

**Vulnérabilité de l'agriculture en réponse aux
changements climatiques : étude de l'influence passée et
future de l'occupation agricole du territoire sur le régime
hydrologique et la qualité de l'eau d'un bassin versant, à
l'aide d'un système de modélisation intégrée.**

**FACC A946
Programme Impacts et Adaptation**

Direction des impacts et de l'adaptation liés au changement climatique
Secteur des sciences de la terre
Ressources naturelles Canada/Gouvernement du Canada

Rapport Final

Équipe de réalisation¹ :

Alain N. Rousseau, Ph.D., ing.

Renaud Quilbé, D.Sc.

Stéphane Savary, M.Sc.

Simon Ricard, M.Sc.

Jean-Sébastien Moquet, M.Sc.

Mohamed Slim Garbouj, M.Sc.

Centre Eau, Terre et Environnement
Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-ETE)
490, rue de la Couronne, Québec (QC), G1K 9A9

et

Marc Duchemin, Ph.D.

Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement, Inc.
2700 rue Einstein, Sainte-Foy, (Québec), G1P 3W8

Rapport N° R-796-f

31 mars 2007

¹ Sont indiqués comme auteurs les collaborateurs ayant participé à l'écriture du document.

© INRS-ETE, 2007

ISBN 978-2-89146-534-2

Dépôt légal Bibliothèque nationale du Québec

Dépôt légal Bibliothèque nationale du Canada

RÉSUMÉ

Ce projet de recherche porte sur l'évaluation du rôle passé et futur de l'occupation du territoire agricole dans les processus d'adaptation de l'agriculture au changement climatique et son influence sur l'hydrologie. Pour ce faire, nous utilisons le système de modélisation intégrée GIBSI appliqué sur le bassin versant de la rivière Chaudière.

Dans un premier temps (approche rétrospective), nous avons reconstitué l'évolution passée de l'occupation du territoire à l'aide de sept images satellites (1976, 1981, 1987, 1990, 1995, 1999 et 2003). Nous avons ainsi pu constater une augmentation de la superficie des terres agricoles au détriment des forêts entre 1976 et 1990 (respectivement 15,3% et 21,7% de la superficie totale du bassin versant), puis une diminution après 1990 pour atteindre 17,2% en 2003. Nous avons ensuite intégré ces images dans GIBSI et réalisé des simulations hydrologiques sur 30 ans de données météorologiques. Les résultats démontrent que la lame d'eau annuelle, la charge en sédiments et le débit d'étiage à l'exutoire du bassin versant sont fortement influencés par l'évolution de la superficie agricole (corrélation positive). On retrouve des observations similaires à l'échelle des sous-bassins les plus agricoles.

Dans un deuxième temps (approche prédictive), nous avons évalué l'effet de scénarios d'évolution de l'occupation du territoire dans un contexte de changement climatique. Afin de définir les chroniques météorologiques futures (période 2010-2039) utilisées en entrée du modèle hydrologique de GIBSI, trois méthodes basées sur les modèles de circulation générale ont été comparées : la méthode des deltas, la mise à l'échelle (communément appelé downscaling) statistique et une méthode mixte. Les résultats montrent que la lame d'eau annuelle à l'exutoire du bassin devrait diminuer légèrement dans un contexte de CC (horizon 2025), de l'ordre de 5%. Cette diminution se produirait surtout durant l'été et l'automne. La lame d'eau pourrait diminuer en hiver du fait de l'augmentation de la température. Le débit de pointe printanier tendrait à diminuer, tandis qu'il est impossible de tirer une conclusion concernant les débits d'étiage. La charge annuelle de sédiments diminuerait également de l'ordre de 12%. Dans ce contexte, un scénario d'occupation du sol « productiviste » engendrerait une forte augmentation de la lame d'eau en été et en automne, une augmentation des débits d'étiage et une augmentation de l'érosion. Cela représenterait donc une atténuation, voire une inversion de l'effet des CC. Au contraire, un scénario d'occupation du sol « rustique » engendrerait une diminution de la lame d'eau en été et en automne, une diminution des débits d'étiage et une diminution de l'érosion. Cela accentuerait donc l'effet des CC. Toutefois, ces résultats doivent être pondérés par la grande incertitude liée aux méthodes, données et scénarios utilisés. De plus, ils ne prennent pas (ou difficilement) en compte l'effet des événements extrêmes. Pour ce faire, des expériences en conditions contrôlées (parcelles

expérimentales et simulateur de pluie) ont été mises en place afin de mesurer le ruissellement et l'érosion hydrique des sols agricoles soumis à différentes intensités de pluies représentant des conditions futures potentielles. L'ensemble des expérimentations initialement prévues n'ont pas pu être réalisées mais les résultats préliminaires semblent montrer une intensification du ruissellement et de l'érosion, dépendamment des cultures en place : ainsi, sur une base événementielle, le soya favoriserait une augmentation du ruissellement, tandis que le maïs favoriserait une augmentation de l'érosion.

L'ensemble de ces résultats confirme l'influence déterminante que pourrait avoir l'occupation du sol agricole sur le régime hydrologique et l'érosion dans un contexte de changement climatique, et donc la nécessité de prendre en compte cet élément dans les processus d'adaptation.

REMERCIEMENTS

Cette étude a impliqué un grand nombre de collaborateurs, de professionnels de recherches, de stagiaires et d'étudiants. Ils sont tous cités au chapitre 9. Les auteurs tiennent à les remercier chaleureusement pour leur contribution.

Les auteurs tiennent également à remercier le personnel ouvrier de la Ferme expérimentale de l'IRDA à Saint-Lambert-de-Lauzon pour leur aide technique lors des opérations agricoles. Nos remerciements vont également à Mme Marie-Claude Laferrière (étudiante d'été du CEGEP de Sainte-Foy) et à Mme Christelle Medjid (stagiaire Maîtrise professionnelle de l'Université Laval) pour leur participation lors des activités d'étalonnage et de simulations de pluie.

Ce projet FACC-A946 a reçu l'appui financier du Programme Impacts et Adaptation, Fonds d'action pour les changements climatiques de Ressources naturelles Canada ainsi que l'appui financier d'Ouranos, Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques.

Nous tenons également à souligner les contributions à la conception de ce projet de MM Claude Bernard de l'IRDA, Alain Bourque d'Ouranos et Ferdinand Bonn de l'Université de Sherbrooke. L'identification du besoin de mener des études à l'échelle parcellaire à l'aide d'un simulateur de pluie revient à MM Bourque et Bernard. Alors que l'intérêt d'étudier le rôle passé de l'occupation agricole sur le comportement hydrologique d'un bassin versant à l'aide de la modélisation intégrée avait été identifié par M Bonn².

Par ailleurs, certaines parties de ce projet ont pu être réalisées en s'appuyant sur les travaux menés dans le cadre d'autres projets de recherche. C'est le cas notamment en ce qui concerne le développement et le calage du système de modélisation GIBSI, financé en majeure partie par le Fonds Québécois de Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT Programme Environnement rural et forestier) par le biais du projet 2004-EN-101585 dont le titulaire est Alain N. Rousseau.

² Malheureusement décédé à l'automne 2006 dans un accident de la route survenu au Maroc.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	III
REMERCIEMENTS.....	V
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES FIGURES	XIII
LISTE DES TABLEAUX	XXVII
LISTE DES SIGLES.....	XXXV
1 INTRODUCTION.....	1
2 MISE EN CONTEXTE ET BREF ÉTAT DES CONNAISSANCES	5
2.1 VULNÉRABILITÉ DE L'AGRICULTURE AU CLIMAT	5
2.2 EFFET ATTENDU DES CC SUR L'AGRICULTURE ET LES RESSOURCES EN EAU	6
2.2.1 Effet des CC sur l'agriculture.....	6
2.2.2 Effet des CC sur le ruissellement et l'érosion hydrique	7
2.3 MESURES D'ADAPTATION	7
2.4 INFLUENCE DE L'OCCUPATION DU SOL SUR LE RÉGIME HYDROLOGIQUE	8
3 LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE.....	11
3.1 TOPOGRAPHIE, GÉOLOGIE ET PÉDOLOGIE.....	12
3.2 OCCUPATION DU SOL ET PRESSION ANTHROPIQUE	12
3.3 HYDROLOGIE	13
4 PRÉSENTATION DE GIBSI	15
4.1 STRUCTURE GÉNÉRALE ET FONCTIONNEMENT	15
4.2 GESTION DE L'OCCUPATION DU SOL.....	17
4.2.1 Gestion de l'occupation du sol	18
4.2.2 Influence de l'occupation du sol dans les modèles.....	20
4.3 APPLICATIONS DE GIBSI SUR LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE	21
4.4 TRAVAUX ET DÉVELOPPEMENTS EN COURS.....	22

4.5	RÉSUMÉ.....	22
5	EFFET DE L'ÉVOLUTION PASSÉE DE L'OCCUPATION DU SOL SUR LE RÉGIME HYDROLOGIQUE ET L'ÉROSION.....	23
5.1	APPROCHE GÉNÉRALE	23
5.2	DÉTERMINATION DE L'ÉVOLUTION PASSÉE DE L'OCCUPATION DU SOL SUR LE BASSIN VERSANT.....	24
5.2.1	Recherche de données.....	24
5.2.2	Traitement et classification des images satellites	26
5.2.3	Résultats	31
5.3	EFFET DE L'ÉVOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL SUR LE RÉGIME HYDROLOGIQUE ET L'ÉROSION	38
5.3.1	Mise à jour de la base de données hydrométéorologiques de GIBSI.....	38
5.3.2	Intégration des cartes d'occupation du sol et mise à jour des données dans GIBSI.....	38
5.3.3	Simulations.....	39
5.3.4	Résultats	39
5.4	RÉSUMÉ.....	48
6	EFFET DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET DE SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL	49
6.1	DÉTERMINATION DE L'EFFET DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LE RÉGIME HYDROLOGIQUE.....	51
6.1.1	Sélection de méthodes pour déterminer l'effet des CC sur l'hydrologie	51
6.1.2	Application des méthodes sélectionnées	56
6.1.3	Simulations avec GIBSI.....	63
6.1.4	Résultats pour l'hydrologie	63
6.1.5	Résultats pour l'érosion.....	73
6.1.6	Résumé et discussion.....	75

6.2	EFFET DE SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL	77
6.2.1	Élaboration des scénarios d'occupation du sol	77
6.2.2	Simulations avec GIBSI.....	78
6.2.3	Résultats	78
6.2.4	Discussion.....	83
6.3	RÉSUMÉ.....	85
7	MESURES PAR SIMULATIONS DE PLUIES DU RUISSELLEMENT ET DE L'ÉROSION HYDRIQUE EN PARCELLES DE GRANDE CULTURE.....	87
7.1	MÉTHODE	88
7.1.1	Localisation du site expérimental	88
7.1.2	Étalonnage du simulateur de pluie.....	90
7.1.3	Simulations de pluies sur les parcelles	92
7.1.4	Analyse des précipitations régionales	95
7.2	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	95
7.2.1	Étalonnage du simulateur de pluie.....	95
7.2.2	Simulations de pluies sur les parcelles	98
7.2.3	Analyse des précipitations régionales	101
7.3	CONCLUSION	103
8	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	105
8.1	RÉSUMÉ DES RÉSULTATS OBTENUS.....	105
8.2	PERSPECTIVES.....	107
9	COORDINATION DES ACTIVITÉS ET PROMOTION DU PROJET	109
9.1	ÉQUIPE DE TRAVAIL	109
9.1.1	Équipe de l'INRS-ETE	109
9.1.2	Équipe de l'IRDA.....	109

9.1.3	Collaborateurs	109
9.2	ÉCHÉANCIER.....	110
9.3	COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES	112
9.3.1	Rapports scientifiques	112
9.3.2	Présentations lors de conférences	113
9.3.3	Textes de conférence.....	114
9.3.4	Affiches	115
9.3.5	Articles scientifiques	115
9.4	RÉUNIONS ENTRE LES COLLABORATEURS	116
RÉFÉRENCES		117
 ANNEXE A. CALAGE DES MODÈLES DE GIBSI SUR LE BASSIN		
	VERSANT DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE	130
ANNEXE B. CARACTÉRISTIQUES DES CARTES D'OCCUPATION DU		
	SOL DE 1977	135
ANNEXE C. TRAITEMENT ET CLASSIFICATION DES IMAGES		
	SATELLITAIRES	143
ANNEXE D. MATRICES DE TRANSITION.....		
	175	
ANNEXE E. ÉVOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL À L'ÉCHELLE		
	DES SOUS-BASSINS.....	191
ANNEXE F. PROCÉDURE D'INTÉGRATION DES CARTES		
	D'OCCUPATION DU SOL DANS GIBSI.....	205
ANNEXE G. EFFET DE L'ÉVOLUTION PASSÉE DE L'OCCUPATION		
	DU SOL SUR LE RÉGIME HYDRIQUE DES SOUS-BASSINS	211
ANNEXE H. APPLICATION DE LA MÉTHODE DES DELTAS.....		
	227	
ANNEXE I. APPLICATION DU DOWNSCALING STATISTIQUE		
	245	
ANNEXE J. APPLICATION DE LA MÉTHODE MIXTE.....		
	265	
ANNEXE K. ÉLABORATION DES SCENARIOS D'OCCUPATION DU		
	SOL	271
ANNEXE L. EFFET DES SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION DE		
	L'OCCUPATION DU SOL SUR L'HYDROLOGIE DANS UN	
	CONTEXTE DE CC	285
ANNEXE M. MISE EN PLACE DES PARCELLES EXPÉRIMENTALES		
	291	

ANNEXE N. STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES SIMULATIONS DE PLUIES POUR L'ORGE ET LE SOYA.....	303
ANNEXE O. ARTICLE.....	307

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 : Localisation du bassin versant de la rivière Chaudière.....	11
Figure 3.2 : Les sous-bassins du bassin versant de la rivière Chaudière.....	14
Figure 4.1 : Représentation schématique du fonctionnement général de GIBSI	16
Figure 4.2 : Processus de digitalisation des USS et représentation de l'occupation du sol.....	18
Figure 4.3 : Fenêtre de gestion de l'occupation du sol de GIBSI. Dans cet exemple, le sous-bassin de la Beaurivage a été sélectionné, et toute la forêt à dominance feuillue est transformée en sol nu.	19
Figure 4.4 : Fenêtre de définition d'un nouveau scénario dans GIBSI. L'option permettant de définir une nouvelle occupation du sol à partir d'une carte est entourée en rouge.....	20
Figure 5.1 : Schéma récapitulatif de l'approche méthodologique	23
Figure 5.2 : Classification de l'occupation du sol pour l'année 1990	29
Figure 5.3 : Résumé de l'évolution temporelle de l'occupation du territoire pour les milieux agricole et forestier	33
Figure 5.4 : Évolution temporelle de l'occupation du territoire pour le milieu agricole.....	34
Figure 5.5 : Évolution temporelle de l'occupation du territoire pour le milieu <i>Forestier et arbustif</i>	35
Figure 5.6 : Évolution temporelle de l'occupation du territoire pour les classes <i>Urbain, Sol nu, Milieu humide</i> et <i>Eau</i>	36
Figure 5.7 : Évolution de l'occupation du sol au niveau du sous-bassin versant Beaurivage.....	37
Figure 5.8 : Évolution de l'occupation du sol au niveau du sous-bassin versant Tring/Saint-Victor	37

Figure 5.9 : Variation de la lame d'eau annuelle moyenne simulée à l'exutoire du bassin versant la Chaudière en fonction des scénarios d'occupation du sol.....	40
Figure 5.10 : Courbe de probabilité de non dépassement de la lame d'eau annuelle à l'exutoire du bassin versant de la rivière Chaudière en fonction des occupations du sol.....	40
Figure 5.11 : Lame d'eau mensuelle (moyenne sur les 30 ans de simulation) en fonction de l'occupation du sol à l'exutoire du bassin versant de la rivière Chaudière	41
Figure 5.12 Variation de la lame d'eau annuelle moyenne simulée au niveau du sous-bassin Beaurivage en fonction de l'occupation du sol.....	42
Figure 5.13 : Évolution de la lame d'eau annuelle moyenne simulée au niveau du sous-bassin Tring/Saint-Victor en fonction de l'occupation du sol.....	42
Figure 5.14 : Évolution annuelle des débits d'étiage à l'exutoire du bassin versant de la rivière Chaudière en fonction des occupations du sol.....	44
Figure 5.15 : Fréquence cumulée de la charge annuelle en sédiments simulée à l'exutoire du bassin versant de la rivière Chaudière en fonction de l'occupation du sol	46
Figure 5.16 : Évolution de la charge moyenne annuelle en sédiments simulée à l'exutoire du bassin versant de la rivière Chaudière en fonction de l'occupation du sol.....	47
Figure 6.1 : Approche globale de simulation	50
Figure 6.2 : Évolution des émissions et des concentrations de CO ₂ au cours du 21ème siècle selon différents scénarios d'émission (GIEC, 2001).....	52
Figure 6.3 : Évolution de la température moyenne mondiale pour les six scénarios indicatifs SRES, dérivée au moyen d'un modèle climatique simple. (Source : Bilan 2001 des changements climatiques : Les éléments scientifiques, Rapport du Groupe de travail I du GIEC, <i>Contribution du Groupe de travail I au troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat</i> , page 66).....	53
Figure 6.4 : Diagramme des différentes étapes et des combinaisons possibles pour l'utilisation du downscaling statistique et de la méthode des deltas. Chaque numéro correspond à une combinaison possible.....	55
Figure 6.5 : Méthode des deltas	58

Figure 6.6 : Schéma de l'approche journalière avec downscaling.....	59
Figure 6.7 : Schéma de l'approche mixte (Deltas appliqués aux données issues du downscaling).....	62
Figure 6.8 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire de la Chaudière selon les données historiques (référence) et les données des MCG-SEM appliqués par la méthode des deltas.....	64
Figure 6.9 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire de la Chaudière selon les données historiques (référence) et l'ensemble des MCG-SEM appliqués par la méthode des deltas considérés comme équiprobables (en rouge).....	65
Figure 6.10 : Lame d'eau mensuelle simulée à l'exutoire de la Chaudière avec les données historiques (boîte de gauche) et avec les données futures issues de la méthode des Deltas (ensemble des sept MCG-SEM, boîte de droite). Les étoiles indiquent que la différence est statistiquement significative (t -test apparié, $p < 0.05$)......	66
Figure 6.11 : Débit moyen journalier simulé à l'exutoire du bassin versant à partir des données de HadCM3_A2a_RMSE (A) et HadCM3_B2a_RMSE (B), pour la période future et la période de référence	68
Figure 6.12 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire de la Chaudière selon les données historiques (référence) et l'ensemble des MCG-SEM considérés comme équiprobables (en rouge), à l'aide de la méthode Mixte.....	70
Figure 6.13 : Lame d'eau mensuelle simulée à l'exutoire de la Chaudière avec les données historiques (boîte de gauche) et avec les données futures issues de la méthode des Deltas (ensemble des six MCG-SEM, boîte de droite). Pour chaque box-plot, la ligne rouge indique la valeur médiane, les limites de la boîte indiquent les 1 ^{er} et 3 ^e quartiles, et les limites des barres indiquent les valeurs minimales et maximales. Les étoiles indiquent que la différence des moyennes est statistiquement significative (t -test apparié, $p < 0.05$)......	71
Figure 6.14 : Effet des CC sur la lame d'eau moyenne mensuelle obtenu avec les trois méthodes à partir des données de HadCM3_A2a et HadCM3_B2a	73

Figure 6.15 : Fréquence cumulée de la charge annuelle de sédiments simulée à l'exutoire de la Chaudière selon les données historiques (référence) et les données des MCG-SEM appliqués par la méthode des Deltas.....	74
Figure 6.16 : Charge de sédiments mensuelle simulée à l'exutoire de la Chaudière avec les données historiques (boîte de gauche) et avec les données futures (en considérant tous les MCG-SEM comme équiprobables, boîte de droite). Pour chaque box-plot, la ligne rouge indique la valeur médiane, les limites des boîtes indiquent les 1 ^{er} et 3 ^e quartiles, et les limites des barres indiquent les valeurs minimales et maximales. Les étoiles indiquent que la différence des moyennes est statistiquement significative (t -test apparié, $p < 0.05$).	75
Figure 6.17 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée avec HadCM3_A2b (en bleu) et ECHAM4 (en vert) et l'occupation du sol de référence (trait gras, points ronds), le scénario A (carrés) et le scénario B (étoiles)	79
Figure 6.18 : Lame d'eau mensuelle simulée avec la méthode des Deltas en considérant les deux MCG-SEM utilisés (HadCM3-A2b et ECHAM4-A2) comme équiprobables, et avec l'occupation du sol de référence (boîte de gauche), le scénario A (boîte du centre) et le scénario B (boîte de droite). Les étoiles indiquent un effet statistiquement significative ($p < 0.05$) par rapport au scénario de référence	80
Figure 6.19 : Débit journalier moyen simulé à partir des scénarios d'occupation du sol de référence (Sc95), A et B, avec les données issues de HadCM3_A2a (A) et HadCM3_B2a (B)	81
Figure 6.20 : Débits d'étiage obtenus pour la période de référence (ref) et pour la période future avec l'occupation du sol de référence (Sc95) et avec les deux scénarios A et B	82
Figure 6.21 : Charges mensuelles en sédiments obtenus avec la méthode des Deltas en considérant les deux MCG-SEM utilisés (HadCM3-A2a et ECHAM4-A2) comme équiprobables, avec l'occupation du sol de référence (boîte de gauche) et les scénarios A (boîte du centre) et B (boîte de droite). Les étoiles indiquent un effet statistiquement significatif ($p < 0.05$) par rapport au scénario de référence.....	83
Figure 7.1 : Localisation du site expérimental.	88
Figure 7.2 : Dispositif expérimental.....	89

Figure 7.3 : Bloc formé de parcelles de soya et d'orge.....	89
Figure 7.4 : Composantes du système d'ajustement du débit des buses	90
Figure 7.5 : Schéma indiquant le positionnement des pots pour les tests d'intensités.....	91
Figure 7.6 : Test d'intensité de pluie et mesure des hauteurs d'eau.	92
Figure 7.7 : Dispositif en place pour effectuer une simulation de pluie.....	93
Figure 7.8 : Mesure des volumes d'eau et échantillonnage des MES.....	94
Figure 7.9 : Distribution spatiale des intensités de pluie pour un débit de 5,75 L/min.....	97
Figure 7.10 : Relation entre les intensités de pluie et le ruissellement pour l'orge et le soya.	98
Figure 7.11 : Relation entre les intensités de pluie et l'érosion pour l'orge et le soya.	99
Figure 7.12 : Résultats de l'analyse en composantes principales.	100
Figure 7.13 : Courbes IDF pour la région de Saint-Lambert-de-Lauzon (d'après Alila 2000).....	102
Figure 7.14 : Courbes IDF pour la région sud du Québec (d'après Mailhot et al. 2007).	103
Figure A.1: Résultat du calage et de la validation de HYDROTEL sur plusieurs sous- bassins du bassin versant de la rivière Chaudière	131
Figure A.2: Comparaison des charges journalières simulées (GIBSI) et observées pour l'année 1989 à l'exutoire de la Beaurivage (tronçon 1644)	133
Figure A.3: Comparaison des charges journalières simulées (GIBSI) et observées avec une échelle logarithmique pour l'année 1989 à l'exutoire de la Beaurivage (tronçon 1644)	134
Figure B.1 : Feuille 21L11 présentant l'utilisation du sol pour l'année 1977	135
Figure B. 2 : Agrandissement d'un feuillet d'utilisation du sol de 1977	136
Figure C.1 : Comparaison des résolutions spatiales des capteurs MSS, TM et ETM+	145
Figure C.2 : Ligne de pixel qui présente des anomalies sur l'image de 1976.....	147

Figure C.3 : Comparaison entre l'image géoréférencée et celle du secteur d'étude pour l'année 1990	149
Figure C.4 : Images satellites utilisées. Les zones entourées en rouge sont les secteurs non couverts par l'image, et les zones entourées en bleu indiquent la présence de couvertures nuageuses.....	150
Figure C.5 : Création de masque pour les surfaces nuageuses et ombragées (Image 1999)	152
Figure C.6 : Exemple d'identification de la classe « Eau » (Image 1995)	154
Figure C.7 : Paramétrisation de la segmentation à l'aide du logiciel eCognition (Image 1990)	157
Figure C.8 : Exemple de segmentation pour l'image de 1990.....	159
Figure C.9: Exemple de sites d'entraînement pour la classe Urbain (Image 1990)	163
Figure C.10: Exemple de sites d'entraînement pour la classe pâturage et foin (Image 1990)	164
Figure C.11: Exemple de sites d'entraînement pour la classe Céréales (Image 1990)	165
Figure C.12: Exemple de sites d'entraînement pour la classe Maïs (Image 1990)	165
Figure C.13: Exemple de sites d'entraînement pour la classe Milieu humide (Image 1990) ...	166
Figure C.14: Exemple de sites d'entraînement pour la classe Sol nu (Image 1990)	166
Figure C.15: Exemple de sites d'entraînement pour la casse Friche (Image 1990)	167
Figure C.16: Exemple de sites d'entraînement pour la classe Feuillus (Image 1990)	168
Figure C.17: Exemple de sites d'entraînement pour la classe Conifères (Image 1990).....	168
Figure C.18: Fenêtre principale du programme matrice et statistiques	174
Figure C.19: Fichier statistique généré à partir du programme matrice et statistique	174
Figure E.1 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Abénaquis	192

Figure E.2 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Araignées	193
Figure E.3 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Arnold	194
Figure E.4 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Basse-Chaudière	195
Figure E.5 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Beaurivage	196
Figure E.6 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Du Loup	197
Figure E.7 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Famine	198
Figure E.8 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Haute-Chaudière	199
Figure E.9 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Samson.....	200
Figure E.10 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Saint-Victor	201
Figure E.11 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Tring.....	202
Figure E.12 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Veilleux	203
Figure F.1 : Conversion Raster à Ascii	205
Figure F.2 : Importation des cartes dans Grassland	206
Figure F.3 : Choix des options pour la création de fichier statistique.....	207
Figure F.4 : Différentes composantes d'un fichier statistique.....	208

Figure G.1 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin Beaurivage.....	211
Figure G.2 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin Arnold.....	213
Figure G.3 : Évolution de la lame d'eau moyenne annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin Arnold.....	214
Figure G.4 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin Araignées.....	215
Figure G.5 : Évolution de la lame d'eau moyenne annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin Araignées.....	216
Figure G.6 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin Du Loup.....	217
Figure G.7 : Évolution de la lame d'eau moyenne annuelle à l'exutoire du sous-bassin DuLoup.....	218
Figure G.8 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée pour le sous-bassin Samson	219
Figure G.9 : Évolution de la lame d'eau moyenne annuelle au niveau du sous-bassin Samson	220
Figure G.10 :Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin des rivières Abénaquis - Veilleux - Famine.....	221
Figure G.11 :Évolution de la lame d'eau moyenne annuelle à l'exutoire du sous-bassin des rivières Abénaquis - Veilleux – Famine	222
Figure G.12 :Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin des rivières Saint-Victor et Tring.....	223
Figure G.13 :Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin Tring	225
Figure G.14 :Évolution de la lame d'eau moyenne annuelle à l'exutoire du sous-bassin Tring	226

Figure H.1: Écarts de précipitations et de température moyenne prévus par les différents MCG-SEM pour la période 2010-2039 par rapport à la période de référence 1970-1999.....	228
Figure H.2: Température minimale moyenne mesurée à la station de Saint-Flavien et simulée par les différents MCG -SEM	229
Figure H.3: Température maximale moyenne mesurée à la station de Saint-Flavien et simulée par les différents MCG-SEM	230
Figure H.4: Précipitation mensuelle mesurée à la station de Saint-Flavien et simulée par les différents MCG-SEM	230
Figure H.5: Facteurs moyens saisonniers appliqués aux données d'entrée de précipitations du modèle HYDROTEL	232
Figure H.6: Ratios mensuels de précipitations prévus par les MCG-SEM retenus.....	232
Figure H.7: Deltas moyens saisonniers des températures maximales selon les MCG-SEM et par SEM.....	233
Figure H.8: Écarts mensuels de température maximale de précipitations prévus par les MCG-SEM retenus	234
Figure H.9: Évolution de la moyenne mensuelle de la température journalière maximale passée et future tous MCG SEM confondus ($\text{moy.} \pm \sigma$) au cours de l'année à la station de Saint Flavien.....	234
Figure H.10: Deltas moyens saisonniers des températures journalières saisonnières minimales selon les MCG-SEM et par SE.....	235
Figure H.11: Écarts mensuels de température minimale de précipitations prévus par les MCG-SEM retenus	236
Figure H.12: Évolution de la moyenne mensuelle de la température journalière minimale passée et future ($\text{moy} \pm \sigma$) au cours de l'année à la station de Saint Flavien.....	236
Figure H.13: La lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire de la Chaudière selon les données historiques et les données des MCG-SEM appliqués par la méthode des deltas	237

Figure H.14: Probabilité de non dépassement des lames d'eau simulées à l'exutoire de la Chaudière selon les données historiques et les SE d'émission A2 et B appliqués par la méthode des deltas (au cours de l'été (a) et de l'hiver (b))	238
Figure H.15: Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire de la Chaudière selon les données historiques (référence) et l'ensemble des MCG-SEM appliqués par la méthode des deltas considérés comme équiprobables (en rouge)	239
Figure H.16: Fréquence cumulée des lames d'eau simulées à l'exutoire de la Chaudière selon les données historiques et l'ensemble des MCG-SEM appliqués par la méthode des deltas (au cours du printemps (a), de l'été (b), de l'automne (c) et de l'hiver (d)	240
Figure H.17: Lame d'eau mensuelle moyenne (sur les 30 ans) simulée à l'exutoire de la Chaudière avec les données historiques (en noir) et avec les données futures issues des différents MCG-SEM.....	241
Figure H.18: Répartition au cours de l'année des débits d'étiage cumulés sur 30 jours (a) et 7 jours (b).....	242
Figure I.1 : Stations météorologiques du bassin versant de la rivière Chaudière. Les stations en rouge sont celles qui ont été utilisées pour l'application du downscaling	245
Figure I.2 : Schématisation de l'approche de modélisation.....	246
Figure I.3 : Écart relatif, pour différentes périodes, entre la lame d'eau cumulée simulée au tronçon 33 (a) et au tronçon 1642 (b) à partir des données météorologiques historiques (9 stations, interpolation polygones de Thiessen) et la lame d'eau mesurée	248
Figure I.4 : Moyenne mensuelle des précipitations selon les données historiques, et chacune des chroniques (RMSE, h1 et h2) du MCG HadCM3 scénario d'émission A2a et B2a aux stations de mesure a) Saint-Flavien, b) Saint-Georges et c) Lac Mégantic pour la période 1970-1999	249
Figure I.5 : Hydrogramme des débits simulés à partir des données météorologiques historiques et issues de la méthode du downscaling pour le scénario A2a (RMSE) et B2a (RMSE) à l'exutoire de la Chaudière entre le 1 octobre 1987 et le 30 septembre 1991.	252

Figure I.6:	Débit moyen journalier simulé à partir des données météorologiques mesurées (en noire) et des données issues du downscaling pour la période de référence	253
Figure I.7 :	Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée avec la méthode du Downscaling appliqué aux données issues de HadCM3_A2a (A) et hadCM3_B2a (B) en considérant les différentes chroniques (h1, h2 et RMSE) comme équiprobables, pour la période de référence (en noir) et la période future (en rouge).....	254
Figure I.8 :	Probabilité de non dépassement des lames d'eau simulées à l'exutoire de la Chaudière selon les données historiques et les chroniques des MCG-SEM HadCM3 A2a et B2a « corrigées » appliqués par la méthode du Downscaling, au printemps (a), à l'été (b), à l'automne (c) et à l'hiver (d).....	256
Figure I.9 :	Lame d'eau mensuelle simulée à l'exutoire de la Chaudière avec les données historiques (boîte de gauche) et avec les données futures issues de la méthode du Downscaling (boîte de droite) pour les deux MCG-SEM considérés. Les étoiles indiquent que la différence est statistiquement significative (t -test apparié, $p < 0.05$).....	257
Figure I.10:	Débit moyen journalier simulé à l'exutoire du bassin versant à partir des données de HadCM3_A2a_RMSE (A) et HadCM3_B2a_RMSE (B), pour la période future et la période de référence	258
Figure I.11:	Débit moyen journalier simulé à l'exutoire du bassin versant à partir des données de HadCM3_A2a_h1 (A) et HadCM3_B2a_h1 (B), pour la période future et la période de référence	259
Figure I.12:	Débit moyen journalier simulé à l'exutoire du bassin versant à partir des données de HadCM3_A2a_h2 (A) et HadCM3_B2a_h2 (B), pour la période future et la période de référence	260
Figure I.13 :	Répartition au cours de l'année des débits minimums cumulés sur 30 jours (a) et 7 jours (b) les plus faibles.	262
Figure J.1 :	Probabilité de non dépassement des lames d'eau simulées à l'exutoire de la Chaudière selon les données historiques et les chroniques des MCG-SEM HadCM3 A2a et B2a appliqués par la méthode Mixte (au cours du printemps (a), de l'été (b), de l'automne (c) et de l'hiver (d).	267

Figure J.2 : Lamé d'eau mensuelle moyenne (sur les 30 ans) simulée à l'exutoire de la Chaudière avec les données historiques (en noir) et avec les données futures issues des MCG-SEM et chroniques considérés (en rouge)	268
Figure J.3 : Répartition au cours de l'année des débits minimums cumulés sur 30 jours (a) et 7 jours (b) les plus faibles.	269
Figure K.1 : Méthode de quantification des facteurs prioritaires.....	272
Figure K.2 : Évolution du cheptel porcin sur le bassin sur le bassin de la rivière Chaudière et au Québec entre 1970 et 2005; le profil de l'évolution au Québec (trait plein) se veut une reconstitution des données compilées par le BAPE (2003), p.10; la concordance entre les tendances des deux courbes valide le jeu de données compilé dans le cadre de ce travail.	275
Figure K.3 : Extrapolation linéaire de la valeur du nombre de porcs en inventaire sur le bassin de la rivière Chaudière entre 1980 et 2025; les valeurs correspondant aux années 1970 sont exclues de l'extrapolation par hypothèse; la valeur projetée pour 2025 est de 136 370 unités animales.	276
Figure K.4 : Quantification des classes d'occupation du sol par régression linéaire, exemple du maïs; la valeur projetée (à la Figure K.3) de 136 370 unités animales correspond à une occupation du sol par la classe « maïs » de 2,96%.	277
Figure K.5 : Mise en œuvre des modifications des occupations du sol dans GIBSI; un transfert partiel d'une classe paramétrable dans GIBSI à l'échelle du bassin (Δ) nécessite la sommation d'une série de transferts totaux à l'échelle des unités spatiales de simulation ($\Sigma\delta$).	280
Figure K.6 : Distribution des terres agricoles sur le bassin en 1976, provenant d'images satellites classifiées.	282
Figure L.1 : Lamé d'eau mensuelle simulée à l'aide de la méthode des Deltas et des deux MCG-SEM, en considérant l'occupation du sol de référence (boîte de gauche) et les scénarios A (boîte du centre) et B (boîte de droite). Les étoiles indiquent un effet statistiquement significatif ($p < 0.05$) par rapport au scénario de référence.....	286
Figure L.2 : Charge de sédiments mensuelle simulée à l'aide de la méthode des Deltas et des deux MCG-SEM, en considérant l'occupation du sol de référence	

(boîte de gauche) et les scénarios A (boîte du centre) et B (boîte de droite). Les étoiles indiquent un effet statistiquement significatif ($p < 0.05$) par rapport au scénario de référence	288
Figure M.1 : Relation entre la hauteur d'eau et le volume d'eau accumulée dans un réservoir.	294
Figure M.2 : Délimitation des parcelles et nivellement des pentes.	295
Figure M.3 : Installation des gouttières de métal en aval des parcelles.	295
Figure M.4 : Confection des réservoirs utilisés pour la collecte des eaux de ruissellement	296
Figure M.5 : Excavation de la tranchée et aménagement des drains d'évacuation.....	296
Figure M.6 : Installation des regards et des réservoirs.....	297
Figure M.7 : Aménagement de la station de pompage	297
Figure M.8 : Électrification de la station de pompage.....	298
Figure M.9 : Accès au puits et installation de la pompe submersible.....	298
Figure M.10 : Aménagement des réservoirs et raccordement aux parcelles.....	299
Figure M.11 : Installation du circuit de contournement bi-valves	299
Figure M.12 : Vue générale du site expérimental.	300
Figure M.13 : Vue générale du site expérimental	300
Figure M.14 : Plan général du site expérimental	301
Figure M.15 : Composantes du système de drainage.....	302

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5.1 :	Images acquises dans le cadre du projet	25
Tableau 5.2 :	Classes d'occupations utilisées dans GIBSI	28
Tableau 5.3 :	Évolution de l'occupation du sol pour chacune des classes thématiques.....	32
Tableau 5.4 :	Évolution des débits d'étiage annuels et estivaux Q2-7, Q10-7 et Q5-30 (en m ³ /s) à l'exutoire de la rivière Chaudière en fonction des occupations du sol.....	44
Tableau 5.5 :	Coefficients de corrélation et de détermination entre les débits d'étiage et l'occupation du sol au niveau du bassin versant de la Chaudière	45
Tableau 5.6 :	Coefficient de corrélation et de détermination entre la charge annuelle moyenne simulée et l'occupation agricole du bassin versant.....	47
Tableau 6.1 :	Description des principaux scénarios d'émission de gaz à effet de serre	52
Tableau 6.2 :	MCG, SE et membres de simulation retenus	63
Tableau 6.3 :	Débit de pointe et d'étiage estival obtenu à l'exutoire du bassin versant avec les données historiques (référence) et effet relatif des différents MCG-SEM. Les étoiles indiquent un effet statistiquement significatif (<i>t</i> - test, <i>p</i> < 0.05).....	67
Tableau 6.4 :	Écart relatif entre les Q_{2-7} , Q_{10-7} et Q_{5-30} estivaux futures et passés.	69
Tableau 6.5 :	Écart relatif entre les lames d'eau futures et passées simulées à l'échelle annuelle à l'exutoire de la Chaudière selon les trois méthodes.....	72
Tableau 7.1 :	Séquences pluie-arrêt pour les simulations de pluies.	93
Tableau 7.2 :	Étalonnage des buses pour un débit approximatif de 5,70 L/min.	96
Tableau 7.3 :	Étalonnage des hauteurs de pluie pour un débit de 5,75 L/min.	96
Tableau 7.4 :	Étalonnage des intensités de pluie pour un débit de 5,75 L/min.	96

Tableau 7.5 : Modèles IDF proposés par Alila (2000).	102
Tableau 9.1 : Échéancier du projet	111
Tableau A.1: Résultats du calage pour les charges annuelles et saisonnières de sédiments sur l'année 1989 à l'exutoire de la rivière Beaurivage (en kg/ha) ...	132
Tableau C.1 : Caractéristiques des capteurs	144
Tableau C.2 : Paramètres de seuillage pour créer la classe « Eau »	153
Tableau C.3: Exemple d'analyse en composantes principales pour l'image de 1990	155
Tableau C.4: Classes d'occupations utilisées dans GIBSI	162
Tableau C.5: Affichage des images MSS et TM et ETM+	162
Tableau C.6: Comparaison des superficies et pourcentages des classes thématiques (1987)	171
Tableau C.7: Comparaison des superficies et pourcentages des classes thématiques (1995)	172
Tableau C.8: Comparaison des superficies du milieu agricole	173
Tableau D.1 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1976 à 1981 pour le bassin versant de la rivière Chaudière	176
Tableau D.2 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1976 à 1981 pour le bassin versant de la rivière Chaudière, des classes vers les regroupements de classes	177
Tableau D.3: Matrice de transition de l'occupation du sol par classe thématique de 1976 à 1981	177
Tableau D.4 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1981 à 1987 pour le bassin versant de la rivière Chaudière	178
Tableau D.5 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1981 à 1987 pour le bassin versant de la rivière Chaudière, des classes vers les regroupements de classes	179

Tableau D.6 : Matrice de transition de l'occupation du sol par classe thématique de 1981 à 1987	179
Tableau D.7 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1987 à 1990 pour le bassin versant de la rivière Chaudière	180
Tableau D.8 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1987 à 1990 pour le bassin versant de la rivière Chaudière, des classes vers les regroupements de classes	181
Tableau D.9 : Matrice de transition de l'occupation du sol par classe thématique de 1987 à 1990	181
Tableau D.10 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1990 à 1995 pour le bassin versant de la rivière Chaudière.	182
Tableau D.11 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1990 à 1995 pour le bassin versant de la rivière Chaudière, des classes vers les regroupements de classes	183
Tableau D.12 : Matrice de transition de l'occupation du sol par classe thématique de 1990 à 1995	183
Tableau D.13 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1995 à 1999 pour le bassin versant de la rivière Chaudière.	184
Tableau D.14 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1995 à 1999 pour le bassin versant de la rivière Chaudière, des classes vers les regroupements de classes	185
Tableau D.15 : Matrice de transition de l'occupation du sol par classe thématique de 1995 à 1999.	185
Tableau D.16 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1999 à 2003 pour le bassin versant de la rivière Chaudière.	186
Tableau D.17 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1999 à 2003 pour le bassin versant de la rivière Chaudière, des classes vers les regroupements de classes	187
Tableau D.18 : Matrice de transition de l'occupation du sol par classe thématique de 1999 à 2003.	187

Tableau D.19 : Moyenne des récurrences, confusions et redistributions de l'occupation du sol de 1976 à 2003	188
Tableau E.1 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Abénaquis	191
Tableau E.2 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Araignées.....	193
Tableau E.3 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Arnold	194
Tableau E.4 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Basse-Chaudière.....	195
Tableau E.5 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Beaurivage.....	196
Tableau E.6 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Du Loup.....	197
Tableau E.7 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Famine.....	198
Tableau E.8 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Haute-Chaudière.....	199
Tableau E.9 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Samson.....	200
Tableau E.10 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Saint-Victor.....	201
Tableau E.11 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Tring	202
Tableau E.12 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Veilleux.....	203
Tableau G.1 : Quantiles de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin Beaurivage	211

Tableau G.2 : Coefficients de corrélation et de détermination de la lame d'eau annuelle et des débits d'étiage avec l'occupation du sol pour le sous-bassin Beaurivage.....	212
Tableau G.3 : Quantiles de la lame d'eau annuelle simulée au niveau du sous-bassin Arnold.....	213
Tableau G.4 : Coefficients de corrélation et de détermination de la lame d'eau annuelle et des débits d'étiage avec l'occupation du sol pour le sous-bassin Arnold	214
Tableau G.5 : Quantiles de la lame d'eau annuelle simulée au niveau du sous-bassin Araignées.....	215
Tableau G.6 : Coefficients de corrélation et de détermination entre les débits d'étiage et l'occupation du sol au niveau du sous-bassin Araignées.....	216
Tableau G.7 : Quantiles de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin Du Loup.....	217
Tableau G.8 : Coefficients de corrélation et de détermination entre les débits d'étiage et l'occupation du sol au niveau du sous-bassin DuLoup.....	218
Tableau G.9 : Quantiles de la lame d'eau annuelle simulée au niveau du sous-bassin Samson.....	219
Tableau G.10 : Coefficients de corrélation et de détermination entre les débits d'étiage et l'occupation du sol au niveau du sous-bassin Samson	220
Tableau G.11 : Quantiles de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin des rivières Abénaquis - Veilleux - Famine	221
Tableau G.12 : Coefficients de corrélation et de détermination entre les débits d'étiage et l'occupation du sol au niveau du sous-bassin Abénaquis - Veilleux - Famine	222
Tableau G.13 : Quantiles de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin des rivières Saint-Victor et Tring.....	223
Tableau G. 14 : Coefficients de corrélation et de détermination entre les débits d'étiage et l'occupation du sol au niveau du sous-bassin Tring/Saint-Victor.....	224

Tableau G.15 : Quantiles de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin Tring.....	225
Tableau G.16 : Coefficients de corrélation et de détermination entre les débits d'étiage et l'occupation du sol au niveau du sous-bassin Tring.....	226
Tableau H.1: MCG, SE et membres de simulation retenus.....	231
Tableau H.2: Précipitations cumulées saisonnières moyennes sur 30 ans à la station Saint Flavien, selon les données historiques (référence) et selon l'application des deltas mensuels issus des différents MCG-SEM pour la période future.....	232
Tableau H.3 : Débit d'étiage annuel Q_{2-7} , Q_{10-7} et Q_{5-30} selon lames d'eau simulées des différents MCG-SEM et les données météorologiques historiques.....	243
Tableau H.4 : Débit d'étiage estival Q_{2-7} , Q_{10-7} et Q_{5-30} obtenus avec les différents MCG-SEM et les données météorologiques historiques	243
Tableau I.1 : Valeurs des variables statistiques étudiées pour la validation du calage de HYDROTEL entre la lame d'eau journalière simulée à partir des données historiques (9 stations, interpolation polygone de Thiessen) et celle mesurée (a) au tronçon 33 (La Chaudière à St Lambert) et (b) au tronçon 1642 (exutoire de la Beaurivage)	247
Tableau I.2 : Écart relatif des lames d'eau annuelles simulées pour la période passée entre celles issues de l'utilisation des MCG et celles issues des données historiques	250
Tableau I.3 : Écarts relatif entre les Q_{2-7} , Q_{10-7} et Q_{5-30} annuels futures et passés.....	262
Tableau I.4 : Écarts relatifs entre les Q_{2-7} , Q_{10-7} et Q_{5-30} estivaux futures et passés.	263
Tableau K.1 : Porcs en inventaires sur le bassin de la rivière Chaudière entre 1971 et 2004.	274
Tableau K.2 : Synthèse des paramètres statistiques et résultats de la quantification des occupations du sol pour le scénario A.	277
Tableau K.3 : Quantification à l'échelle du bassin des scénarios A et B.....	278

Tableau K.4 : Matrices de transition quantifiant les transferts de classes du scénario permanent vers les scénarios A et B.....	283
Tableau M.1 : Caractéristiques du site expérimental	292
Tableau N.1 : Intensités de pluie (mm/h)	303
Tableau N.2 : Début du ruissellement (minutes).....	303
Tableau N.3 : Durée du ruissellement (minutes).....	304
Tableau N.4 : Volume de ruissellement (litres).....	304
Tableau N.5 : Débit de ruissellement (Litres/minute)	305
Tableau N.6 : Concentration de MES (mg/Litre).....	305
Tableau N.7 : Débit de MES (mg/minute)	306
Tableau N.8 : Érosion nette (kg/ha)	306

LISTE DES SIGLES

CC	Changements Climatiques
CCCMA	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
CV	Coefficient de variation
FACC	Fonds d'Action pour les Changements Climatiques
FADQ	Financière Agricole Du Québec
GIBSI	Gestion Intégrée des Bassins versants à l'aide d'un Système Informatisé
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
INRS-ETE	Institut National de la Recherche Scientifique – Centre Eau, Terre et Environnement
IRDA	Institut de Recherche et Développement en Agri-environnement
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
MCG	Modèle de Circulation Générale
MCG-SEM	Combinaison d'un modèle de circulation générale, d'un scénario d'émission de gaz à effet de serre et d'un membre de simulation
MRC	Modèle Régional Climatique
SE	Scénario d'Émission de Gaz à effet de serre
SIG	Système d'Information Géographique
USS	Unité Spatiale de Simulation

1 INTRODUCTION

La quantité et la qualité de l'eau à l'échelle d'un bassin versant sont affectées par de nombreux facteurs, qu'ils soient naturels ou liés aux activités humaines. En premier lieu, les conditions météorologiques sont déterminantes et une modification des températures et du régime de précipitation en intensité, en durée et en fréquence peut avoir un effet drastique sur le régime hydrologique d'un bassin versant. Ainsi, les changements climatiques (CC) à venir vont inévitablement nécessiter la mise en place de mesures d'adaptation concernant les facteurs anthropiques afin de minimiser les effets négatifs et maximiser les effets positifs des CC. Si la réflexion sur l'adaptation au CC se base le plus souvent sur des critères socio-économiques, il est important de considérer également l'impact potentiel de scénarios d'adaptation sur l'environnement et plus particulièrement sur les ressources hydriques. L'agriculture est un domaine particulièrement sensible aux aléas climatiques et l'utilisation agricole du territoire peut être un élément déterminant de l'adaptation au CC, avec un impact non négligeable sur les ressources hydriques.

L'étude de la capacité d'adaptation de l'agriculture et de l'occupation du territoire aux CC doit se baser en premier lieu sur l'analyse des données historiques afin de préciser le rôle des différents facteurs climatiques et anthropiques mis en jeu (Reilly *et al.*, 2003). Dans un deuxième temps, et afin de pouvoir déterminer quelles mesures d'adaptation à encourager et mettre en place dans le futur, il est nécessaire de procéder à l'identification et à l'évaluation prédictive des différents scénarios d'évolution possible de l'occupation du territoire dans un contexte de CC. Il s'agit d'estimer leur faisabilité, leur efficacité, et leurs conséquences, aussi bien sur le plan agronomique, qu'environnemental et économique, et ce à plusieurs échelles, de l'exploitation agricole au bassin versant. La difficulté de ce genre d'approche réside alors dans la complexité des liens existant entre les différents domaines affectés par les CC (ressources en eau, agriculture, économie, politique, aspects socioculturels) et entre les différentes échelles spatiales (Parson *et al.*, 2003). Compte tenu de cette complexité, l'utilisation accrue des nouvelles technologies, et en particulier de modèles de gestion intégrée du territoire et des ressources, est une voie prometteuse à approfondir.

Dans ce contexte, les principaux objectifs de ce projet sont les suivants :

- (i) Identifier, sur la base des 30 dernières années, l'influence passée de l'occupation agricole du sol sur l'hydrologie et la qualité de l'eau à l'échelle du bassin versant.
- (ii) Évaluer l'impact des CC sur le régime hydrologique, l'érosion et la qualité de l'eau et déterminer l'influence de scénarios futurs d'occupation agricole du sol comme tendance possible d'adaptation.

Pour ce faire, nous proposons d'utiliser une méthode d'évaluation de la vulnérabilité agricole et des mesures d'adaptation aux CC à l'échelle du bassin versant, basée sur le système de modélisation intégrée GIBSI (Gestion Intégrée des Bassins versants à l'aide d'un Système Informatisé, Villeneuve *et al.*, 1998a). Cette étude a été réalisée sur le bassin versant de la rivière Chaudière. En parallèle, des expériences ont été réalisées en conditions contrôlées pour étudier l'effet des CC sur l'érosion.

Ce projet a été financé en majeure partie par le Fonds d'Action pour les Changements Climatiques (FACC) en collaboration avec le Consortium OURANOS, et a impliqué de nombreux collaborateurs (scientifiques et gestionnaires, voir section 9.1). Le projet a démarré officiellement le 3 août 2004 et est arrivé à échéance le 31 décembre 2006. Un rapport d'étape a été réalisé le 15 mars 2005 (Rousseau *et al.*, 2005), présentant un état d'avancement du projet. Ce rapport final présente l'ensemble des travaux réalisés et des résultats obtenus. Certains travaux et résultats ont déjà été décrits en détails dans des précédents rapports c'est pourquoi ils sont présentés à nouveau plus succinctement dans ce rapport final.

La plupart des objectifs ont été atteints. Toutefois, certaines parties du projet ont nécessité plus de travail et de temps que prévu (en particulier la détermination des conditions climatologiques futures) ce qui implique que certains travaux initialement prévus n'ont pu être réalisés : ainsi, l'effet des CC et des changements d'occupation du sol sur la qualité de l'eau (concentrations en nutriments) n'ont pas pu être évalués. De même, l'analyse économique avantage-coûts initialement prévue a dû être abandonnée. Enfin, la mise en place des parcelles expérimentales a été plus longue que prévue, ainsi seule une partie des expériences prévues initialement a pu être réalisée.

Le présent rapport est structuré comme suit :

- Le Chapitre 2 consiste en une mise en contexte et un survol de la littérature dans le domaine du rôle de l'occupation du sol et de l'adaptation au CC.
- Le Chapitre 3 consiste en une présentation du bassin versant de la rivière Chaudière et de ses principales caractéristiques.
- Le Chapitre 4 consiste en une présentation du système d'aide à la décision GIBSI, de sa structure générale, son fonctionnement, avec un accent particulier sur les outils permettant de gérer l'occupation du sol, ainsi que des applications réalisées et des développements en cours.

-
- Le Chapitre 5 présente la première partie de cette étude, c'est-à-dire l'approche rétrospective consistant à identifier l'évolution passée de l'occupation du sol sur le bassin versant et son influence sur le régime hydrologique et la qualité de l'eau.
 - Le Chapitre 6 présente la seconde partie de l'étude, soit l'approche prédictive consistant à déterminer l'effet des CC sur le régime hydrologique et la qualité de l'eau et l'influence de scénarios d'occupation du sol.
 - Le Chapitre 7 réalise une synthèse des résultats et propose des perspectives de recherche.
 - Le Chapitre 8 présente l'étude expérimentale réalisée en conditions contrôlées pour déterminer l'effet des CC sur les processus d'érosion.
 - Le Chapitre 9 présente les activités de coordination avec l'équipe de travail et de collaborateurs, ainsi que les activités de promotion, de diffusion et de publication réalisés à ce jour

Plusieurs annexes sont présentées, comprenant la description détaillée des méthodes utilisées, des résultats non présentés dans le document principal, ainsi qu'un article sur le point d'être publié.

2 MISE EN CONTEXTE ET BREF ÉTAT DES CONNAISSANCES

Afin de bien comprendre les enjeux de cette étude, il convient de faire un état des lieux sur les connaissances liées à la vulnérabilité de l'agriculture au CC, aux effets prévus des CC et aux processus d'adaptation envisagés.

2.1 VULNÉRABILITÉ DE L'AGRICULTURE AU CLIMAT

Les effets positifs et négatifs des fluctuations climatiques de courtes périodes de ces dernières années sont connus des agriculteurs aux niveaux local et régional. En effet, les impacts des événements extrêmes sont bien répertoriés. Au Québec, la financière agricole (FADQ) propose entre autre l'assurance récolte (ASREC) qui couvre les pertes de revenus attribuables à des baisses de rendement provoquées par des conditions climatiques adverses et des phénomènes naturels incontrôlables. La FADQ répertorie donc tous les dommages dus à des variations climatiques comme par exemple les répercussions négatives d'un épisode de grêle (anéantissement de récoltes entières et dévastation de vergers) et celles d'une période de sécheresse (baisse du rendement des cultures)³.

Il est évident que les fluctuations de températures et de précipitations ont des influences sur les écosystèmes à l'échelle régionale (les inondations, les sécheresses...). Toutefois, imputer ces bouleversements observés au CC est osé étant donné l'incertitude à savoir s'il s'agit de fluctuations normales de températures et de précipitations ou s'il s'agit bien là de signes avant-coureurs du réchauffement climatique. En revanche, le changement de climat à venir et ses impacts sur l'agriculture semblent inéluctables.

L'agriculture est un secteur particulièrement vulnérable au CC. Certains effets seront sûrement avantageux, d'autres négatifs. Il est nécessaire donc de minimiser les effets négatifs et maximiser les effets positifs en élaborant des mesures d'adaptation propres aux pratiques agricoles.

³ Renseignements disponibles sur le site de la FADQ : www.financiereagricole.qc.ca

2.2 EFFET ATTENDU DES CC SUR L'AGRICULTURE ET LES RESSOURCES EN EAU

2.2.1 Effet des CC sur l'agriculture

Le CC projeté influera sur l'agriculture en accélérant la vitesse de maturation des plantes, en allongeant la saison de croissance, en augmentant l'érosion, les infestations d'insectes et en diminuant l'efficacité des pesticides (Ressources Naturelles Canada, 2002).

Bélangier et Bootsma (2002) ont étudié les répercussions possibles des changements climatiques sur l'agriculture du Québec et notamment sur les récoltes de maïs, soya, orge, plantes fourragères et arbres fruitiers. Leur étude a conduit à la conclusion suivante : le CC prévu pour les prochaines décennies devrait occasionner des augmentations de rendement de maïs, de soya et de plantes fourragères par contre aucune augmentation pour l'orge n'est prévue. Il semble alors que toutes les espèces limitées dans leur croissance par la température auront des rendements plus forts du fait de l'hypothèse d'un réchauffement. Le CC influera aussi sur les périodes de croissance des différentes cultures. Bootsma *et al.* (2004) avaient également étudié l'impact de ce changement sur l'agriculture dans le Canada Atlantique à l'aide du MCG canadien. Ils ont également conclu à une augmentation de rendement pour le maïs et le soja. de Jong *et al.* (2001) ont étudié la vulnérabilité de certaines cultures face à un scénario de CC de type doublement de CO₂ atmosphérique d'ici 2050. Ils notèrent notamment que le blé et le canola sont susceptibles de ne pas être perturbés par un tel CC alors que les rendements du blé d'hiver, des pommes de terre et du soja tendront à augmenter.

Les risques existent aussi pour le bétail : l'augmentation du nombre d'événements extrêmes devrait accroître la mortalité du bétail liée au stress thermique, même si des hivers plus chauds pourraient réduire la mortalité néonatale aux latitudes tempérées (GIEC, 2001).

Ainsi, on connaît relativement bien aujourd'hui les répercussions possibles des CC sur les différentes composantes de l'agriculture canadienne (cultures, bétail, érosion, parasites, économie). Toutefois, il existe encore des lacunes importantes dans la connaissance des processus d'adaptation et donc de la vulnérabilité de l'agriculture canadienne aux CC (Collectif, 2002). De plus, la plupart des études se sont focalisées sur les aspects agronomiques, sans intégrer la dimension environnementale et en particulier les conséquences de ces processus d'adaptation sur les ressources sol et eau.

2.2.2 Effet des CC sur le ruissellement et l'érosion hydrique

Les études récentes indiquent que le ruissellement et l'érosion hydrique sont plus influencés par les modifications annuelles des précipitations associées aux quantités et aux intensités de pluies qu'au nombre total de jours de pluie dans l'année (SWCS, 2003). Thacker (2004) souligne qu'une augmentation de l'intensité des pluies d'environ 10% entraînerait une augmentation de 24% du taux moyen d'érosion des sols. Nearing et al. (2004) suggèrent que le ruissellement et l'érosion hydrique augmenteraient d'environ 2% pour chaque hausse de 1% des précipitations annuelles. Phillips (1993) mentionne plutôt qu'une hausse moyenne de 2 à 7% des taux d'érosion serait imputable aux CC.

L'érosion hydrique est affectée par la couverture végétale qui réduit l'impact des gouttes de pluie au sol ainsi que le détachement et la capacité de transport des sédiments. La production de biomasse constitue donc un facteur dominant dans la relation entre les CC et l'érosion des sols (Nearing *et al.*, 2004). Les conséquences de l'adaptation des cultures et des pratiques agricoles auront donc, à leurs tours, une influence majeure sur l'érosion hydrique des sols (Duchemin *et al.*, 2004).

Toutefois, la plupart des études qui tentent d'évaluer l'effet des CC sur l'hydrologie à l'échelle des bassins versants considèrent que la configuration du bassin resterait la même qu'aujourd'hui (voir par exemple Wood et Maurer, 2002). Toutefois, il est probable que l'occupation du sol va continuer à évoluer dans les prochaines années, en adaptation au CC mais aussi aux impératifs, socio-économiques ou environnementaux. Cette évolution aura sans nul doute une influence importante sur l'hydrologie et doit donc être prise en considération (Kite, 1993).

2.3 MESURES D'ADAPTATION

Les mesures d'adaptation vont dépendre de la nature et de l'ampleur du CC et des degrés de vulnérabilité et de sensibilité des terres agricoles. Les premiers critères considérés, lorsque l'on parle d'adaptation de l'agriculture au CC, sont économiques. L'adaptation doit permettre de minimiser les pertes et d'améliorer les rendements. La question est de savoir quelles conséquences ces mesures d'adaptation économiques auront sur la sensibilité des terres agricoles. En effet, l'intensification et la spécialisation de l'agriculture lui confèrent une dimension polluante étant donné la contamination des cours d'eau et la destruction ou l'altération des habitats fauniques et floristiques par le lessivage des sols dégradés, les pesticides, les fumiers et les aménagements hydro-agricoles mal conçus. Il ne s'agit pas de mettre en place des mesures qui intensifieront ces problèmes.

Intéressons-nous aux principales mesures préconisées dans la littérature. En général, ces mesures concernent l'intensification de l'utilisation des terres agricoles, l'allongement des périodes de culture et la diversification des cultures afin de minimiser l'impact des événements extrêmes, et une augmentation des cultures commerciales plus exigeantes en terme de climat : principalement maïs grain et soja dans le sud du Québec (Bryant *et al.*, 2000; Smit et Skinner, 2002). De plus, si les conditions climatiques changent, les producteurs agricoles seront enclins à concilier leurs cultures et leurs pratiques agricoles aux conditions de l'économie (Nearing *et al.*, 2004). De façon générale, on s'attend à voir la production agricole passer à des cultures mieux adaptées à des climats plus chauds, bien que le choix des cultures continuera d'être influencé par des facteurs non climatiques. Ces facteurs sont ardues à gérer car ils font intervenir des paramètres socio-économiques difficilement quantifiables à long terme. Compte tenu de l'utilisation déjà très intensive des terres de la plaine du Saint-Laurent, cette tendance impliquerait notamment une reprise des terres cultivables actuellement en friches, situées dans des zones à plus forte pente et sur des sols plus vulnérables au ruissellement et à l'érosion. de Jong *et al.* (2001) considèrent que l'avancement des dates de plantation de l'orge et la fertilisation par des engrais azotés, en vue de compenser les effets négatifs de l'augmentation du stress hydrique sur le blé du printemps, sont des mesures à adopter. Pour Smit et Skinner (2002), les mesures d'adaptation à préconiser doivent concerner le développement technologique c'est-à-dire les nouvelles variétés de cultures et innovations diverses, les assurances, les pratiques de production agricole et la gestion financière agricole. Dans le rapport *Impact et Adaptation liés au changement climatique : perspective canadienne* (volet agriculture) de Ressources Naturelles Canada (2002), il apparaît également que l'apparition de nouvelles espèces et d'espèces hybrides soit une des principales mesure d'adaptation du secteur agricole à privilégier. Dans le rapport du GIEC de 2001, les solutions envisageables concernent les modifications des doses d'engrais, des dates de plantation et de semis et des régimes d'irrigation.

Ces modifications des systèmes cultureux et de l'occupation du territoire auront inévitablement une influence importante sur le ruissellement, le régime hydrologique des bassins versants agricoles et la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique. En particulier, il est important de comprendre et quantifier l'influence de l'occupation du territoire sur le régime hydrologique à l'échelle du bassin versant.

2.4 INFLUENCE DE L'OCCUPATION DU SOL SUR LE RÉGIME HYDROLOGIQUE

Le développement récent des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et des modèles hydrologiques distribués offre des outils pratiques et efficaces pour étudier l'effet de

L'occupation du territoire sur le régime hydrologique à l'échelle des bassins versants (Fohrer *et al.*, 2001). Toutes les études en sens montrent que la déforestation au profit de terres agricoles provoque une augmentation du ruissellement et de la lame d'eau à l'exutoire du bassin versant, à des niveaux variables. Par exemple, Costa *et al.* (2003) ont montré qu'une augmentation des terres agricoles de 30% à 49% du bassin versant de la rivière Tocantins (Brésil, 767 000 km²) a mené à une augmentation de 24% de la lame d'eau annuelle. D'un autre côté, Fohrer *et al.* (2001) ont trouvé un effet modéré des changements d'occupation du sol sur le bilan hydrique du petit bassin versant de la rivière Dietzhölze (Allemagne, 82 km²). De plus, Dunn and MacKay (1995) ont montré avec le modèle distribué SHETRAN que le changement d'occupation du sol a plus d'influence sur les sous-bassins situés en aval que sur ceux situés en amont. Ainsi, l'intensité de l'effet de l'occupation du sol sur le régime hydrologique d'un bassin versant dépend de nombreux facteurs dont la taille, la pente et les caractéristiques d'occupation du sol du bassin versant (voir aussi Matheussen *et al.*, 2000; Cognard-Plancq *et al.*, 2001). Bien sûr, cela dépend aussi du modèle hydrologique utilisé et des processus simulés.

Ces outils d'aide à la décision peuvent également être utilisés pour définir des changements optimaux d'occupation du sol permettant d'atteindre des objectifs spécifiques comme par exemple réduire le débit de pointe ou la pollution diffuse (Yeo *et al.*, 2004).

3 LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE

Le bassin versant de la rivière Chaudière est situé sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent et a une superficie de 6 680 km² (Figure 3.1).

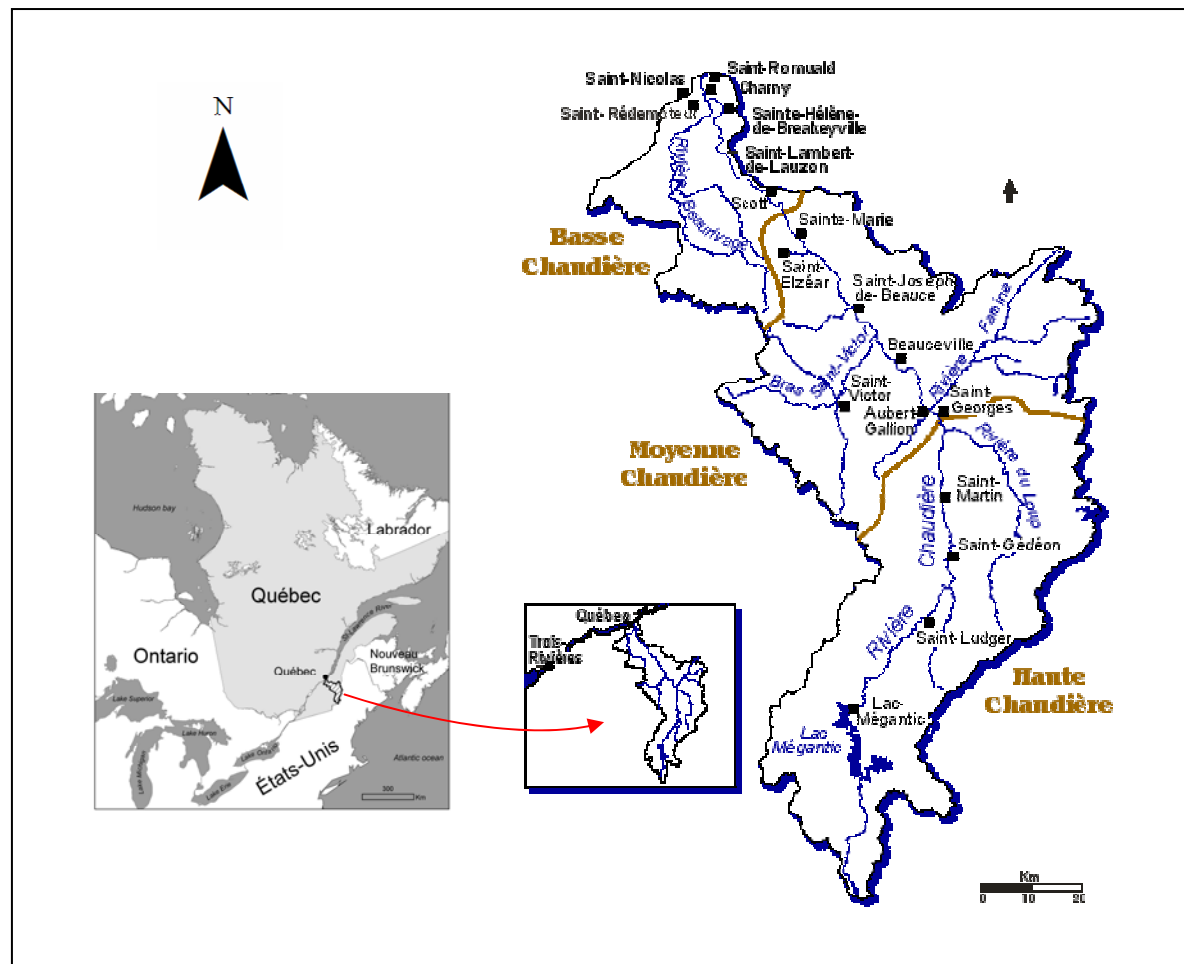


Figure 3.1 : Localisation du bassin versant de la rivière Chaudière

Ce bassin versant a été sélectionné pour l'application et le développement du système d'aide à la décision GIBSI au début de 1995 car il présente des caractéristiques représentatives de nombreux bassins versants de la plaine du Saint-Laurent avec la présence de trois volets d'assainissement, une grande diversité d'usages sur le territoire, une superficie adéquate et la disponibilité des données nécessaires au projet (Villeneuve *et al.*, 1998a). Le bassin versant de la rivière Chaudière était également, au moment du démarrage du projet, le bassin versant pilote

pour la mise en place de la gestion intégrée de l'eau par bassin versant (il fait aujourd'hui partie des 33 bassins versants prioritaires).

3.1 TOPOGRAPHIE, GÉOLOGIE ET PÉDOLOGIE

Le bassin de la Chaudière chevauche deux régions physiographiques (Simoneau *et al.*, 1996) : les basses-terres et les Appalaches. Les basses-terres du Saint-Laurent occupent 5% du bassin dans sa partie Nord entre le fleuve et le plateau des Appalaches, avec une altitude variant entre 0 et 180 m. Les basses terres comprennent une plaine agricole et limoneuse et une série de hautes terrasses sableuses (60-180 m) étalées en gradins successifs. Les Appalaches occupent la majeure partie du bassin (95%) avec une altitude variant de 180 à 1 275 m. Il en résulte un relief et une végétation variés : la région des bas-plateaux (50% du territoire, 180-700 m) présente un relief ondulé et est partiellement déboisée tandis que, à partir de Saint-Gédéon, la région devient montagneuse et boisée. Les limites hydrographiques du bassin sont marquées par une chaîne de montagnes (les monts Mégantic) avec comme plus haut sommet le mont Gosford à l'extrémité sud du bassin (1 275 m). La région appalachienne est couverte majoritairement par des matériaux glaciaires et fluvio-glaciaires présentant une granulométrie loameuse ou squelettique loameuse (Duchemin *et al.*, 2001b). Les types des sols sont variables sur l'ensemble du bassin versant. Le bassin versant de la rivière Chaudière est divisé en trois sous régions soit la Basse, la Moyenne et la Haute Chaudière (Figure 3.1). On trouve surtout des sables limoneux dans la Basse Chaudière, des limons argileux dans la Moyenne Chaudière et des limons dans la Haute Chaudière.

3.2 OCCUPATION DU SOL ET PRESSION ANTHROPIQUE

Le bassin chevauche deux régions administratives, soit la région de Chaudières-Appalaches et la région de l'Estrie. En ce qui a trait à l'utilisation du sol sur le territoire, des données de 1994 (Villeneuve *et al.*, 1998a) révèlent que 63% de la superficie du bassin est couverte par la forêt, 17% par les cultures et les pâturages, 15% par les friches, 3% par des zones urbaines et 2% par l'eau. Les occupations du sol passée et présente seront présentées en détail à la section 5.2.

Les pressions agricoles sont concentrées dans les régions de la Basse et de la Moyenne Chaudière, tandis que le couvert forestier domine la Haute Chaudière. Les activités de production animale sont particulièrement concentrées dans le sous-bassin de la rivière Beaurivage et génèrent des quantités importantes de fumiers et de lisiers.

En 1996, 99 municipalités étaient localisées en totalité ou en partie dans les limites du bassin, 77 d'entre elles déversant leurs eaux usées dans le réseau hydrographique du bassin. La

population se chiffrait en 1996 à 173 129 habitants (Simoneau *et al.*, 1996). L'activité industrielle est très diversifiée sur le bassin et elle se caractérise par la présence de petites et moyennes entreprises.

Pour plus de détails, le lecteur est invité à consulter le rapport de Simoneau *et al.* (1996).

3.3 HYDROLOGIE

La rivière Chaudière prend sa source dans le lac Mégantic à l'extrémité sud du bassin et coule en direction nord, pour aller se déverser dans le fleuve Saint-Laurent à la hauteur de St-Romuald. La rivière est alimentée par quatre principaux tributaires qui sont, de l'amont vers l'aval, la rivière du Loup, la rivière Famine, le Bras Saint-Victor et la rivière Beaurivage. Ceux-ci drainent environ 46% de la superficie totale du bassin. Le bassin versant de la rivière Chaudière est constitué de 12 sous-bassins de dimensions variables (Figure 3.2). Les vitesses d'écoulement enregistrées dans le tronçon supérieur de la rivière Chaudière et ses tributaires sont plus élevées que celles du tronçon intermédiaire. Cela est à l'origine des inondations périodiques qui surviennent lors des crues printanières ou de fortes précipitations (Simoneau *et al.*, 1996). Le bassin contient 236 lacs qui couvrent 0,94% de la superficie totale du bassin.

Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 1 060 mm et le débit moyen annuel à l'exutoire est de 114 m³/s (Simoneau *et al.*, 1996). Les crues printanières de la Chaudière sont assez spectaculaires, avec des débits maximums journaliers pouvant atteindre plus de 2 000 m³/s. L'étiage estival se produit habituellement en juillet-août avec des débits minimums journaliers pouvant atteindre 5 m³/s.

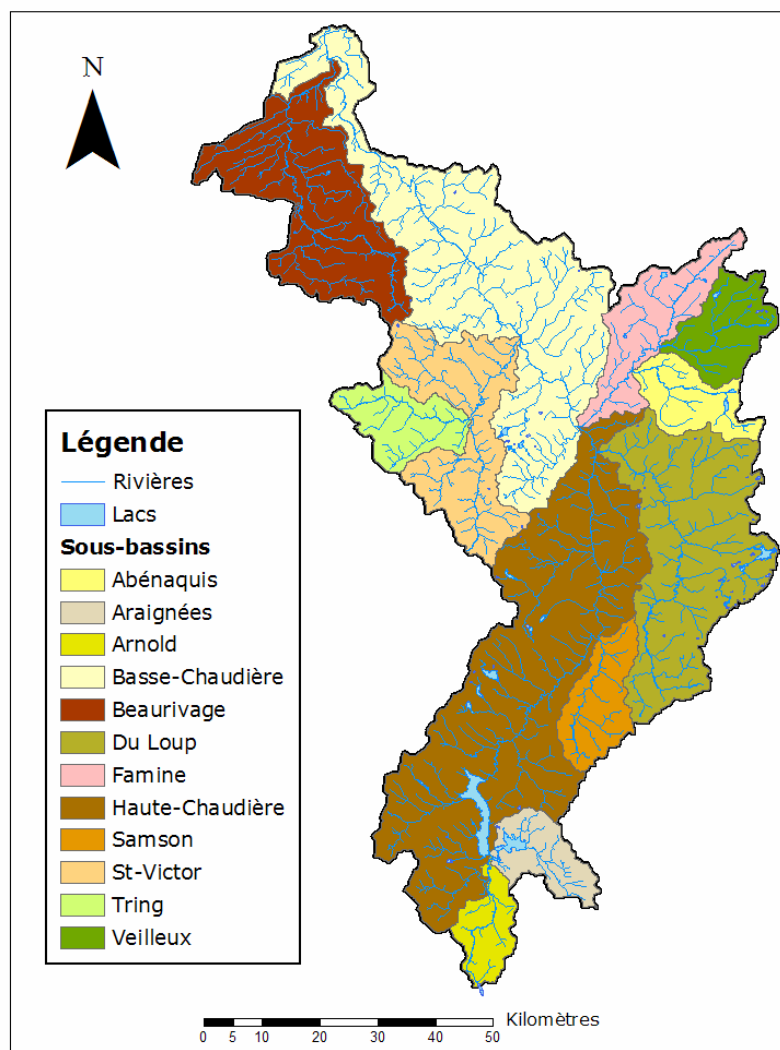


Figure 3.2 : Les sous-bassins du bassin versant de la rivière Chaudière

4 PRÉSENTATION DE GIBSI

4.1 STRUCTURE GÉNÉRALE ET FONCTIONNEMENT

GIBSI (*Gestion Intégrée des Bassins versants à l'aide d'un Système Informatisé*) est un système d'aide à la décision capable de simuler les principaux processus affectant l'évolution quantitative et qualitative de l'eau d'un bassin versant (Villeneuve *et al.*, 1998a; Rousseau *et al.*, 2000a; 2000b).

Comme la plupart des systèmes d'aide à la décision, GIBSI est composé d'une base de données, d'un Système d'Information Géographique (SIG), d'un système de gestion de la base de données et d'une interface graphique (Figure 4.1). La base de données contient des données spatiales (par exemple la localisation des stations météorologiques) et des données attributs (données associées aux données spatiales, telles que les séries météorologiques). La base de données était originellement gérée à l'aide du système Microsoft ACCESS™ (Simpson, 1994) mais ce système a récemment été remplacé par le système MySQL® (Pedersen *et al.*, 2005) plus efficace. Le SIG utilisé est GRASSLAND (L.A.S., 1996). Le bassin versant est discrétisé en deux types d'éléments de calcul : (i) des tronçons de rivière qui sont des éléments à une dimension et qui supportent la simulation des processus en rivière (*i.e.* le débit et le transport des polluants). La longueur moyenne des tronçons sur le bassin versant de la rivière Chaudière est de 1.9 km; (ii) des unités spatiales de simulation (USS), appelées aussi unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH) qui correspondent à des bassins versants élémentaires et qui supportent la simulation des processus au sol (*i.e.* la genèse du ruissellement et le transport des sédiments et des polluants). La moyenne de superficie des USS est de l'ordre de 3,5 km². Ces éléments de calcul sont définis à l'aide de PHYSITEL (Turcotte *et al.*, 2001; Rousseau *et al.*, 2007 en préparation), un logiciel complémentaire conçu pour préparer la base de données physiographiques de modèles hydrologiques distribués.

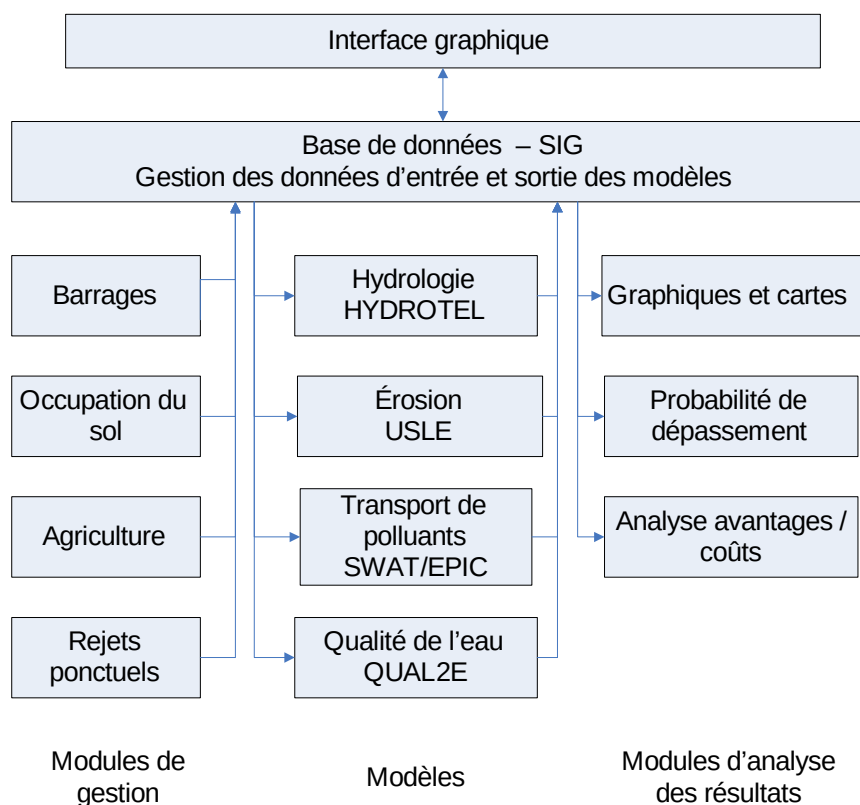


Figure 4.1 : Représentation schématique du fonctionnement général de GIBSI

Du point de vue de la gestion des bassins versants, GIBSI permet d'élaborer des scénarios d'usage de l'eau et de l'utilisation du territoire à l'aide des modules de gestion suivants:

- **ouvrages hydrauliques** (ex.: ajout ou retrait d'infrastructures hydrauliques, modification des règles d'opération des infrastructures hydrauliques);
- **aménagement du territoire** (ex.: changements d'occupation du sol, analyse de schémas d'aménagement, *etc.*); Cet aspect est détaillé à la section suivante (4.2).
- **rejets ponctuels** (ex.: ajout ou retrait de rejets ponctuels urbains et industriels, modifications des caractéristiques de ces rejets) et;
- **pollution diffuse d'origine agricole** (ex.: modifications des systèmes de production agricole - cheptel et mode d'épandage des fumiers et lisiers - et des pratiques culturales - fertilisation et protection des cultures, conservation des sols).

Les simulations à l'aide des modèles permettent ensuite de déterminer l'effet des modifications apportées sur le régime hydrologique et la qualité de l'eau en tout point du réseau hydrographique.

Les modèles mathématiques de simulation de l'hydrologie, de l'érosion des sols, du transport et du devenir de l'azote, du phosphore et des pesticides, et de la qualité de l'eau en rivière et en lac de GIBSI permettent, à l'aide de bilans de masse, de quantité de mouvement et d'énergie (et quelques relations empiriques et phénoménologiques), d'évaluer les impacts sur l'eau de surface de différents scénarios d'intervention tout le long du réseau hydrographique. GIBSI est basé sur quatre modèles découplés: (i) le modèle hydrologique à base physique HYDROTEL (Fortin *et al.*, 1995; Fortin *et al.*, 2001a); (ii) un modèle d'érosion basé sur RUSLE (Wischmeier et Smith, 1978; Renard *et al.*, 1997) complété par l'équation de Yalin, 1963) pour prendre en compte la capacité de transport du ruissellement transport; (iii) un modèle de transport de polluants (nutriments et pesticides) basé sur les algorithmes de SWAT (Arnold *et al.*, 1996) et EPIC (Arnold et Williams, 1995); (iv) un modèle de qualité de l'eau en rivière basé sur QUAL2E (Brown et Barnwell, 1987) qui simule les processus biologiques, physiques et chimiques contrôlant le devenir des contaminants dans les eaux de surface. Pour ce qui est des processus d'érosion, de transport et du devenir des polluants agricoles, ils sont simulés sur chacune des occupations de sols agricoles d'un sous-bassin versant élémentaire. À noter que GIBSI ne simule pas l'infiltration vers les eaux souterraines profondes. Les modèles tournent à un pas de temps journalier. Les données d'entrée sont les séries météorologiques journalières (précipitation, températures minimale et maximale). Les données météorologiques disponibles vont de 1966 à 2004. L'utilisateur sélectionne les séries météorologiques désirées soit en définissant des dates de début et de fin, soit en choisissant parmi des séries caractéristiques (par exemple un été sec ou un printemps humide).

Des outils d'analyse permettent enfin d'analyser les résultats de simulations : graphiques, cartes, calcul de probabilités de dépassement et analyse avantage/coût.

4.2 GESTION DE L'OCCUPATION DU SOL

La manière dont l'occupation du sol est traitée dans GIBSI est d'un intérêt particulier dans le cadre de ce projet. Il est en effet important, afin d'interpréter correctement les résultats de simulation, de bien comprendre de quelle manière le type d'occupation et de couvert végétal est pris en compte dans les modèles et d'avoir conscience des hypothèses et des limites liées à cette représentation.

4.2.1 Gestion de l'occupation du sol

Comme indiqué précédemment, les données liées à l'occupation du sol sont basées sur une carte satellite classifiée intégrée dans le SIG de GIBSI. C'est la configuration de 1995 qui est utilisée par défaut. Ces informations spatiales peuvent ensuite être agrégées, sous forme de pourcentages de la superficie, à l'échelle d'autres unités spatiales : le bassin versant, les sous-bassins versants, les municipalités ou les USS. Les USS, qui sont les unités de calcul des modèles, représentent la plus petite unité spatiale à laquelle on peut avoir de l'information sur l'occupation du sol. Ainsi, pour chaque USS, la seule information prise en compte par les modèles est le pourcentage de la superficie occupée par chaque classe d'occupation du sol (Figure 4.2). La position précise des champs agricoles ne peut pas être prise en compte.

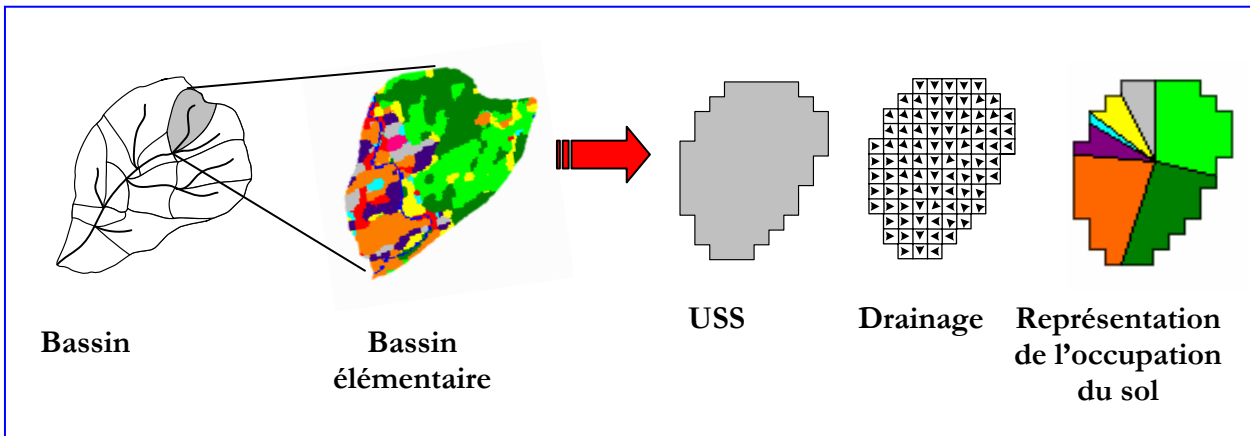


Figure 4.2 : Processus de digitalisation des USS et représentation de l'occupation du sol

Pour définir un changement d'occupation du sol, il existe deux moyens :

- (i) Utiliser le module de gestion de l'occupation du sol.

Ce procédé permet, à partir de la carte d'occupation du sol initiale (1995), de définir des changements d'occupation à l'échelle de n'importe quelle unité spatiale : bassin versant, sous-bassin, municipalité, USS ou ensemble d'USS alimentant une section du réseau hydrographique. Une fois la superficie définie, le pourcentage de la superficie totale occupé par chaque classe d'occupation du sol est calculé et affiché (Figure 4.3). L'utilisateur peut alors choisir une classe et la transformer en une autre. Il est important de noter que toute la superficie d'une classe est transformée et qu'il n'est pas possible de transformer partiellement, par exemple, de la forêt en culture. Pour ce faire, la seule solution est de procéder par transformations à l'échelle des plus petites unités spatiales, les USS. Cet outil est

particulièrement utile pour des études prospectives, pour définir des scénarios *what if...* C'est ce procédé qui a été utilisé dans la seconde partie de cette étude. L'approche méthodologique employée sera développée davantage à la section 6.2.1.

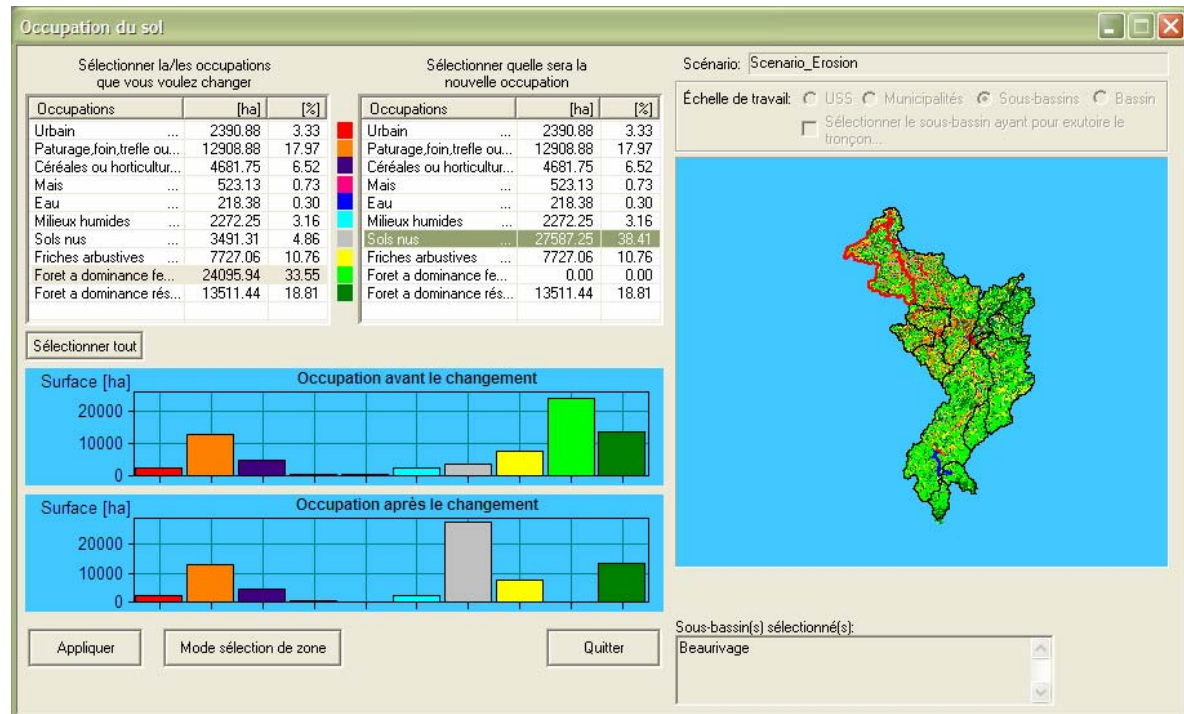


Figure 4.3 : Fenêtre de gestion de l'occupation du sol de GIBSI. Dans cet exemple, le sous-bassin de la Beaurivage a été sélectionné, et toute la forêt à dominance feuillue est transformée en sol nu.

- (ii) Se baser sur une nouvelle carte satellite classifiée

Cette méthode est adaptée pour une approche rétrospective, pour réaliser une étude et des simulations dans des conditions particulières à une année passée. Cette approche a été utilisée dans le cadre de la première partie de cette étude. De nouvelles fonctionnalités ont été développées spécifiquement afin de faciliter l'intégration de nouvelles cartes d'occupation du sol et de pouvoir simuler directement à partir de ces cartes. Ainsi, dans la fenêtre de définition d'un scénario de simulation (Figure 4.4), une nouvelle option est maintenant disponible permettant d'utiliser une carte d'occupation du sol.

Figure 4.4 : Fenêtre de définition d'un nouveau scénario dans GIBSI. L'option permettant de définir une nouvelle occupation du sol à partir d'une carte est entourée en rouge.

4.2.2 Influence de l'occupation du sol dans les modèles

La manière dont le type d'occupation du sol est pris en compte dans les modèles détermine comment un changement d'occupation va avoir un effet sur les résultats de simulation. Pour plus de détails sur les équations utilisées, le lecteur est invité à consulter le rapport de Villeneuve *et al.* (1998a).

Dans le modèle hydrologique, deux processus sont dépendants de l'occupation du sol et du type de couvert :

- (i) Le calcul de l'évapotranspiration réelle prend en compte la profondeur racinaire et l'indice de surface foliaire. Ces deux variables sont différentes selon le type de couvert et la dynamique de développement des cultures. L'évapotranspiration est une

composante du bilan hydrique du sol et a donc une influence sur la quantité d'eau disponible pour le ruissellement.

- (ii) L'écoulement de l'eau de surface utilise l'algorithme de l'onde cinématique, comprenant une équation cinématique de type Manning. Le coefficient de Manning est directement dépendant du type d'occupation du sol.

En ce qui concerne l'érosion, l'équation universelle de perte en sol (USLE) comprend un terme lié au couvert végétal (C). En effet, un sol nu favorisera l'érosion tandis qu'un couvert végétal dense limitera l'impact des précipitations sur le sol. L'érosion sous couvert forestier est considérée comme nulle.

Ces changements dans la lame d'eau ruisselée et la charge de sédiments vont évidemment impliquer un changement dans les quantités de polluants exportées vers les eaux de surface. De plus, le type de culture et le stade de végétation vont également déterminer le niveau de prélèvement en nutriments par les cultures, donc le bilan en nutriments dans le sol et la quantité disponible pour un transport par ruissellement et érosion. À noter que, comme pour l'érosion, on ne considère pas de transport de polluants par ruissellement en milieu forestier.

Enfin, le type de culture va déterminer le type de pesticide utilisé et donc susceptible de contaminer les eaux de surface. Toutefois, cette influence est indirecte puisque le taux et les dates d'application de pesticides doivent être définis par l'utilisateur au moment de déterminer les scénarios de gestion (aucun pesticide n'est appliqué par défaut).

4.3 APPLICATIONS DE GIBSI SUR LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE

L'ensemble du processus d'implantation de GIBSI sur le bassin versant de la rivière Chaudière est décrit en détail par Villeneuve *et al.* (1998a). La digitalisation du bassin versant de la rivière Chaudière est également décrite en détail par Turcotte *et al.* (2001) tandis que l'application du modèle hydrologique HYDROTEL a été publiée par Fortin *et al.* (2001b). Afin de correctement interpréter les résultats des simulations, il est important de connaître la performance du modèle par rapport aux données mesurées. Le calage des modèles sur le bassin versant de la rivière Chaudière est donc décrit à l'ANNEXE A.

GIBSI a déjà été appliqué et utilisé sur le bassin versant de la rivière Chaudière pour étudier, entre autres, l'effet de la déforestation (Lavigne *et al.*, 2004), de l'implantation de stations de traitement des eaux usées (Mailhot *et al.*, 2002) ou encore de nouvelles règles de gestion des fertilisants (Rousseau *et al.*, 2002) sur le débit et la qualité de l'eau. Salvano *et al.* (2004; 2006)

ont également menés une analyse avantage-coût de différents modes de gestion des engrais organiques. Ces différentes études sont résumées par Quilbé et Rousseau (2007).

