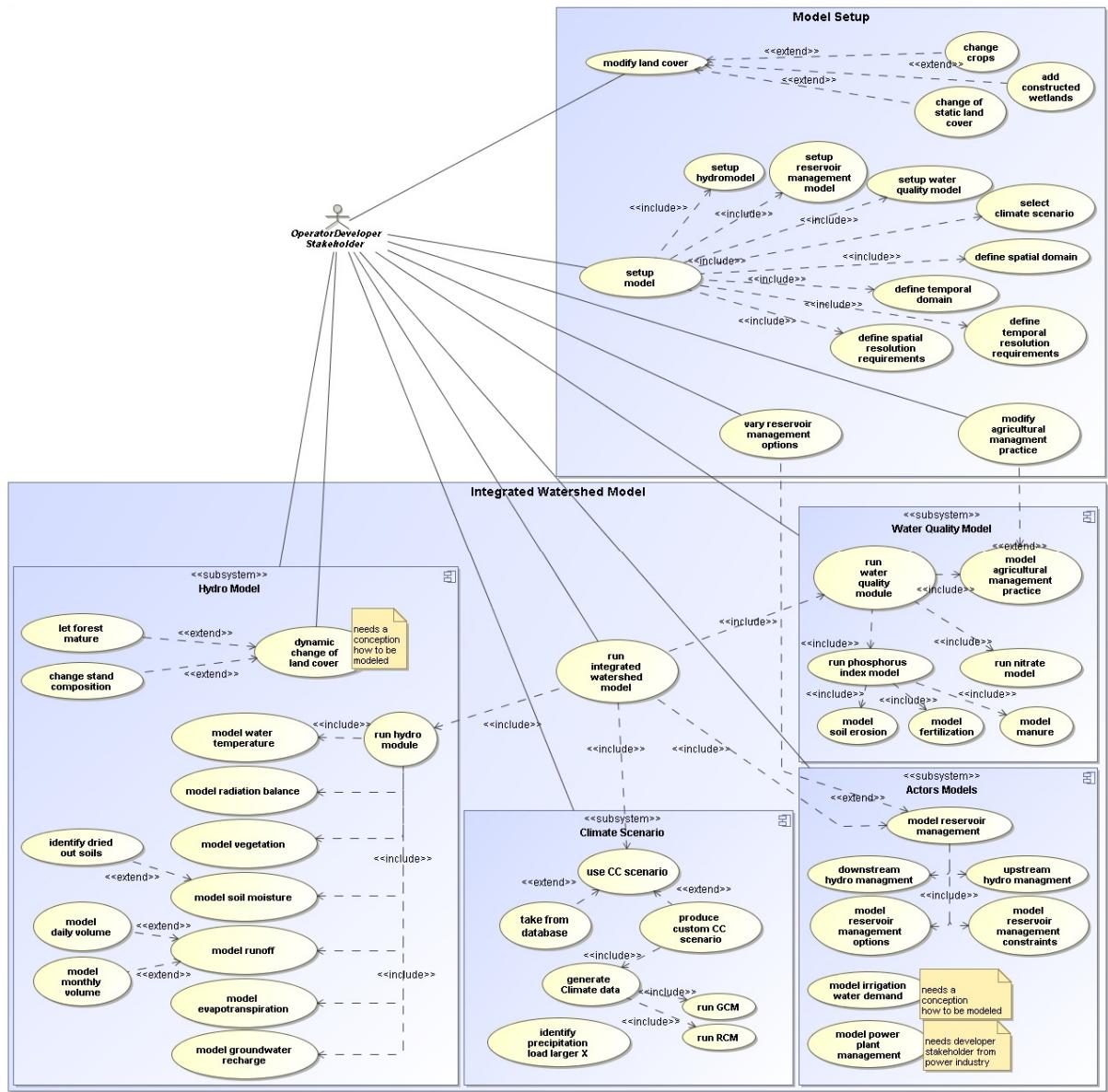


Abb. A2: Anforderungen an ein integriertes Einzugsgebietsmodell als UML Use Case Diagramm