4.4 TRAVAUX ET DÉVELOPPEMENTS EN COURS

Dans le cadre d'un projet de recherche financé en majeure partie par le Fonds Québécois sur la Nature et les Technologies (FQRNT), un travail important a été réalisé durant les quatre dernières années afin d'améliorer les modèles de transport de polluants de GIBSI, d'intégrer un modèle de transport de coliformes fécaux (TransPath, travaux de maîtrise de G. Rogel), d'intégrer un indicateur d'intégrité biologique (travaux de thèse de M. Grenier) et d'élaborer un protocole d'application de GIBSI. Ces travaux sont décrits plus en détail par Quilbé et Rousseau (2007).

Par ailleurs, dans le cadre du projet *Watershed Evaluation of BMPs* (WEBs) mené par Agriculture Agroalimentaire Canada, une application spécifique de GIBSI est en cours de réalisation à l'échelle du sous-bassin de la rivière Beaurivage (Rousseau *et al.*, 2007). L'objectif est de pouvoir évaluer l'effet de pratiques de gestion bénéfique (PGB) sur la qualité de l'eau à l'échelle de petits bassins versants. Une approche d'évaluation économique doit également être développée et couplée à GIBSI.

Enfin, dans le cadre de *l'Initiative Nationale pour l'Élaboration de Normes* (INÉNA), la performance de GIBSI a été comparée avec celle des modèles SWAT et HSPF (intégré à BASINS) avec de bons résultats (Rousseau *et al.*, 2006). GIBSI a été utilisé pour déterminer des Normes de Performance Atteignables (NPA) basés sur des concentrations en pesticides (voir Quilbé et Rousseau, 2007).

4.5 RÉSUMÉ

GIBSI représente l'outil idéal pour mener cette étude pour les raisons suivantes :

- (i) Il permet d'évaluer l'effet de changements d'occupation du sol ainsi que l'effet des CC sur l'hydrologie et la qualité de l'eau à l'échelle du bassin versant.
- (ii) Il est déjà appliqué et calé sur le bassin versant de la rivière Chaudière.
- (iii) La performance des modèles est très bonne, particulièrement le modèle hydrologique.
- (iv) L'équipe de travail en a une très bonne connaissance puisqu'il a été développé au sein de l'INRS-ETE.

5 EFFET DE L'ÉVOLUTION PASSÉE DE L'OCCUPATION DU SOL SUR LE RÉGIME HYDROLOGIQUE ET L'ÉROSION

Cette partie de l'étude consiste à déterminer l'évolution de l'occupation du territoire sur le bassin versant de la rivière Chaudière au cours des trente dernières années, puis à évaluer l'influence de cette évolution sur le régime hydrologique et la qualité de l'eau en rivière.

5.1 APPROCHE GÉNÉRALE

L'approche générale est schématisée sur la Figure 5.1. La première étape consiste à déterminer l'occupation du sol à des intervalles réguliers (5 ans environ) tout au long des 30 dernières années à l'aide d'images satellites. Dans un deuxième temps, pour chaque configuration d'occupation du sol, des simulations sont réalisées avec GIBSI avec 30 années de chroniques météorologiques afin de déterminer le débit en rivière et la qualité de l'eau. Enfin, il s'agira de comparer les résultats obtenus pour chaque configuration d'occupation du sol pour déterminer l'influence de ce facteur sur la réponse du bassin versant en fonction des régimes hydrologique et d'érosion.

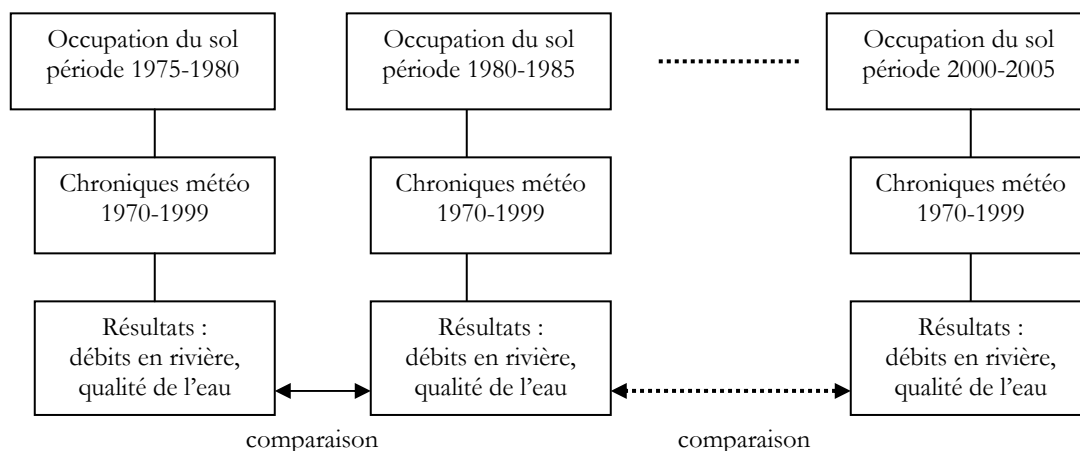


Figure 5.1 : Schéma récapitulatif de l'approche méthodologique

5.2 DÉTERMINATION DE L'ÉVOLUTION PASSÉE DE L'OCCUPATION DU SOL SUR LE BASSIN VERSANT

5.2.1 Recherche de données

Afin de retracer l'évolution historique de l'occupation du sol sur le bassin versant de la rivière Chaudière, il est nécessaire de cibler des outils et des données qui permettent l'atteinte de cet objectif. Parmi ces données, on retrouve notamment des images satellitaires, des cartes d'occupation du sol et des données de terrain.

5.2.1.1 Images satellitaires

Dans le but de déterminer l'influence de l'évolution de l'occupation sur la réponse hydrologique du bassin versant, il est important de réaliser des portraits ponctuels réguliers, à tous les cinq (5) ans si possible, sur la période de 1970 à 2004. Un second critère déterminant lors de la sélection d'images est la période d'acquisition. Étant donné que l'objectif principal est de quantifier l'évolution de l'occupation du sol, il est évident qu'une attention particulière doit être portée à la discrimination des différents types d'occupation. Pour ce faire, il faut choisir des scènes prises lors de période où la variabilité spectrale entre les différentes cultures et les autres couverts est grande. Par exemple, les images d'hiver au Québec sont à proscrire, celles-ci ne permettent pas de discriminer les cultures : la période végétative s'étendant de la fin du printemps au début de l'automne. De plus, la présence de neige au sol peut rendre visuellement homogène des occupations qui sont en réalité différentes. La période qui s'avère la plus propice au Québec pour l'identification des cultures dans un contexte d'analyse d'image uni-date (une image par année) est celle s'étendant de la fin juillet au début septembre. En effet, durant cet espace temps, une forte proportion des cultures est à pleine maturité et aucune parmi celles-ci n'a commencé à être récoltée. Enfin, deux autres critères de sélection doivent guider le choix des images. Premièrement la scène doit couvrir en totalité la superficie du bassin. Deuxièmement, la couverture nuageuse doit être minimale pour permettre une analyse satisfaisante de l'image. Bien sûr, les images doivent également être de bonne qualité radiométrique.

En ce qui concerne le type de capteur privilégié, la décision s'impose d'elle-même. Effectivement, le programme Landsat est un des rares programmes de télédétection qui offre des images depuis 1972 et dont le but premier est d'assurer une continuité dans l'acquisition de données de la surface de la Terre provenant des satellites. Depuis le lancement du satellite Landsat-1 en 1972, cinq autres satellites de cette famille ont conquis l'espace, le dernier étant Landsat-7 lancé le 15 avril 1999. Une fois les critères fixés et le choix d'un programme complété, il suffit d'exécuter la recherche sur un des portails d'images satellitaires (Earth

Explorer⁴, EOS Data Gateway⁵, Centre Canadien de télédétection⁶). Les résultats de cette recherche sont présentés dans le Tableau 5.1.

Les critères de sélection étant assez stricts et les images disponibles étant peu nombreuses, il fut impossible d'obtenir des images qui respectent parfaitement tous les critères fixés. D'une part, la scène de 1976, 1987, 1995 et celle de 2003 n'offrent pas une couverture complète du bassin. De plus on note la présence de nuages sur les images de 1987, 1990, 1999 et 2003 (moins de 10% de la superficie).

Tableau 5.1 : Images acquises dans le cadre du projet

Date d'acquisition	Satellite et Capteur
4 août 1976	Landsat-2 MSS
14 août 1981	Landsat-2 MSS
6 août 1987	Landsat-5 TM
29 juillet 1990	Landsat-5 TM
28 août 1995	Landsat-5 TM
14 juillet 1999	Landsat-7 ETM+
2 septembre 2003	Landsat-5 TM

5.2.1.2 Cartes d'occupation du sol existantes

Tout d'abord, la recherche de données pouvant servir à orienter et valider les classifications s'est avérée mitigée par rapport aux attentes fixées. En effet, pour l'image de l'année 1976, il a été possible de se procurer des cartes d'occupation du sol auprès du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) qui traduisent le paysage de l'année 1977. Ces cartes couvrent le bassin uniquement pour l'année 1977 et ont servi de support pour la classification de la scène de 1976. On retrouve à l'0, les différentes caractéristiques de ces cartes d'occupation du sol, ainsi que les définitions exhaustives des classes qu'elles contiennent.

Pour l'image de l'année 1981, selon les recherches, il semble qu'aucune donnée ne soit disponible. En ce qui concerne les images de 1987 et 1990, des informations peuvent être

⁴ <http://edcsns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer/>

⁵ <http://delenn.gsfc.nasa.gov/~imswwww/pub/imswelcome/>

⁶ <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/>

obtenues auprès de la FADQ, mais le travail que cela implique est non négligeable. Finalement, pour les images de 1995, 1999 et 2003 aucune information complémentaire n'a été couplée aux images classifiées afin de permettre leur vérification.

5.2.1.3 Données de terrain

Des démarches ont été entreprises auprès de la Financière Agricole du Québec (FADQ) pour obtenir des données de terrain pouvant servir à la classification des images. L'0 expose la nature de ces informations et les contraintes qui étaient liées à leur acquisition. Compte tenu de ces difficultés, il a finalement été décidé de privilégier la classification des images satellites. Cela implique l'absence presque totale d'information terrain pour classer les images satellitaires et complexifie le travail.

5.2.2 Traitement et classification des images satellites

Gauthier (1996) a produit un rapport technique qui explique la démarche qui a été employée pour la classification de l'image de 1995 lors de la conception de GIBSI. Ce document a servi de base pour établir un protocole méthodologique pour le projet actuel. Le traitement et la classification des images satellites ont été décrits en détail par Savary *et al.* (2006) et sont à nouveau présentés à l'ANNEXE C. Le rapport de Grenier (2006) présente plus spécifiquement la classification de l'image de 2003 selon la même méthode.

L'approche méthodologique est résumée dans la présente section. La méthode de traitement des images satellites comprend trois grandes étapes : les prétraitements, les classifications et les comparaisons.

5.2.2.1 Prétraitements

Une série de prétraitements a été appliquée à l'aide du logiciel PCI Geomatica aux sept scènes afin de permettre leur classification ultérieure et ce malgré le nombre restreint de données terrain. Les images de 1976 et 1990 ont été restaurées radiométriquement afin de corriger des lignes de pixels affichant des valeurs erronées. Ensuite, ces mêmes images ainsi que celle de 1981, 1987, 1999 et 2003 ont subi des transformations géométriques. Ces transformations ont permis la géoréférence des images. D'autres prétraitements ont été appliqués en réduisant les dimensions des scènes et en isolant les informations radiométriques contenues à l'intérieur du bassin.

Il n'a pas été jugé nécessaire d'appliquer des corrections atmosphériques aux images, celles-ci étant classifiées de manière indépendante. Bien que l'image de 1990 présente un très léger voile brumeux, au-dessus de la basse Chaudière (voir Figure C.4 à l'ANNEXE C), celui-ci

n'affecte pas la classification de façon significative. Ainsi cette image ne requière pas de correction atmosphérique.

5.2.2.2 *Classification*

La classification de l'ensemble des images a été effectuée avec la méthode orientée objet à l'aide du logiciel eCognition. Elle a été réalisée sans vérité terrain et en s'appuyant sur une interprétation visuelle basée sur les connaissances de l'analyste ainsi que sur la discrétisation spectrales des classes thématiques mis en évidence par le logiciel eCognition. Également des informations textuelles provenant des rapports de Gauthier (1996) et Dolbec *et al.* (2005), ont contribué grandement à la classification des images.

Le processus de classification a suivi les étapes suivantes :

- Identification et pré-classification des classes « Eau » et « Nuage » de façon indépendante des autres classes.
- Analyse en composantes principales (ACP) pour permettre la synthèse des différentes couches informatives (bandes de l'image)
- Segmentation de l'image
- Classification orientée objet

Les classes définies sont celles utilisées dans GIBSI (Tableau 5.2) pour lesquelles des zones d'entraînement sont déterminées à l'aide des connaissances du territoire.

Tableau 5.2 : Classes d'occupations utilisées dans GIBSI

Numéros de classes	Classes thématiques
1	Urbain
2	Pâturage et foin
3	Céréales
4	Maïs
5	Eau
6	Milieu humide
7	Sol nu
8	Friche
9	Feuillus
10	Conifères

5.2.2.3 Résultats des classifications

La Figure 5.2 présente un exemple de classification de l'occupation du sol pour l'image de 1990. Cela résume de façon visuelle la classification de l'occupation du sol appliquée à chacune des images. La comparaison et l'analyse de l'évolution de cette occupation du sol sont présentées à la section suivante.

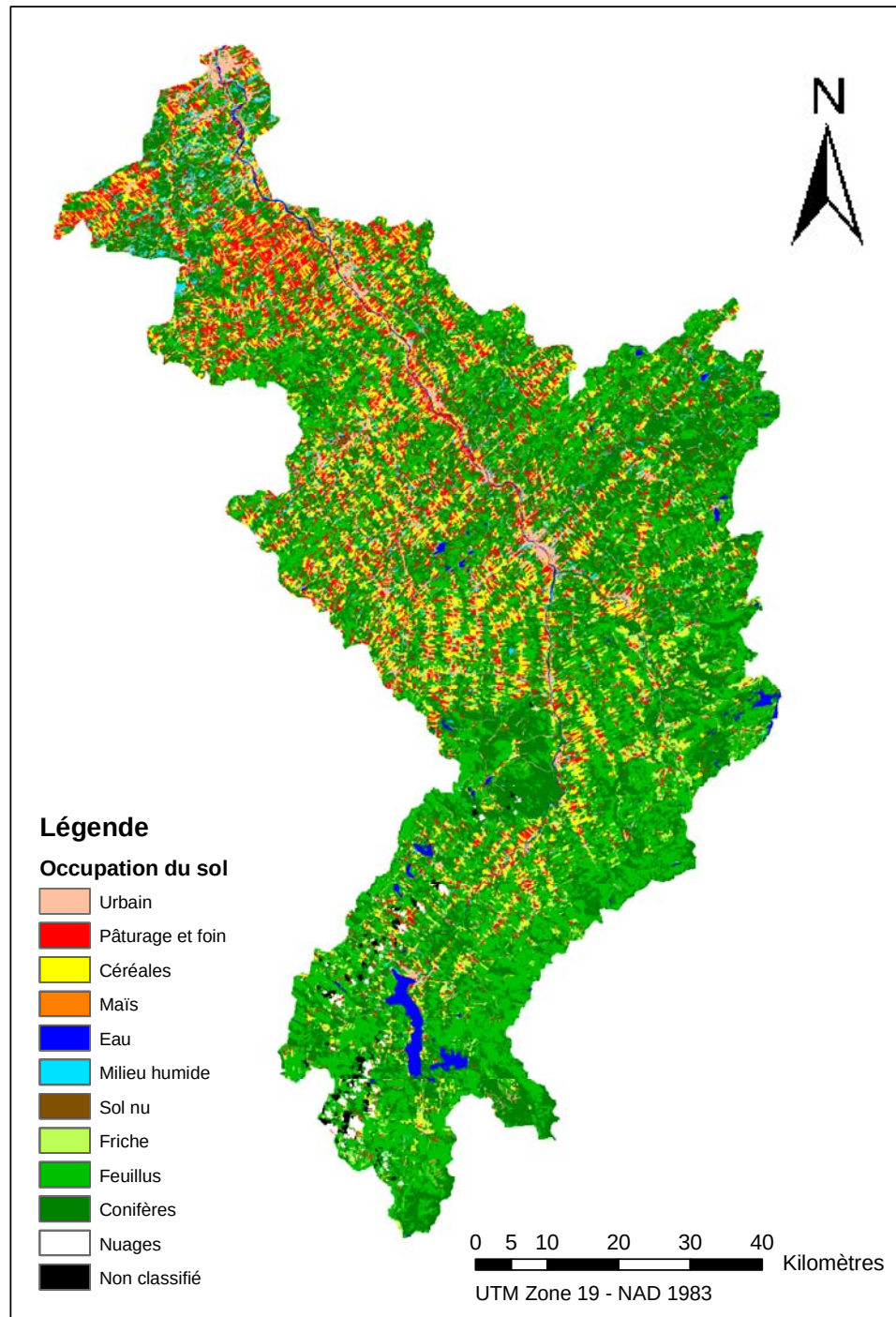


Figure 5.2 : Classification de l'occupation du sol pour l'année 1990

Les résultats de classifications s'avèrent relativement intéressants et peuvent être considérés comme valable. Il est toutefois pertinent de souligner que la présence de nuages (1987, 1990, 1999, 2003) et de zones non couvertes du bassin versant (1976, 1987, 1995, 2003) limite la comparaison des résultats et l'étude de l'évolution temporelle et spatiale de l'occupation du territoire. Il serait alors intéressant de procéder à l'attribution de classes pour les zones nuageuse ou manquantes afin de permettre l'intégration complète des images classifiées au modèle GIBSI. Ainsi, la carte de 1995, présente dans GIBSI, peut constituer un point de départ intéressant dans l'attribution d'occupation du sol aux zones non classifiées. Aussi, il faut considérer l'absence de données de validation, limitant l'évaluation totalement objective de la précision des classifications. En ce sens, il serait intéressant d'évaluer la qualité de la classification en utilisant des zones de validation qui n'ont pas été impliquées dans le processus de création des classes thématiques. Cependant, pour les images utilisées dans la présente étude, on ne possède pas de vérité terrain intégrée aux images respectives, ce qui rend fort difficile l'établissement de zones de validation.

À cette incertitude s'ajoute également la notion de confusion qui découle des similitudes entre les signatures spectrales des différentes classes. Afin d'évaluer la qualité des classifications des images et de poser un regard plus global sur les changements d'occupation du sol, il est possible d'évaluer la récurrence, l'évolution ou la confusion pour les différentes classes thématiques à l'aide de matrices de transition. Les résultats sont présentés à l'ANNEXE D. Cette analyse a révélé la présence de confusion non négligeable entre certaines classes. Cela montre qu'il peut être difficile de déterminer la portion et l'importance réelle des changements occurrents sur le bassin versant de la rivière Chaudière et amène à être prudent dans l'interprétation des résultats.

Toutefois, les données obtenues sont cohérentes et la méthode qui a été utilisée pour la classification des cartes d'occupation du sol est très satisfaisante en regard de la classification de la totalité des pixels des cartes thématiques.

5.2.2.4 Comparaison avec d'autres données

Il est important de mentionner que l'étape de comparaison doit être effectuée avec prudence tant dans le choix des données comparatives que dans l'interprétation des résultats. Quelques comparaisons quantitatives ont été réalisées sur les cartes d'utilisation de 1987, 1995 et les résultats sont présentés à la section C.5 de l'ANNEXE C. Il demeure difficile de juger des résultats étant donné le manque de données comparatives fiables. Il est important de rappeler que ces comparaisons sont faites à partir de classifications antérieures (Gauthier (1996) et Dolbec *et al.* (2005)) ou encore à partir de données très restreintes du MAPAQ. Néanmoins, les ordres de grandeurs des pourcentages d'occupation des classes, semblent assez bien respecter ceux obtenus précédemment bien qu'ils diffèrent légèrement des données du MAPAQ. Plus

précisément, pour les années 1987 et 1995 les superficies agricoles semblent surestimées au détriment du milieu forestier.

5.2.3 Résultats

5.2.3.1 Bassin versant de la rivière Chaudière

Dans un premier temps l'analyse des résultats des classifications peut être orientée sur l'évolution temporelle de l'occupation du territoire par les différentes classes sur l'ensemble du bassin versant de la rivière Chaudière. Le Tableau 5.3 présente un résumé de la superficie et du pourcentage de la zone d'étude occupé par chacune des classes. Il est important de rappeler que certaines images (1976, 1987, 1995, 2003) ne couvrent pas la totalité de la zone d'étude. De plus, la présence de nuages sur les images de 1987, 1990, 1999 et 2003 restreint la classification puisque celle-ci ne peut être réalisée sur les zones ennuagées et ombragées. Il est à noter que l'image de 2003 a été classifiée lors des travaux de Grenier (2006).

L'évolution temporelle peut également être présentée sous forme graphique. Un tel exercice permet également le regroupement de certaines classes en champs thématiques facilitant et synthétisant l'analyse de l'évolution globale de l'occupation du sol. Par conséquent, les classes *Pâturage et foin*, *Céréales* et *Maïs* peuvent être regroupées sous le champ *Milieu agricole* alors que les classes *Feuillus*, *Conifères* et *Friche* peuvent être regroupées sous le champ *Milieu forestier et arbustif*. Les classes restantes présentent trop peu de similitudes pour suggérer leur regroupement. Les quatre figures suivantes représentent l'évolution temporelle du pourcentage d'occupation du territoire pour chacune des classes et champs thématiques.

Tableau 5.3 : Évolution de l'occupation du sol pour chacune des classes thématiques

	Superficie (ha) et pourcentage d'occupation du sol du bassin versant													
Classes	1976		1981		1987		1990		1995		1999		2003	
Urbain	27499	3,99%	26153	3,87%	31263	4,54%	30653	4,45%	28669	4,25%	31653	4,69%	31756	4,70%
Pâturage et foin	45957	6,67%	59639	8,83%	75392	10,94%	71580	10,39%	67390	9,98%	78897	11,69%	70555	10,45%
Céréales	54502	7,91%	29579	4,38%	60331	8,76%	64241	9,32%	41693	6,18%	43668	6,47%	37481	5,55%
Maïs	483	0,07%	1052	0,16%	7185	1,04%	8857	1,29%	4225	0,63%	4175	0,62%	4971	0,74%
Eau	8293	1,20%	8398	1,24%	8029	1,17%	8293	1,20%	8856	1,31%	9237	1,37%	9452	1,40%
Milieu humide	11856	1,72%	9676	1,43%	11465	1,66%	16081	2,33%	14432	2,14%	13752	2,04%	2793	0,41%
Sol nu	4174	0,61%	3117	0,46%	11924	1,73%	4618	0,67%	8745	1,30%	6934	1,03%	7265	1,08%
Friche	26108	3,79%	29433	4,36%	35211	5,11%	30056	4,36%	35828	5,31%	25560	3,79%	24263	3,59%
Feuillus	268727	39,00%	267675	39,65%	235557	34,18%	228962	33,23%	244811	36,27%	239427	35,47%	254171	37,66%
Conifères	241473	35,04%	240356	35,60%	212715	30,87%	225732	32,76%	220329	32,64%	221675	32,84%	232273	34,41%
Non Classifiés	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
Superficie de l'image⁷	689072	100,00%	675078	100,00%	689072	100,00%	689072	100,00%	674978	100,00%	674978	100,00%	674978	100,00%

⁷ Le pourcentage associé à la superficie de l'image représente la fraction du bassin versant couverte par celle-ci

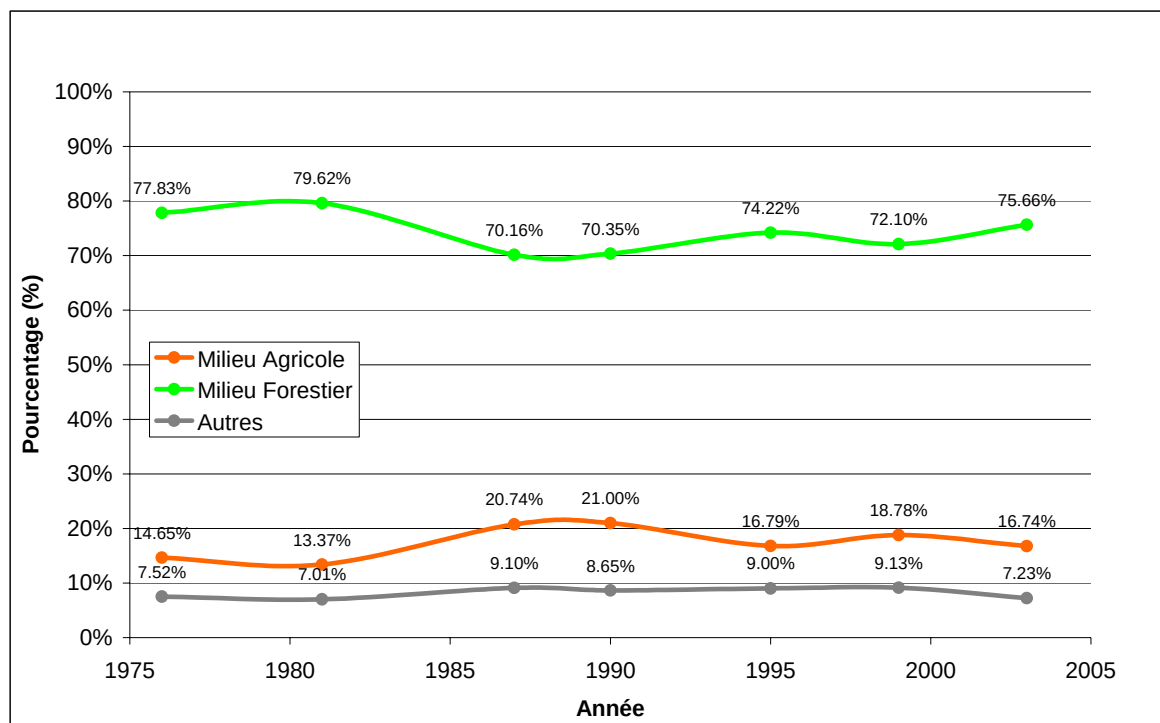


Figure 5.3 : Résumé de l'évolution temporelle de l'occupation du territoire pour les milieux agricole et forestier

La Figure 5.3 démontre que le milieu forestier occupe près des trois quarts du territoire du bassin versant de la rivière Chaudière. Le milieu agricole occupe près de 20% du territoire. Cette figure montre que le milieu agricole évolue en opposition au milieu forestier. Les terres utilisées pour l'agriculture et l'élevage ont graduellement empiété sur le milieu forestier jusqu'à l'année 1990 à partir de laquelle on remarque une diminution de ces terres agricoles pour céder à nouveau la place au milieu forestier. Le troisième champ (classe *Autres*) ne présente pas de fluctuations remarquables et son évolution reste relativement constante au cours du temps.

La diminution de la superficie agricole lors des 10 dernières années semble due à la diminution des superficies cultivées en céréales dont le pourcentage de territoire occupé passe de 9,98% en 1995 à 5,55% en 2003 (Figure 5.4).

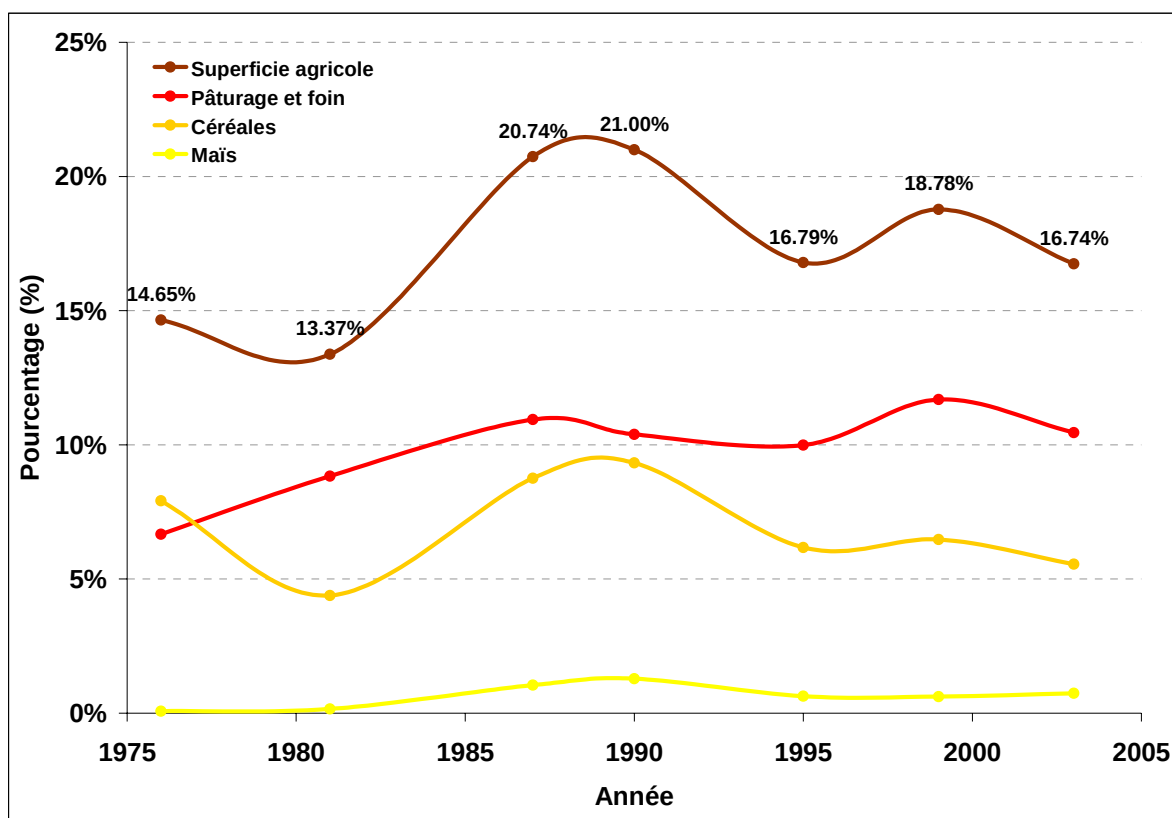


Figure 5.4 : Évolution temporelle de l'occupation du territoire pour le milieu agricole

On note en revanche une augmentation graduelle des classes *Pâturage et foin* et *Maïs*. Les variations de la classe *Céréales* peuvent être entre autre attribuées à la rotation des cultures qui intègre la transformation périodique de cultures céréalières en pâturage en en fourrage. Ces fluctuations peuvent également être liées à la confusion entre les classes *Céréales* et *Pâturage et foin*. En effet, la signature spectrale de *Pâturage* peu dense et présentant une plus faible activité chlorophyllienne peu s'apparenter à celle de cultures céréalières non mûres.

Concernant le milieu forestier, on constate sur la Figure 5.5 que la baisse du milieu forestier dans les années 80 est due à diminution des classes *Feuillus* et *Conifères*. Cette diminution peut résulter de la déforestation au profit de pratiques agricoles. La classe *Friche* présente peu de variabilité sur l'ensemble du secteur d'étude sans toutefois empêcher les fluctuations spécifiques et parcellaires d'occupation du territoire par des fiches. En effet l'augmentation par la déforestation de la classe *Friche* peut être compensée par la réaffectation de celle-ci en superficie agricole

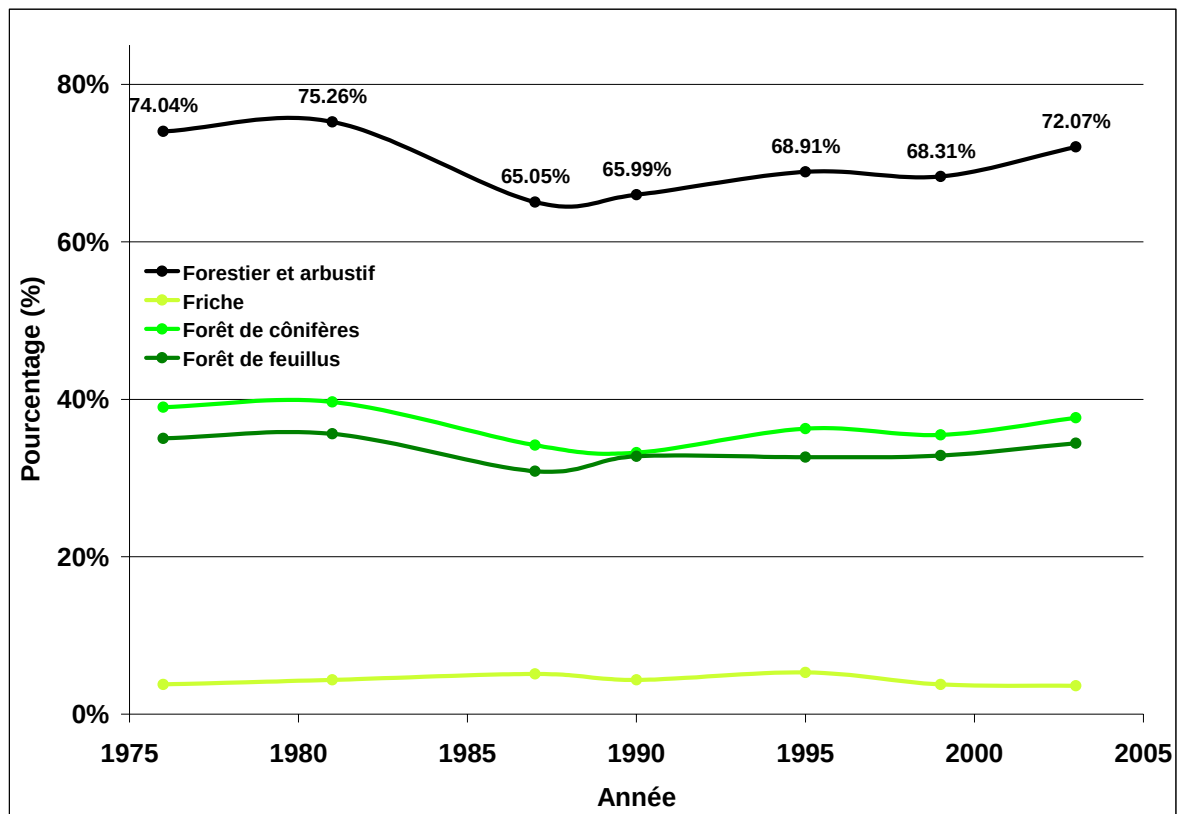


Figure 5.5 : Évolution temporelle de l'occupation du territoire pour le milieu *Forestier et arbustif*

Enfin, en ce qui concerne les autres classes d'occupation du sol, La Figure 5.6 permet de constater premièrement une augmentation de la classe *Urbain* associé à l'urbanisation du secteur d'étude notamment sur le sous-bassin de la Basse-Chaudière et de la rivière Beaurivage. Deuxièmement, tel qu'anticipé, la classe *Eau* reste constante dans le temps. Troisièmement, les classes *Milieu Humide* et *Sol nu* présentent certaines fluctuations, notamment la baisse drastique des milieux humides pour l'année 2003.

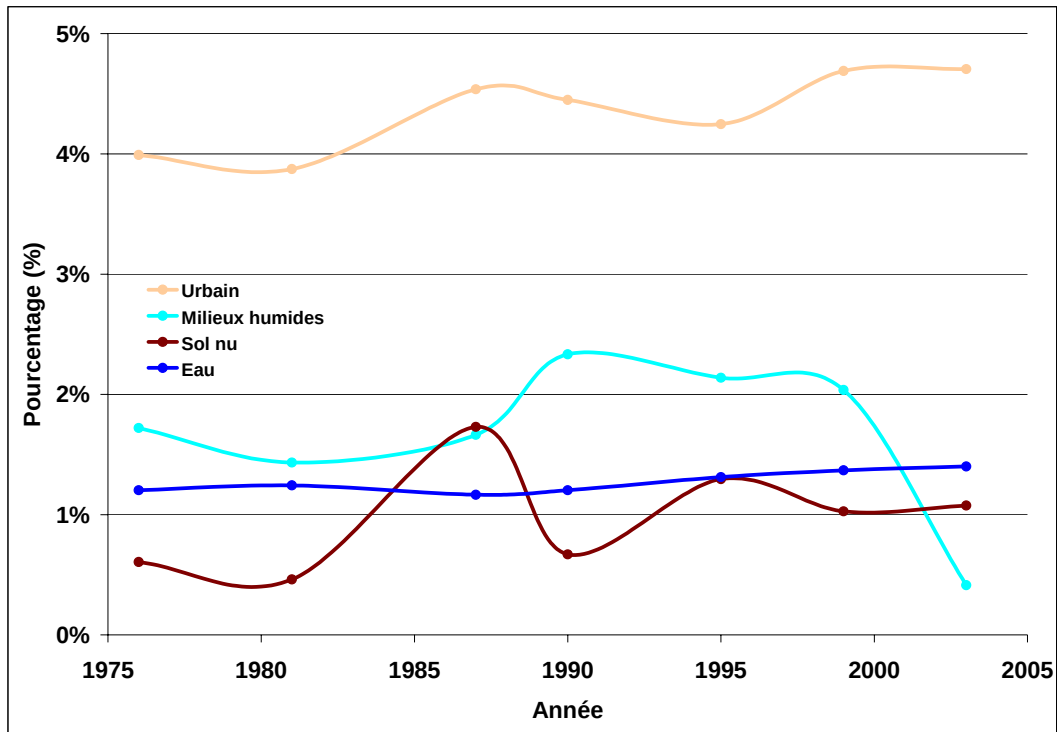


Figure 5.6 : Évolution temporelle de l'occupation du territoire pour les classes *Urbain*, *Sol nu*, *Milieu humide* et *Eau*

Il convient de noter que la classe *Sol nu* présente une signature spectrale semblable à celle de la classe *Urbain* ou encore à celle de d'étendue de sol labouré. Ainsi ces similitudes peuvent occasionner une certaine confusion entre les classes *Sol nu*, *Urbain*, *Pâturage et foin* et *Céréale*. D'autre part, les fluctuations de la classe *Milieu humide* peuvent être influencées par l'humidité du sol et la confusion avec la classe *Conifères* en raison des signatures spectrales semblables entre les milieux humides et les boisés de conifères.

5.2.3.2 À l'échelle de sous-bassins agricoles

Tel que mentionné dans la première partie du rapport, on sait que le bassin versant de la rivière Chaudière est représenté par 70% de forêt, tandis que le milieu agricole n'occupe que 20% de tout le territoire d'étude. Le logiciel GIBSI, grâce à son module de statistique intégré, a permis de déterminer deux sous-bassins versants à dominance agricole. Ces sous-bassins versants sont Beauvillage et Tring/Saint-Victor (voir Figure 3.2). La Figure 5.7 et la Figure 5.8 présentent l'évolution de l'occupation du sol au niveau de ces deux sous-bassins.

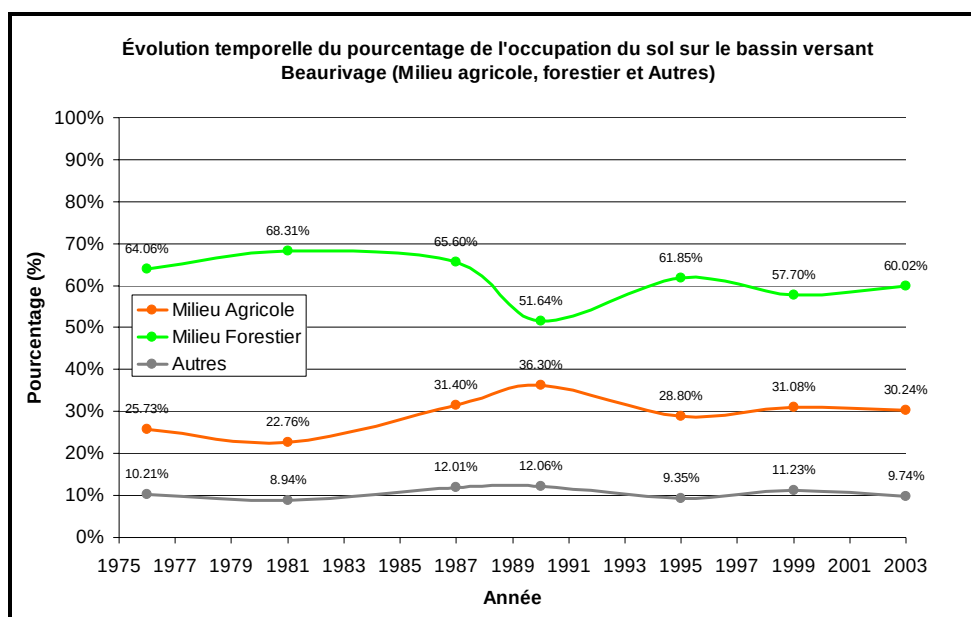


Figure 5.7 : Évolution de l'occupation du sol au niveau du sous-bassin versant Beurivage

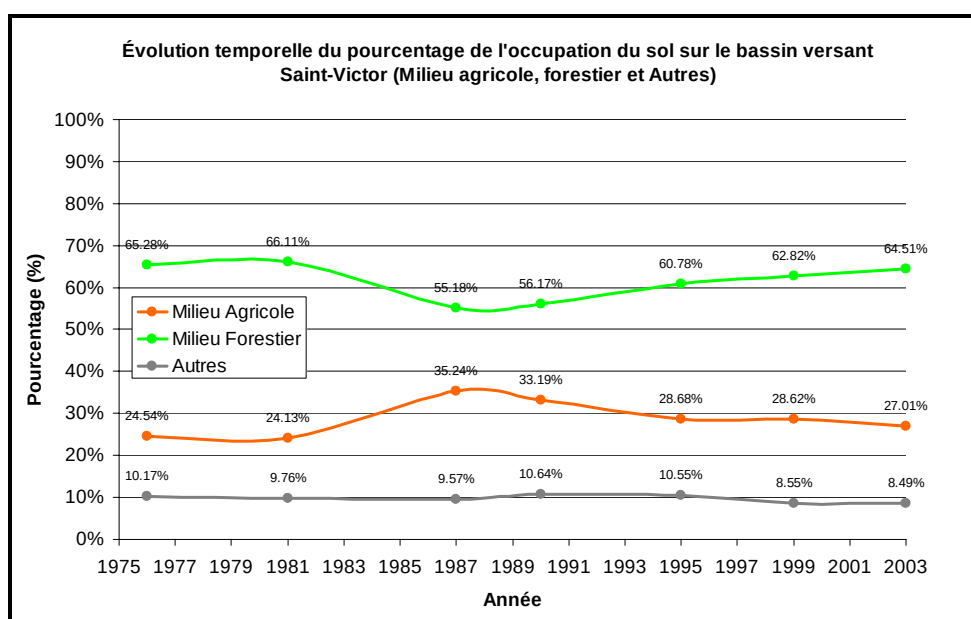


Figure 5.8 : Évolution de l'occupation du sol au niveau du sous-bassin versant Tring/Saint-Victor

En tenant compte de l'évolution de l'occupation des principales classes d'occupation du sol, on constate là encore que les courbes des champs *Milieu agricole* et *Milieu forestier* évoluent en opposition de phases. La déforestation ou la baisse du milieu forestier s'accorde avec

l'augmentation du milieu agricole alors que la régénérescence ou l'augmentation du milieu forestier coïncide avec la diminution du milieu agricole. L'évolution des champs présentés dans les deux figures ci-dessus est relativement semblable pour les deux sous-bassins. Toutefois, l'évolution est différente à partir de 1995 puisque, sur le sous-bassin Beaurivage, on observe une fluctuation et une stabilisation du *Milieu agricole* autour de 30%, tandis que sur le sous-bassin Tring/Saint-Victor, le milieu agricole diminue graduellement (et le milieu forestier augmente).

L'analyse de résultats peut-être approfondie par l'étude de la distribution spatiale de l'occupation du sol au cours du temps à l'aide des matrices de transition présentées à l'ANNEXE D.

L'ANNEXE E présente l'évolution temporelle du pourcentage de l'occupation du sol pour les milieux agricole et forestier pour chacun des sous-bassins versants.

5.3 EFFET DE L'ÉVOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL SUR LE RÉGIME HYDROLOGIQUE ET L'ÉROSION

5.3.1 Mise à jour de la base de données hydrométéorologiques de GIBSI

Jusqu'à présent, les données hydrologiques disponibles dans la base de données de GIBSI s'arrêtaient en 1995. Afin de réaliser l'étude comparative de la vulnérabilité des sols agricoles aux événements climatiques durant la période 1970-2000, il a donc été nécessaire de mettre à jour les données hydrométriques. Cette modification des données a ensuite nécessité une nouvelle analyse fréquentielle à l'aide du logiciel HYFRAN pour déterminer les débits d'étiage proposés lors de l'élaboration d'une nouvelle simulation. Pour plus de détails, le lecteur est invité à consulter le rapport de Guillot (2004). La base de données de GIBSI a ensuite été modifiée pour intégrer ces mises à jour.

5.3.2 Intégration des cartes d'occupation du sol et mise à jour des données dans GIBSI

L'intégration des nouvelles cartes d'occupation du sol dans le modèle GIBSI se fait de façon simple et rapide. La procédure technique est décrite à l'ANNEXE F d'après Garbouj *et al.* (2006).

5.3.3 Simulations

Une fois les cartes d'occupation du sol intégrées dans GIBSI, les simulations ont été réalisées. Pour chaque carte, nous avons procédé à 30 années de simulation à l'aide des séries météorologiques journalières disponibles sur les 41 stations météorologiques du bassin versant entre 1970 à 1999, afin de représenter l'ensemble des conditions météorologiques mesurées sur le bassin versant durant cette période. Les simulations ont été réalisées de manière indépendante pour chaque année. Seuls les modèles d'hydrologie et d'érosion ont été utilisés.

5.3.4 Résultats

Les résultats présentés ici portent sur la lame d'eau annuelle, les lames d'eau mensuelles, les débits de pointe et d'étiage simulés à l'exutoire du bassin versant.

5.3.4.1 Lames d'eau annuelle et mensuelles

La Figure 5.9 montre la variation de la lame d'eau annuelle moyenne simulée à l'exutoire du bassin versant de la rivière Chaudière en fonction de l'occupation du sol. Il convient de garder en mémoire que cette courbe est une tendance interpolée entre sept (7) points et que nous n'avons aucune information sur les années intermédiaires. Toutefois, il est raisonnable de faire l'hypothèse que des changements majeurs ne sont pas produits en l'espace d'une ou deux années. La lame d'eau annuelle moyenne varie entre 492 mm pour la configuration d'occupation du sol de 1981 et 555 mm pour l'occupation du sol de 1990, avec un coefficient de variation de 4,6%. Il est intéressant de constater que cette évolution est très semblable à l'évolution de la superficie agricole (voir Figure 5.4). On obtient d'ailleurs une très forte corrélation ($r^2 = 97,2\%$). De plus, l'effet de l'occupation du sol sur la lame d'eau annuelle est statistiquement significatif (test de Friedman, $p < 0.001$).

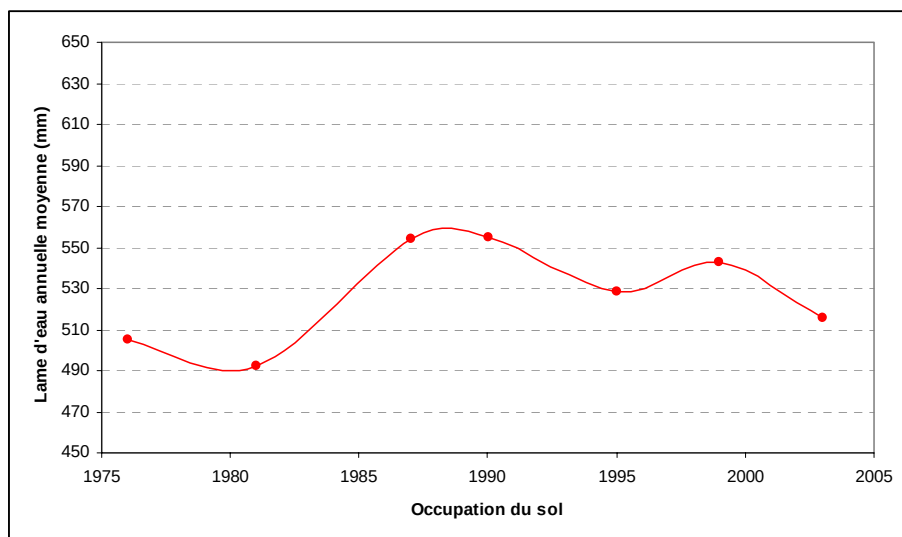


Figure 5.9 : Variation de la lame d'eau annuelle moyenne simulée à l'exutoire du bassin versant la Chaudière en fonction des scénarios d'occupation du sol

Il est également intéressant de constater que l'effet de l'occupation du sol sur la lame d'eau annuelle est homogène parmi les 30 années de simulations, tel qu'illustré sur la Figure 5.10. Cela signifie que l'effet de l'occupation du sol sur la lame d'eau annuelle est le même en valeur absolue pour les années humides et les années sèches. L'effet relatif est en revanche plus important pour les années sèches.

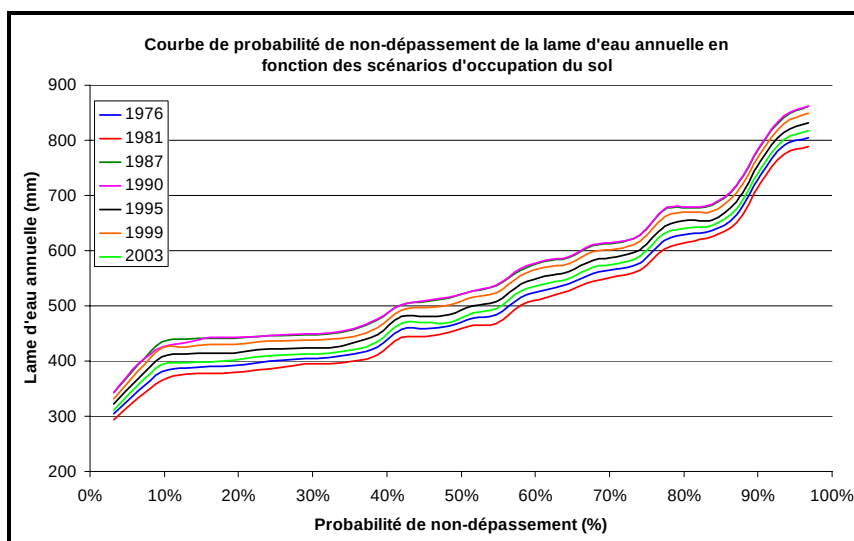


Figure 5.10 : Courbe de probabilité de non dépassement de la lame d'eau annuelle à l'exutoire du bassin versant de la rivière Chaudière en fonction des occupations du sol

Nous pouvons également observer sur la Figure 5.11 que cet effet de l'occupation du sol est négligeable en hiver et au printemps et qu'il est surtout important du mois de juin au mois de novembre. Cela s'explique par le fait que, durant la période hivernale, le ruissellement est essentiellement un ruissellement par saturation et que l'évapotranspiration de même que le prélèvement en eau par les cultures sont négligeables, de sorte que le type végétation (forêt, culture ou sol nu) influence peu le bilan hydrique du sol et les événements de ruissellement. Ainsi, le débit de pointe ne varie pas beaucoup : de 1309 m³/s avec l'occupation du sol de 1981 à 1337 m³/s avec l'occupation du sol de 1999, pour un coefficient de variation de seulement 0,8%. À l'inverse, en été et à l'automne, le ruissellement peut-être souvent de type Hortonien, dû à des précipitations intenses, ce qui implique qu'un couvert végétal dense a une grande influence en comparaison d'une culture à faible couvert comme le maïs par exemple, ou un sol nu.

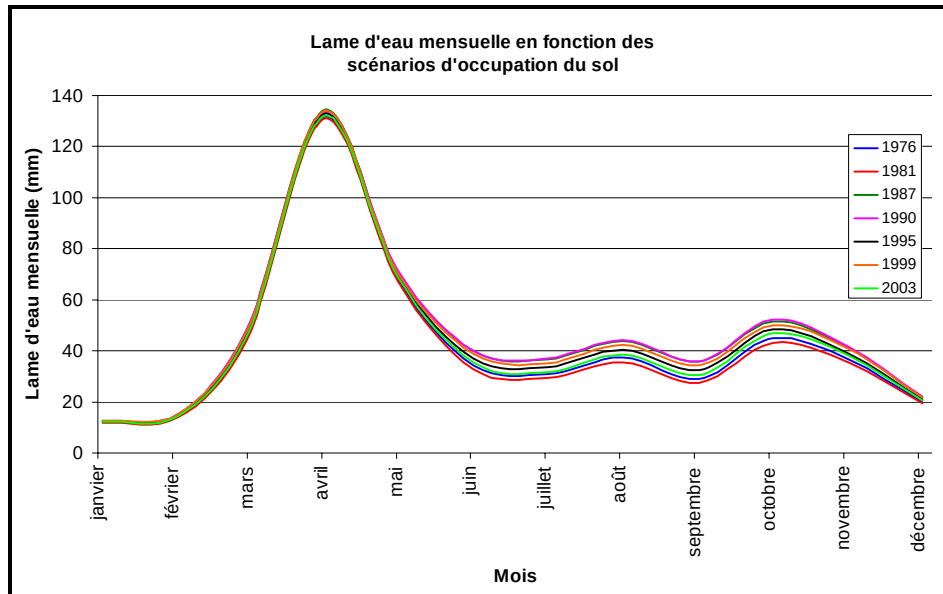


Figure 5.11 : Lame d'eau mensuelle (moyenne sur les 30 ans de simulation) en fonction de l'occupation du sol à l'exutoire du bassin versant de la rivière Chaudière

Pour mieux comprendre cette évolution de la lame d'eau au niveau de notre territoire d'étude, nous avons procédé à l'analyse des résultats au niveau des sous-bassins versants agricoles. Nous présentons ici les principaux résultats pour les deux sous-bassins les plus agricoles : Beaurivage et St-Victor. L'ANNEXE G présente les résultats pour tous les sous-bassins.

Si on retrouve le même type d'évolution de la lame d'eau annuelle à l'exutoire du sous-bassin de la rivière Beaurivage (Figure 5.12), en revanche la dynamique est différente à l'exutoire du sous-bassin Tring/Saint-Victor (Figure 5.13). Ainsi, au niveau du sous-bassin Beaurivage et pour la totalité du bassin versant, l'occupation de l'année 1995 produit une diminution très

remarquable de la lame d'eau. Cette diminution est moins importante au niveau du sous-bassin Tring/Saint-Victor qui présente une diminution constante de la lame d'eau à partir de 1990. Cela s'explique par le fait que l'évolution de l'occupation du sol a été différente sur ce sous-bassin, avec une diminution régulière du couvert forestier dans les années 90 (voir Figure 5.8). On retrouve d'ailleurs là encore une très forte corrélation entre la lame d'eau et l'occupation agricole sur le sous-bassin ($r^2 = 86,5\%$), inférieure à toutefois à celle obtenue sur le sous-bassin Beaurivage ($r^2 = 96,8\%$).

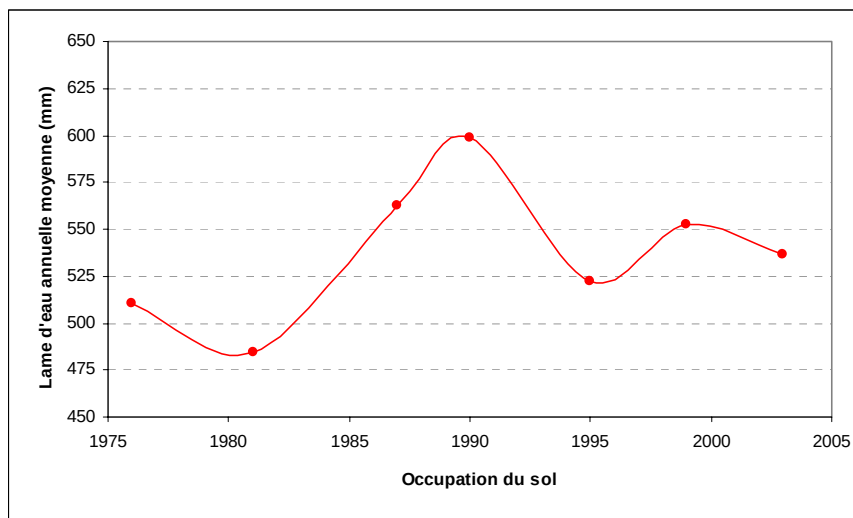


Figure 5.12 Variation de la lame d'eau annuelle moyenne simulée au niveau du sous-bassin Beaurivage en fonction de l'occupation du sol

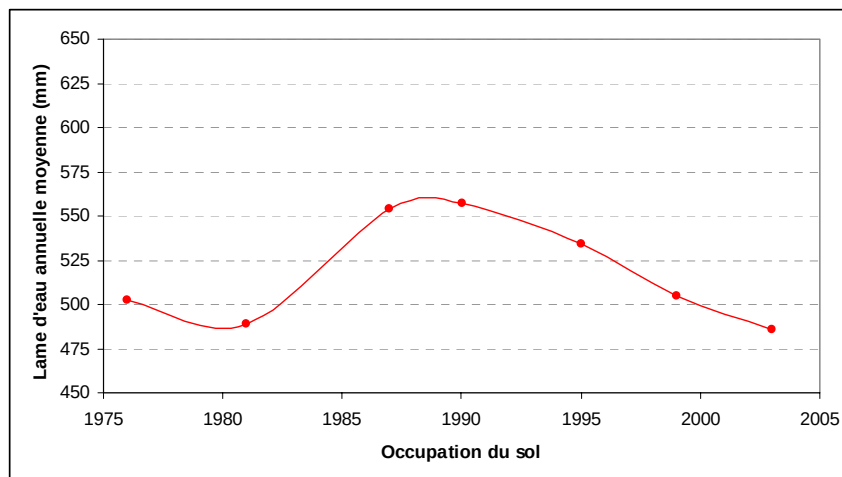


Figure 5.13 : Évolution de la lame d'eau annuelle moyenne simulée au niveau du sous-bassin Tring/Saint-Victor en fonction de l'occupation du sol

5.3.4.2 Débits d'étiage

Une analyse fréquentielle a été réalisée pour calculer les débits d'étiage caractéristiques annuel et estival (20 juin au 21 septembre) à l'échelle de l'exutoire de la Chaudière et aussi pour chaque sous-bassin versant. Ce calcul a été réalisé avec le logiciel HYFRAN© (Chaire en hydrologie statistique, 2002). Les débits d'étiage considérés sont le Q_{10-7} (débit cumulé de 7 jours consécutifs de période de retour 10 ans), le Q_{2-7} (débit cumulé de 7 jours consécutifs de période de retour 2 ans) et le Q_{5-30} (débit cumulé de 30 jours consécutifs de période de retour 5 ans). Le Q_{2-7} et le Q_{10-7} sont les variables utilisées en Amérique du Nord tandis que le Q_{5-30} est utilisé en Europe dans le cadre de la réglementation liée aux rejets des eaux usées. Les Q_{2-7} , Q_{10-7} et Q_{5-30} d'étiages ont été observés à l'échelle annuelle (janvier à décembre), faisant ainsi principalement ressortir les étiages hivernaux, et à l'échelle estivale (21 juin au 20 septembre).

L'évolution des débits d'étiages Q_{2-7} , Q_{10-7} et Q_{5-30} à l'exutoire du bassin versant de la rivière Chaudière en fonction de l'occupation du sol considérée est présentée au Tableau 5.4. Il est à noter que les Q_7 annuels sont majoritairement au mois de mars et les Q_{30} annuels au mois de février.

Tableau 5.4 : Évolution des débits d'étiage annuels et estivaux Q2-7, Q10-7 et Q5-30 (en m³/s) à l'exutoire de la rivière Chaudière en fonction des occupations du sol

Occupation du sol	Débits d'étiage annuels			Débits d'étiage estivaux		
	Q_{2-7}	Q_{10-7}	Q_{5-30}	Q_{2-7}	Q_{10-7}	Q_{5-30}
1976	7,29	5,43	7,26	9,46	5,85	13,08
1981	7,21	5,37	7,23	9,23	5,76	12,61
1987	7,81	5,84	7,65	10,64	6,88	16,21
1990	7,76	5,82	7,65	10,58	6,81	16,27
1995	7,47	5,58	7,45	9,60	6,26	14,28
1999	7,59	5,67	7,50	10,12	6,52	15,32
2003	7,37	5,48	7,34	9,57	5,91	13,19
COV (%)	3,1%	3,3%	2,3%	5,7%	7,4%	10,6%

L'évolution annuelle peut aussi être présentée par un graphique permettant la visualisation des changements des débits d'étiages (Figure 5.14).

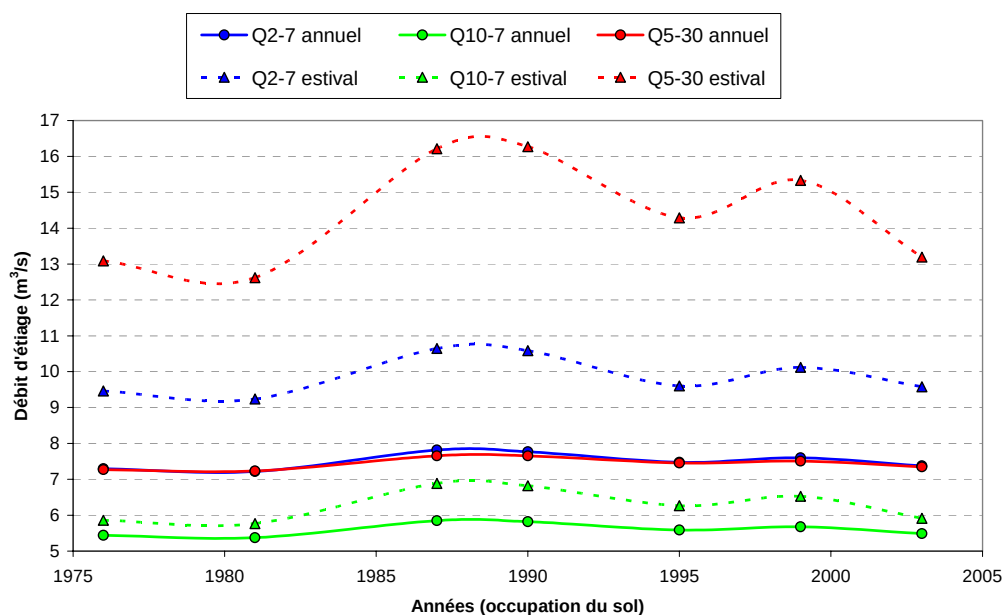


Figure 5.14 : Évolution annuelle des débits d'étiage à l'exutoire du bassin versant de la rivière Chaudière en fonction des occupations du sol

On observe que les débits d'étiage estivaux et annuels présentent le même type d'évolution mais que celle des débits d'étiage estivaux est beaucoup plus marquée (cela se retrouve dans les valeurs des coefficients de variation reportées dans le Tableau 5.4. Cela s'explique par les

mêmes raisons que celles exposées pour la lame d'eau mensuelle : l'effet de la végétation se fait surtout sentir en été et à l'automne et beaucoup moins en hiver (les étiages annuels sont en hiver) et au printemps. Dans les deux cas, la corrélation avec l'occupation agricole est très forte, avec des coefficients de détermination toujours supérieurs à 92% (Tableau 5.5). Des résultats du même ordre sont obtenus par rapport à l'évolution du milieu forestier.

Tableau 5.5 : Coefficients de corrélation et de détermination entre les débits d'étiage et l'occupation du sol au niveau du bassin versant de la Chaudière

		Milieu agricole	Milieu forestier	Autres
$Q_{2.7}$ annuel	Corr,	98,38%	-98,30%	74,92%
	Det,	96,79%	96,63%	56,13%
$Q_{10.7}$ annuel	Corr,	97,99%	-98,29%	75,72%
	Det,	96,01%	96,60%	57,34%
$Q_{5.30}$ annuel	Corr,	98,11%	-99,10%	38,24%
	Det,	96,25%	98,20%	60,56%
$Q_{2.7}$ estival	Corr,	97,31%	-93,56%	63,39%
	Det,	94,69%	87,53%	40,18%
$Q_{10.7}$ estival	Corr,	96,15%	-97,83%	78,32%
	Det,	92,46%	95,70%	61,34%
$Q_{5.30}$ estival	Corr,	96,56%	-97,25%	75,78%
	Det,	93,24%	94,58%	57,42%

Ces résultats montrent que l'évolution des occupations agricole et forestière à l'échelle du bassin versant a une influence très importante sur le régime d'écoulement à l'exutoire. L'accroissement des superficies cultivées au détriment de la forêt provoque une augmentation du ruissellement et de la lame d'eau en rivière, spécialement pendant l'été et l'automne. Cela a également pour conséquence une augmentation des débits d'étiage, particulièrement les débits d'étiage estivaux.

À l'échelle des sous-bassins, les résultats sont hétérogènes et, globalement, les corrélations avec l'évolution de la superficie agricole sont moins fortes qu'à l'échelle de l'ensemble du bassin versant de la rivière Chaudière (voir l'ANNEXE G).

5.3.4.3 Érosion

Les simulations ont également porté sur le processus d'érosion. On peut voir sur la Figure 5.15 que l'effet de l'évolution de l'occupation du sol sur la charge annuelle n'est pas aussi homogène que pour la lame d'eau parmi les 30 années de simulation : l'effet est plus important en valeur absolue pour les années à forte érosion que pour celles à faible érosion. Cela implique que l'effet relatif est en revanche plus homogène.

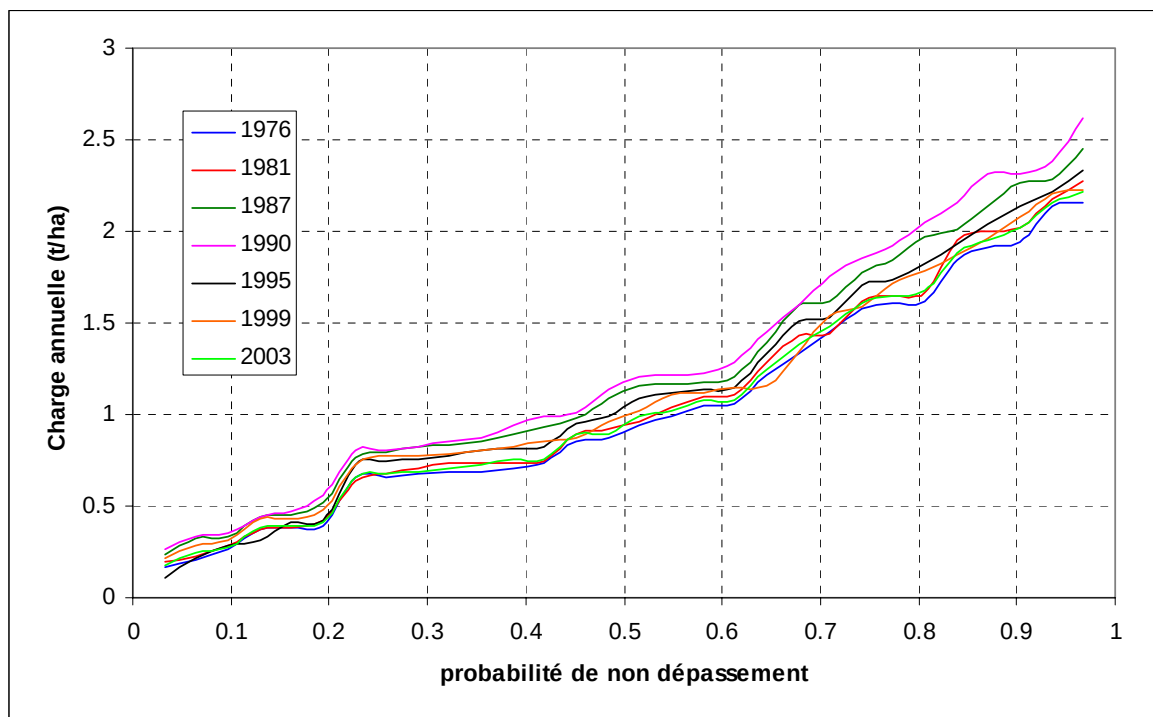


Figure 5.15 : Fréquence cumulée de la charge annuelle en sédiments simulée à l'exutoire du bassin versant de la rivière Chaudière en fonction de l'occupation du sol

On constate également sur la Figure 5.16 que la charge moyenne annuelle simulée à l'exutoire du bassin de la Chaudière ne suit pas tout à fait la même évolution que la lame d'eau (Figure 5.9). La charge minimale est obtenue avec l'occupation du sol de 1976 (1,04 t/ha). De plus la charge diminue fortement et régulièrement à partir de 1990 alors qu'on avait obtenu une remontée de la lame d'eau en 1999. Le coefficient de variation est plus important que celui de la lame d'eau annuelle (7,2% contre 4,6%).

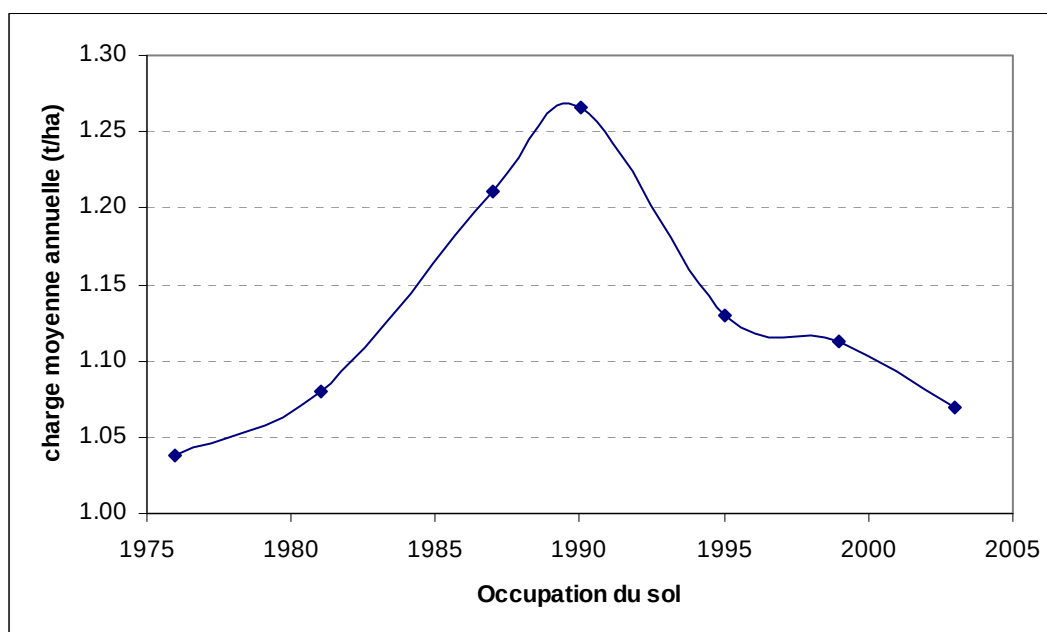


Figure 5.16 : Évolution de la charge moyenne annuelle en sédiments simulée à l'exutoire du bassin versant de la rivière Chaudière en fonction de l'occupation du sol

Cette différence est intéressante et montre que la charge en sédiments ne varie pas linéairement avec l'hydrologie. Elle est toutefois bien corrélée avec la superficie agricole sur le bassin versant ($r^2 = 74,8\%$), même si cette corrélation est moins forte que pour la lame d'eau. Ceci s'explique par le fait que, dans le modèle de GIBSI, l'érosion est particulièrement sensible au type de culture. En 1999, c'est surtout les pâturages qui ont augmenté, tandis que le maïs et les céréales sont restés relativement stables. En particulier, il semble que l'évolution de la charge annuelle en sédiments suive l'évolution de la superficie en maïs (voir Figure 5.4) qui varie fortement de manière relative ($cv = 67,5\%$). Cela est confirmé par les coefficients de corrélation reliant la charge annuelle en sédiments et les différentes cultures (Tableau 5.6). La superficie en maïs diminue dans les années 90, ce qui pourrait expliquer la diminution de l'érosion. Toutefois, cela n'explique pas la baisse de l'érosion en 2003.

Tableau 5.6 : Coefficient de corrélation et de détermination entre la charge annuelle moyenne simulée et l'occupation agricole du bassin versant

	Superficie agricole	Pâturage	Céréales	Maïs
Coefficient de corrélation	86,5%	53,9%	68,8%	89,5%
Coefficient de détermination	74,8%	29,0%	47,3%	80,0%

5.4 RÉSUMÉ

L'évolution passée de l'occupation du sol sur le bassin versant de la rivière Chaudière a été quantifiée à l'aide de 7 images satellites (1976, 1981, 1987, 1990, 1995, 1999 et 2003) qui ont subi une série de prétraitements avant d'être classifiées à l'aide de la méthode orientée objet. Malgré les limites imposées par l'absence de vérité terrain et la présence de confusion entre les classes, les résultats de cette classification semblent cohérents ont permis de constater que l'occupation du territoire a beaucoup évolué au cours des 30 dernières années, avec une nette augmentation de l'agriculture au détriment de la forêt pendant les années 80, puis une légère diminution dans les années 90.

Ces cartes d'occupation ont été ensuite intégrées dans le système d'aide à la décision GIBSI et des simulations de 30 ans ont été réalisées pour chacune des sept configurations. Les résultats montrent que la lame d'eau annuelle moyenne simulée à l'exutoire du bassin versant de la rivière Chaudière suit la même évolution que l'occupation agricole sur le bassin. Les débits d'étiage annuels et estivaux sont également fortement corrélés avec le milieu agricole. Cette corrélation est également importante pour l'ensemble des sous-bassins versants. En revanche, l'effet de l'évolution de l'occupation agricole sur la charge annuelle en sédiments est un peu moins évident, celle-ci variant plus fortement que la lame d'eau annuelle.

Le défrichement des forêts au profit de terres agricoles, qui était la tendance dans les années 70 et 80, diminue la couverture végétale et donc l'évapotranspiration et la capacité de rétention de l'eau du sol et s'accompagne souvent de drainage agricole (non simulé ici explicitement par GIBSI), favorisant ainsi le ruissellement vers le réseau hydrique et l'augmentation du débit. Au contraire, la tendance observée depuis 1990 d'une régénération du milieu forestier au profit des terres agricoles, augmente l'effet tampon du territoire et diminue la lame d'eau annuelle et le débit d'étiage.

Cette première étape de l'étude a donc permis de confirmer l'hypothèse selon laquelle l'occupation des sols influence l'écoulement du bassin versant, et de quantifier cette influence. Compte tenu de l'importance de cette influence, cela montre bien également l'intérêt de prendre en compte l'évolution de l'occupation du sol lorsque l'on souhaite évaluer *a priori* le comportement hydrologique du bassin versant dans le futur, comme cela est fait dans la deuxième partie de cette étude.

6 EFFET DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET DE SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL

Cette partie de l'étude porte sur la détermination de l'effet des CC sur le régime hydrologique et la qualité de l'eau à l'échelle du bassin versant de la rivière Chaudière. Il s'agit également de déterminer l'influence de scénarios d'évolution future l'occupation du sol dans ce contexte de CC.

Contrairement à la plupart des études visant à estimer l'effet des CC qui portent sur l'horizon 2050, il a été convenu avec nos partenaires, notamment le MAPAQ et la FADQ, de déterminer l'effet à court terme, soit à l'horizon 2025 (sur la période 2010-2039). En effet, compte tenu de la problématique agricole de notre étude et de la prise en compte de scénarios d'occupation du territoire, il aurait été très difficile de définir des scénarios plausibles sur une longue période. De plus, l'horizon 2025 permet d'éviter une trop grande incertitude liée à la dispersion des scénarios de gaz à effet de serre et à la performance des modèles de circulation générale (MCG). Ceci étant dit, les sorties des MCG sous les scénarios d'émissions des gaz à effet de serre pour l'horizon 2025 (voir Figures 6.2b et 6.3) pourraient ne pas donner lieu à des modifications du climat aussi significatives que pour les horizons 2050 ou encore 2100. Ainsi, les experts en modélisation du climat chez notre partenaire Ouranos nous ont souligné qu'il est possible que la perturbation ou la variabilité climatique prévue par l'ensemble des MCG utilisés pour l'horizon 2025 découle plus des MCG eux-mêmes que des scénarios d'émissions des gaz à effet de serre, mais qu'il demeurerait *a priori* difficile de quantifier cette hypothèse dans le cadre de ce projet.

L'approche méthodologique générale est schématisée sur la Figure 6.1 ci-dessous.

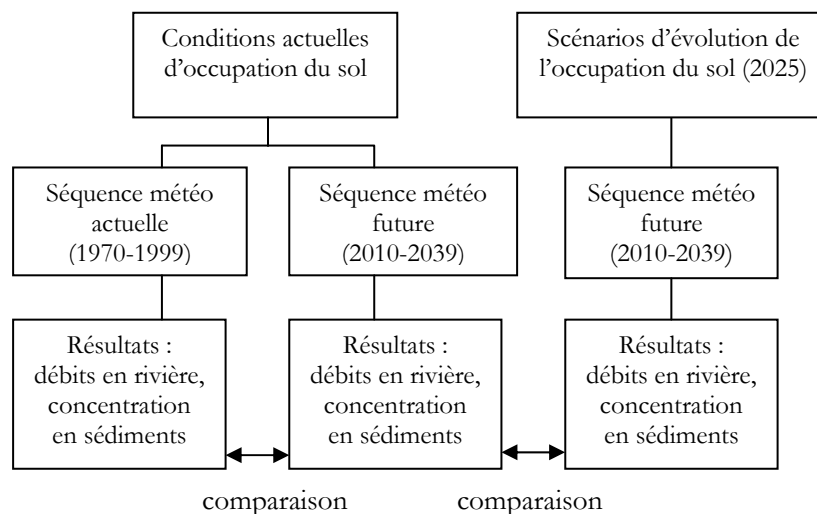


Figure 6.1 : Approche globale de simulation

Compte tenu de sa complexité, ce travail s'est déroulé en plusieurs étapes : tout d'abord, un travail exploratoire a été réalisé (Guillot, 2004) afin de nous familiariser avec les techniques existantes pour déterminer les séquences météorologiques futures, et mettre en place l'approche méthodologique ainsi qu'une première application. Par la suite, nous avons fait une deuxième tentative pour calculer les séries météorologiques futures à l'aide du downscaling statistique (Trinh, 2005). Finalement, c'est le Consortium OURANOS, par l'intermédiaire de l'équipe de Philippe Gachon, qui s'est chargé de calculer les données météorologiques futures à l'aide du downscaling statistique (voir section 6.1.2.2). Des données plus récentes nous ont également été fournies pour la méthode des Deltas (équipe de Diane Chaumont d'OURANOS). En parallèle, deux scénarios d'évolution d'occupation du sol ont été déterminés et intégrés dans GIBSI. Nous avons finalement pu procéder aux simulations finales durant l'année 2006 (Moquet, 2006).

6.1 DÉTERMINATION DE L'EFFET DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LE RÉGIME HYDROLOGIQUE

6.1.1 Sélection de méthodes pour déterminer l'effet des CC sur l'hydrologie

Différentes méthodes existent pour évaluer l'évolution du climat résultant de cette augmentation de gaz à effet de serre ainsi que son impact :

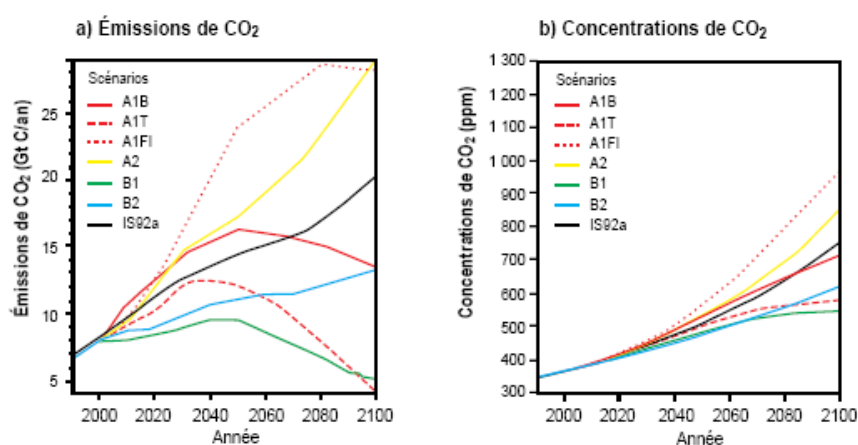
- Les scénarios analogues qui consistent en l'utilisation de climats chauds antérieurs en tant que scénarios de climats future (analogue temporel) ou dans l'utilisation du climat actuel d'une autre région habituellement plus chaude en tant que scénario de climat futur pour la région à l'étude (analogue spatial).
- Les scénarios issus des résultats des Modèles de Circulation Générale (MCG), de loin les plus utilisés de nos jours. Ces modèles fonctionnent à partir de scénarios d'émission des gaz à effet de serre et prennent en compte les effets des aérosols.
- L'estimation des paramètres de température et de précipitations à l'aide de courbes de tendances.

Dans le cadre de cette étude, nous avons privilégié les méthodes basées sur les MCG. Les MCG sont actuellement les outils les plus utilisés par les scientifiques pour prévoir les changements dans le climat futur de la Terre.

Les MCG fonctionnent à partir des scénarios d'émission de gaz à effet de serre (SE) du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) décrits dans le *Special Report on Emissions Scenarios* (GIEC, 2001). Les augmentations de CO₂ prises en compte dans ces scénarios sont calculées par rapport à la concentration de référence de 330 ppm (celle de 1850). Les principaux SE sont décrits dans le Tableau 6.1 et représentés à la Figure 6.2. Dans les diverses prédictions d'évolution du climat et d'étude de l'impact de celui-ci, l'hypothèse la plus souvent étudiée correspond à un doublement de la concentration CO₂ dans l'atmosphère à la fin du siècle par rapport à l'état initial de la période préindustrielle.

Tableau 6.1 : Description des principaux scénarios d'émission de gaz à effet de serre

LES SCÉNARIOS D'ÉMISSIONS DU RAPPORT SPÉCIAL SUR LES SCÉNARIOS D'ÉMISSIONS	
A1. Les scénarios A1 sont fondés sur : • une croissance économique très rapide ; • une croissance des populations qui atteint un sommet au milieu du XX^e siècle et décline par la suite ; • une pénétration rapide de nouvelles technologies énergétiques plus efficaces. On s'attend à une plus grande convergence entre les régions du globe avec des échanges accrus et une réduction des écarts de revenus. On distingue au sein de ce groupe trois scénarios en fonction des sources d'approvisionnement énergétique en cause : • combustibles fossiles : scénario A1FI, • énergies non fossiles : scénario A1T, • amélioration technologique touchant toutes les sources d'approvisionnement : scénario A1B.	A2. Les scénarios A2 envisagent un monde où la convergence est plus lente avec des taux de fécondité qui demeurent élevés dans certaines régions et une population mondiale qui continue de s'accroître tout au long de l'horizon de prévisions. La croissance économique et technologique y est plus hétérogène et plus lente. B1. Les scénarios B1 proposent une évolution semblable à celle des scénarios A1, tout en accordant une place plus importante à une économie de services et d'information. Ce type d'évolution est accompagné d'une réduction de la consommation des matières premières, de l'introduction de technologies propres utilisant plus efficacement les ressources. B2. Les scénarios B2, comme les scénarios A2, posent l'hypothèse d'une croissance continue des populations mais à un rythme inférieur. Le développement économique y est moyen et les changements technologiques sont plus variés, de façon à mieux répondre aux situations locales et régionales.
Aucun de ces scénarios ne prend en compte spécifiquement la mise en œuvre du Protocole de Kyoto ou d'autres initiatives découlant de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.	

Figure 6.2 : Évolution des émissions et des concentrations de CO₂ au cours du 21^{ème} siècle selon différents scénarios d'émission (GIEC, 2001)

Selon les différents SE, les différences de concentration sont nettes en fin de siècle et ne sont réellement sensibles qu'à partir de l'année 2040.

À partir de ces SE, les MCG permettent de simuler l'évolution future de variables climatiques à l'échelle de mailles de plusieurs centaines de kilomètres de côté. L'évolution de la température est représentée sur la Figure 6.3.

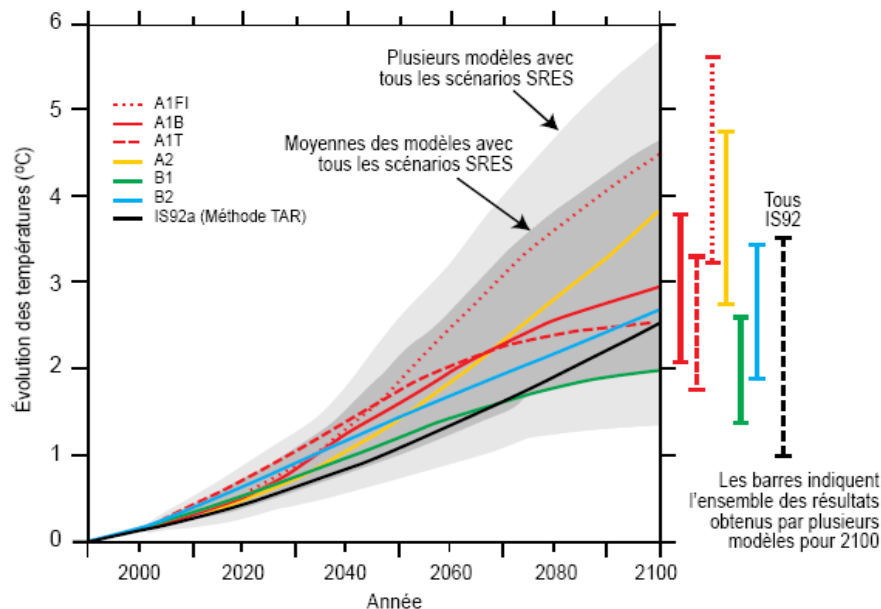


Figure 6.3 : Évolution de la température moyenne mondiale pour les six scénarios indicatifs SRES, dérivée au moyen d'un modèle climatique simple. (Source : Bilan 2001 des changements climatiques : Les éléments scientifiques, Rapport du Groupe de travail I du GIEC, *Contribution du Groupe de travail I au troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, page 66)

Pour certains MCG, plusieurs simulations sont réalisées avec le même SE mais avec des conditions initiales différentes. C'est ce qu'on appelle les membres (M) de simulations. On se retrouve donc avec un grand nombre de combinaisons (MCG-SEM) possibles.

Pour prévoir l'effet de CC sur le régime hydrologique, le principe est alors d'intégrer les prévisions des MCG comme données d'entrée d'un modèle hydrologique. Toutefois, la principale difficulté concerne la différence d'échelle spatiale puisque le modèle hydrologique nécessite en entrée des variables météorologiques locales (température et précipitations).

Une manière simple de procéder est de comparer les sorties des MCG pour la période de référence et la période future, puis à calculer un écart mensuel moyen pour chaque variable météorologique : température minimale ($T_{\min}$), température maximale ($T_{\max}$) et précipitations (P). Ces écarts sont ensuite appliqués à la séquence météorologique utilisée dans le modèle hydrologique pour la période de référence. C'est la méthode des Deltas ou méthode incrémentale. Elle est schématisée à la Figure 6.5. L'intérêt de cette méthode est sa facilité de mise en œuvre. Elle est souvent utilisée en première approximation. L'inconvénient est qu'elle présente de grandes imprécisions liées à la mauvaise simulation des précipitations par les MCG,

les augmentations de températures prévues sont parfois très importantes et surtout, comme cette méthode prend en compte un changement moyen (dans l'espace et le temps) la fréquence des précipitations reste inchangée.

D'autres méthodes plus sophistiquées ont été développées, consistant en une mise à l'échelle (*downscaling*) des données des MCG. Les méthodes de downscaling utilisables dans un contexte de modélisation hydrologique sont présentées et comparées notamment par Wilby et Wigley (1997), Wood *et al.* (2004) et Xu (1999b). Le downscaling peut être dynamique ou statistique. Le downscaling dynamique est basé sur l'utilisation de modèles régionaux climatiques (MRC) alimentés par les MCG (voir par exemple Bergström *et al.*, 2001; Stone *et al.*, 2001 pour des exemples d'utilisation de MRC en modélisation hydrologique). Le principal inconvénient de cette méthode est l'important temps de calcul nécessaire. Les méthodes de downscaling statistique sont plus accessibles et consistent en la détermination d'une relation statistique entre les variables climatiques à l'échelle globale prédite par les MCG (nommées *prédicteurs*) et les variables météorologiques locales (appelées *prédictees*). De plus, plusieurs études ont montré que le downscaling statistique est plus simple et plus adapté pour une utilisation avec un modèle hydrologique (Wilby *et al.*, 2000; Wood et Maurer, 2002). Wilby and Wigley (1997) ont classé les méthodes de downscaling statistique en trois groupes : les méthodes de régression, les générateurs de climat et les approches *weather pattern*. La procédure générale pour intégrer les sorties des MCG dans un modèle hydrologique à l'aide du downscaling statistique suit de nombreuses étapes qui peuvent toutes être abordées de différentes manières. Cela aboutit à un grand nombre de méthodes possibles (Figure 6.4).

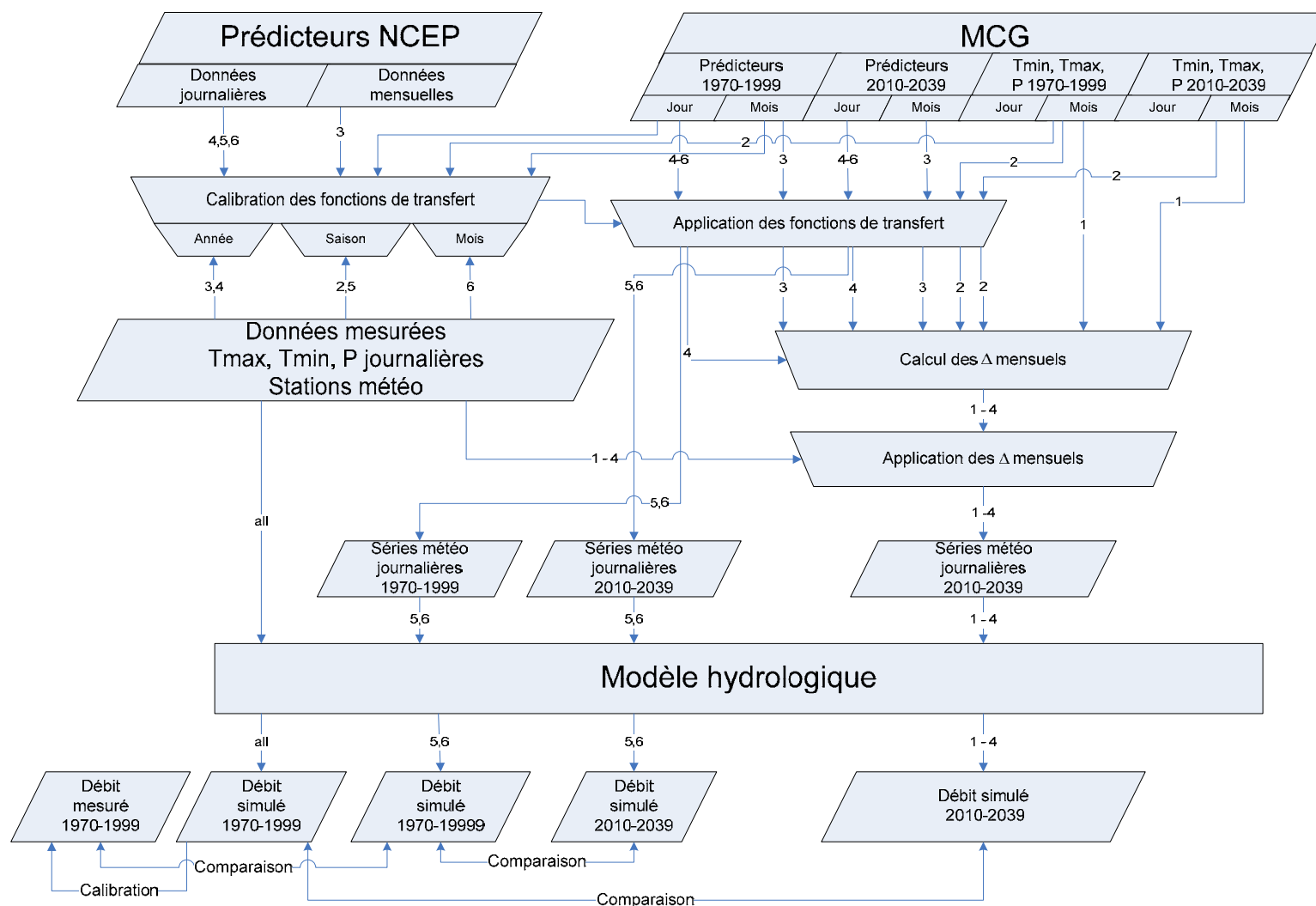


Figure 6.4 : Diagramme des différentes étapes et des combinaisons possibles pour l'utilisation du downscaling statistique et de la méthode des deltas. Chaque numéro correspond à une combinaison possible.

L'approche la plus ambitieuse est d'utiliser les sorties journalières des MCG, d'appliquer une mise à l'échelle à l'aide d'une méthode de régression par rapport aux données mesurées NCEP, puis d'utiliser les données journalières ainsi obtenues directement comme données d'entrée du modèle hydrologique. Une des limites de cette approche est qu'elle nécessite des données de réanalyse NCEP qui ne sont pas disponibles pour tous les MCG. On ne peut donc pas prendre plusieurs MCG comme pour la méthode des Deltas.

Finalement, il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode universelle, reconnue comme étant meilleure que les autres en toute circonstance (Diaz-Nieto et Wilby, 2005, 2006). Tel que mentionné par Haylock *et al.* (2006), et de la même manière qu'il est recommandé d'utiliser plusieurs MCG, plusieurs SE et plusieurs membres de simulation, l'idéal est de considérer plusieurs approches de mises à l'échelle. Dans cette étude, nous avons donc choisi d'utiliser les méthodes suivantes :

1. La Méthode des deltas calculés à partir des données brutes mensuelles (schématisée à la Figure 6.5). Cette méthode sera appelée **Méthode des Deltas**
2. L'utilisation directe des données journalières issues du downscaling statistique comme données d'entrée du modèle hydrologique (schématisée à la Figure 6.6). cette méthode sera appelée **Méthode du Downscaling**
3. La méthode des deltas calculés à partir des données journalières issues du downscaling statistique (schématisée à la Figure 6.7). Cette méthode sera appelée **Méthode mixte**

6.1.2 Application des méthodes sélectionnées

6.1.2.1 Méthode des Deltas

L'approche générale est schématisée sur la Figure 6.5.

Plusieurs MCG étaient disponibles : CGCM2 et CGCM3 développés par le Centre Climatologique Canadien, ECHAM4 développé par le Max Planck Institute for Meteorology (Allemagne), HadCM3 développé par le Hadley Centre for Climate Prediction and Research (Grande-Bretagne), CSIRO-Mk2 développé par le Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Australie) et le CCSRNIES développé par le Japanese Centre for Climate Research Studies.

Une comparaison a donc été réalisée, basée sur la capacité des MCG à reproduire les températures et la précipitation mesurées sur la période de référence. Les résultats sont présentés à l'ANNEXE H et montrent que CGCM3, HadCM3 et ECHAM4 donnent les

meilleurs résultats dans nos conditions. Les moyennes mensuelles des températures minimale et maximale ainsi que des précipitations sont correctement reproduites, excepté pour le mois de septembre où la précipitation est sous-estimée par les GCM. Par conséquent, seuls ces trois MCG ont été utilisés dans notre étude. Il faut noter que CGCM3 est une amélioration de CGCM2, intégrant une nouvelle version de la composante atmosphérique et une amélioration du schéma de surface (Scinocca et McFarlane, 2004). Les membres de simulations ont été sélectionnés pour représenter la plus large gamme de conditions (voir ANNEXE H).

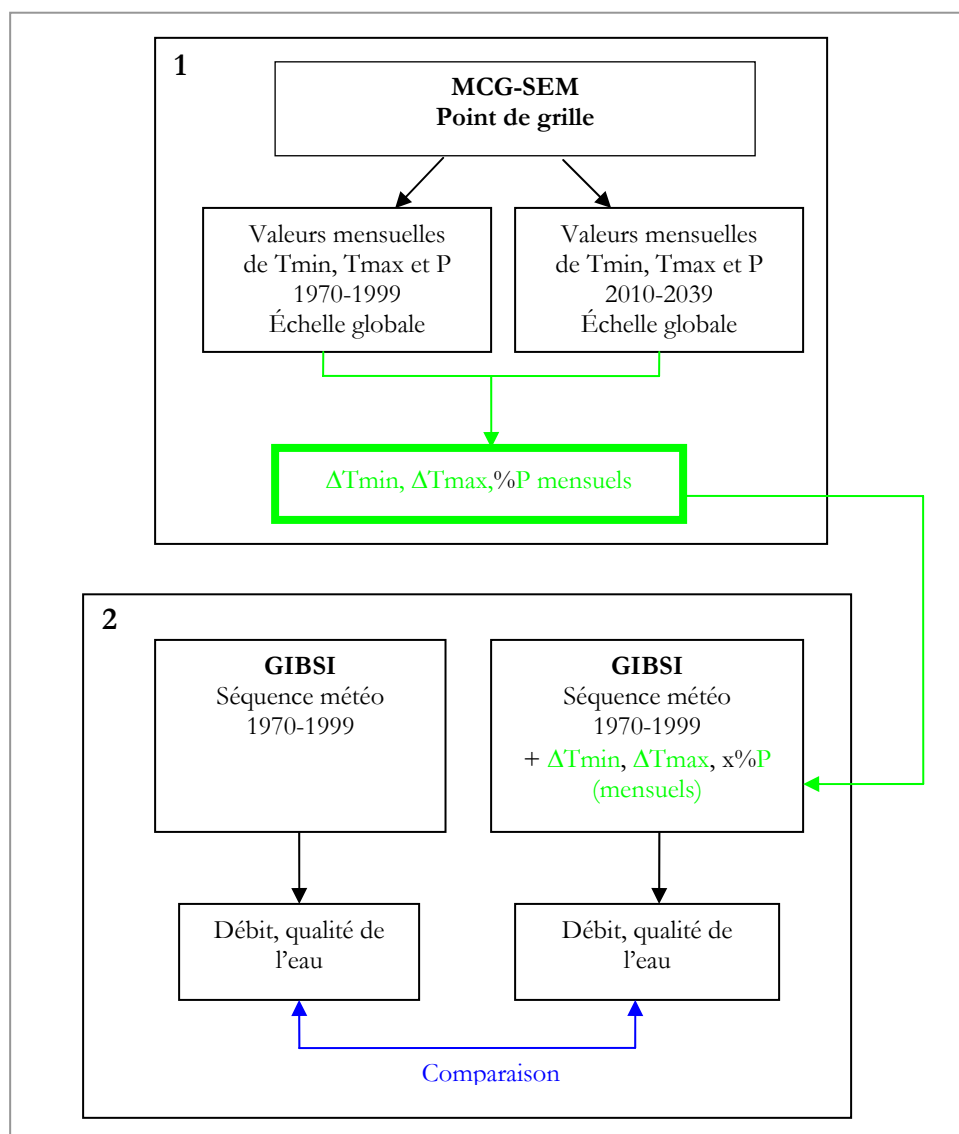


Figure 6.5 : Méthode des deltas

Les écarts de température et de précipitation déterminés entre la période future et la période de référence pour la méthode des Deltas sont représentés à l'ANNEXE H.

La méthode des Deltas présente l'avantage d'être facile à mettre en œuvre, permet de considérer l'ensemble de l'information météorologique historique à l'échelle du bassin versant, et permet d'utiliser une grande variété de MCG. Cependant elle ne prend pas en compte la variabilité spatiale de l'évolution du climat ni l'évolution de l'occurrence, de la durée et de l'intensité des précipitations.

L'approche générale est schématisée sur la Figure 6.6).

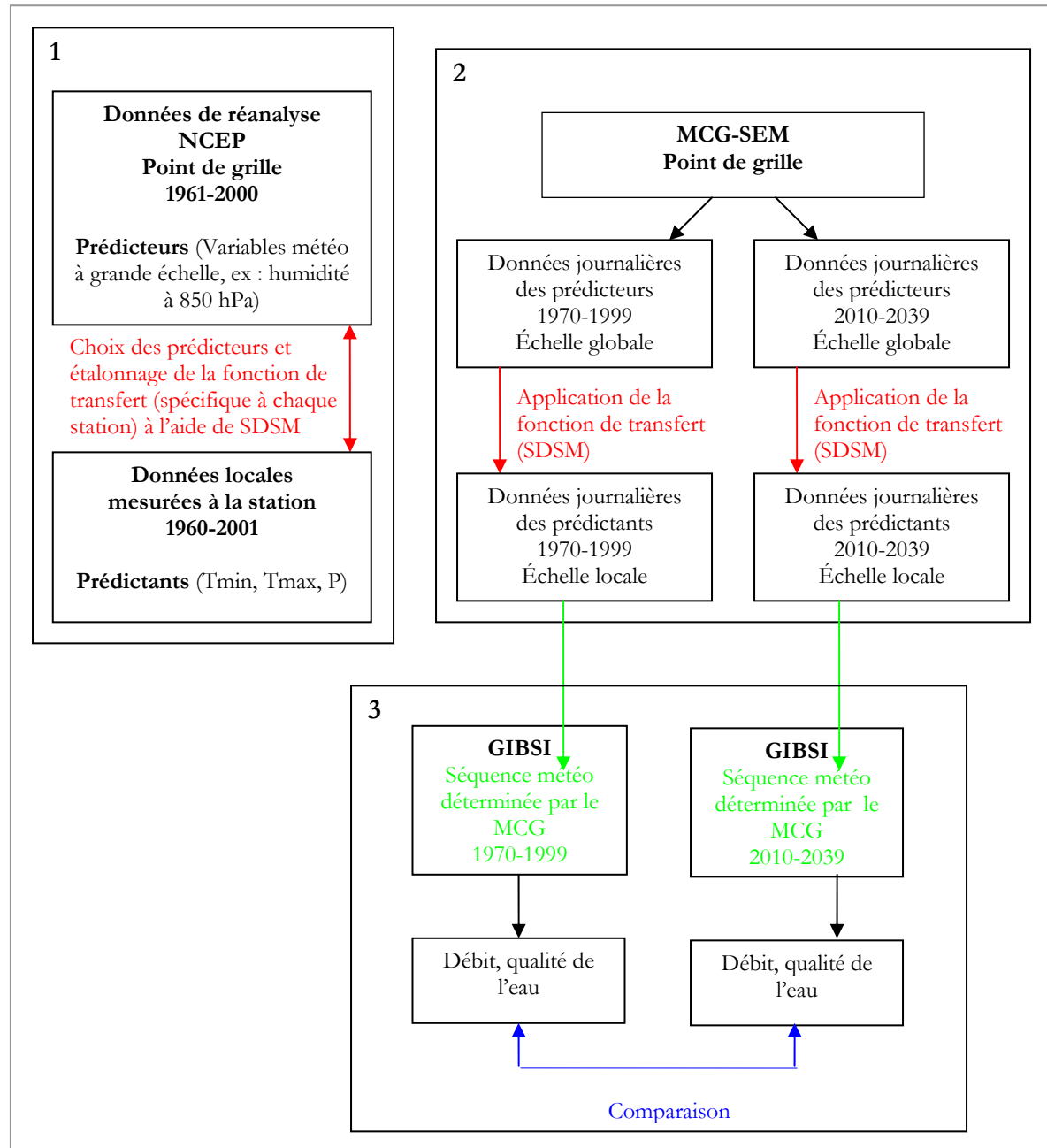


Figure 6.6 : Schéma de l'approche journalière avec downscaling

Comme cette procédure est fastidieuse et que l'étape d'étalonnage nécessite au moins trente ans de données météorologiques, elle n'a pas pu être menée sur l'ensemble des 41 stations météorologiques du bassin versant, la plupart d'entre elles ayant des données sur une durée limitée. Seules neuf (9) stations avec plus de trente ans de données ont été sélectionnées afin de couvrir l'ensemble du bassin (Figure I.1 à l'ANNEXE I).

La procédure du downscaling a été réalisée par le Consortium OURANOS (équipe de Philippe Gachon) à l'aide du logiciel SDSM (Wilby *et al.*, 2002) selon deux étapes : (1) choix des prédicteurs et étalonnage de la fonction de transfert entre prédicteurs et prédicteurs à partir des données NCEP et sur une base mensuelle, et (2) application de la fonction de transfert aux données journalières issues du MCG pour la période de référence et pour la période future.

Pour la méthode du downscaling statistique, les données de réanalyse NCEP n'étaient disponibles que pour le MCG HadCM3. Seul ce MCG a donc pu être utilisé.

Le fait de ne considérer que neuf (9) stations météorologiques sur les 41 présentes sur le bassin induit inévitablement une perte d'information et un biais dans la performance du modèle hydrologique de GIBSI. Cela est discuté à l'ANNEXE I. Pour ces neuf (9) stations, la méthode d'interpolation des données météorologiques choisie est la méthode des polygones de Thiessen, plus performante pour un faible nombre de stations que la méthode de pondération des trois stations les plus proches, utilisée par défaut dans HYDROTEL.

Les données issues du downscaling ont été générées sous forme de fichiers de 100 chroniques météorologiques équiprobables sur la période 1961-2099, par scénario d'émission, pour chacune des neuf (9) stations et par paramètre (température minimale, maximale et précipitation). Compte tenu de l'impossibilité de réaliser 100 simulations avec GIBSI, trois simulations ont été sélectionnées parmi les 100: la chronique météorologique dont le RMSE sur la période 1961-2040 est le plus faible, c'est-à-dire la simulation qui se rapproche le plus de la moyenne des simulations, et deux autres chroniques prises au hasard (appelées h1 et h2).

Ainsi, après différentes modifications de la structure informatique du système GIBSI, des simulations sur la période 1970-1999 et 2010-2039 sont réalisées, chaque année étant simulée de manière indépendante.

La simulation de référence, à laquelle seront comparées les simulations futures, correspond donc dans ce cas à la simulation réalisée avec les données météorologiques des neuf (9) stations calculées par SDSM à partir des sorties de HadCM3, et pour la période 1970-1999 (voir Figure 6.6).

La méthode du Downscaling a l'avantage de faire varier l'occurrence, l'intensité et la durée des précipitations journalières. Toutefois, Gachon *et al.* (2005) ont montré que, si le Downscaling statistique permet de correctement reproduire l'occurrence des précipitations, l'intensité des événements pluvieux, en particulier lors des événements extrêmes, est plus difficilement reproduite. Elle permet aussi spatialiser ces données à l'échelle des stations météorologique (9 sur 41 dans notre cas). Cependant cette méthode présente les inconvénients liés au faible nombre de stations, sous-évaluant de manière importante le régime hydrique simulé. Elle a par ailleurs des difficultés à reproduire le climat passé et donc le régime hydrologique passé. Enfin, elle ne permet pas de prendre en compte la variabilité et l'incertitude liées aux MCG, puisque seul un MCG peut être utilisé.

De plus, il faut souligner que la procédure du Downscaling fait appel à l'expertise de l'utilisateur et donc à un certain jugement subjectif, en particulier pour le choix des prédicteurs. Or, certaines études ont montré que les résultats sont très sensibles à ce choix des prédicteurs (Wilby *et al.*, 1999). De plus, l'approche de régression implique l'hypothèse que les paramètres de la fonction de transfert restent inchangés entre la période d'étalonnage (historique) et la période de prévision (future). Cette hypothèse n'est pas vérifiable.

6.1.2.3 Méthode Mixte

L'approche générale est schématisée sur la Figure 6.7.

Puisque cette méthode est basée sur les résultats du Downscaling, elle n'a pu être appliquée que pour le MCG HadCM3.

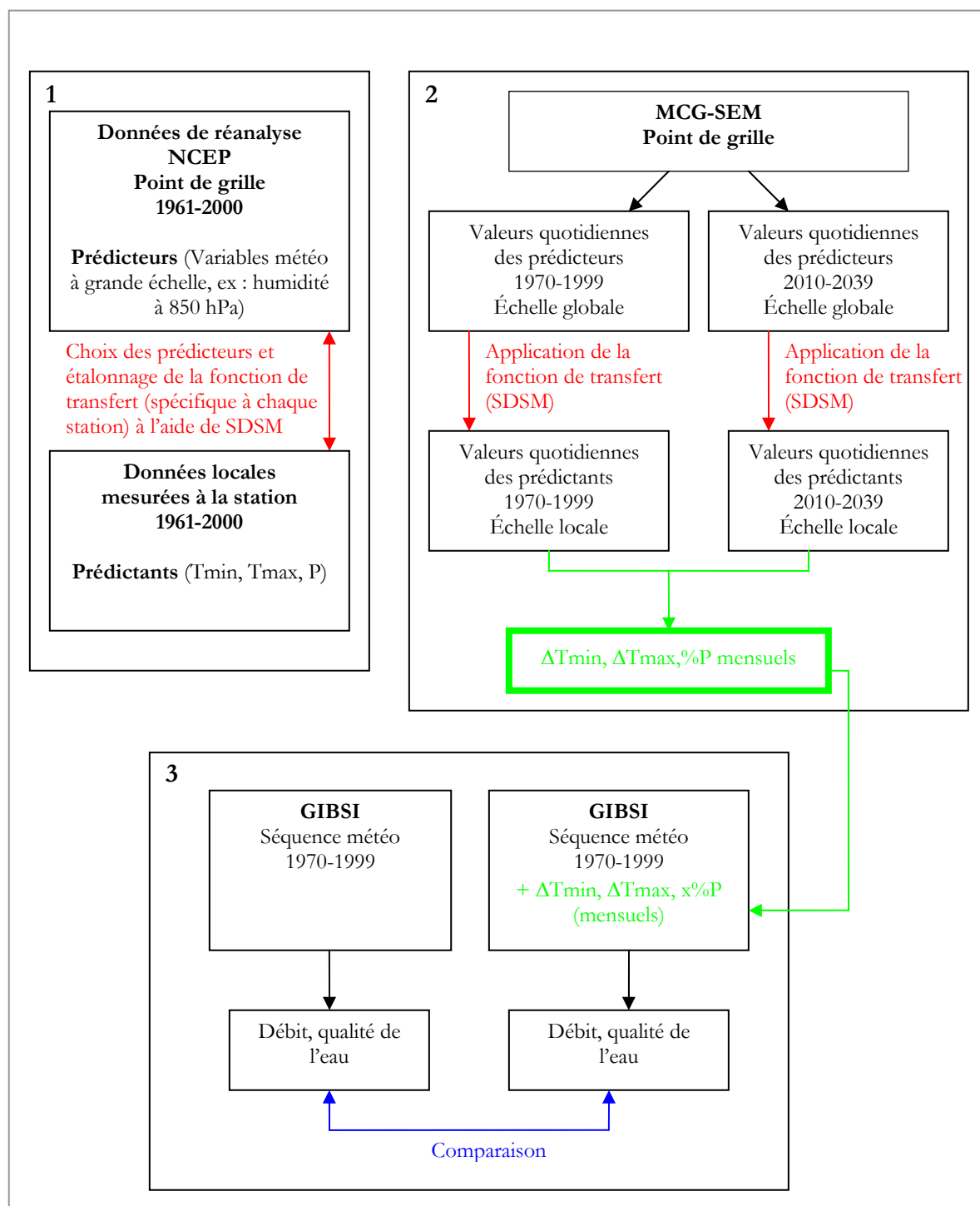


Figure 6.7 : Schéma de l'approche mixte (Deltas appliqués aux données issues du downscaling)

La méthode des deltas utilisant les données journalières de la mise à l'échelle spatiale du downscaling constitue une alternative aux deux précédentes méthodes et présente l'avantage de spatialiser l'évolution du climat sur les neuf stations considérées, elle permet de comparer les simulations futures directement avec les simulations passées issues des données historiques. Elle présente l'inconvénient de ne pas modifier la temporalité des événements climatiques et la représentativité spatiale du faible nombre de stations météorologiques pris en compte à l'échelle du bassin versant.

Les combinaisons MCG-SEM finalement retenues pour les trois méthodes sont présentées au Tableau 6.2.

Tableau 6.2 : MCG, SE et membres de simulation retenus

MCG	SE	Membre	Deltas	Downscaling	Mixte
CGCM3	A2	1	X	-	-
		2	-	-	-
		3	-	-	-
	B1	1	X	-	-
		2	-	-	-
		3	-	-	-
HadCM3	A2	a	X	X	X
		b	X	-	-
	B2	a	X	X	X
		b	-	-	-
ECHAM4	A2	-	X	-	-
	B2	-	X	-	-

6.1.3 Simulations avec GIBSI

L'utilisation de ces résultats pour alimenter le modèle hydrologique de GIBSI a nécessité la création de nouveaux fichiers d'entrée d'HYDROTEL à l'aide d'un programme MATLAB.

Les simulations sont réalisées pour chaque année de la période de simulation de manière indépendante, sur la période du 1^{er} janvier au 31 décembre.

6.1.4 Résultats pour l'hydrologie

Seuls les résultats obtenus à l'exutoire du bassin versant de la rivière Chaudière sont présentés ici. Les résultats concernant les sous-bassins sont présentés dans les Annexes H à J.

6.1.4.1 Méthode des Deltas

Nous présentons ici une synthèse des principaux résultats obtenus. Des résultats et données plus détaillées sont présentés à l'ANNEXE H.

Les différents MCG produisent des résultats très variables. À titre d'exemple, la Figure 6.8 présente la lame d'eau annuelle obtenue avec les différents MCG-SEM sur les 30 ans de simulation.

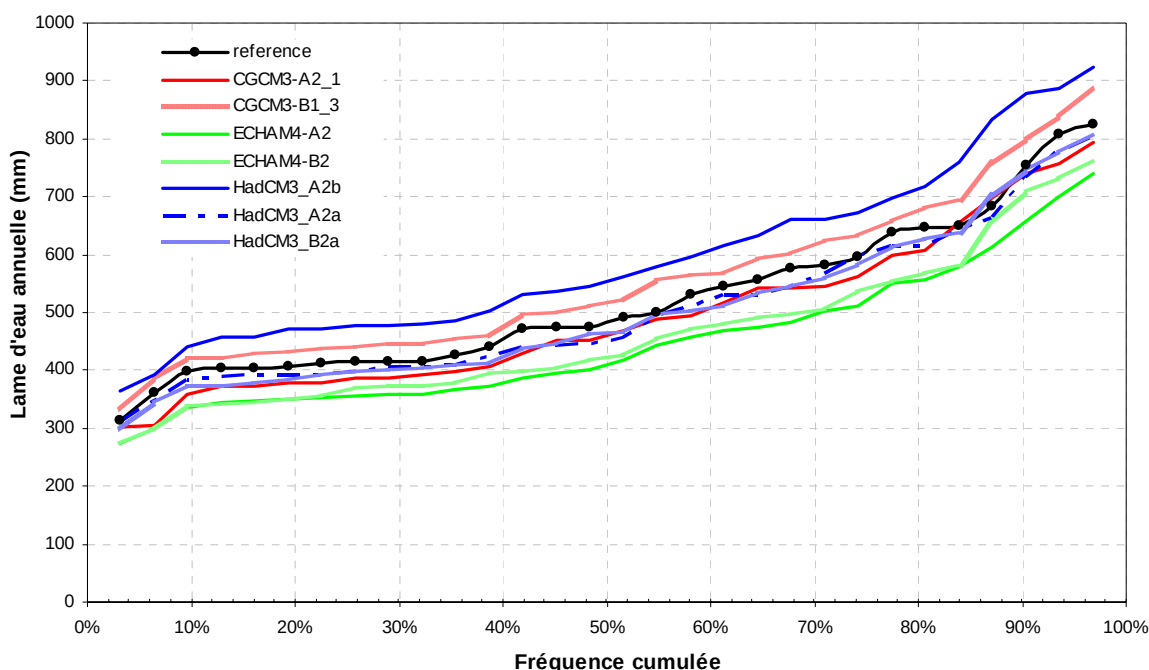


Figure 6.8 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire de la Chaudière selon les données historiques (référence) et les données des MCG-SEM appliqués par la méthode des deltas

On constate également que l'effet des CC est homogène (en valeur absolue) sur les 30 années de simulation, ce qui signifie que l'augmentation ou la diminution de la lame d'eau annuelle est, à peu de choses près, la même pour les années humides et les années sèches.

Le MCG-SEM ECHAM4-A2 produit la lame d'eau la plus faible avec une diminution moyenne de 14,1%, ce qui s'explique par le fait que le MCG ECHAM4 prédit une diminution des précipitations. À l'opposé, le MCG-SEM HadCM3-A2b produit la lame d'eau la plus élevée, soit une augmentation moyenne de 13,8%, due au fait que HadCM3 prédit une importante augmentation des précipitations (voir section H.2.1 à l'ANNEXE H). Il est donc

difficile de conclure à une tendance générale compte tenu de cette variabilité. Toutefois, si l'on considère que tous ces MCG-SEM sont équiprobables, on obtient la courbe de fréquence cumulée représentée en rouge sur la Figure 6.9. On constate ainsi une légère diminution de la lame d'eau (-2,7% en moyenne), qui est statistiquement significative (t -test apparié, $p < 0.01$).

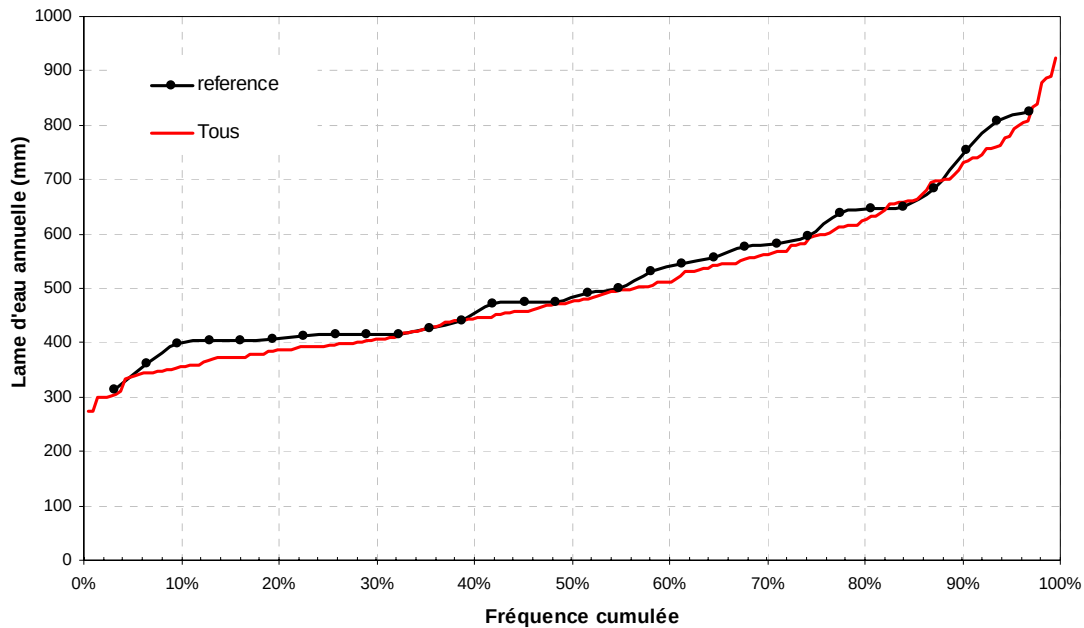


Figure 6.9 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire de la Chaudière selon les données historiques (référence) et l'ensemble des MCG-SEM appliqués par la méthode des deltas considérés comme équiprobables (en rouge)

Il est intéressant de considérer l'effet des CC tels que prévus par les MCG sur une base mensuelle. On constate sur la Figure 6.10 que la lame d'eau augmenterait en hiver (décembre à mars) du fait des températures plus élevées prévues par la plupart des MCG pendant cette saison, ce qui favorise les précipitations sous forme liquide et la fonte du couvert neigeux. En revanche, la lame d'eau tendrait à diminuer le restant de l'année.

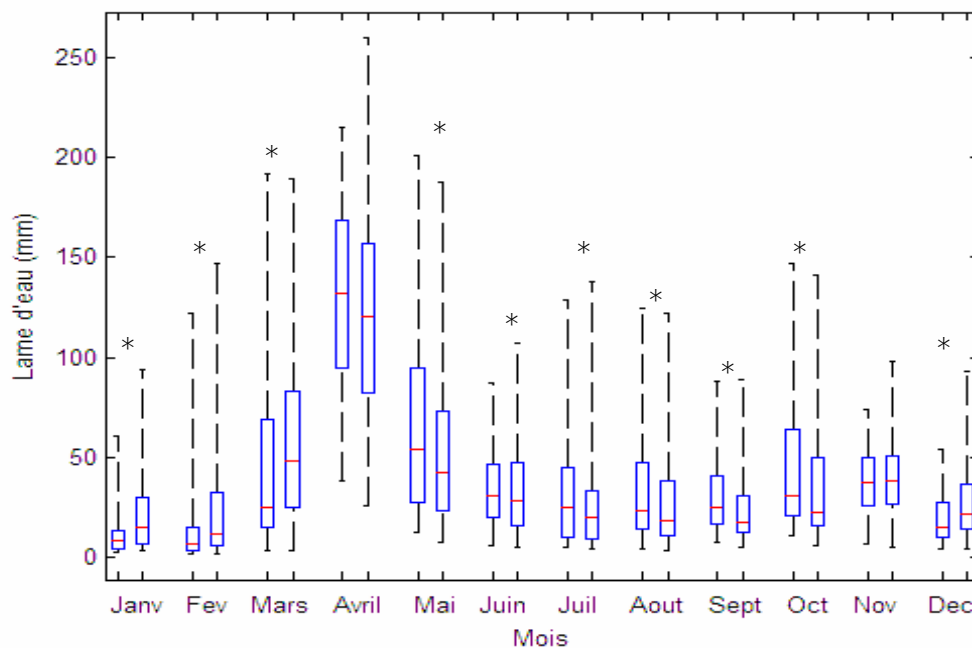


Figure 6.10 : Lame d'eau mensuelle simulée à l'exutoire de la Chaudière avec les données historiques (boîte de gauche) et avec les données futures issues de la méthode des Deltas (ensemble des sept MCG-SEM, boîte de droite). Les étoiles indiquent que la différence est statistiquement significative (t -test apparié, $p < 0.05$).

On peut aussi constater que l'augmentation de la lame d'eau en hiver est particulièrement prononcée pour le 3^e quartile, c'est-à-dire pour les années humides.

Il est intéressant de noter que l'effet est sensiblement le même à l'échelle des sous-bassins agricoles Beaurivage et Saint-Victor (voir section H.3.4 à l'ANNEXE H).

Concernant les débits de pointe et d'étiage, on obtient une diminution du débit de pointe printanier (de l'ordre de 6,6% pour l'ensemble des MCG-SEM, non statistiquement significatif), ainsi qu'une diminution du débit d'étiage estival, et ce quelque soit le MCG-SEM considéré (Tableau 6.3 ci-dessous).

Tableau 6.3 : Débit de pointe et d'étiage estival obtenu à l'exutoire du bassin versant avec les données historiques (référence) et effet relatif des différents MCG-SEM. Les étoiles indiquent un effet statistiquement significatif (t -test, $p < 0.05$).

	Débit de pointe printanier	Débit d'étiage estival		
		Q_{2-7}	Q_{10-7}	Q_{5-30}
Référence	1328 m ³ /s	11,5 m ³ /s	6,7 m ³ /s	14,8 m ³ /s
CGCM3_A2_1	-3,9%	-18,6%	-18,7%	-19,8%
CGCM3_B2_3	1,3%	-5,6%	-7,2%	-6,7%
HadCM3_A2a	-6,9%	-23,9%	-25,6%	-29,0%
HadCM3_A2b	6,6%	-17,6%	-17,6%	-18,3%
HadCM3_B2a	-5,9%	-10,0%	-14,3%	-14,1%
ECHAM4-A2	-16,3%*	-9,4%	-9,6%	-7,4%
ECHAM4-B2	-21,0%*	-9,1%	-10,7%	-9,2%

Toutefois, il convient d'être prudent concernant les débits de pointe et d'étiage obtenus avec la méthode des Deltas puisque cette méthode ne prend pas du tout en compte l'évolution de la fréquence des précipitations. La méthode du downscaling est sans doute mieux adaptée pour évaluer l'effet des CC sur ces composantes.

6.1.4.2 Méthode du Downscaling

Nous présentons ici une synthèse des principaux résultats obtenus. Des résultats et données plus détaillées sont présentés à l'ANNEXE I.

Comme indiqué précédemment, l'effet des CC sur le régime hydrologique ne peut être déterminé que de manière relative, en comparant les résultats des simulations réalisées à partir des données des MCG-SEM pour la période passée et la période future.

À l'échelle annuelle, on obtient une diminution de la lame d'eau moyenne de 3,9% qui n'est toutefois pas statistiquement significative (voir ANNEXE I).

Compte tenu du fait que le downscaling statistique permet d'utiliser des séries météorologiques journalières directement intégrées en tant que données d'entrée dans le modèle hydrologique, il est particulièrement intéressant d'étudier les résultats de débits à l'échelle journalière. La Figure 6.11 présente le débit moyen journalier obtenu à partir de HadCM3-A2a-RMSE et HadCM3-B2a-RMSE pour les périodes passée et future. Les autres simulations (h1 et h2) donnent des résultats similaires et sont présentées à l'ANNEXE I.

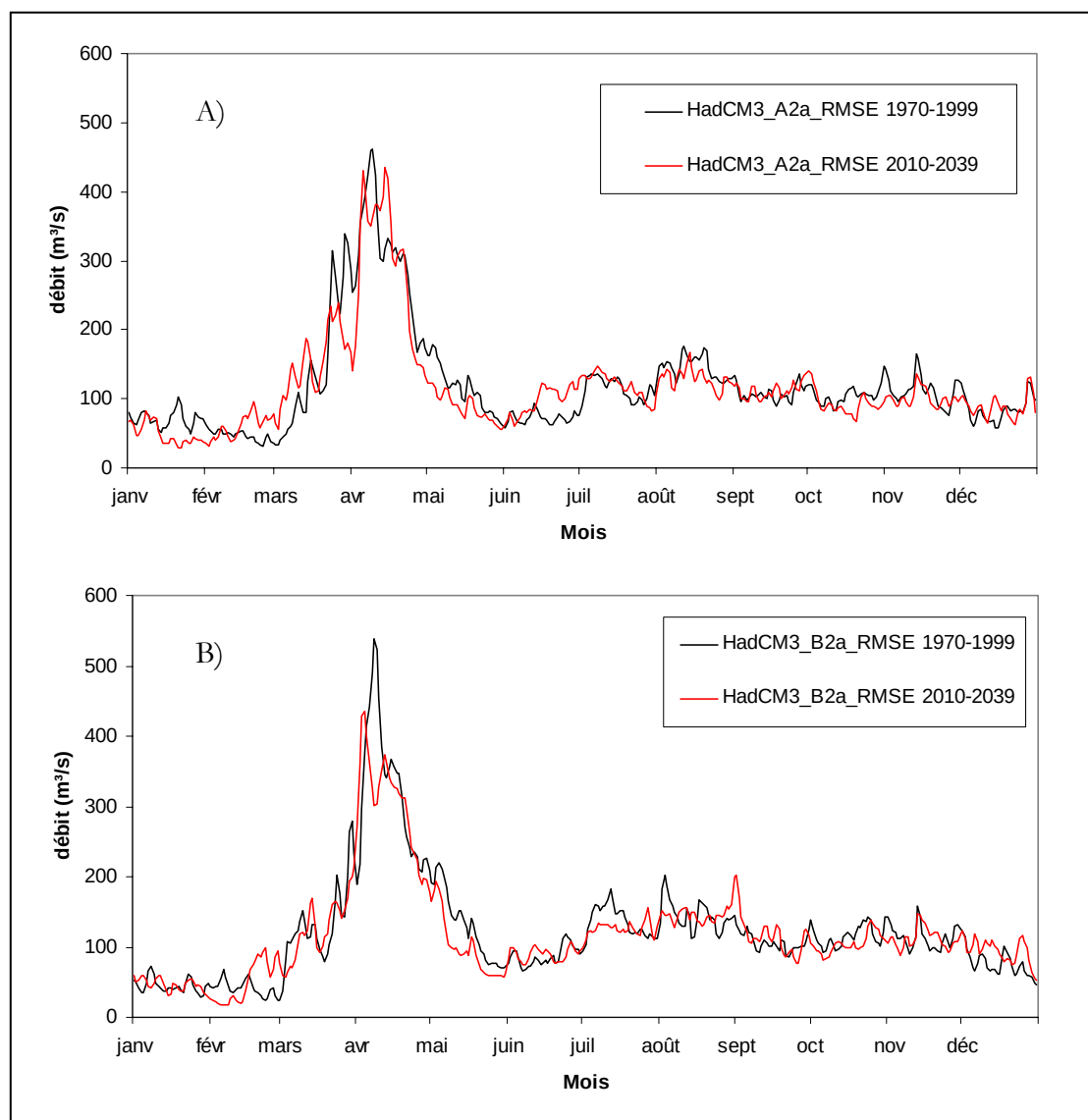


Figure 6.11 : Débit moyen journalier simulé à l'exutoire du bassin versant à partir des données de HadCM3_A2a_RMSE (A) et HadCM3_B2a_RMSE (B), pour la période future et la période de référence

On constate que l'effet des CC obtenu avec cette méthode à l'échelle journalière est loin d'être évident. Si on retrouve dans les deux cas (A2a et B2a) une diminution du débit de pointe printanier et une diminution du débit au mois de mai, le reste du temps, aucune tendance nette ne peut être identifiée. La diminution du débit de pointe printanier est confirmée par les résultats présentés au Tableau 6.4 ci-dessous.

Tableau 6.4 : Écart relatif entre les Q_{2-7} , Q_{10-7} et Q_{5-30} estivaux futures et passés.

HadCM3 SE	chronique	Débit de pointe printanier	Débit d'étiage		
			Q_{2-7}	Q_{10-7}	Q_{5-30}
A2a	RMSE	-1,5%	+31,3%	-7,4%	+10,1%
	h1	-1,0%	+30,7%	-20,0%	-11,8%
	h2	-3,8%	-11,4%	+9,6%	-5,9%
B2a	RMSE	-10,9% *	+5,6%	-2,5%	+17,6%
	h1	-10,5% *	+7,5%	+11,2%	+11,2%
	h2	-12,9% *	-0,7%	-2,6%	-0,7%
Moyenne générale		-6,8%	10,5%	-2,0%	3,4%

Pour les débits de pointe, * indique que la différence est significative (t -test apparié, $p < 0.05$)

On constate également que l'effet sur les débits d'étiage estivaux calculés avec l'analyse fréquentielle est très variable en fonction des chroniques utilisées (h1, h2 ou RMSE), du SEM considéré (A2a ou B2a) et du type de débit d'étiage considéré. Il semble que le Q_{2-7} augmenterait sensiblement, alors que pour le Q_{5-30} et le Q_{10-7} , il est impossible de tirer une tendance de ces résultats.

6.1.4.3 Méthode Mixte

Nous présentons ici une synthèse des principaux résultats obtenus. Des résultats et données plus détaillées sont présentés à l'ANNEXE J.

Pour l'analyse des résultats, on reprend ici la même approche que celle utilisée pour la méthode des Deltas. On constate sur la Figure 6.12 une diminution de la lame d'eau annuelle sur l'ensemble des trente années de simulation (les différentes chroniques issues du downscaling sont considérées ici équiprobables). En moyenne, on obtient une diminution de -8,4%, statistiquement significative (t -test apparié, $p < 0.001$).

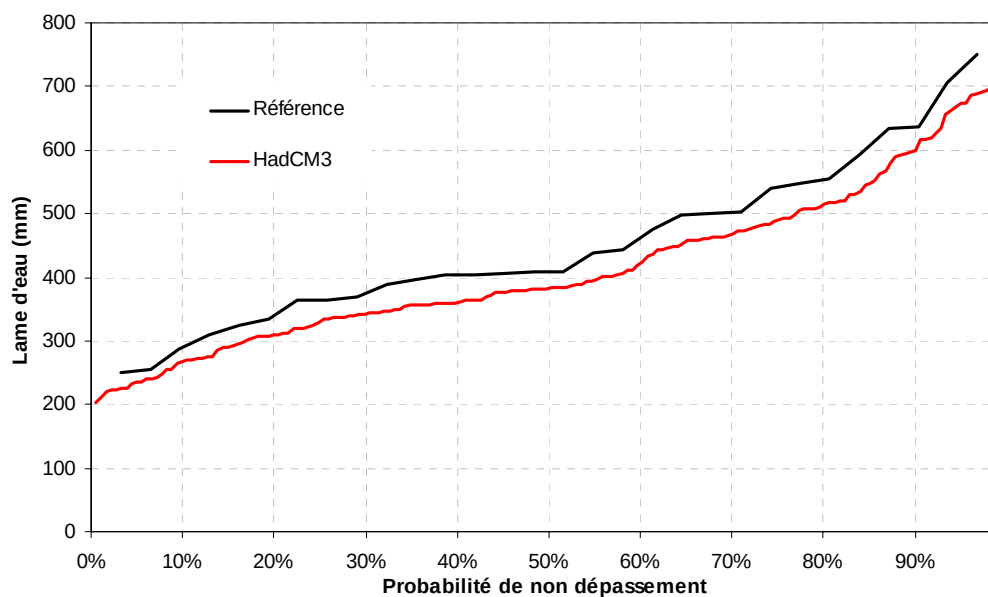


Figure 6.12 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire de la Chaudière selon les données historiques (référence) et l'ensemble des MCG-SEM considérés comme équiprobables (en rouge), à l'aide de la méthode Mixte

À l'échelle mensuelle (Figure 6.13), on constate une diminution de la lame d'eau à partir du mois de mai et jusqu'au mois octobre. En revanche, de novembre à avril, il n'y a pratiquement aucun effet des CC. De plus, on constate que l'effet est très faible sur les 1^{er} quartiles

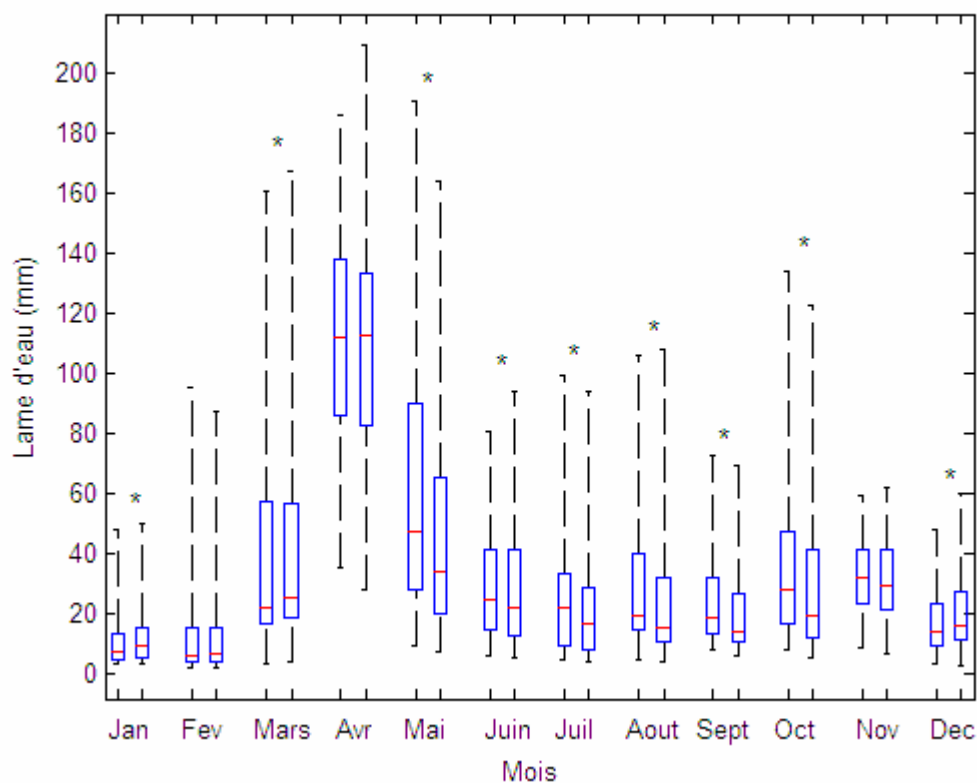


Figure 6.13 : Lame d'eau mensuelle simulée à l'exutoire de la Chaudière avec les données historiques (boîte de gauche) et avec les données futures issues de la méthode des Deltas (ensemble des six MCG-SEM, boîte de droite). Pour chaque box-plot, la ligne rouge indique la valeur médiane, les limites de la boîte indiquent les 1^{er} et 3^e quartiles, et les limites des barres indiquent les valeurs minimales et maximales. Les étoiles indiquent que la différence des moyennes est statistiquement significative (t -test apparié, $p < 0.05$).

6.1.4.4 Comparaison des trois méthodes

Les trois méthodes utilisées ont chacune des avantages et des inconvénients. Afin de permettre une meilleure interprétation des résultats, il est intéressant de comparer les résultats obtenus avec ces trois méthodes. Cela ne peut être réalisé que pour les données issues de HadCM3-A2a et HadCM3-B2a (seuls MCG-SEM utilisés dans les trois méthodes). Pour les méthodes du Downscaling et Mixte, la moyenne des trois chroniques (h1, h2 et RMSE) est utilisée pour cette comparaison. De plus, seul l'effet relatif des CC obtenu peut être comparé puisque la simulation de référence est différente entre la méthode du Downscaling et les deux autres méthodes.

Concernant l'effet sur la lame d'eau annuelle, on obtient dans chaque cas une légère diminution (Tableau 6.5). On constate que les méthodes des Deltas et du Downscaling aboutissent à des résultats similaires, excepté pour les années humides (quantile 75%). La méthode Mixte donne une diminution plus importante de la lame d'eau que les deux autres méthodes.

Tableau 6.5 : Écart relatif entre les lames d'eau futures et passées simulées à l'échelle annuelle à l'exutoire de la Chaudière selon les trois méthodes

	Deltas (7 MCG-SEM)	Deltas (HadCM3 A2a et B2a)	Downscaling (HadCM3 A2a et B2a)	Mixte (HadCM3 A2a et B2a)
Moyenne	-2,7%	-3,8%	-4%	-8,4%
Quantile 25	-5,2%	-4,1%	-4,9%	-8,9%
Médiane	-1,6%	-4,7%	-4,0%	-6,3%
Quantile 75	+0,6%	-1,1%	-4,3%	-7,9%

En revanche, on peut observer des différences assez importantes à l'échelle mensuelle (Figure 6.14). Ainsi, en avril avec HadCM3-A2a, l'effet sur la lame d'eau est respectivement de -13,2, -4,9 et +7,6 mm pour les méthodes Deltas, Downscaling et Mixte. Cette différence s'explique facilement pour les méthodes Deltas et Downscaling puisque les variables utilisées issues des MCG sont différentes (P , $T_{\min}$ et $T_{\max}$ pour la méthode des Deltas, et prédicteurs climatiques pour les méthodes basées sur le downscaling). En revanche, il est plus difficile d'expliquer la différence obtenue entre les méthodes Downscaling et Mixte puisque la seule différence consiste à utiliser un écart moyen mensuel plutôt que d'utiliser directement les données journalières. Cela est peut-être dû au fait que la Méthode Downscaling prend en compte l'occurrence des précipitations.

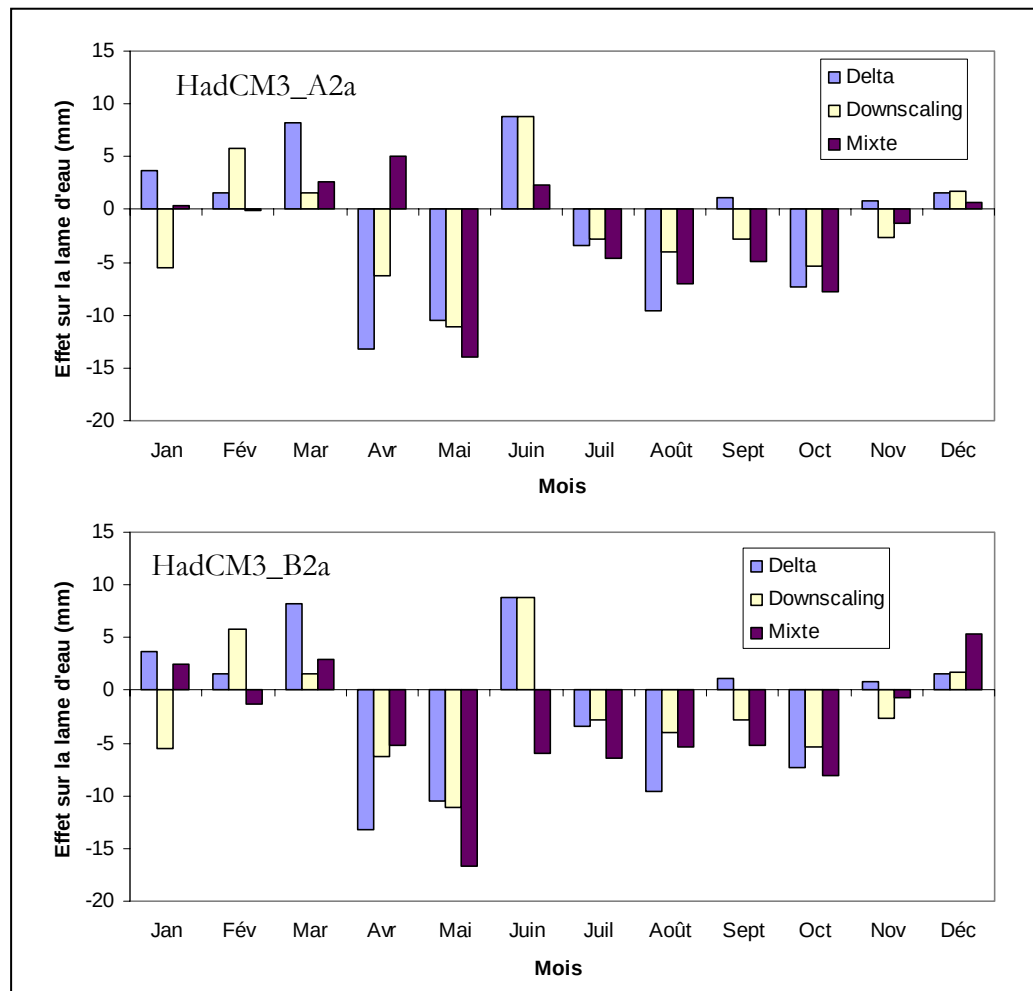


Figure 6.14 : Effet des CC sur la lame d'eau moyenne mensuelle obtenu avec les trois méthodes à partir des données de HadCM3_A2a et HadCM3_B2a

6.1.5 Résultats pour l'érosion

Les simulations de l'érosion ont été réalisées uniquement avec la méthode des Deltas afin d'estimer l'effet des CC sur la charge annuelle et mensuelle de sédiments. On peut voir sur la Figure 6.15 que les différents MCG-SEM produisent un effet très variable sur la charge annuelle. Contrairement à la lame d'eau annuelle, l'effet est amplifié pour les années à forte érosion. En considérant l'ensemble des MCG-SEM équiprobables, on obtient une diminution de la charge annuelle moyenne de 12,5% ($p < 0.001$), soit une diminution plus importante que pour la lame d'eau qui était de -2,7%.

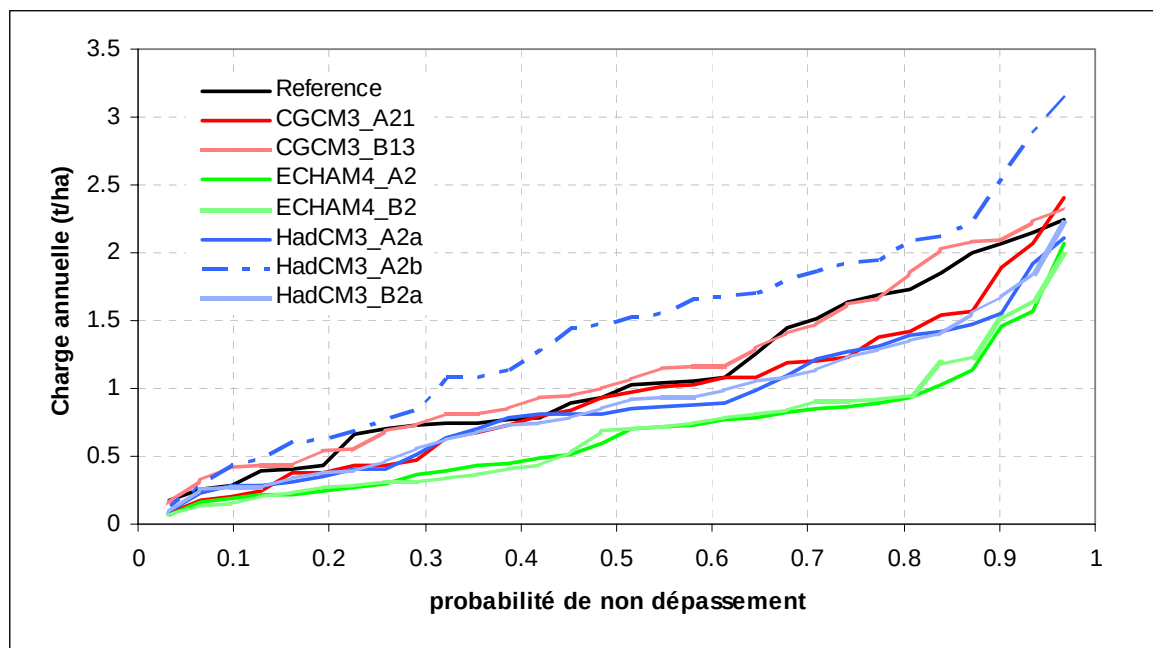


Figure 6.15 : Fréquence cumulée de la charge annuelle de sédiments simulée à l'exutoire de la Chaudière selon les données historiques (référence) et les données des MCG-SEM appliqués par la méthode des Deltas

À l'échelle mensuelle, on observe sur la Figure 6.16 que la baisse de la charge en sédiments se produirait surtout au printemps (avril et mai), ainsi qu'au mois d'août. Ceci est conforme à la réalité terrain. En effet, c'est le printemps qui est la période la plus active au niveau de l'érosion et c'est aussi à cette période de l'année que les lames d'eau subissaient une plus forte diminution selon la méthode des Deltas et ce lorsque tous les MCG-SEM étaient considérés équiprobables (voir Figure 6.10).

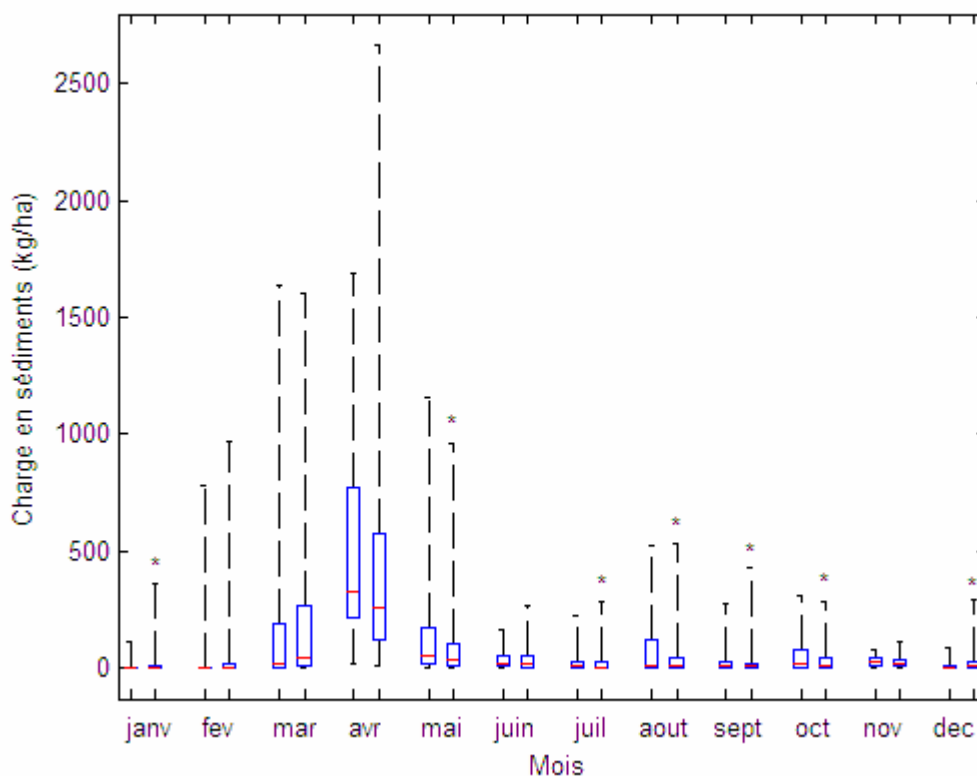


Figure 6.16 : Charge de sédiments mensuelle simulée à l'exutoire de la Chaudière avec les données historiques (boîte de gauche) et avec les données futures (en considérant tous les MCG-SEM comme équiprobables, boîte de droite). Pour chaque box-plot, la ligne rouge indique la valeur médiane, les limites des boîtes indiquent les 1^{er} et 3^e quartiles, et les limites des barres indiquent les valeurs minimales et maximales. Les étoiles indiquent que la différence des moyennes est statistiquement significative (t -test apparié, $p < 0.05$).

Il est également intéressant de constater que la variabilité de la charge en sédiments augmente sensiblement au mois d'avril. Ainsi la valeur maximale atteint 2665 kg/ha alors qu'elle n'est que de 1688 kg/ha pour la période de référence et que la valeur médiane diminue.

6.1.6 Résumé et discussion

La première conclusion de ce travail concerne la grande variabilité des résultats obtenus, selon le MCG, le SE, le membre de simulation et également selon la méthode employée. Compte tenu de cette variabilité, il est donc très difficile de conclure de manière précise à l'effet des CC sur le régime hydrique de la rivière Chaudière.

Toutefois, il convient de tenir compte des caractéristiques, avantages et inconvénients propres à chacune des méthodes utilisées afin d'interpréter les résultats de manière plus spécifique. Ainsi, nous avons décidé de nous baser en priorité sur la méthode des Deltas concernant l'effet sur la lame d'eau annuelle et mensuelle. En effet, la possibilité de tenir compte d'un ensemble de plusieurs MCG apporte une information très importante, tandis que, à cette échelle temporelle, le fait de ne pas prendre en compte l'occurrence journalière est jugé moins important. En revanche, concernant les débits d'étiage et de pointe, nous avons jugé préférable de nous fier à la méthode du Downscaling puisque l'occurrence des précipitations joue un rôle majeur dans ces processus.

Compte tenu de cette approche d'exploitation des résultats, on peut ressortir les tendances suivantes :

- (i) **La lame d'eau annuelle à l'exutoire du bassin devrait diminuer légèrement, de l'ordre de 5%.** La plupart des MCG, et les trois méthodes utilisées avec HadCM3 aboutissent à une diminution de la lame d'eau. Toutefois, il faut garder en mémoire que l'utilisation de certains MCG-SEM comme HadCM3_A2b aboutit au contraire à une augmentation de la lame d'eau. Ce résultat est consistant avec la plupart des études récentes sur l'effet des CC sur l'hydrologie dans la région d'intérêt (voir par exemple Mortsch *et al.*, 2000; Rousseau *et al.*, 2004). En revanche, d'autres études menées sur des bassins versants voisins prévoient au contraire une augmentation de la lame d'eau annuelle (Roy *et al.*, 2001; Dibike et Coulibaly, 2005).
- (ii) **À l'échelle saisonnière et mensuelle, il est difficile de conclure sur l'effet hivernal** puisque si la méthode des Deltas prévoit une augmentation de la lame d'eau avec tous les MCG, la méthode du Downscaling aboutit au contraire à une diminution de la lame d'eau. Les différentes méthodes utilisées semblent en revanche s'accorder sur le fait que la **diminution de la lame d'eau se produirait surtout à l'été et à l'automne.**
- (iii) **Le débit de pointe printanier tendrait à diminuer** (de l'ordre de 7%). Toutefois, cela se base sur les données de HadCM3_A2a et HadCM3_B2a. Si d'autres MCG plus « humides » avaient pu être utilisées avec la méthode du Downscaling, cela aurait sans doute donné des résultats opposés.
- (iv) **Il est impossible de tirer une conclusion concernant les débits d'étiage** compte tenu de la variabilité des résultats.
- (v) **La charge annuelle de sédiments diminuerait de l'ordre de 12%.** Toutefois, cette estimation n'est basée que sur l'utilisation d'une seule méthode (Deltas). Cette diminution se produirait surtout **au printemps et en été.**

Il convient de souligner la grande incertitude liée à ces résultats, due notamment aux limites conceptuelles liées aux méthodes utilisées. Dans les trois cas, on réalise une grande simplification des cycles hydrologiques et énergétiques, négligeant les nombreuses interactions entre le climat et l'hydrologie. De plus, les événements extrêmes ne sont pas pris en compte (méthode des Deltas) ou de manière imprécise (méthode du Downscaling). Or, ce sont ces événements extrêmes qui sont le plus susceptibles de conditionner l'effet des CC sur les débits de pointe, les étiages, et l'érosion. L'utilisation des MRC pourrait être envisagée pour préciser ce point, mais le problème de l'horizon considéré se pose alors (les MRC ne permettent pas à l'heure actuelle de prévoir les CC avant l'horizon 2050).

Cette première approche considèrerait que le bassin versant n'évolue pas entre la période de référence et la période future. Or, on a montré au Chapitre 5 que l'occupation du sol a une influence déterminante sur le régime hydrologique du bassin versant. Il convient donc de prendre en compte cette évolution pour une évaluation plus réaliste du comportement hydrologique futur du bassin versant et des possibilités d'adaptation.

6.2 EFFET DE SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL

6.2.1 Élaboration des scénarios d'occupation du sol

La conceptualisation des scénarios d'occupation du sol est *a priori* limitée par les classes paramétrables par le système GIBSI. Les scénarios élaborés doivent néanmoins incarner des choix de gestion du territoire et des pratiques agricoles ayant un impact macroscopique sur l'occupation du sol. L'élaboration de ces canevas constitue une étape nécessaire afin de justifier les hypothèses réductrices qui en découlent et ainsi, les spécificités propres à chaque scénario. Deux scénarios sont *a priori* considérés :

Scénario A- Un scénario dit « productiviste » : l'aménagement du territoire est guidé par des préceptes de rentabilité économique; la croissance de la production porcine constitue le facteur prioritaire de l'évolution de l'occupation du sol.

Scénario B- Un scénario dit « rustique » : l'aménagement du territoire tente de recréer l'état du bassin antérieur à l'établissement de la production agricole intensive; ces conditions sont

supposées plus intègres d'un point de vue écologique; la reforestation, la réduction et la dispersion de l'activité agricole constituent les facteurs prioritaires.

Il est clair que nombre d'hypothèses posées dans le cadre de l'élaboration des scénarios peuvent faire l'objet de remises en question. Toutefois, l'objectif visé par ce travail n'est pas de prédire l'occupation du sol sur le bassin de la Chaudière en 2025, mais plutôt d'incarner différentes voies envisageables de l'aménagement du territoire en se basant sur l'observation de l'évolution passée des différentes classes d'occupation du sol. Dans ce contexte, il faut constamment se référer au contexte macroscopique des modifications apportées ainsi qu'au caractère tendanciel de l'analyse des simulations climatiques à effectuer. Les résultats obtenus n'auront donc pas de valeurs quantitatives proprement dit, mais présenteront plutôt un portrait comparatif par rapport à un état de référence. Dans le cadre de cette étude, l'état de référence correspond au scénario offert par défaut dans GIBSI, nommé « scénario permanent ». Ce dernier fait référence à une carte d'occupation du sol déterminée à partir d'images satellites de 1995 et validée à l'aide de données de recensement datant de 1994.

La procédure de détermination, de quantification et d'implantation dans GIBSI de ces deux scénarios est décrite à l'ANNEXE H, tirée du rapport de Ricard *et al.* (2006).

6.2.2 Simulations avec GIBSI

Compte tenu de la durée des simulations, il était impossible de reproduire l'ensemble des simulations réalisées dans la section 6.1 (avec les trois méthodes et l'ensemble des MCG-SEM utilisées). Nous avons donc choisi de sélectionner les méthodes suivantes :

- (i) La méthode des Deltas pour l'effet sur les lames d'eau et charges en sédiments à l'échelle annuelle et mensuelle. Seuls les deux MCG-SEM « extrêmes » ont été utilisés, soit HadCM3_A2b (le plus humide) et ECHAM4_A2 (le plus sec).
- (ii) La méthode du Downscaling pour l'effet sur le débit journalier, le débit de pointe et les débits d'étiage. Seule la chronique « RMSE » a été utilisée.

Ici encore, les simulations sont réalisées sur les périodes 1970-1999 et 2010-2039, chaque année étant simulée de manière indépendante.

6.2.3 Résultats

Seuls les principaux résultats sont présentés ici. Pour plus de détails, le lecteur est invité à consulter l'ANNEXE L ainsi que l'article de Quilbé *et al.* (2007) présenté à l'ANNEXE M.

6.2.3.1 Effet sur la lame d'eau annuelle

La Figure 6.17 permet de comparer la fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée sur la période future (2010-2039) en prenant les deux scénarios d'évolution de l'occupation du sol par rapport à l'occupation de référence. Que ce soit avec HadCM3-A2b ou ECHAM4-A2, on constate que le scénario A engendre une augmentation de la lame d'eau sur l'ensemble des 30 années de simulation (en moyenne +12,2% et +15% respectivement pour HadCM3-A2b et ECHAM4-A2), tandis que le scénario B engendre une diminution de cette lame d'eau annuelle (en moyenne -6,7% et 7,7% respectivement pour HadCM3-A2b ou ECHAM4-A2). Ainsi, si l'on considère les deux MCG-SEM comme équiprobables, le scénario A engendre une augmentation de 13,6% de la lame d'eau annuelle moyenne et le scénario B une diminution de -7,2%. L'effet est statistiquement significatif ($p < 0.001$) dans chaque cas.

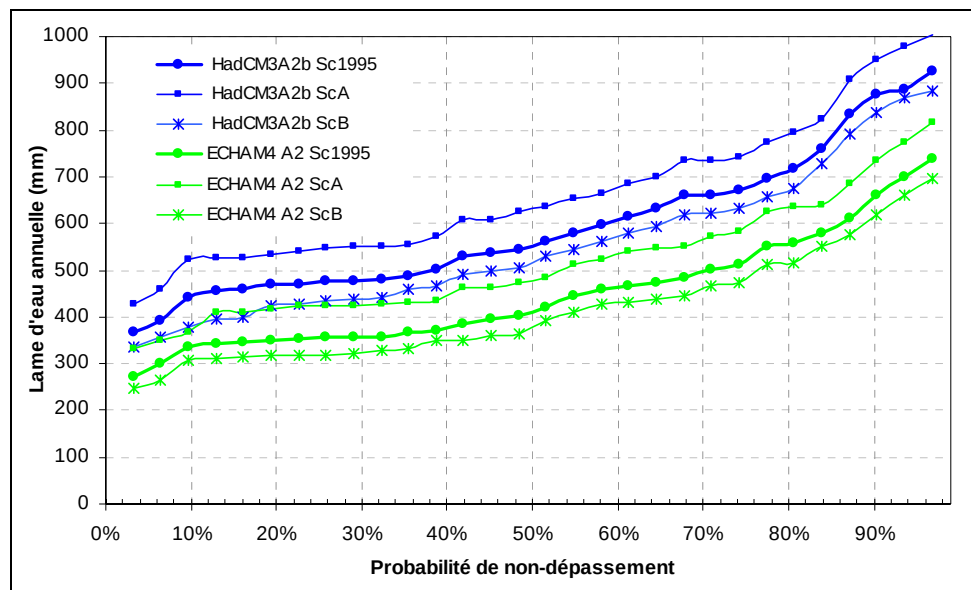


Figure 6.17 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée avec HadCM3_A2b (en bleu) et ECHAM4 (en vert) et l'occupation du sol de référence (trait gras, points ronds), le scénario A (carrés) et le scénario B (étoiles)

6.2.3.2 Effet sur les lames d'eau mensuelles

À l'échelle mensuelle (Figure 6.18), on constate que les scénarios d'évolution de l'occupation du sol ont un effet significatif sur l'ensemble de l'année (excepté en avril pour le scénario B). On retrouve la même tendance qu'à l'échelle annuelle avec une augmentation de la lame d'eau pour le scénario A et une diminution pour le scénario B. Toutefois, cette effet reste très faible jusqu'au mois d'avril et est beaucoup plus important durant l'été et l'automne (pour plus de détails, voir l'ANNEXE I).

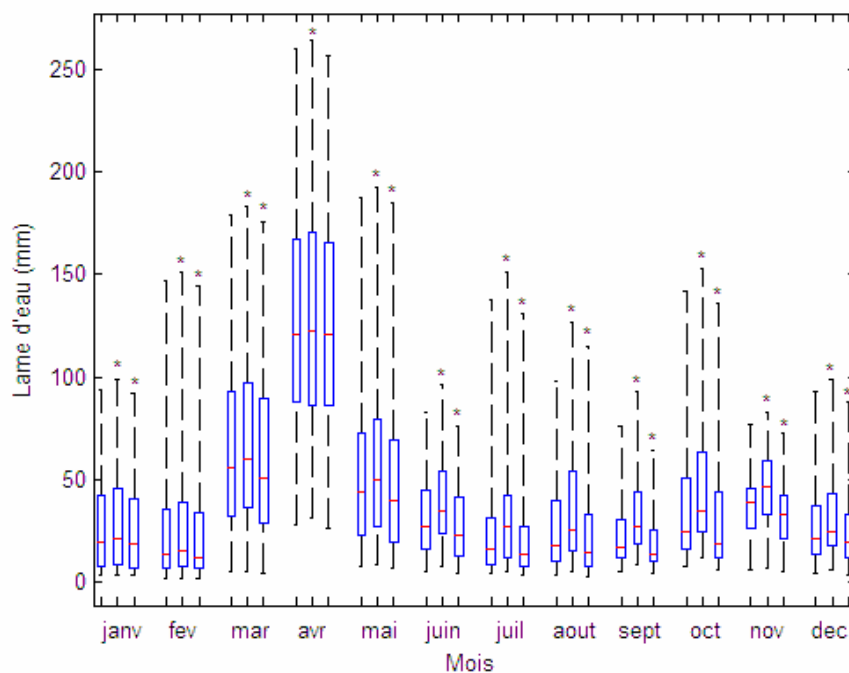


Figure 6.18 : Lame d'eau mensuelle simulée avec la méthode des Deltas en considérant les deux MCG-SEM utilisés (HadCM3-A2b et ECHAM4-A2) comme équiprobables, et avec l'occupation du sol de référence (boîte de gauche), le scénario A (boîte du centre) et le scénario B (boîte de droite). Les étoiles indiquent un effet statistiquement significative ($p < 0.05$) par rapport au scénario de référence

6.2.3.3 Effet sur le débit journalier

Les résultats obtenus avec la méthode du Downscaling sont présentés sur la Figure 6.19. On retrouve ici encore la même tendance que précédemment : l'effet des scénarios A et B n'est perceptible qu'à partir du mois de juin et jusqu'au mois de novembre avec une légère augmentation du débit pour le scénario A et une légère diminution pour le scénario B.

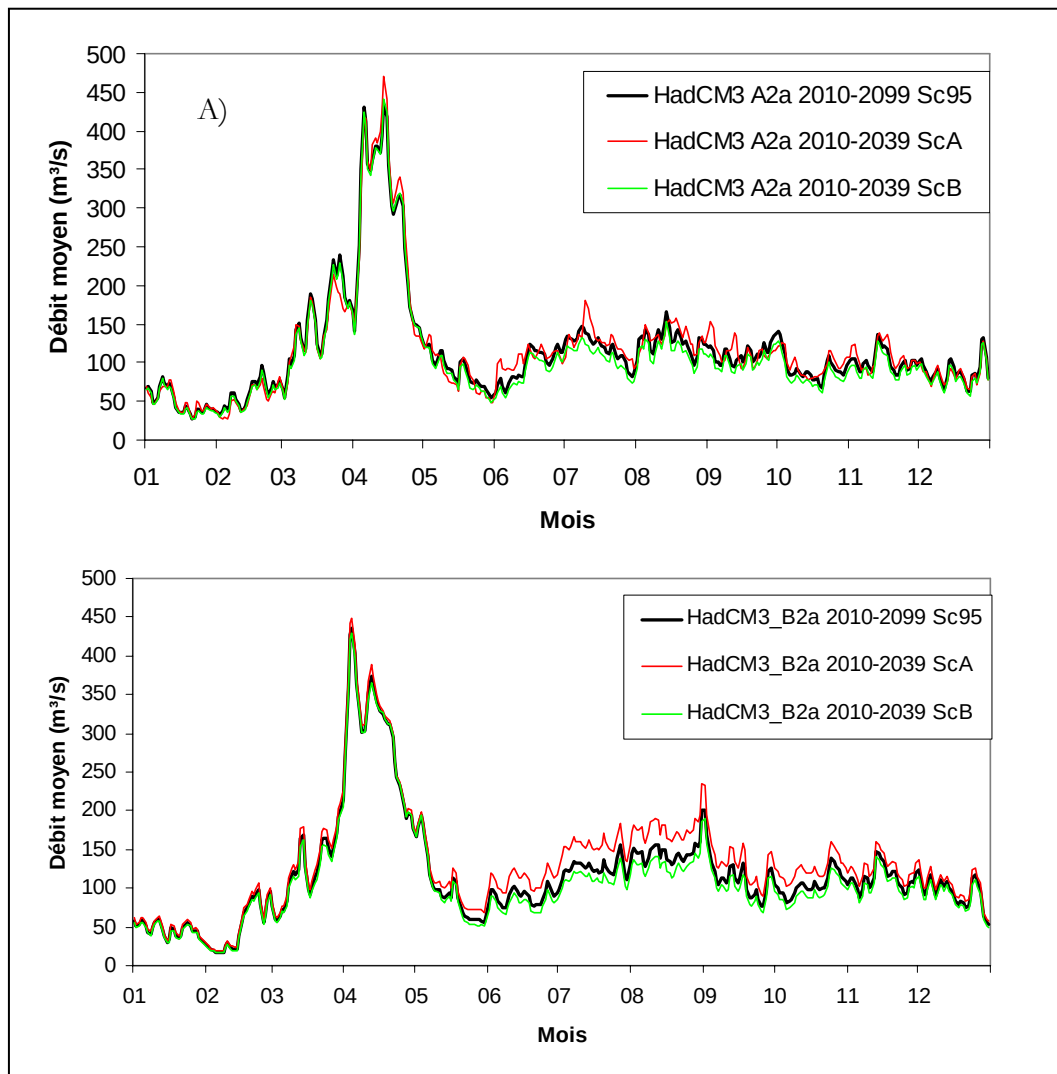


Figure 6.19 : Débit journalier moyen simulé à partir des scénarios d'occupation du sol de référence (Sc95), A et B, avec les données issues de HadCM3_A2a (A) et HadCM3_B2a (B)

6.2.3.4 Effet sur les débits d'étiage estivaux

Lest observations précédentes se retrouvent avec les débits d'étiage estivaux : nette augmentation avec le scénario A et légère diminution avec le scénario B. On peut constater sur la Figure 6.20 que le fait de considérer les scénarios A et B engendre un effet plus important sur les débits d'étiage par rapport à l'occupation du sol de référence que celui du CC par rapport à la période de référence.

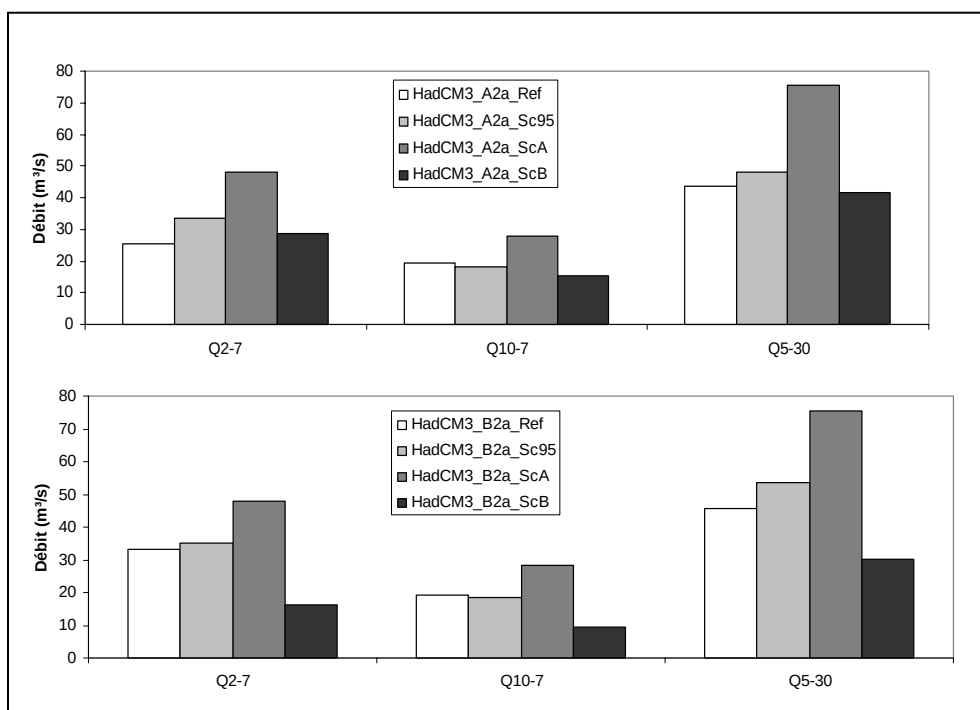


Figure 6.20 : Débits d'étiage obtenus pour la période de référence (ref) et pour la période future avec l'occupation du sol de référence (Sc95) et avec les deux scénarios A et B

6.2.3.5 Effet sur la charge en sédiments

Concernant l'érosion, la charge annuelle moyenne augmente avec le scénario A (+15,9% et +7,6% respectivement pour HadCM3-A2b et ECHAM4-B2) et diminue avec le scénario B (-5,3% et -4,2% respectivement). L'effet est dans chaque cas statistiquement significatif ($p < 0.001$). Si on considère les deux MCG-SEM comme étant équiprobables, on obtient une augmentation de la lame d'eau annuelle moyenne de +11,7% et de -4,8% respectivement pour les scénarios A et B. L'effet est donc moins important (en valeur relative) que pour la lame d'eau annuelle (+13,6% et -7,2% respectivement).

À l'échelle mensuelle, on constate sur la Figure 6.21 que le scénario A engendre une augmentation de la charge en sédiments qui est statistiquement significative ($p < 0.05$) tout au long de l'année. L'effet relatif est particulièrement important durant l'été. À l'inverse, le scénario B engendre une diminution de la charge en sédiments tout au long de l'année, excepté au mois d'avril.

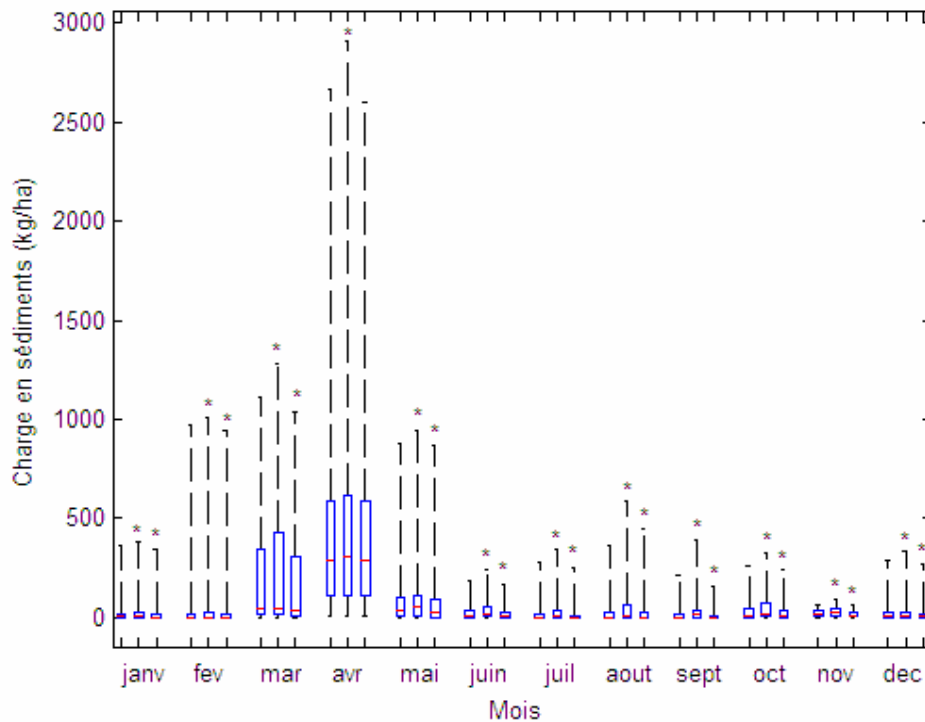


Figure 6.21 : Charges mensuelles en sédiments obtenus avec la méthode des Deltas en considérant les deux MCG-SEM utilisés (HadCM3-A2a et ECHAM4-A2) comme équiprobables, avec l'occupation du sol de référence (boîte de gauche) et les scénarios A (boîte du centre) et B (boîte de droite). Les étoiles indiquent un effet statistiquement significatif ($p < 0.05$) par rapport au scénario de référence

6.2.4 Discussion

Comme nous l'avons vu au Chapitre 5.3, l'occupation du territoire a une influence très marquée sur le régime hydrologique du bassin versant, la superficie agricole étant directement et étroitement corrélée avec la lame d'eau à l'exutoire. Dans un contexte de CC, la forte augmentation des lames d'eau et charges en sédiments à l'échelle annuelle et plus particulièrement durant l'été, obtenue lorsque l'on considère le scénario A par rapport au scénario de référence (occupation du sol de 1995) s'explique donc aisément par l'augmentation de l'occupation agricole du territoire. À l'opposé, il n'est pas surprenant que le scénario B, plus rustique et qui prévoit une légère diminution et une répartition plus homogène de la superficie agricole, engendre une diminution de la lame d'eau, des débits d'étiage et de l'érosion.

Au final, il semble donc que le scénario A aurait un effet contraire au CC tandis que le scénario B accentuerait l'effet des CC, c'est-à-dire une diminution du ruissellement et de la lame d'eau à

l'exutoire du bassin versant durant l'été et l'automne. Il est important de rappeler qu'il ne s'agit pas de scénarios d'adaptation au CC mais bien de scénarios possibles d'évolution future de l'occupation du sol compte tenu de l'évolution historique.

Avant d'interpréter ces résultats sous l'angle de l'adaptation au CC, il convient de déterminer quels sont les effets positifs et les effets négatifs en regard des différents usages de l'eau sur le bassin versant. En effet, la diminution de l'érosion qui accompagne cette baisse du ruissellement est une bonne chose du point de vue de la qualité de l'eau. Ainsi, le scénario A constituerait dans le premier cas une meilleure adaptation puisqu'il permettrait d'atténuer la diminution, voire d'augmenter les débits, mais le scénario B serait souhaitable dans le second cas. Ce travail ne constitue donc qu'une étape préliminaire, mais nécessaire, à l'élaboration de stratégies plus élaborées de gestion régionale des pratiques agricoles et de l'occupation du territoire, stratégies dont le potentiel d'adaptabilité pourra éventuellement être évalué à l'aide du système de modélisation GIBSI.

Il est également important d'être prudent dans l'interprétation de ces résultats, en gardant en mémoire qu'une incertitude importante est liée aux méthodes et aux hypothèses utilisées pour déterminer les séquences météorologiques futures. Par exemple, on a vu que l'utilisation de différentes méthodes et de différents jeux de données (les MCG-SEM) conduisent à une grande variété de résultats, certains étant parfois contradictoires. De plus, les événements pluviométriques extrêmes sont mal ou pas du tout pris en compte. Or, on sait que ce sont des processus déterminants dans l'évolution des débits de pointe et d'étiage, et qu'ils vont donc conditionner en grande partie les stratégies d'adaptation aux CC. Par ailleurs, certains processus ne sont pas pris en compte dans l'influence des CC sur le bilan hydrologique à l'échelle du bassin versant, telle que l'augmentation probable de l'irrigation due à l'augmentation de la température.

Les travaux futurs pourraient consister à quantifier l'incertitude liée aux méthodes utilisées dans cette étude. Il s'agirait également d'estimer l'effet des CC et de l'occupation du sol sur la qualité de l'eau en utilisant les modèles de transport de polluants de GIBSI. Il pourrait également être intéressant d'utiliser des méthodes plus sophistiquées telles que les MCR pour déterminer les séquences météorologiques futures. Il s'agira alors d'évaluer l'effet des CC à long terme (2050) ce qui pose le problème de devoir également définir des scénarios réalistes d'évolution de l'occupation du sol à long terme. Or, cela est difficilement réalisable compte tenu des multiples facteurs socio-économiques imprévisibles qui sont susceptibles d'influencer l'agriculture dans les prochaines années. Finalement, il serait intéressant d'organiser une concertation avec les différents acteurs et usagers du bassin versant de la rivière Chaudière afin de déterminer quels sont les usages à privilégier dans un contexte de CC compte tenu de

L'évolution attendue du régime hydrologique du bassin, et ainsi d'orienter l'évolution future de l'occupation du territoire pour une adaptation raisonnée et durable au CC.

6.3 RÉSUMÉ

Les principales conclusions de cette partie de l'étude sont les suivantes :

- Une importante incertitude est liée aux résultats compte tenu des méthodes utilisées et des hypothèses réalisées.
- Dans un contexte de CC, la lame d'eau annuelle à l'exutoire du bassin devrait diminuer légèrement dans un contexte de CC, de l'ordre de 5%. Cette diminution se produirait surtout durant l'été et l'automne. La lame d'eau pourrait augmenter en hiver du fait de l'augmentation de la température.
- Le débit de pointe printanier tendrait à diminuer, tandis qu'il est impossible de tirer une conclusion concernant les débits d'étiage
- La charge annuelle de sédiments diminuerait de l'ordre de 12%
- Un scénario d'occupation du sol « productiviste » engendrerait une forte augmentation de la lame d'eau en été et en automne, une augmentation des débits d'étiage et une augmentation de l'érosion. Cela représenterait donc une atténuation, voire une inversion de l'effet des CC.
- Un scénario d'occupation du sol « rustique » engendrerait une diminution de la lame d'eau en été et en automne, une diminution des débits d'étiage et une diminution de l'érosion. Cela accentuerait donc l'effet des CC.

7 MESURES PAR SIMULATIONS DE PLUIES DU RUISSELLEMENT ET DE L'ÉROSION HYDRIQUE EN PARCELLES DE GRANDE CULTURE

Cette partie de l'étude a été réalisée par l'IRDA. Ce chapitre est tiré du rapport de Duchemin et de Ladurantaye (2007).

Au cours des dernières décennies, le climat mondial s'est réchauffé : la température moyenne à la surface de la terre a augmenté de 0,3 à 0,6 °C environ depuis la fin du XIX^{ème} siècle (Canada, 2002). Cette tendance vers un réchauffement planétaire (*global warming*) impliquera de nombreux changements concernant le type et la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes (Shaver *et al.*, 2000; McBean *et al.*, 2001). Les analyses climatiques indiquent une augmentation des précipitations annuelles qui serait attribuable à une plus grande fréquence des orages intenses (Groisman *et al.*, 2004). Selon les modèles climatiques actuels, cette tendance se poursuivra durant le 21^{ème} siècle (Nearing, 2001; Pruski et Nearing, 2002a). L'intensité des pluies résultant des CC s'avère donc un paramètre important en agroenvironnement car l'effet combiné des pluies et du ruissellement détermine, en partie, l'importance de l'érosion hydrique des sols agricoles (Duchemin *et al.*, 2004).

L'agriculture intensive est une source de dégradation des ressources sol et eau (Troeh *et al.*, 2004). L'érosion hydrique constitue un processus de dégradation des sols qui affecte plusieurs terres agricoles du Québec. Les sols dégradés voient leur productivité réduite, alors que les eaux reçoivent des apports accrus de matières en suspension, de nutriments (N et P), de pesticides et de pathogènes. Sous l'influence des CC, la dégradation des sols, l'érosion hydrique et la perte de productivité pourraient devenir problématiques pour certaines régions (Nearing *et al.*, 2004). Les gestionnaires préoccupés par la conservation des sols et des eaux sont d'ailleurs préoccupés par l'impact des CC (Schneider *et al.*, 2000).

Le réchauffement climatique nécessitera une adaptation des pratiques agricoles à l'échelle régionale. Au Québec, aucune étude n'a été menée concernant l'impact des précipitations intenses sur le ruissellement et l'érosion provenant de grandes cultures. C'est dans ce contexte des CC que s'inscrit cette partie du projet. La technique retenue pour « modéliser » l'impact des précipitations sur l'érosion hydrique des sols agricoles consistait à recourir à un simulateur de pluies (Nolan *et al.*, 1997). La façon de procéder visait à reproduire différentes intensités de pluie à l'aide d'un simulateur disposé au-dessus de parcelles en grandes cultures représentatives de la région (orge, soya) et à y mesurer le ruissellement et les pertes de sol. De cette façon, il

devient possible de comparer, d'une façon concrète, le ruissellement et l'érosion hydrique pour différentes cultures soumises à différentes intensités des pluies.

Les objectifs spécifiques de cette partie du projet était de : 1) calibrer un simulateur de pluie afin de produire différentes intensités de pluies; 2) mesurer le ruissellement et l'érosion résultant de simulations de pluies effectuées sur des parcelles en grandes cultures ; 3) établir un lien entre les précipitations simulées et les précipitations régionales.

7.1 MÉTHODE

7.1.1 Localisation du site expérimental

Cette étude a été effectuée à la Ferme expérimentale de l'IRDA située à Saint-Lambert-de-Lauzon, à environ 30 km au sud de la ville de Québec (Figure 7.1).

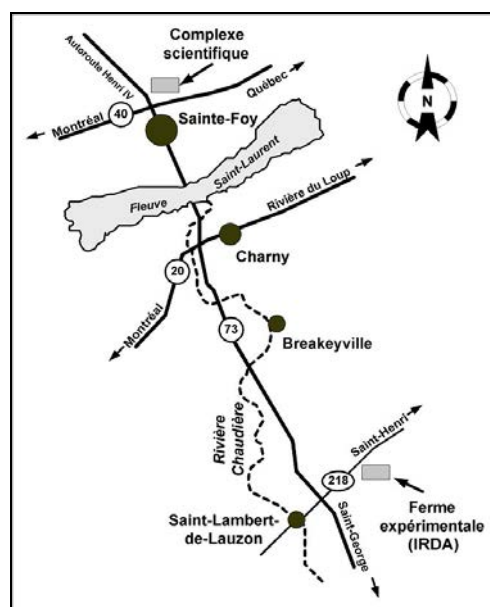


Figure 7.1 : Localisation du site expérimental.

Le site expérimental se compose de 6 parcelles de 3 m de largeur par 6 m de longueur réparties en trois blocs de deux parcelles (Figure 7.2).

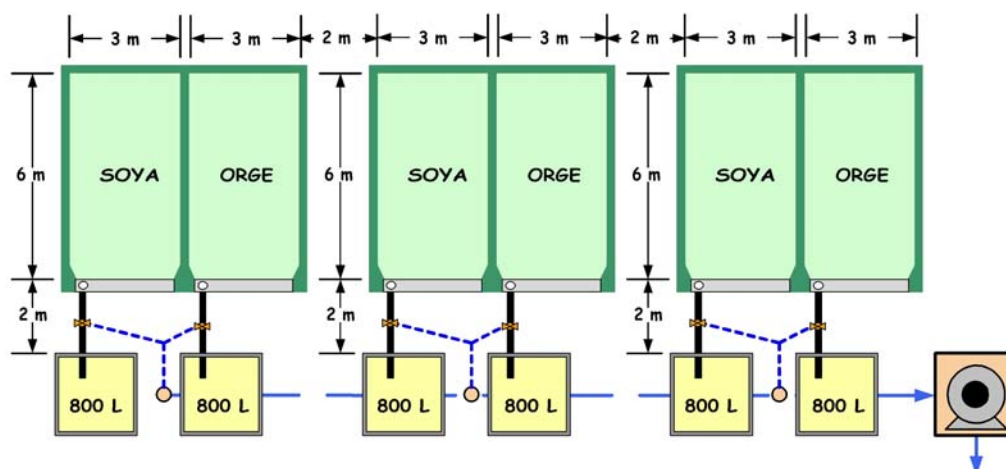


Figure 7.2 : Dispositif expérimental

En 2006, des cultures d'orge (*Hordeum vulgare*) et de soja (*Glycine max*) ont été établies sur les parcelles (Figure 7.3).



Figure 7.3 : Bloc formé de parcelles de soja et d'orge

Ces cultures reposent sur un sol dont la texture moyenne correspond à un loam argileux (26% sable; 48% limon; 27% argile) avec une pente moyenne de 3,1%. Chaque parcelle est munie d'un capteur d'eau de ruissellement dans sa partie aval. Un système de canalisation relie les capteurs à des réservoirs de 800 litres enfouis dans le sol. Les volumes d'eau ruisselée et les pertes de sols ont été mesurés dans ces réservoirs. Duchemin et Dufour (2005) donnent une

description détaillée du dispositif expérimental utilisé pour mesurer le ruissellement et l'érosion hydrique par simulations de pluies. Cette description est présentée à l'ANNEXE M.

7.1.2 Étalonnage du simulateur de pluie

Cette étape du projet consistait à produire des événements pluvieux à l'aide d'un simulateur de pluie à intensités variables construit par l'IRDA (Dufour et Duchemin 2005; De Ladurantaye et Duchemin 2006, voir l'ANNEXE M). L'activité consistait à calibrer les six buses d'aspersion du simulateur (*Bete Fog Nozzle inc.; MP156M, 3/8 po., 90°*) afin qu'elles produisent un débit de 5,7 L/min à une pression de 56 kPa. Selon Michaud (1987), ce type de buses fournit une distribution de gouttes de pluies similaire aux précipitations naturelles avec des diamètres D_{10} , D_{50} et D_{90} respectifs de 1,03 mm, 2,06 mm et 3,47 mm lorsque le simulateur est situé à une hauteur de 2,15 m. L'énergie cinétique produite par les gouttes d'eau atteint alors 0,201 MJ ha⁻¹ mm⁻¹. Une valve située à l'aval des buses et des manomètres permet l'ajustement du débit (Figure 7.4).

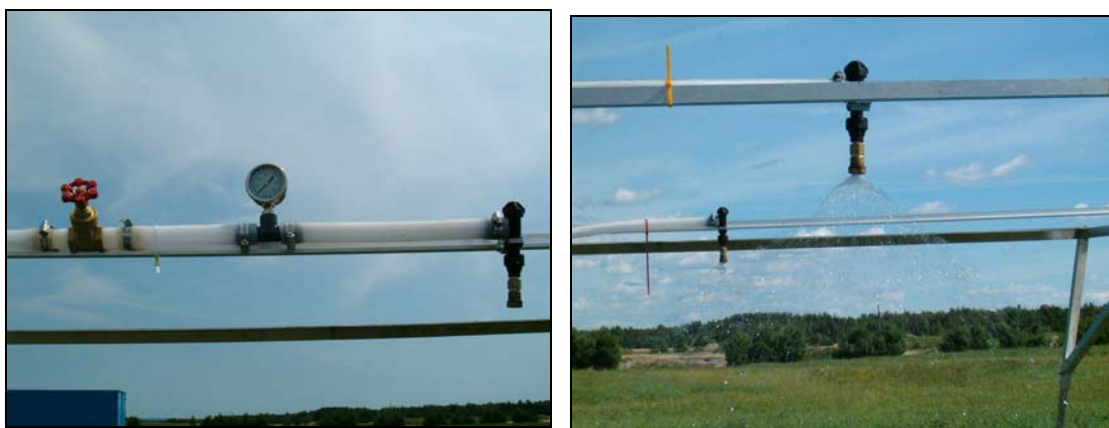


Figure 7.4 : Composantes du système d'ajustement du débit des buses

Une chaudière était placée au-dessous de chaque buse pendant 15 secondes et le volume d'eau recueilli était mesuré à l'aide d'un cylindre gradué d'un litre. Le volume d'eau était ensuite multiplié par quatre pour obtenir un débit en L/min. La lecture des manomètres placés entre la buse et la valve était notée afin de connaître la pression (psi) pour laquelle le débit désiré était obtenu. Toutefois, les manomètres étaient peu précis et donnaient des lectures de pressions différentes pour un même débit. Les ajustements manuels, par essais et erreurs, pouvaient durer jusqu'à 30 minutes par répétition afin d'atteindre le débit désiré de 5,7 L/min. Tous les essais ont été effectués en dehors des parcelles afin de préserver le plus possible la condition naturelle des sols.

Les tests nécessaires à l'obtention de l'intensité moyenne des pluies sur les parcelles pour un débit de 5,7 L/min se sont échelonnés sur une période de deux semaines. Pour ce faire, 121 pots de 8 cm de diamètre par 10 cm de hauteur étaient disposés au sol, sous le simulateur de pluie, selon une grille d'environ 5,5 m x 6 m avec un espacement vertical de 55 cm et horizontal de 60 cm entre chaque pot (Figure 7.5). Cet arrangement spatial représente les dimensions de deux parcelles adjacentes, séparées par un billon engazonné (*i.e.* le simulateur couvre deux parcelles à la fois). Ensuite, le simulateur de pluie fonctionnait pendant une période de 15 minutes, à un débit constant de 5,7 L/min. À la fin de cette période, la hauteur d'eau (mm) était mesurée dans chaque pot à l'aide d'une règle graduée en millimètres (Figure 7.6). Ces hauteurs étaient multipliées par quatre pour obtenir des intensités de pluie en mm/h.

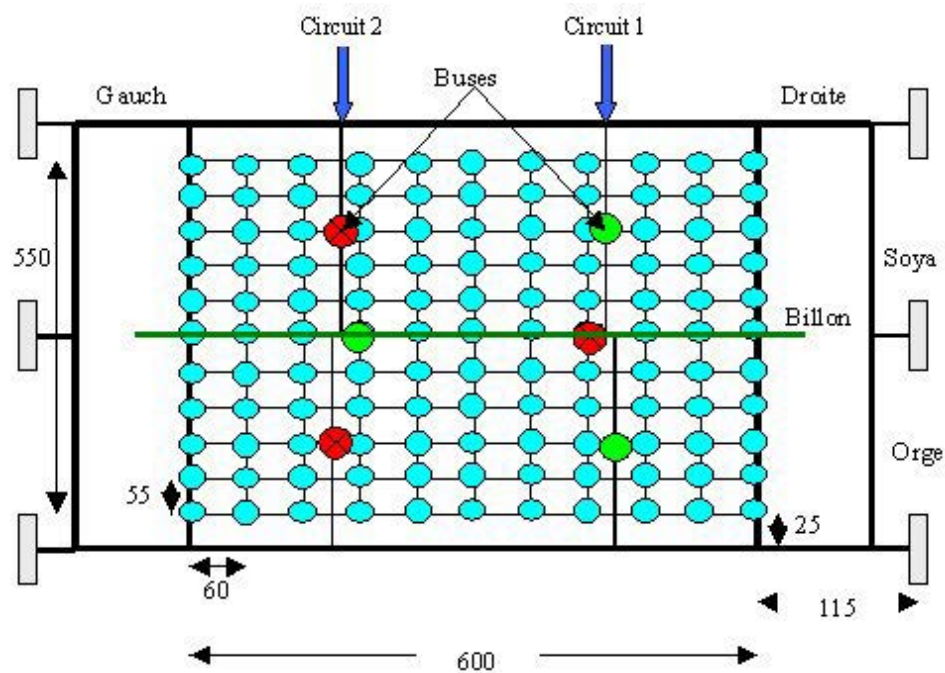


Figure 7.5 : Schéma indiquant le positionnement des pots pour les tests d'intensités



Figure 7.6 : Test d'intensité de pluie et mesure des hauteurs d'eau.

Par la suite, la moyenne des 121 pots était calculée afin de connaître l'intensité moyenne de la pluie sur la superficie couverte par le simulateur. De plus, les intensités de pluie ont également été mesurées à l'aide de deux pluviomètres placés au sol.

L'indice d'uniformité (U_c) de Christiansen (1941) a été calculé pour les deux tests d'étalonnage d'intensité :

$$U_c = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - X_m|}{\sum X_i}$$

où

X_i = hauteur d'eau dans le i^{me} pots

X_m = hauteur d'eau moyenne dans les n pots

n = nombre total de pots

Finalement, des graphiques de la distribution spatiale des intensités de pluie au sol ont été dressés afin de « visualiser » l'uniformité spatiale des précipitations au sol.

7.1.3 Simulations de pluies sur les parcelles

Les simulations de pluies ont été effectuées à un débit de 5,75 L/min, pour une pluie calibrée de 14,75 mm en 15 minutes. Afin de reproduire des événements pluvieux de différentes intensités et de restreindre les opérations de simulations de pluie, de mesure de volumes d'eau ruisselée et d'échantillonnage des matières en suspension (MES) dans une même journée (1

intensité X 6 parcelles), il a été décidé de simuler des pluies de 30 minutes (29.5 mm) selon le protocole suivant : trois intensités de pluies ont été simulées à deux reprises sur les trois blocs de cultures d'orge et de soya à maturité; 30 minutes de pluie pour un événement de 30 minutes, 30 minutes de pluie pour un événement de 45 minutes et 30 minutes de pluie pour un événement de 60 minutes; soient des intensités de pluies théoriques respectives de 59,00 mm/h; 39,33 mm/h et 29,50 mm/h (Tableau 7.1, Figure 7.7).

Tableau 7.1 : Séquences pluie-arrêt pour les simulations de pluies.

Durée de la simulation (min)	Séquences pluie-arrêt du simulateur (chaque simulation totalisait 29,5 mm de pluie)	Intensité de pluie (mm/h)
30	30 min (pluie)	59,00
45	15 min(pluie)-10 min(arrêt)-10 min(pluie)-5 min(arrêt)-5 min(pluie)	39,33
60	15 min(pluie)-20 min(arrêt)-10 min(pluie)-10 min(arrêt)-5 min(pluie)	29,50

Note : Dans notre projet, les pluies intenses ont été de courtes durées.

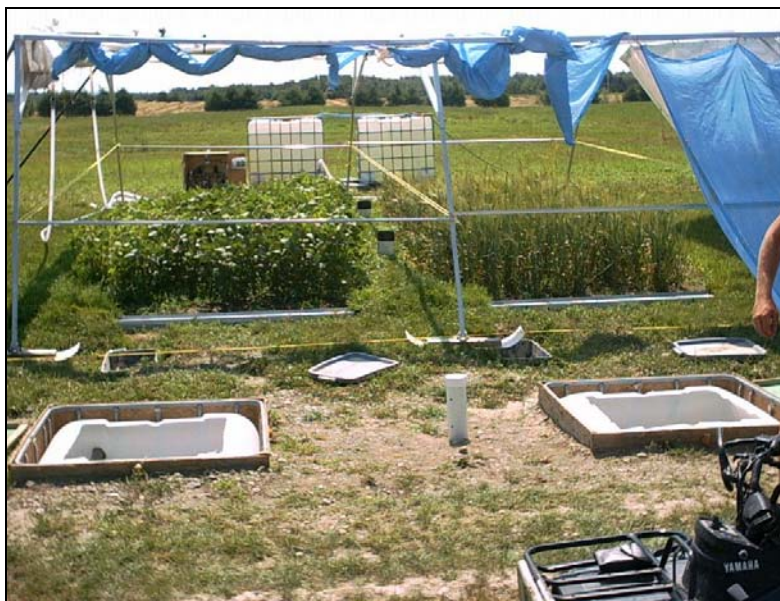


Figure 7.7 : Dispositif en place pour effectuer une simulation de pluie

Le ruissellement résultant des simulations de pluie était acheminé vers un système de captage qui dirigeait l'eau des parcelles vers six réservoirs de 800 litres enfouis dans le sol (cf. Duchemin et Dufour 2005). Après chaque simulation, l'eau accumulée par ruissellement dans chaque réservoir était prélevée à l'aide d'un aspirateur (*Shop-Vac*) et le volume total extrait était mesuré au litre près (Figure 7.8).



Figure 7.8 : Mesure des volumes d'eau et échantillonnage des MES

Avant chaque vidange de l'aspirateur, un sous-échantillon d'eau était prélevé et transvidé dans une chaudière. Le nombre de sous-échantillons variait selon le volume total d'eau ruisselée. L'ensemble de ces sous-échantillons formait un volume d'eau composite considéré représentatif de l'événement de ruissellement pour lequel était prélevé un échantillon de 500 mL pour l'analyse des matières en suspension (MES).

La durée des épisodes de ruissellement, les volumes d'eau ruisselée et les concentrations de matières en suspension (MES) ont été mesurées pour chaque simulation de pluie. De plus, deux pluviomètres ont permis de mesurer les intensités de pluies réelles lors des simulations. Ainsi, 18 simulations de pluies ont été effectuées pour chaque type de culture, pour un total de 36 simulations-parcelles; soit 36 mesures de volume d'eau et 36 mesures de MES.

Cette étape du projet a nécessité six jours de simulations (deux journées par intensité) et le maintien de trois personnes à temps plein au début du mois d'août 2006. Des analyses statistiques et des courbes de régression ont été établis entre les intensités de pluies (mm/h), les flux d'eau de ruissellement (L/min) et de sédiments (g/min) issus de chacune des cultures (orge, soya). Ces données permettront d'établir un portrait des relations existant entre les grandes cultures soumises à différentes intensités de pluies dans un contexte de CC.

7.1.4 Analyse des précipitations régionales

Selon Hatfield *et al.* (2004) et Quilbé *et al.* (2004), les CC auront pour conséquence d'accroître l'aire de production des cultures à grand interligne (maïs, soya) en remplacement des cultures fourragères ou à interligne étroit (céréales). La région méridionale du Québec touchée par ce phénomène occupe principalement la périphérie des Basses-Terres du fleuve Saint-Laurent. Puisque la fréquence des événements de pluies extrêmes sera plus grande, leur intensité risque de rendre ces sols plus sensibles à l'érosion hydrique et au transport des polluants (sédiments, azote, phosphore, pesticides, agents pathogènes).

Pour établir des scénarios futurs, il est possible d'analyser les normales climatiques des précipitations actuelles pour les stations météorologiques situées au sud du Québec afin de déterminer des courbes pluviométriques de différentes intensités, durées et fréquences (courbes IDF). Ainsi, une modélisation des courbes IDF a été effectuée pour la région de Saint-Lambert-de-Lauzon à partir des équations proposées par Alila (2000). Aussi, dans le contexte des CC et sur la base de simulations obtenues du Modèle Régional Climatique Canadien (MRCC), Mailhot *et al.* (2007) ont étudié les précipitations de la région du Québec méridionale pour la période « actuelle » 1961-1990 afin d'estimer les hauteurs de pluie de la période « future » 2041-2070.

À partir de ces deux sources de données, des courbes présentant la relation entre la durée et l'intensité des événements pluvieux ont été tracées pour des périodes de retour de 2 ans, 5 ans, 10 ans et 25 ans. Ces courbes IDF ont été mises en relations avec les intensités de pluie simulées.

7.2 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

7.2.1 Étalonnage du simulateur de pluie

Les pressions mesurées dans les conduites d'eau du simulateur de pluie variaient considérablement pour chacun des tests d'étalonnage des débits de buses (Tableau 7.2).

Tableau 7.2 : Étalonnage des buses pour un débit approximatif de 5,70 L/min.

Buse	Pression au manomètre (psi)	Débit (L./min)
#1	11,75	5,76
#2	12,00	5,60
#3	10,00	5,84
#4	12,50	5,80
#5	12,00	5,64
#6	11,50	5,84
	P moy = 11,63 psi	Q moy = 5,75 L/min

La pression moyenne indiquée par les six manomètres s'élevait à 11,63 psi (80,2 kPa). Le débit moyen obtenu à la sortie des six buses du simulateur a atteint 5,75 L/min, ce qui est similaire au débit de 5,70 L/min suggéré par Michaud (1987) pour une pluie naturelle. Ce débit a été utilisé pour calibrer le simulateur à partir des tests d'intensités. Les 121 pots servants à recueillir l'eau de pluie ont permis de déterminer les hauteurs de pluie reçues au sol et de produire des graphiques détaillés de la distribution spatiale des intensités, dont les valeurs se rapprochaient de celles obtenues par les pluviomètres disposés sous le simulateur (Tableau 7.3, Tableau 7.4 et Figure 7.9).

Tableau 7.3 : Étalonnage des hauteurs de pluie pour un débit de 5,75 L/min.

# Essai	Pression moyenne (Psi)	Hauteur moyenne sur la partie soya pendant 15 minutes (66 pots) (mm)	Hauteur moyenne sur la partie orge pendant 15 minutes (66 pots) (mm)	Hauteur Moyenne (mm)
1	11,63	15,05	13,98	14,60
2	11,63	15,47	13,85	14,90
		I moy = 15,26 mm	I moy = 13,92 mm	I moy = 14,75 mm

Tableau 7.4 : Étalonnage des intensités de pluie pour un débit de 5,75 L/min.

# Essai	Pression moyenne (Psi)	Intensité moyenne sur la partie soya (66 pots) (mm/h)	Intensité moyenne sur la partie orge (66 pots) (mm/h)	Intensité moyenne (mm/h)
1	11,63	60,18	55,94	58,38
2	11,63	61,88	55,39	59,40
		I moy = 61,03 mm/h	I moy = 55,67 mm/h	I moy = 58,89 mm/h

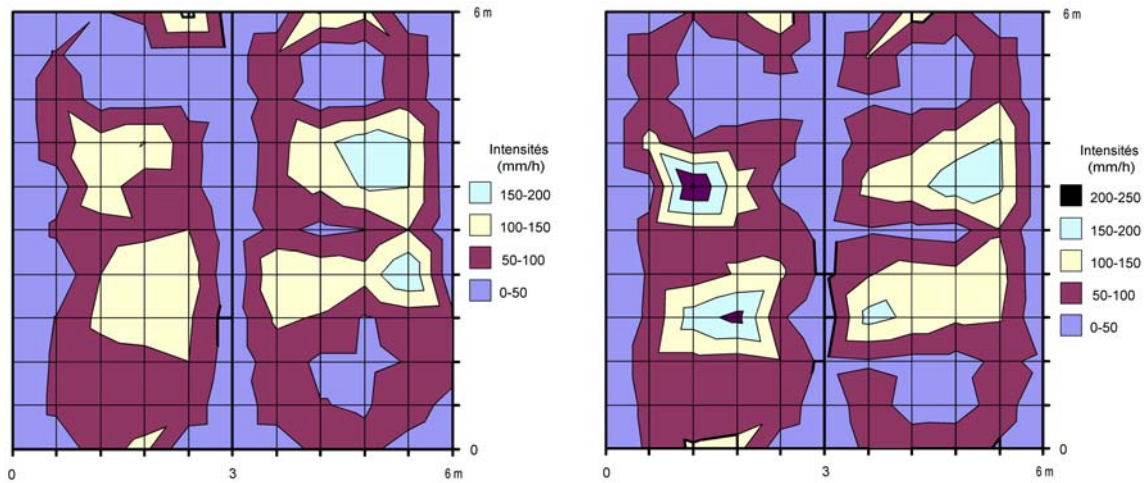


Figure 7.9 : Distribution spatiale des intensités de pluie pour un débit de 5,75 L/min.

Le positionnement des buses sur le simulateur a causé une hétérogénéité spatiale dans la distribution des pluies mesurées au sol puisque la parcelle en orge recevait moins d'eau que la parcelle de soya. Il a été conclu que le cône formé par certaines buses n'était pas précis et régulier, créant de ce fait une aspersion d'eau irrégulière au sol. Les indices d'uniformité de Christiansen (U_c) indiquent d'ailleurs une faible homogénéité des précipitations simulées, soit 0,527 pour le premier test et 0,528 pour le second test.

Le simulateur de pluie comprenait deux circuits hydrauliques pour alimenter les six buses disposées en série de trois (cf. Figure 7.5). Pour éviter que le débit des deux buses les plus éloignées de l'arrivée du système de pompage soit inférieur à celui de la buse située la plus près, des valves de contrôle ont été placées devant chaque buse. Pour chacun des circuits hydrauliques, la dernière buse de la série devait être davantage ouverte pour compenser les contraintes hydrauliques. Malgré les efforts fournis pour atteindre une distribution spatiale uniforme des intensités de pluie, la partie aval des parcelles d'orge était un peu moins arrosée par les buses d'aspersion.

Pour remédier à cette situation, les simulations ont été effectuées dans les deux sens, c'est-à-dire en inversant le simulateur de 180° entre les deux répétitions. Le patron d'intensités qui était sur la parcelle en soya lors de la première série de tests se retrouvait ainsi sur la parcelle en orge lors de la deuxième série de tests. De cette façon, les intensités de pluies reçues sur les parcelles d'orge et de soya étaient similaires, ce qui permettait d'effectuer les simulations d'une façon équitable sur chaque culture.

7.2.2 Simulations de pluies sur les parcelles

Le simulateur a produit des intensités réelles moyennes de 52,42 mm/h, 36,78 mm/h et 28,87 mm/h, soit une différence de 11,15%, 6,48% et 2,14% par rapport aux intensités théoriques visées de 59,00 mm/h, 39,33 mm/h et 29,50 mm/h. Il faut considérer que dans ce projet, les pluies intenses ont été de courtes durées (cf. Tableau 7.1). L'ANNEXE N donne les statistiques descriptives des précipitations, du ruissellement et de l'érosion hydrique sur les parcelles d'orge et de soya pour les 36 simulations de pluies regroupées par durée de simulation et type de culture (ex : Sim30orge1 indique la simulation de 30 minutes sur les 3 parcelles d'orge pour la première répétition : $n = 3$). Les figures 10 et 11 présentent les relations existant entre les intensités des précipitations (mm/h) et les débits de ruissellement (L/min) et de sédiments (g/min) pour les 36 simulations de pluies regroupées par type de culture (3 parcelles X 2 répétitions).

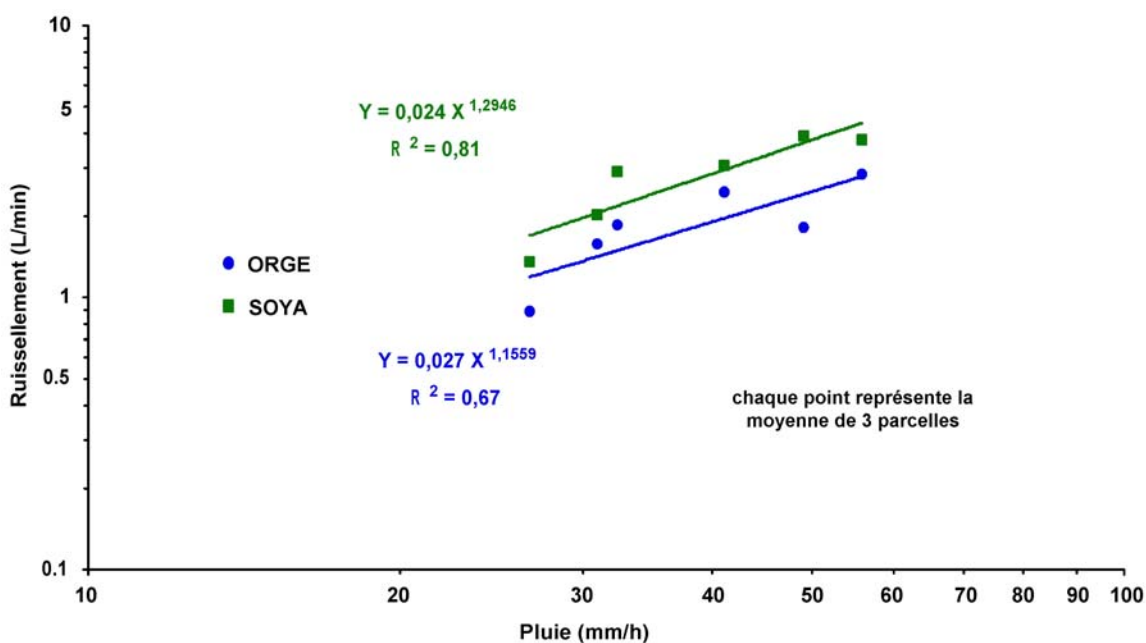


Figure 7.10 : Relation entre les intensités de pluie et le ruissellement pour l'orge et le soya.

Les courbes illustrées à la Figure 7.10 sont statistiquement significatives ($p < 0,05$) et indiquent que les débits de ruissellement sont étroitement dépendants des intensités de précipitations. La forme logarithmique des relations obtenues révèle que les débits de ruissellement augmentent d'une façon croissante lorsque les intensités de pluies augmentent. Au fur et à mesure que les intensités augmentent, l'eau ne parvient plus à s'infiltrer dans le sol et contribue davantage au

ruissellement. Cependant, il n'y a pas de différence significative entre la pente des courbes d'orge et de soya; l'hydrologie des deux cultures répond d'une façon similaire à l'augmentation des intensités de pluies.

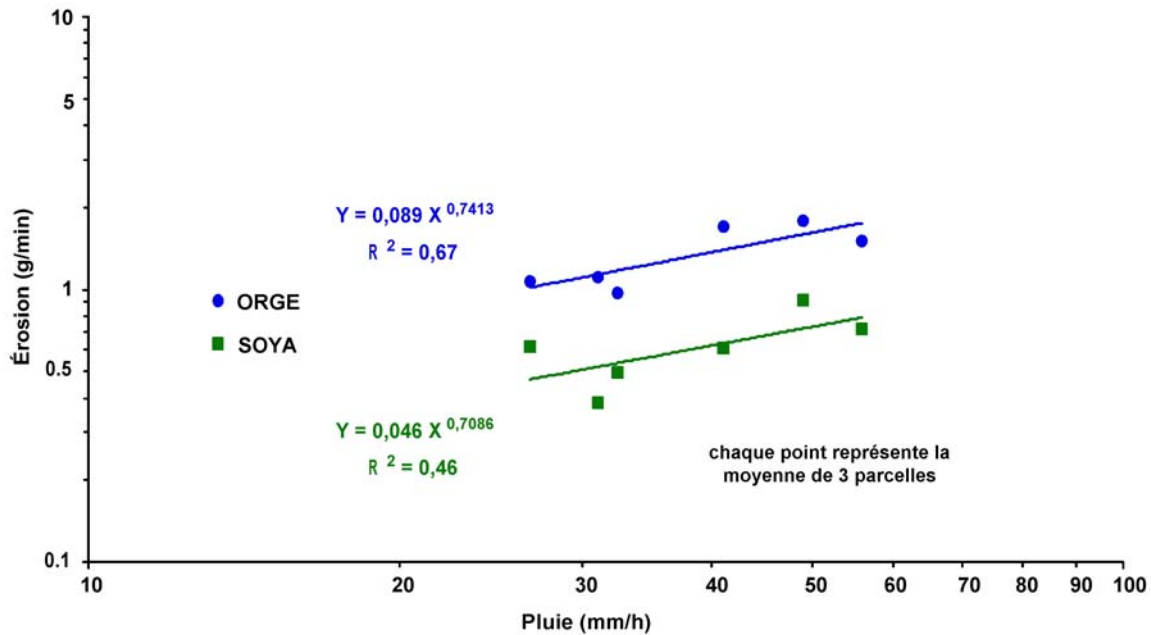


Figure 7.11 : Relation entre les intensités de pluie et l'érosion pour l'orge et le soya.

Les courbes illustrées à la Figure 7.11 sont statistiquement significatives ($p < 0,05$) et indiquent que les débits de sédiments sont étroitement dépendants des intensités de précipitations. La forme logarithmique des relations obtenues révèle que les débits de sédiments augmentent d'une façon décroissante lorsque les intensités de pluies augmentent. Même si les débits de ruissellement augmentent suite à l'augmentation des intensités de pluies, la quantité de sédiments susceptibles d'être transportée à l'aval des parcelles est limitée par la capacité de transport du ruissellement. Il n'y a pas de différence significative entre la pente des courbes d'orge et de soya; l'érosion hydrique des deux cultures répond d'une façon similaire à l'augmentation des intensités de pluies.

Les informations précédentes peuvent être résumées à l'aide de l'analyse en composantes principales (ACP). L'ACP est une technique d'analyse statistique multivariée qui permet de réduire un système complexe de corrélations en un nombre plus petit de relations (*i.e.*, les composantes principales). Cette méthode d'analyse permet d'expliquer la variance observée pour l'ensemble des données initiales en se limitant à un nombre réduit de composantes définies comme étant une transformation des variables initiales (Hair *et al.*, 1987). Une ACP a

été effectuée sur l'intensité des précipitations, le ruissellement et l'érosion hydrique auxquels ont été ajoutés les pentes (PENTE), le pourcentage de sable (SABLE) et le facteur d'érodabilité des sols (FACTEUR_K) des parcelles d'orge et de soya (Figure 7.12).

La variable PLUIEintensité (mm/h) demande une interprétation particulière car elle est étroitement liée à la durée de l'événement pluvieux simulé (RUISSdurée). Il faut considérer que les pluies intenses ont été de courtes durées (*cf.* Tableau 7.1). Ce qui expliquerait la corrélation négative ($r : -0,919$) entre ces variables. Ainsi, la durée de l'événement pluvieux simulé, qui est inversement proportionnelle à son intensité, est fortement corrélée avec la durée du ruissellement ($r : 0,998$; significative à 95%).

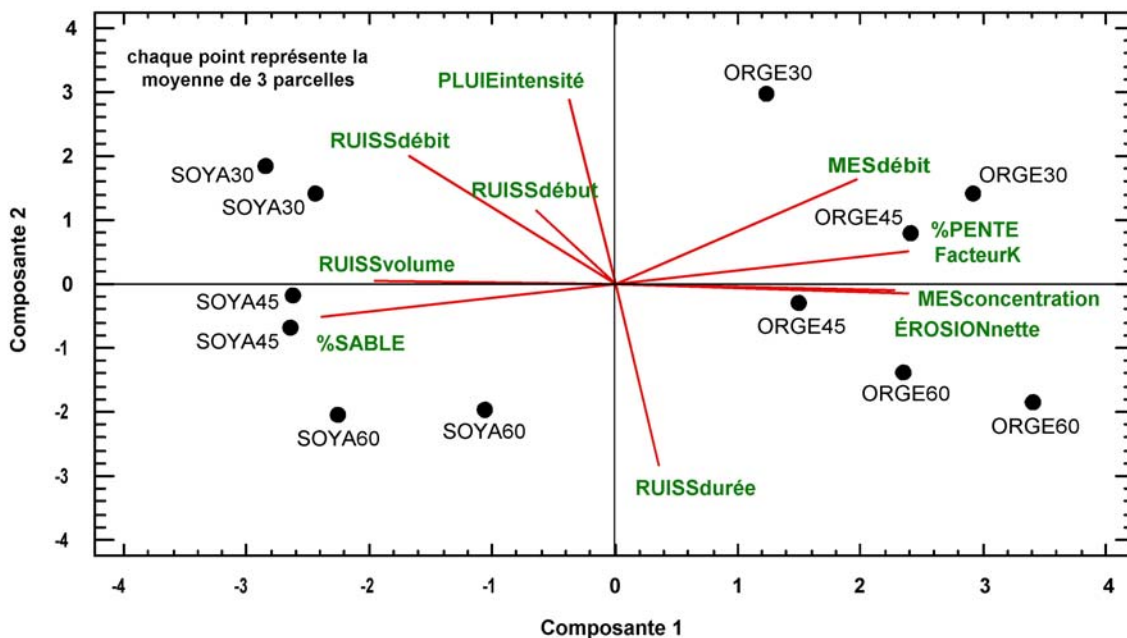


Figure 7.12 : Résultats de l'analyse en composantes principales.

Les individus de l'ACP correspondent aux 36 simulations regroupées en types de culture (orge, soya) et de durée de simulations (30, 45, 60 minutes). L'analyse contient donc 12 individus, soit 12 combinaisons de culture et de durée (ex : ORGE30 X 2 répétitions). L'analyse ACP a produit deux composantes qui expliquent 82,9% de la variabilité des données mesurées (*cf.* ANNEXE N). La Figure 7.12 fournit plusieurs renseignements sur les relations de proximité entre les variables d'intensité, de ruissellement et d'érosion vis-à-vis des cultures et des durées de simulations (*i.e.*, intensités).

Le graphique ACP indique que les variables d'érosion se situent le long de l'axe positif de la première composante alors que les variables de ruissellement se situent principalement le long de l'axe négatif de la composante 1. Plus une variable est située loin du point d'origine d'une composante, plus elle exerce un « poids » important sur cette composante. Ainsi, les variables MESdébit et RUISSdébit caractérisent fortement la composante 1 alors que les variables PLUIEintensité et RUISSdurée caractérisent fortement la composante 2. Le « poids » exercé sur la composante 2 par la texture grossière du sol (SABLE) est similaire, mais opposé, à celui exercé par l'érodabilité des sols (FACTEUR_K). Les concentrations en MES et les taux d'érosion nette (EROSIONnette) sont fortement tributaires de l'érodabilité des sols (FACTEUR_K) et des pentes (PENTE) des parcelles.

Concernant les 12 individus (culture-durée), le graphique ACP indique une nette ségrégation des types de cultures ORGE et SOYA le long de l'axe de la composante 1 et des durées de simulation 30, 45 et 60 minutes le long de l'axe de la composante 2. En effet, les simulations en cultures d'orge s'opposent aux simulations en cultures de soya en ce qui concerne les variables de ruissellement et d'érosion. Les variables d'érosion étant fortement associées aux cultures d'orge tandis que les variables de ruissellement étant fortement associées aux cultures de soya. L'analyse ACP indique également que plus l'intensité des pluies augmente (*i.e* 30 minutes), plus les flux de ruissellement (RUISSdébit) et de sédiments (MESdébit) augmentent (les simulations de longue durée produisant des intensités plus faibles).

Les observations tirées des analyses précédentes résultent des conditions agro-environnementales actuelles et peuvent être considérées garantes des précipitations régionales qui existeraient dans le contexte des CC.

7.2.3 Analyse des précipitations régionales

Selon les travaux de Alila (2000), les intensités de 52,42 mm/h, 36,78 mm/h et 28,87 mm/h obtenues pour les simulations d'une durée respective de 30 minutes, 45 minutes et 60 minutes correspondraient à des périodes de retour actuelles de 9,62 ans, 5,87 ans et 5,77 ans pour la région de Saint-Lambert-de-Lauzon (Tableau 7.5 et Figure 7.13).

Tableau 7.5 : Modèles IDF proposés par Alila (2000).

Précipitations	Modèles IDF
< 60 minutes	$R_{60}^T = [(-0,038 \ln(I) + 0,088) \ln(MAP) + (0,495 \ln(I) - 0,152)] [0,183 t^{0,433}] R_{60}^{10}$
60 minutes	$R_{60}^T = [(-0,038 \ln(I) + 0,088) \ln(MAP) + (0,495 \ln(I) - 0,152)] R_{60}^{10}$

* Regional depth-duration-frequency equations (p.1773); MAP=1000 mm; $R_{60}^{10} = 33,44$ mm

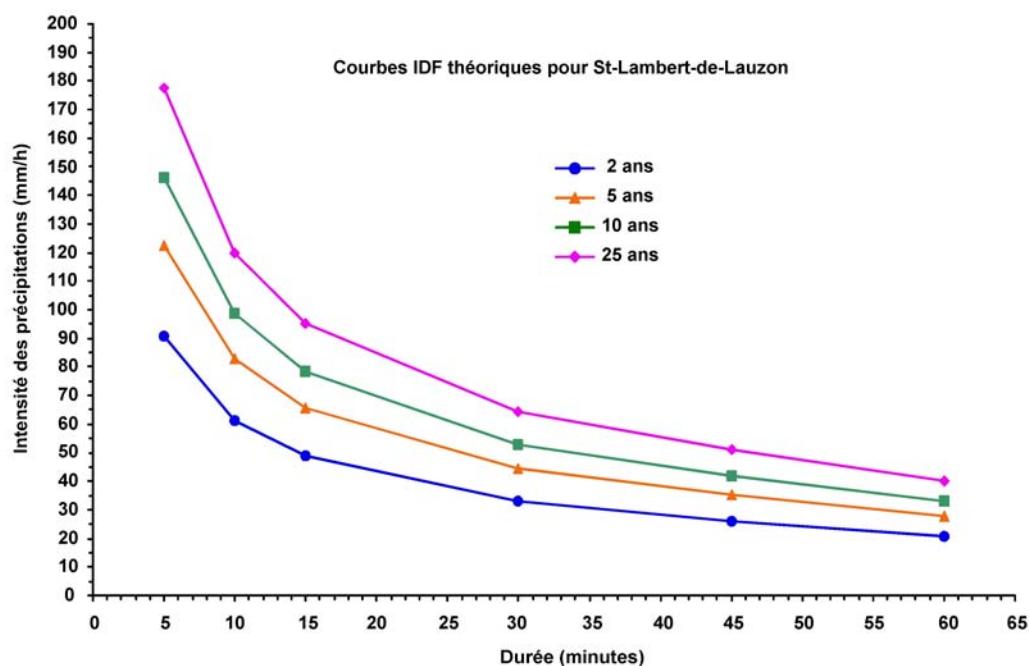


Figure 7.13 : Courbes IDF pour la région de Saint-Lambert-de-Lauzon (d'après Alila 2000).

Extrapolées au scénario futur « 2041-2070 » des CC pour le sud du Québec, les courbes IDF de Mailhot *et al.* (2007) indiqueraient pour des événements pluvieux ayant des intensités de pluie actuelles de 52,42 mm/h, 36,78 mm/h et 28,87 mm/h, des durées de 30 minutes, 45 minutes et 60 minutes et des périodes de retour de 9,62 ans, 5,87 ans et 5,77 ans, des intensités de pluie futures respectives de 61 mm/h, 42 mm/h et 33 mm/h (Figure 7.14).

La mise en relation des valeurs actuelles et projetées des composantes de l'IDF conduit à l'équation de régression suivante :

$$\text{INTENSITÉ_FUTURE} = 0,417558 - (0,0194554 * \text{DURÉE}) - (0,0202155 * \text{RETOUR}) + (1,15891 * \text{INTENSITÉ})$$

$$R^2 = 99,89 ; \text{SIGNIFICATIF À } 95\%$$

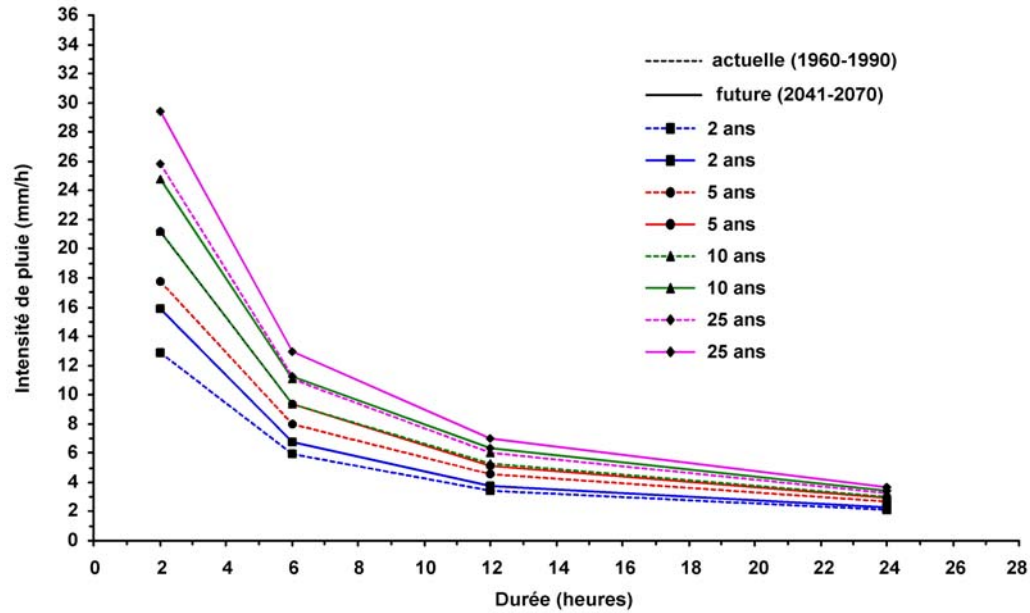


Figure 7.14 : Courbes IDF pour la région sud du Québec (d'après Mailhot et al. 2007).

Bien que spéculatifs, ces renseignements permettent d'apprécier l'impact potentiel d'un éventuel CC sur l'hydrologie et l'érosion hydrique des parcelles agricoles en grandes cultures. La transposition des résultats obtenus aux conditions agroenvironnementales futures dépendra de l'ensemble des efforts fournis pour évaluer l'impact et l'adaptation du milieu agricole aux CC.

7.3 CONCLUSION

Si l'hypothèse d'une augmentation du ruissellement de surface et de l'érosion résultant des CC est facilement acceptable, ses conséquences sur l'agroenvironnement sont plus difficiles à appréhender. Le taux d'érosion des sols changera en réponse aux changements du climat pour plusieurs raisons, les plus directes étant une modification dans l'érosivité des précipitations et une modification dans la distribution spatiale de la biomasse végétale. Mais le facteur le plus

dominant sera la nécessité de modifier l'occupation du territoire afin de s'adapter aux nouvelles conditions climatiques. En modifiant les systèmes cultureux, les producteurs agricoles modifieront la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique. Les résultats obtenus se veulent une contribution à l'étude *in situ* de l'impact de CC en agriculture. D'autres études similaires devront être effectuées afin d'approfondir nos connaissances sur l'adaptation agricole face aux CC.

8 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

8.1 RÉSUMÉ DES RÉSULTATS OBTENUS

La première partie de l'étude portait sur l'évolution de l'occupation du sol sur le bassin versant de la rivière Chaudière au cours des trente dernières années et l'évaluation de son effet sur l'hydrologie et l'érosion à l'aide du système de modélisation intégrée GIBSI. Les résultats des simulations ont montré que :

- La superficie agricole a fortement augmenté durant les années 80 (de 13,4% du territoire en 1981 à 21% en 1990) avant de diminuer à nouveau et de fluctuer autour de 17%. Le milieu forestier suit évolution opposée.
- La lame d'eau annuelle ainsi que les débits d'étiage estivaux sont très fortement corrélés à l'évolution de la superficie agricole.

Dans la seconde partie, nous avons évalué, à l'aide de la modélisation, l'effet des CC sur l'hydrologie et l'érosion à l'échelle du bassin versant de la rivière Chaudière, ainsi que l'effet de scénarios d'évolution de l'occupation du sol dans ce contexte de CC. Les principales conclusions sont les suivantes :

- Une importante incertitude est liée aux résultats compte tenu des méthodes utilisées et des hypothèses réalisées. De ce fait, l'effet des CC à l'horizon 2025 est parfois trop faible pour être détecté. De plus, nos collègues chez Ouranos ont souligné qu'il est possible que la modification climatique prévue par l'ensemble des MCG utilisés pour cet horizon dépende plus des MCG eux-mêmes que des scénarios d'émissions des gaz à effet de serre, mais qu'il demeurerait difficile d'infirmer ou de confirmer cette hypothèse.
- Dans un contexte de CC, la lame d'eau annuelle à l'exutoire du bassin devrait diminuer légèrement dans un contexte de CC, de l'ordre de 5%. Cette diminution se produirait surtout durant l'été et l'automne. La lame d'eau pourrait augmenter en hiver du fait de l'augmentation de la température.
- Le débit de pointe printanier tendrait à diminuer, tandis qu'il est impossible de tirer une conclusion concernant les débits d'étiage
- La charge annuelle de sédiments diminuerait de l'ordre de 12%.

- Un scénario d'occupation du sol « productiviste » engendrerait une forte augmentation de la lame d'eau en été et en automne, une augmentation des débits d'étiage et une augmentation de l'érosion. Cela représenterait donc une atténuation, voire une inversion de l'effet des CC.
- Un scénario d'occupation du sol « rustique » engendrerait une diminution de la lame d'eau en été et en automne, une diminution des débits d'étiage et une diminution de l'érosion. Cela accentuerait donc l'effet des CC.
- Aussi, des expériences sur parcelles et sous pluie simulée ont été menées afin d'évaluer l'effet des événements de précipitations futurs sur le ruissellement et l'érosion à l'échelle parcellaire. Compte tenu de l'inexpérience, la mise en place du dispositif expérimental a été plus longue que prévue, et seuls des résultats préliminaires ont pu être obtenus. Ils suggèrent une intensification du ruissellement et de l'érosion dans un contexte de CC, dépendamment des cultures en place : ainsi, sur une base événementielle, le soya favoriserait une augmentation du ruissellement, tandis que l'orge favoriserait une augmentation de l'érosion.

Ainsi, l'effet des CC sur le ruissellement et l'érosion semble différent selon que l'on travaille à grande échelle spatio-temporelle (diminution de la lame d'eau et de l'érosion) ou à petite échelle spatio-temporelle (augmentation du ruissellement et de l'érosion). Cela montre bien l'intérêt et l'importance de considérer plusieurs échelles d'étude avant de tirer des conclusions. Les événements de précipitations extrêmes ayant surtout lieu au cours de la saison estivale, cela implique que c'est lors de cette période que les résultats obtenus à l'échelle annuelle et du bassin versant (diminution du ruissellement et de l'érosion) sont sans doute les plus incertains.

Par ailleurs, cette étude a montré tout le potentiel du système de modélisation intégrée GIBSI, que ce soit pour évaluer l'influence de l'évolution passée et future de l'occupation du sol ou l'effet des CC sur l'hydrologie et la qualité de l'eau. De plus, des scénarios d'adaptation dans d'autres domaines pourraient être pris en compte, tels que la gestion des pratiques agricoles, des réservoirs ou des stations de traitement des eaux usées.

Toutefois, la principale difficulté posée par l'étude de la vulnérabilité de l'agriculture au CC réside dans la nécessité d'une part de considérer un horizon lointain (2050 voire 2100) pour pouvoir déterminer un effet significatif des CC, et d'autre part l'impossibilité de définir un scénario d'occupation du territoire agricole au-delà des 10 ou 20 prochaines années compte tenu des multiples facteurs socio-économiques imprévisibles à prendre en compte.

Enfin, il est important de rappeler que les scénarios d'occupation du sol testés dans le cadre de cette étude ne sont pas des scénarios d'adaptation au CC mais bien de scénarios possibles

d'évolution future de l'occupation du sol compte tenu de l'évolution historique. Ainsi, avant d'interpréter les résultats obtenus du point de vue de l'adaptation au CC, il convient de déterminer quels sont les effets positifs et les effets négatifs en regard des différents usages de l'eau sur le bassin versant. Ce travail ne constitue donc qu'une étape préliminaire, mais nécessaire, à l'élaboration de stratégies élaborées de gestion régionale des pratiques agricoles et de l'occupation du territoire, stratégies dont le potentiel d'adaptabilité pourra éventuellement être évalué à l'aide du système de modélisation GIBSI.

8.2 PERSPECTIVES

Dans la continuité de cette étude, les travaux futurs pourraient consister à :

- Quantifier l'incertitude liée aux méthodes utilisées pour estimer l'effet des CC et des scénarios d'occupation du sol sur l'hydrologie du bassin versant. Cela permettrait d'avoir une meilleure idée du niveau de confiance à donner aux résultats et aux conclusions précédentes.
- Utiliser des méthodes plus sophistiquées telles que les MRC pour déterminer les séquences météorologiques futures. Il s'agira alors d'évaluer l'effet des CC à long terme (2050) ce qui pose le problème de devoir également définir des scénarios réalistes d'évolution de l'occupation du sol à long terme. Toutefois, cela est difficilement réalisable compte tenu des multiples facteurs socio-économiques imprévisibles qui sont susceptibles d'influencer l'agriculture dans les prochaines années.
- Estimer l'effet des CC et de l'occupation du sol sur la qualité de l'eau en utilisant les modèles de transport de polluants de GIBSI. S'il est probable que les concentrations en nutriments et pesticides suivent l'évolution du ruissellement et de l'érosion, il serait intéressant de quantifier l'évolution de la probabilité de dépassement des critères de qualité d'eau, en relation avec certains usages de l'eau (*e.g.* baignade, consommation, activités récréotouristiques).
- Poursuivre les expérimentations sur parcelles en simulant des séquences de précipitations attendues dans le futur. Une telle étude permettrait de bien mettre en contexte les intensités de pluie générées avec des courbes intensité-durée-fréquence issues des données historiques et futures simulées par le MRC canadien. Il pourrait également être intéressant d'utiliser ce dispositif pour tester d'autres types de cultures que l'orge et le soya (comme par exemple le maïs), ou encore certaines pratiques agricoles (sens de travail du sol, semis direct versus labour, *etc.*). Les retombées d'un tel projet seraient d'ailleurs très pertinentes pour l'adaptation des pratiques culturales au contexte climatique futur anticipé.

- Organiser une concertation avec les différents acteurs et usagers du bassin versant de la rivière Chaudière afin de déterminer quels sont les usages à privilégier dans un contexte de CC compte tenu de l'évolution attendue du régime hydrologique du bassin, et ainsi d'orienter l'évolution future de l'occupation du territoire pour une adaptation raisonnée et durable au changement climatique.

9 COORDINATION DES ACTIVITÉS ET PROMOTION DU PROJET

9.1 ÉQUIPE DE TRAVAIL

9.1.1 Équipe de l'INRS-ETE

- o *Alain N. Rousseau*, professeur
- o *Renaud Quilbé*, stagiaire post-doctoral puis associé de recherche
- o *Sébastien Tremblay*, programmeur
- o *Philippe Boucher*, stagiaire en informatique, 1^{er} cycle (U. Laval, QC)
- o *Jean-Sébastien Moquet*, stagiaire de fin d'études, 2^e cycle (U. François-Rabelais, France)
- o *Stéphane Savary*, assistant de recherche
- o *Simon Ricard*, stagiaire, 2^e cycle
- o *Mohamed Slim Garbonj*, stagiaire, 2^e cycle (ENIT, Tunisie)
- o *Jean-François Dolbec*, stagiaire, 2^e cycle
- o *Florence Guillot*, stagiaire, 1^{er} cycle (ENS de Géologie de Nancy, France)
- o *Nguyen Bao Trinh*, stagiaire, 3^e cycle
- o *Martine Grenier*, stagiaire, 3^e cycle
- o *Jean-Pierre Villeneuve*, professeur

9.1.2 Équipe de l'IRDA

- o *Marc Duchemin*, chercheur
- o *Boris Salou*, stagiaire, 1^{er} cycle (U. de Moncton, NB)
- o *Sylvain de Ladurantaye*, stagiaire, 1^{er} cycle (U. Laval, QC)
- o *Alexandre Dufour*, stagiaire au baccalauréat, 1^{er} cycle (U. Laval, QC)

9.1.3 Collaborateurs

- o OURANOS : *Philippe Gachon, Yonas Dibike, Diane Chaumont & Anne Debrabandère*
- o Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) : *Nancy Lease & Charles Savoie*
- o Financière Agricole du Québec (FADQ) : *Patrice Mullier & Isabelle Duchesne*
- o Ministère de l'Environnement du Québec (MENV) : *Michel Patoine*
- o Université du Manitoba : *Esther Salvano*

- o Université de Moncton : *Anne-Marie Laroche*
- o Université Laval : *Guy Debailleul*

9.2 ÉCHÉANCIER

L'échéancier de travail est présenté à la page suivante (Tableau 9.1).

Tableau 9.1 : Échéancier du projet

Étape	Opérateurs	Semestre 1 Avril 2004 -Sept 2004	Semestre 2 Oct 2004 - Mars 2005	Semestre 3 Avril 2005 -Sept 2005	Semestre 4 Oct 2005 - Mars 2006	Trimestre 5 Avril 2006 -Sept 2006	Trimestre 6 Oct 2006 - Mars 2007
Revue de littérature des méthodes existantes	<i>R.Quilbé, A.Rousseau</i>						
Étape rétrospective							
Reconstitution de l'évolution de l'occupation du sol depuis 30 ans	<i>F.Guillot, J.F.Dolbec, S. Savary, A.Rousseau, C.Savoie, N.Lease, P.Mullier</i>						
Simulations avec GIBSI pour étape rétrospective	<i>S.M. Garbouj, R.Quilbé, A.Rousseau, A.M.Laroche</i>						
Étape prédictive							
Expériences de Simulation de pluie	<i>M.Duchemin, B. Salou, S. de Ladurantaye, A. Dufour</i>						
Détermination des scénarios climatiques	<i>R.Quilbé, F.Guillot, N.B.Trinh, J.-S. Moquet, A.Rousseau, P.Gachon, Y. Dibike</i>						
Identification des scénarios d'évolution et d'adaptation de l'occupation du sol	<i>S.Ricard, N.Lease P.Mullier, G.Debailleur</i>						
Simulations avec GIBSI pour étape prédictive	<i>R.Quilbé, J.-S. Moquet, A.Rousseau, E. Salvano</i>						
Rédaction des rapports d'étape et final	<i>Tous</i>						

9.3 COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

9.3.1 Rapports scientifiques

- Guillot F. 2004. *Étude préliminaire de l'impact du changement climatique sur le régime d'écoulement du bassin versant de la rivière Chaudière, à l'aide du système de modélisation intégrée GIBSI*. Rapport n° I-150. INRS-ETE, Sainte-Foy, Québec.
- Rousseau A.N., Quilbé R., Dolbec J.F., Guillot F., Villeneuve J.-P. et Duchemin M. 2005. *Vulnérabilité de l'agriculture en réponse aux changements climatiques: étude de l'influence passée future de l'occupation agricole du territoire sur le régime hydrologique et la qualité de l'eau d'un bassin versant, à l'aide d'un système de modélisation intégrée*. Rapport d'état d'avancement. Rapport n° R-796-e1. INRS-ETE, Québec, Canada.
- Rousseau A.N., Quilbé R., Dolbec J.F., Guillot F., Ricard S., Savary S., Villeneuve J.-P. et Duchemin M. 2005. *Vulnérabilité de l'agriculture en réponse aux changements climatiques: étude de l'influence passée future de l'occupation agricole du territoire sur le régime hydrologique et la qualité de l'eau d'un bassin versant, à l'aide d'un système de modélisation intégrée*. Rapport d'état d'avancement préparé pour OURANOS. Rapport N° R-796-e2. INRS-ETE, Québec, Canada.
- Dolbec J.F., Rousseau A.N. et Quilbé R. 2005. *Développement d'un processus de classification d'images satellitaires afin de détecter les changements d'occupation du sol sur le bassin versant de la rivière Chaudière pour la période 1970 à 2000 : Exemple de l'image Landsat-5 du 6 août 1987*. Rapport N° 802. INRS-ETE, Québec.
- Trinh N.B., 2005. *Impact des Changements Climatiques sur le Régime Hydrique de la Rivière Chaudière. Développement d'une Approche Méthodologique Basée sur les MCG, le Downscaling & le Système de Modélisation GIBSI*. Rapport de mini-projet dans le cadre du programme de doctorat en Sciences de l'Eau de l'INRS-ETE. INRS-ETE, Québec.
- Grenier M. 2005. *Classification de l'occupation du sol du bassin versant de la rivière Chaudière à l'aide de l'image satellitaire Landsat-5 du 2 septembre 2003*. Rapport de mini-projet dans le cadre du programme de doctorat en Sciences de l'Eau de l'INRS-ETE. INRS-ETE, Québec. 43 pages.
- Salou B. 2005. *Vulnérabilité de l'agriculture en réponse aux changements climatiques : étude de l'influence passée et future de l'occupation agricole du territoire sur le régime hydrologique et la qualité de*

l'eau d'un bassin versant, à l'aide d'un système de modélisation intégrée. FACC A946. Courbes IDF et mise en place des parcelles expérimentales. Rapport de stage. INRS-ETE, Québec.

- O Ricard S., Rousseau A.N. et Quilbé R. 2006. *Vulnérabilité de l'agriculture en réponse aux changements climatiques : étude de l'influence passée et future de l'occupation agricole du territoire sur le régime hydrologique et la qualité de l'eau d'un bassin versant, à l'aide d'un système de modélisation intégrée. FACC A946. Élaboration des scénarios d'occupation du sol. Rapport de stage. INRS-ETE, Québec.*
- O Savary S., Dolbec J.F., Rousseau A.N. et Quilbé R. 2006. *Description d'un processus de classification orientée objet pour la cartographie et la détection des changements de l'occupation du sol à l'aide d'images satellitaires du bassin versant de la rivière Chaudière pour la période de 1970 à 2000. Rapport N° 873. INRS-ETE, Québec, Canada.*
- O Garbouj S.M., Rousseau A.N., Quilbé R. et Savary S. 2006. *Étude de l'influence passée de l'occupation agricole du territoire sur l'écoulement du bassin versant de la rivière Chaudière à l'aide d'un système de modélisation intégrée. Rapport N° 887. INRS-ETE, Québec, Canada.*
- O Moquet J.-S., 2006. *Étude de l'influence du changement climatique selon l'occupation du sol agricole actuelle et future sur le régime d'écoulement du bassin versant de la rivière Chaudière à l'aide du système de modélisation intégrée GIBSI. Projet FACC A946. Rapport de stage. INRS-ETE, Québec.*
- O Duchemin, M. et Dufour A. 2005. *Aménagement d'un dispositif expérimental pour mesurer l'érosion hydrique des sols résultant de simulations de pluies dans un contexte de changements climatiques. Contribution au projet FACC A946, Programme Impacts et Adaptation, Ressources naturelles du Canada/Gouvernement du Canada. IRDA, novembre 2005, 15 p.*
- O Duchemin M. et de Ladurantaye S. 2007. *Mesures par simulations de pluies du ruissellement et de l'érosion hydrique en parcelles de grandes cultures dans un contexte de changements climatiques. Contribution au projet FACC A946, Programme Impacts et Adaptation, Ressources naturelles du Canada/Gouvernement du Canada. IRDA, mars 2007, 29 p.*

9.3.2 Présentations lors de conférences

- O Quilbé R., Rousseau A.N., Guillot F. et Villeneuve J.P. 2004. *Étude de la vulnérabilité climatique passée et future de l'agriculture en fonction de l'évolution de l'occupation agricole du territoire à l'aide du système de modélisation intégrée GIBSI. 57^e Congrès annuel de l'Association Canadienne des Ressources Hydriques. Eau et changements climatiques: comprendre pour mieux s'adapter, 16-18 juin 2004, Montréal.*

- o Dibike Y.B. et Gachon P. 2006. Evaluation of Statistical and Dynamical Downscaling Model Outputs: A Case Study in Chaudière River Basin, Southern Québec. *Séminaire Ouranos*. Montréal, le 18 octobre 2006;
- o Dibike Y.B. et Gachon P. 2006. Evaluation of Statistical and Dynamical Downscaling Model Outputs: A Case Study in Chaudière River Basin, Southern Québec. *Atmospheric Research Seminars*. Environment Canada. Downsview, le 28 novembre 2006.
- o Quilbé R., Rousseau A.N., Moquet S., Savary S., Ricard S., Garbouj S. 2006. Impact of historical and future land use on the hydrological regime of a Canadian watershed. *International Symposium Man and River Systems II, Interactions among Rivers, their Watersheds and the Sociosystem*, Paris, 4-6 décembre 2006.
- o Rousseau A.N. et Quilbé R. 2007. Effet des changements climatiques sur les eaux de surface. Cas du bassin versant de la rivière Chaudière. *Colloque régional de RÉSEAU Environnement Capitale Nationale et Chaudière-Appalaches*. Québec, le 15 février 2007.
- o Quilbé R. et Rousseau A.N. 2007. Modélisation quantité-qualité de l'eau en milieu agricole dans un contexte de changement climatique. *Association Canadienne des Ressources Hydriques, Atelier qualité et quantité de l'eau en milieu agricole*. Montréal, le 22 février 2007.
- o Gachon P. et Dibike Y.B. 2007. Statistical and Dynamical Downscaling Comparison for the Québec Region (ex. Chaudière River Basin). *Climate Change in High definition workshop*. Adaptation and Impacts Research Division, Environment Canada. Vancouver, le 7 mars 2007.
- o Rousseau A.N., Savary S., Quilbé R. et Duchemin M. 2007. Vulnérabilité de l'agriculture en réponse aux changements climatiques: étude de l'influence passée et future de l'occupation agricole du territoire sur le régime hydrologique et la qualité de l'eau d'un bassin versant, à l'aide d'un système de modélisation intégrée. FACC A946, Programme Impacts et Adaptation. Présentation réalisée dans le cadre des séminaires du Consortium OURANOS, le 4 avril 2007 à Montréal.

9.3.3 Textes de conférence

- o Quilbé R., Rousseau A.N., Guillot F. et Villeneuve J.P. 2004. *Étude de la vulnérabilité climatique passée et future de l'agriculture en fonction de l'évolution de l'occupation agricole du territoire à l'aide du système de modélisation intégrée GIBSI*. 57^e Congrès annuel de l'Association Canadienne des Ressources Hydriques. Eau et changements climatiques: comprendre pour mieux s'adapter, 16-18 juin 2004, Montréal, Qc, Canada.

9.3.4 Affiches

- Rousseau A.N., Quilbé R., Guillot F. et Villeneuve J.-P. 2004. Vulnérabilité de l'agriculture en réponse au changement climatique. Étude de l'influence passée et future de l'occupation agricole du territoire sur le régime hydrologique et la qualité de l'eau d'un bassin versant, à l'aide d'un système de modélisation intégrée. Poster présenté au 57^e Congrès annuel de l'Association Canadienne des Ressources Hydriques. *Eau et changements climatiques: comprendre pour mieux s'adapter*. 16-18 juin 2004, Montréal, Qc, Canada.
- Quilbé R., Moquet J.-S., Ricard S., Rousseau A.N. 2006. Évaluation de l'impact de l'occupation agricole du territoire sur l'écoulement du bassin versant de la rivière Chaudière dans un contexte de changements climatiques. Affiche présentée dans le cadre du *Deuxième Symposium Scientifique d'OURANOS, Climatologie et adaptation à l'échelle régionale*, 2-3 novembre 2006, Montréal, Qc, Canada.
- Duchemin M., de Ladurantaye S., Rousseau A.N., Quilbé R. 2006. Mesures de ruissellement par simulations de pluie sur des parcelles en grandes cultures dans un contexte de changements climatiques. Affiche présentée dans le cadre du *Deuxième Symposium Scientifique d'OURANOS, Climatologie et adaptation à l'échelle régionale*, 2-3 novembre 2006, Montréal, Qc, Canada.
- Dibike Y.B., Gachon P. and Bokoye A.I. 2006. Comparison of Statistical and Dynamical Downscaling Model Outputs: A Case Study in Southern Quebec. Affiche présentée dans le cadre du *Deuxième Symposium Scientifique d'OURANOS, Climatologie et adaptation à l'échelle régionale*, 2-3 novembre 2006, Montréal, Qc, Canada.
- Bokoye A.I., Chaumont D., Dibike Y.B., Gachon P. et Brown R.. 2006. Comparaison de scénarios climatiques issus de MCG et de mise à échelle statistique: application au bassin versant de la Chaudière (Québec). Affiche présentée dans le cadre du *Deuxième Symposium Scientifique d'OURANOS, Climatologie et adaptation à l'échelle régionale*, 2-3 novembre 2006, Montréal, Qc, Canada.

9.3.5 Articles scientifiques

- Quilbé R., Rousseau A.N., Moquet J.-S., Dibike Y. et Gachon P. 2007. Assessing the effect of climate change on river flow using a general circulation models and hydrological modelling. Application to the Chaudière River (Québec, Canada). *Canadian Water Resources Journal* (en préparation).

- o Quilbé R., Rousseau A.N., Savary S., Ricard S., Moquet J.-S. et Garbouj M.S. 2007. Impact of historical and future land use on the hydrological regime of a Canadian watershed. *Hydrology and Earth System Sciences, numéro special* (soumis).
- o Savary S., Rousseau A.N., Quilbé R. et Garbouj M.S. 2007. Impact of land use evolution on the hydrology of the Chaudière River watershed (en préparation).
- o Duchemin M., Rousseau A.N., Majdoub R. et Quilbé R. 2004. Impacts potentiels des changements climatiques sur l'érosion hydrique des sols. *Vecteur Environnement*, 37(4): 26-32.

9.4 RÉUNIONS ENTRE LES COLLABORATEURS

- o INRS-ETE, le 21 janvier 2005 : réunion de démarrage avec les principaux collaborateurs du projet. L'équipe de l'INRS-ETE a présenté le plan de travail. Un compte rendu a été réalisé et distribué à tous les collaborateurs.
- o OURANOS, le 21 novembre 2005 : réunion de suivi avec les collaborateurs d'OURANOS : présentation par R. Quilbé des travaux réalisés en 2005 et discussion sur les prochaines étapes.
- o INRS-ETE, le 27 avril 2006 : réunion de suivi avec les collaborateurs d'OURANOS : présentation et discussion des résultats du downscaling et de la démarche de simulation pour l'été 2006.
- o OURANOS, en juillet 2006 : réunion de suivi avec les collaborateurs d'OURANOS, présentation par J.-S. Moquet des résultats préliminaires de simulation.
- o INRS-ETE, le 6 septembre 2006 : réunion de suivi avec les collaborateurs d'OURANOS. Présentation par J.-S. Moquet des résultats des simulations pour la période future et discussion sur l'interprétation des résultats.

RÉFÉRENCES

- Alila Y., 2000. Regional rainfall depth-duration-frequency equations for Canada. *Water Resources Research*, 36(7):1767-1778.
- Arnold J.G. et Williams J.R., 1995. The EPIC model. Dans: V.P. Singh (Ed.) Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO, pp. 847-908.
- Arnold J.G., Williams J.R., Srinivasan R. et King K.W., 1996. SWAT. Manual. USDA, Agricultural Research Service and Blackland Research Center, Texas.
- BAPE Bureau d'audiences publiques sur l'environnement. 2003. Consultation publique sur le développement durable de la production porcine au Québec. Rapport d'enquête et d'audience publique. No 179, .Volume 1 – L'état de la situation de la production porcine au Québec 245 p.
- Bélanger G., Rochette P., Castonguay Y., Bootsma A., Mongrain D. et Ryan D.A.J., 2002. Climate change and winter survival of perennial forage crops in Eastern Canada. *Agronomy Journal*, 94: 1120-1130.
- Bergström S., Carlsson B., Gardelin M., Lindström G., Petterson A. et Rummukainen M., 2001. Climate change impacts on runoff in Sweden - assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modelling. *Climate Research*, 16: 101-112.
- Blaschke T. et Strobl J., 2001. What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS, *GeoBit/GIS* 6, pp. 12-17
- Bootsma A., Anderson D. et Gameda S., 2004. Impacts potentiels du changement climatique sur les indices agroclimatiques dans les régions du sud de l'Ontario et du Québec. Bulletin technique, Contribution du CRECO no 03-284. Centre de recherches de l'Est sur les céréales et oléagineux, Direction de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa (Ontario).
- Brown L.C. et Barnwell T.O.J., 1987. The enhanced stream water quality models QUAL2 and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia, U.S.

- Bryant C.R., Smit B., Brklacich M., Johnston T.R., Smithers J., Chiotti Q. et Singh B., 2000. Adaptation in canadian agriculture to climatic variability and change. *Climatic Change*, 45: 181-201.
- Caloz R. et Collet C., 2001. Traitements numériques d'images de télédétection. Précis De Télédétection, vol. 3. Sainte-Foy, Québec, Presses de l'Université du Québec, 386 pages.
- Gouvernement du Canada, 2002. Plan du Canada sur les changements climatiques : les changements climatiques, respecter nos engagements ensemble. 71 p. (Site internet : http://www.climatechange.gc.ca/plan_du_canada/plan/pdf/version_compl.pdf).
- Chaire en hydrologie statistique, 2002. Hydrological Frequency Analysis. INRS-ETE / HYDRO-QUÉBEC / ALCAN / CRSNG.
- Christiansen J.E., 1941. The uniformity of application of water by sprinkler systems. *Agricultural Engineering* 22(2):89-92.
- Cognard-Plancq A.-L., Voltz M., Didon-Lescot J.-F. et Normand M., 2001. The role of forest cover on streamflow down sub-Mediterranean mountain watersheds: a modelling approach. *Journal of Hydrology*, 254(1-4): 229-243.
- Collectif, 2002. Impacts et adaptation liés au changement climatique : perspective canadienne. Ressources Naturelles Canada. Direction des impacts et de l'adaptation liés au changement climatique.
- Costa M.H., Botta A. et Cardille J.A., 2003. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. *Journal of Hydrology*, 283(1-4): 206-217.
- de Jong R., Li K.Y., Bootsma A., Huffman T., Roloff G. et Gameda S., 2001. Crop yield and variability under climate change and adaptative crop management scenarios. Final Report for Climate Change Action Fund Project A080.
- De Ladurantaye S. et Duchemin M., 2006. Mesure de l'impact potentiel des changements climatiques sur l'érosion hydrique des sols par simulations de pluie. Rapport de stage Été 2006 pour le cours GAE-19106, Baccalauréat en Génie Agroenvironnemental, Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval, 22 p.

- Definiens Imaging, 2001. eCognition online user guide, guide d'utilisateur en ligne eCognition, <http://www.definiens-imaging.com>
- Diaz-Nieto J. et Wilby R.L., 2005. A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom. *Climatic Change*, 69(2 - 3): 245-268.
- Dibike Y.B. et Coulibaly P., 2005. Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 307(1-4): 145-163.
- Dolbec J.-F., Rousseau A.N. et Quilbé R. (2005), Développement d'un processus de classification d'images satellitaires afin de détecter les changements d'occupation du sol sur le bassin versant de la rivière Chaudière pour la période 1970 à 2000 : Exemple de l'image Landsat-5 du 6 août 1987. Rapport n° 802 pour le projet FACC A9446. Québec, Québec, INRS-ETE, Université du Québec, 73 pages.
- Duchemin M. et de Ladurantaye S., 2007. Mesures par simulations de pluies du ruissellement et de l'érosion hydrique en parcelles de grande culture dans un contexte de changements climatiques. Contribution au projet FACC A946, Programme Impacts et Adaptation, Ressources naturelles du Canada/Gouvernement du Canada. IRDA, mars 2007.
- Duchemin M. et Dufour A., 2005. Aménagement d'un dispositif expérimental pour mesurer l'érosion hydrique des sols résultant de simulations de pluies dans un contexte de changements climatiques. Contribution au projet FACC A946, Programme Impacts et Adaptation, Ressources naturelles du Canada/Gouvernement du Canada. IRDA, novembre 2005, 15 p.
- Duchemin M., Lachance M., Morin G. et Lagacé R., 2001a. Approche géomatique pour simuler l'érosion hydrique et le transport de sédiments à l'échelle des petits bassins versants. *Water Quality Research Journal of Canada*, 36(3): 435-473.
- Duchemin M., Rousseau A.N., Lamontagne L. et Villeneuve J.-P., 2001b. Utilisation des technologies géomatiques pour spatialiser le facteur K d'érodabilité des sols du bassin versant de la rivière Chaudière, Québec. *Canadian Journal of Soil Science*, 81: 423-437.
- Duchemin M., Rousseau A.N., Majdoub R. et Quilbé R., 2004. Impacts potentiels des changements climatiques sur l'érosion hydrique des sols. *Vecteur Environnement* 37(4):26-32.

- Duchemin M., de Ladurantaye S., Rousseau A. et Quilbé R., 2006. Mesures du ruissellement par simulations de pluie sur des parcelles en grandes cultures dans un contexte de changements climatiques. Affiche présentée lors du 2^{ème} Symposium scientifique OURANOS : Climatologie et adaptation à l'échelle régionale tenue du 2 au 3 novembre 2006 au site Cœur des Sciences, Montréal, Québec, Canada.
- Dufour A. et Duchemin M., 2005. Changements climatiques et érosion hydrique : rapport technique 2005. Rapport d'avancement du projet 041120. IRDA, novembre 2005, 85 p.
- Dunn S.M. et Mackay R., 1995. Spatial variation in evapotranspiration and the influence of land use on catchment hydrology. *Journal of Hydrology*, 171(1-2): 49-73.
- Flato G.M., Boer G.J., Lee W., McFarlane N., Ramsden D. et Weaver A., 2000. The CCCma global coupled model and its climate. *Climate Dynamic*, 16: 451-467.
- Fohrer N., Haverkamp S., Eckhardt K. et Frede H.-G., 2001. Hydrologic Response to land use changes on the catchment scale. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26(7-8): 577-582.
- Fortin J., Turcotte R., Massicotte S., Moussa R., Fitzback J. et Villeneuve J.P., 2001a. A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. Part I: Description of the model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(2): 91-99.
- Fortin J.P., Moussa R., Bocquillon C. et Villeneuve J.P., 1995. Hydrotel, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique. *Revue des Sciences de l'Eau*, 8(1): 97-124.
- Fortin J.P., Turcotte R., Massicotte S., Moussa R. et Fitzback J., 2001b. A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data, part 2: Application to the Chaudière watershed. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(2): 100-108.
- Gachon P., St-Hilaire A., Ouarda T., Nguyen V.T.V., Lin C., Milton J., Chaumont D., Goldstein J., Hessami M., Nguyen T.D., Selva F., Nadeau M., Roy P., Parishkura D., Major D., Choux M. et Bourque A., 2005. A first evaluation of the strength and weaknesses of statistical downscaling methods for simulating extremes over various regions of eastern Canada. Final report. Sub-component, Climate Change Action Fund (CCAF), Environment Canada, Montréal, Québec, Canada.

- Garbouj S.M., Rousseau A.N., Quilbé R. et Savary S., 2006. Étude de l'influence passée de l'occupation agricole du territoire sur l'écoulement du bassin versant de la rivière Chaudière à l'aide d'un système de modélisation intégrée. Rapport N° 887. INRS-ETE, Québec, Canada.
- Gauthier Y., 1996. Rapport technique présenté dans le cadre de GIBSI. Rapport technique n° RT-462a. INRS-Eau, University of Québec, Sainte-Foy, Québec.
- Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), 2001. Bilan 2001 des changements climatiques: les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail au troisième rapport d'évaluation du GIEC.
- Grenier M., 2006. Classification de l'occupation du sol du bassin versant de la rivière Chaudière à l'aide de l'image satellitaire Landsat-5 du 2 septembre 2003. Rapport de projet dirigé (Eau 801) pour la maîtrise en Sciences de l'Eau. INRS-ETE, Québec, Canada.
- Groisman P.Y., Knight R.W., Karl T.R., Easterling D.R., Sun B. et Lawrimore J.M., 2004. Contemporary Changes of the Hydrological Cycle over the Contiguous United States: Trends Derived from In-Situ Observations. *Journal of Hydrometeorology* 5(1):64-85.
- Guillot F., 2004. Étude préliminaire de l'impact du changement climatique sur le régime d'écoulement du bassin versant de la rivière Chaudière, à l'aide du système de modélisation intégrée GIBSI. Rapport n° I-150. INRS-ETE, Sainte-Foy, Québec.
- Hair J.F., Anderson R.E. et Tathman R.L., 1987. Multivariate data analysis with readings. Second Edition. Macmillan Publishing Company, New York, 449 p.
- Hatfield J.L. et Prueger J.H., 2004. Impacts of Changing Precipitation Patterns on Water Quality. *Journal of Soil and Water Conservation* 59(1):51-58.
- Haylock M.R., Cawley G.C., Harpham C., Wilby R.L. et Goodess C.M., 2006. Downscaling heavy precipitation over the United Kingdom: a comparison of dynamical and statistical methods and their future scenarios. *International Journal of Climatology*, 26(10), 1097-0088: 1397-1415.
- Hirst A.C., Gordon H.B. et O'Farrell S.P., 1996. Global warming in a coupled climate model including oceanic eddy-induced advection. *Geophysical Research Letters*, 23(23): 3361-3364.

- Hostert P., Roder A. et Hill J., 2003. Coupling spectral unmixing and trend analysis for monitoring of long-term vegetation dynamics in Mediterranean rangelands. *Remote Sensing of Environment*. **87**(2-3):183-197.
- Johns T.C., Gregory J.M., Ingram W.J., Johnson C.E., Jones A., Lowe J.A., Mitchell J.F.B., Roberts D.L., Sexton D.H.M., Stevenson D.S., Tett S.F.B. et Woodge M.J., 2001. Anthropogenic climate change for 1860 to 2100 simulated with the HadCM3 model under updated emissions scenarios. Hadley Centre Technical Note 22. The Hadley Centre for Climate Prediction and Research, The Met Office, Bracknell, U.K.
- Kite G.W., 1993. Application of a land class hydrological model to climatic change. *Water Resources Research*, 29(7): 2377-2384.
- Kok R., Schneider T., Baatz M. et Ammer U., 1999, Object-based classification and applications in the alpine forest environment, International archive photogrammetry and remote sensing, vol. 32, section 7-4-3 W6
- Kurokawa J., Akiyoshi H., Nagashima T., Masunaga H., Nakajima T., Takahashi M. et Nakane H., 2005. (Effects of atmospheric sphericity on stratospheric chemistry and dynamics over Antarctica. *Journal of Geophysical Research*, 110(D21305): doi:10.1029/2005JD005798.
- L.A.S., 1996. Grassland User's guide for Windows95 and Windows NT, Version 1.0. Logiciels et Applications Scientifiques Inc., Montréal, QC.
- Lavigne M.P., Rousseau A.N., Turcotte R., Laroche A.M., Fortin J.P. et Villeneuve J.P., 2004. Validation and use of a distributed hydrological modeling system to predict short term effects of clear cutting on the hydrological regime of a watershed. *Earth Interactions*, 8(3): 1-19.
- Mailhot A., Rousseau A.N., Salvano E., Turcotte R. et Villeneuve J.P., 2002. Évaluation de l'impact de l'assainissement urbain sur la qualité des eaux du bassin versant de la rivière Chaudière à l'aide du système de modélisation intégrée GIBSI. *Revue des Sciences de l'Eau*, 15(Numéro spécial): 149-172.
- Mailhot A., Rivard G., Duchesne S. et Villeneuve J.-P., 2007. Impacts et adaptations liés aux changements climatiques (CC) en matière de drainage urbain au Québec. Rapport N° R-874, Fonds d'action sur les changements climatiques (FACC), Ressources naturelles Canada et le Consortium OURANOS. INRS-ETE, 131 p.

- Mansor S., Hong W.T. et Shariff A.R.M. (2002) Object oriented classification for land cover mapping, Site de GIS Development, <http://www.gisdevelopment.net>.
- Matheussen B., Kirschbaum R.L., Goodman I.A., O'Donnell G.M. et Lettenmaier D.P., 2000. Effects of land cover change on streamflow in the interior Columbia River Basin (USA and Canada). *Hydrological Processes*, 14(5): 867-885.
- McBean G., Weaver A. et Roulet N., 2001. La science des changements climatiques : où en sont nos connaissances ?. *Isuma* 2(4):16-26.
- Michaud A., 1987. Soil erodibility indices for southern Québec soils derived under variable intensity rainfall simulation. M.Sc. Thesis, Faculty of graduate studies and research. Department of Renewable resources, McGill University, Montreal, Canada.
- Miller S.N., Kepner W.G., Mehaffey M.H., Hernandez M., Miller R.C., Goodrich D.C., Devonald K.K., Heggem D.T. et Miller W.P., 2002. Integrating landscape assessment and hydrologic modeling for land cover change analysis. *Journal of the American Water Resources Association*. 38(4):915-929.
- Moquet J.-S., 2006. Étude de l'influence du changement climatique selon l'occupation du sol agricole actuelle et future sur le régime d'écoulement du bassin versant de la rivière Chaudière à l'aide du système de modélisation intégrée GIBSI. Projet FACC A946. Rapport de stage. INRS-ETE, Québec.
- Mortsch L., Hengeveld H., Lister M., Lofgren B., Quinn F., Slivitzky M. et Wenger L., 2000. Climate change impacts on the hydrology of the Great Lakes - St. Lawrence System. *Canadian Water Resources Journal*, 25(2): 153-179.
- Nearing M.A., 2001. Potential Changes in Rainfall Erosivity in the U.S. with Climate Change During the 21st Century. *Journal of Soil and Water Conservation* 56(3):229-232.
- Nearing, M.A., Pruski F.F. et O'Neal M.R., 2004. Expected Climate Change Impacts on Soil Erosion Rates : A Review. *Journal of Soil and Water Conservation* 59(1):43-50.
- Nolan S.C., van Vliet L.J.P., Goddard T.W. et Flesch T.K., 1997. Estimating storm erosion with rainfall simulator. *Canadian Journal of Soil Sciences* 77:669-676.
- Parry M., 2002. Scenarios for climate impact and adaptation assessment. *Global Environmental Change*, 12(3): 149-153.

- Parson E.A., Corell R.W., Barron E.J., Burkett V., Janetos A., Joyce L., Karl T.R., MacCracken M.C., Melillo J., Morgan M.G., Schimel D.S. et Wilbanks T., 2003. Understanding climatic impacts, vulnerabilities, and adaptation in the United States: Building a capacity for assessment. *Climatic Change*, 57(1): 9-42.
- PCI Geomatics, 2003. *Using OrthoEngine*. Geomatica Prime Help Version 9.0, Richmond Hill.
- Pedersen C., Dubois P. et Hinz C., 2005. MySQL 5, Certification Study Guide. MySQL Press.
- Phillips D.L., 1993. Implications of Climate Change Scenarios for Soil Erosion Potential in the USA. *Land Degredation and Rehabilitation* 4:61-72.
- Poulin A., 2001. Évolution des superficies en terres cultivées et en pâturage sur le bassin de la rivière Chaudière, de 1966 à 1996. Rapport N° R-549-re3. INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec.
- Pruski F.F. et Nearing M.A., 2002. Climate-Induced Changes in Erosion During the 21st Century for Eight U.S. Locations. *Water Resources Research* 38(12), 1298, doi:10.1029/2001WR000493, 2002.
- Quilbé R. et Rousseau A.N., 2007. GIBSI : An integrated modelling system for watershed management - Sample applications and current developments. *Hydrology and Earth System Sciences Discussion* (sous presse)
- Quilbé R., Rousseau A.N., Duchemin M., Poulin A., Gangbazo G. et Villeneuve J.P., 2005. Selecting a calculation method to estimate sediment and nutrient loads in streams: application to the Beaurivage River (Québec, Canada). *Journal of Hydrology*, 326: 295-310.
- Quilbé R., Rousseau A.N., Moquet J.-S., Dibike Y.B. et Gachon P., 2007a. Assessing the effect of climate change on river flow using general circulation models and hydrological modelling. Application to the Chaudière River (Québec, Canada). *Canadian Water Resources Journal* (soumis).
- Quilbé R., Rousseau A.N., Savary S., Ricard S., Moquet J.-S. et Garbouj M.S., 2007b. Hydrological responses of a watershed to historical land use evolution and future land use scenarios under climate change conditions. *Hydrology and Earth System Sciences Discussion* (sous presse).
- Quilbé, R., A.N. Rousseau, F. Guillot et J.-P. Villeneuve, 2004. Étude de la vulnérabilité climatique passée et future de l'agriculture en fonction de l'évolution de

- l'occupation agricole du territoire à l'aide du système de modélisation intégrée GIBSI. Dans : *Eau et changement climatique: comprendre pour mieux s'adapter*, 57^e Congrès annuel de l'association Canadienne des Ressources Hydriques, 16-18 Juin 2004, Montréal, Qc, Canada. 7 pages.
- Reilly J., Tubiello F., McCarl B., Abler D., Darwin R., Fuglie K., Hollinger S., Izaurralde C., Jagtap S., Jones J., Mearns L., Ojima D., Paul E., Paustian K., Riha S., Rosenberg N. et Rosenzweig C., 2003. U.S. agriculture and climate change: New results. *Climatic Change*, 57(1): 43-69.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., Mclood D.K. et Yoder D.C., 1997. Predicting Soil Erosion by Water : A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). US Department of Agriculture, Washington.
- Ressources Naturelles Canada, 2002. Impacts et adaptation liés au changement climatique : perspective canadienne - agriculture. Gouvernement du Canada.
- Ricard S., Rousseau A.N. et Quilbé R., 2006. Vulnérabilité de l'agriculture en réponse aux changements climatiques : étude de l'influence passée et future de l'occupation agricole du territoire sur le régime hydrologique et la qualité de l'eau d'un bassin versant, à l'aide d'un système de modélisation intégrée. FACC A946. Élaboration des scénarios d'occupation du sol. Rapport de stage. INRS-ETE, Québec.
- Roeckner E., Arpe K., Bengtsson L., Christoph M., Claussen M., Dümenil L., Esch M., Giorgetta M., Schlese U. et Schulzweida U., 1996. The atmospheric general circulation model ECHAM4: model description and simulation of present-day climate. Technical Report.218. Max Planck Institut für Meteorology.
- Rogan J., Franklin J. et Roberts D.D., 2002. A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery. *Remote Sensing of Environment*. **80**(1):143-156.
- Rousseau A.N., Lafrance P., Quilbé R., Savary S., Sulis M. et Caron E., 2006. Évaluation de modèles de transport des pesticides pour le développement de normes de performances agro-environnementale atteignables (NPA) à l'échelle des bassins versants. Rapport N° R-786f. INRS-ETE, Québec, Canada.
- Rousseau A.N., Mailhot A. et Villeneuve J.P., 2000b. Problématique, éléments de solution et exemples d'application du système informatisé GIBSI. *Vecteur Environnement*, 33(5): 27-54.

- Rousseau A.N., Mailhot A., Gariépy S., Salvano E. et Villeneuve J.P., 2002. Calcul de probabilités de dépassement d'objectifs environnementaux de rejets de sources ponctuelle et diffuse à l'aide du système de modélisation intégrée GIBSI. *Revue des Sciences de l'Eau*, 15(Numéro spécial): 121-148.
- Rousseau A.N., Mailhot A., Slivitsky M., Villeneuve J.P., Rodriguez M.J. et Bourque A., 2004. Usages et approvisionnement en eau dans le sud du Québec. Niveau des connaissances et axes de recherche à privilégier dans une perspective de changements climatiques. *Canadian Water Resources Journal*, 29(2): 121-134.
- Rousseau A.N., Mailhot A., Turcotte R., Duchemin M., Blanchette C., Roux M., Etong N., Dupont J. et Villeneuve J.P., 2000a. GIBSI - An integrated modelling system prototype for river basin management. *Hydrobiologia*, 422/423: 465-475.
- Rousseau A.N., Quilbé R., Dolbec J.F., Guillot F., Villeneuve J.-P. et Duchemin M., 2005. Vulnérabilité de l'agriculture en réponse aux changements climatiques: étude de l'influence passée future de l'occupation agricole du territoire sur le régime hydrologique et la qualité de l'eau d'un bassin versant, à l'aide d'un système de modélisation intégrée. Rapport d'état d'avancement. Rapport n°R-796-e1. INRS-ETE, Québec, Canada.
- Rousseau A.N., Savary S., Quilbé R. et Tremblay S., 2007. Hydrologic modelling in Bras d'Henri watershed (BH), Quebec, and development of the GIBSI integrated, economic-hydrologic, modelling system. Rapport N° R910. INRS-ETE, Québec, Canada.
- Roy L., Leconte R., Brissette F.P. et Marche C., 2001. The impact of climate change on seasonal floods of a Southern Quebec river basin. *Hydrological Processes*, 15(16), 08856087 (ISSN): 3167-3179.
- Salvano E., Rousseau A.N., Debailleul G. et Villeneuve J.P., 2004. Development of a cost-benefit framework to evaluate the impact of legislation supporting reduction of agricultural pollution at the watershed level. Dans: T.O. Manley, P.L. Manley et T. Mihuc (Eds.), *Lake Champlain in Transition: Partnerships in Progress*. Kluwer Academic, pp. 123-142.
- Salvano E., Rousseau A.N., Debailleul G. et Villeneuve J.P., 2006. An environmental benefit-cost analysis case study of nutrient management in an agricultural watershed. *Canadian Water Resources Journal*, 31(2): 105-122.

- Savary S., Dolbec J.F., Rousseau A.N. et Quilbé R., 2006. Description d'un processus de classification orientée objet pour la cartographie et la détection des changements de l'occupation du sol à l'aide d'images satellitaires du bassin versant de la rivière Chaudière pour la période de 1970 à 2000. Rapport N° 873. INRS-ETE, Québec, Canada.
- Schiewe J., Tufte L. et Ehlers M., 2001. Potential and problems of multi-scale segmentation methods in remote sensing, *GEOBIT/GIS* 6, pp. 34-39.
- Schneider S.H., Easterling W.E. et Mearns L.O., 2000. Adaptation : Sensitivity to Natural Variability, Agent Assumptions and Dynamic Climate Changes. *Climatic Change* 45(1) :203-221.
- Scinocca J.F. et McFarlane N.A., 2004. The variability of modeled tropical precipitation. *Journal of Atmospheric Sciences*, 61: 1993-2015.
- Shaver, G.R., Canadell J., Chapin III F.S., Gurevitch J., Harte J., Henry G., Ineson P., Jonasson S., Melillo J., Pitelka L. et Rustad L., 2000. Global Warming and Terrestrial Ecosystems: A Conceptual Framework for Analysis. *BioScience* 50(10):871-882.
- Simoneau M., Pelletier L. et Martel N., 1996. Le bassin de la rivière Chaudière: profil géographique, sources de pollution et interventions d'assainissement. Dans: Ministère de l'Environnement et de la Faune - Direction des écosystèmes aquatiques (Ed.) Le bassin de la rivière Chaudière: l'état de l'écosystème aquatique, Québec, Canada, pp. 1.1-1.34.
- Simpson A., 1994. Microsoft Access 2. Sybex Inc., San Francisco, CA.
- Smit B. et Skinner M.W., 2002. Adaptation options in agriculture to climate change : a typology. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 7: 85-114.
- Stone M.C., Hotchkiss R.H., Hubbard C.M., Fontaine T.A., Mearns L.O. et Arnold J.G., 2001. Impacts of climate change on Missouri River basin water yield. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5): 1119-1129.
- SWCS, 2003. Conservation Implications of Climate Change : Soil Erosion and Runoff From Cropland. A Report from the Soil and Water Conservation Society, 945 Southwest Ankeny Road Ankeny, Iowa 50021, 25 pages. (Site Internet : http://www.swcs.org/t_advocacy_action2003).

- Thacker P.D, 2004. As the Planet Heats Up : Will the Topsoil Melt Away ?. *Journal of Soil and Water Conservation* 59(1):12A-15A.
- Trinh N.B., 2005. Impact des Changements Climatiques sur le Régime Hydrique de la Rivière Chaudière. Développement d'une Approche Méthodologique Basée sur les MCG, le Downscaling & le Système de Modélisation GIBSI. Rapport de mini-projet dans le cadre du programme de doctorat en Sciences de l'Eau de l'INRS-ETE. INRS-ETE, Québec.
- Troeh F.R., Hobbs J.A et Donahue R.L., 2004. Water Quality and Pollution, Chapter 17 In : Soil and Water Conservation : for Productivity and Environmental Protection. Fourth Edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Turcotte R., Fortin J.-P., Rousseau A.N., Massicotte S. et 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): 225-242.
- Villeneuve J.P., Blanchette C., Duchemin M., Gagnon J.F., Mailhot A., Rousseau A.N., Roux M., Tremblay J.F. et Turcotte R., 1998a. Rapport Final du Projet GIBSI : Gestion de l'Eau des Bassins Versants à l'Aide d'un Système Informatisé. Mars 1998 : Tome 1.R-462. INRS - Eau, Sainte-Foy.
- Villeneuve J.P., Blanchette C., Duchemin M., Mailhot A., Rousseau A.N., Roux M., Trépanier S. et Turcotte R., 1998b. Document relatif aux commentaires du Comité de suivi du projet GIBSI.462 Add1. INRS - Eau, Sainte-Foy.
- Wilby R.L. et Wigley T.M.L., 1997. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*, 21(4): 530-548.
- Wilby R.L., Dawson C.W. et Barrow E.M., 2002. SDSM - a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17(2): 145-157.
- Wilby R.L., Hay L.E. et Leavesley G.H., 1999. A comparison of downscaled and raw GCM output: implications for climate change scenarios in the San Juan River basin, Colorado. *Journal of Hydrology*, 225: 67-91.
- Wilby R.L., Hay L.E., Gutowski W.J.J., Arritt R.W., Takle E.S., Pan Z., Leavesley G.H. et Clark M.P., 2000. Hydrological responses to dynamically and statistically downscaled climate model output. *Geophysical Research Letters*, 27(8): 1199-1202.

-
- Wischmeier W.H. et Smith D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning. Agricultural Handbook No. 537. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Wood A.W. et Maurer E.P., 2002. Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. *Journal of Geophysical Research*, 107(D20): 4429.
- Wood A.W., Leung L.R., Sridhar V. et Lettenmaier D.P., 2004. Hydrologic Implications of Dynamical and Statistical Approaches to Downscaling Climate Model Outputs. *Climatic Change*, 62(1 - 3): 189-216.
- Yalin Y.S., 1963. An expression for bed-load transportation. *Journal of the Hydraulics Division ASCE*, 89: 221-250.
- Yeo I., Gordon S.I. et Guldman J.M., 2004. Optimizing patterns of land use to reduce peak runoff flow and nonpoint source pollution with an integrated hydrological and land-use model. *Earth Interactions*, 8(6): 1-20.
- Yuan D. et Elvidge C, 1998. NALC Land Cover Change Detection Pilot Study: Washington D.C. Area Experiments. *Remote Sensing of Environment*. **66**(2):166-178.
- Zhao G.Z., Lin G. et Warner T, 2004. Using Thematic Mapper data for change detection and sustainable use of cultivated land: a case study in the Yellow River delta, China. *International Journal of Remote Sensing* **25**(13):2509-2522.

ANNEXE A. CALAGE DES MODÈLES DE GIBSI SUR LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE

A.1 MODÈLE HYDROLOGIQUE

Le modèle hydrologique de GIBSI, HYDROTEL (2001b), simule l'interpolation des données météorologiques, l'évolution du couvert nival, l'évapotranspiration potentielle, le bilan d'eau vertical, l'écoulement sur la partie terrestre du bassin et l'écoulement par le réseau hydrographique. Son application et son calage sur le bassin versant de la rivière Chaudière sont décrits par Fortin *et al.* (2001a). Les mesures des stations hydrométriques situées à St-Lambert sur la rivière Chaudière, et aux confluent des rivières Famine et Beaurivage avec la rivière Chaudière, ont été utilisées pour caler et valider le modèle et contrôler la qualité des simulations. Le bassin hydrographique en amont de St-Lambert couvre 5820 km², soit environ 85% du bassin complet de la Chaudière. Les superficies des rivières Beaurivage (vocation plutôt agricole) et Famine (vocation plutôt forestière) couvrent quant à elles respectivement 709 km² et 691 km², soit environ 10% du bassin complet de la Chaudière. Les résultats sont présentés à la Figure A.1. Ils sont excellents aussi bien en période de calage qu'en période de validation, avec des coefficients de Nash-Sutcliffe toujours supérieurs à 0,8.

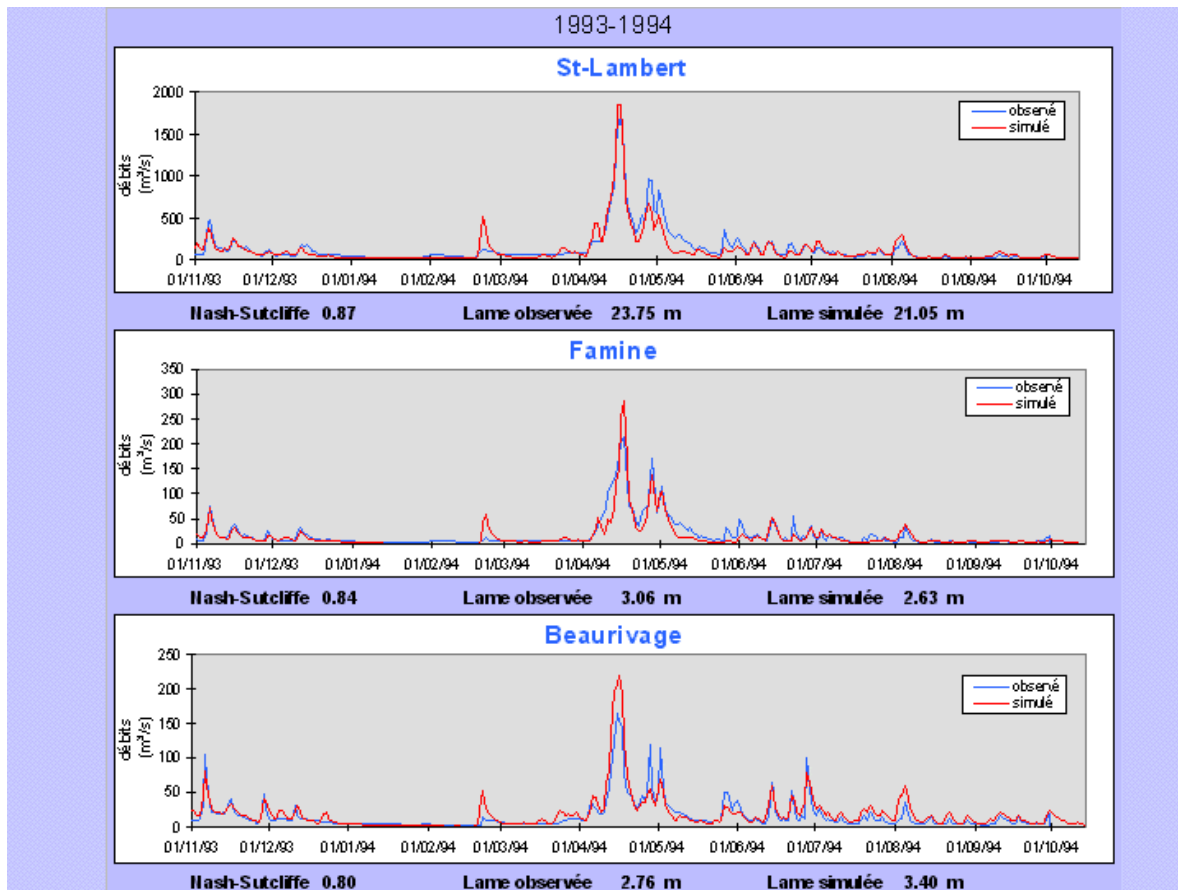


Figure A.1: Résultat du calage et de la validation de HYDROTEL sur plusieurs sous-bassins du bassin versant de la rivière Chaudière

A.2 MODÈLE D'ÉROSION

Le modèle d'érosion hydrique de GIBSI repose en partie sur l'utilisation du modèle MODÉROSS de Duchemin *et al.* (2001a) et comprend deux parties : (i) le modèle d'érosion au sol qui est inspiré de l'équation universelle de perte en sol révisée RUSLE (Renard *et al.*, 1997, Wischmeier and Smith, 1978) adaptée sur un pas de temps journalier et en y ajoutant certaines particularités issues d'autres modèles (par exemple, la capacité de transport du ruissellement selon l'équation de Yalin (Yalin, 1963) ; et (ii) le modèle d'érosion et de transport des sédiments en rivière qui est basé sur le modèle ROTO adapté de SWAT. Les équations du modèle ne seront pas décrites en détail ici (voir Villeneuve *et al.* 1998a).

Le modèle d'érosion doit être calé en priorité, avant les modèles de transport de polluants, puisqu'il conditionne le transport particulaire des polluants (nutriments, pathogènes et pesticides). Le calage du modèle a été réalisé (contribution majeure en parallèle de l'INRS-ETE

dans le cadre d'un projet FQRNT - Rousseau *et al.*, 2005b). Nous avons utilisé les données de débit et de concentration en sédiments à l'exutoire du sous-bassin de la Beaurivage pour l'année 1989. Les points de comparaison les plus fiables restent donc les points de mesure.

Nous cherchons ici à reproduire à la fois la charge annuelle de sédiments et la dynamique des charges journalières. Toutefois, il ne faut pas oublier que le modèle utilisé pour l'érosion annuelle est originalement un modèle sur base annuelle qui a été adapté à un pas de temps journalier. De plus, les résultats dépendent des débits simulés par HYDROTEL qui, s'ils sont la plupart du temps très proches des débits mesurés, les sous-estiment parfois, notamment en période d'étiage. Par conséquent, une bonne reproduction de la dynamique journalière des concentrations et des charges de sédiments est plus difficile à obtenir que pour la charge annuelle.

Les résultats pour les charges annuelle et saisonnière sont présentés au Tableau A.1. Plusieurs méthodes d'estimation ont été utilisées pour calculer les charges en sédiments afin de comparer avec les résultats de simulation : le ratio estimator (voir Quilbé *et al.*, 2005) et un estimateur statistique en développement (Mailhot *et al.*, 2007 en préparation). On constate que les résultats du modèle sont proches de la moyenne estimée par la méthode statistique, excepté pour l'hiver.

Tableau A.1: Résultats du calage pour les charges annuelles et saisonnières de sédiments sur l'année 1989 à l'exutoire de la rivière Beaurivage (en kg/ha)

Période	Ratio Estimator	Estimation statistique			Simulation
		Moyenne	Quantile 10%	Quantile 90%	
Hiver (DJF)	1,66	1,60	1,35	1,87	0,17
Printemps (MAM)	70,31	293,51	151,86	480,79	305,96
Été (JJA)	6,32	6,99	5,29	9,08	3,49
Automne (SON)	7,14	15,67	11,08	21,28	11,31
Charge annuelle	85	316,92	175,04	501,13	320,93

Si l'on compare les charges journalières (Figure A.2 et Figure A.3), on constate que la dynamique générale tout au long de l'année est relativement bien reproduite par le modèle. En particulier, les fortes charges du printemps sont bien simulées, les résultats de simulations étant toujours à l'intérieur de l'intervalle de confiance et proches des valeurs mesurées. En revanche, en période d'étiage (hiver et été), le modèle tend à produire des diminutions rapides de la concentration alors que les mesures restent relativement stables. Cela est probablement dû d'une part à la moins bonne performance du modèle hydrologique qui sous-estime le débit lors de ces périodes, et d'autre part à la grande incertitude qui accompagne les mesures de

concentration à des niveaux aussi faibles (le seuil de détection est de 1 mg/L, ce qui signifie qu'une valeur mesurée de 1 mg/L peut correspondre à une concentration réelle nettement inférieure à cela).

La validation temporelle et spatiale du modèle s'est avérée satisfaisante, excepté sur des petits sous-bassins situés en amont (ex : bassin du Bras d'Henri) avec une nette sous-estimation des charges. Cela est sans doute dû à l'échelle spatiale de calcul. Un calage distribué du modèle pourrait être envisagé afin de remédier à ce problème.

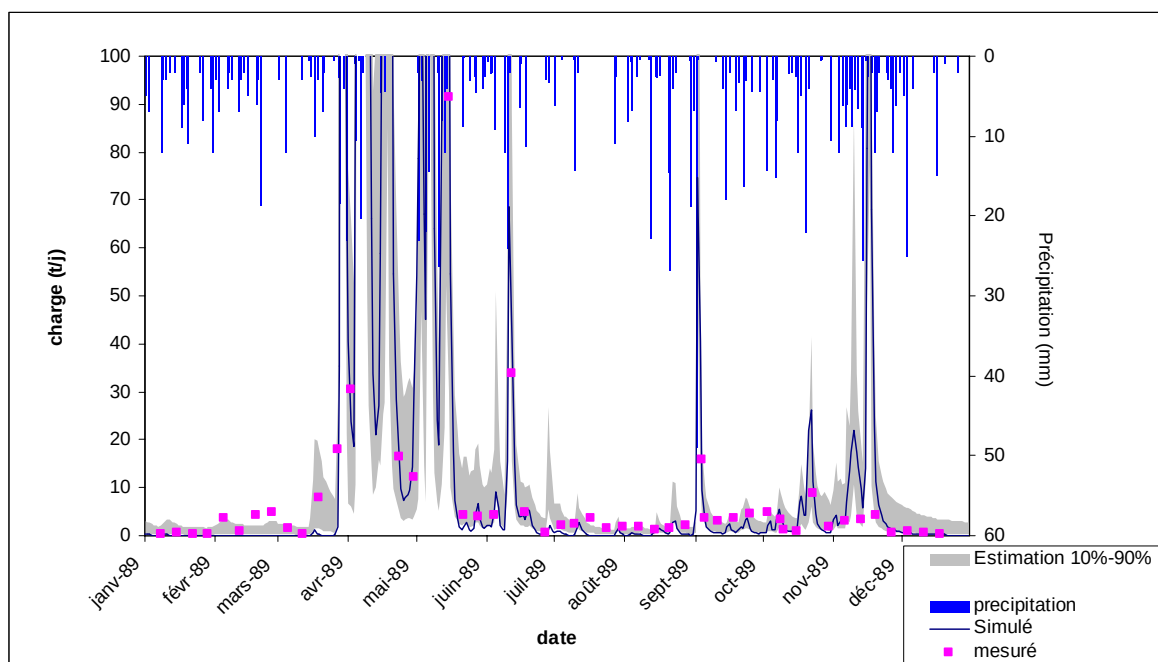


Figure A.2: Comparaison des charges journalières simulées (GIBSI) et observées pour l'année 1989 à l'exutoire de la Beaurivage (tronçon 1644)

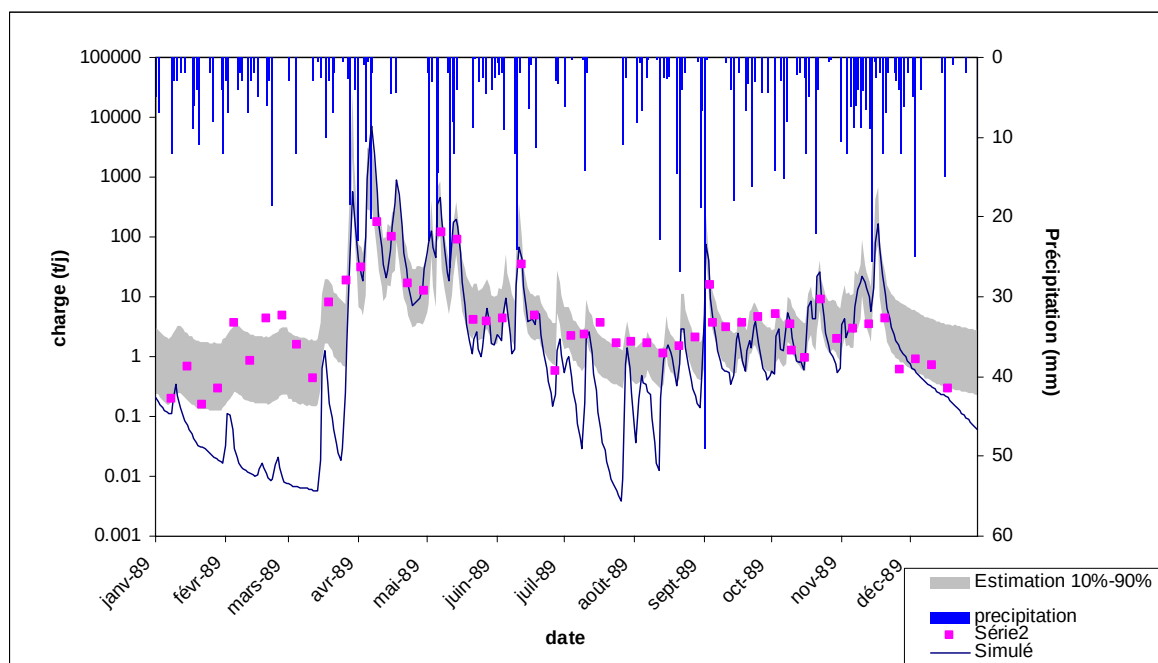


Figure A.3: Comparaison des charges journalières simulées (GIBSI) et observées avec une échelle logarithmique pour l'année 1989 à l'exutoire de la Beaurivage (tronçon 1644)

A.3 MODÈLES DE TRANSPORT DE POLLUANTS ET DE QUALITÉ DE L'EAU

Villeneuve *et al.* (1998b) ont comparé les concentrations mesurées et simulées de nitrates et de phosphore et trouvé que les erreurs étaient en majorité inférieures à 0,1 mgN/L et 0,01 mgP/L respectivement. Les résultats étaient moins satisfaisants pour la DBO₅. Des améliorations des modèles de transport de nutriments et de pesticides ont été réalisées récemment dans le cadre d'autres projets de recherche (voir section 4.4) et leur calage est actuellement en cours.

ANNEXE B. CARACTÉRISTIQUES DES CARTES D'OCCUPATION DU SOL DE 1977

B.1 CARACTÉRISTIQUES CARTOGRAPHIQUES

Échelle cartographique : 1 : 50 000

Format de données : TIFF géoréférencé (inclut un fichier TFW)

Systèmes de coordonnées : 3 systèmes sont disponibles

- MTM zone 7
- UTM zone 19
- Géographique en degrés décimal

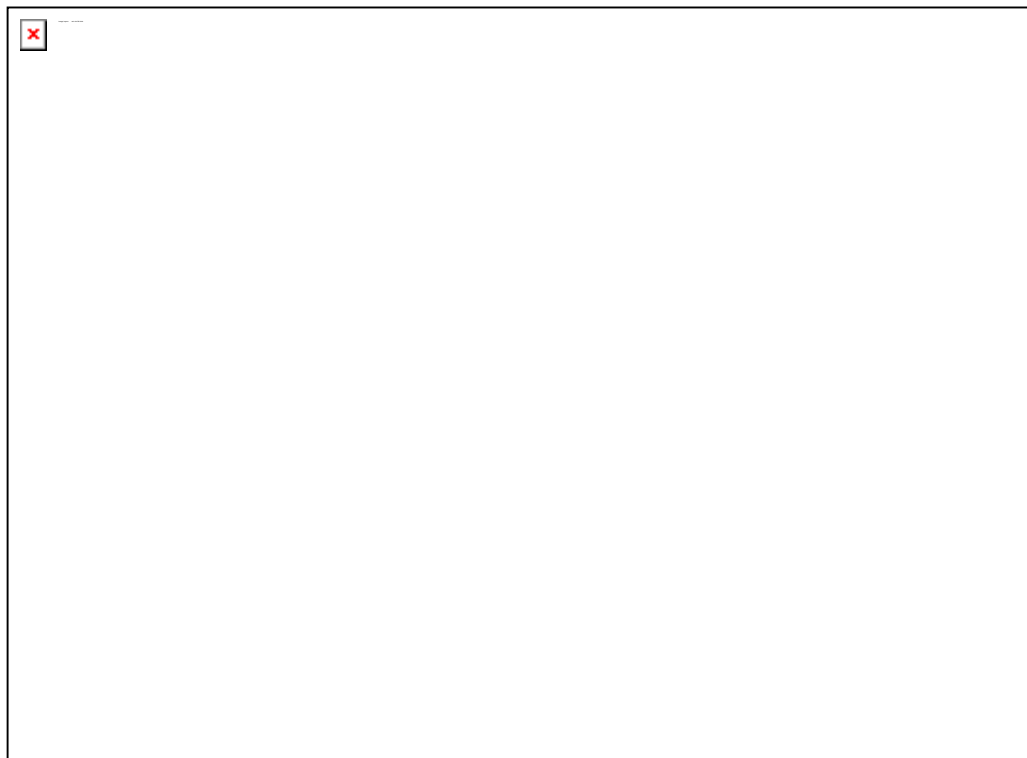


Figure B.1 : Feuille 21L11 présentant l'utilisation du sol pour l'année 1977



Figure B. 2 : Agrandissement d'un feuillet d'utilisation du sol de 1977

B.2 DÉFINITIONS DES DONNÉES THÉMATIQUES CONTENUES DANS LES CARTES D'OCCUPATION DU SOL DU MAPAQ DE 1977 (SOURCE : MAPAQ)

B.2.1. Affectation des terres agricoles

Terre cultivées

P : Grandes cultures, pâturage permanent et pâturage en rotation

Pr : Grandes cultures, pâturage en rotation, pâturage permanent,

Pc : Foin et pâturage négligés

On entend par grande culture, les cultures de céréales, de fourrage et par extension les pâturages. Les céréales sont généralement bien connues et faciles à identifier : blé, avoine, orge, céréales mélangées (avoine, orge et/ou blé), maïs. Le seigle et le sarrasin sont rares au Québec.

Comme le maïs grain et le maïs fourrager entrent dans la catégorie des grandes cultures, ils ne sont pas distingués. Cependant, le maïs sucré est identifié et classé comme culture maraîchère, ce qui demande une certaine vigilance surtout quand les plantes sont encore jeunes. Le fourrage est surtout composé de foin, (mil, trèfle, luzerne, *etc.*).

Il existe plusieurs types de pâturages : les pâturages permanents, les pâturages dans un cycle de rotation des cultures, les pâturages sur des terrains incultivables et les pâturages sur des terres semi-abandonnées. Les deux premiers types entrent dans la classe P et les deux autres sont traités plus loin dans ce document avec le symbole K. Par pâturage permanent, on entend ici des champs semés et entretenus en fonction de cette utilisation, c'est-à-dire qu'ils sont engraisés, soumis à la fauche des mauvaises herbes, *etc.* Les pâturages dans un cycle de rotation font partie du cycle traditionnel céréales-foin-pâturage ou de ses variations.

La distinction entre Pr et Pc réfère à la qualité et à la densité des plantes fourragères. Un champ de céréales et un pâturage permanent sont toujours classés Pr. C'est le cas également des champs de foin et des pâturages pendant un cycle de rotation normal. Les plantes fourragères sont relativement abondantes et sans trop de mauvaises herbes.

Le symbole Pc s'applique à un champ négligé et laissé à lui-même pendant un temps qui dépasse la période normale entre les labours. La densité des plants de mil est faible et inégale, les mauvaises herbes sont nombreuses, les parties des champs les plus mal drainées sont couvertes de carex et des scirpes et on trouve parfois une mince couche de mousse sous les graminées.

Pour entrer dans cette catégorie, un champ doit être récolté ou pâturé. Sinon, il sera classé comme friche récente (symbole K).

La distinction entre Pr et Pc n'est pas toujours évidente du premier coup d'œil. Souvent le contexte agricole donnera de bons indices. Parmi ces indications, il y a le petit nombre de fermes sur lesquelles se trouvent des animaux par rapport aux superficies en foin, la faible proportion de terre en céréales, la présence de friche dans des champs voisins, un contexte de fermes abandonnées et semi-abandonnées.

H : Horticulture

Hm : Culture de légumes pour la mise en marché traditionnelle

Hc : Culture de légumes pour les conserveries

Hf : Petits fruits

La catégorie Hc se retrouve principalement, sinon exclusivement dans la plaine de Montréal. Les principaux légumes de conserverie sont les haricots, les pois verts et le maïs sucré. Les principaux indices qui permettent de les reconnaître sont la grande étendue des champs ainsi cultivés et la présence d'une conserverie dans la région. Le maïs sucré pour conserverie se distingue mal du maïs fourrager et du maïs grain du moins au début de l'été.

A : Cultures spéciales

At : Tabac

La culture du tabac se fait généralement en rotation avec de la jachère ou des céréales. Chaque champ est le plus souvent trop petit pour être cartographié séparément et le symbole At englobe tous ces champs puisque la culture du tabac constitue la principale utilisation.

As : Betterave sucrière

Ab : Bleuetière

On entend ici par bleuetière les terrains déboisés en vue de la récolte de bleuet indigène. N'entrent pas dans cette classe ni les vieux « bûchés » ni les « brûlés » qui produisent des bleuets.

Ao : Graines oléagineuses

Ce sont surtout le lin, le soya et le colza.

Af : Floriculture, pépinières, gazon

Ap: Pomme de terre

G: Verger en production

Seuls les vergers en production sont identifiés comme vergers. Les vergers abandonnés sont classés U.

Terre agricoles non cultivées

K : Pâturage semi-naturel et friche récente

Par pâturage semi-naturel on réfère aux ravins, aux sols pierreux, aux pentes fortes, qui ont été défrichés, qui ne sont pas cultivés et qui servent de pâturage. On peut y trouver quelques broussailles et des arbres dispersés. Toutefois, si on a de bonnes raisons de croire que les

broussailles envahissent le terrain définitivement, elles sont classées comme U selon les critères énoncés plus loin.

La friche récente comprend surtout des terrains qui n'ont pas été cultivés depuis longtemps et qu'on considère comme abandonnés. Ils sont couverts principalement de mauvaises herbes et de graminées auxquelles s'ajoutent souvent quelques broussailles. Il arrive parfois que des animaux vont paître dans ces terrains. Ils sont quand même classés comme K. Si les broussailles occupent plus de 10% de la superficie du terrain et dépassent généralement quatre pieds de hauteur, elles sont classées comme U.

U : Friche embroussaillée

Ce sont les broussailles qui caractérisent ces terrains bien que les foins négligés, les graminées et les mauvaises herbes peuvent occuper la majeure partie de la surface. Ce sont généralement des terres agricoles abandonnées dont l'évolution correspond à un stade intermédiaire entre la friche récente et le boisé.

La démarcation entre la friche embroussaillée et le boisé ne peut s'établir selon des critères absolument précis. On peut seulement donner des repères qui serviront de guide. On considère comme boisé (T) un terrain dont les arbustes et les arbres atteignent une hauteur de 20 pieds et /ou couvrent plus de 80% de la superficie du terrain. Autrement, ils sont considérés comme friche embroussaillée (U).

B.2.2. Affectation urbaine et para-urbaine

B : Affectation urbaine et para-urbaine

Distinction à faire en dehors des agglomérations

Br : Groupement de résidences

Bc : Commerce, industrie

Bi : Institution

Ba : Autoroute, aéroport, poste de transformation de l'électricité, *etc.*

Les agglomérations urbaines sont cartographiées comme telle (symbole B) et ne se distinguent pas de leurs différentes fonctions, mais les grandes étendues de friches et les terres en culture en bordure des villes ont été cartographiées même si elles sont séparées de la campagne voisine par un mince ruban de terrain urbanisé.

En dehors des agglomérations, différents types d'affectation urbaine et para-urbaine sont cartographiées :

les groupements de résidences à la croisée de deux routes, ou le long d'un rang (symbole **Br**);

les commerces, les entrepôts, les usines (symbole **Bc**)

L'intérieur des parcs industriels est traité comme les autres territoires. Les usines portent les symboles Bc, la friche récente le symbole K, *etc.* Les limites des parcs ont été transférées sur la carte finale à l'aide de documents du ministère de l'Industrie et du Commerce.

les institutions comme les écoles, les maisons de religieux, les églises, les cimetières, les hôpitaux, *etc.* (symbole **Bi**);

les autoroutes, les aéroports, les dépotoirs, les barrages, les postes de transformation d'électricité, en résumé, des affectations reliées à des services publics (symbole **Ba**).

Dans les cas d'affectations mixtes, seules celles qui dominent sont identifiées. Par exemple, le symbole Br sera donné à un groupe de résidences le long d'un rang même s'il s'y trouve quelques commerces et quelques maisons de ferme.

E : Extraction

Em : Mine

Et : Tourbière exploitée

Ep : Carrière de pierre

Es : Carrière de sable

Ea : Enlèvement de la couche arable

La classification de ces phénomènes présente peu de difficulté. Il est généralement facile de déterminer si une mine ou une carrière est en activité ou abandonnée. Les carrières de sable à moitié envahies par les broussailles où des individus vont occasionnellement chercher un peu de sable ne sont pas considérées comme en activité.

B.2.3. Affectation récréative

O : Récréation de plein air, villégiature, site historique

Il faut noter d'abord que ce symbole n'est pas utilisé qu'à l'extérieur des agglomérations urbaines. Il s'applique à toutes les activités récréatives : terrains de golf, de pique-nique, de camping, pistes de course, jardin botanique, camp de vacances, *etc.* Les groupements de chalets entrent également dans cette classe.

Les parcs régionaux réservés exclusivement pour des activités récréatives sont délimités et toute leur surface est placée sous le symbole O. Pour les grands parcs provinciaux, la situation est différente. En règle générale, on y trouve des activités récréatives et de l'exploitation forestière. Ces parcs sont délimités sur la carte finale par un symbole approprié et l'intérieur est traité comme les autres territoires.

B.2.4. Autres affectations

T : Forêt et boisé

Sous ce symbole est placé toutes les étendues forestières, y compris, les brûlés, les terrains qui ont fait l'objet d'une coupe à blanc, les boisés dont les arbres ont poussé naturellement et qui ont fait l'objet de travaux sylvicoles.

Tp : Arbres plantés

M : Marais, marécage, tourbière inexploitée et sans arbre

Le partage entre la forêt et la tourbière se situe au moment où la taille et/ou la densité des arbres font que le paysage n'en est plus un de forêt.

L : Roc à nu

Seul les masses à nu qui par leur étendue et leur situation en milieu rural ayant une certaine signification sont identifiées.

S : Sable à nu

X : Terrain inutilisé à la suite d'une utilisation autre qu'agricole

Ce symbole comprend les carrières désaffectées, les déchets de mines et de scieries, les cicatrices d'enlèvement de la couche arable, *etc.*

Z : Surface d'eau

ANNEXE C. TRAITEMENT ET CLASSIFICATION DES IMAGES SATELLITAIRES

C.1 PROBLÉMATIQUE RELIÉE À LA TÉLÉDÉTECTION ET AU CONTEXTE DU PROJET

Différentes problématiques surgissent de par la nature du projet et rendent celui-ci singulier par rapport à de nombreux travaux que l'on retrouve dans la littérature et qui sont basés sur l'étude des changements sur le territoire à partir de l'analyse d'images satellitaires. Ces particularités méritent d'être présentées pour juger du défi que revêt ce projet et des limitations qu'elles peuvent engendrer.

Tout d'abord, l'étude n'a pas exclusivement pour but de détecter les changements qui ont eu lieu sur le bassin. Il s'agit aussi d'obtenir des cartes de l'occupation du sol relativement fiables pour les années dont l'on possède les images (1976, 1981, 1987, 1990, 1995, 1999 et 2003). Ces cartes doivent ensuite être incorporées dans le modèle de simulation GIBSI.

Ensuite, on cherche à définir la nature du changement de l'utilisation (ex : champs de maïs devenu zones urbaines). Contrairement à d'autres études (Zhao *et al.*, 2004; Yuan et Elvidge, 1998; Rogan *et al.*, 2002; Miller *et al.*, 2002; Hoster *et al.*, 2003), le projet n'a pas simplement pour objectifs d'identifier le changement ou l'absence de changement ou encore l'augmentation ou la diminution de fréquence d'une classe d'occupation du sol particulière. Il faut en effet classifier les images en employant les mêmes classes d'utilisation du sol pour être en mesure de les comparer, d'identifier de quelle façon les changements d'occupation se sont produits et, par le fait même, quelles classes ont augmenté en superficie et au détriment de quelles autres.

Un autre facteur à considérer est le fait que les images proviennent de différents capteurs. Même si ces capteurs font partie du même programme (Landsat), certains problèmes au niveau des comparaisons découlent des différences de caractéristiques entre les capteurs (Tableau C.1). Ainsi, les scènes ne possèdent pas toutes les mêmes résolutions spatiales et spectrales. Cette situation peut affecter le projet de diverses manières.

Tableau C.1 : Caractéristiques des capteurs

Capteur	Bandes	Résolutions
Landsat-2 MSS	Bande 1 (0,50µm - 0,60µm)	80m
	Bande 2 (0,60µm - 0,70µm)	
	Bande 3 (0,70µm - 0,80µm)	
	Bande 4 (0,80µm - 1,10µm)	
Landsat-5 TM	Bande 1 (0,45µm - 0,52µm)	30m
	Bande 2 (0,52µm - 0,60µm)	
	Bande 3 (0,63µm - 0,69µm)	
	Bande 4 (0,76µm - 0,90µm)	
	Bande 5 (1,55µm - 1,75µm)	
	Bande 7 (2,08µm - 2,35µm)	
	Bande 6 Th (10,40µm - 12,50µm)	120m
Landsat-7 ETM+	Bande 1 (0,45µm - 0,52µm)	30m
	Bande 2 (0,52µm - 0,60µm)	
	Bande 3 (0,63µm - 0,69µm)	
	Bande 4 (0,76µm - 0,90µm)	
	Bande 5 (1,55µm - 1,75µm)	
	Bande 7 (2,08µm - 2,35µm)	
	Bande 6 Th (10,40µm - 12,50µm)	120m
	Bande 8 Pan (0,59µm - 0,80µm)	13m X 15m

En premier lieu, le résultat des classifications est lié à la dimension des pixels. En effet, des objets peuvent être identifiés à une résolution plus fine ou se retrouver complètement fondus avec les objets qui les entourent à une résolution plus grossière. La Figure C.1 illustre bien ce phénomène. Sur celle-ci, on observe l'ampleur de la différence entre un pixel de 80 mètres et un pixel de 30 mètres. Il est donc évident que la classification de l'image qui possède une résolution spatiale de 30 m se fera à un niveau de détail plus élevé que celle qui a une résolution de 80 m. Les pixels de la première regrouperont ainsi moins d'objets hétérogènes et les probabilités qu'ils représentent un seul type d'occupation du sol sont plus fortes.

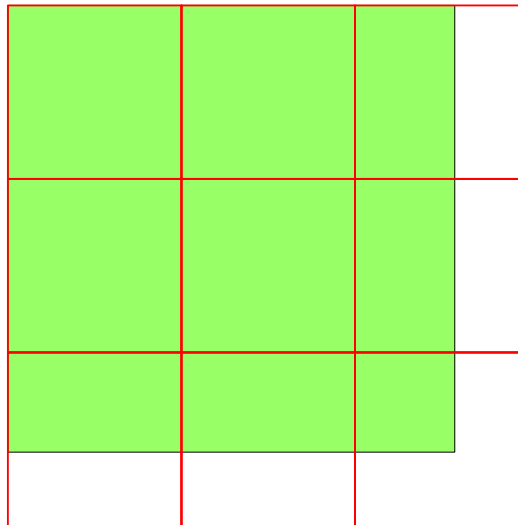


Figure C.1 : Comparaison des résolutions spatiales des capteurs MSS, TM et ETM+

En second lieu, la différence de résolutions spatiales entre les capteurs rend plus complexe l'étude des changements d'utilisations du sol car la comparaison directe des images devient difficile. En effet, il faut rééchantillonner les images pour obtenir des résolutions compatibles si l'on veut appliquer des analyses spatiales de comparaison sur les images. Cette opération de rééchantillonnage peut entraîner l'attribution de valeurs erronées aux pixels résultants qui induiront possiblement des erreurs d'interprétation dans l'évolution de l'occupation du sol.

Enfin, le nombre de bandes spectrales ainsi que la sensibilité des capteurs diffèrent d'un satellite à l'autre. Ce facteur est moins important car les images seront classifiées de manière indépendante et la comparaison des scènes se réalisera a posteriori. Néanmoins, il est important de saisir que la technologie qui caractérise le capteur Landsat-2, développé au début des années 1970, est différente de celle employée dans le satellite Landsat-7. Notamment, l'absence de bande dans le moyen infrarouge sur le capteur MSS (Bande 5 sur le capteur TM ou ETM+) contraindra sensiblement l'identification et la séparabilité de classe présentant des espèces végétales qui sont caractérisées par une forte réponse dans de telle longueur d'onde. Finalement, l'amélioration de la résolution spatiale conjointe à l'augmentation du registre spectral ont contribué, au cours des trente dernières années, au rehaussement de la qualité des images satellitaires. Cette évolution permet une plus grande flexibilité lors des classifications, ce qui augmente leur fiabilité.

Le peu d'information terrain disponible complexifie également la réalisation du projet. Effectivement, les classifications sont réalisées de manière plus contrôlée (classification de type dirigée) lorsque l'on possède des connaissances a priori sur le territoire étudié. Dans le cas contraire, la classification se base uniquement sur les propriétés spectrales et l'analyste doit

interpréter et associer des thématiques aux classes créées. Sans cette information terrain, il devient aussi plus difficile d'évaluer la précision des classifications. Dans ce cas-ci, les seules données que l'on possède sur l'utilisation du territoire sont celles provenant des cartes d'occupation du sol du MAPAQ pour l'année 1977. Il serait intéressant d'effectuer la comparaison entre les cartes d'occupation du sol du MAPAQ et les résultats de classifications, toutefois la structure de ces cartes complexifie grandement leur utilisation. De plus, les classes thématiques des cartes du MAPAQ ne correspondent pas entièrement à celles employées dans le système de modélisation intégrée GIBSI. Ainsi, pour certaines occupations, les classes utilisées dans GIBSI présentent un niveau de détail plus élaboré que celles retrouvées sur les cartes du MAPAQ. Le cas contraire est aussi observé.

C.2 PRÉTRAITEMENTS

Les opérations de prétraitements sont essentielles pour exploiter efficacement les données satellitaires. Elles permettent de fonctionner dans un environnement géoréférencé et de pouvoir utiliser des images dépourvues de défauts visuels. Sous le terme de prétraitements, deux catégories d'opération sont regroupées, les transformations radiométriques et les transformations géométriques.

C.2.1. Transformations radiométriques

L'application de transformations radiométriques sur les images peut viser deux objectifs distincts : le rehaussement de la qualité de l'image (la restauration) et la transformation du contenu de la scène en valeurs physiques quantifiables (la transformation radiométrique). Dans le cadre du projet, ce type de transformation a été employé dans l'unique but de rehausser la qualité de certaines images. La conversion des valeurs de compte numérique des pixels en valeurs physiques ne paraît pas nécessaire car les classifications des images sont indépendantes et les comparaisons sont réalisées avec des images classifiées.

La restauration des scènes est effectuée pour attribuer une valeur estimée aux pixels pour lesquels l'information radiométrique est erronée ou manquante (Caloz et Collet, 2001). Ainsi, l'image de 1976 et l'image de 1990 contiennent des séries de pixels dont l'information est altérée, ce qui détériore l'aspect visuel de ces images (Figure C.2). Ces anomalies peuvent provenir de différentes sources : trouble mécanique du capteur lors de l'acquisition des données, erreur de transmission du signal du satellite au sol, *etc.* Dans ce cas-ci, elles se présentent sous la forme d'une série de pixel ayant des valeurs très basses. L'image de 1976 présente trois lignes affectées dans la bande 2 tandis que l'image de 1990 en renferme trois dans la bande 2 et trois autres dans la bande 3.

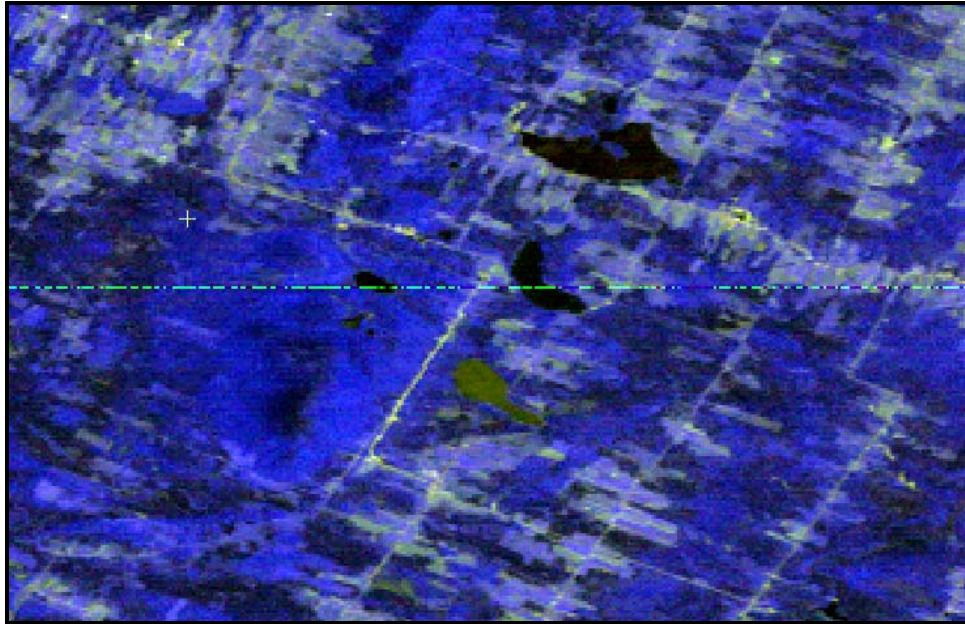


Figure C.2 : Ligne de pixel qui présente des anomalies sur l'image de 1976

Le module XPace du logiciel PCI Geomatica a servi à corriger ces anomalies. Ainsi, la fonction «LRP» de ce module permet d'utiliser les informations radiométriques des pixels voisins de ceux qui contiennent des données erronées. Il est alors possible de déterminer si l'on veut assigner les valeurs de compte numérique du pixel de la ligne supérieure ou la ligne inférieure ou encore une moyenne des deux au pixel à corriger. Dans la mesure du possible, la moyenne du pixel supérieur et celui inférieur a été employée pour calculer la valeur du pixel erroné. Cependant, les données manquantes de l'image de 1990 se présentaient sur trois lignes consécutives, ce qui rendait impraticable l'application de la méthode de substitution moyenne.

C.2.2. Transformations géométriques

Les transformations géométriques consistent à modifier la géométrie implicite de l'image de façon à ce qu'elle soit le plus près possible d'une planimétrie cartographique (Caloz et Collet, 2001). Ces transformations rendent possible l'assignation de coordonnées aux pixels de l'image afin de situer dans un espace de référence spatial la scène acquise par le capteur.

Une méthode globale de transformation géométrique a été employée, la transformation polynomiale. La méthode est dite globale car elle ne considère pas les données sur le relief du territoire. La transformation polynomiale s'appuie sur les principes des transformations de

systèmes de référence spatiale. Ainsi, le système S' de l'image initiale, exprimé en unité de pixels et de lignes, est transformé en un système S géoréférencé dont les axes de coordonnées correspondent à ceux de la cartographie locale utilisée. Dans ce cas-ci, le système de coordonnées géographiques de référence employé est la projection Universal Transverse Mercator (UTM), zone 19 et le datum de référence est le NAD83.

Le module Orthoengine du logiciel PCI Geomatica V.9.0 a servi à réaliser les transformations géométriques de toutes les scènes acquises (1976, 1981, 1987, 1990, 1995, 1999 et 2003). Pour résoudre le jeu d'équations d'une transformation polynomiale, il est essentiel de connaître un minimum de coordonnées des pixels dans l'image. Dans le cas d'une transformation de degré 2, celle qui offre des résultats optimaux parmi les transformations par polynômes, ce minimum est de six (6) pixels connus. Il faut donc six (6) couples de coordonnées (x et y) pour compléter la transformation. Cette connaissance spatiale provient de l'image de 1995 qui a été géoréférencée lors des travaux de Gauthier (1996). Ainsi, la procédure consiste à sélectionner des points dits d'appui dans l'image de 1995 et leur correspondance dans l'image à géoréférencer. Il est important de choisir un couple de points facilement identifiable sur les deux scènes. Il est aussi recommandé de récolter un plus grand nombre de points d'appui que le minimum nécessaire. Donc, une quinzaine de points, en moyenne, sont sélectionnés pour faire la géoréférence de chacune des images. Les points d'appui sont collectés sur l'ensemble du bassin et le plus uniformément possible pour limiter les distorsions qui pourraient survenir lors de la transformation. Des erreurs résiduelles (Root Mean Square) sont issues de la transformation polynomiale. Celles-ci nous indiquent avec quelle précision la conversion de système s'effectue. Idéalement, elles doivent être inférieures à 1 pixel avant de lancer la transformation. Cette condition est respectée pour les sept images géoréférencées. À noter que la transformation de degré 2 a été employée dans tous les cas.

Par la suite, il faut opter pour une méthode de ré-échantillonnage. En effet, suite à la conversion de système, les pixels de la nouvelle image ne se retrouvent pas nécessairement aux mêmes endroits que sur l'image originale. Il faut alors estimer la valeur des nouveaux pixels par l'interpolation des valeurs affectées aux pixels de son voisinage dans l'image originale. Cette opération se nomme le ré-échantillonnage. Il existe différentes techniques de ré-échantillonnage, mais la méthode d'interpolation cubique est celle privilégiée dans ce cas-ci. Cette technique donne un effet moins saccadé et plus naturel que la méthode du plus proche voisin tout en présentant une image plus claire et plus nette que la méthode d'interpolation bilinéaire (PCI Geomatics, 2003).

C.2.3. Autres prétraitements

En plus des transformations radiométriques et géométriques, d'autres transformations distinctes de ces dernières ont été appliquées aux images dans le but de faciliter leur analyse. En premier lieu, en utilisant le logiciel Focus de PCI Geomatica, les images géoréférencées et transformées radiométriquement ont été réduites en fonction des dimensions du bassin. La réduction s'est effectuée à l'aide du fichier vectoriel des limites du bassin qui est en format *shape* (format vectoriel propre à la compagnie ESRI). En second lieu, ce fichier vectoriel est de nouveau mis à contribution pour garder uniquement les informations situées à l'intérieur du bassin. Ainsi, le fichier vectoriel agit comme masque et tous les pixels à l'extérieur des limites du bassin se voient assigner une valeur nulle. Le résultat de ces opérations est visible à la Figure C.3.

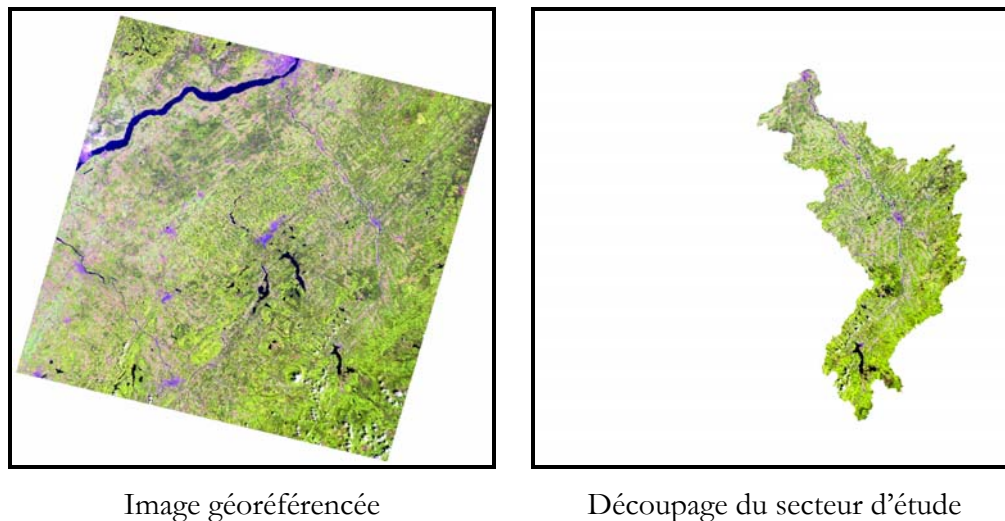


Figure C.3 : Comparaison entre l'image géoréférencée et celle du secteur d'étude pour l'année 1990

Finalement les images acquises par le capteur MSS (1976 et 1981) ont été ré-échantillonnées dans le but de leur attribuer une résolution spatiale facilitant leur comparaison avec les images subséquentes. En ce sens, la résolution des pixels passe de 80 m à 60 m. Par conséquent, les pixels nouvellement créés couvrent 4 pixels de 30 m de résolution acquis par les capteurs TM et ETM+. Toutefois, une telle transformation occasionne un certain déplacement de l'information et ne permet pas l'analyse et la comparaison pixel à pixel entre les images ré-échantillonnées et celle acquises par les capteurs à plus grande résolution.

La Figure C.4 présente les images résultantes des prétraitements, ces images se limitent au secteur d'étude seulement et sont positionnées dans une fenêtre géoréférencée unique permettant l'analyse temporelle et spatiale de l'évolution de l'occupation du sol sur le secteur d'étude.

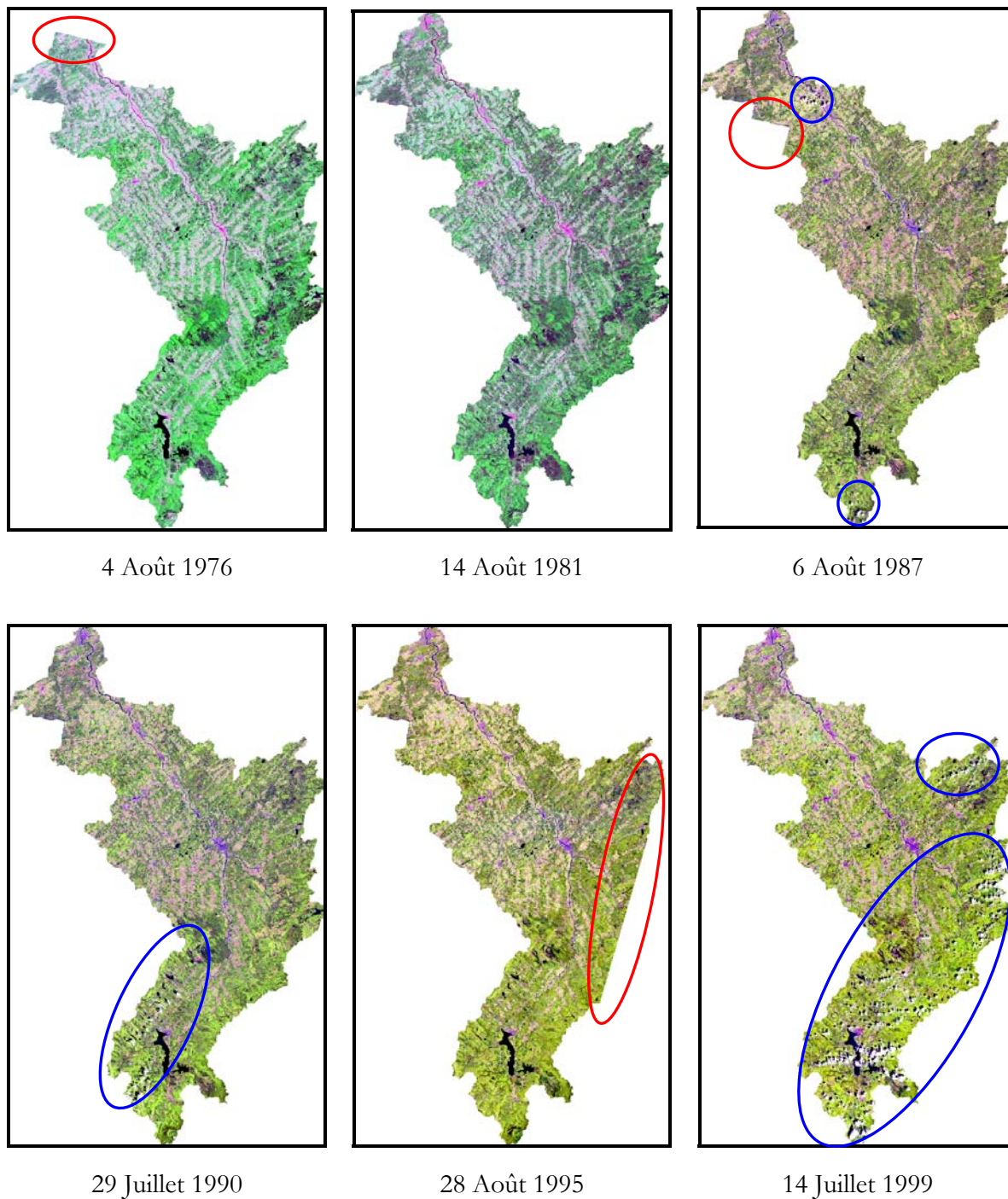
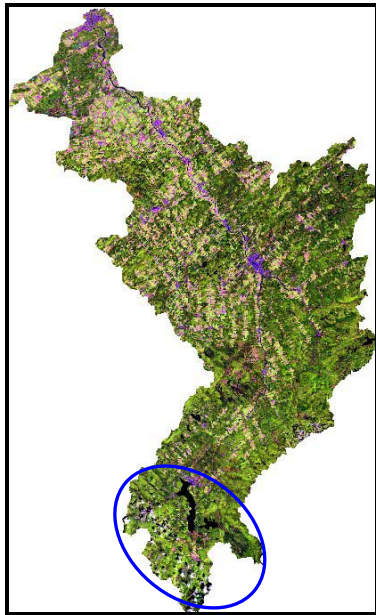


Figure C.4 : Images satellites utilisées. Les zones entourées en rouge sont les secteurs non couverts par l'image, et les zones entourées en bleu indiquent la présence de couvertures nuageuses



2 Septembre 2003

Figure C.4 (suite)

Tel que mentionné précédemment, les images de 1976, 1987 et 1995 ne couvrent pas la totalité du bassin. De plus, il est possible de noter la présence de couverture nuageuse sur les images de 1987, 1990, 1999 et 2003.

C.3 CLASSIFICATION

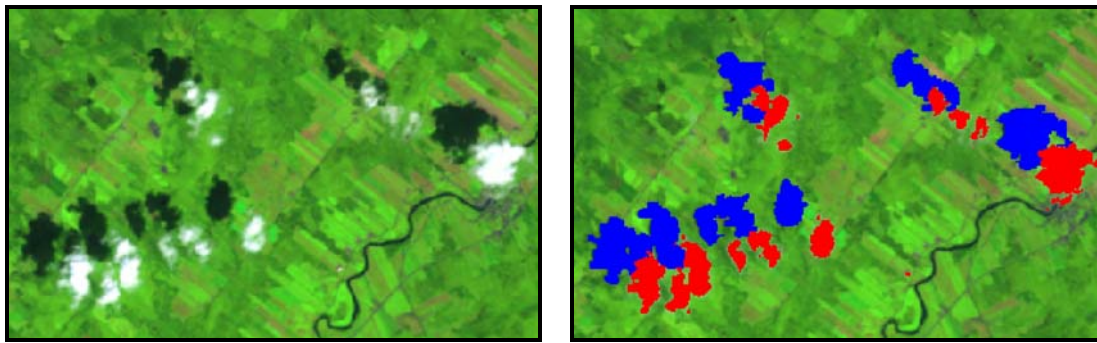
C.3.1. Classes préclassifiées

Le processus de classification a été appliqué à la totalité des images. Celui-ci comporte différentes étapes qui sont décrites dans la présente section.

Comme l'avait fait Gauthier (1996), il a été jugé plus simple d'identifier les classes « Nuage » et « Eau » de façon indépendante aux autres classes thématiques.

Dans un premier temps il est très important d'isoler les pixels où l'on note la présence de nuages ou celle de leurs ombres, puisque de telles classes ne peuvent être prises en compte dans l'étude de l'occupation du sol. Ces zones nuageuses sont aisément repérables puisque les nuages de basse et moyenne altitudes présentent une réponse spectrale assez forte dans les bandes du visible, proche et moyen infrarouge. De plus les nuages sont clairement

identifiables en raison de leurs ombres projetées au sol. Bien que la pratique fait souvent appel à des méthodes classiques de seuillage pour la classification des nuages, la présente étude suggère plutôt la création manuelle de masque à la fois sur les masses nuageuse et leurs ombres projetées sols. Même si cette méthode demeure fastidieuse et quelques peu coûteuse en temps, elle évite l'utilisation de seuil souvent trop permissif occasionnant l'attribution de la classe nuage à des pixels qui ne le sont pas. Ainsi des masques couvrant la totalité des surfaces nuageuses et ombragées ont été créés pour les images présentant de telles surfaces (ex : Figure C.5).



Secteur ennuagé

Masques des nuages et ombres

Figure C.5 : Création de masque pour les surfaces nuageuses et ombragées (Image 1999)

La classe Eau présente également des caractéristiques qui la distinguent proprement. En ce sens, l'eau a une réponse spectrale faible dans le proche et moyen infrarouge. De plus, l'eau ne présente aucune activité chlorophyllienne contrairement aux surfaces où l'on dénote la présence de végétation. Cette particularité peut être mise en évidence par l'indice de végétation normalisé (NDVI) calculé selon l'équation (3.1). Pour chacune des images une couche d'information supplémentaire a été créée pour le calcul de cet indice.

$$NDVI = \frac{B_{PIR} - B_R}{B_{PIR} + B_R} \quad (3.1)$$

où :

B_{PIR} = Bande dans le proche infra rouge (MSS Bande 3, TM Bande 4, ETM+ Bande 4)

B_R = Bande dans le rouge (MSS Bande 2, TM Bande 3, ETM+ Bande 3)

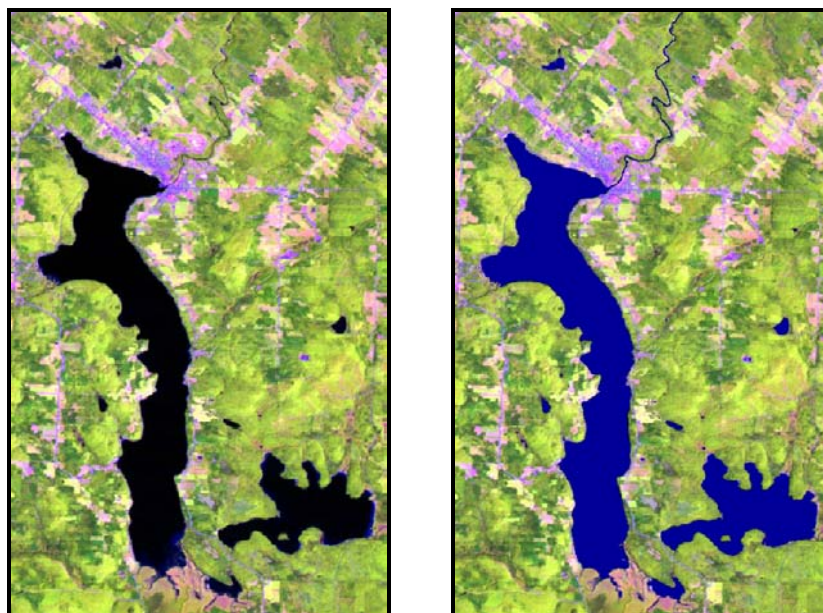
Néanmoins, différents facteurs affectent la signature spectrale de l'eau. Ceux-ci sont notamment la profondeur des plans d'eau, la quantité de matières en suspension, la présence de végétation en bordure des cours d'eau cachant en partie la surface, la présence d'algues, *etc.*

La majorité des cours d'eau et des lacs sur le secteur d'étude peuvent tout de même être isolé à l'aide d'un seuillage sur l'image. Cette opération fait appel aux travaux antérieurs de Gauthier auxquels s'ajoute l'utilisation de l'indice de végétation normalisé. Le Tableau C.2 présente les paramètres de seuillage pour la détermination de la classe « Eau ». Les diverses conditions sont liées l'opérateur logique « et ».

Tableau C.2 : Paramètres de seuillage pour créer la classe « Eau »

Capteur	Pixels de la bande	Condition	Opérateur logique	Valeur
MSS	Bande 2	Inférieur	ET	40
	Bande 3			45
	NDVI			0,25
TM	Bande 3	Inférieur	ET	40
	Bande 4			45
	Bande 5			45
	NDVI			0,25

Un tel seuillage a été appliqué aux différentes images sans prendre en compte les zones nuageuses et ombragées. Par la suite le masque créé pour la classe « Eau » a été ajusté manuellement afin d'inclure les zones omises par le seuillage. Il est préférable de faire appel à un seuil restrictif permettant la création d'un masque plus fin suivi d'une vérification et un ajustement par l'analyste dans le but d'éviter l'attribution erronée de la classe « Eau ». La Figure C.6 présente un exemple de l'identification de la classe « Eau ».



Secteur de lacs et cours d'eau

Masque des lacs et cours d'eau

Figure C.6 : Exemple d'identification de la classe « Eau » (Image 1995)

Enfin, un autre seuillage a été appliqué pour créer une classe contenant tous les pixels situés à l'extérieur du bassin. La valeur de ces pixels est ramenée zéro dans toutes les bandes. Ainsi, un masque peut être créé en regroupant les pixels à l'extérieur du bassin avec ceux de la classe « Eau » et ceux de la classe « Nuages et Ombrages ». Ce masque permet de créer une couche d'information où les pixels sous-jacents prennent une valeur nulle contrairement à une valeur attribuée aux pixels situés à l'extérieur de cette zone sur lesquels sera effectué la classification.

C.3.2. Analyse en composantes principales

Dans le cadre de cette étude, la classification d'occupation du sol fait appel au logiciel eCognition qui suggère une approche plus complète pouvant inclure non seulement les caractéristiques spectrales des pixels mais également des notions de formes, de textures et de voisinages. De plus, ce logiciel n'opère pas un traitement sur les pixels mais plutôt sur des objets regroupant, selon des critères prédéfinis, des éléments voisins. Ce traitement repose donc sur une segmentation de l'image en régions ou entités homogènes.

Afin de faciliter la segmentation de l'image à l'aide du logiciel eCognition, une analyse en composante principale a été appliquée à chacune des images pour permettre la synthèse des différentes couches informatives (Bandes de l'image). L'analyse en composantes principales

(ACP) est une technique mathématique permettant de réduire un système complexe de corrélations en un plus petit nombre de dimensions. Elle s'exprime par une transformation linéaire appliquant une rotation des différentes dimensions de l'image vers un espace pluridimensionnel délimité par des axes correspondant au maximum de variance. Par conséquent les différentes couches d'informations de l'image (Bandes disponible) peuvent être regroupées et représentées par un nombre déterminé de composantes principales. Dans le cas présent il a été observé que les trois premières composantes principales expliquaient l'essentiel de la variance des couches informatives disponibles pour chaque image. La fonction PCA du logiciel PCI de Geomatica permet le calcul des composantes principales communément appelées « *eigenchannel* ». Cette fonction permet également l'obtention de rapport textuels où s'inscrivent les différents pourcentages de la variance attribuables à chacune des composantes principales. Le Tableau C.3 présente un court résumé du rapport produit, par cette fonction, pour l'image de 1990

Tableau C.3: Exemple d'analyse en composantes principales pour l'image de 1990

Capteur	Bande	Composante principale	% Variance
TM	1	1	68.65
	2	2	26.54
	3	3	3.69
	4	4	0,52
	5	5	0,26
	7	6	0,15

Tel que mentionné, les trois premières composantes principales expriment l'essentiel de la variance des bandes de l'image. Ce sont donc les pourcentages relatifs à celles-ci qui seront utilisé dans la segmentation de l'image.

C.3.3. Segmentation

Tel qu'énoncé, l'étude actuelle ne peut se limiter à l'analyse de pixels isolés, en effet elle doit plutôt s'accorder étroitement avec la notion de contexte spatial défini par les relations topologiques qui existent entre les éléments voisins. Récemment, de nouvelles techniques ont été développées pour la prise en compte du contexte spatial. Celles-ci permettent de déduire des propriétés relevant de la dimension spatiale telles que les relations de voisinage et la géométrie des objets accroissant ainsi les capacités d'extraction du contenu sémantique des images (Caloz *et al.*, 2001). Ces techniques reposent sur la segmentation des images en régions ou entités homogènes selon des critères d'homogénéité fondés sur des attributs tels que la forme, la texture, la radiométrie, *etc.* (Mansor *et al.*, 2002). Ainsi s'efface la notion de pixel pour

laisser place à celle d'objets ou entités. La segmentation est le processus heuristique qui permet de générer des objets images par le regroupement de pixels contigus selon des critères d'homogénéité dépendants des caractéristiques radiométriques et spatiales des pixels.

Tel que décrit, dans une approche orientée objet, la classification requiert une étape préliminaire qui est celle de la segmentation de l'image. Le logiciel eCognition, permet la segmentation d'image en fonction de divers critères. Les règles de décision utilisées pour une telle opération incluent non seulement les paramètres spectraux mais aussi les paramètres spatiaux. La primitive sémantique n'est donc plus présentée par un unique pixel mais par un ensemble de pixels adjacents et homogènes qui définissent un objet ou une entité. Il permet également l'utilisation d'une couche directive indiquant les secteurs de l'image non sujets à la segmentation. Ceux-ci sont clairement définis par la couche d'information créée à partir du masque d'exclusion intégrant l'extérieur du bassin de la Chaudière et les classes « Nuages », « Ombrages » et « Eau ».

Le principe de segmentation utilisé par le logiciel eCognition consiste, en fait, en une agrégation progressive des pixels selon les critères d'adjacence et de similarité d'un paramètre de couleur et/ou de forme déterminé par l'utilisateur. La procédure de croissance de la région mise en œuvre par le logiciel utilise une approche ascendante qui part d'un pixel objet ou germe pour aboutir à la naissance de région. De proche en proche les pixels sont agrégés en plusieurs étapes séquentielles (successives) selon des critères d'homogénéités définis par l'analyste. Ces critères permettent de déterminer quels sont les attributs d'hétérogénéité relatifs aux objets images qu'il faudrait minimiser lors de la segmentation. L'algorithme de segmentation implanté dans le logiciel eCognition (Definiens, 2001) permet la combinaison de critères d'hétérogénéité fondés sur la radiométrie et la forme des objets qu'il est possible d'ajuster au moyen d'indices. Le résultat issu d'une telle procédure est une segmentation de l'image en entités homogènes adaptées à la classification envisagée. En effet, l'analyse de l'image suivant une approche orientée objet a pour but fondamental la génération d'objets d'intérêts servant de primitives graphiques et comportant une multitude d'attributs exploitable pour une classification ultérieure de l'image. Le processus de segmentation peut être paramétré par la définition des bandes spectrales à utiliser, par le poids attribués à chacune des bandes utilisées et par le choix des critères d'homogénéités et du paramètre d'échelle. La Figure C.7 présente la fenêtre de paramétrisation de la segmentation par le logiciel eCognition prenant pour exemple l'image de 1990.

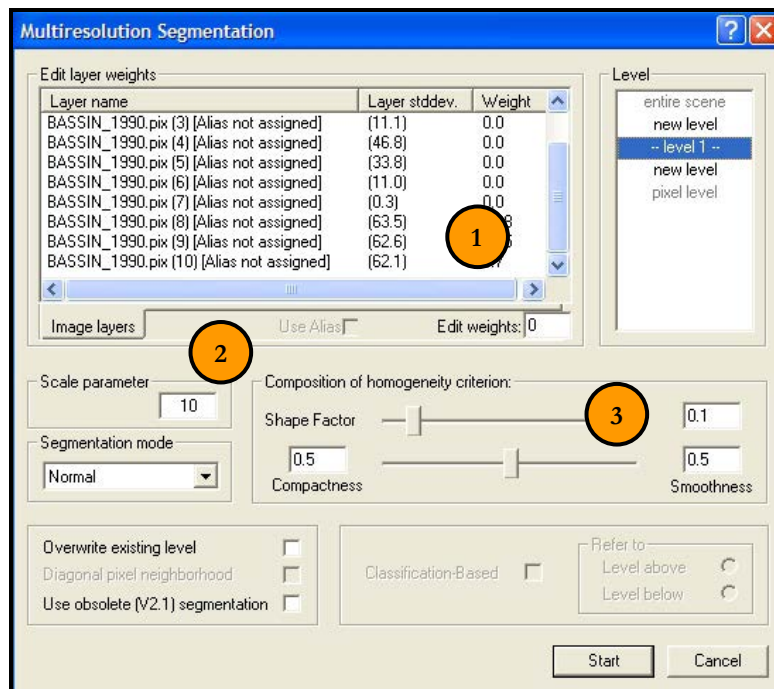


Figure C.7 : Paramétrisation de la segmentation à l'aide du logiciel eCognition (Image 1990)

Les différents paramètres régissant la segmentation de l'image de 1990 découlent d'un processus itératifs visant à adapter la segmentation à la classification envisagée. Ceux-ci sont décrits selon les points suivants :

o Poids des bandes utilisées

Pour chacune des images, les bandes utilisées pour effectuer la segmentation sont les trois premières composantes principales et le poids qui leurs sont attribués correspondent au pourcentage de la variance expliqué par la composante principale (voir aussi tableau 3.2). L'importance de la bande utilisée est donc directement proportionnelle au poids attribué à celle-ci. Dans le cadre de ce projet, aucun poids n'est attribué aux bandes de l'image puisque les informations qu'elles décrivent sont synthétisées par les composantes principales. Cette manœuvre vise l'uniformisation de la démarche de segmentation sur la totalité des images évitant ainsi la prise en compte de singularité spectrale liée à la période d'acquisition de l'image. La segmentation est alors moins influencée par la détérioration ou l'amplification de la réponse spectrale de certaines bandes.

0 Facteur d'échelle

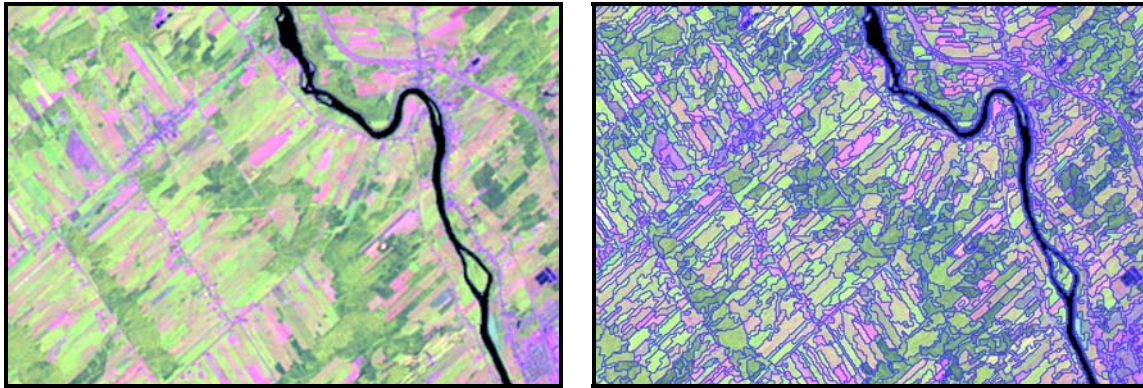
Le facteur d'échelle est un terme abstrait qui détermine l'hétérogénéité maximale pouvant être attribuée aux objets images résultants. En présence de données hétérogènes les objets déterminés en fonction d'un paramètre d'échelle sont de plus petite taille qu'en présence de données homogènes. La valeur de dix attribuée au facteur d'échelle représente un juste compromis entre les données hétérogènes de l'image comme les secteurs urbanisés et les données plus homogènes comme les parcelles agricoles ou encore les secteurs boisés de grandes superficies. La taille des objets résultants est jugé représentative de l'homogénéité des surfaces présentant une réponse spectrale similaire.

0 Critères d'homogénéités

Dans le contexte présent le terme homogénéité est synonyme d'hétérogénéité minimisée. Le logiciel eCognition fait appel à trois critères d'hétérogénéité qui sont la couleur, la forme (*Shape facteur*), la densité (*Compactness*) et le degré de lissage (*Smoothness*). La couleur liée aux bandes utilisées est le facteur déterminant dans la création d'objets significatifs. Néanmoins, un certain niveau d'homogénéité, selon la forme, améliore parfois la qualité de l'extraction des objets. Ce qui peut être attribuable au fait qu'un certain degré de densité est associé à la conception d'objets spatiaux. Le facteur de forme prévient la segmentation fractale d'objet en présence de données fortement texturées. Dans le champ de « Couleur » il est possible, tel que décrit, d'attribuer un pourcentage relatif à l'importance de la bande dans le critère global d'homogénéité. Dans le même sens, il est possible d'attribuer un poids au critère de forme défini par la densité et le degré de lissage. Dans le cadre de ce projet, il est préférable de favoriser le facteur de couleur lié directement à l'information spectrale des bandes qui souligne la séparabilité des différentes classes. Le critère de forme est donc moins important (valeur de 0,1) sans toutefois être nul puisque qu'il assure la pérennité d'objet sur des zones moins homogènes pouvant être associé à des classes caractérisées par une plus forte hétérogénéité.

Le critère de forme est à son tour composé de deux paramètres, le degré de lissage et la densité. Le degré de lissage est employé pour optimiser les objets de l'image en fonction de leur frontière. Il prévient l'enchevêtrement des objets et préserve la distinction de frontières clairement distinguables surtout en présence de données texturées. De plus il prévient la formation d'objet de trop faible densité. Le critère de densité, quant à lui, est utilisé pour optimiser la détermination d'objets en fonction de leur densité. Ce critère doit être favorisé en présence d'objet de forte densité se différenciant d'objets de plus faible densité par un contraste relativement faible. Dans le cadre de ce projet, il est préférable d'opter pour l'attribution d'un poids égal au paramètre de densité (0,50) et de degré de lissage (0,50). Par conséquent, la forme et les frontières des objets denses ou légèrement texturés sont préservées

pour la classification anticipée. La Figure C.8 présente le résultat de la segmentation pour un secteur de l'image de 1990.



Secteur de l'image de 1990

Segmentation de l'image de 1990

Figure C.8 : Exemple de segmentation pour l'image de 1990

La Figure C.8 démontre clairement la création d'entités homogènes s'accordant avec les différentes occupations du sol observées sur le secteur d'étude. Cette segmentation peut donc être jugée satisfaisante et peut être appliquée à l'ensemble des images séparément.

C.3.4. Classification orientée objet

Malgré le progrès dans les méthodes de classification utilisant l'approche pixel celles-ci demeurent limitées. Un des problèmes liés à cette approche résulte du fait que l'agencement des pixels voisins n'est pas pris en compte puisque les classes sont construites sur la base de l'homogénéité de l'information spectrale uniquement (Schiewe *et al.*, 2001). Le recours à des méthodes de classification permettant une meilleure exploitation du contenu informatif des images s'avère donc indispensable (Blaschke *et al.*, 2001) notamment dans le cadre de l'étude actuelle. Le présent projet, qui intègre l'étude rétrospective de la détection des changements de l'occupation du sol, ne peut donc se limiter à l'analyse de pixels isolés et doit plutôt s'accorder avec la notion de contexte spatial défini par les relations topologiques qui existent entre les éléments voisins.

L'analyse et le traitement des données images, selon une approche objet, qui considère non seulement les propriétés radiométriques mais aussi les caractéristiques spatiales d'un ensemble de pixels homogènes, fournissent une information supplémentaire au processus de classification.

Le logiciel eCognition permet la classification d'images segmentées en se basant sur l'implémentation d'outils de segmentation des images (décrite précédemment) et de classification réalisée selon la logique floue. La logique floue permet une modélisation graduelle et nuancée de la connaissance experte et propose un mode de raisonnement approché et analogique. La connaissance experte traduite sous forme de règles de décisions exprimées par un ensemble de fonctions d'appartenance, contribue à la réduction de la complexité par la condensation des caractéristiques décrivant les classes (Kok *et al.*, 1999). Les règles de décisions ainsi construites apportent une aide substantielle au processus de regroupement des objets spatiaux en classes sémantiques grâce à la synergie des propriétés spectrales, de l'influence des objets voisins et de la connaissance de l'expert qui s'y trouve intégré.

Le logiciel eCognition offre différentes techniques de classification dirigée et une variété de méthodes pour la définition des classes thématiques et la construction de la base de connaissance requise pour la classification des objets. La classification supervisée consiste à diviser l'espace spectral en différentes classes par le recours à des sites d'entraînement. L'affectation d'un objet à une classe donnée nécessite la définition de cette classe au moyen de caractéristiques. Lorsqu'on est en présence d'un espace spectral multidimensionnel, le nombre de caractéristiques décrivant une classe donnée est relativement important. Il est alors souvent recommandé d'appliquer la classification selon le classificateur du plus proche voisin (*nearest neighbor classifier*). Le classificateur du plus proche voisin procède à partir de zones d'échantillonnages qui vont définir un ensemble de caractéristiques ou prototypes décrivant une classe. Le principe de cette classification est simple. Il suffit de choisir sur l'image segmentée un nombre restreint d'objets représentant chacune des classes. Ces objets échantillons seront considérés comme des sites d'entraînements. La distance euclidienne entre chacun des objets constituant une classe thématique et l'objet à classer est ensuite calculée et l'objet est assigné à la classe pour laquelle un des objets échantillons est le plus proche.

Étant donné que la classification objet, moyennant le classificateur du plus proche voisin, permet la sélection d'objet échantillons issus de la segmentation préalable de l'image, pour chacune de classes, le choix des sites d'entraînement a donc été effectué sur les images segmentées. Ceux-ci ont été sélectionnés sur des zones homogènes où les ambiguïtés liées aux pixels mixtes sont négligeables. Le logiciel eCognition permet le choix des sites d'entraînement selon un degré d'appartenance lié à une fonction définie dans un espace multidimensionnel ou s'ajoutent aux bandes spectrales, des paramètres liés à la forme des objets. La division de cet espace multidimensionnel est inhérente à l'assignation d'objets échantillons aux classes données. Contrairement aux méthodes courantes de maximum de vraisemblance, celles faisant appel à des classificateurs flous attribuent à un objet une valeur d'appartenance, à une classe, comprise entre 0 et 1 ou 0 représente un degré d'appartenance nul et 1 un degré maximum

d'appartenance. Le degré d'appartenance d'objet dépend du niveau d'atteinte des conditions descriptives de la classe. Un des avantages de ces méthodes est l'expression de l'incertitude liée à la description des classes.

Dans le cadre de l'étude actuelle, l'utilisation de la moyenne de chacune des bandes, l'asymétrie, la forme rectangulaire, la densité, la luminance et le maximum de différence sont les différents paramètres directeurs de la fonction d'appartenance des objets. Le choix de ces paramètres résultent de l'occupation même du territoire où l'on retrouve tant forêts, parcelles agricoles et secteurs urbanisés. Il est à noter que l'utilisation d'une méthode de classification dirigée, pour les différentes images du projet, présente une contrainte importante, celle de disposer de très peu de réalité terrain. Il faut donc s'appuyer en partie sur une interprétation visuelle de l'image et sur le savoir faire développé lors de travaux antérieurs (Dolbec *et al.*, 2005; Gauthier, 1996).

Dans ce cas-ci, les classes définies sont celles utilisées dans GIBSI (Tableau C.3) pour lesquelles des zones d'entraînement sont déterminées à l'aide des connaissances du territoire. Tel que mentionné ci-haut (contexte du projet), cette connaissance est basée sur l'interprétation visuelle de l'analyste et des informations provenant des travaux antérieurs de classification d'images du bassin de la rivière Chaudière. Toutefois, cette connaissance est guidée par la division, par le logiciel eCognition, de l'espace multidimensionnel selon des critères portant à la fois sur les caractéristiques spectrales et spatiales des objets. Par conséquent, le choix des sites d'entraînements par l'analyste est orienté par l'intégration évolutive des objets échantillons représentatifs de chacune des classes. Les zones d'entraînement définissent ainsi les caractéristiques spectrales et spatiales des classes auxquelles elles sont associées.

Tableau C.4: Classes d'occupations utilisées dans GIBSI

Numéros de classes	Classes thématiques
1	Urbain
2	Pâturage et foin
3	Céréales
4	Maïs
5	Eau
6	Milieu humide
7	Sol nu
8	Friche
9	Feuillus
10	Conifères

C.3.5. Sites d'entraînement

Le logiciel eCognition permet l'attribution manuelle de sites d'entraînement pour chacune des classes thématiques. La présente section vise la présentation d'exemple de site d'entraînement pour les classes définies, accompagnée d'une description explicatrice du choix de ces sites en comparaison avec les caractéristiques des classes. L'affichage préconisé permettant l'amélioration des contrastes entre les différentes classes est présenté au tableau suivant.

Tableau C.5: Affichage des images MSS et TM et ETM+

Capteur	Bandes	Affichage
Landsat-2 MSS	Bande 1 (0,50 μ m - 0,60 μ m)	Canal Bleu
	Bande 2 (0,60 μ m – 0,70 μ m)	Canal Rouge
	Bande 4 (0,80 μ m – 1,10 μ m)	Canal Vert
Landsat-5 TM et ETM+	Bande 3 (0,63 μ m – 0,69 μ m)	Canal Bleu
	Bande 4 (0,76 μ m – 0,90 μ m)	Canal Vert
	Bande 5 (1,55 μ m – 1,75 μ m)	Canal Rouge

Cet affichage vise à mettre en évidence l'activité chlorophyllienne des divers types d'occupation du sol. En ce sens, les classes présentant une telle activité (Pâturage et foin, Maïs, Friche arbustive, Feuillus, Conifères) arborent des teintes empreintes de vert alors que celles ne

présentant peu d'activité chlorophyllienne (Urbain, Céréales, Sol nu) se distinguent par des teintes allant du bleu au rose pâle. Les points suivants décrivent dans l'ordre les classes thématiques tout en présentant des sites d'entraînement relatifs à celles-ci.

O Urbain

Visuellement, les zones urbaines sont aisément distinguables par leurs formes irrégulières, leur couleur violet-bleu et leurs localisations géographiques. Toutefois, la classification de ce milieu peu être complexe. En effet, les zones urbaines sont hétérogènes et contiennent souvent d'autres types d'utilisation (végétation, arbres, milieu humide, eau, *etc.*). Néanmoins, la création d'entités homogènes de zone urbanisée minimise la prise en compte d'autres types d'occupation du sol. La sélection des sites d'entraînement peut donc être concentrée sur les éléments caractérisant le milieu urbain soit les routes, les bâtiments, les surfaces asphaltées, *etc.* La Figure C.9 présente un exemple de sites d'entraînement pour la classe Urbain pour l'image de 1990.

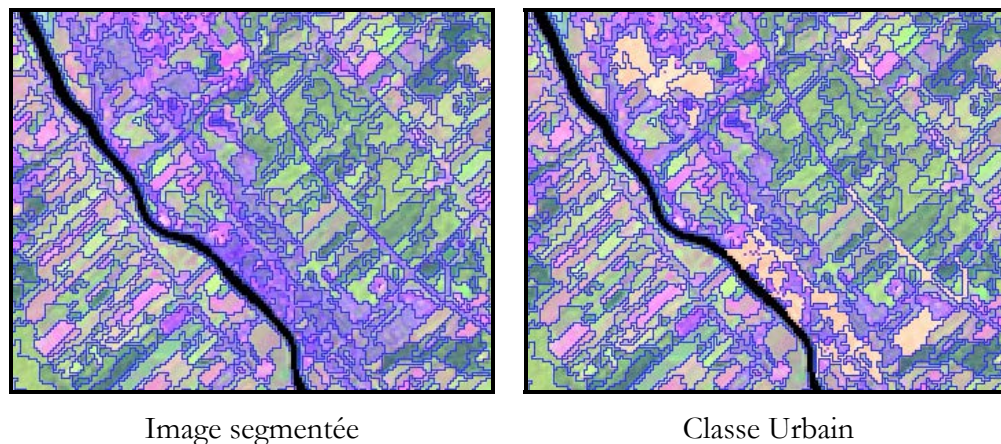


Figure C.9: Exemple de sites d'entraînement pour la classe Urbain (Image 1990)

O Pâturage et foin

Les zones de pâturage et foin se distinguent relativement bien des autres cultures. En effet leur activité chlorophyllienne, qui caractérise leur signature spectrale, s'exprime à l'affichage par des teintes de vert parfois mariées au rose. De plus ces zones se présentent comme des surfaces plus régulières, angulées s'apparentant à des formes rectangulaires. Toutefois, les objets échantillons liés à cette classes sont moins homogènes ce qui confère à la classes une étendue spectrale plus large et donc susceptible d'engendré de la confusion avec des classes s'en approchant. La Figure C.10 présente un exemple de sites d'entraînement plus la classe Pâturage et foin pour l'image de 1990.

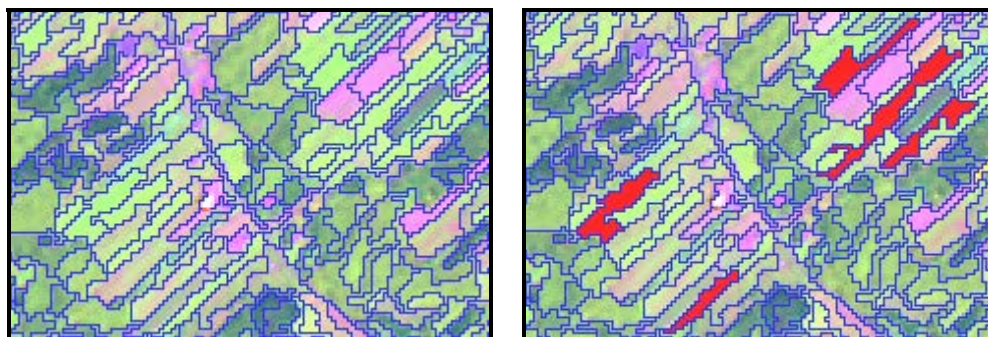


Image segmentée

Classe Pâturage et foin

Figure C.10: Exemple de sites d'entraînement pour la classe pâturage et foin (Image 1990)

O Céréales

L'identification des champs de céréales peu poser certaines difficultés. Ceux-ci sont généralement composés de blé, d'avoine, d'orge ou un mélange de ces trois cultures. L'activité chlorophyllienne de ces cultures est notamment plus faible que celle des zones de pâturage est foin ce qui résulte en des teintes plus rosées nuancées de vert et de violet. Ceux présentant des teintes de mauve traduisent possiblement la présence de sol nu ou l'expression des sols sous jacents aux cultures alors que ceux qui sont légèrement teinté de vert laisse présumer l'immaturité des cultures. Par conséquent, les cultures céréalières présentes des signatures spectrales plus étendues. Néanmoins, l'homogénéité et la symétrie des champs de céréales permettent de mieux définir les règles d'appartenance permettant leur classification. Toutefois ces règles de classification ne peut permettre la distinction entre la classe céréale et les zones de pâturages et récoltés. En effet les champs de pâturage et foin récoltés ainsi les cultures de céréales à maturités présentent des signatures spectrales et des formes très similaires contraignant leur distinction. Malheureusement, on ne dispose d'aucune vérité terrain pour atténuer cette confusion probante. La Figure C.11 présente un exemple de sites d'entraînement pour la classe céréale pour l'image de 1990.

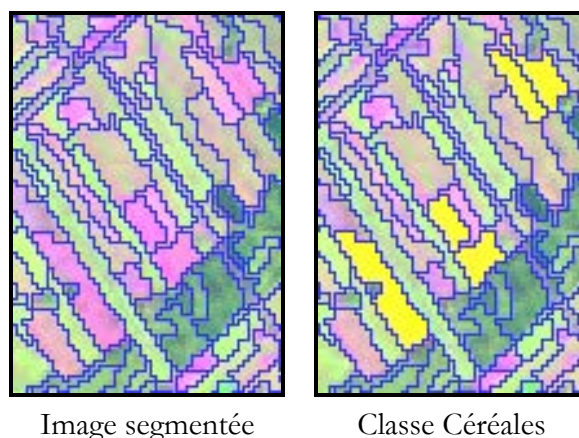


Figure C.11: Exemple de sites d'entraînement pour la classe Céréales (Image 1990)

O Maïs

Selon les observations fournies par Gauthier (1996), le maïs affiche une couleur uniforme émeraude très distincte. Tout comme les classes précédentes, les surfaces recouvertes de maïs sont caractérisées par des formes plus rectangulaires représentatives de celles de champs cultivés. Par conséquent la signature spectrale assez fine et les paramètres de forme sont de fort indice de classification pour le maïs. Il est à noter que les cultures de maïs ont été retrouvées majoritairement dans la section de la basse chaudière. La Figure C.12 présente un exemple de sites d'entraînement pour la classe Maïs pour l'image de 1990.

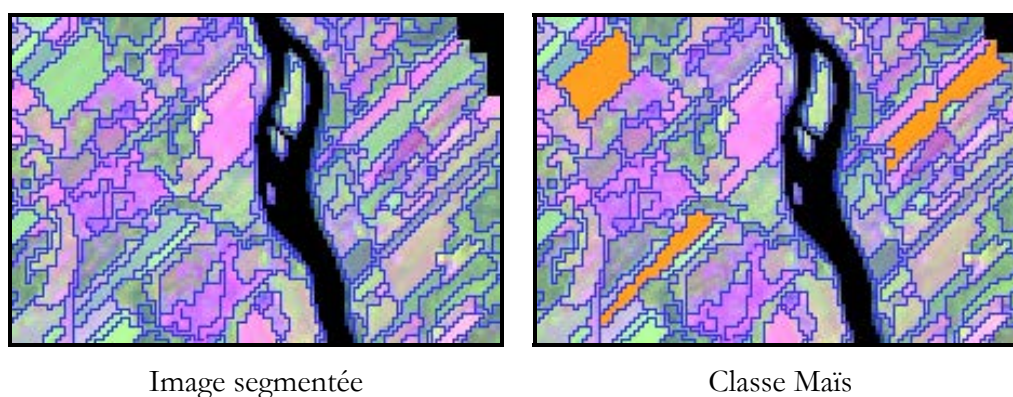


Figure C.12: Exemple de sites d'entraînement pour la classe Maïs (Image 1990)

O Eau

La classification des cours d'eau et lacs a été présentée en détail à la section C.3.1. En effet les caractéristiques spectrales uniques de l'eau permettent sa classification par simple seuillage.

0 Milieu humide

Les milieux humides peuvent être identifiés sans trop de difficulté. Tel que présenté lors de travaux précédents (Dolbec *et al.*, 2005; Gauthier, 1996), ceux-ci s'affiche sous des teintes bleu-gris s'approchant à l'occasion du violet. Ils sont également caractérisés par des formes plus arrondies assez constante dans le temps. La Figure C.13 présente un exemple de sites d'entraînement pour la classe Milieu humide pour l'image de 1990.

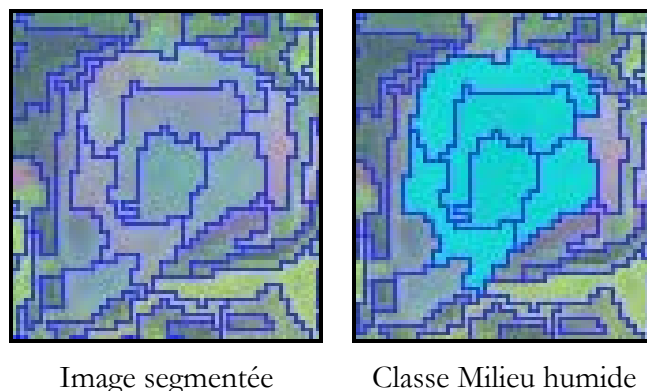


Figure C.13: Exemple de sites d'entraînement pour la classe Milieu humide (Image 1990)

0 Sol nu

La classe sol nu est caractérisée par l'absence d'activité chlorophyllienne et s'affiche dans des teintes assez foncées de mauves ou de roses clairs. Celles-ci soulignent l'absence de végétation et met en évidence la présence de sol dénudé. Cette classe inclue notamment les carrières, les champs labourés, *etc.* Bien que la signature spectrale des sols nus s'approche de celle des zones urbanisées, leurs formes arrondies ou rectangulaires les distinguent de part leur plus grande symétrie. La Figure C.14 présente un exemple de sites d'entraînement pour la classe Sol nu pour l'image de 1990.

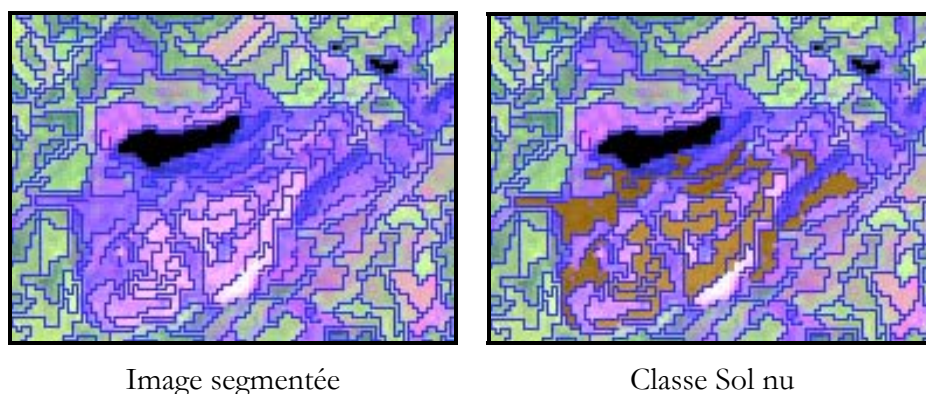


Figure C.14: Exemple de sites d'entraînement pour la classe Sol nu (Image 1990)

O Friche

Les zones de friches s'avèrent plus difficilement identifiables que le reste du couvert forestier. En effet, la définition de friche est assez vague selon les informations présentes dans les travaux antérieurs. À quel moment un groupe d'arbre cesse d'être une friche et devient des feuillus? Est-ce que les friches herbacées sont incluses dans cette classe? Pour ces raisons, il est ardu de les discriminer de manière fiable les friches. Dans le cadre du projet ce sont les friches herbacées ou partiellement arbustives qui semblent avoir été identifiées. Ainsi, les sites d'entraînement sélectionnés paraissent couvrir des zones de coupes relativement jeunes. Ces sites affichent une couleur dominée par le jaune signalant une plus faible activité chlorophyllienne se différenciant de la signature spectrale de forêt de feuillus ou conifères. Ainsi, les sites d'entraînement sélectionnés paraissent couvrir des zones de coupes relativement jeunes ou encore des zones en bordure de forêt présentent des formes plus irrégulières les distinguant de la classe pâturage et foin. La Figure C.15 présente un exemple de sites d'entraînement pour la classe Friche pour l'image de 1990.

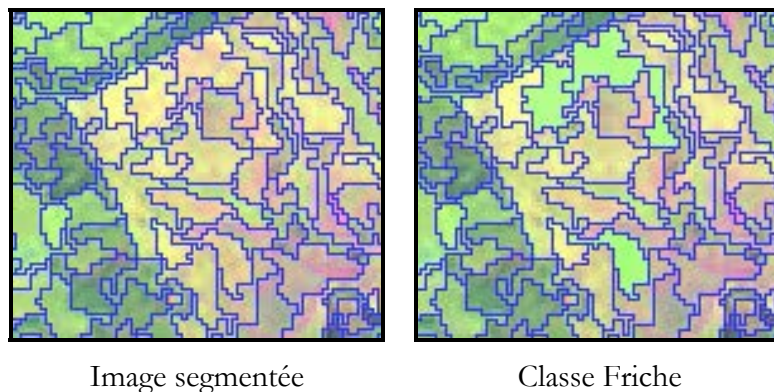


Figure C.15: Exemple de sites d'entraînement pour la classe Friche (Image 1990)

O Feuillus

La classe Feuillus se distingue essentiellement de la classe Conifères par son activité chlorophyllienne qui lui confère une signature spectrale propre. Ainsi la classe Feuillus s'affiche dans des teintes de vert pâle. De plus cette classe se différencie des classes liées à l'agriculture par l'irrégularité des contours et l'asymétrie des forêts. Les caractéristiques spatiales combinées à la réponse spectrale de telles étendues forestières contribuent donc à la détermination des paramètres régissant les règles d'appartenances associées à cette classe. La Figure C.16 présente un exemple de sites d'entraînement pour la classe Feuillus pour l'image de 1990.

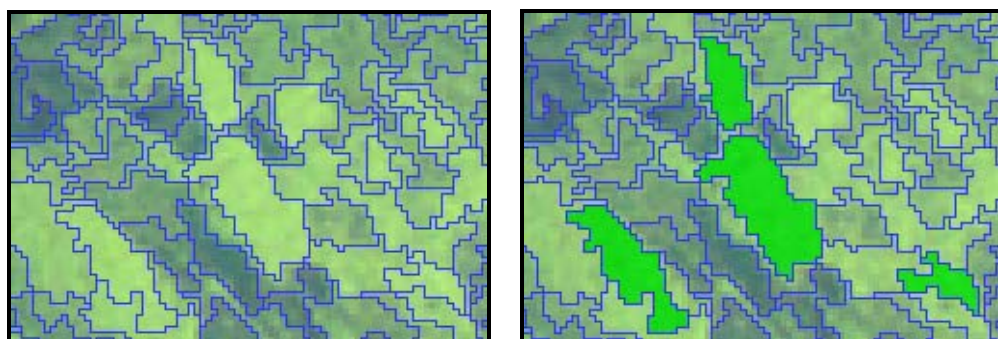


Image segmentée

Classe Feuillus

Figure C.16: Exemple de sites d'entraînement pour la classe Feuillus (Image 1990)

o Conifères

La classe Conifères contrairement à la classe Feuillus, présente une activité chlorophyllienne plus faible et une signature spectrale distincte. Cette classe s'affiche dans des teintes de vert foncé. Également, les forêts de conifères se différencient des classes liées à l'agriculture par leurs contours irréguliers et leurs formes asymétriques. Les caractéristiques spatiales et la réponse spectrale de telles étendues forestières contribuent donc à l'identification des paramètres définissant les règles d'appartenances associées à cette classe. La Figure C.17 présente un exemple de sites d'entraînement pour la classe Conifères pour l'image de 1990.

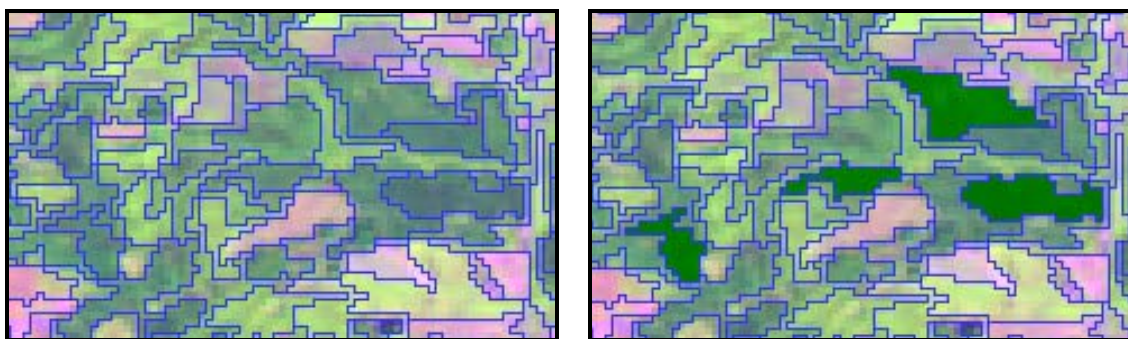


Image segmentée

Classe Conifères

Figure C.17: Exemple de sites d'entraînement pour la classe Conifères (Image 1990)

C.3.6. Images classifiées

Suite à l'attribution de sites d'entraînement aux différentes classes établies, le logiciel eCognition permet la classification de l'image. Tel que mentionné, cette classification est effectuée par le calcul de la distance euclidienne entre chacun des objets constituant une classe

thématique et l'objet à classer. Celui-ci est alors assigné à la classe pour laquelle un des objets échantillons est le plus proche. Cette distance euclidienne s'inscrit dans un univers pluridimensionnel définis par des fonctions d'appartenance des objets aux classes. Dans le cadre de l'étude actuelle, les règles d'appartenances sont dépendantes des caractéristiques spectrales et spatiales des objets. Les caractéristiques dominantes sont la moyenne et la luminance de chacune des bandes et le maximum de différence entre celles-ci; l'asymétrie, la forme rectangulaire et la densité des objets.

C.4 CONTRÔLE DE LA QUALITÉ DES CLASSIFICATIONS

Afin d'évaluer la qualité des classifications des images et de poser un regard plus global sur les changements d'occupation du sol, il est intéressant d'analyser les matrices de transition obtenues (ANNEXE D). De plus, à partir de ces matrices de transition, il est possible de constituer des tableaux synthèse exposant le pourcentage de récurrence, d'évolution ou de confusion pour les différentes classes thématiques. En effet, en l'absence de vérité terrain, il est très difficile d'attribuer un changement d'occupation du territoire à une simple évolution des différentes classes. À cette évolution s'intègre alors la notion de confusion entre les classes. Cette confusion découle des similitudes entre les signatures spectrales des différentes classes. En effet, le degré d'activité chlorophyllienne, l'apparence du sol sous-jacent, les conditions d'humidité de surfaces et la densité de la classe sont tous des facteurs pouvant occasionner un chevauchement entre les signatures spectrales des différentes classes et par conséquent réduire leur séparabilité. Par opposition, la notion de récurrence souligne plutôt la pérennité temporelle de la classe visée. Pour faciliter la synthèse des résultats, l'espace de confusion et de changement est calculé en fonction des champs thématiques *Milieu agricoles*, *Milieu forestier et arbustif* et *Autres* (*Urbain*, *Eau*, *Milieu humide* et *Sol nu*).

C.5 COMPARAISON DES RÉSULTATS AVEC D'AUTRES DONNÉES

Il est à noter que la comparaison des résultats avec certaines données disponibles demeure qualitative et n'inclue pas une analyse spatiale approfondie. Elle vise ainsi l'inter-comparaison des résultats avec ceux obtenus lors de classifications antérieures ou encore avec des données recueillies.

Les comparaisons ont porté sur les statistiques des cartes d'occupation obtenues pour les années 1987 et 1995 avec celles provenant des autres sources de données : le rapport de Villeneuve *et al.* (1998a) et le rapport de Poulin (2001).

Les cartes d'occupation du sol de 1987 et 1995 possèdent des caractéristiques propres qui ont un impact direct sur le calcul de superficie des classes thématiques. Comme mentionné plus haut, l'image de 1987 est affectée par la présence de quelques nuages au-dessus du bassin. De plus, la scène ainsi que celle de 1995 ne couvre pas la totalité du bassin versant de la rivière Chaudière. Ces deux facteurs font en sorte que la superficie du bassin sur les images de 1987 et 1995 sont respectivement de 6596 km² et 6327 km² soit 153 km² et 423 km² de moins que la superficie totale du bassin versant de la Chaudière.

De plus il est à noter que les classes thématiques des données comparées ne possèdent pas les mêmes définitions. Ainsi, dans le rapport de Poulin (2001), les données proviennent du recensement agricole canadien et sont compilées par Statistiques Canada. Cet organisme inclut dans la définition de pâturage uniquement les pâturages non améliorés ou négligés. Les pâturages améliorés sont inclus dans la classe cultures. Il devient alors difficile de comparer de manière indépendante les chiffres obtenus de la classification avec ceux des travaux de Poulin (2001). Néanmoins, il est possible de comparer la sommation des cultures et des pâturages pour chaque source de données.

Dans le cas présent, plusieurs sources de données différentes peuvent être comparées avec les statistiques des cartes d'occupation du sol créées pour l'année 1987 et 1995. Premièrement, il est possible d'évaluer les résultats de 1987 par rapport à la carte d'occupation issue de la classification antérieure, par Dolbec *et al.* (2005), de l'image de 1987. Deuxièmement, il est également possible de comparer les résultats de 1995 par rapport à la carte d'occupation issue de la classification antérieure, par Gauthier (1996), de l'image de 1987. Évidemment, ces comparaisons visent principalement à s'assurer que les ordres de grandeur des superficies des utilisations sont assez semblables, car il est normal d'observer une différence entre les différentes sources. Il est à noter la présence de quelques incohérences entre les chiffres fournis dans le texte et les données du tableau 4 dans le rapport de Villeneuve *et al.* (1998a). Par exemple, pour la classe maïs, il est mentionné que la superficie classifiée est de 790 hectares, ce qui représente 0,12% du territoire ($790/668\ 000 = 0,0012$) alors que le tableau indique un pourcentage de couverture de 0,32%. Les données du tableau ont été choisies car elles traduisent supposément la carte d'occupation employée dans GIBSI. Également, certaines informations servant à la validation de la classification de 1995 peuvent aussi servir à titre comparatif. Ces données proviennent du MAPAQ suite à des sondages ou à des classifications d'images satellites. Cependant, elles n'existent pas pour toutes les classes d'utilisation et elles traduisent un paysage pour des années diverses en fonction du type d'occupation. Les différentes comparaisons des superficies et des pourcentages des classes thématiques et données supplémentaires sont présentées aux tableaux C.7 à C.9.

Tableau C.6: Comparaison des superficies et pourcentages des classes thématiques (1987)

Classes thématiques	Superficie (ha) et pourcentage				
	Classification 1987		Carte d'occupation 1987 ⁸		Données MAPAQ
Urbain	30 164	4,6%	31 645	4,8%	
Pâturage et foin	71 435	10,8%	80 986	12,8%	
Céréales	58 866	8,9%	68 170	10,3%	
Maïs	6 996	1,1%	4 651	0,7%	
Eau	8 564	1,3%	9 251	1,4%	
Milieu humide	11 043	1,7%	37 126	5,6%	
Sol nu	10 907	1,6%	17 866	2,7%	
Friche	31 928	4,8%	32 617	4,9%	16 600 (1989)
Feuillus	223 613	33,7%	185 777	28,3%	
Conifères	206 130	31,1%	191 918	29,1%	

Le tableau précédent présente la comparaison entre les superficies et pourcentages des classes thématiques obtenus à partir de la classification de l'image de 1987. Cette comparaison fait référence à la classification actuelle et à celle menée par Dolbec *et al.* (2005) sur l'image 1987 en plus d'intégrer une donnée du MAPAQ. Ainsi il est possible de noter que le milieu agricole est moins important dans la classification actuelle sauf pour la classe Maïs. Inversement, le milieu forestier est plus fortement représenté dans la classification actuelle. Les classes restantes présentent des superficies soit comparable (Eau et Urbain) soit inférieure (Eau, Sol nu et Milieu humide). Il est à noter que la superficie de la classe Friche est largement supérieure à celle indiquée par le MAPAQ.

⁸ Carte d'occupation produite par Dolbec et al. 2005

Tableau C.7: Comparaison des superficies et pourcentages des classes thématiques (1995)

Classes thématiques	Superficie (ha) et pourcentage				
	Classification 1995		Carte d'occupation 1995 ⁹		Données MAPAQ
Urbain	28 761	4,5%	24 182	3,6%	
Pâturage et foin	67 899	10,7%	75 284	11,3%	45 400 (1994)
Céréales	42 249	6,7%	25 184	3,8%	8700 (1994)
Maïs	4 213	0,7%	2 138	0,3%	1733 ¹⁰ (1994)
Eau	7 874	1,2%	11 289	1,7%	
Milieu humide	14 465	2,3%	14 896	2,2%	
Sol nu	7 129	1,1%	14 028	2,1%	
Friche	26 388	4,2%	85 103	12,7%	
Feuillus	222 375	35,1%	267 200	40,0%	
Conifères	211 369	33,4%	148 697	22,3%	

Le tableau précédent présente la comparaison entre les superficies et pourcentages des classes thématiques obtenus à partir de la classification de l'image de 1995. Cette comparaison fait référence à la classification actuelle et à celle menée par Gauthier (1996) sur l'image 1995 en plus d'intégrer certaines données du MAPAQ. Ainsi il est possible de noter que le milieu agricole présente une répartition différente dans la classification actuelle. En ce sens, la classe Pâturage et foin est moins fortement représentée contrairement aux classes Céréales et Maïs. Dans le même sens le milieu forestier présente également une répartition différente dans la classification actuelle. Plus précisément les classes Friche et Feuillus sont moins fortement représentées contrairement à la classe Conifères. Les classes restantes présentent des superficies qui sont à la fois semblables (Milieu humide) inférieures (Eau et Sol nu) ou encore supérieur (Urbain). Il est à noter que les superficies des deux classifications sont strictement supérieures à celles indiquées par le MAPAQ. De plus, bien la superficie en Maïs déterminée par Gauthier (1996) s'approche de la valeur indiquée par le MAPAQ, elle demeure assez restrictive en raison du nombre restreint de municipalité

⁹ Carte d'occupation produite par Gauthier et al. 1996

¹⁰ Données pour 5 municipalités : St-Bernard, St-Elzéard, St-Narcisse, St-Patrice, Ste-Marie, St-Victor.

Tableau C.8: Comparaison des superficies du milieu agricole

Classes	Superficie (ha)		
	Classification 1987	Carte d'occupation 1987 ¹¹	Données pour l'année 1986 provenant de Poulin (2001) ¹²
Milieu agricole	137 297	153 807	≈ 110 000

Le tableau précédent montre une comparaison des superficies du milieu agricole pour l'année 1987. Il est ainsi possible de constater que la surface obtenue par la classification actuelle est supérieure à la valeur de la classification par Dolbec *et al.* (2005) ainsi qu'à celle extraite du rapport de Poulin (2001).

Les commentaires portés sur les différentes superficies demeurent qualitatifs en raison de l'absence de réalité terrain précise. Par conséquent, il demeure assez difficile de définir et de qualifier la véracité des classifications obtenues à l'aide la méthode actuelle. Les différentes comparaisons permettent néanmoins de souligner la variabilité des résultats en fonction de la méthode de classification employée et de la connaissance par l'analyste des caractéristiques spectrales des différentes classes. Il demeure toutefois, raisonnable d'affirmer que la méthode de classification orientée objet présente des résultats acceptables qui respectent l'ordre de grandeur des valeurs obtenues, pour les différentes classes thématiques, lors de travaux antérieurs.

C.6 CALCUL DES POURCENTAGES D'OCCUPATION DU SOL À L'ÉCHELLE DU BASSIN ET DES SOUS-BASSINS

Nous avons conçu un petit programme statistique pour déterminer les pourcentages d'occupation du sol au niveau de tout le bassin versant ainsi que tous les sous-bassins. Les données d'entrée pour ce programme sont les différentes cartes d'occupation du sol, le nombre de lignes pour l'en-tête, la «No data value» (valeur correspondant au quadrillage de chaque carte) et le nombre de classes pour la distribution. La Figure C.18 présente la fenêtre principale de ce programme et la Figure C.19 présente le type de fichier généré par ce programme.

¹¹ Carte d'occupation produite par Dolbec *et al.*, (2005)

¹² Donnée interpolée à partir d'un graphique dans Poulin (2001)

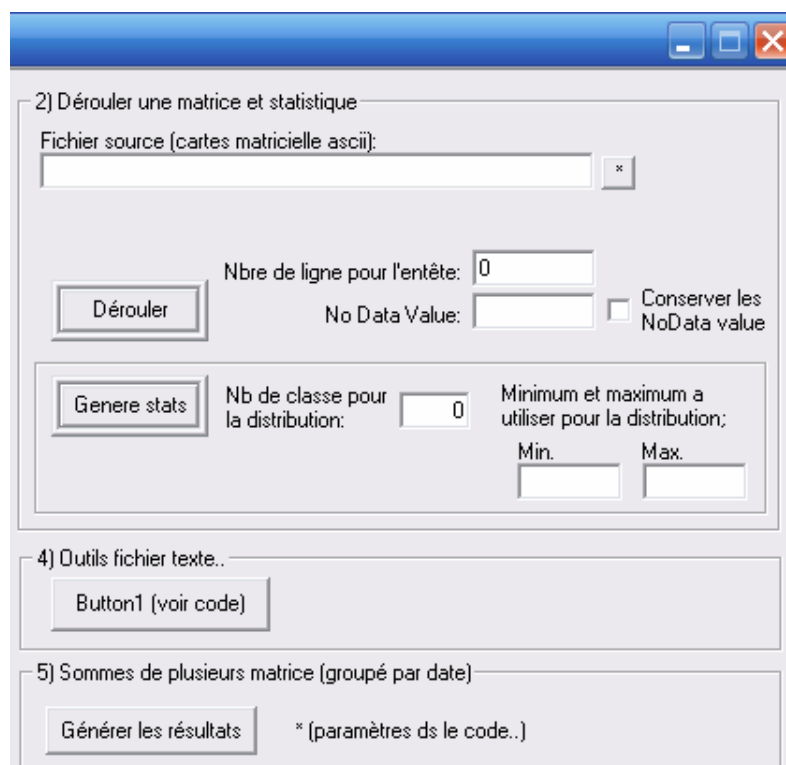


Figure C.18: Fenêtre principale du programme matrice et statistiques

Nombre total de valeurs; 11025153	[1,00 - 1,90[;	518701;	4,70%
Maximum; 10,00	[1,90 - 2,80[;	1152453;	10,45%
Minimum; 1,00	[2,80 - 3,70[;	612211;	5,55%
Somme; 85336240,00	[3,70 - 4,60[;	81200;	0,74%
Moyenne; 7,74	[4,60 - 5,50[;	154387;	1,40%
Médiane; 9,00	[5,50 - 6,40[;	45623;	0,41%
Variance; 9,41	[6,40 - 7,30[;	118664;	1,08%
Écart type; 3,07	[7,30 - 8,20[;	396309;	3,59%
Distribution des valeurs	[8,20 - 9,10[;	4151643;	37,66%
Nombre de classes; 10	[9,10 - 10,00[;	3793962;	34,41%
Longueur des classes; 0,90			

Intervalle présenté
par chaque classe

Surface occupée
par chaque classe

Pourcentage
d'occupation du
sol présenté par
chaque classe

Figure C.19: Fichier statistique généré à partir du programme matrice et statistique

ANNEXE D. MATRICES DE TRANSITION

Les matrices de transition présentent l'évolution de la distribution des classes thématiques entre les différentes dates d'acquisition d'images. Dans le cas présent, une fenêtre défilante de 100 ha a été utilisée pour le calcul de l'évolution des différentes classes. Les images classifiées sont donc subdivisées en imageries d'une superficie de 100 ha. Par la suite, il est possible de déterminer l'évolution de l'occupation du territoire sous chacune des imageries créées. Cette évolution se traduit par la confirmation dans le temps de l'occupation du sol pour une classe donnée ou l'affectation de nouvelles classes thématiques à l'utilisation du territoire. Cette analyse permet une première évaluation de la qualité des classifications basée sur la récurrence de l'utilisation du territoire. En effet, certains changements d'occupation du territoire ne peuvent être logiquement envisagés et suggèrent plutôt une confusion entre deux classes. Les matrices de transitions entre les différentes dates sont présentées aux tableaux D.1 à D.19. Il est à noter que dans l'étude présente il est peu pertinent de procéder à une analyse de chacune des classes et ce pour chacune des matrices de transitions. Il est plutôt raisonnable de poser un regard global sur la récurrence, l'évolution ou la confusion des différentes classes par rapport aux champs thématiques les regroupant.

Tableau D.1 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1976 à 1981 pour le bassin versant de la rivière Chaudière.

	Classes	1981												Total
		Nulle	Urbain	Pâturage et foin	Céréales	Maïs	Eau	Milieu humide	Sol nu	Friche	Feuillus	Conifères	Non Classifiés	
1976	Nulle	2816247,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2816247,00
	Urbain	0,00	13788,06	3827,16	1357,71	107,60	94,77	683,88	137,66	2197,13	3703,16	1601,82	0,00	27498,94
	Pâturage et foin	0,00	1280,47	32111,69	1354,45	73,40	63,56	640,67	142,83	2491,17	5648,50	2150,75	0,00	45957,50
	Céréales	0,00	4125,79	9833,57	19407,31	298,95	176,21	1507,42	279,30	5993,05	9587,08	3293,08	0,00	54501,75
	Maïs	0,00	53,99	103,31	24,78	148,56	1,55	10,18	2,16	34,61	79,26	24,61	0,00	483,00
	Eau	0,00	53,81	49,02	38,96	1,06	7774,38	18,72	14,88	21,35	138,28	182,67	0,00	8293,13
	Milieu humide	0,00	777,51	2329,79	977,75	90,49	37,78	2195,13	97,28	1451,39	2718,73	1180,03	0,00	11855,88
	Sol nu	0,00	382,97	472,38	234,31	29,60	44,28	230,35	771,25	478,62	1098,42	431,52	0,00	4173,69
	Friche	0,00	853,12	2208,67	1142,23	50,71	75,46	647,97	154,80	8068,25	8368,04	4538,64	0,00	26107,88
	Feuillus	0,00	3053,40	6341,58	4107,63	146,38	154,97	2370,26	441,62	6122,41	223721,30	22267,82	0,00	268727,36
	Conifères	0,00	2326,00	3597,99	1547,19	127,14	149,30	1571,94	1139,79	3185,02	18161,02	209667,60	0,00	241472,99
	Non Classifiés	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total		2816247,00	26695,13	60875,14	30192,31	1073,88	8572,25	9876,50	3181,56	30043,01	273223,80	245338,53	0,00	3505319,11

Tableau D.2 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1976 à 1981 pour le bassin versant de la rivière Chaudière, des classes vers les regroupements de classes

	Classes	1981			
		Récurrence	Évolution et Confusion		
			Milieu Agricole	Milieu forestier et arbustif	Autres
1976	Urbain	50,14%	19,25%	27,28%	3,33%
	Pâturage et foin	69,87%	3,11%	22,39%	4,63%
	Céréales	35,61%	18,59%	34,63%	11,17%
	Maïs	30,76%	26,52%	28,67%	14,05%
	Eau	93,74%	1,07%	4,13%	1,05%
	Milieu humide	18,52%	28,66%	45,13%	7,70%
	Sol nu	18,48%	17,64%	48,12%	15,76%
	Friche	30,90%	13,03%	49,44%	6,63%
	Feuillus	83,25%	3,94%	10,56%	2,24%
	Conifères	86,83%	2,18%	8,84%	2,15%
	Moyenne	77,76%			

Tableau D.3 : Matrice de transition de l'occupation du sol par classe thématique de 1976 à 1981

	Classes	1981		
		Récurrence et Confusion		
		Milieu Agricole	Milieu Forestier et arbustif	Autres
1976	Milieu Agricole	62,76%	29,03%	8,21%
	Milieu forestier et arbustif	3,59%	93,99%	2,41%
	Autres	18,36%	29,34%	52,30%

Tableau D.4 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1981 à 1987 pour le bassin versant de la rivière Chaudière

	Classes	1987												Total
		Nulle	Urbain	Pâturage et foin	Céréales	Maïs	Eau	Milieu humide	Sol nu	Friche	Feuillus	Conifères	Non Classifiés	
1981	Nulle	2816247,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2816247,00
	Urbain	0,00	16120,38	2293,65	2953,07	627,65	28,43	463,92	593,30	902,94	904,60	1807,20	0,00	26695,13
	Pâturage et foin	0,00	1640,60	45496,50	5628,42	1007,12	28,16	714,26	820,64	1543,95	1688,48	2306,99	0,00	60875,13
	Céréales	0,00	1549,57	2891,64	19877,00	515,54	17,94	598,54	567,19	1079,31	1359,51	1736,07	0,00	30192,31
	Maïs	0,00	84,11	107,83	171,76	473,94	1,92	22,57	39,07	37,28	51,43	83,98	0,00	1073,88
	Eau	0,00	148,86	185,01	120,53	30,98	7561,06	58,26	67,90	109,88	138,23	151,54	0,00	8572,25
	Milieu humide	0,00	577,27	1399,95	1648,24	290,50	10,44	2506,13	295,76	791,00	1264,84	1092,37	0,00	9876,50
	Sol nu	0,00	231,07	312,79	306,86	46,75	11,47	90,78	1017,81	460,57	287,81	415,64	0,00	3181,56
	Friche	0,00	1796,86	4449,89	5472,78	944,29	48,91	613,08	728,79	9269,19	3951,40	2767,82	0,00	30043,00
	Feuillus	0,00	6396,45	13502,19	17505,38	2610,01	153,53	4107,01	3562,88	9230,89	197886,10	18269,32	0,00	273223,75
	Conifères	0,00	2717,97	4752,79	6646,99	637,87	167,19	2290,34	4231,15	11785,69	28024,18	184084,40	0,00	245338,58
	Non Classifiés	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Total	2816247,00	31263,13	75392,24	60331,03	7184,63	8029,06	11464,88	11924,50	35210,70	235556,59	212715,34	0,00	3505319,09

Tableau D.5 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1981 à 1987 pour le bassin versant de la rivière Chaudière, des classes vers les regroupements de classes

	Classes	1987			
		Récurrence	Évolution et Confusion		
			Milieu Agricole	Milieu forestier et arbustif	Autres
1981	Urbain	60,39%	22,01%	13,54%	4,07%
	Pâturage et foin	74,74%	10,90%	9,10%	5,26%
	Céréales	65,83%	11,28%	13,83%	9,05%
	Maïs	44,13%	26,04%	16,08%	13,75%
	Eau	88,20%	3,93%	4,66%	3,21%
	Milieu humide	25,37%	33,80%	31,88%	8,95%
	Sol nu	31,99%	20,95%	36,59%	10,48%
	Friche	30,85%	36,17%	22,37%	10,61%
	Feuillus	72,43%	12,30%	10,07%	5,20%
	Conifères	75,03%	4,91%	16,23%	3,83%
	Moyenne	71,74%			

Tableau D.6 : Matrice de transition de l'occupation du sol par classe thématique de 1981 à 1987

	Classes	1987		
		Récurrence et Confusion		
		Milieu Agricole	Milieu Forestier et arbustif	Autres
1981	Milieu Agricole	82,67%	10,73%	6,60%
	Milieu forestier et arbustif	10,30%	84,81%	4,89%
	Autres	21,14%	17,23%	61,63%

Tableau D.7 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1987 à 1990 pour le bassin versant de la rivière Chaudière

	Classes	1990												Total
		Nulle	Urbain	Pâturage et foin	Céréales	Maïs	Eau	Milieu humide	Sol nu	Friche	Feuillus	Conifères	Non Classifiés	
1987	Nulle	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Urbain	0,00	20814,88	1637,43	2097,41	499,34	33,62	1354,08	220,39	1094,23	1912,09	1599,68	0,00	31263,15
	Pâturage et foin	0,00	1395,75	52260,56	7083,85	1193,42	43,90	2187,01	298,90	3537,77	4722,02	2669,06	0,00	75392,24
	Céréales	0,00	1135,57	4323,79	42994,50	834,01	37,35	1655,66	234,08	2569,28	4050,42	2496,34	0,00	60331,00
	Maïs	0,00	300,88	817,17	929,44	2849,88	5,25	506,38	59,33	458,57	796,83	460,90	0,00	7184,63
	Eau	0,00	15,59	29,69	39,45	15,62	7811,00	33,13	3,46	11,56	28,67	40,90	0,00	8029,07
	Milieu humide	0,00	762,48	974,25	761,10	327,23	15,95	5243,38	117,54	371,60	1254,29	1637,07	0,00	11464,89
	Sol nu	0,00	854,57	1497,91	1488,01	446,77	69,66	852,09	2035,25	1042,55	2054,74	1582,95	0,00	11924,50
	Friche	0,00	1098,30	2886,36	2432,74	680,77	83,22	969,19	204,80	16601,13	6577,30	3676,90	0,00	35210,71
	Feuillus	0,00	2379,28	4152,86	3414,86	1170,23	84,19	1434,69	882,57	2381,44	200064,90	19591,63	0,00	235556,65
	Conifères	0,00	1896,02	2999,79	2999,52	839,75	108,43	1845,09	562,13	1987,56	7500,41	191976,60	0,00	212715,30
	Non Classifiés	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total		0,00	30653,32	71579,81	64240,88	8857,02	8292,57	16080,70	4618,45	30055,69	228961,67	225732,03	0,00	689072,14

Tableau D.8 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1987 à 1990 pour le bassin versant de la rivière Chaudière, des classes vers les regroupements de classes

	Classes	1990			
		Récurrence	Évolution et Confusion		
			Milieu Agricole	Milieu forestier et arbustif	Autres
1987	Urbain	66,58%	13,54%	14,73%	5,14%
	Pâturage et foin	69,32%	10,98%	14,50%	5,21%
	Céréales	71,26%	8,55%	15,11%	5,08%
	Maïs	39,67%	24,31%	23,89%	12,13%
	Eau	97,28%	1,06%	1,01%	0,65%
	Milieu humide	45,73%	17,99%	28,46%	7,81%
	Sol nu	17,07%	28,79%	39,25%	14,90%
	Friche	47,15%	17,04%	29,12%	6,69%
	Feuillus	84,93%	3,71%	9,33%	2,03%
	Conifères	90,25%	3,22%	4,46%	2,07%
	Moyenne	81,83%			

Tableau D.9 : Matrice de transition de l'occupation du sol par classe thématique de 1987 à 1990

	Classes	1995		
		Récurrence et Confusion		
		Milieu Agricole	Milieu Forestier et arbustif	Autres
1990	Milieu Agricole	79,27%	15,23%	5,50%
	Milieu forestier et arbustif	4,46%	93,15%	2,39%
	Autres	15,66%	20,15%	64,19%

Tableau D.10 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1990 à 1995 pour le bassin versant de la rivière Chaudière.

	Classes	1995												Total
		Nulle	Urbain	Pâturage et foin	Céréales	Maïs	Eau	Milieu humide	Sol nu	Friche	Feuillus	Conifères	Non Classifiés	
1990	Nulle	2816247,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2816247,00
	Urbain	0,00	19452,63	1446,38	770,10	189,74	80,41	866,08	551,07	1284,34	3371,27	2641,30	0,00	30653,32
	Pâturage et foin	0,00	2028,20	46586,31	3436,73	824,60	129,80	1873,41	1016,26	2940,29	7509,24	5234,98	0,00	71579,80
	Céréales	0,00	2355,65	9672,26	32664,00	721,47	133,56	1824,49	983,54	3871,86	7999,56	4014,48	0,00	64240,87
	Maïs	0,00	607,76	1262,82	670,95	1582,06	50,88	468,52	195,20	700,29	1978,05	1340,48	0,00	8857,00
	Eau	0,00	6,50	6,00	4,18	2,06	8039,06	6,29	14,82	84,23	82,25	47,18	0,00	8292,56
	Milieu humide	0,00	971,90	1479,71	893,78	247,48	58,92	6369,56	320,68	814,52	2661,21	2262,93	0,00	16080,69
	Sol nu	0,00	276,31	401,09	197,50	75,94	39,74	188,16	1387,19	489,58	1087,27	475,67	0,00	4618,44
	Friche	0,00	959,79	3475,84	1477,66	249,02	60,16	820,01	542,66	15257,25	4550,69	2662,60	0,00	30055,69
	Feuillus	0,00	1416,94	2341,86	1396,88	238,40	130,37	1347,25	1999,53	5997,08	204020,80	10072,51	0,00	228961,62
	Conifères	0,00	1192,02	2125,04	1051,42	182,80	317,79	969,92	1916,55	5136,75	16662,26	196177,50	0,00	225732,05
	Non Classifiés	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total		2816247,00	29267,69	68797,31	42563,19	4313,56	9040,69	14733,69	8927,50	36576,19	249922,60	224929,63	0,00	3505319,04

Tableau D.11 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1990 à 1995 pour le bassin versant de la rivière Chaudière, des classes vers les regroupements de classes

	Classes	1995			
		Récurrence	Évolution et Confusion		
			Milieu Agricole	Milieu forestier et arbustif	Autres
1990	Urbain	63,46%	7,85%	23,80%	4,89%
	Pâturage et foin	65,08%	5,95%	21,91%	7,05%
	Céréales	50,85%	16,18%	24,73%	8,25%
	Maïs	17,86%	21,83%	45,37%	14,93%
	Eau	96,94%	0,15%	2,58%	0,33%
	Milieu humide	39,61%	16,30%	35,69%	8,40%
	Sol nu	30,04%	14,61%	44,44%	10,92%
	Friche	50,76%	17,31%	24,00%	7,93%
	Feuillus	89,11%	1,74%	7,02%	2,14%
	Conifères	86,91%	1,49%	9,66%	1,95%
	Moyenne	78,75%			

Tableau D.12 : Matrice de transition de l'occupation du sol par classe thématique de 1990 à 1995

	Classes	1995		
		Récurrence et Confusion		
		Milieu Agricole	Milieu Forestier et arbustif	Autres
1990	Milieu Agricole	67,34%	24,60%	8,06%
	Milieu forestier et arbustif	2,59%	95,01%	2,41%
	Autres	9,58%	25,65%	64,77%

Tableau D.13 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1995 à 1999 pour le bassin versant de la rivière Chaudière.

	1999													Total
	Classes	Nulle	Urbain	Pâturage et foin	Céréales	Maïs	Eau	Milieu humide	Sol nu	Friche	Feuillus	Conifères	Non Classifiés	
1995	Nulle	2816247,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2816247,00
	Urbain	0,00	20690,00	1947,87	1385,16	228,61	73,47	527,29	353,17	784,90	2102,54	1174,67	0,00	29267,69
	Pâturage et foin	0,00	1303,25	52565,56	5654,23	676,39	60,94	863,79	528,77	2150,88	3077,81	1915,71	0,00	68797,31
	Céréales	0,00	1371,25	5571,42	26985,44	718,34	63,49	1072,27	432,86	1679,39	3179,50	1489,23	0,00	42563,19
	Maïs	0,00	293,30	593,17	592,43	1128,69	23,36	264,62	92,02	308,53	739,45	278,00	0,00	4313,56
	Eau	0,00	79,60	76,73	36,29	10,30	8295,94	57,51	41,42	27,33	154,38	261,21	0,00	9040,69
	Milieu humide	0,00	1227,11	1503,49	1255,55	185,63	67,06	5711,75	440,32	647,92	2358,67	1336,21	0,00	14733,69
	Sol nu	0,00	443,86	1562,05	520,98	97,85	40,51	358,72	2048,13	695,16	2052,28	1107,96	0,00	8927,50
	Friche	0,00	1207,58	5211,57	2333,35	361,85	66,89	961,08	487,83	14102,06	7946,12	3897,86	0,00	36576,19
	Feuillus	0,00	2934,25	6580,79	3386,24	437,99	211,16	2015,23	1472,65	3175,09	214388,90	15320,29	0,00	249922,59
	Conifères	0,00	2763,31	4931,65	2430,66	416,74	527,48	2206,80	1181,66	2522,24	8426,71	199522,40	0,00	224929,65
	Non Classifiés	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Total	2816247,00	32313,50	80544,30	44580,32	4262,38	9430,31	14039,06	7078,81	26093,50	244426,35	226303,53	0,00	3505319,05

Tableau D.14 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1995 à 1999 pour le bassin versant de la rivière Chaudière, des classes vers les regroupements de classes

	Classes	1999			
		Récurrence	Évolution et Confusion		
			Milieu Agricole	Milieu forestier et arbustif	Autres
1995	Urbain	70,69%	12,17%	13,88%	3,26%
	Pâturage et foin	76,41%	9,20%	10,38%	4,01%
	Céréales	63,40%	14,78%	14,91%	6,91%
	Maïs	26,17%	27,49%	30,74%	15,61%
	Eau	91,76%	1,36%	4,90%	1,97%
	Milieu humide	38,77%	19,99%	29,48%	11,77%
	Sol nu	22,94%	24,43%	43,19%	9,44%
	Friche	38,56%	21,62%	32,38%	7,45%
	Feuillus	85,78%	4,16%	7,40%	2,65%
	Conifères	88,70%	3,46%	4,87%	2,97%
	Moyenne	86,18%			

Tableau D.15 : Matrice de transition de l'occupation du sol par classe thématique de 1995 à 1999.

	Classes	1999		
		Récurrence et Confusion		
		Milieu Agricole	Milieu Forestier et arbustif	Autres
1995	Milieu Agricole	81,68%	12,81%	5,51%
	Milieu forestier et arbustif	5,10%	91,76%	3,14%
	Autres	14,22%	20,50%	65,28%

Tableau D.16 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1999 à 2003 pour le bassin versant de la rivière Chaudière.

1999	2003													Total
	Classes	Nulle	Urbain	Pâturage et foin	Céréales	Maïs	Eau	Milieu humide	Sol nu	Friche	Feuillus	Conifères	Non Classifiés	
	Nulle	2816247,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2816247,00
	Urbain	0,00	21592,56	1616,11	996,97	308,48	115,76	221,00	480,04	975,15	3748,77	2258,66	0,00	32313,50
	Pâturage et foin	0,00	2121,98	53971,75	4623,45	884,52	173,86	104,55	1028,45	3008,67	9663,68	4963,42	0,00	80544,32
	Céréales	0,00	1750,37	5820,60	24554,38	744,82	187,60	102,45	650,49	2313,58	5691,56	2764,47	0,00	44580,32
	Maïs	0,00	318,53	557,33	614,76	1287,13	26,99	9,12	135,78	218,44	584,28	510,04	0,00	4262,38
	Eau	0,00	53,94	68,60	37,94	9,72	8391,69	3,74	46,32	46,50	291,56	480,31	0,00	9430,31
	Milieu humide	0,00	1037,06	1531,35	1076,99	528,90	139,41	1874,31	411,30	912,97	3718,09	2808,69	0,00	14039,06
	Sol nu	0,00	446,74	649,52	388,49	71,35	59,08	37,87	1835,13	616,99	2041,20	932,45	0,00	7078,81
	Friche	0,00	993,49	2252,88	1503,12	373,95	99,19	51,77	472,30	10369,25	6221,84	3755,73	0,00	26093,50
	Feuillus	0,00	2013,58	3050,47	2356,06	438,24	161,72	142,98	1038,34	3559,51	212398,30	19267,24	0,00	244426,43
	Conifères	0,00	2090,57	2509,72	2111,05	427,89	293,91	303,66	1318,36	2748,26	15118,46	199381,60	0,00	226303,47
	Non Classifiés	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	2816247,00	32418,81	72028,32	38263,19	5075,00	9649,19	2851,44	7416,50	24769,31	259477,74	237122,60	0,00	3505319,10	

Tableau D.17 : Matrice de transition de l'occupation du sol (ha) de 1999 à 2003 pour le bassin versant de la rivière Chaudière, des classes vers les regroupements de classes

	Classes	2003			
		Récurrence	Évolution et Confusion		
			Milieu Agricole	Milieu forestier et arbustif	Autres
1999	Urbain	66,82%	9,04%	21,61%	2,53%
	Pâturage et foin	67,01%	6,84%	21,90%	4,26%
	Céréales	55,08%	14,73%	24,16%	6,04%
	Maïs	30,20%	27,50%	30,80%	11,51%
	Eau	88,99%	1,23%	8,68%	1,10%
	Milieu humide	13,35%	22,35%	52,99%	11,31%
	Sol nu	25,92%	15,67%	50,72%	7,68%
	Friche	39,74%	15,83%	38,24%	6,20%
	Feuillus	86,90%	2,39%	9,34%	1,37%
	Conifères	88,10%	2,23%	7,90%	1,77%
	Moyenne	79,36%			

Tableau D.18 : Matrice de transition de l'occupation du sol par classe thématique de 1999 à 2003.

	Classes	2003		
		Récurrence et Confusion		
		Milieu Agricole	Milieu Forestier et arbustif	Autres
1999	Milieu Agricole	71,92%	22,97%	5,11%
	Milieu forestier et arbustif	3,02%	95,17%	1,81%
	Autres	11,59%	29,96%	58,46%

Il est à noter que la moyenne est calculée à partir de la proportion de l'occupation du territoire pour chacune des classes thématiques en fonction de la superficie totale de l'image sans l'inclusion des surfaces non classifiées. Par conséquent, la moyenne globale pour toute la période d'étude est de 75.28%. Cette valeur indique une bonne qualité de la classification de l'occupation du sol entre les différentes dates. L'ensemble des tableaux précédents peut être fondu dans un tableau synthèse présentant la moyenne de récurrence, d'évolution et de confusion des différentes classes thématiques. Ce tableau vise à dresser un portrait global de la classification de l'occupation du sol sur l'ensemble de la période visée (1976 à 2003).

Tableau D.19 : Moyenne des récurrences, confusions et redistributions de l'occupation du sol de 1976 à 2003

Classes	Récurrence	Évolution et Confusion		
		Milieu Agricole	Milieu forestier et arbustif	Autres
Urbain	62,53%	14,20%	19,44%	3,84%
Pâturage et foin	69,89%	8,05%	16,92%	5,15%
Céréales	56,82%	14,50%	21,12%	7,56%
Maïs	26,28%	28,84%	30,51%	14,37%
Eau	94,00%	1,34%	3,38%	1,28%
Milieu humide	28,29%	23,94%	38,01%	9,76%
Sol nu	19,84%	21,49%	46,20%	12,46%
Friche	36,00%	22,42%	33,44%	8,14%
Feuillus	83,21%	4,98%	9,09%	2,73%
Conifères	86,34%	2,97%	8,23%	2,47%
Moyenne	75,28%			

À l'aide de ces données, il est possible de porter certains commentaires sommaires quant à la classification de l'occupation du sol.

- La classe Urbain présente une récurrence moyennement élevée et une confusion non négligeable avec les milieux agricole, forestier et arbustif. Cette confusion est fortement déterminée par l'évolution de la classe Urbain entre les années 1976 et 1981. En effet, le faible niveau de précision des images Landsat 2-MSS rend difficile la discrimination de certaines classes en raison de l'absence de longueur d'onde facilitant leur séparation.
- La classe Pâturage et foin présente une récurrence relativement bonne. Cependant, elle est également sujette à une évolution vers les classes restantes du milieu agricole, forestier et arbustif. Plus précisément, les rotations de cultures peuvent expliquer les échanges entre les classes pâturage et foin et céréales, d'autre part il peut être noté que les classes Pâturage et foin, Friche et Feuillus présentent des signatures spectrales similaires pouvant induire une confusion lors de leur classification.
- Dans le même sens que pour la classe Pâturage et foin, la classe Céréales présente une récurrence moyennement élevée et une évolution relativement importante vers les milieux agricole, forestier et arbustif. À nouveau, les rotations de cultures peuvent expliquer les échanges entre les classes Céréales et Pâturage et foin. Également les similitudes entre les signatures spectrales des classes Céréales et Conifères peuvent engendrer une certaine confusion de leur classification dans le temps. De plus les valeurs présentées sont

fortement influencées par celles correspondant à l'évolution de la classe Céréale entre les années 1976 et 1981.

- O La classe Maïs présente quant à elle assez peu de récurrence dans le temps et ainsi beaucoup de confusion avec les milieux agricole, forestier et arbustif. De plus, la classe Maïs présente une confusion non négligeable avec les classes restantes. Il peut être raisonnable d'affirmer que la rotation des cultures et la réaffectation de certaines parcelles agricoles peuvent expliquer l'évolution de la classe Maïs. Toutefois, il semble également que la classe Maïs peut difficilement être identifiée et ce en raison du nombre restreints de sites d'entraînement, de la faible importance de cette classe sur le secteur d'étude et des similitudes entre les signatures spectrales des classes Maïs, Pâturages et foin, Friches et Feuillus.
- O La classe Eau présente une excellente récurrence dans le temps qui peut être expliquée par sa signature spectrale très distincte de celles de l'ensemble des autres classes.
- O Tout comme la classe Maïs, la classe Milieu humide présente assez peu de récurrence dans le temps et ainsi plus de confusion avec les milieux agricole, forestier et arbustif. En ce sens, la classe Milieu humide est difficilement identifiable et ce en raison du nombre restreints de sites d'entraînement, de la faible importance de cette classe sur le secteur d'étude et des similitudes entre les signatures spectrales des classes Milieu humide, Pâturage et foin, Friches, Feuillus et Conifères. Notamment, bon nombre de milieux humides sont caractérisés par la présence de résineux qui ont pour effet de restreindre le niveau de séparabilité de tels milieux et ainsi augmenté la confusion entre la classe Milieu humide et le milieu forestier.
- O La classe Sol nu présente une très faible récurrence dans le temps contrairement à une forte confusion avec les milieux agricole, forestier et arbustif. En ce sens, la classe Sol nu est difficilement identifiable et ce en raison du nombre restreints de sites d'entraînement, de la faible importance de cette classe sur le secteur d'étude et des similitudes entre les signatures spectrales des classes Sol nu, Céréale et Conifères.
- O La classe Friche présente à son tour une récurrence relativement peu élevée par opposition à une plus forte confusion avec les milieux, agricole et forestier. Il peut être envisagé que certain secteur de friches ont été transformé en zone agricole (Pâturage et foin) ou encore reboisé. Néanmoins, la classe Friche demeure difficilement identifiable en raison du nombre restreints de sites d'entraînement, de l'importance moindre de cette classe sur le secteur d'étude et des similitudes entre les signatures spectrales des classes Friches, Pâturage et foin et Feuillus.

- Finalement les classes Feuillus et Conifères, présentent une forte récurrence dans le temps et très peu de confusion avec les autres milieux ou classes thématiques. Il peut être noté que ces classes sont caractérisées par des signatures spectrales ayant une zone de chevauchement pouvant engendrer une certaine confusion. Néanmoins, l'importance du milieu forestier sur le secteur d'étude et les caractéristiques des signatures spectrales des classes le représentant contribuent à son identification lors de la classification.

Les commentaires précédents soulignent donc les caractéristiques de la discrimination des classes thématiques à l'aide de la méthode de classification utilisée dans la présente étude. En ce sens les classes d'importances (*Pâturage et foin*, *Céréales*, *Feuillus* et *Conifères*) sont plus facilement identifiables en raison de leur signatures spectrales et de la possibilité d'un nombre élevée des sites d'entraînement. En revanche, les classes de moindre importance présentent un niveau plus élevé de confusion avec les celles dont les signatures spectrales sont similaires. Il est raisonnable d'affirmer que la notion de confusion intègre certaines hypothèses de réaffectation ou d'évolution entre certaines classes. Toutefois il demeure très difficile de quantifier la portion de la classe sujette à une évolution réelle contrairement à une réaffectation résultante de la confusion entre les classes. Cette difficulté résulte notamment de l'absence de réalité terrain précise contribuant à la discrimination des classes. Ainsi la méthode employée se limite aux connaissances de l'analyste et à l'attention portée à l'attribution, à chacune des classes, de plages spectrales relativement uniformes dans le temps.

ANNEXE E. ÉVOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL À L'ÉCHELLE DES SOUS-BASSINS

E.1 ÉVOLUTION TEMPORELLE DE L'OCCUPATION DU SOL POUR LES SOUS-BASSINS VERSANTS DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE

E.1.1. Sous-bassin Abénaquis

Tableau E.1 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin
versant Abénaquis

Classes thématiques	1976	1981	1987	1990	1995	1999	2003
Urbain	3,15%	2,62%	3,81%	3,65%	4,28%	4,25%	3,92%
Pâturage et foin	3,54%	2,96%	7,41%	7,38%	5,27%	7,67%	5,70%
Céréales	6,71%	6,00%	9,77%	7,96%	6,08%	4,95%	4,89%
Maïs	0,00%	0,00%	0,44%	0,99%	0,19%	0,23%	0,02%
Eau	0,81%	0,84%	0,82%	0,86%	0,92%	0,86%	0,89%
Milieu humide	1,72%	0,44%	1,02%	1,97%	2,84%	0,87%	0,05%
Sol nu	0,39%	0,00%	1,25%	0,40%	1,44%	1,01%	0,52%
Friche	3,13%	1,99%	5,19%	3,40%	3,93%	1,17%	2,90%
Feuillus	42,91%	40,16%	32,83%	34,08%	31,66%	33,12%	33,10%
Conifères	37,64%	44,99%	37,46%	39,31%	43,38%	45,88%	48,02%

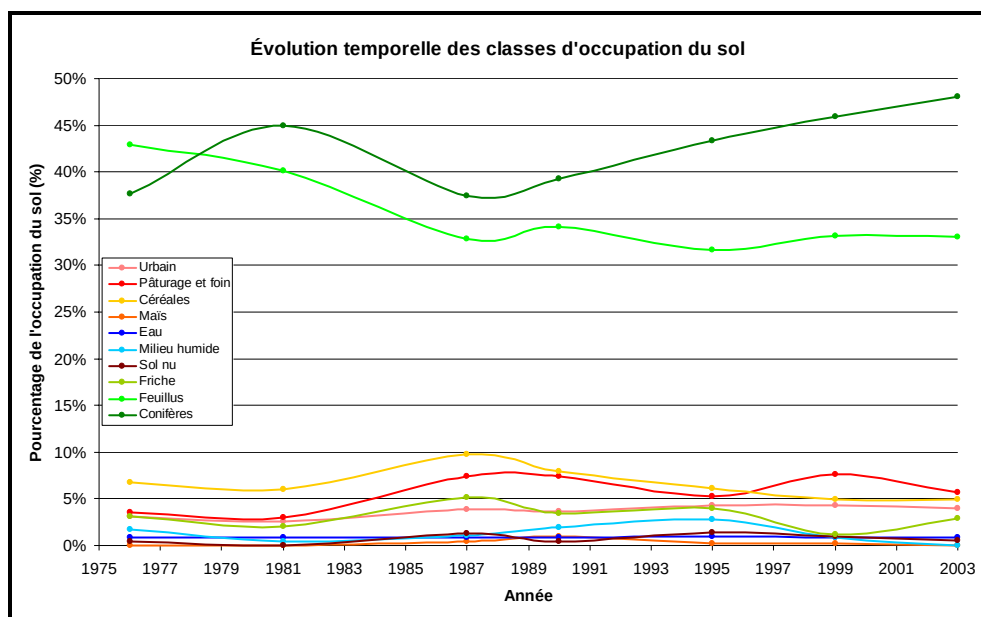


Figure E.1 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Abénaquis

E.1.2. Sous-bassin versant : Araignées

Tableau E.2 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Araignées

Classes thématiques	1976	1981	1987	1990	1995	1999	2003
Urbain	0,07%	0,16%	0,56%	1,11%	0,20%	1,66%	0,78%
Pâturage et foin	0,75%	0,08%	0,90%	0,52%	0,54%	4,60%	1,23%
Céréales	0,32%	0,19%	1,74%	0,81%	0,26%	0,86%	0,30%
Maïs	0,00%	0,00%	0,06%	0,05%	0,02%	0,19%	0,00%
Eau	5,26%	5,15%	5,08%	5,21%	5,20%	5,39%	5,10%
Milieu humide	0,19%	0,00%	0,67%	0,08%	0,12%	2,60%	0,07%
Sol nu	0,10%	0,42%	3,35%	0,25%	2,60%	1,26%	0,63%
Friche	1,13%	0,55%	4,80%	2,41%	2,31%	4,83%	1,69%
Feuillus	39,23%	37,82%	45,87%	45,41%	45,40%	43,49%	43,45%
Conifères	52,95%	55,63%	36,97%	44,15%	43,35%	35,12%	46,75%

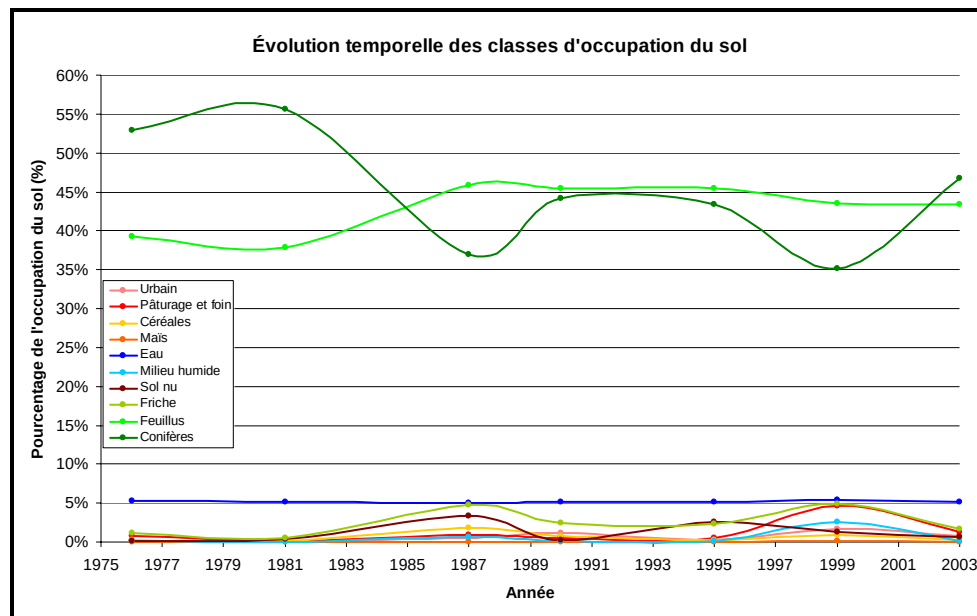


Figure E.2 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Araignées

E.1.3. Sous-bassin versant : Arnold

Tableau E.3 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Arnold

Classes thématiques	1976	1981	1987	1990	1995	1999	2003
Urbain	0,88%	1,06%	3,46%	1,38%	1,24%	2,60%	1,99%
Pâturage et foin	2,71%	2,05%	2,67%	1,14%	2,71%	8,23%	6,49%
Céréales	2,02%	0,92%	3,04%	2,91%	1,42%	2,42%	1,71%
Maïs	0,01%	0,51%	0,28%	0,03%	0,05%	0,30%	0,48%
Eau	0,20%	0,08%	0,18%	0,12%	0,11%	1,12%	0,25%
Milieu humide	0,00%	0,13%	1,16%	0,26%	0,34%	2,91%	0,45%
Sol nu	0,98%	0,29%	2,02%	1,12%	0,98%	0,84%	0,44%
Friche	3,22%	3,91%	3,68%	4,31%	6,28%	5,59%	2,56%
Feuillus	54,05%	58,95%	53,60%	53,54%	51,44%	48,48%	55,62%
Conifères	35,49%	32,10%	29,91%	35,19%	35,43%	27,52%	30,00%

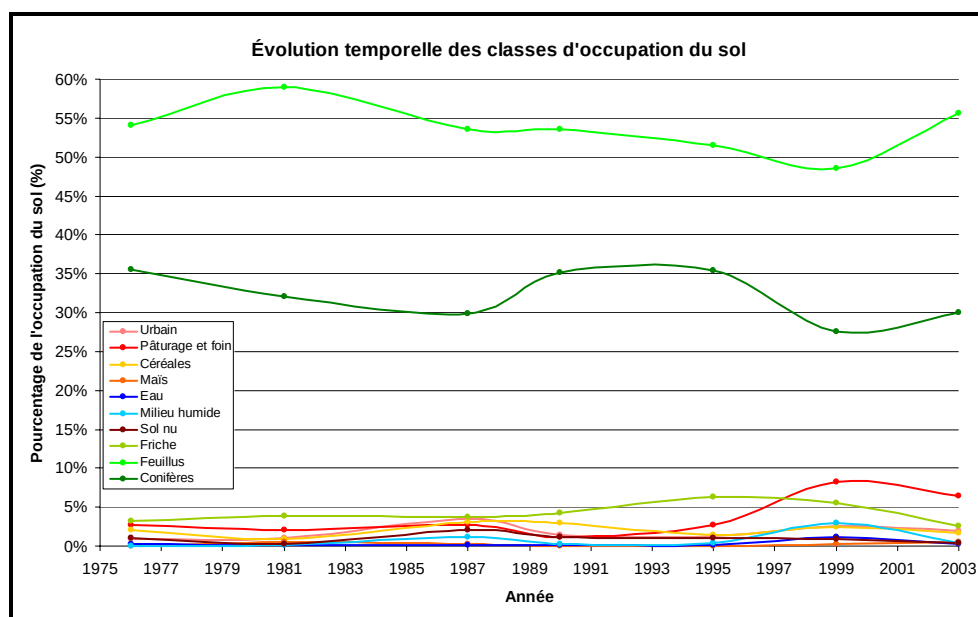


Figure E.3 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Arnold

E.1.4. Sous-bassin versant : Basse-Chaudière

Tableau E.4 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Basse-Chaudière

Classes thématiques	1976	1981	1987	1990	1995	1999	2003
Urbain	7,62%	7,89%	8,48%	7,67%	8,04%	8,07%	8,56%
Pâturage et foin	10,51%	16,02%	18,06%	17,81%	16,21%	17,11%	16,30%
Céréales	14,14%	7,09%	12,72%	13,93%	10,56%	10,47%	9,22%
Maïs	0,11%	0,28%	1,94%	2,18%	1,27%	1,33%	1,62%
Eau	1,11%	1,15%	1,09%	1,04%	1,17%	1,12%	1,34%
Milieu humide	2,69%	2,06%	2,15%	3,59%	3,16%	2,75%	0,39%
Sol nu	0,76%	0,42%	1,65%	0,43%	0,78%	0,77%	1,07%
Friche	4,05%	5,21%	3,66%	3,67%	3,31%	2,88%	2,97%
Feuillus	30,64%	33,16%	22,22%	22,62%	25,15%	26,65%	29,57%
Conifères	28,37%	26,72%	28,02%	27,07%	30,34%	28,84%	28,96%

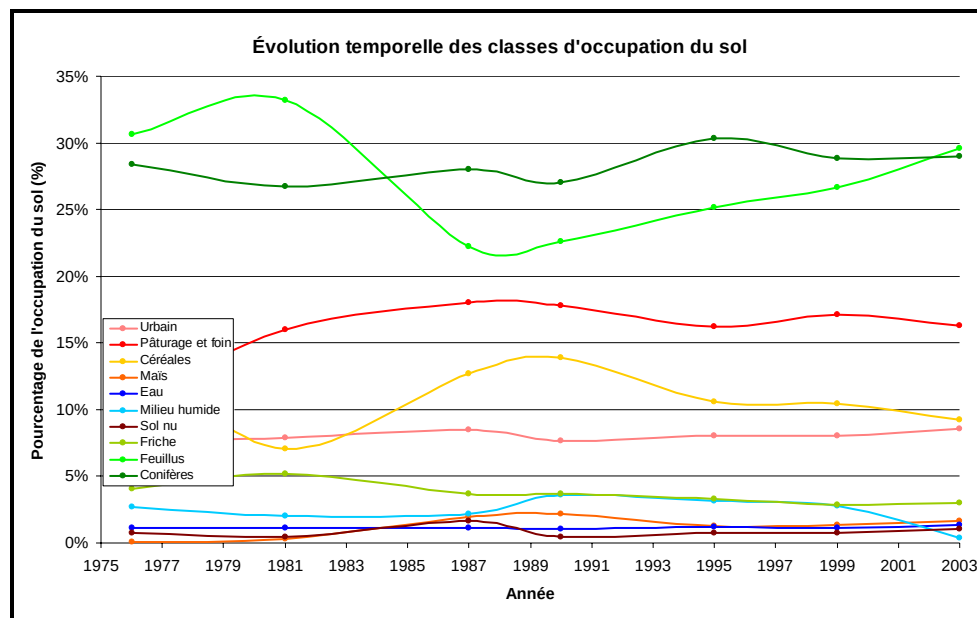


Figure E.4 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Basse-Chaudière

E.1.5. Sous-bassin versant : Beaurivage

Tableau E.5 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Beaurivage

Classes thématiques	1976	1981	1987	1990	1995	1999	2003
Urbain	6,78%	4,95%	4,34%	5,47%	4,45%	5,75%	6,06%
Pâturage et foin	11,39%	16,74%	18,19%	20,50%	15,76%	18,40%	16,96%
Céréales	14,20%	5,65%	11,16%	13,40%	11,67%	11,77%	10,95%
Maïs	0,14%	0,37%	2,05%	2,40%	1,37%	0,91%	2,33%
Eau	0,20%	0,33%	0,18%	0,18%	0,25%	0,32%	0,69%
Milieu humide	2,35%	3,48%	4,48%	5,60%	3,11%	3,84%	1,59%
Sol nu	0,88%	0,18%	3,01%	0,81%	1,54%	1,32%	1,40%
Friche	3,20%	5,49%	3,08%	2,42%	3,61%	3,47%	2,72%
Feuillus	30,17%	34,11%	32,15%	20,25%	26,75%	25,58%	31,77%
Conifères	30,69%	28,71%	30,37%	28,97%	31,49%	28,65%	25,53%

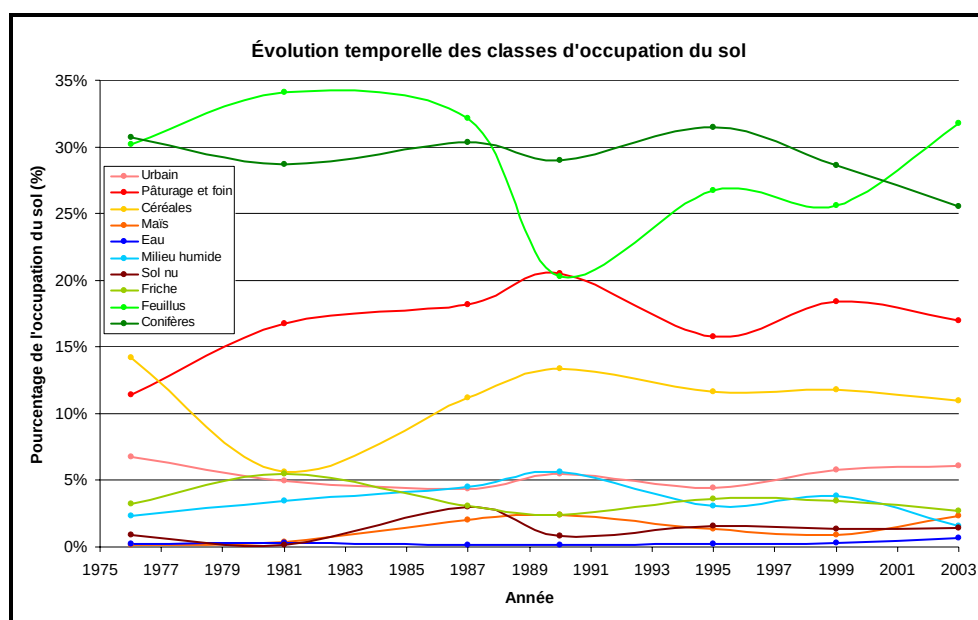


Figure E.5 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Beaurivage

E.1.6. Sous-bassin versant : Du Loup

Tableau E.6 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Du Loup

Classes thématiques	1976	1981	1987	1990	1995	1999	2003
Urbain	0,87%	1,48%	2,31%	2,52%	1,44%	2,32%	2,16%
Pâturage et foin	2,42%	1,45%	4,05%	4,00%	3,13%	5,65%	3,73%
Céréales	2,74%	1,39%	5,42%	5,35%	2,12%	2,39%	1,94%
Maïs	0,02%	0,01%	0,34%	0,45%	0,08%	0,30%	0,13%
Eau	0,90%	0,96%	0,87%	1,12%	1,35%	1,12%	1,13%
Milieu humide	0,82%	0,78%	0,59%	0,76%	0,69%	1,50%	0,05%
Sol nu	0,59%	0,46%	1,82%	0,65%	2,14%	0,67%	0,73%
Friche	3,77%	2,63%	8,47%	6,24%	12,12%	4,10%	3,31%
Feuillus	37,34%	41,62%	42,71%	40,52%	47,09%	47,44%	47,28%
Conifères	50,52%	49,23%	33,42%	38,39%	29,84%	34,51%	39,53%

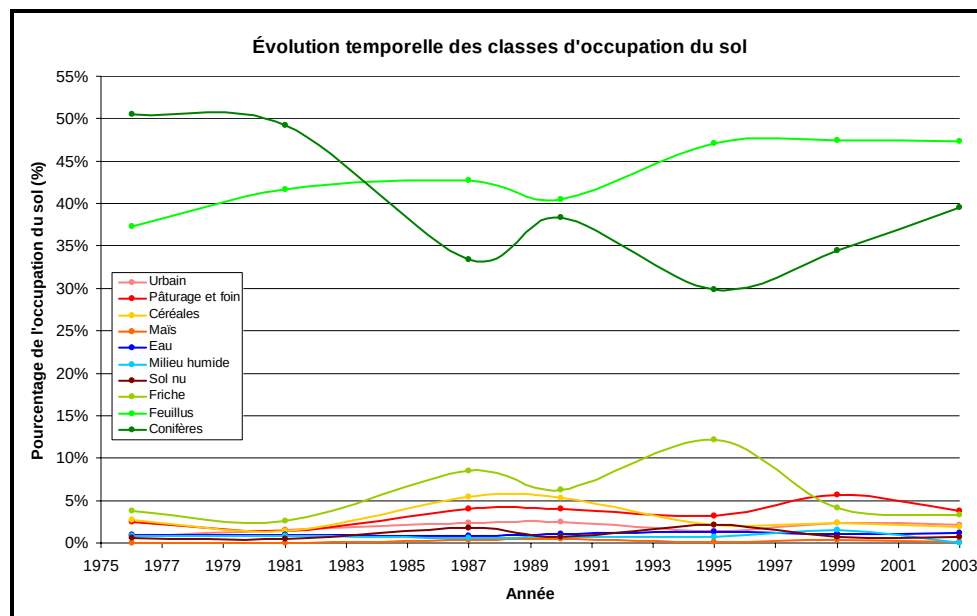


Figure E.6 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Du Loup

E.1.7. Sous-bassin versant : Famine

Tableau E.7 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Famine

Classes thématiques	1976	1981	1987	1990	1995	1999	2003
Urbain	1,72%	2,04%	3,54%	3,74%	4,31%	3,90%	4,16%
Pâturage et foin	4,56%	4,91%	6,46%	7,37%	5,23%	8,14%	6,72%
Céréales	4,63%	3,00%	6,92%	5,52%	4,32%	4,88%	2,62%
Maïs	0,00%	0,02%	0,64%	0,97%	0,28%	0,00%	0,08%
Eau	0,58%	0,59%	0,64%	1,00%	0,75%	1,02%	0,87%
Milieu humide	0,97%	0,95%	1,06%	1,45%	2,79%	1,38%	0,13%
Sol nu	0,56%	0,79%	1,32%	0,47%	1,41%	1,15%	0,84%
Friche	3,57%	3,29%	8,36%	4,39%	3,44%	3,17%	3,93%
Feuillus	40,76%	39,58%	34,86%	36,95%	31,65%	33,41%	33,36%
Conifères	42,66%	44,84%	36,21%	38,49%	45,83%	42,70%	47,28%

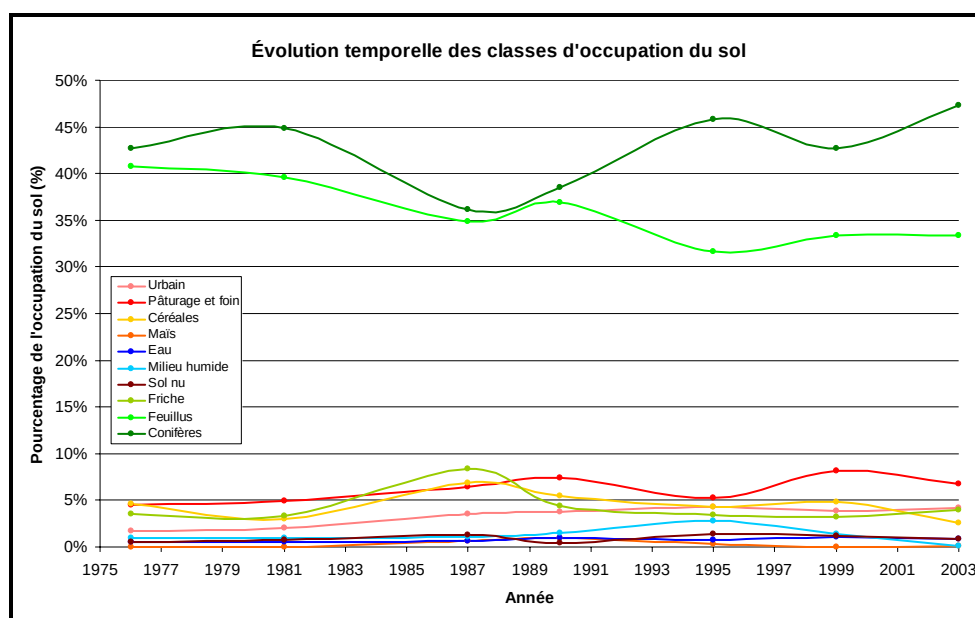


Figure E.7 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Famine

E.1.8. Sous-bassin versant : Haute-Chaudière

Tableau E.8 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Haute-Chaudière

Classes thématiques	1976	1981	1987	1990	1995	1999	2003
Urbain	2,55%	2,40%	3,55%	3,35%	2,97%	3,95%	3,67%
Pâturage et foin	4,32%	4,61%	7,62%	5,59%	6,93%	9,11%	7,70%
Céréales	4,41%	3,26%	6,25%	7,11%	3,68%	4,39%	3,50%
Maïs	0,03%	0,07%	0,54%	0,79%	0,22%	0,30%	0,21%
Eau	2,43%	2,45%	2,34%	2,38%	2,48%	2,68%	2,57%
Milieu humide	1,16%	0,70%	0,97%	1,22%	1,39%	1,58%	0,25%
Sol nu	0,30%	0,42%	1,19%	0,81%	1,33%	1,13%	1,13%
Friche	3,71%	3,32%	4,05%	4,36%	5,27%	4,29%	4,04%
Feuillus	48,41%	46,38%	43,18%	41,05%	45,01%	39,54%	43,02%
Conifères	32,68%	36,38%	30,32%	33,34%	30,72%	33,05%	33,92%

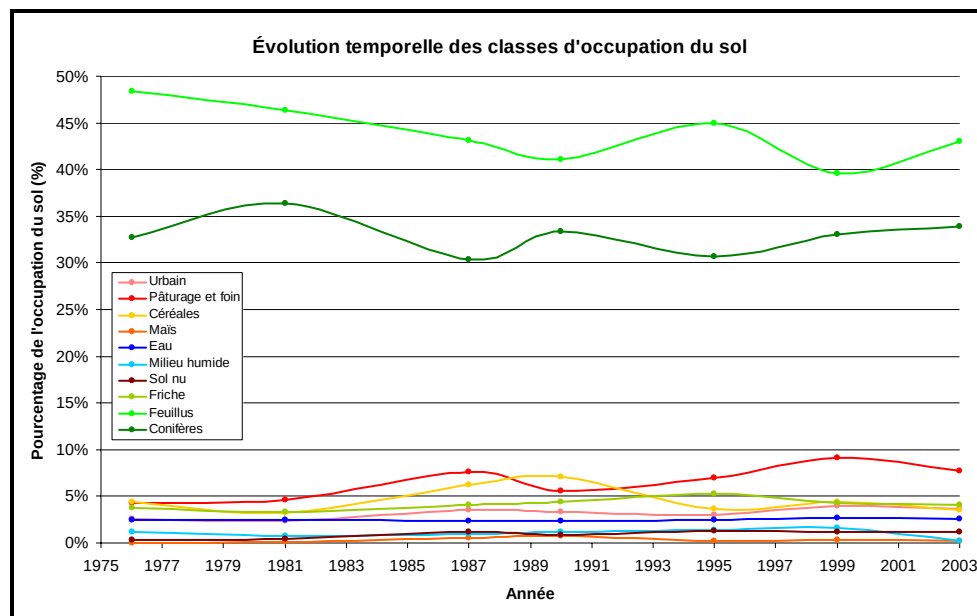


Figure E.8 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Haute-Chaudière

E.1.9. Sous-bassin versant : Samson

Tableau E.9 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Samson

Classes thématiques	1976	1981	1987	1990	1995	1999	2003
Urbain	2,64%	1,76%	2,56%	1,88%	1,48%	1,91%	1,71%
Pâturage et foin	4,64%	5,89%	7,97%	4,98%	6,06%	10,72%	8,56%
Céréales	5,30%	4,32%	6,57%	8,51%	4,68%	3,60%	3,52%
Maïs	0,05%	0,06%	0,56%	0,45%	0,17%	0,56%	0,05%
Eau	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,02%	0,17%	0,22%
Milieu humide	1,08%	0,74%	0,59%	0,88%	0,94%	1,42%	0,13%
Sol nu	0,24%	0,12%	0,86%	0,49%	0,69%	1,00%	0,59%
Friche	4,15%	3,19%	6,76%	5,47%	5,73%	4,76%	3,78%
Feuillus	49,95%	47,11%	51,39%	48,83%	56,47%	52,51%	51,78%
Conifères	31,95%	36,78%	22,72%	28,49%	23,76%	52,51%	29,66%

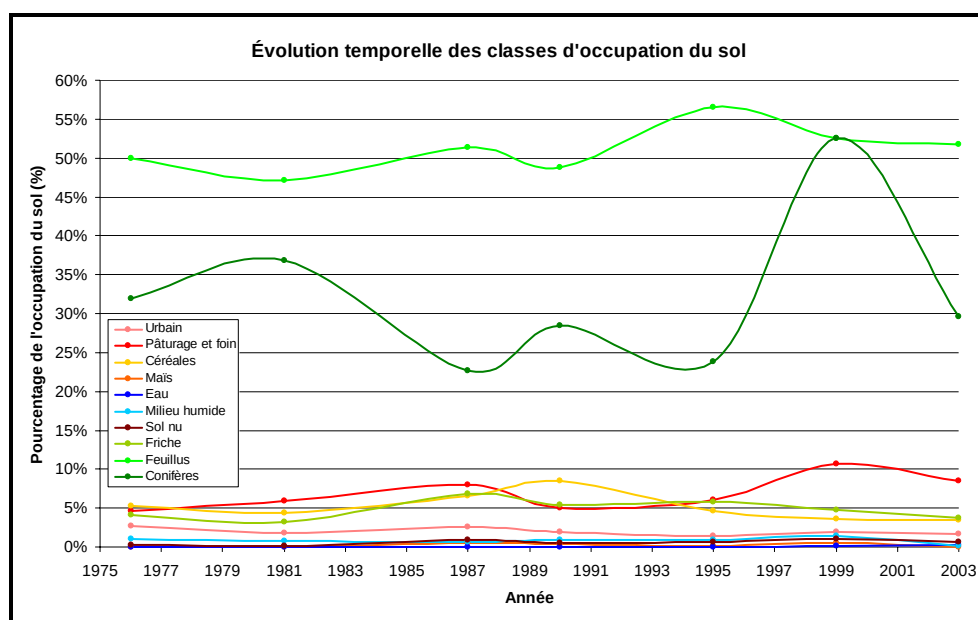


Figure E.9 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Samson

E.1.10. Sous-bassin versant : Saint-Victor

Tableau E.10 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Saint-Victor

Classes thématiques	1976	1981	1987	1990	1995	1999	2003
Urbain	6,00%	6,53%	6,01%	6,30%	6,56%	5,79%	6,24%
Pâturage et foin	11,36%	16,31%	17,79%	15,64%	19,48%	17,47%	17,52%
Céréales	13,12%	7,72%	15,90%	15,56%	8,26%	10,43%	8,84%
Maïs	0,06%	0,10%	1,55%	1,99%	0,94%	0,72%	0,65%
Eau	0,21%	0,35%	0,20%	0,19%	0,28%	0,29%	0,35%
Milieu humide	2,99%	1,83%	1,53%	3,32%	2,93%	1,21%	0,19%
Sol nu	0,97%	1,05%	1,83%	0,83%	0,78%	1,00%	1,71%
Friche	3,34%	7,79%	4,99%	5,08%	3,88%	3,46%	3,35%
Feuillus	34,91%	33,19%	22,90%	23,85%	26,85%	29,57%	29,35%
Conifères	27,03%	25,13%	27,29%	27,24%	30,05%	29,79%	31,81%

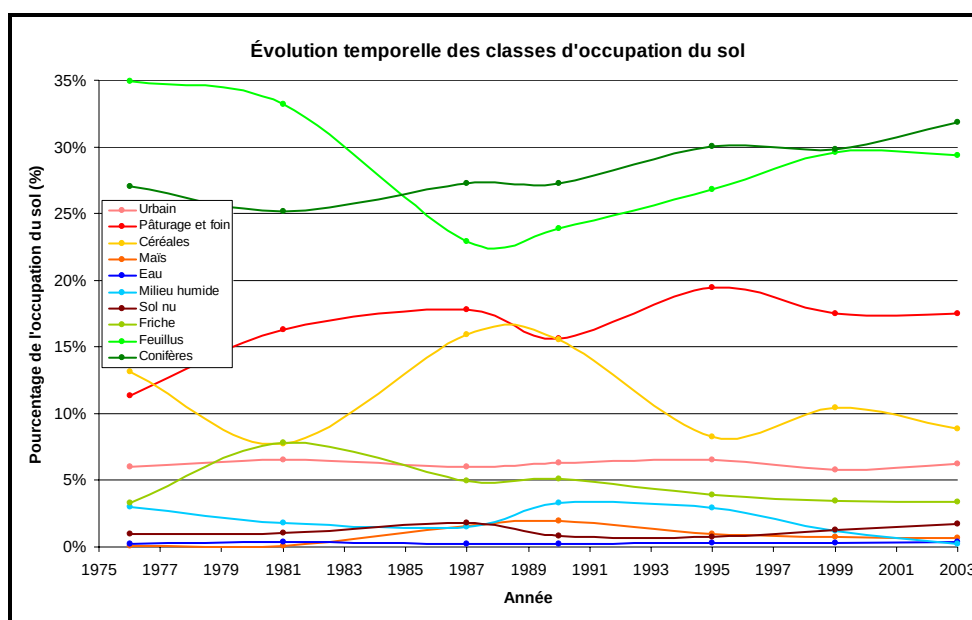


Figure E.10 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Saint-Victor

E.1.11. Sous-bassin versant : Tring

Tableau E.11 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Tring

Classes thématiques	1976	1981	1987	1990	1995	1999	2003
Urbain	5,08%	6,53%	4,80%	4,05%	5,28%	4,30%	3,03%
Pâturage et foin	10,73%	16,31%	15,18%	14,93%	17,60%	15,69%	15,51%
Céréales	9,95%	7,72%	13,58%	13,99%	9,26%	8,04%	6,87%
Maïs	0,05%	0,10%	1,51%	1,72%	1,26%	0,57%	0,27%
Eau	0,07%	0,35%	0,09%	0,08%	0,18%	0,24%	0,18%
Milieu humide	3,12%	1,83%	1,62%	3,34%	3,53%	1,45%	0,18%
Sol nu	0,49%	1,05%	1,16%	0,28%	0,29%	0,87%	0,98%
Friche	5,43%	7,79%	5,29%	4,41%	3,45%	4,23%	5,99%
Feuillus	44,72%	33,19%	31,63%	30,43%	30,01%	35,87%	36,80%
Conifères	20,35%	25,13%	25,17%	26,78%	29,14%	28,73%	30,19%

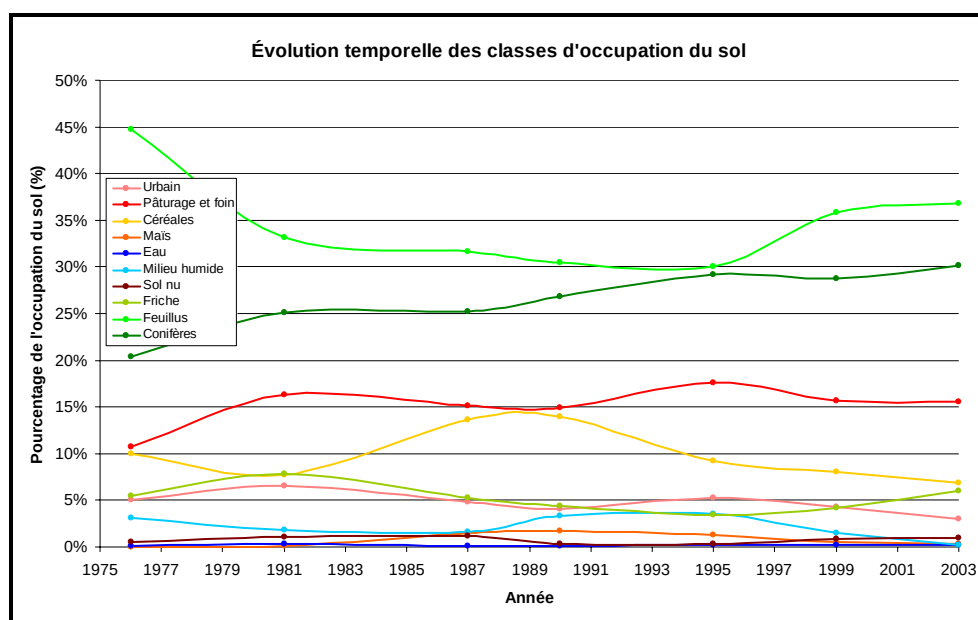


Figure E.11 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Tring

E.1.12. Sous-bassin versant : Veilleux

Tableau E.12 : Évolution temporelle du pourcentage d'occupation du sol pour le sous-bassin versant Veilleux

Classes thématiques	1976	1981	1987	1990	1995	1999	2003
Urbain	0,26%	0,21%	1,37%	2,31%	4,31%	1,66%	2,29%
Pâturage et foin	1,78%	1,67%	3,27%	4,15%	5,24%	2,92%	2,60%
Céréales	2,06%	2,01%	3,76%	3,15%	4,32%	1,32%	1,08%
Maïs	0,01%	0,00%	0,11%	0,64%	0,28%	0,05%	0,08%
Eau	0,54%	0,53%	0,51%	0,53%	0,75%	0,56%	0,55%
Milieu humide	0,56%	0,95%	2,87%	1,71%	2,79%	1,56%	0,50%
Sol nu	0,34%	0,16%	2,34%	0,68%	1,41%	1,13%	1,02%
Friche	2,24%	0,88%	5,49%	1,84%	3,44%	0,58%	2,88%
Feuillus	32,00%	29,55%	28,62%	29,26%	31,65%	26,58%	26,00%
Conifères	60,22%	64,05%	51,67%	55,74%	45,83%	63,64%	63,00%

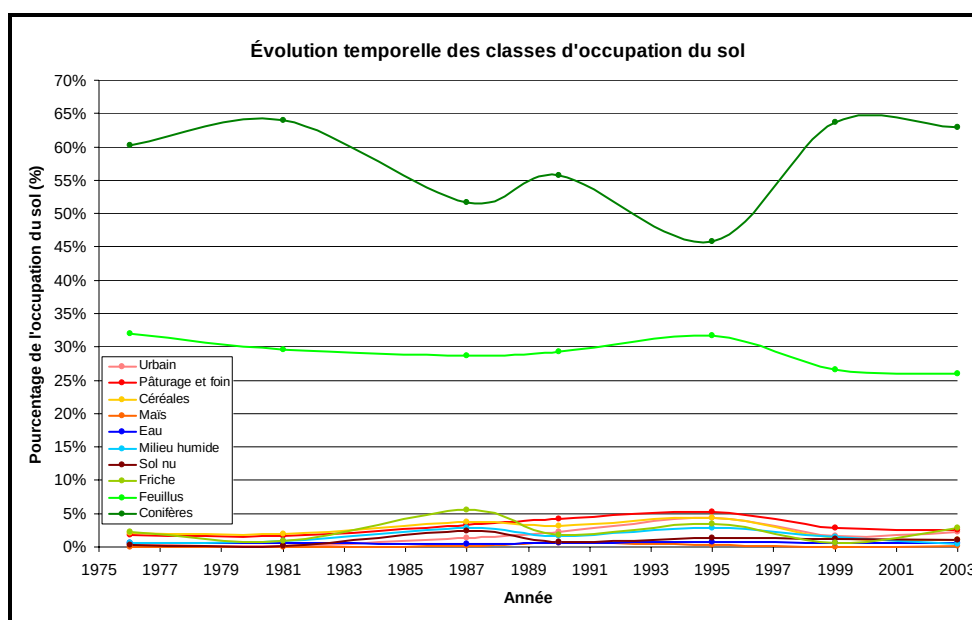


Figure E.12 : Évolution temporelle de l'occupation des classes thématiques au niveau du sous-bassin Veilleux

ANNEXE F. PROCÉDURE D'INTÉGRATION DES CARTES D'OCCUPATION DU SOL DANS GIBSI

F.1 INTÉGRATION DES CARTES D'OCCUPATION DU SOL DANS GIBSI

La première étape consiste en la création de nouveaux répertoires dont chacun va contenir la base de données GIBSI et l'occupation du sol appropriée. Dans le présent projet, il s'agit de sept répertoires contenant les cartes 1976, 1981, 1987, 1990, 1995, 1999 et 2003.

En premier lieu, l'intégration des cartes dans le modèle GIBSI exige le passage par le logiciel Grassland sous le quel se fera l'actualisation de ces cartes. Ce dernier permet d'ouvrir des fichiers Ascii. Ce qui rend nécessaire un passage de format Raster en Ascii. C'est sous le logiciel ArcGis 9.0 que cette étape a été faite. Figure F.1 présente la fenêtre de conversion sous ArcGis 9.0.

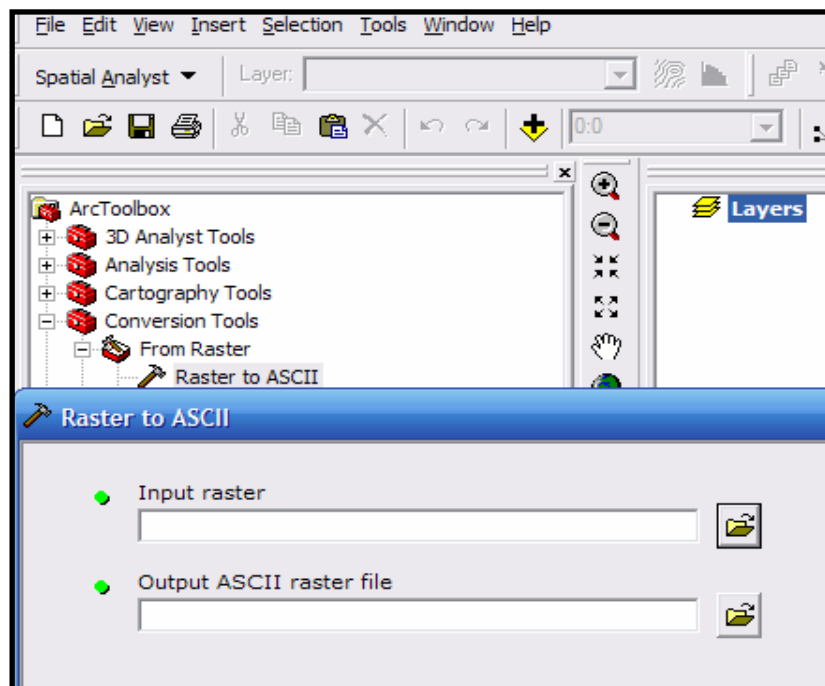


Figure F.1 : Conversion Raster à Ascii

Remarque : Avant de faire la conversion, les en-têtes des fichiers présentant les cartes ont été aussi changés pour permettre leur lecture avec le logiciel Grassland.

L'importation se fait à l'aide de la commande « r.in.ascii » dans le menu « Spatial Analysis Toolbox » du logiciel Grassland qui permet, en effet, de transformer un fichier Ascii de format texte en une image Raster binaire ce qui rend sa visualisation possible. Il est à noter que chaque carte a été importée séparément et enregistrée dans le dossier approprié.

Figure F.2 illustre les étapes de l'importation.

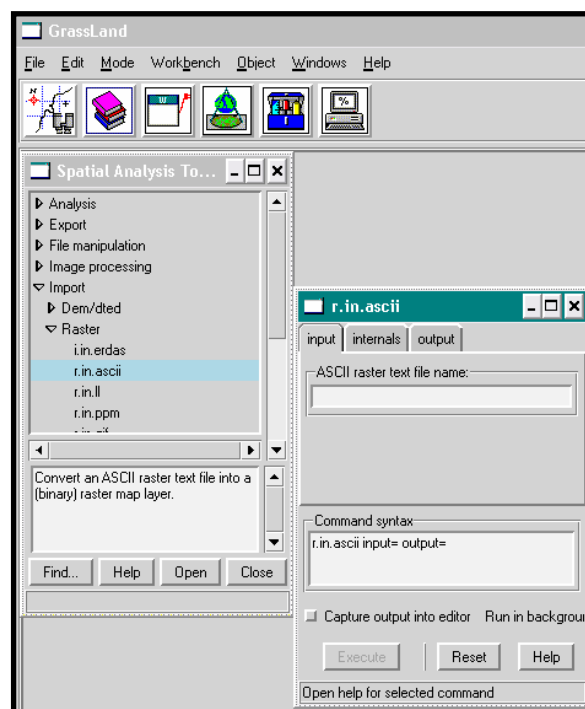


Figure F.2 : Importation des cartes dans Grassland

Chaque carte complète et corrigée d'occupation du sol a été introduite dans un nouveau répertoire qui doit contenir aussi un fichier statistique de la carte présente. Afin de générer ces fichiers statistiques, le sous menu « Report » de « Spatial Analysis Toolbox » dans Grassland présente une grande variété de commandes permettant l'exécution de tâches diverses. Dans notre cas, c'est la commande « r.stats » qui nous intéresse. Cette commande permet en effet de générer des aires statistiques de la carte présente. C'est-à-dire qu'elle calcule les surfaces de chacune des classes pour les différentes cartes d'occupation du sol.

Le menu « flags » de la fenêtre « r.stats » présente un ensemble d'options parmi lesquelles on peut choisir celles qui nous intéressent (Figure F.3). Il est préférable d'utiliser les options suivantes :

- Print area totals (pour prendre en considération toute la surface occupée par la carte).
- Report only non_zero data values (prendre en consideration seulement les éléments de la matrice présentant la carte).

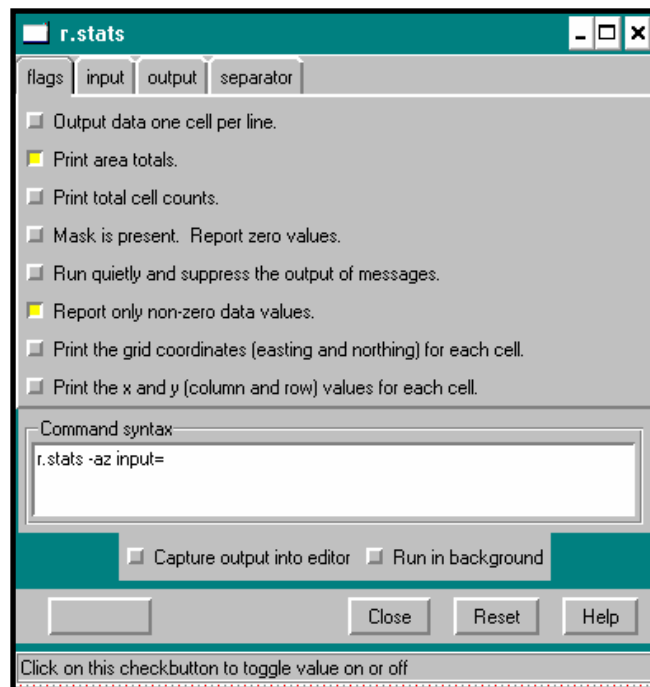


Figure F.3 : Choix des options pour la création de fichier statistique

Les données d'entrée doivent contenir dans l'ordre les données suivantes:

- USS
- Municipalité
- Sous-bassin
- Occupation du Sol

La Figure F.4, montre les composantes du fichier statistique de la carte 1981.

USS	Municipalité	Sous-bassin	Occupation du Sol	Superficie
-1122	12	9	9	158750.000000
-1122	12	9	10	611875.000000
-1113	9	9	2	1875.000000
-1113	9	9	5	656250.000000
-1113	9	9	9	91250.000000
-1113	9	9	10	180625.000000
-1113	12	9	2	2500.000000
-1113	12	9	5	308125.000000
-1113	12	9	7	3750.000000
-1113	12	9	9	31250.000000
-1113	12	9	10	144375.000000
-1106	9	9	5	856875.000000

Figure F.4 : Différentes composantes d'un fichier statistique

F.2 MISE À JOUR DES DONNÉES DANS GIBSI

Afin d'étudier l'impact du changement de l'occupation du sol sur le régime d'écoulement durant la période 1976-2003, il a été nécessaire de mettre à jour les données dans la base de données GIBSI. La mise à jour des données constitue la dernière étape de la première partie de ce travail. Les tables à mettre à jour sont au nombre de sept.

La mise à jour doit se faire dans l'ordre suivant :

- o Table Occupation du sol
- o Table ReferenceIdBDIdGrass
- o Table Données Cheptel

- o Table Données Engrais Couches
- o Table Données Prod Veg Couches
- o Table PhysicoChimiqueUssOccup
- o Table Données BilansUss

Cette étape est faite à l'aide du fichier statistique et de l'utilitaire « GIBSI_util_2 ».

L'exécution d'une requête MySQL «suppression» a été obligatoire pour l'élimination des redondances de données :

```
DELETE *  
FROM OccupationSol  
WHERE Id_Municip not in (SELECT Distinct ID_Municip FROM CouchesMunicipalites);
```


ANNEXE G. EFFET DE L'ÉVOLUTION PASSÉE DE L'OCCUPATION DU SOL SUR LE RÉGIME HYDRIQUE DES SOUS-BASSINS

G.1 SOUS-BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE BEAURIVAGE

Tableau G.1 : Quantiles de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin Beaurivage

	1976	1981	1987	1990	1995	1999	2003
quartile 1	421,1	393,8	465,0	500,1	427,5	456,1	442,6
médiane	471,9	445,8	525,8	563,2	483,6	516,1	498,8
quartile 3	607,7	581,7	664,2	702,6	620,2	654,1	636,9

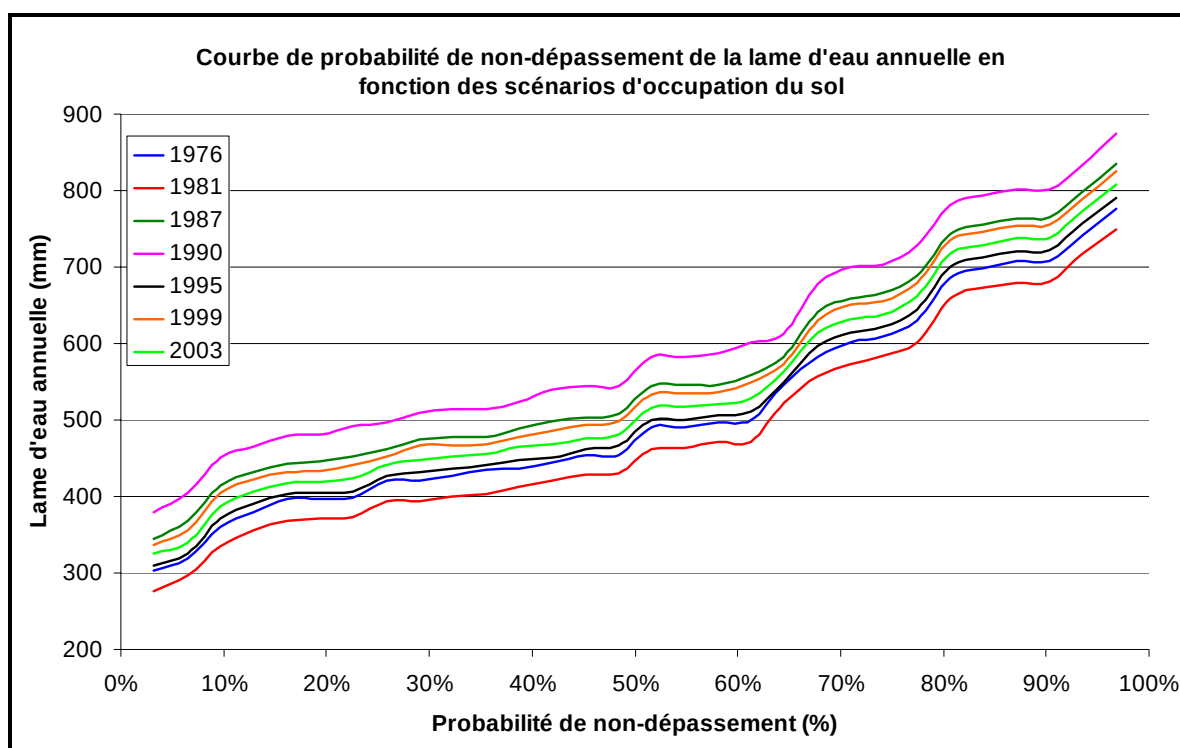


Figure G.1 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin Beaurivage

Tableau G.2 : Coefficients de corrélation et de détermination de la lame d'eau annuelle et des débits d'étiage avec l'occupation du sol pour le sous-bassin Beaurivage

		Milieu agricole	Milieu forestier	Autres
Lame d'eau annuelle	Corr,	98,4%	-74,5%	35,2%
	Det,	96,8%	55,5%	12,4%
$Q_{2.7}$ annuel	Corr,	93,1%	-59,7%	41,8%
	Det,	86,8%	35,6%	17,5%
$Q_{10.7}$ annuel	Corr,	94,4%	-60,6%	27,5%
	Det,	89,2%	36,7%	7,6%
Q_{5-30} annuel	Corr,	91,5%	-61,5%	52,7%
	Det,	83,7%	37,8%	27,8%
$Q_{2.7}$ estival	Corr,	97,3%	-93,6%	63,4%
	Det,	94,7%	87,5%	40,2%
$Q_{10.7}$ estival	Corr,	96,1%	-97,8%	78,3%
	Det,	92,5%	95,7%	61,3%
Q_{5-30} estival	Corr,	96,6%	-97,3%	75,8%
	Det,	93,2%	94,6%	57,4%

G.2 SOUS-BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE ARNOLD

Tableau G.3 : Quantiles de la lame d'eau annuelle simulée au niveau du sous-bassin Arnold

	1976	1981	1987	1990	1995	1999	2003
quartile1	779,0	761,1	823,6	771,9	768,8	872,7	811,2
médiane	929,1	910,7	976,2	922,0	919,8	1027,5	962,9
quartile 3	1026,4	1007,5	1071,7	1018,8	1016,2	1122,8	1059,1

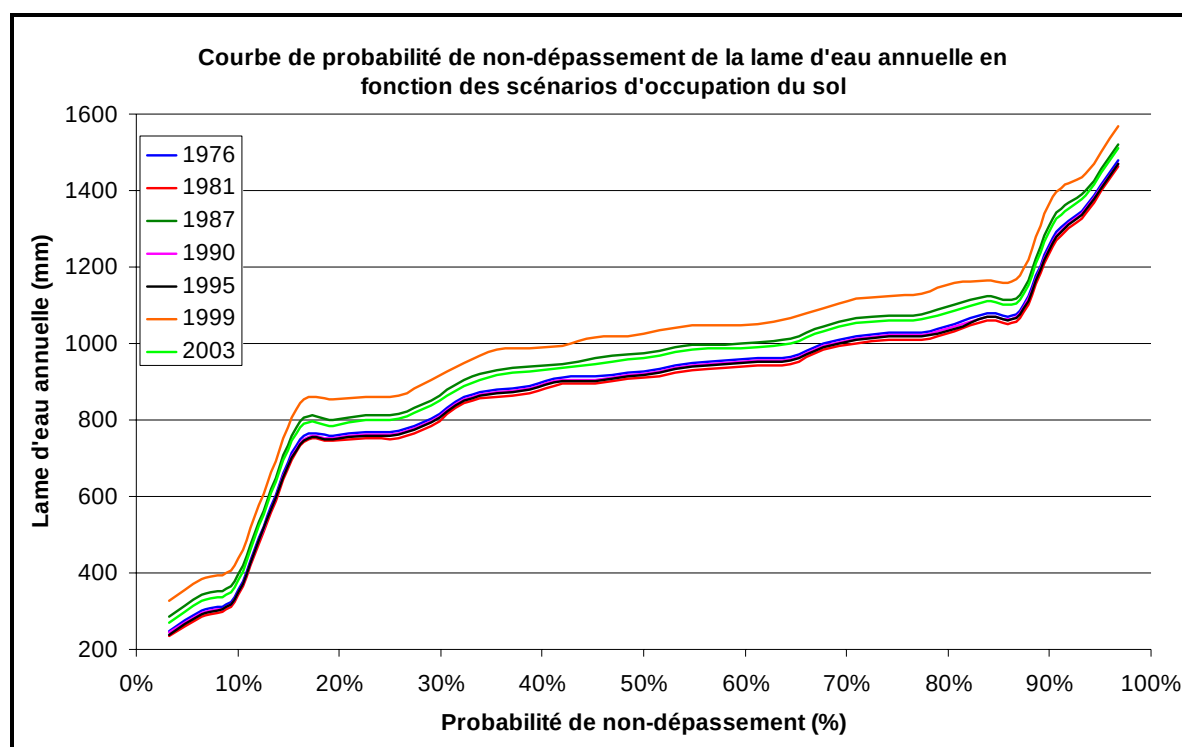


Figure G.2 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin Arnold

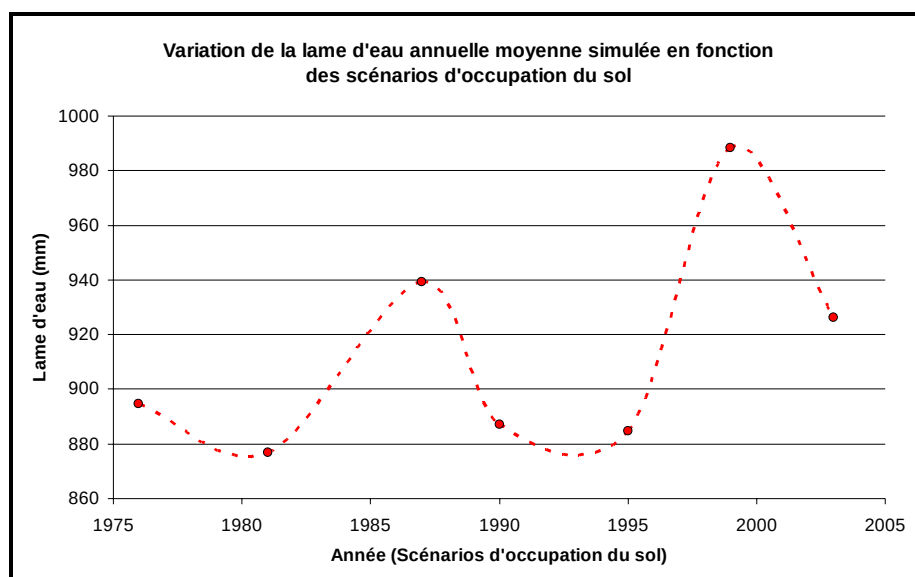


Figure G.3 : Évolution de la lame d'eau moyenne annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin Arnold

Tableau G.4 : Coefficients de corrélation et de détermination de la lame d'eau annuelle et des débits d'étiage avec l'occupation du sol pour le sous-bassin Arnold

		Milieu agricole	Milieu forestier	Autres
Lame d'eau annuelle	Corr,	92,9%	-96,2%	78,1%
	Det,	86,4%	92,5%	61,0%
$Q_{2.7} \text{ annuel}$	Corr,	41,8%	-11,9%	-26,4%
	Det,	17,4%	1,4%	7,0%
$Q_{10.7} \text{ annuel}$	Corr,	29,7%	-10,0%	-15,6%
	Det,	8,8%	1,0%	2,4%
$Q_{5.30} \text{ annuel}$	Corr,	-3,9%	32,2%	-61,2%
	Det,	0,2%	10,4%	37,5%
$Q_{2.7} \text{ estival}$	Corr,	91,4%	-97,4%	88,7%
	Det,	83,6%	94,9%	78,7%
$Q_{10.7} \text{ estival}$	Corr,	86,4%	-86,8%	73,0%
	Det,	74,6%	75,3%	53,3%
$Q_{5.30} \text{ estival}$	Corr,	3,3%	-2,4%	0,8%
	Det,	0,1%	0,1%	0,0%

G.3 SOUS-BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE ARAIGNÉES

Tableau G.5 : Quantiles de la lame d'eau annuelle simulée au niveau du sous-bassin Araignées

	1976	1981	1987	1990	1995	1999	2003
quartile1	437,8	428,5	466,2	446,9	441,2	513,4	444,5
médiane	509,5	499,7	539,4	521,6	514,7	583,1	516,3
quartile 3	573,1	562,8	605,2	584,6	578,3	656,1	579,2

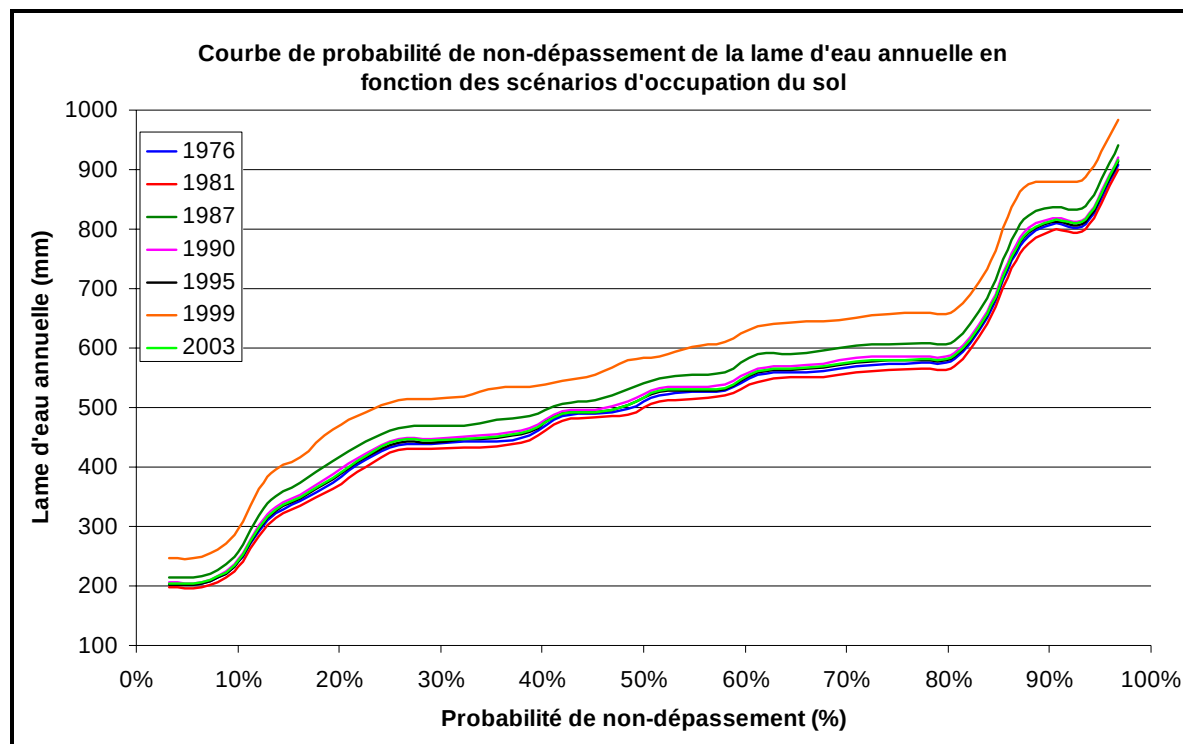


Figure G.4 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin Araignées

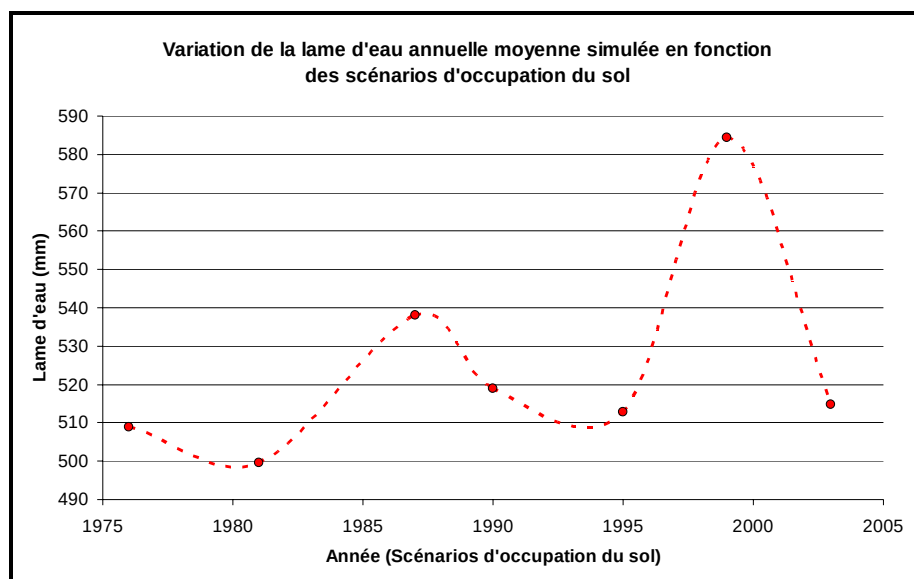


Figure G.5 : Évolution de la lame d'eau moyenne annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin Araignées

Tableau G.6 : Coefficients de corrélation et de détermination entre les débits d'étiage et l'occupation du sol au niveau du sous-bassin Araignées

		Milieu agricole	Milieu forestier	Autres
Lame d'eau annuelle	Corr,	99,4%	-95,7%	89,5%
	Det,	98,8%	91,5%	80,1%
Q_{2-7} annuel	Corr,	96,3%	-90,6%	79,6%
	Det,	92,7%	82,0%	63,4%
Q_{10-7} annuel	Corr,	87,4%	-83,0%	73,7%
	Det,	76,4%	68,9%	54,4%
Q_{5-30} annuel	Corr,	97,3%	-91,9%	81,1%
	Det,	94,6%	84,4%	65,7%
Q_{2-7} estival	Corr,	96,7%	-89,9%	78,1%
	Det,	93,4%	80,9%	60,9%
Q_{10-7} estival	Corr,	97,4%	-90,8%	79,1%
	Det,	94,8%	82,5%	62,6%
Q_{5-30} estival	Corr,	98,4%	-93,0%	82,2%
	Det,	96,8%	86,6%	67,6%

G.4 SOUS-BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE DU LOUP

Tableau G.7 : Quantiles de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin Du Loup

	1976	1981	1987	1990	1995	1999	2003
quartile1	285,5	280,4	317,2	314,5	294,8	320,1	292,2
médiane	347,6	339,6	390,8	388,4	362,0	391,3	357,1
quartile 3	459,3	450,6	502,1	502,0	472,3	501,0	468,8

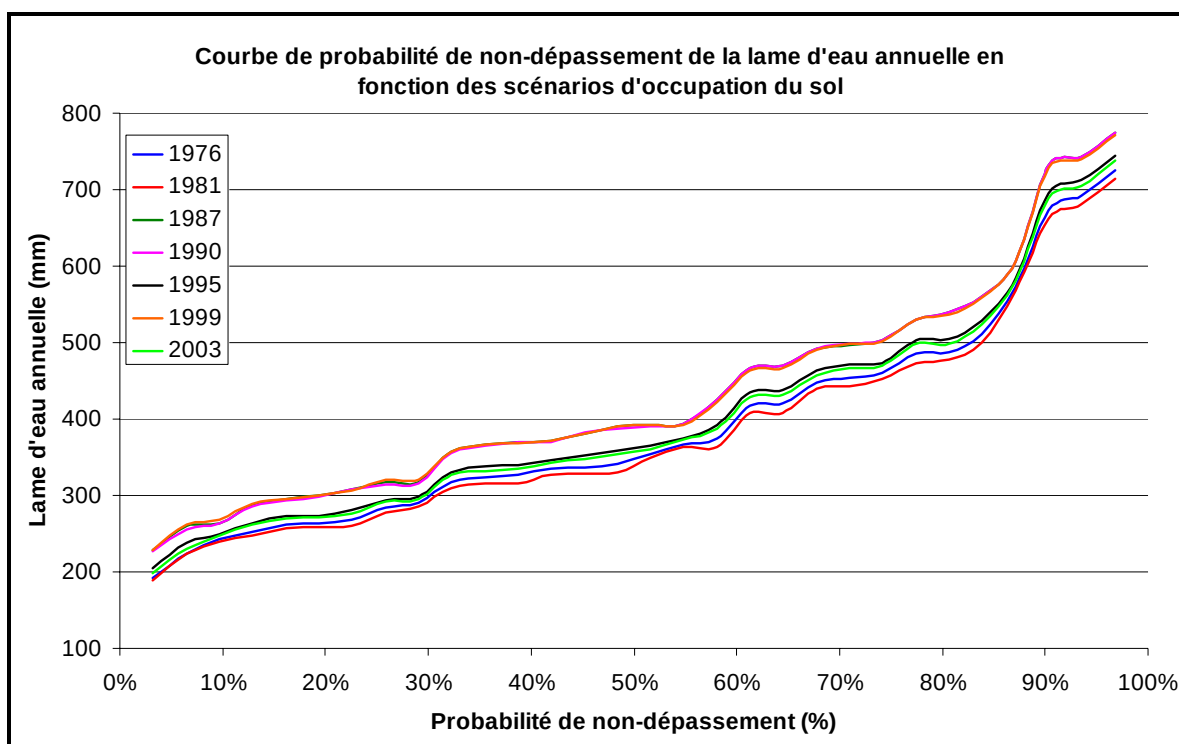


Figure G.6 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin Du Loup

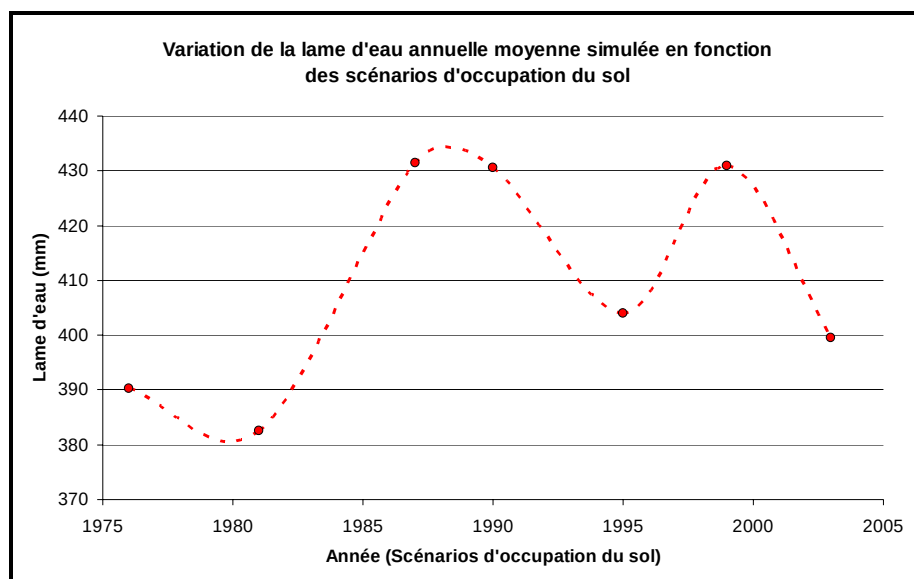


Figure G.7 : Évolution de la lame d'eau moyenne annuelle à l'exutoire du sous-bassin DuLoup

Tableau G.8 : Coefficients de corrélation et de détermination entre les débits d'étiage et l'occupation du sol au niveau du sous-bassin DuLoup

		Milieu agricole	Milieu forestier	Autres
Lame d'eau annuelle	Corr,	96,3%	-78,5%	47,6%
	Det,	92,8%	61,6%	22,7%
Q_{2-7} annuel	Corr,	89,9%	-94,7%	84,0%
	Det,	80,7%	89,7%	70,5%
Q_{10-7} annuel	Corr,	79,7%	-82,1%	68,3%
	Det,	63,6%	67,4%	46,6%
Q_{5-30} annuel	Corr,	87,0%	-91,3%	79,9%
	Det,	75,7%	83,3%	63,8%
Q_{2-7} estival	Corr,	82,8%	-88,5%	81,7%
	Det,	68,5%	78,3%	66,8%
Q_{10-7} estival	Corr,	71,5%	-76,5%	70,7%
	Det,	51,2%	58,5%	50,0%
Q_{5-30} estival	Corr,	75,3%	-82,4%	80,5%
	Det,	56,7%	67,8%	64,8%

G.5 SOUS-BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE SAMSON

Tableau G.9 : Quantiles de la lame d'eau annuelle simulée au niveau du sous-bassin Samson

	1976	1981	1987	1990	1995	1999	2003
quartile 1	432,6	423,9	458,8	444,1	427,0	461,6	429,7
médiane	502,3	493,4	526,4	515,1	498,3	529,8	500,1
quartile 3	589,3	579,9	619,8	607,9	585,5	621,8	588,0

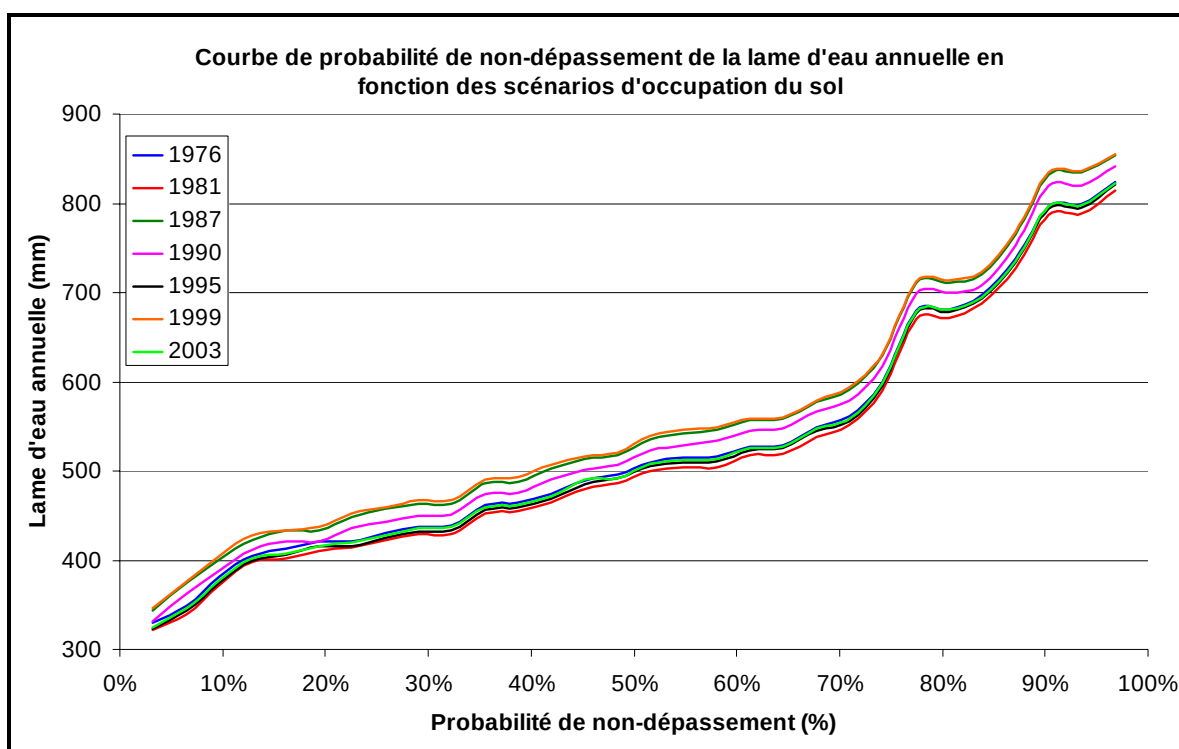


Figure G.8 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée pour le sous-bassin Samson

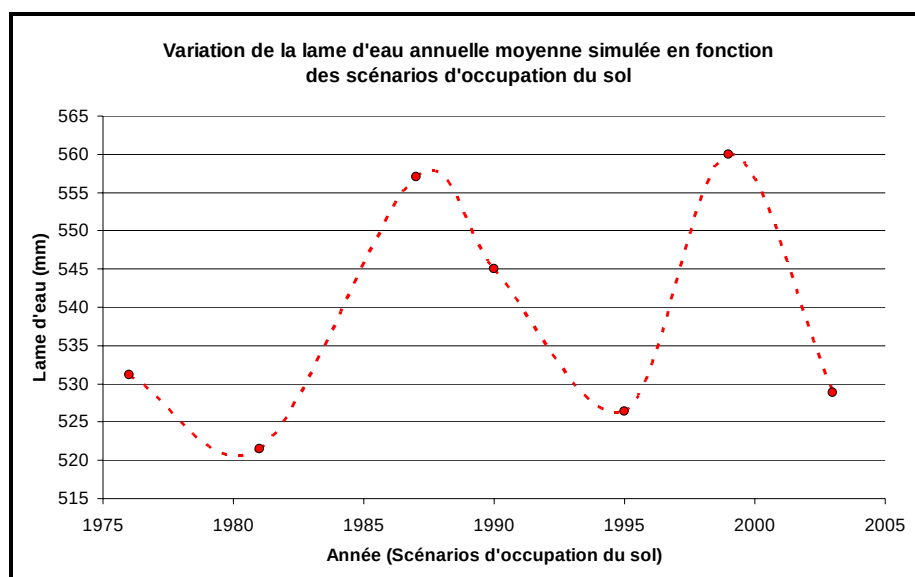


Figure G.9 : Évolution de la lame d'eau moyenne annuelle au niveau du sous-bassin Samson

Tableau G.10 : Coefficients de corrélation et de détermination entre les débits d'étiage et l'occupation du sol au niveau du sous-bassin Samson

		Milieu agricole	Milieu forestier	Autres
Lame d'eau annuelle	Corr,	93,2%	33,5%	79,0%
	Det,	86,8%	11,2%	62,5%
Q_{2-7} annuel	Corr,	70,4%	38,8%	62,6%
	Det,	49,6%	15,1%	39,2%
Q_{10-7} annuel	Corr,	70,4%	38,8%	62,6%
	Det,	49,6%	15,1%	39,2%
Q_{5-30} annuel	Corr,	21,0%	17,6%	42,0%
	Det,	4,4%	3,1%	17,6%
Q_{2-7} estival	Corr,	83,1%	53,7%	58,1%
	Det,	69,1%	28,8%	33,7%
Q_{10-7} estival	Corr,	67,2%	52,3%	74,6%
	Det,	45,1%	27,4%	55,7%
Q_{5-30} estival	Corr,	33,6%	-12,5%	64,9%
	Det,	11,3%	1,6%	42,1%

G.6 SOUS-BASSINS VERSANTS DES RIVIÈRES ABÉNAQUIS – VEILLEUX – FAMINE

Tableau G.11 : Quantiles de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin des rivières Abénaquis - Veilleux - Famine

	1976	1981	1987	1990	1995	1999	2003
quartile1	335,6	327,5	377,3	374,3	372,8	363,7	343,5
médiane	404,1	395,5	450,3	446,7	445,0	433,8	412,8
quartile 3	531,6	522,1	589,9	585,9	581,5	568,0	543,8

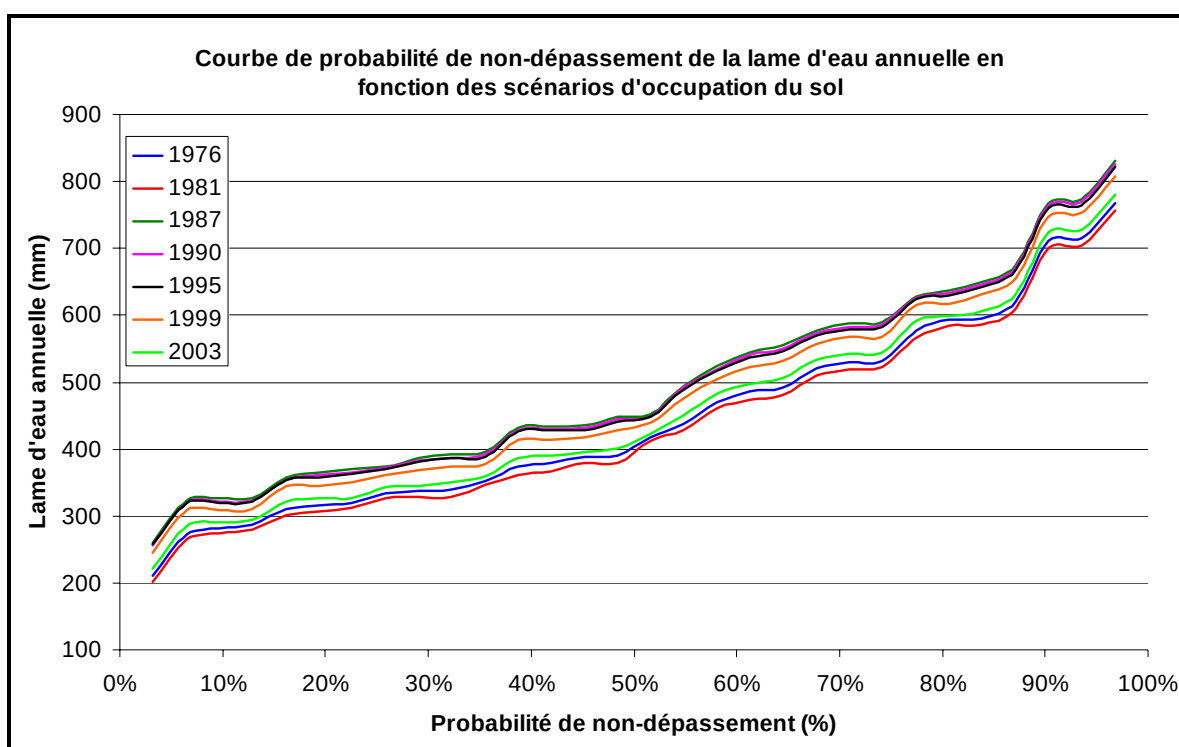


Figure G.10 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin des rivières Abénaquis - Veilleux - Famine

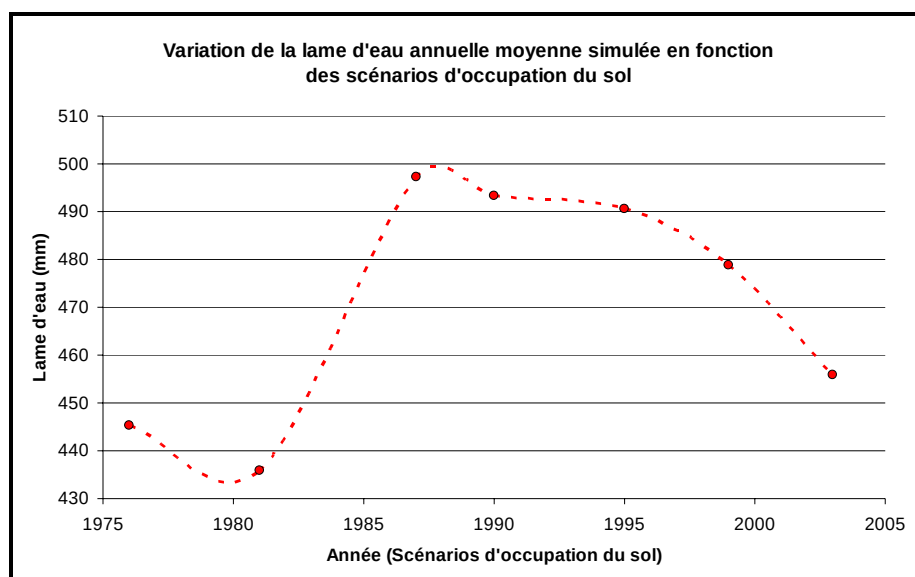


Figure G.11 : Évolution de la lame d'eau moyenne annuelle à l'exutoire du sous-bassin des rivières Abénaquis - Veilleux – Famine

Tableau G.12 : Coefficients de corrélation et de détermination entre les débits d'étiage et l'occupation du sol au niveau du sous-bassin Abénaquis - Veilleux - Famine

		Milieu agricole	Milieu forestier	Autres
Lame d'eau annuelle	Corr,	95,2%	-96,0%	85,6%
	Det,	90,7%	92,2%	73,3%
Q_{2-7} annuel	Corr,	95,6%	-95,4%	75,9%
	Det,	91,4%	91,1%	57,6%
Q_{10-7} annuel	Corr,	87,7%	-84,1%	62,7%
	Det,	76,9%	70,7%	39,3%
Q_{5-30} annuel	Corr,	92,2%	-98,8%	86,7%
	Det,	85,0%	97,6%	75,1%
Q_{2-7} estival	Corr,	92,8%	-98,5%	85,4%
	Det,	86,2%	97,1%	72,9%
Q_{10-7} estival	Corr,	85,5%	-82,1%	61,3%
	Det,	73,2%	67,4%	37,6%
Q_{5-30} estival	Corr,	81,7%	-97,0%	95,9%
	Det,	66,8%	94,2%	91,9%

G.7 SOUS-BASSIN VERSANT DES RIVIÈRES SAINT-VICTOR ET TRING

Tableau G.13 : Quantiles de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin des rivières Saint-Victor et Tring

	1976	1981	1987	1990	1995	1999	2003
quartile 1	379,3	367,5	425,8	428,8	407,5	382,0	364,3
médiane	484,3	470,9	538,5	542,3	517,8	486,0	466,6
quartile 3	590,1	576,8	641,3	644,9	621,1	592,7	575,1

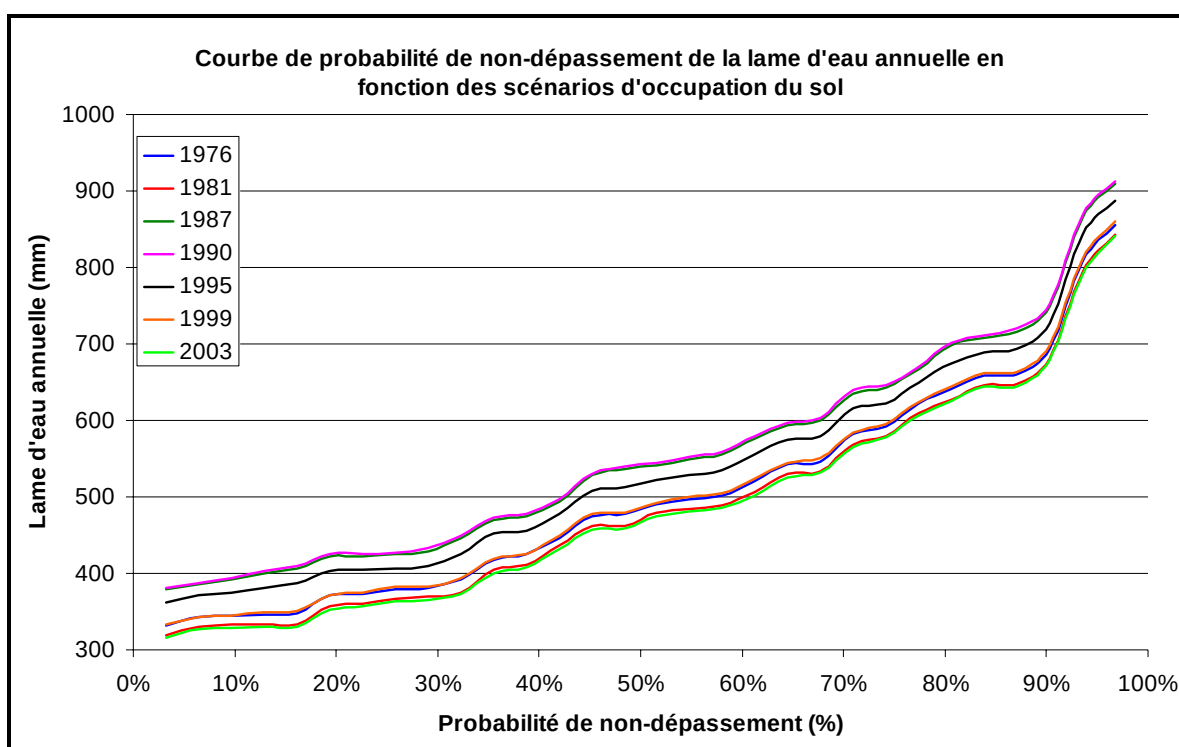


Figure G.12 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin des rivières Saint-Victor et Tring

Tableau G. 14 : Coefficients de corrélation et de détermination entre les débits d'étiage et l'occupation du sol au niveau du sous-bassin Tring/Saint-Victor

		Milieu agricole	Milieu forestier	Autres
Lame d'eau annuelle	Corr,	93,0%	-85,5%	2,2%
	Det,	86,5%	73,1%	0,1%
$Q_{2.7}$ annuel	Corr,	92,4%	-97,9%	40,8%
	Det,	85,3%	95,7%	16,7%
$Q_{10.7}$ annuel	Corr,	97,3%	-98,6%	28,0%
	Det,	94,8%	97,2%	7,9%
$Q_{5.30}$ annuel	Corr,	95,2%	-96,9%	28,8%
	Det,	90,7%	93,9%	8,3%
$Q_{2.7}$ estival	Corr,	76,9%	-84,0%	29,0%
	Det,	59,2%	70,5%	8,4%
$Q_{10.7}$ estival	Corr,	-32,1%	-8,1%	76,2%
	Det,	10,3%	0,6%	58,0%
$Q_{5.30}$ estival	Corr,	70,9%	-56,5%	-16,1%
	Det,	50,3%	31,9%	2,6%

G.8 SOUS-BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE TRING

Tableau G.15 : Quantiles de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin Tring

	1976	1981	1987	1990	1995	1999	2003
quartile1	430,6	412,0	477,6	485,8	483,4	430,7	395,5
médiane	500,1	479,1	546,9	554,0	551,7	500,1	463,4
quartile 3	657,6	638,8	700,6	707,4	704,2	657,7	624,2

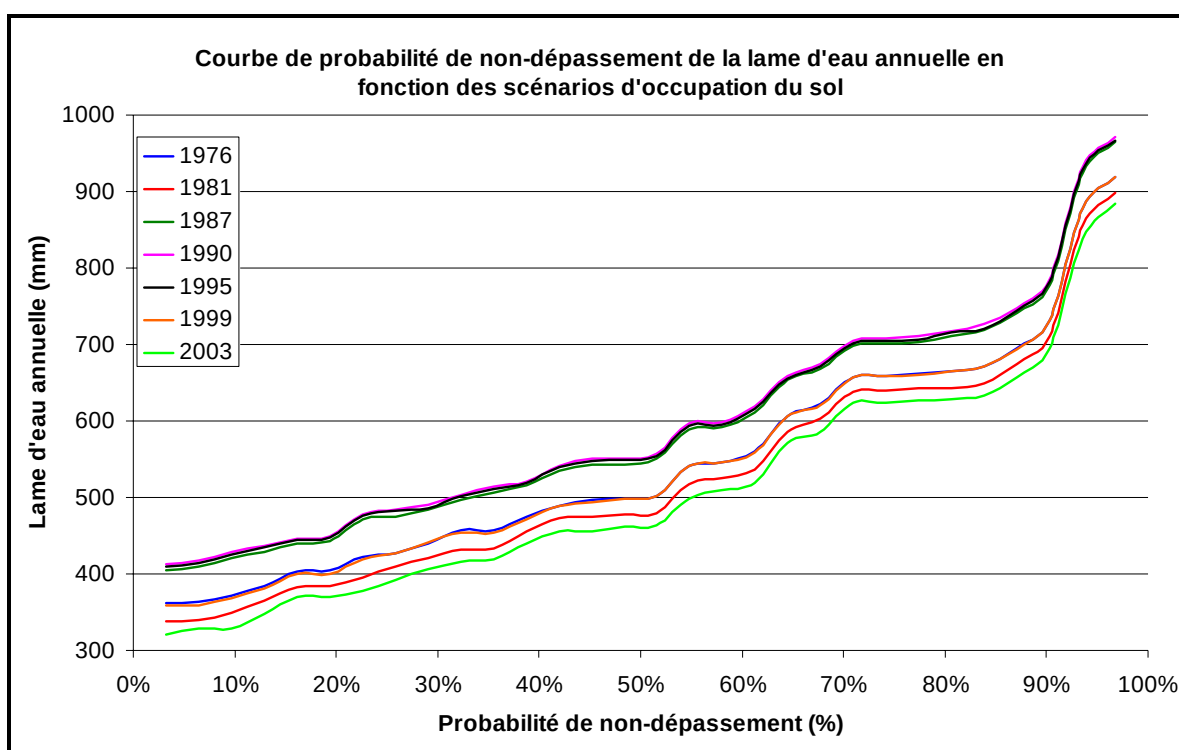


Figure G.13 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire du sous-bassin Tring

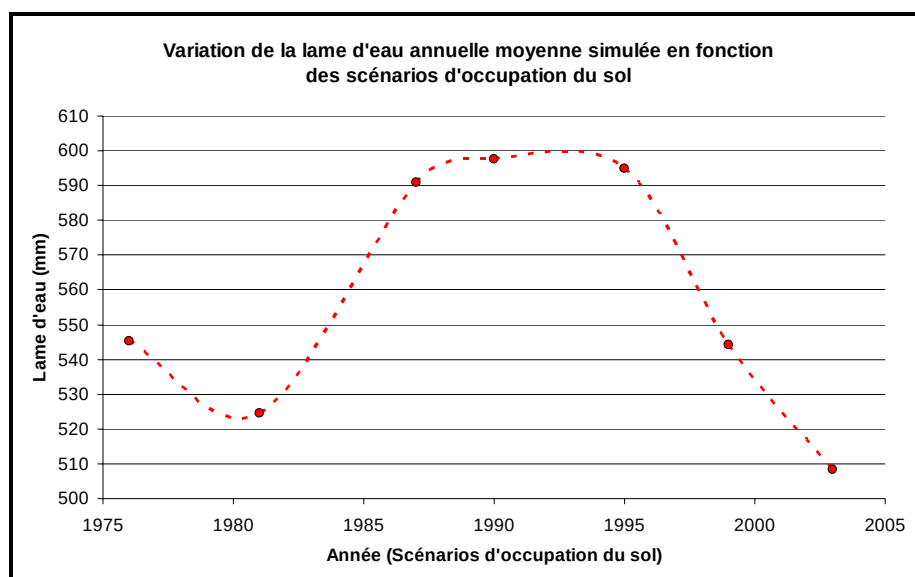


Figure G.14 : Évolution de la lame d'eau moyenne annuelle à l'exutoire du sous-bassin Tring

Tableau G.16 : Coefficients de corrélation et de détermination entre les débits d'étiage et l'occupation du sol au niveau du sous-bassin Tring

		Milieu agricole	Milieu forestier	Autres
Lame d'eau annuelle	Corr,	85,5%	-71,8%	-10,5%
	Det,	73,2%	51,6%	1,1%
Q_{2-7} annuel	Corr,	94,8%	-89,1%	20,3%
	Det,	89,9%	79,4%	4,1%
Q_{10-7} annuel	Corr,	-4,0%	37,5%	-84,8%
	Det,	0,2%	14,1%	71,8%
Q_{5-30} annuel	Corr,	87,1%	-95,1%	51,5%
	Det,	75,9%	90,5%	26,6%
Q_{2-7} estival	Corr,	97,0%	-90,0%	17,8%
	Det,	94,0%	81,0%	3,2%
Q_{10-7} estival	Corr,	94,5%	-91,0%	25,6%
	Det,	89,3%	82,8%	6,6%
Q_{5-30} estival	Corr,	75,6%	-88,0%	58,4%
	Det,	57,1%	77,5%	34,2%

ANNEXE H. APPLICATION DE LA MÉTHODE DES DELTAS

H.1 COMPARAISON ET SÉLECTION DES MCG

La sélection des MCG a été réalisée en collaboration avec Diane Chaumont d'OURANOS.

Dans un premier temps, tous les modèles de circulation générale diffusés par le GIEC (<http://ipcc-ddc.cru.uea.uk>) ainsi que les plus récentes simulations du modèle canadien MCGC3 fournie par le Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCMA) ont été retenus.

La sélection des modèles diffusés par le GIEC repose sur quatre (4) critères :

- Être couplés atmosphère-océans en 3D
- Être documentés dans la littérature revue par les pairs
- Avoir réalisé une simulation de contrôle sur plusieurs siècles (pour des raisons de stabilité)
- Avoir participé au Projet d'intercomparaison des modèles CMIP2

Les quatre premiers critères ont été proposés dans Parry (2002) et sont des incontournables reconnus par le GIEC. Les MCG ainsi considérés sont les modèles canadiens CGCM2 (Flato *et al.*, 2000) et CGCM3, le modèle allemand ECHAM4 (Roeckner *et al.*, 1996), le modèle britannique HadCM3 (Johns *et al.*, 2001), le modèle japonais CSIRO-MkII (Hirst *et al.*, 1996) et le modèle australien CCSRNIES (Kurokawa *et al.*, 2005).

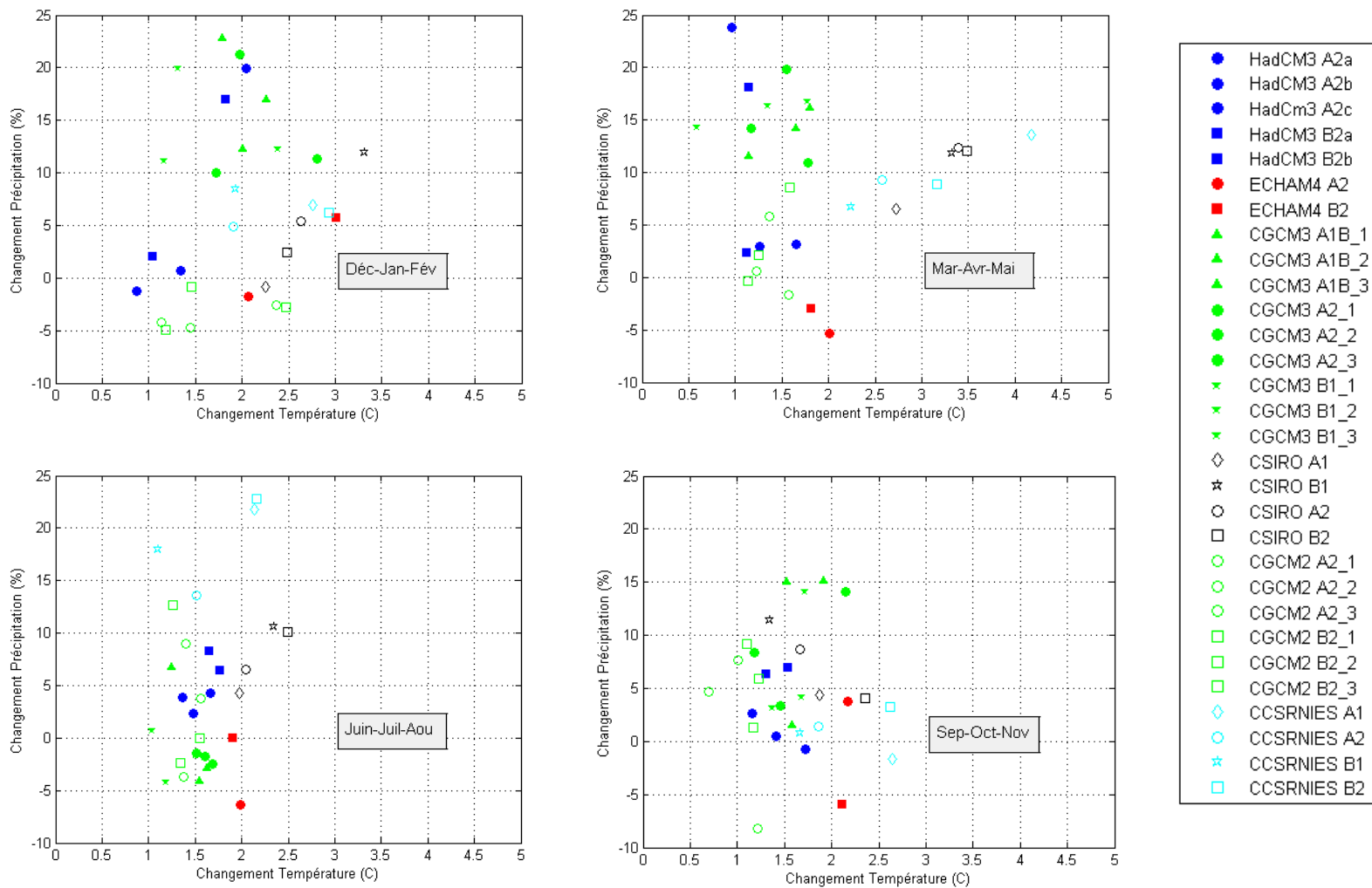


Figure H.1: Écarts de précipitations et de température moyenne prévus par les différents MCG-SEM pour la période 2010-2039 par rapport à la période de référence 1970-1999

En plus des critères établis par le GIEC, OURANOS conseille de tenir compte de quelques critères supplémentaires dans la construction de scénarios climatiques pour des études d'impacts régionaux en climat nordique. Deux autres critères semblent particulièrement pertinents :

- Avoir une résolution d'au moins 4°
- Avoir un schéma de surface à plus d'une couche

Le critère ayant trait à la résolution est recommandé dans le cas d'études d'impacts à l'échelle régionale. Quant au critère sur le schéma de surface, il a été considéré à cause du climat et des propriétés du sol dans une grande partie du territoire québécois.

Finalement, un critère de sélection très important est la capacité des MCG à reproduire les conditions météorologiques du passé. Nous avons donc comparé les températures minimale, maximale et les précipitations moyennes pour chaque mois obtenues avec les MCG pour la période 1970-1999 avec les données mesurées à une station météorologique du bassin. Les données ont été obtenues du Centre Canadien de la modélisation et de l'analyse Climatique (CCmaC) pour CGCM3, du *Climate and Environmental Retrieving and Archiving* (CERA) pour ECHAM4, et du *Intergovernmental Panel on Climate Change Data Distribution Centre* pour HadCM3, CSIRO-MkII, CCSRNIES and CGCM2. Les résultats sont présentés sur les Figures H.2 à H.4. Seul un SE et un membre de simulation a été considéré pour chaque MCG puisque les différents SE et membres ont un effet minime sur les sorties du MCG pour la période passée.

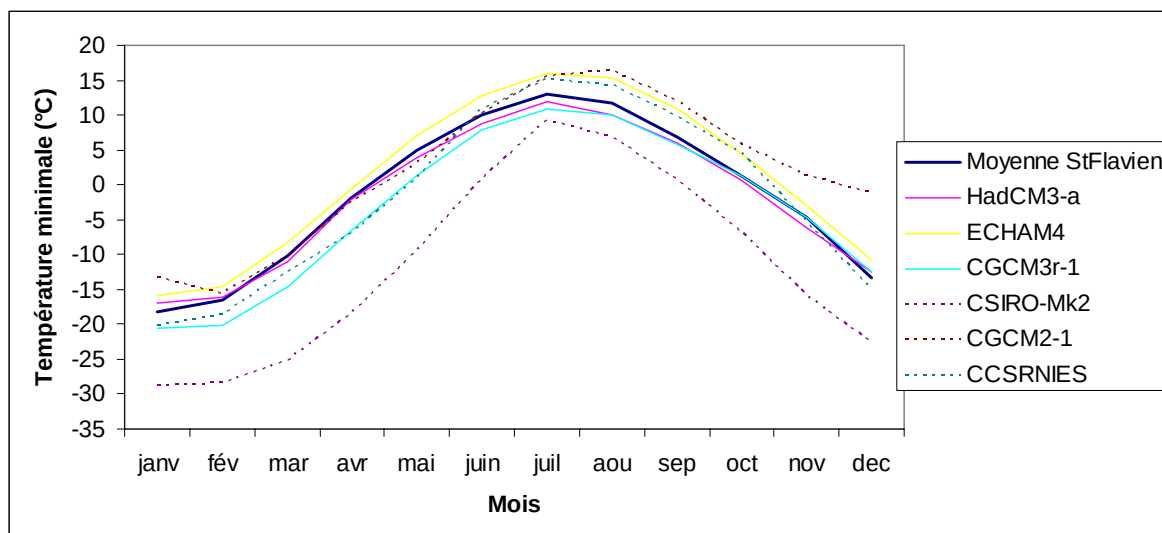


Figure H.2: Température minimale moyenne mesurée à la station de Saint-Flavien et simulée par les différents MCG -SEM

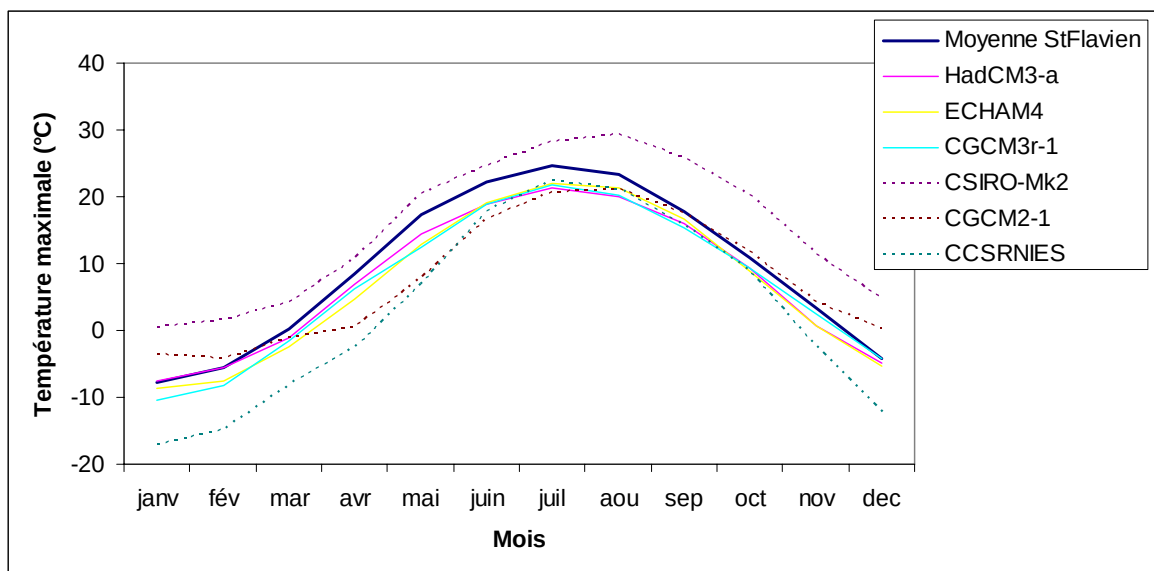


Figure H.3: Température maximale moyenne mesurée à la station de Saint-Flavien et simulée par les différents MCG-SEM

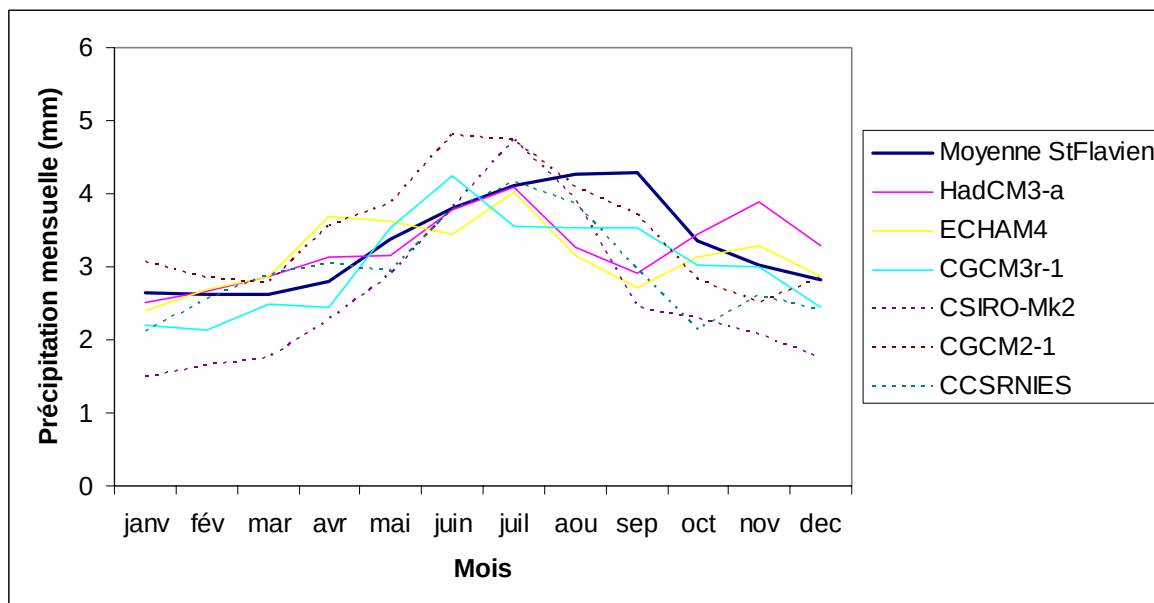


Figure H.4: Précipitation mensuelle mesurée à la station de Saint-Flavien et simulée par les différents MCG-SEM

On voit que les MCG CSIRO-Mk2, CGCM2 et CCSRNIES ont plus de difficultés à reproduire les observations. Compte tenu de ces résultats, les trois MCG qui ont été retenus sont : HadCM3, CGCM3 et ECHAM4.

Les deux SE A2 et B2 ont été sélectionnés pour chaque MCG. ECHAM4 ne présente qu'un seul membre de simulation par SE. Le choix des membres de simulations pour HadCM3 et CGCM3 s'est fait sur la base de la Figure H.1, afin de couvrir la plus large gamme possible de conditions. Le Tableau H.1 donne les combinaisons MCG-SEM finalement utilisées pour la méthode des Deltas. Concernant HadCM3, les mêmes combinaisons ont été utilisées pour la méthode de downscaling.

Tableau H.1: MCG, SE et membres de simulation retenus

MCG	SE	Membre
CGCM3	A2	1
	B1	3
HadCM3	A2	a
		b
	B2	a
		b
ECHAM4	A2	-
	B2	-

H.2 EFFETS DES CC PRÉVUS PAR LES MCG SÉLECTIONNÉS

H.2.1. Effet sur les précipitations

D'après le Le Tableau H.12, les précipitations maximales ont lieu au cours de la période estivale, cependant, c'est au cours du printemps que les lames d'eau les plus importantes sont recensées. Ceci pour trois raisons majeures :

- la neige accumulée au cours de l'hiver fond au printemps et entraîne une augmentation de l'écoulement.
- l'absence de couverture végétale dense au sol favorise le ruissellement.
- le phénomène d'évapotranspiration n'est pas à son maximum au printemps.

Tableau H.2: Précipitations cumulées saisonnières moyennes sur 30 ans à la station Saint Flavien, selon les données historiques (référence) et selon l'application des deltas mensuels issus des différents MCG-SEM pour la période future.

précipitations (mm)	Référence	CGCM3_A2_1	CMCG3_B2_3	ECHAM4_A2	ECHAM4_B2	HadCM3_A2a	HadCM3_A2b	HadCM3_B2a
hiver	221,26	231,02	251,21	218,53	235,93	209,98	277,18	226,03
printemps	237,42	261,32	247,35	230,40	232,99	251,75	283,61	242,41
été	332,30	321,94	338,94	306,11	330,36	331,18	336,98	344,11
automne	275,44	277,97	292,35	282,69	256,60	288,31	284,80	275,25

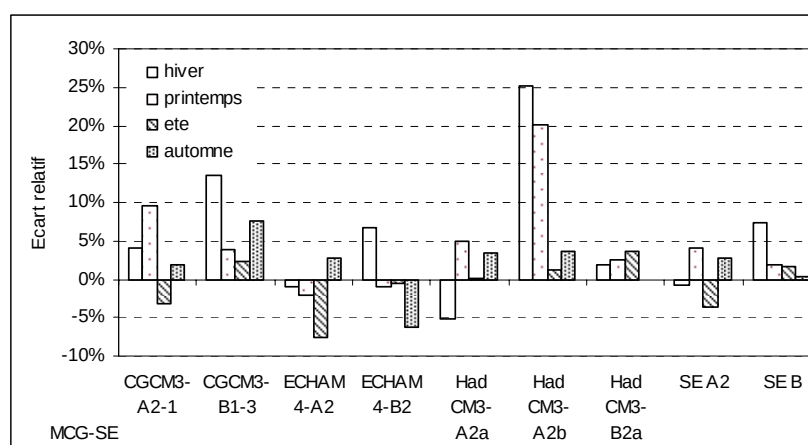


Figure H.5: Facteurs moyens saisonniers appliqués aux données d'entrée de précipitations du modèle HYDROTEL

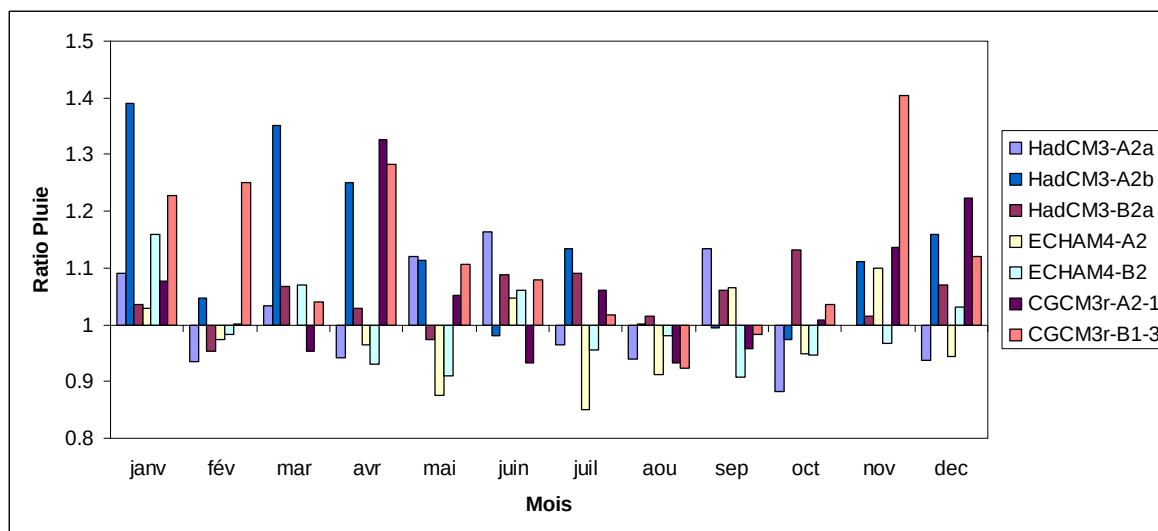


Figure H.6: Ratios mensuels de précipitations prévus par les MCG-SEM retenus

D'après la Figure H.5 et la Figure H.6, l'évolution des précipitations prévue pour la période future est très variable selon les MCG et les SE. Ainsi le MCG CGCM3 prévoit une augmentation des précipitations hivernales, printanières et d'automne de manière plus marquée selon le scénario d'émission B2. Le MCG ECHAM4 a un faible impact sur les précipitations cependant nous pouvons noter une tendance à la diminution des précipitations printanières aux environs de 5%. Les deux SE se différencient en hiver, le SE B2 produit une augmentation de plus de 5% des précipitations, et en automne, où le SE A2 produit une diminution de plus de 5% des précipitations. Durant l'été, le SE A2 produit une diminution de plus de 5% des précipitations.

Le MCG HadCM3 produit une hausse des précipitations annuelles de manière extrêmement marquée de plus de 20% en hiver et au printemps pour le SE A2b, et dans une moindre mesure au cours de l'été et l'automne pour le scénario B2a (>5%).

Notons que le scénario d'émission B produirait une augmentation des précipitations hivernales supérieures à 5%.

H.2.2. Températures maximales

Les différents MCG-SEM induisent une augmentation des températures maximales de 0,40 à 2,22°C à variable selon les saisons et les MCG-SEM (Figure H.7 et Figure H.8). L'écart type le plus important des moyennes mensuelles des températures journalières maximales futures (Figure H.9), apparaît au cours du mois de février à hauteur de 0,91°C, le plus petit apparaît au mois de mai à hauteur de 0,35°C, la période estivale et de fin du printemps présentant les écarts relatifs les plus faibles. C'est-à-dire que les différents MCG-SEM induisent des modifications plus homogènes au cours du mois de mai à août.

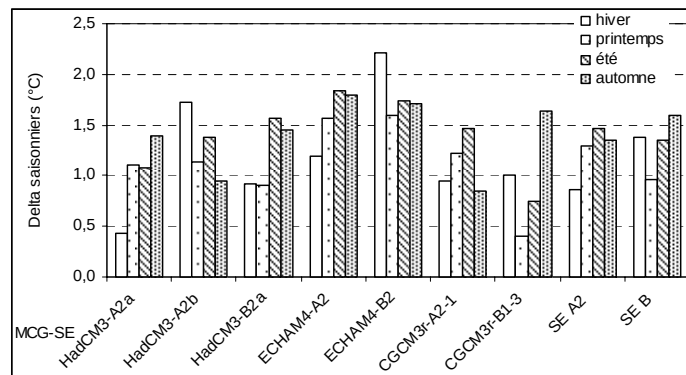


Figure H.7: Deltas moyens saisonniers des températures maximales selon les MCG-SEM et par SEM

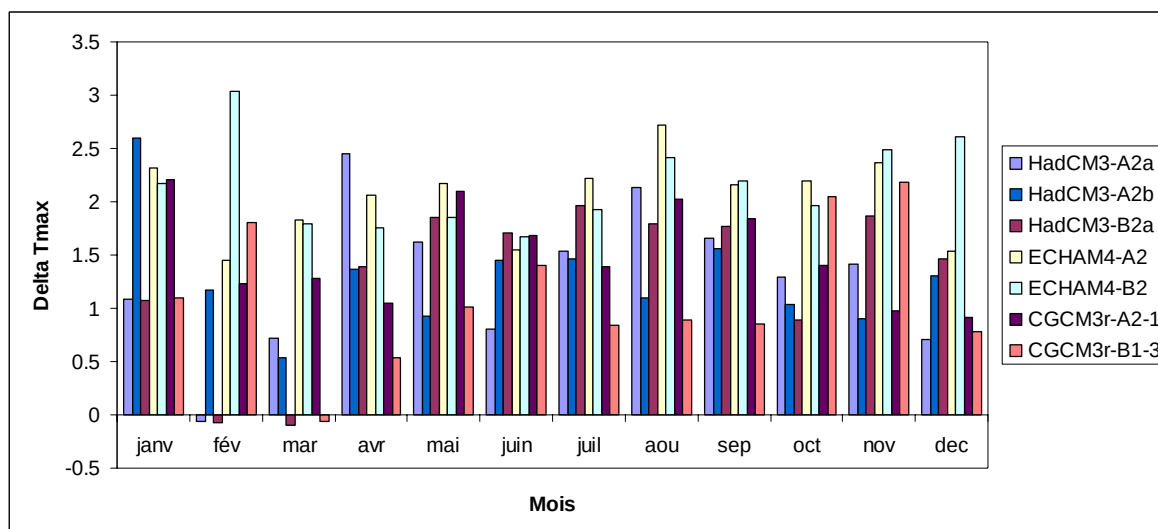


Figure H.8: Écarts mensuels de température maximale de précipitations prévus par les MCG-SEM retenus

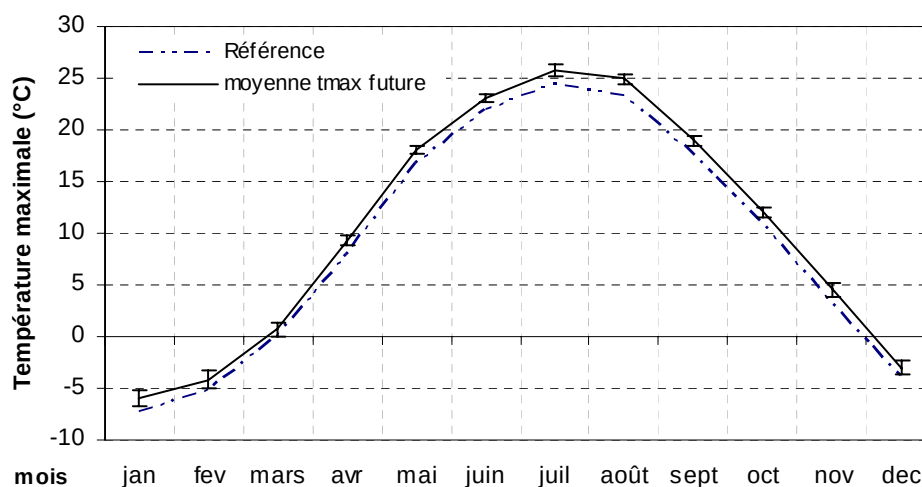


Figure H.9: Évolution de la moyenne mensuelle de la température journalière maximale passée et future tous MCG SEM confondus (moy. $\pm \sigma$) au cours de l'année à la station de Saint Flavien.

H.2.3. Températures minimales

Les différents MCG induisent une augmentation des températures minimales de 0,55 à 2,94°C au cours des saisons. D'après la Figure H.10 et la Figure H.11, l'hiver présentera une augmentation de ces températures particulièrement marquée pour le MCG-SEM HadCM3A2b et ECHAM4 B2. Quelque soit le MCG-SEM considéré, les températures minimales auront tendance à augmenter, cela se traduira par des nuits moins froides et un hiver moins rigoureux.

L'écart type le plus important des moyennes mensuelles des températures journalières minimales futures, apparaît au cours du mois de février à hauteur de 1,04°C, le plus petit apparaît au mois de juin à hauteur de 0,22. La période estivale et de fin du printemps présentant les écarts relatifs les plus faibles (Figure H.12).

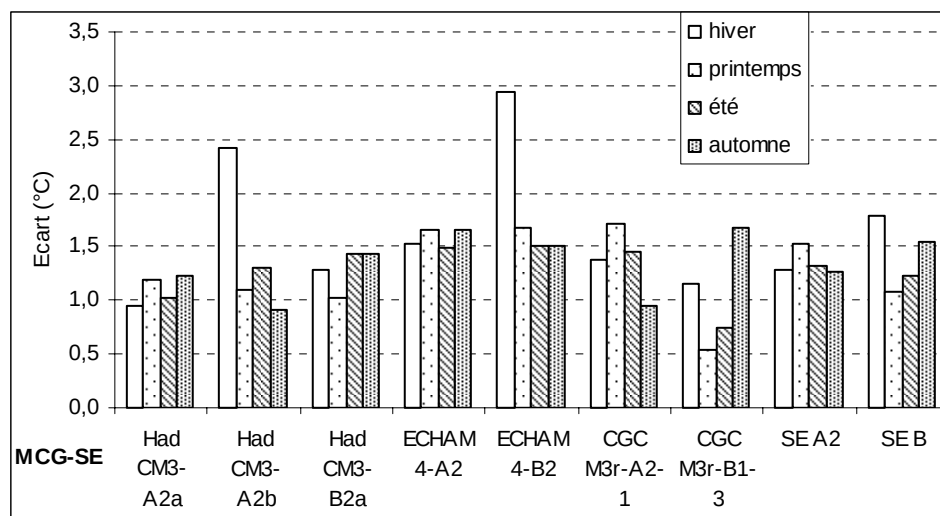


Figure H.10: Deltas moyens saisonniers des températures journalières saisonnières minimales selon les MCG-SEM et par SE

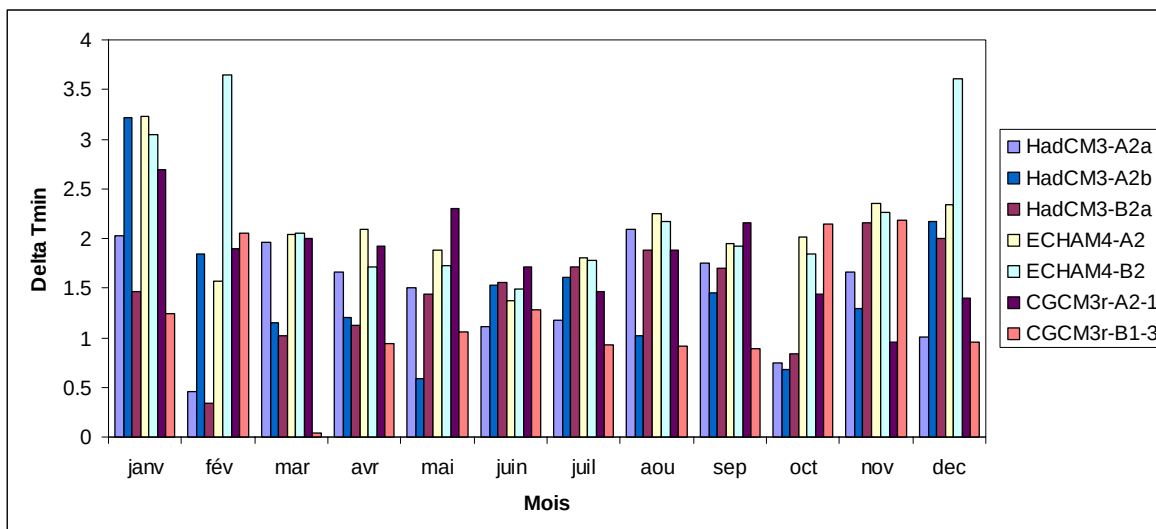


Figure H.11: Écarts mensuels de température minimale de précipitations prévus par les MCG-SEM retenus

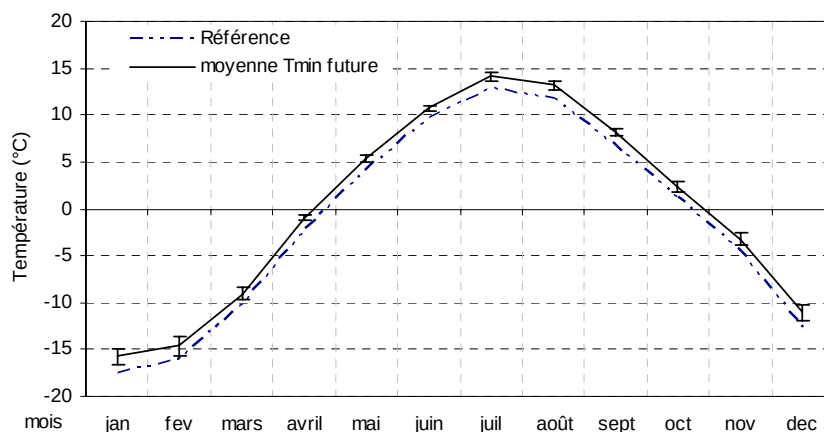


Figure H.12: Évolution de la moyenne mensuelle de la température journalière minimale passée et future (moy $\pm \sigma$) au cours de l'année à la station de Saint Flavien

Ainsi, quelque soit le MCG-SEM considéré, selon cette méthode de prévision de l'évolution du climat, la hausse des températures pourrait mener à une augmentation de l'évapotranspiration au cours de la période estivale et à avancer la période de fonte des neiges au printemps et ainsi éventuellement diminuer le débit d'été selon les précipitations engendrées. En automne, cette hausse des températures aura tendance à retarder les précipitations sous forme de neige.

Ainsi, d'après ces données il semble qu'à l'horizon 2010-2039, les hivers seront plus doux et les étés plus chauds par rapport à la période 1970-1999.

H.3 EFFET SIMULÉ SUR LE RÉGIME HYDROLOGIQUE

H.3.1. Effet sur la lame d'eau annuelle et saisonnière

Les différents MCG produisent des résultats très variables, c'est pour cette raison que nous avons choisi d'agrèger l'ensemble de ces résultats afin d'avoir une tendance générale quand à l'impact du CC futur sur le régime hydrique de la Chaudière. À titre d'exemple, la Figure H.13 présente cette grande variabilité à l'échelle annuelle entre les résultats issus des différents MCG-SEM. Cette variabilité est aussi valable au cours des différentes saisons. Le MCG-SEM ECHAM4-A2 est celui produisant un plus faible écoulement et le MCG-SEM HadCM3-A2b produisant un plus fort écoulement. Ces critères nous ont permis de les sélectionner pour l'étape b) de ces travaux pour l'étude de l'influence de l'évolution de l'occupation des sols sur le régime hydrique.

Notons par ailleurs que les simulations issues des MCG-SEM semblent produire des lames d'eau corrélées à celles de la référence historique de manière relativement uniforme. Ce qui s'explique par l'application uniforme des deltas mensuels à l'ensemble des données météorologiques historiques.

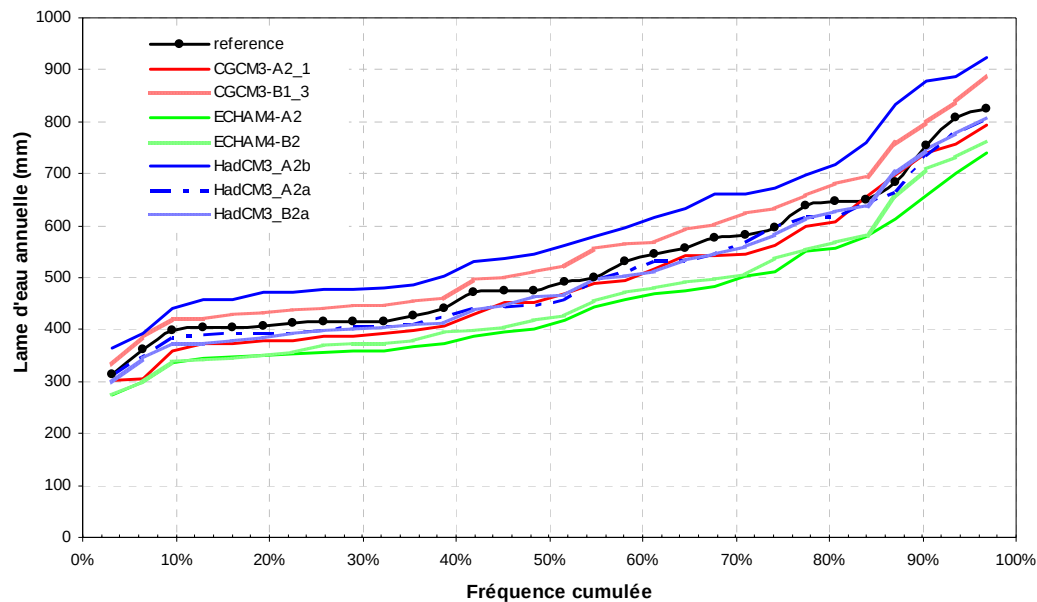


Figure H.13: La lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire de la Chaudière selon les données historiques et les données des MCG-SEM appliqués par la méthode des deltas

Au cours des périodes d'étiage (hiver et été), le scénario B a tendance à produire des lames d'eau supérieures au scénario A2 (Figure H.14).

Au cours de la période estivale, le SE B provoque une diminution de cet écoulement de -6,7%, selon le quantile 25, à -15,3%, selon le quantile 75, de la lame d'eau issue des données historiques. Cependant le SE A2 la diminue de -13,4%, selon le quantile 25, à -25,8%, selon le quantile 75, par rapport à un écoulement simulé historique de 59,8 à 149,6 mm. Ceci s'explique par une augmentation des précipitations estivales pour le SE B, compensant en partie l'effet du CC et une diminution de ces précipitations pour le SE A.

Au cours de l'hiver l'écoulement simulé historique varie de 23,7 à 66,3 mm respectivement pour le quantile 25 et 75. Les SE B induit une augmentation de 70 à 80% de la lame d'eau alors que le SE A2 induit une augmentation de 33 à 47,6% pour des lames d'eau simulées de référence de 23,6 à 63,3 mm respectivement pour les quantiles 25 et 75.

Les deux scénarios d'émission de GES considérés (SE A2 et B) produisent des résultats relativement similaires lors des autres périodes, au cours desquels les écoulements sont plus importants soit à l'échelle annuelle, au cours du printemps et de l'automne.

Cela signifie que les différences entre les deux scénarios d'émissions sont sensibles uniquement pour les périodes de faible écoulement.

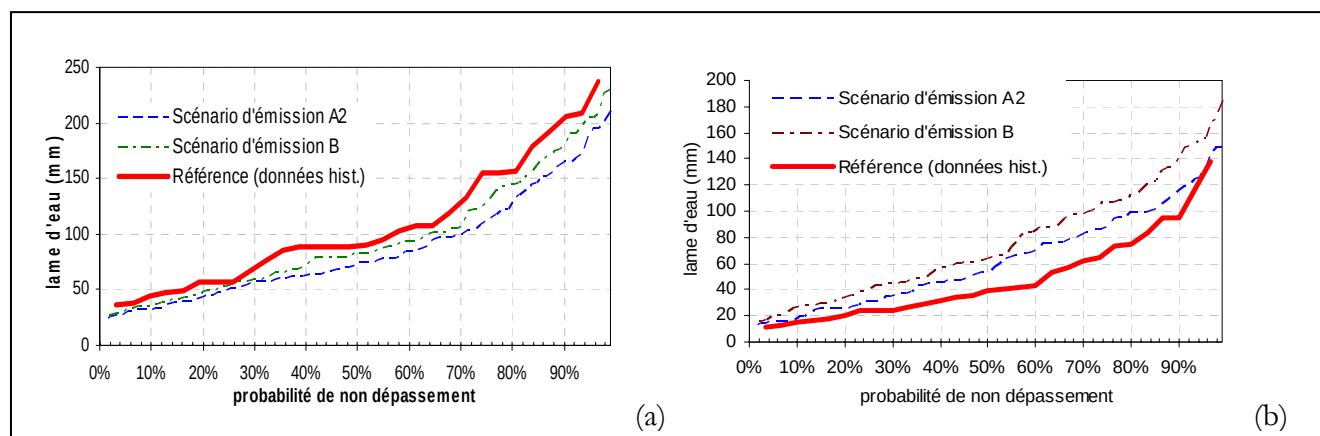


Figure H.14: Probabilité de non dépassement des lames d'eau simulées à l'exutoire de la Chaudière selon les données historiques et les SE d'émission A2 et B appliqués par la méthode des deltas (au cours de l'été (a) et de l'hiver (b))

Si l'on considère l'ensemble des réalisations simulées futures, de nettes tendances se dégagent à l'échelle annuelle (Figure H.15) et saisonnière (Figure H.16). Il semble que les lames d'eau

annuelle et printanière soient peu affectées par les changements climatiques en considérant l'écart relatif.

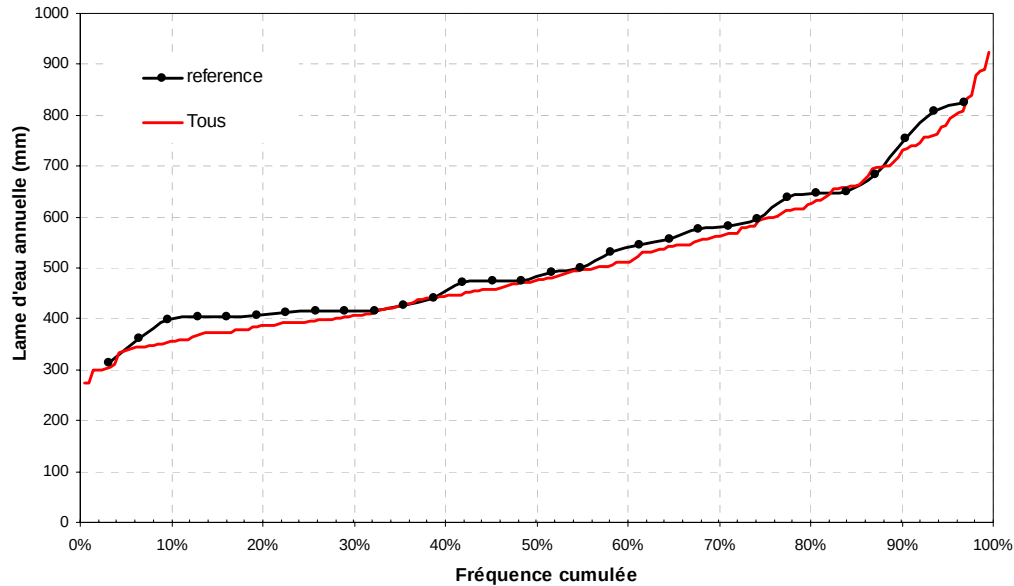


Figure H.15: Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée à l'exutoire de la Chaudière selon les données historiques (référence) et l'ensemble des MCG-SEM appliqués par la méthode des deltas considérés comme équiprobables (en rouge)

La lame d'eau hivernale augmentera nettement de 44,9% à 74% produisant ainsi des lames d'eau de 34,2 à 101,4 mm respectivement pour les quantiles 25 et 75.

Au cours du reste de l'année une diminution de la lame d'eau aurait lieu (les valeurs sont données pour les quantiles 25 et 75) :

- au printemps, de -10,1 à -2,7%, correspondant à des lames d'eau de 187,8 à 277,2 mm.
- en été, de -9,2 à -18,0% correspondant à des lames d'eau de 54,3 à 122,6 mm. À noter que plus les lames d'eau seront importantes plus l'impact du CC augmentera.
- et en automne, de -2,8 à -15,4% correspondant à des lames d'eau de 60,8 à 140,5 mm et une diminution médiane de -13,25%.

Ils reflètent bien une avancée de la crue annuelle de printemps ce qui a comme effet d'augmenter la lame d'eau hivernale et de diminuer l'écoulement printanier. Au cours de l'été,

les réserves en eau s'amenuiseraient, influant la recharge des rivières. Le régime hydrique de l'automne serait la continuité des conséquences précédentes à l'échelle annuelle.

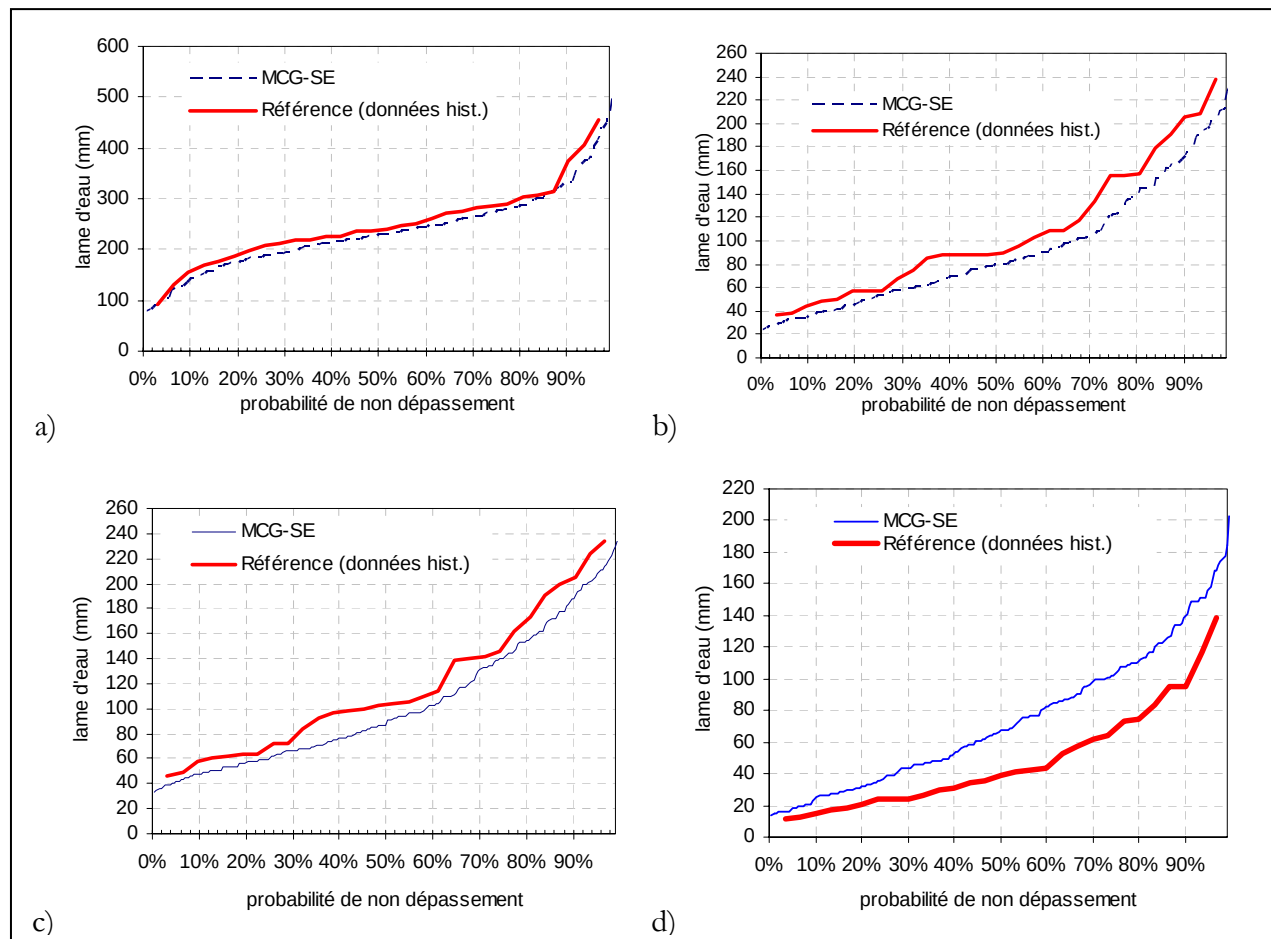


Figure H.16: Fréquence cumulée des lames d'eau simulées à l'exutoire de la Chaudière selon les données historiques et l'ensemble des MCG-SEM appliqués par la méthode des deltas (au cours du printemps (a), de l'été (b), de l'automne (c) et de l'hiver (d))

H.3.2. Lame d'eau à l'échelle mensuelle

La Figure H.17 présente la lame d'eau moyenne (sur les 30 ans) obtenue à l'échelle mensuelle avec les sept MCG-SEM considérés. On constate la grande dispersion des résultats obtenus avec les différents MCG-SEM au printemps, tandis que la tendance est plus homogène durant l'été (diminution de la lame d'eau) et durant l'hiver (augmentation de la lame d'eau).

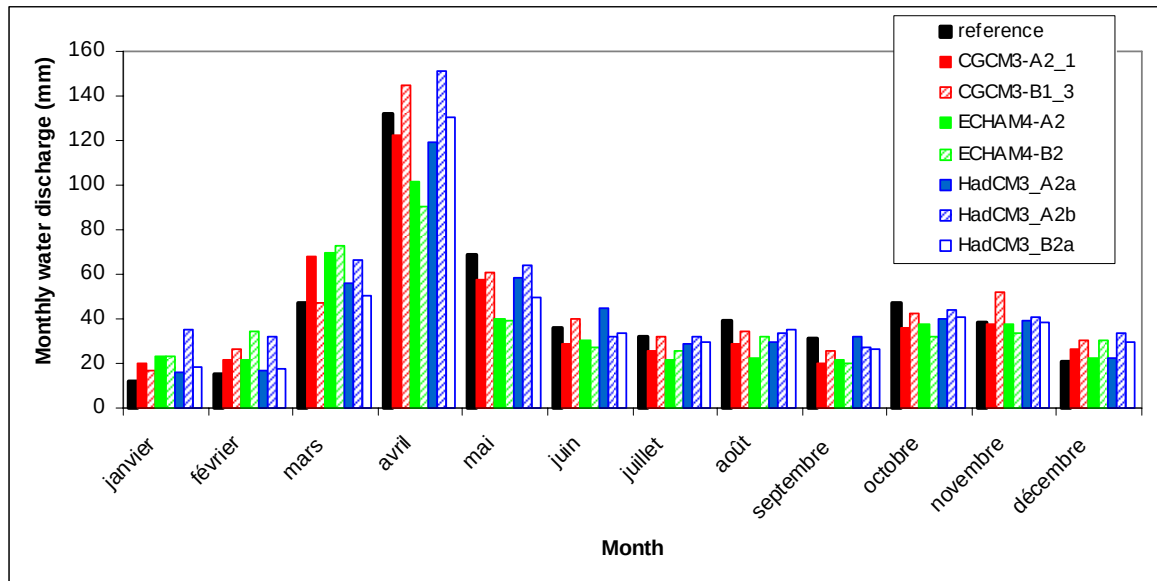


Figure H.17: Lamé d'eau mensuelle moyenne (sur les 30 ans) simulée à l'exutoire de la Chaudière avec les données historiques (en noir) et avec les données futures issues des différents MCG-SEM

Lorsque l'ensemble des MCG-SEM sont considérés équiprobables, on obtient la courbe qui a été présentée à la Figure 6.10, à la section 6.1.4.1.

H.3.3. Les débits d'étiage

L'analyse fréquentielle réalisée avec le logiciel HYFRAN permet de déterminer pour chacune des simulations sous HYDROTEL le Q_{2-7} , le Q_{10-7} et le Q_{5-30} annuel et estival à l'exutoire de la Chaudière.

On analyse la période de l'année à laquelle le Q_7 (Débit cumulé sur 7 jours) et le Q_{30} sont les plus faibles pour chacune des simulations issues des données des MCG-SEM et des données historiques. La Figure H.18 présente la répartition dans l'année des débits d'étiage Q_7 et Q_{30} recensés par année, sur les trente ans simulés à partir des données historiques (référence) et des MCG. Nous constatons qu'ils n'apparaissent plus à la même période dans l'année.

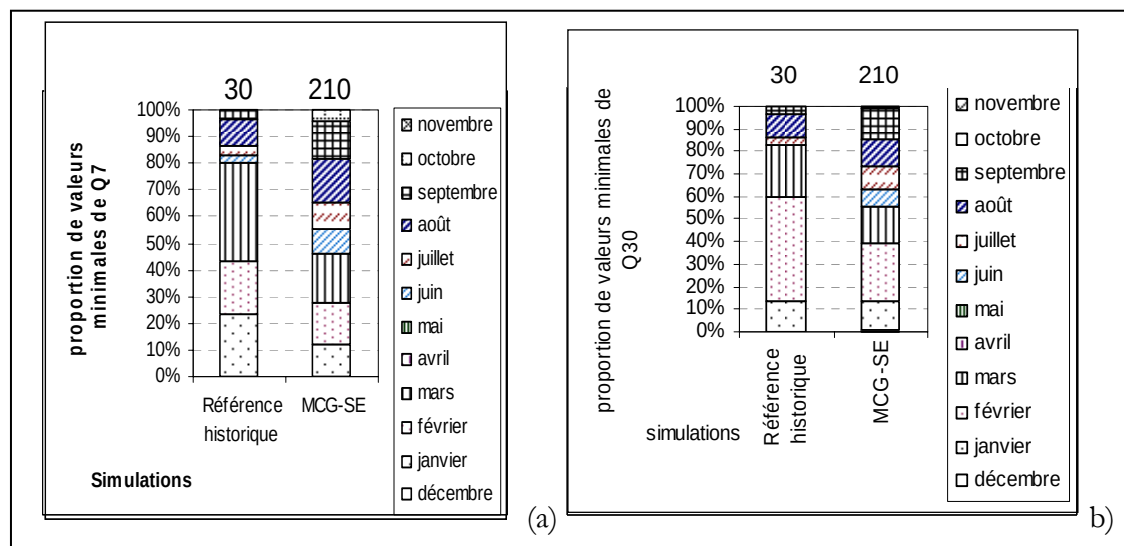


Figure H.18: Répartition au cours de l'année des débits d'étiage cumulés sur 30 jours (a) et 7 jours (b)

Avec la simulation de référence les étiages (sur 7 et 30 jours) se produisent plutôt au cours de l'hiver et au début du printemps (décembre, janvier, février et mars) ce sont 24 années sur 30 simulées qui produisent de faibles débits au cours de cette période. Les simulations futures produisent de faibles Q_7 et Q_{30} autant au cours de la période janvier, février et mars que durant la période juin, juillet, août et septembre (approximativement de 92 à 103 années sur 210). Cela s'explique par le fait que la lame d'eau a tendance à augmenter en hiver et à diminuer en été, ce qui influe sur la répartition des minimums annuels.

Si l'on s'intéresse au Q_{2-7} , Q_{10-7} et Q_{5-30} , à l'échelle de l'année, nous constatons que le Q_{10-7} aurait une tendance à diminuer sous l'impact du CC avec une diminution maximale de 17,4% sous l'influence du MCG-SEM ECHAM4-A2. Si l'on prête attention aux périodes de retour plus faibles des débits cumulé sur 7 et 30 jours, la tendance serait plutôt à une augmentation, de -1,3% à 11,3% pour le Q_{2-7} et de 5,7 à 26,4% pour le Q_{5-30} .

Tableau H.3 : Débit d'étiage annuel Q_{2-7} , Q_{10-7} et Q_{5-30} selon lames d'eau simulées des différents MCG-SEM et les données météorologiques historiques

Débit d'étiage annuel (m ³ /s)	Q_{2-7}	Q_{10-7}	Q_{5-30}	Ecart relatif (MCG-SEM - Ref)/Ref		
				Q_{2-7}	Q_{10-7}	Q_{5-30}
Ref (sim. Hist)	7,48	5,58	7,46			
CGCM3_A2_1	7,39	5,06	8,41	-1,31%	-9,31%	12,73%
CGCM3_B1_3	7,94	5,65	8,66	6,15%	1,13%	16,13%
ECHAM4-A2	7,72	4,62	8,42	3,18%	-17,35%	12,89%
ECHAM4-B2	7,84	5,28	9,43	4,72%	-5,52%	26,45%
HadCM3_A2a	7,52	5,22	7,89	0,41%	-6,54%	5,74%
HadCM3_A2b	8,33	5,59	9,84	11,34%	0,18%	31,85%
HadCM3_B2a	7,69	5,39	8,42	2,74%	-3,53%	12,82%

Si l'on ne considère que la période estivale, du 20 juin au 21 septembre, tous MCG-SEM confondus, nous obtenons une nette diminution de débit d'étiage de $-13,5 \pm 6,6\%$, $-14,8 \pm 6,3\%$ et $-14,9 \pm 8,1\%$, respectivement pour le Q_{2-7} , Q_{10-7} et Q_{5-30} par rapport aux valeurs simulées historiques. Notons que les simulations par scénario d'émission de GES, le SE A2 produira une plus importante diminution du débit d'étiage au cours de l'été de l'ordre de $-17,5\%$ à $-21\% \pm 0,076$ alors que le scénario B produira une diminution de $-10,7$ à $-11,8 \pm 6,2\%$, ce qui montre une influence de l'impact des variations d'émission de GES dès l'horizon 2025. (Tableau H.4)

Tableau H.4 : Débit d'étiage estival Q_{2-7} , Q_{10-7} et Q_{5-30} obtenus avec les différents MCG-SEM et les données météorologiques historiques

Q d'étiage estival (20 juin - 21 septembre) (m ³ /s)	Q_{2-7}	Q_{10-7}	Q_{5-30}	Écart relatif (MCG-SEM - Ref)/Ref		
				Q_{2-7}	Q_{10-7}	Q_{5-30}
Ref	11,53	6,67	14,81			
CGCM3_A2_1	9,38	5,42	11,88	-18,62%	-18,68%	-19,79%
CGCM3_B1_3	10,89	6,19	13,82	-5,56%	-7,24%	-6,67%
ECHAM4-A2	8,77	4,97	10,52	-23,88%	-25,57%	-28,98%
ECHAM4-B2	9,49	5,50	12,09	-17,65%	-17,62%	-18,33%
HadCM3_A2a	10,38	5,71	12,72	-9,96%	-14,33%	-14,06%
HadCM3_A2b	10,44	6,03	13,70	-9,44%	-9,65%	-7,45%
HadCM3_B2a	10,47	5,96	13,44	-9,14%	-10,67%	-9,22%

H.3.4. Comparaison des sous-bassins versants agricoles

Les sous-bassins versants agricoles de Beurivage et de Saint Victor sont aussi étudiés afin de déterminer de manière plus spécifique l'influence du CC sur les zones à caractère agricole.

A l'échelle annuelle les sous-bassins versants de Beaurivage et de Saint-Victor présentent des lames d'eau similaires à celles de la Chaudière, variant de respectivement 377,1 à 708,2 mm, de 355,8 à 673,3 mm et de 403,3 à 689,6 mm. Le CC semble avoir un impact similaire sur la lame d'eau des trois bassins versants considérés. En revanche, en été, malgré des lames d'eau simulées de référence de même ordre de grandeur, l'influence du CC semble être variable selon le bassin versant considéré. Pour les écoulements les plus faibles, le CC semble avoir une plus grande influence sur les sous-bassins versants agricoles de l'ordre de 10% de diminution par rapport à l'exutoire de la Chaudière. Pour les lames d'eau les plus élevées, la Chaudière semble plus touchée par les CC, en effet elle subit une diminution de près de 8% par rapport à la lame d'eau simulée historique.

Une explication possible est que pour de faibles lames d'eau, le ruissellement caractéristique des zones plus agricoles limite le stockage de l'eau lors des saisons précédentes et donc le maintien d'une lame d'eau conséquente au cours de l'été. Lors des années pluvieuses, durant lesquelles les lames d'eau sont plus importantes, le ruissellement favorisé par les sous-bassins agricoles alimente directement de manière importante le cours d'eau.

ANNEXE I. APPLICATION DU DOWNSCALING STATISTIQUE

I.1 APPLICATION DU DOWNSCALING SUR LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE

I.1.1. Stations météorologiques utilisées

Neuf stations météorologiques présentant 30 ans de données météorologiques ont été sélectionnées sur le bassin versant afin d'appliquer la procédure du downscaling statistique. Ces neuf (9) stations sont représentées sur la Figure I.1. Les stations sont réparties spatialement afin de représenter les différentes régions du bassin.

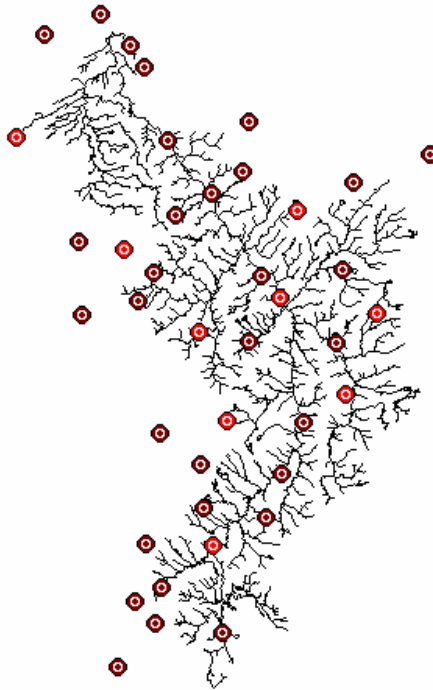


Figure I.1 : Stations météorologiques du bassin versant de la rivière Chaudière. Les stations en rouge sont celles qui ont été utilisées pour l'application du downscaling

Les stations sélectionnées sont les suivantes : Saint-Zacharie, Saint-Théophile, Saint-Odilon, Saint-Pierre-de-Broughton, Saint-Georges, Saint-Hilaire-Dorset, Saint-Flavien, Saint-Ephrem et Lac Mégantic.

Le fait de ne considérer que neuf (9) stations météorologiques sur les 41 présentes sur le bassin induit inévitablement une perte d'information et un biais dans la performance du modèle hydrologique de GIBSI. Il convient donc de considérer et quantifier ce biais afin de pouvoir interpréter correctement les données. Ainsi, le schéma de la Figure I.2 ci-dessous montre les différentes étapes de simulation et illustre l'importance de traiter les résultats de manière relative par rapport à une simulation de référence, et non de manière absolue ou directement par rapport aux données mesurées.

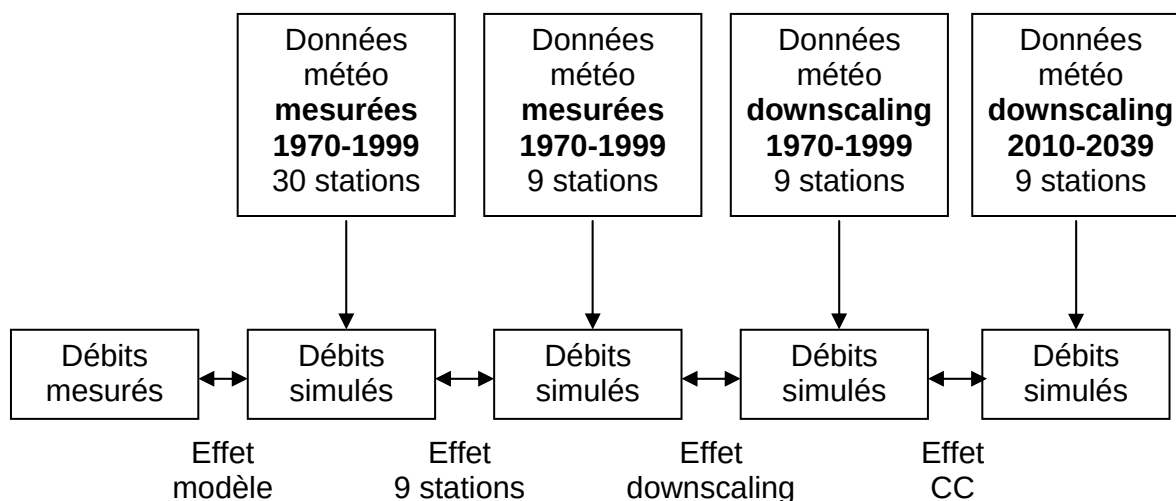


Figure I.2 : Schématisation de l'approche de modélisation

Il convient donc de réaliser les comparaisons suivantes :

- (i) Les résultats des simulations hydrologiques en n'utilisant que neuf (9) stations météorologiques (à partir des données météo mesurées) par rapport aux données mesurées de débit (performance du modèle hydrologique avec neuf (9) stations)
- (ii) Les données météorologiques prévues par les MCG-SEM sur la période de référence par rapport aux données mesurées (performance du downscaling)
- (iii) Les résultats des simulations hydrologiques à partir des données météorologiques simulées par les MCG-SEM sur la période de référence par rapport aux résultats de simulation

obtenus à partir des données météorologiques mesurées (effet du downscaling sur les sorties du modèle hydrologique).

I.1.2. Validité du modèle hydrologique en considérant seulement 9 stations météorologiques

D'après le Tableau I.1 et la Figure I.3, présentant les résultats relatifs de la lame d'eau des simulations de référence (avec 9 stations) par rapport à celles mesurées de la Chaudière à St-Lambert, l'ensemble des périodes observées présente des valeurs supérieures à 10%. Cependant le coefficient de Nash-Sutcliffe est toujours supérieur à 0,6, le RMSE toujours inférieur ou égal à 0,07 et le coefficient de corrélation toujours supérieur à 0,69.

Le sous-bassin versant de Beaurivage présente des écarts relatifs annuels supérieurs à 10% pour les périodes d'octobre 1990 à septembre 1991 et d'octobre 1983 à septembre 1993. Seul le coefficient de Nash-Sutcliffe de la période 1989-1990 présente une valeur très inférieure à 0,6 (0,38). Cela montre que pour ce tronçon le modèle est considéré comme calé pour 4 des 5 périodes considérées.

Tableau I.1: Valeurs des variables statistiques étudiées pour la validation du calage de HYDROTEL entre la lame d'eau journalière simulée à partir des données historiques (9 stations, interpolation polygone de Thiessen) et celle mesurée (a) au tronçon 33 (La Chaudière à St Lambert) et (b) au tronçon 1642 (exutoire de la Beaurivage)

a)	oct 87- sept88	Oct 89- sept 90	Oct 90- sept 91	oct 93 - sept 94	oct 84- sept 93
Ecart relatif ((ref- mes)/mes)	-20.9%	-18.2%	-23.2%	-29.5%	-24.4%
Nash-Sutcliffe	0.76	0.80	0.81	0.75	0.67
RMSE	0.05	0.06	0.08	0.08	0.03
Coefficient détermination	0.78	0.82	0.85	0.87	0.76

b)	oct 87- sept 88	oct 89 - sept 90	oct 90- sept 91	oct 93 - sept 94	oct 84- sept 93
Ecart relatif ((ref- mes)/mes)	-8.5%	-4.0%	-18.2%	0.5%	-15.1%
Nash-Sutcliffe	0.76	0.38	0.79	0.79	0.68
RMSE	0.06	0.08	0.08	0.06	0.03
Coefficient détermination	0.78	0.69	0.81	0.79	0.90

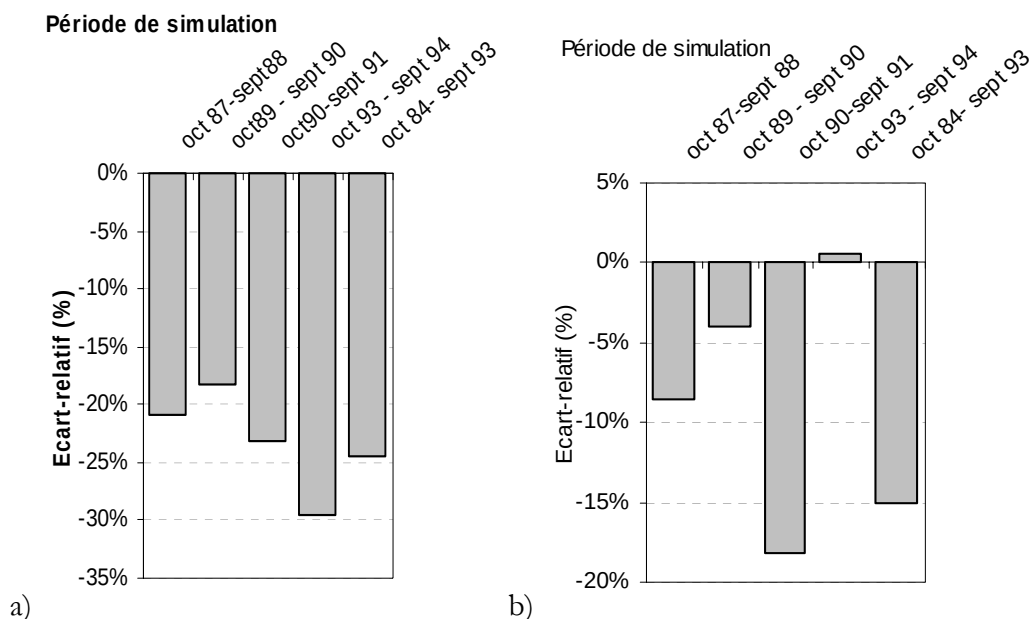


Figure I.3 : Écart relatif, pour différentes périodes, entre la lame d'eau cumulée simulée au tronçon 33 (a) et au tronçon 1642 (b) à partir des données météorologiques historiques (9 stations, interpolation polygones de Thiessen) et la lame d'eau mesurée

Ces résultats nous permettent de considérer que, pour la période prise en compte lors du calage, HYDROTEL est convenablement calé, malgré des valeurs d'écart relatif parfois importantes, sans doute pour les mêmes raisons que les écarts constatés lors du calage avec la prise en compte de 41 stations météorologiques (voir section A.1 à l'ANNEXE A). L'écart est plus important ici qu'avec les 41 stations. La diminution de la lame d'eau de plus de 15% constatées sur la Chaudière à St Lambert en serait une conséquence directe.

I.1.3. Performance des MCG-SEM : Comparaison des données météorologiques sur la période de référence

Les données météorologiques sont analysées à trois (3) stations : Saint-Flavien, Saint-Georges et Lac Mégantic. Elles sont situées respectivement en basse Chaudière, moyenne Chaudière et haute Chaudière.

Suite à l'étude de la Figure I.4 correspondant aux données moyennes de précipitations mesurées et passées simulées par la méthode du downscaling, nous pouvons observer que les précipitations mesurées sont difficilement reproduites par HadCM3 A2a et B2a. Cependant, nous pouvons relever que les différentes chroniques pour un même scénario d'émission (A2a et B2a) présentent des données relativement homogènes.

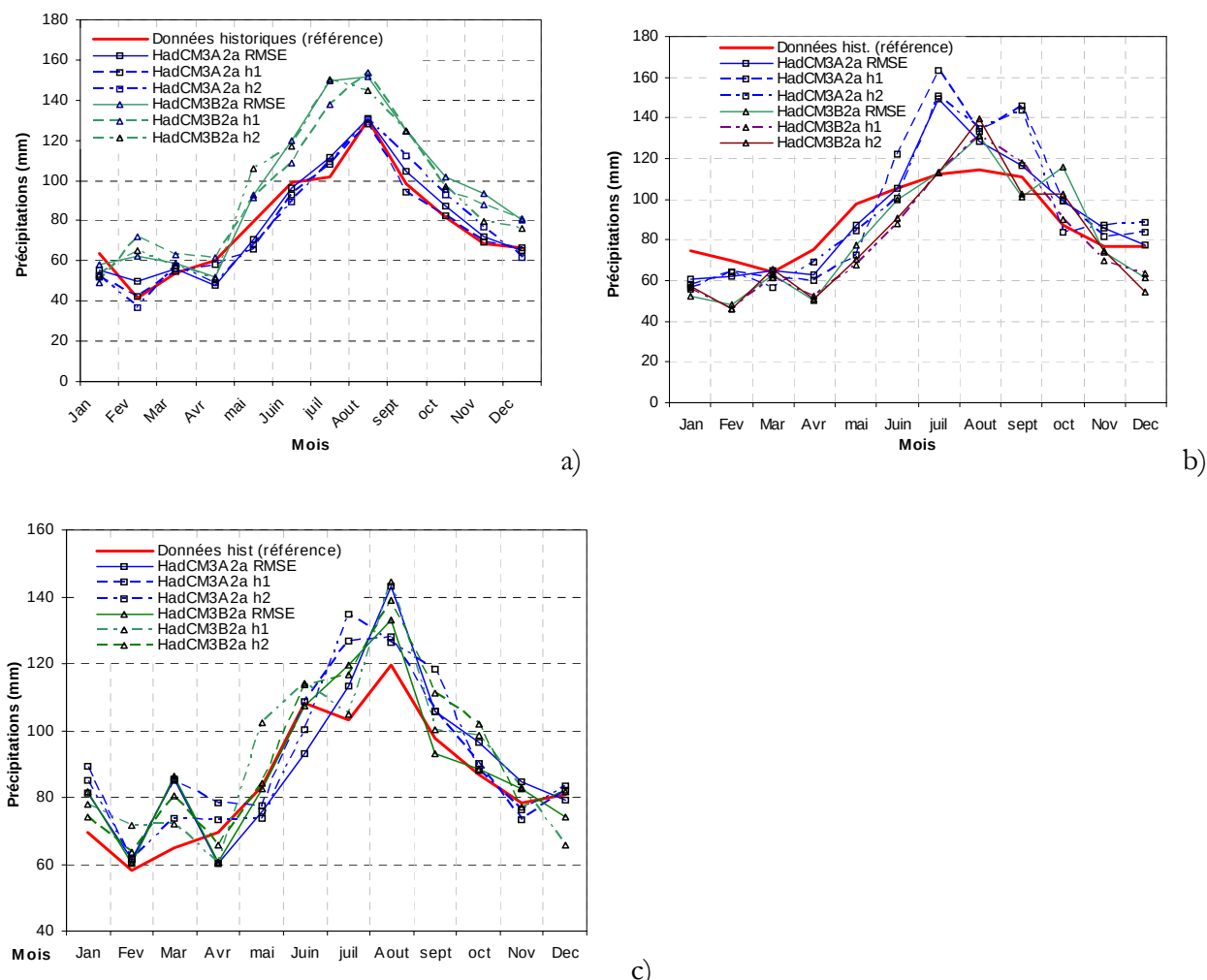


Figure I.4 : Moyenne mensuelle des précipitations selon les données historiques, et chacune des chroniques (RMSE, h1 et h2) du MCG HadCM3 scénario d'émission A2a et B2a aux stations de mesure a) Saint-Flavien, b) Saint-Georges et c) Lac Mégantic pour la période 1970-1999

Les températures produisent aussi une erreur de +2 à -1,3 °C selon les chroniques considérées pour les moyennes mensuelles des températures journalières maximales et de +1,3 à -1,2 °C pour les moyennes mensuelles des températures journalières minimales.

Ces erreurs sont importantes et constituent un biais lors de la simulation de la lame d'eau. C'est pourquoi nous exploiterons les résultats hydrologiques de manière relative entre les simulations futures et passées issues des MCG-SEM.

Selon la station et la chronique météorologique utilisée, l'évolution de la précipitation moyenne mensuelle dans le futur est très variable. Elle peut varier entre +34%, +3% et -29% de manière aléatoire sur les trois stations étudiées. Cela montre la grande difficulté à simuler les précipitations même à l'aide d'une seule méthode de prévision de la météorologie sur un MCG.

Les températures journalières maximales augmentent de manière relativement homogène selon la série et le scénario d'émission considéré. Les mois de janvier, février, mars et juin semblent peu affectés par ces variations de températures alors qu'au cours des autres mois elles peuvent être augmentées de 0,5 à plus de 2°C.

Les températures journalières minimales augmentent elles aussi de manière relativement homogène selon la série et le scénario d'émission considéré. Les augmentations de températures journalières minimales ont lieu principalement au cours de la période de mai à septembre le plus souvent de plus de 1 °C. Le maximum d'augmentation apparaît au mois d'août.

I.1.4. Effet du downscaling : comparaison de la simulation issue des données historiques de référence (1970-1999) avec la simulation issue des données des MCG-SEM (1970-1999)

Si l'on considère la lame d'eau cumulée à l'échelle annuelle, nous constatons une erreur importante et relativement homogène selon la chronique météorologique. La lame d'eau est surévaluée au maximum pour les lames d'eau les plus faibles d'environ 50%. Cet écart diminue progressivement pour les lames d'eau les plus élevées avec une erreur pouvant aller de -1,6% à 9,7% de la lame d'eau de référence pour l'écoulement correspondant au quantile 90 (Tableau I.2).

Tableau I.2 : Écart relatif des lames d'eau annuelles simulées pour la période passée entre celles issues de l'utilisation des MCG et celles issues des données historiques

Ecart relatifs (sim passée ds-sim passé hist)/sim passée hist.)	HadCM3_A2a	HadCM3_B2a	HadCM3_A2a	HadCM3_B2a	HadCM3_A2a	HadCM3_B2a
	RMSE	RMSE	h1	h1	h2	h2
Quantile 10	50,52%	44,24%	48,70%	52,10%	53,77%	66,41%
Quantile 25	34,58%	43,06%	46,13%	46,70%	41,37%	46,73%
Mediane	41,59%	39,64%	42,00%	42,76%	38,38%	46,22%
Quantile 75	15,02%	19,63%	20,26%	19,41%	19,70%	23,50%
Quantile 90	-1,61%	4,38%	4,02%	6,27%	7,91%	9,72%

Cette erreur est retrouvée de manière plus ou moins importante selon la saison considérée mais toujours relativement homogène selon le MCG-SEM utilisé. Au cours du printemps pour les probabilités de non dépassement inférieures à 50% environ (médiane), la tendance est à une surévaluation (maximum de 35,3%) de la lame d'eau et pour le quantile 90, la tendance est à la sous évaluation de celle ci.

Au cours de l'été, la surévaluation des lames d'eau est importante pour les lames d'eau inférieures au quantile 90, avec un maximum à plus de 100%, en dessus du quantile 90 elle persiste à hauteur de 37%.

Les lames d'eau de la période de l'automne sont correctement reproduites pour les probabilités de non dépassement supérieures au quantile 80.

En hiver, les faibles lames d'eau simulées induisent une erreur variant de 35 à 100% pour le quantile 10.

Ces différences entre les lames d'eau simulées à partir des données historiques et celles simulées à partir des données passées du MCG, sont dues à la difficulté de reproduire le climat local par le MCG même à l'aide d'outils de mise à l'échelle spatiale. Ainsi, comme nous l'avons précédemment montré, les données météorologiques simulées par le SDSM ne reproduisent pas totalement les données mesurées aux stations de mesures, ce qui influence le régime hydrique.

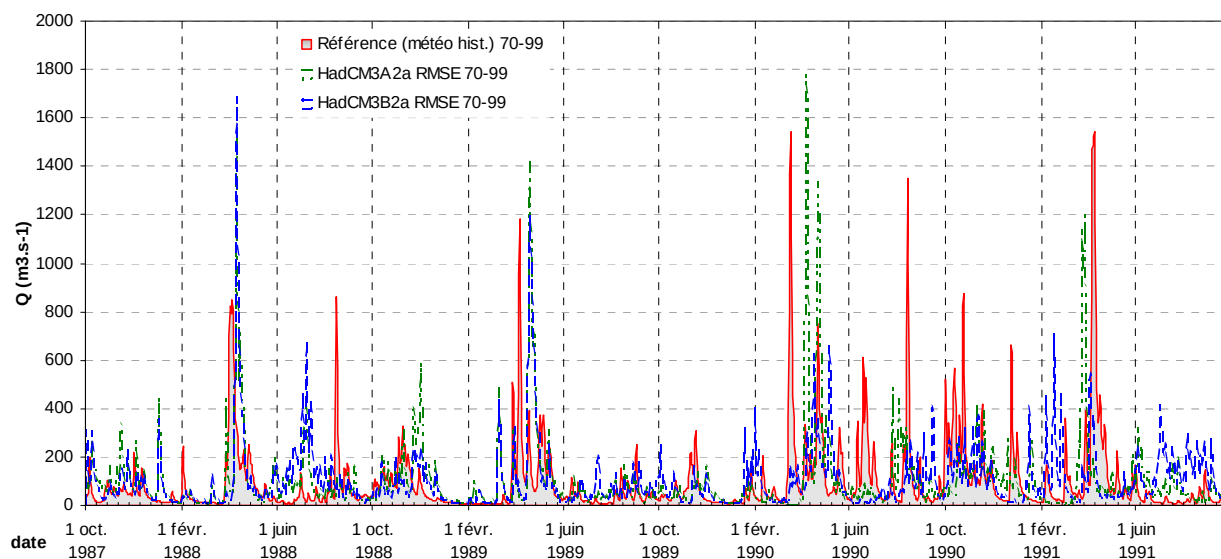


Figure I.5 : Hydrogramme des débits simulés à partir des données météorologiques historiques et issues de la méthode du downscaling pour le scénario A2a (RMSE) et B2a (RMSE) à l'exutoire de la Chaudière entre le 1 octobre 1987 et le 30 septembre 1991.

La Figure I.5 présentant l'hydrogramme entre le 1^{er} octobre 1987 et le 31 septembre 1991, montre que les simulations issues des données simulées pour la période passée ne reproduit pas le régime hydrique issues des données historiques pour la période présentée. Par ailleurs les deux simulations issues des données météorologiques du downscaling, sur la période passée, ne reproduisent pas les mêmes pics de crue.

A titre d'exemple nous pouvons noter que le débit maximal journalier du printemps 1990, a lieu le 18 mars pour la simulation historique, avec $1545,6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, le 7 avril pour la simulation HadCM3a A2a (RMSE) avec $1703 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et le 16 mai pour la simulation HadCM3a B2a (RMSE) avec $653 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Cet exemple n'est pas isolé sur l'ensemble des simulations.

Une autre manière de visualiser cet écart est d'effectuer, pour chaque jour, la moyenne des débits sur les 30 années de simulation. On obtient l'hydrogramme « moyen » représenté sur la Figure I.6. On voit bien ici l'erreur engendrée par l'utilisation des données journalières issues du downscaling et la nécessité d'interpréter les résultats de manière relative et non absolue.

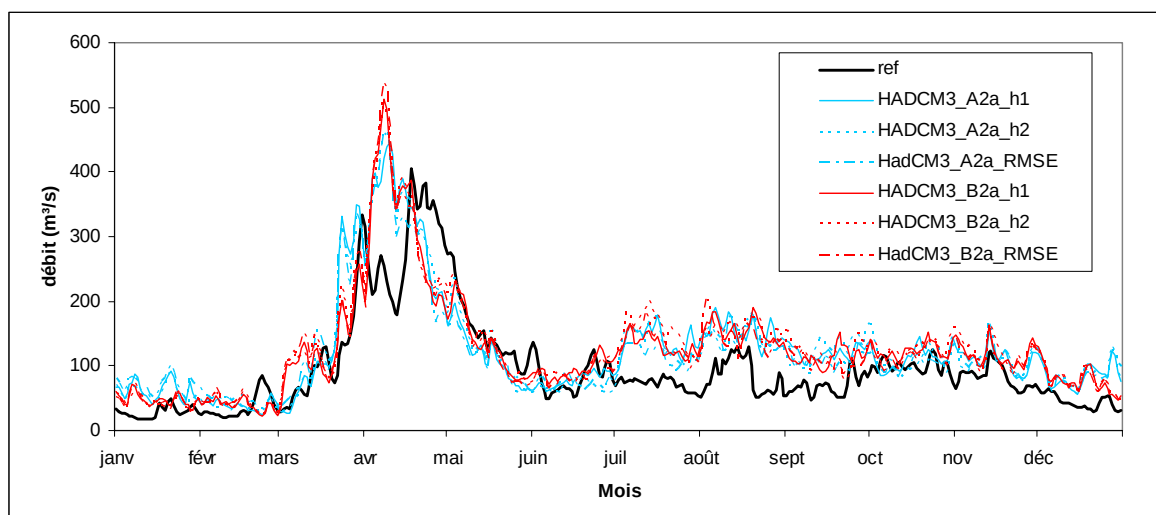


Figure I.6: Débit moyen journalier simulé à partir des données météorologiques mesurées (en noire) et des données issues du downscaling pour la période de référence

La méthode de mise à l'échelle spatiale du downscaling présente donc l'intérêt de fournir des données journalières cohérentes sur la période passée et future, mais présente une erreur importante quand à la reproduction des conditions hydriques passées historiques.

Malgré ce dernier aspect développé, la solution envisagée pour évaluer la lame d'eau saisonnière future en valeur absolue est de calculer la différence entre la lame d'eau simulée à partir des données futures et passées issues du MCG, puis d'appliquer cette différence à la lame d'eau simulée issue des données historiques.

I.2 EFFET DES CC SELON LA MÉTHODE DU DOWNSCALING

I.2.1 Effet sur la lame d'eau annuelle

En considérant l'ensemble des chroniques (h1, h2 et RMSE) équiprobables, on obtient les courbes de fréquence cumulée présentées à la Figure I.7. On constate, pour HadCM3-A2a comme pour HadCM3-B2a, une légère diminution de la lame d'eau annuelle sur l'ensemble des années de simulation, excepté pour les années les plus sèches. En moyenne, la lame d'eau diminue respectivement de -4% et -3,8%. Les résultats sont donc relativement cohérents et

constants selon le SEM considéré. Notons toutefois que cet effet n'est pas statistiquement significatif ($p = 0,06$ et $0,09$ respectivement, avec t -test apparié).

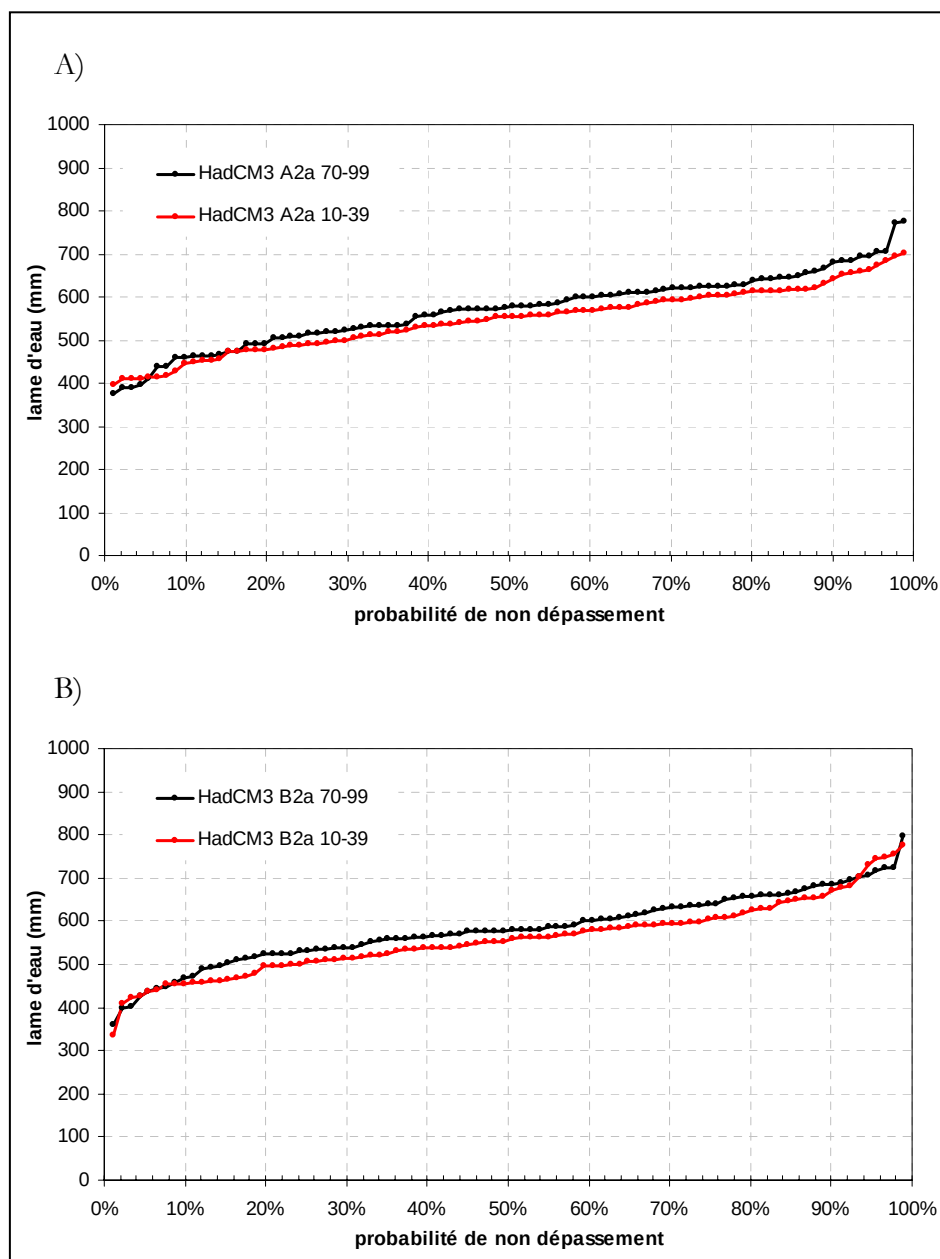


Figure I.7 : Fréquence cumulée de la lame d'eau annuelle simulée avec la méthode du Downscaling appliqué aux données issues de HadCM3_A2a (A) et hadCM3_B2a (B) en considérant les différentes chroniques (h1, h2 et RMSE) comme équiprobables, pour la période de référence (en noir) et la période future (en rouge)

I.2.2. Effet sur la lame d'eau mensuelle et saisonnière

Au printemps, la lame d'eau diminuerait de 5 à 12% soit de 14,7 à 22 mm environ. En été l'écoulement serait peu influencé par le CC selon cette méthode alors que durant l'automne, une diminution de la lame d'eau de 5 à 10,8% aurait lieu. En hiver, c'est une augmentation de 3 à 27% qui aurait lieu.

Au cours du printemps (Figure I.8 (a)), si l'on analyse les résultats de l'ensemble des simulations futures de manière indépendante, la lame d'eau aura tendance à diminuer. Les simulations futures du Scénario d'émission A2a produiraient une plus faible diminution que celles issues du Scénario B2a, notamment pour les probabilités de non dépassement les plus faibles soit pour le quantile 10, -7 et -13,5% et pour la médiane -6,7% et -8,4% (respectivement SE A2a et B2a)

En été l'impact du CC serait variable selon les deux scénarios d'émission. Le SE A2a induirait une variation de la lame d'eau comprise entre -6,8% et 2,9%. Le SE B2a provoque plutôt une augmentation de la lame d'eau pour les quantiles inférieurs à 25%. Les lames d'eau supérieures au quantile 25 présenteraient dans le future une diminution croissante avec, pour le quantile 90, une diminution de 10% de la lame d'eau. Si l'on regroupe l'ensemble des réalisations, la lame d'eau future varierait entre -5,7% et 4,5% (Figure I.8 (b)). L'impact du CC semble faible pour cette période estivale.

Durant l'automne, le MCG a tendance à induire une diminution de la lame d'eau, dans la même gamme de valeur selon les deux SE considéré (Figure I.8 (c)). En prenant en compte l'ensemble des simulations, la diminution de la lame d'eau varierait entre -0,8% pour les lames d'eau de la médiane et 0,9% pour celle du quantile 90.

En hiver les Scénarios d'émission de GES A2a et B2a, ont un impact différent sur le régime hydrique de la Chaudière. Le SE A2a, augmente les lames d'eau les plus faibles dont la probabilité de non dépassement est inférieure à la médiane et a peu d'impact sur les lames d'eau supérieures à cette limite. Le SE B2a aura tendance à augmenter la lame d'eau globalement de 5 à 29% selon la probabilité de non dépassement considérée. Selon l'ensemble des simulations futures, la lame d'eau augmenterait de 2,6 à 27,5% respectivement pour les quantiles 75 et 10 (Figure I.8 (d)).

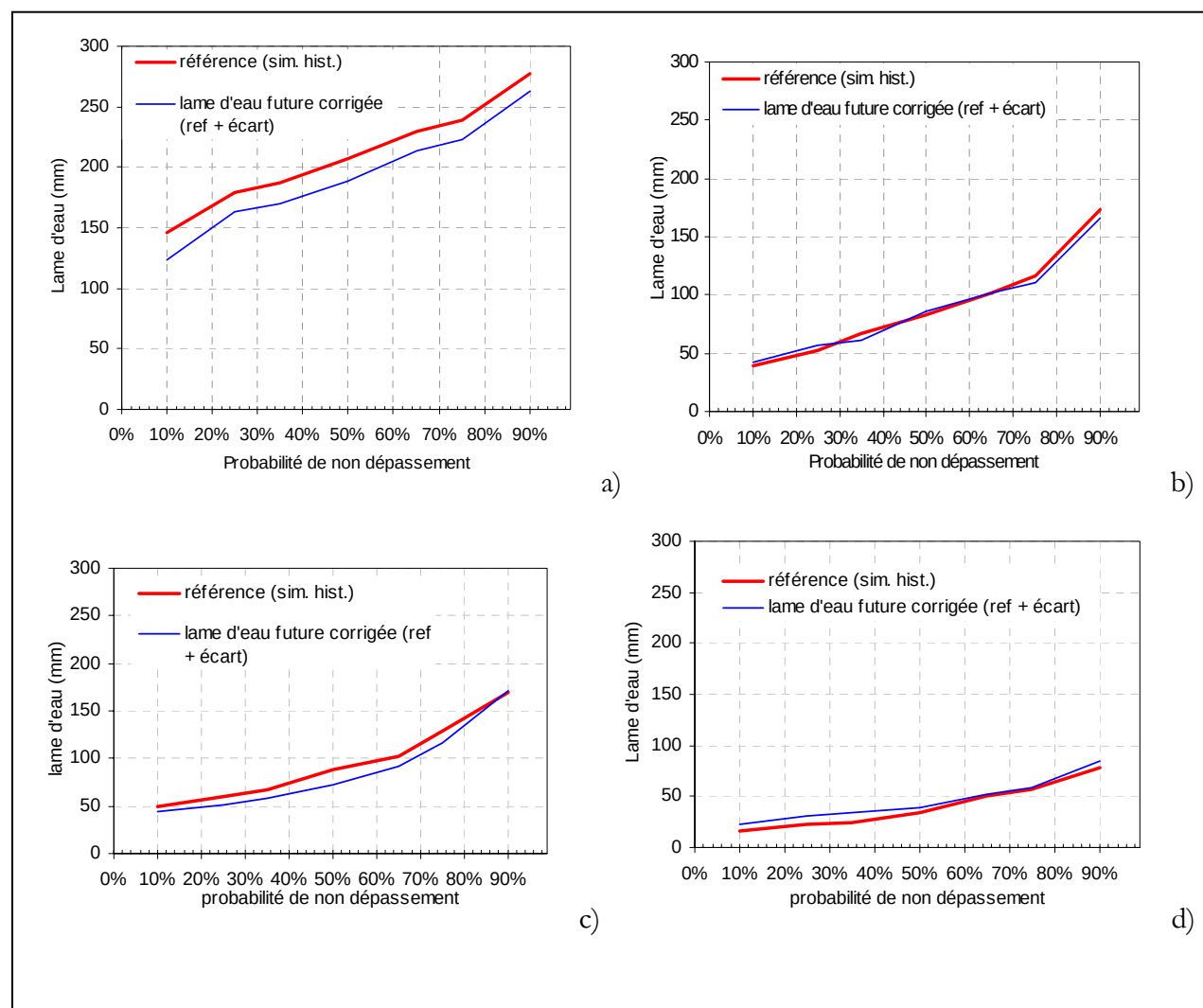


Figure I.8 : Probabilité de non dépassement des lames d'eau simulées à l'exutoire de la Chaudière selon les données historiques et les chroniques des MCG-SEM HadCM3 A2a et B2a « corrigées » appliqués par la méthode du Downscaling, au printemps (a), à l'été (b), à l'automne (c) et à l'hiver (d).

À l'échelle mensuelle, l'effet le plus important est observé au mois de mai (Figure I.9) avec une très nette diminution de la lame d'eau médiane ainsi que des 1^{er} et 3^e quartiles, que ce soit avec HadCM3-A2a ou avec HadCM3-B2a. Pour les autres mois, il n'y a aucun effet qui soit statistiquement significatif pour les deux MCG-SEM.

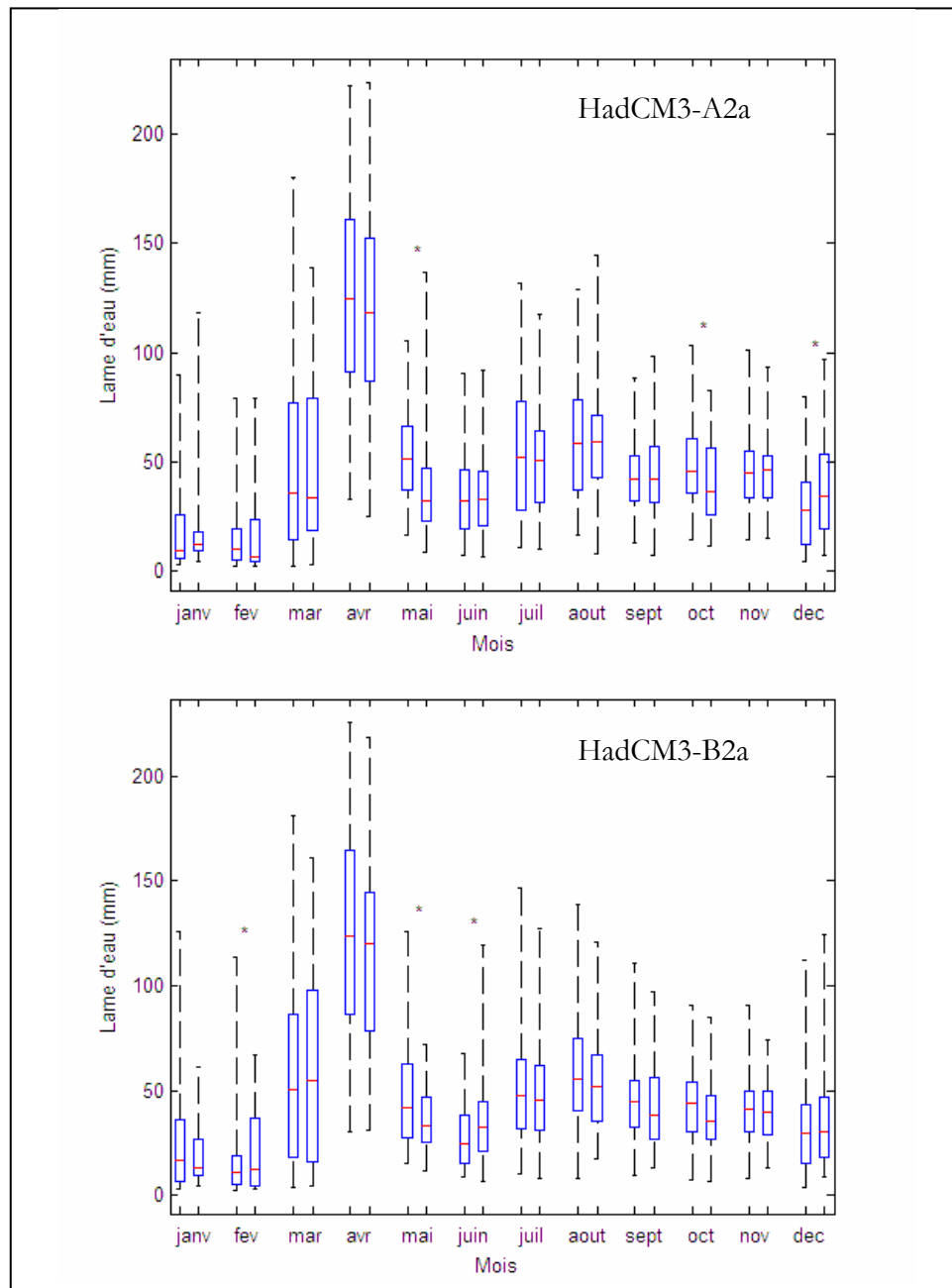


Figure I.9 : Lame d'eau mensuelle simulée à l'exutoire de la Chaudière avec les données historiques (boîte de gauche) et avec les données futures issues de la méthode du Downscaling (boîte de droite) pour les deux MCG-SEM considérés. Les étoiles indiquent que la différence est statistiquement significative (t -test apparié, $p < 0.05$).

I.2.3. Effet sur le débit journalier

Les figures suivantes présentent l'effet des CC sur les débits journaliers moyens obtenu avec les différentes combinaisons de MCG-SEM et simulations de downscaling (RMSE, h1, h2). On constate que l'effet des CC obtenu avec cette méthode à l'échelle journalière est très faible. On retrouve dans les deux cas (A2a et B2a) une diminution du débit de la pointe printanière et une diminution du débit au mois de mai. Le reste du temps, aucune tendance nette ne peut être identifiée.

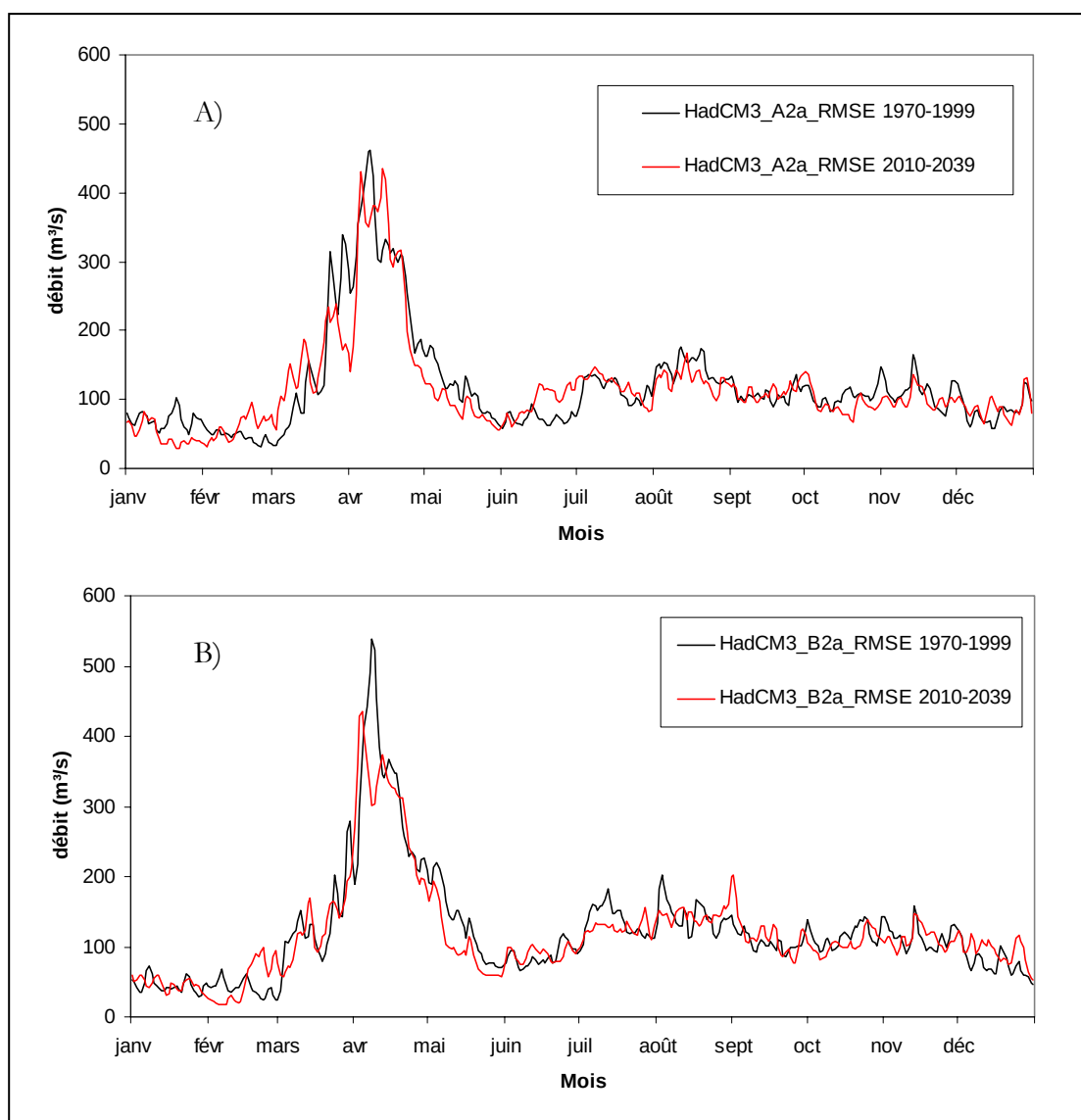


Figure I.10: Débit moyen journalier simulé à l'exutoire du bassin versant à partir des données de HadCM3_A2a_RMSE (A) et HadCM3_B2a_RMSE (B), pour la période future et la période de référence

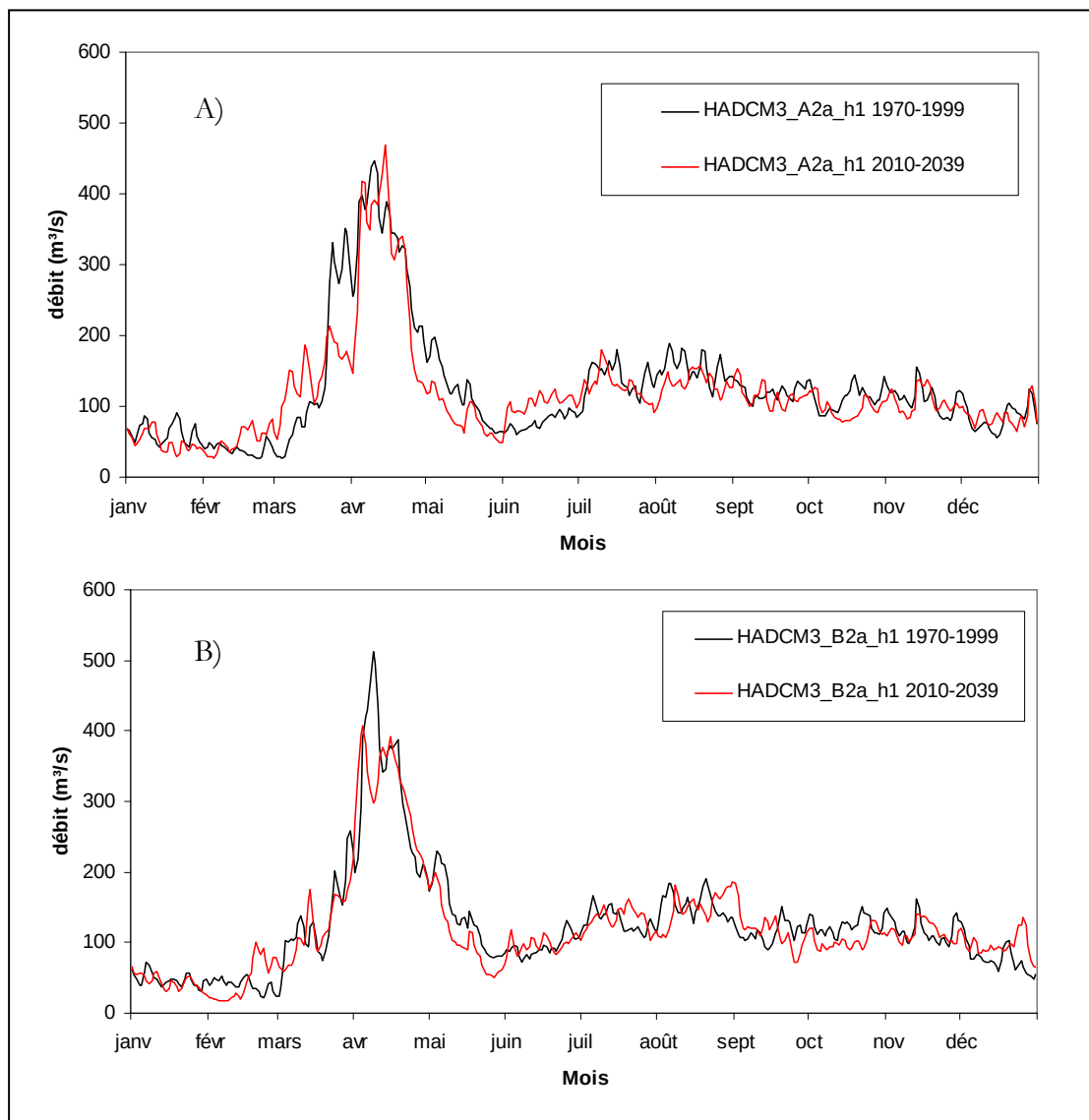


Figure I.11: Débit moyen journalier simulé à l'exutoire du bassin versant à partir des données de HadCM3_A2a_h1 (A) et HadCM3_B2a_h1 (B), pour la période future et la période de référence

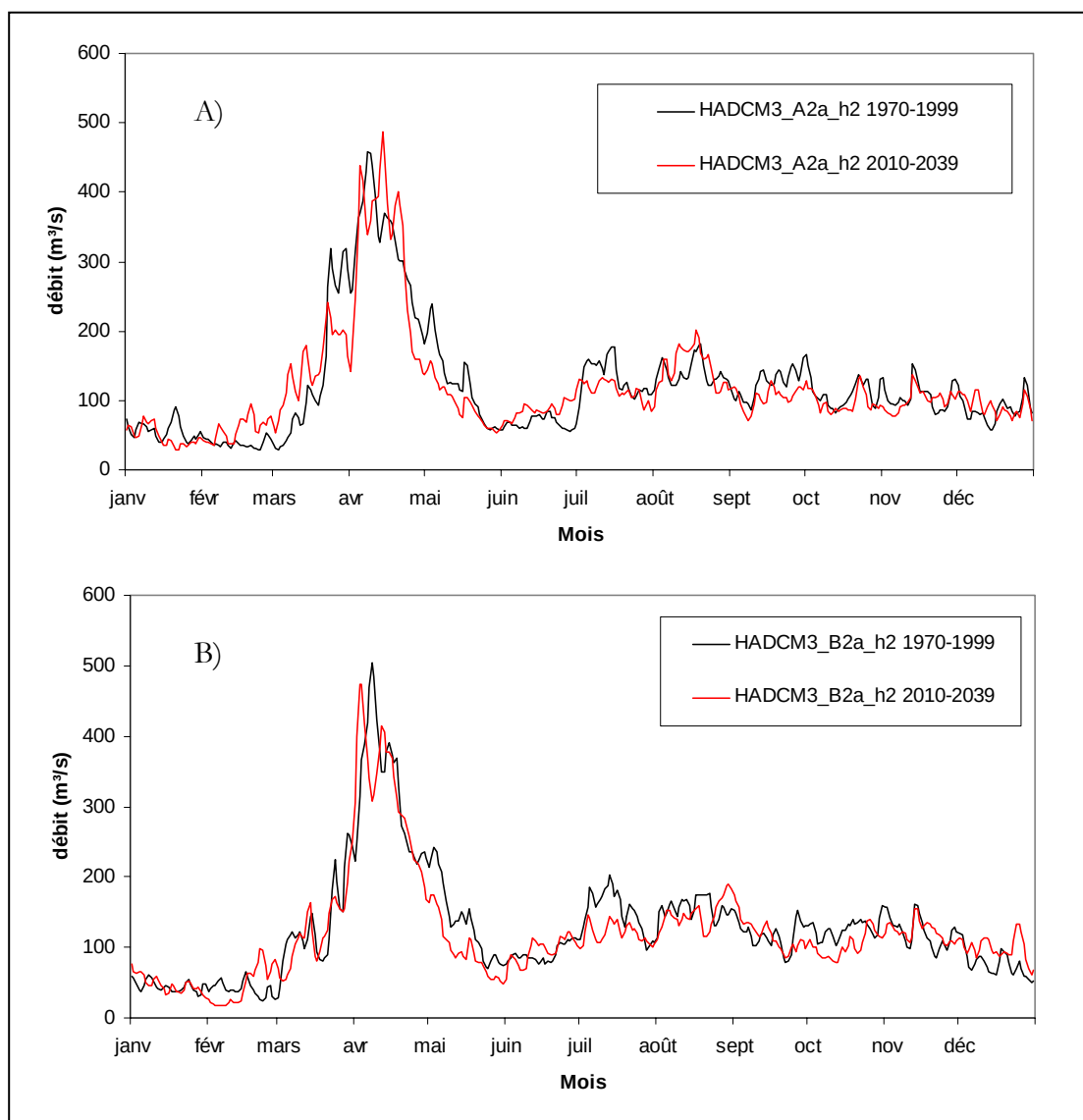


Figure I.12: Débit moyen journalier simulé à l'exutoire du bassin versant à partir des données de HadCM3_A2a_h2 (A) et HadCM3_B2a_h2 (B), pour la période future et la période de référence

I.2.4. Comparaison des lames d'eau de l'exutoire de la Chaudière avec celles de deux sous-bassins agricoles

A l'échelle annuelle, le bassin versant de Saint Victor produit des lames d'eau inférieures d'environ 80 à 110 mm à celles de La Chaudière. Celui de Beaurivage produit un écoulement d'environ 60 mm supérieur à celui de la Chaudière. Le CC fait peu varier la lame d'eau à l'échelle de l'année et de manière peu différente selon le bassin versant étudié.

Au cours de l'hiver les lames d'eau produites par les bassins versants sont relativement similaires, le CC ne semble pas agir différemment selon le bassin versant de Beaurivage et de la Chaudière. Cependant l'augmentation de la lame d'eau semble plus accrue selon le bassin versant de Saint Victor; la lame d'eau augmenterait de 16 à 31% pour ce dernier alors que les bassins versants de la Chaudière et de Beaurivage supporteraient une augmentation de 2,5 à 19,3%.

Au printemps, tel que constaté à l'échelle annuelle, le bassin versant de Saint Victor produit un écoulement inférieur à celui de la Chaudière de environ 70 à 100 mm, alors que celui de Beaurivage produirait un écoulement supérieur à 40 mm. Le CC ne semble pas produire des différences notables selon le bassin versant considéré.

Durant l'été, les lames d'eau ne sont pas spécialement différentes d'un bassin versant à l'autre, cependant, le CC induirait une relative stagnation de l'écoulement estival à l'exutoire de la Chaudière alors qu'il augmenterait la lame d'eau de 3 à 15% sur les deux sous-bassins versants agricoles.

Au cours de l'automne, les lames d'eau générées par les différents sous-bassins versants présentent la même gamme de valeur et le CC ne semble pas agir différemment selon ces territoires.

Les variations constatées à l'échelle de ces différents sites peuvent être liées à la répartition et l'influence des stations météorologiques, celles-ci étant en faible nombre. Nous ne pouvons donc pas tirer de conclusions claires quand à l'impact du CC sur ces deux sous-bassins versant comparativement à celui de la Chaudière.

I.2.5. Effet sur les débits d'étiage

Les graphiques de la Figure I.13 nous montrent des résultats différents de ceux déterminés pour la méthode des deltas. Ils nous montrent que dans le futur, les débits d'étiage les plus importants semblent continuer à se produire en hiver, ainsi le CC semble avoir un faible impact sur la répartition des débits d'étiages de la Chaudière.

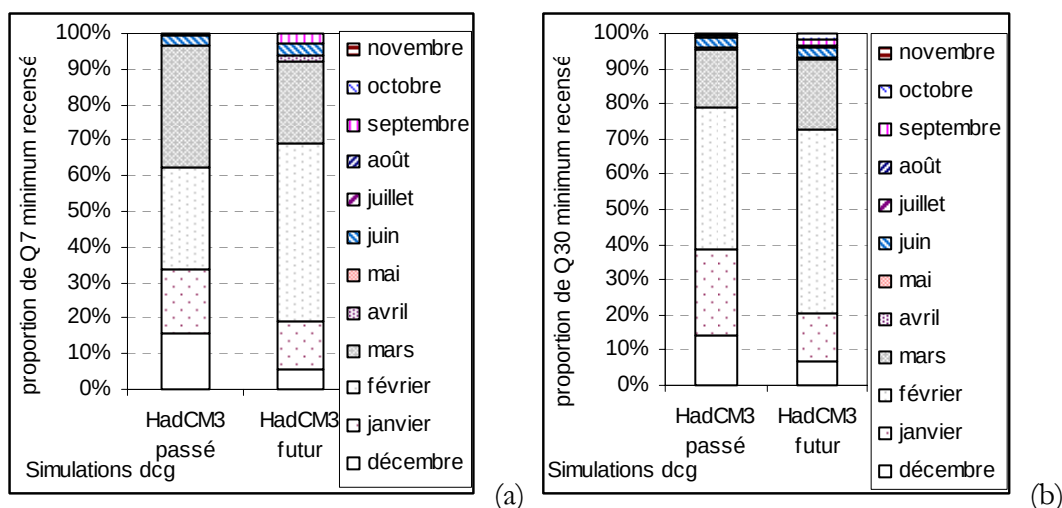


Figure I.13 : Répartition au cours de l'année des débits minimums cumulés sur 30 jours (a) et 7 jours (b) les plus faibles.

A l'échelle annuelle, comme nous le présente le Tableau I.3, les lames d'eau annuelles déterminées pour le Q_{2-7} , le Q_{10-7} et le Q_{5-30} sont cohérentes, cependant si l'on compare les valeurs déterminées pour les simulations futures avec celles issues des simulations passées, nous ne pouvons distinguer de tendance quant aux résultats. Sans distinguer les chroniques, sous l'influence du CC, le Q_{2-7} évoluerait peu, à hauteur de +1,19% (médiane de l'ensemble des résultats issue des MCG-SEM) avec un maximum de 5,81% d'augmentation et un minimum de -7,96% de diminution, le Q_{10-7} augmenterait de 5,64% (médiane) avec comme extrême -6,7% et +12,25% et le Q_{5-30} augmenterait de 5,73% (médiane), avec comme évolutions extrêmes -6,79% et +8,76%.

D'après ces résultats il paraît difficile de conclure sur l'évolution de la lame d'eau d'étiage annuelle.

Tableau I.3 : Écarts relatif entre les Q_{2-7} , Q_{10-7} et Q_{5-30} annuels futures et passés

HadCM3 SE	Chronique	Q2-7	Q10-7	Q5-30
A2a	RMSE	2,62%	8,17%	4,82%
	h1	-1,97%	3,69%	-6,79%
	h2	5,81%	7,59%	8,76%
B2a	RMSE	-0,49%	12,25%	7,93%
	h1	3,13%	0,62%	-2,11%
	h2	-7,96%	-6,74%	6,63%

Les lames d'eau d'étiage estivales sont cohérentes du point de vue de l'ordre de grandeur des valeurs déterminées avec des valeurs variant entre 25,5 et 39 m³.s⁻¹ pour le Q_{2-7} , de 19,4 à 21 m³.s⁻¹ pour le Q_{10-7} et de 43,8 à 55 m³.s⁻¹ pour le Q_{5-30} .

Cependant elles ne paraissent pas présenter de tendance claire quand à l'évolution de la lame d'eau dans le futur. Le Q_{2-7} augmenterait de 6,6% (médiane de l'ensemble des résultats issue des MCG-SEM) avec comme évolutions extrêmes + 31,3% à -11,4%, le Q_{10-7} diminuerait de 2,5% (médiane) avec comme évolution extrême de + 9,6% à -20% et le Q_{5-30} augmenterait de 4,7% (médiane) avec comme extrêmes d'évolution +17,6% et -11,8% (Tableau I.4).

Tableau I.4 : Écarts relatifs entre les Q_{2-7} , Q_{10-7} et Q_{5-30} estivaux futures et passés.

HadCM3 SE	chronique	Q2-7	Q10-7	Q5-30
A2a	RMSE	31,28%	-7,39%	10,13%
	h1	30,72%	-20,00%	-11,81%
	h2	-11,42%	9,59%	-5,90%
B2a	RMSE	5,61%	-2,46%	17,64%
	h1	7,50%	11,16%	11,18%
	h2	-0,70%	-2,65%	-0,69%

Tel que souligné lors de l'analyse du débit d'étiage à l'échelle annuelle, il est difficile de conclure quant à l'évolution du débit d'étiage au cours de la période estivale sous l'influence du CC.

ANNEXE J. APPLICATION DE LA MÉTHODE MIXTE

J.1 APPLICATION DE LA MÉTHODE MIXTE SUR LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE

Cette méthode est basée sur la méthode du Downscaling présentée à l'ANNEXE I. Les MCG-SEM utilisés sont donc les mêmes : HadCM3_A2a et HadCM3_B2a avec dans chaque cas les chroniques h1, h2 et RMSE.

Cette approche est schématisée sur la Figure 6.7.

J.2 EFFET DES CC SELON LA MÉTHODE MIXTE

J.2.1. Effet sur la lame d'eau annuelle

Voir section 6.1.4.3.

J.2.2. Effet sur la lame d'eau mensuelle et saisonnière

Au cours du printemps (Figure J.1 (a)), les chroniques du scénarios B2a produisent des écarts relatifs (entre simulation future et passée) relativement cohérents selon le quartile considéré, variant de -7,9 à -12,6%, de -2,9 à -8,6% et de -2,9 à -10,1% respectivement pour les chroniques RMSE, h1 et h2. Le scénario A2a produit des résultats plus variés, la chronique h2 induit une diminution de -6,1 à -9,6% de la lame d'eau dans le futur alors que les chroniques RMSE et h2 induisent une variation de la lame d'eau de +2,7 à -2,7%. En considérant les réalisations issues des chroniques météorologique des scénarios A2a et B2a indépendamment, la lame d'eau diminue de -0,5 à -3,9% pour le scénario A2a et de -4,4 à -11,6% pour le scénario B2a. En prenant en compte l'ensemble des simulations, le CC induirait une diminution de -1,9 à -8% de la lame d'eau au cours du printemps.

En été, les différentes chroniques météorologiques futures induisent des variations cohérentes de la lame d'eau dans le futur. Le Scénario A2a induit une diminution de -8,5 à -12,8% de la lame d'eau alors que le scénario B2a induit une diminution plus sévère de la lame d'eau de -15

à -20,9%. En considérant l'ensemble des résultats pour la période future, une diminution de -14 à -21,1% de la lame d'eau est induite (Figure J.1 (b)).

En automne, les différentes chroniques météorologiques futures considérées induisent des variations cohérentes de la lame d'eau dans le futur. Les Scénarios A2a et B2a ont relativement la même influence sur la lame d'eau de la Chaudière. Ainsi, en considérant l'ensemble des résultats, le MCG HadCM3 induit une diminution de -3,5 à -18,5% avec une moyenne de -14,9%, variant (Figure J.1 (c)).

En hiver les différentes chroniques météorologiques choisies par scénarios d'émission produisent des lames d'eau cohérentes entre elles. En agrégeant ces résultats par scénario d'émission, le scénario A2a semble produire une augmentation de 4 à 9,8% de la lame d'eau alors que le scénario B2a en produit une de 16,6 à 37,6%. En considérant l'ensemble des chroniques météorologiques, le CC produirait une augmentation de 7 à 20,9% de la lame d'eau (Figure J.1 (d)).

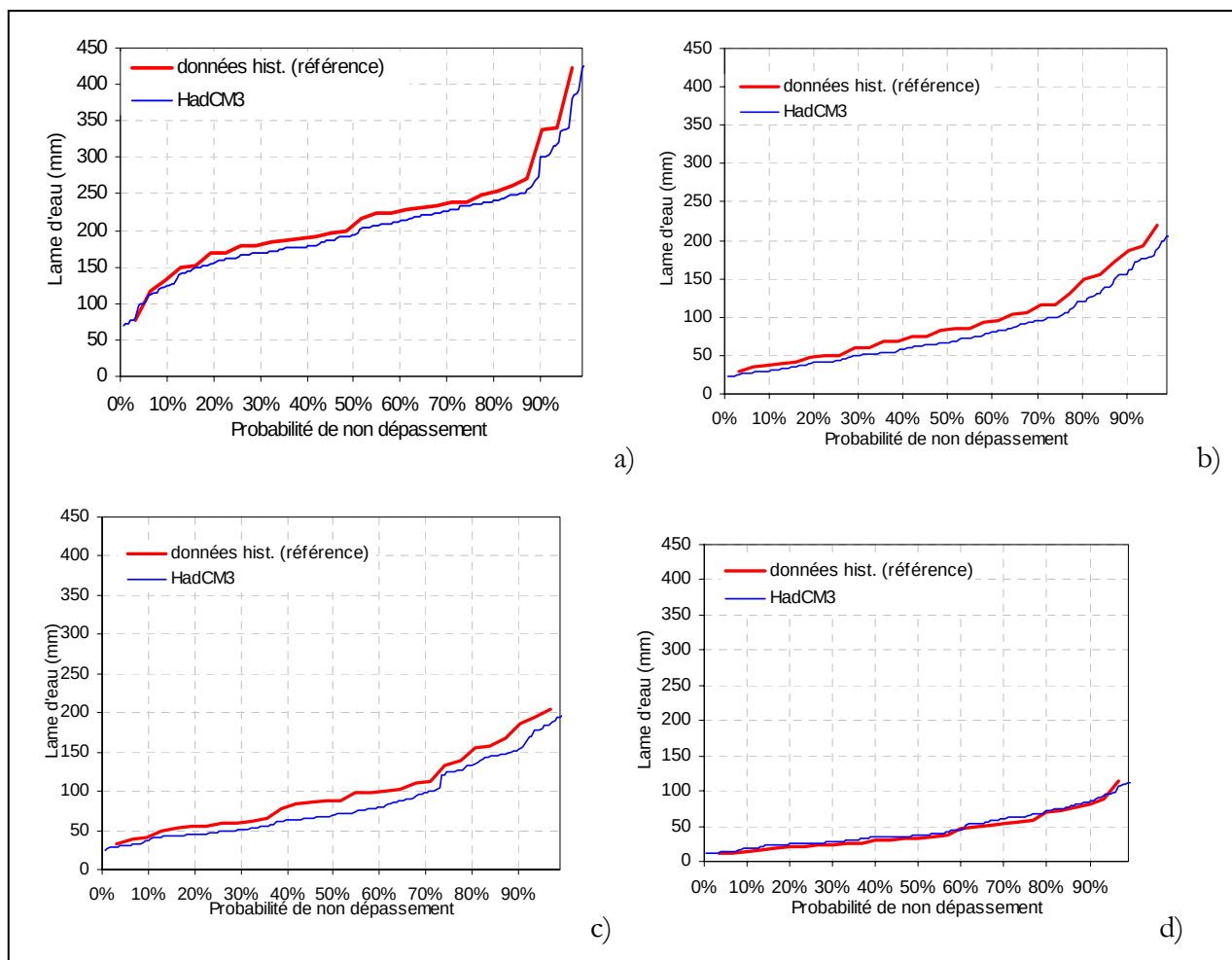


Figure J.1 : Probabilité de non dépassement des lames d'eau simulées à l'exutoire de la Chaudière selon les données historiques et les chroniques des MCG-SEM HadCM3 A2a et B2a appliqués par la méthode Mixte (au cours du printemps (a), de l'été (b), de l'automne (c) et de l'hiver (d)).

Le SE B2a produit des modifications plus importantes, aux différentes périodes étudiées que le Scénario A2a. Cette constatation est surprenante au vu des définitions des SE. En effet, le Scénario A2 est sensé présenter une modification du climat plus importante que les scénarios B2. Cependant à l'échelle de temps à laquelle nous travaillons, ces conséquences sont difficiles à différencier d'un scénario à un autre.

Selon la prise en compte de l'ensemble des chroniques météorologiques simulées, l'hiver produirait une augmentation de la lame d'eau de 7 à 20,9%, le printemps, une diminution de -1,9 à -8%, l'été une diminution importante de -14 à -21,1% et l'automne une diminution de -3,5 à -18,5%.

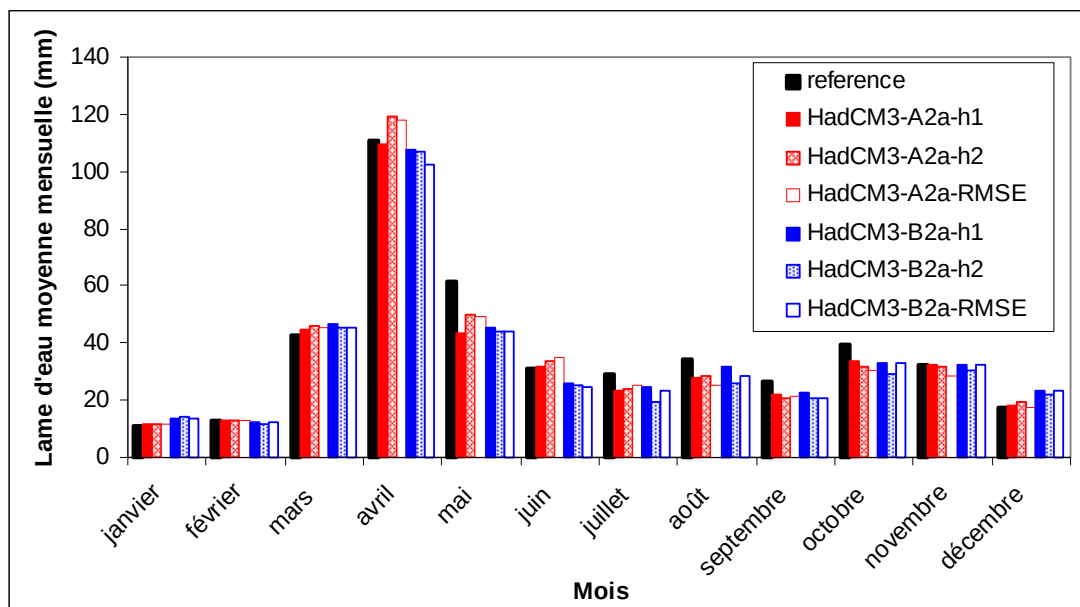


Figure J.2 : Lame d'eau mensuelle moyenne (sur les 30 ans) simulée à l'exutoire de la Chaudière avec les données historiques (en noir) et avec les données futures issues des MCG-SEM et chroniques considérés (en rouge)

Lorsqu'on considère l'ensemble des MCG-SEM et des chroniques comme équiprobables, on obtient le graphique de la Figure 6.13, à la section 6.1.4.3.

J.2.3. Effet sur les débits d'étiage

L'analyse sous HYFRAN, n'a pu être réalisée pour cette étape, cependant, la Figure J.3 présente les périodes de l'année auxquelles apparaissent les Q_7 et les Q_{30} minimum mensuelles les plus faibles.

Le Q_7 minimum mensuel le plus faible au cours de l'année apparaît dans la période future majoritairement en été, alors que dans le passé, il apparaissait principalement en hiver. Cependant le Q_{30} minimum mensuel le plus faible continu à apparaître principalement en hiver. Cela signifie que dans la période future, des périodes de forts étiages ponctuels seront plus fréquents en été alors que les longues périodes d'étiage continueront à apparaître au cours de la période hivernale. Cette donnée est intéressante du point de vue de la gestion de l'eau. En confirmant cette observation, il sera nécessaire de mettre en place des mesures adapter pour se prémunir de ces périodes de fort déficit hydrique, ponctuel dans la durée, à l'échelle du bassin versant.

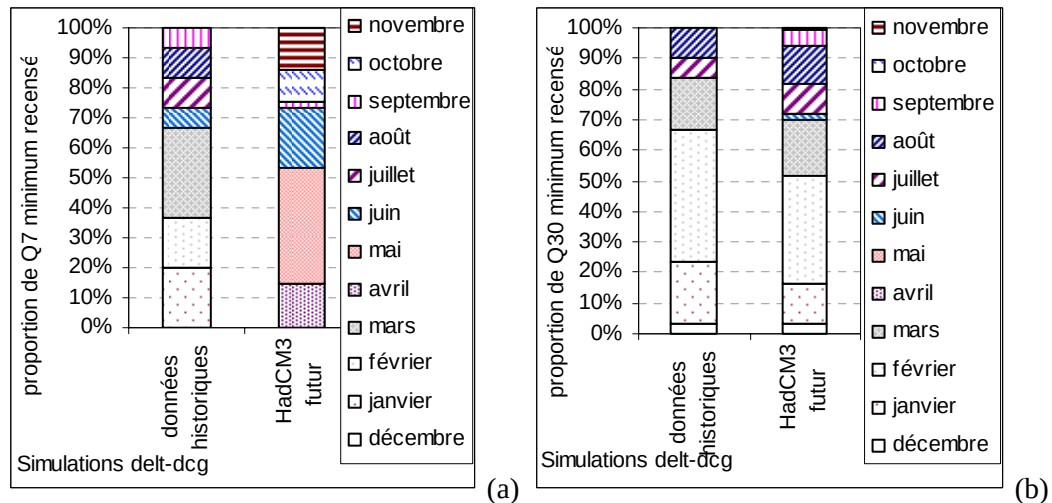


Figure J.3 : Répartition au cours de l'année des débits minimums cumulés sur 30 jours (a) et 7 jours (b) les plus faibles.

J.2.4. Comparaison des lames d'eau de l'exutoire de la Chaudière avec celles de deux sous-bassins versants agricoles

Ce sont les probabilités de non dépassement de l'ensemble des simulations futures qui sont comparées avec la simulation passée issue des données historiques.

La comparaison est réalisée entre les lames d'eau du bassin versant de La Chaudière, et les sous-bassins versants agricoles de Beaurivage et Saint-Victor à l'échelle annuelle et saisonnière. Nous comparons les lames d'eau produites à partir de la simulation des données historiques et les écarts relatifs issues des CC.

Sur l'année, le bassin versant de Saint-Victor produit une lame d'eau inférieure de l'ordre de 80 à 100 mm à celui de la Chaudière. Par ailleurs, le bassin versant de Beaurivage, produit un écoulement supérieur de plus de 60 mm à celui de la Chaudière. Cela peut s'expliquer par des variabilités climatiques locales liées à la ou les station(s) la/les plus proche(s) de ces bassins versants.

Le CC semble avoir un impact plus important sur le bassin versant de Saint-Victor et celui de la Chaudière que celui de Beaurivage, les premiers ayant des lames d'eau diminuant de -6,9% à -13%, alors que Beaurivage produit un écoulement diminué de -1,5 à -5,8%.

Au cours de l'hiver, les lames d'eau produites ne sont pas très différentes selon le bassin versant. La Chaudière présente un écoulement pouvant augmenter de 7,7% à 20,9% sous l'influence du CC, celui de St Victor, de 7,9 à 11,6% et celui de Beaurivage de 9,8 à 24,8%.

Saint Victor semble donc moins influencé que les deux autres bassins versants analysés par les CC au cours de l'hiver.

Au printemps, le bassin versant de Saint-Victor produit un écoulement très inférieur (de 70-80 mm) à celui de la Chaudière, Beaurivage produit un écoulement plus important. L'impact du CC est plus limité à l'échelle des sous-bassins versants agricoles. Pour les quantiles compris entre 25 et 75%, le CC produirait une diminution de 2 à 8,1% de la lame d'eau sur la Chaudière alors que les sous-bassins versants agricoles, produiraient une diminution de -0,9 à +5,4%. Cela peut s'expliquer par un ruissellement favorisé à l'échelle des sous-bassins versants agricoles, ce qui entraîne une augmentation locale de la lame d'eau et donc une impression de moins grande influence du CC sur l'ensemble de cette période.

En été, les lames d'eau produites par les trois bassins versants, sont relativement similaires (à ± 15 mm) cependant l'impact du CC est plus important à l'échelle des bassins versants de La Chaudière et de Saint Victor. Alors que la Chaudière produit une lame d'eau modifiée de -14,9 à -21,5%, sous l'impact du CC, St Victor produit une diminution de -10,8 à -23,4% de la lame d'eau, et celle de Beaurivage, varie de 4,6% à -11,4% (en moyenne -5,7%). Tel que constaté à l'échelle annuelle, le bassin versant de Beaurivage semble moins influencé par l'évolution du climat futur.

En automne, le CC produirait une diminution de la lame d'eau plus importante à l'échelle de St Victor et de la Chaudière de l'ordre de -17,2 à -19% de variation, qu'à l'échelle de Beaurivage (-4 à -10,7% de diminution de la lame d'eau).

Selon cette méthode, le bassin versant de Beaurivage est moins influencé par l'évolution du climat que les bassins versant de la Chaudière et de Saint-Victor, ce qui peut s'expliquer par la répartition et l'influence du faible nombre des stations météorologiques.

ANNEXE K. ÉLABORATION DES SCENARIOS D'OCCUPATION DU SOL

Cette section est extraite du rapport de Ricard *et al.* (2006).

Deux scénarios sont considérés :

Scénario A- Un scénario dit « productiviste » : l'aménagement du territoire est guidé par des préceptes de profitabilité économique; la croissance de la production porcine constitue le facteur prioritaire de l'évolution de l'occupation du sol.

Scénario B- Un scénario dit « rustique » : l'aménagement du territoire tente de recréer l'état du bassin antérieur à l'établissement de la production agricole intensive; ces conditions sont supposées plus intègres d'un point de vue écologique; la reforestation, la réduction et la dispersion de l'activité agricole constituent les facteurs prioritaires.

Il est clair que nombre d'hypothèses posées dans le cadre de l'élaboration des scénarios peuvent faire l'objet de remises en question. Toutefois, l'objectif visé par ce travail n'est pas de prédire l'occupation du sol sur le bassin de la Chaudière en 2025, mais plutôt d'incarner différentes voies envisageables de l'aménagement du territoire en se basant sur l'observation de l'évolution passée des différentes classes d'occupation du sol. Dans ce contexte, il faut constamment se référer au contexte macroscopique des modifications apportées ainsi qu'au caractère tendanciel de l'analyse des simulations climatiques à effectuer. Les résultats obtenus n'auront donc pas de valeurs quantitatives proprement dit, mais présenteront plutôt un portrait comparatif par rapport à un état de référence. Dans le cadre de cette étude, l'état de référence correspond au scénario offert par défaut dans GIBSI, nommé « scénario permanent ». Ce dernier fait référence à une carte d'occupation du sol déterminée à partir d'images satellites de 1995 et validée à l'aide de données de recensement datant de 1994.

K.1 QUANTIFICATION DES SCÉNARIOS

La quantification des scénarios se fonde sur l'évolution historique de l'aménagement du bassin au cours des 30 dernières années ainsi que les occupations définies pour le scénario permanent. En premier lieu, et ce pour chaque scénario, des facteurs prioritaires sont identifiés à partir d'hypothèses réductrices explicitées ci-dessous. Un facteur prioritaire constitue un jeu de données historiquement quantifié ayant une incidence significative sur l'évolution de différentes classes d'occupation du sol. Une modification de celui-ci caractérise donc les spécificités propres à chaque scénario. Dans le cadre de ce travail, la dimension du cheptel porcin (scénario A) et certaines classes d'occupation du sol (scénario B) agissent à titre de facteurs prioritaires. Ces derniers sont déterminés par extrapolation sur l'horizon 2025 (Figure K.1), cette année correspondant à la mi-période des simulations climatiques. Une fois ces facteurs prioritaires quantifiés, des modalités d'ajustement déterminent les valeurs d'occupations du sol qui leur sont subordonnées.

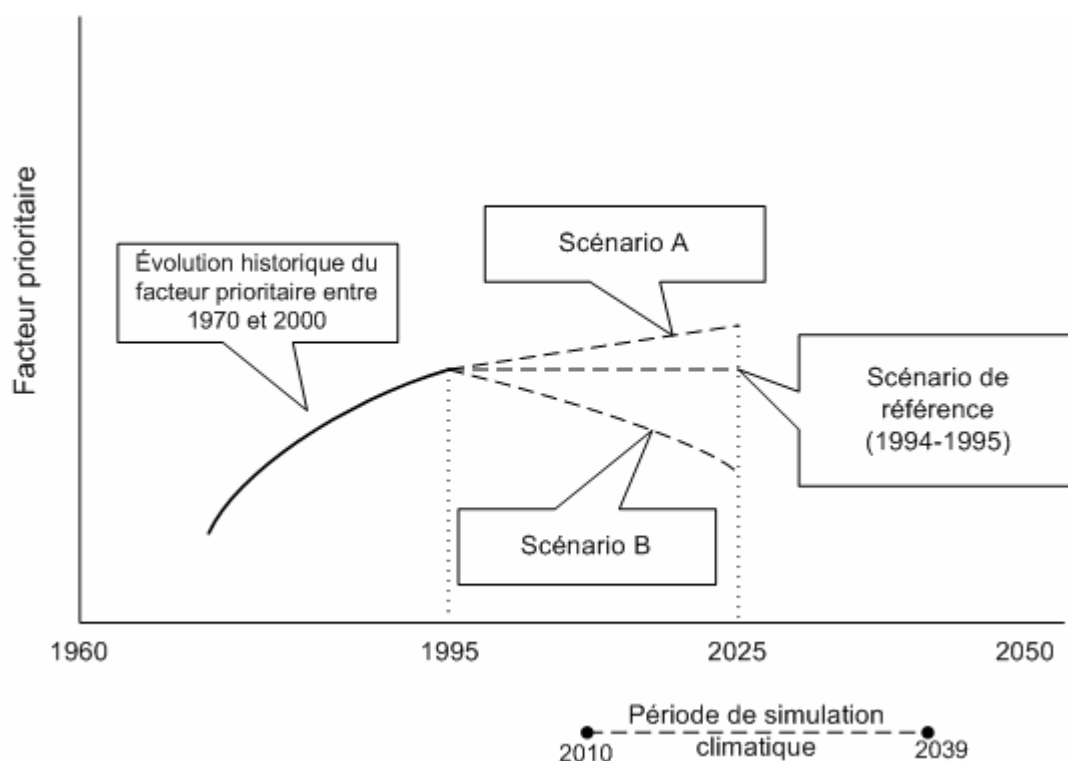


Figure K.1 : Méthode de quantification des facteurs prioritaires.

K.1.1. Présentation des données utilisées

L'étude par télédétection de l'occupation du sol sur le bassin de la rivière Chaudière a permis d'identifier puis de quantifier les différentes classes d'occupation du sol paramétrables dans GIBSI, et ce pour différentes années entre 1976 et 2003 (voir section 5.2).

Le Tableau K.1 présente l'évolution du nombre de porcs en inventaire sur le bassin de la entre 1971 et 2004. Ces données proviennent de trois sources distinctes¹³ et doivent ainsi être traitées pour fin d'harmonisation :

- Les données brutes des sources (A) et (B) sont exprimées en nombre de porcs, toutes catégories confondues. Un facteur de conversion doit donc être appliqué afin de transposer ces données en unité animales; on considère par hypothèse qu'un porc vaut 10,67 unités animales.
- Les sources (A) et (B) correspondent à la région administrative Chaudière-Appalaches et non au bassin de la rivière Chaudière; un facteur de pondération leur est appliqué pour les harmoniser avec la source (C); ce facteur est déterminé par le rapport entre les valeurs de (A) et (C) communes pour l'année 1998.
- La source (C) ne compile pas les entreprises agricoles localisées à l'extérieur de la région administrative; toutefois, on pose par hypothèse que ces données sont représentatives des tendances évolutives du cheptel porcin sur le bassin et qu'un traitement supplémentaire n'est pas nécessaire.

¹³ Les données ont été compilées par le GREPA, le BAPE et le GIRMA; ces sources sont respectivement identifiées (A), (B) et (C).

Tableau K.1 : Porcs en inventaires sur le bassin de la rivière Chaudière entre 1971 et 2004.

Cheptel porcin (unités animales)				
Années	SOURCE A (GREPA)	SOURCE B (BAPE)	SOURCE C (GIRMA)	Valeurs pondérées
1971	40 113			37 861
1976	47 426			44 763
1981	94 047			88 766
1986	87 196			82 300
1991	89 224			84 213
1996	95 078	Application du coefficient de pondération de (0,9438)		89 739
1997	100 034			94 416
1998	101 346		95 655	95 655
2000			98 662	98 662
2001		117 180		110 599
2002			112 907	112 907
2004			116 400	116 400

Sources : **(A)** Statistique Canada, sortie spéciale, Recensement de l'agriculture, 1971, 1976, 1981, 1986, 1991 et 1996. Compilation GREPA, Université Laval, Québec, 1999; **(B)** BAPE, Consultation publique sur le développement durable de la production porcine au Québec, p.62; **(C)** Compilation par GIRMA - Gestion Intégrée des ressources en milieu agricole - Ministère de l'agriculture des pêcheries et de l'alimentation Direction de la production et des affaires régionales Direction générale de la Chaudière-Appalaches.

La Figure K.2 présente les valeurs compilées au tableau 2 correspondant à l'évolution du cheptel porcin sur le bassin entre 1971 et 2004 (ligne pointillée). Ce profil est comparé à celui de l'évolution du cheptel porcin pour la province du Québec. Les deux profils présentent des tendances fortement similaires. Ceci permet, en se basant sur l'hypothèse que la production porcine sur le bassin soit représentative de celle de l'ensemble du Québec, de valider le jeu de données présenté au Tableau K.1.

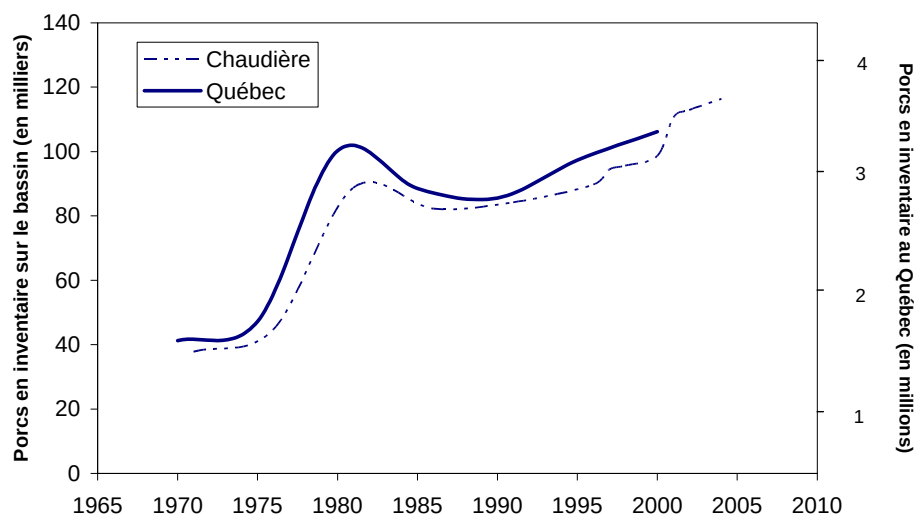


Figure K.2 : Évolution du cheptel porcin sur le bassin de la rivière Chaudière et au Québec entre 1970 et 2005; le profil de l'évolution au Québec (trait plein) se veut une reconstitution des données compilées par le BAPE (2003), p.10; la concordance entre les tendances des deux courbes valide le jeu de données compilé dans le cadre de ce travail.

K.1.2. Quantification du scénario A

Le premier scénario (dit « productiviste ») pose initialement l'hypothèse que la production porcine est le facteur prioritaire de l'évolution agricole déterminant ainsi l'aménagement du territoire sur l'ensemble du bassin. Dans un premier temps, la dimension du cheptel porcin sur le bassin a été linéairement extrapolée entre 1981 et 2025 tel qu'illustré à la Figure K.3. Cette période correspond à la période visée par les simulations, tout en excluant par hypothèse la période de forte croissance de la production porcine observée à la fin des années 1970¹⁴. Ainsi, dans le cadre d'un scénario où la croissance de la production porcine est mise de l'avant, la valeur envisagée du cheptel porcin sur le bassin de la Chaudière pour l'année 2025 serait de 136 370 unités animales (UA).

¹⁴ Il semble peu probable qu'une telle expansion se reproduise dans les vingt prochaines années.

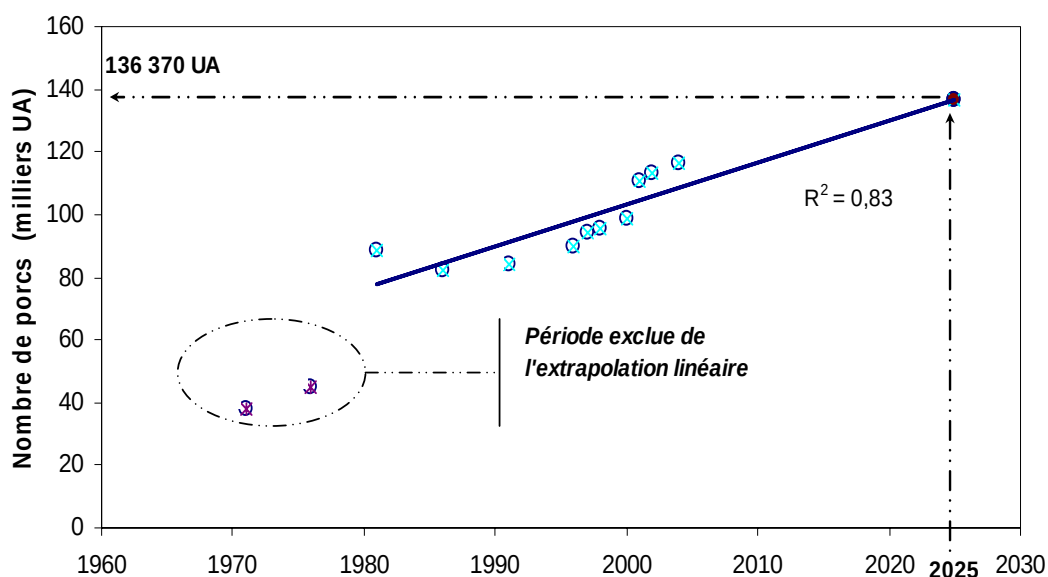


Figure K.3 : Extrapolation linéaire de la valeur du nombre de porcs en inventaire sur le bassin de la rivière Chaudière entre 1980 et 2025; les valeurs correspondant aux années 1970 sont exclues de l'extrapolation par hypothèse; la valeur projetée pour 2025 est de 136 370 unités animales.

Dans un second temps, il faut déterminer un jeu d'occupation du sol correspondant à la dimension du cheptel porcin projetée pour 2025. Afin de simplifier la démarche, seules quatre occupations du sol ont été retenues soit : maïs, pâturage-fourrage, céréales et forêts. Le choix de ces classes se fonde sur : (1) leur valeur de corrélation avec la production porcine¹⁵, (2) leur pertinence dans le cadre d'un plan de gestion des pratiques agricoles, (3) la sensibilité du système GIBSI à une modification de celles-ci. Une série d'analyses par régression linéaire est ensuite effectuée pour la période 1976-2004, la production porcine étant la variable explicative et les occupations du sol, les variables expliquées. Tel qu'illustré à la Figure K.4 par l'exemple du maïs, les valeurs d'occupation du sol sont déterminées en insérant la valeur projetée du cheptel porcin pour 2025 dans chaque équation linéaire obtenue par régression.

¹⁵ À l'exception des céréales

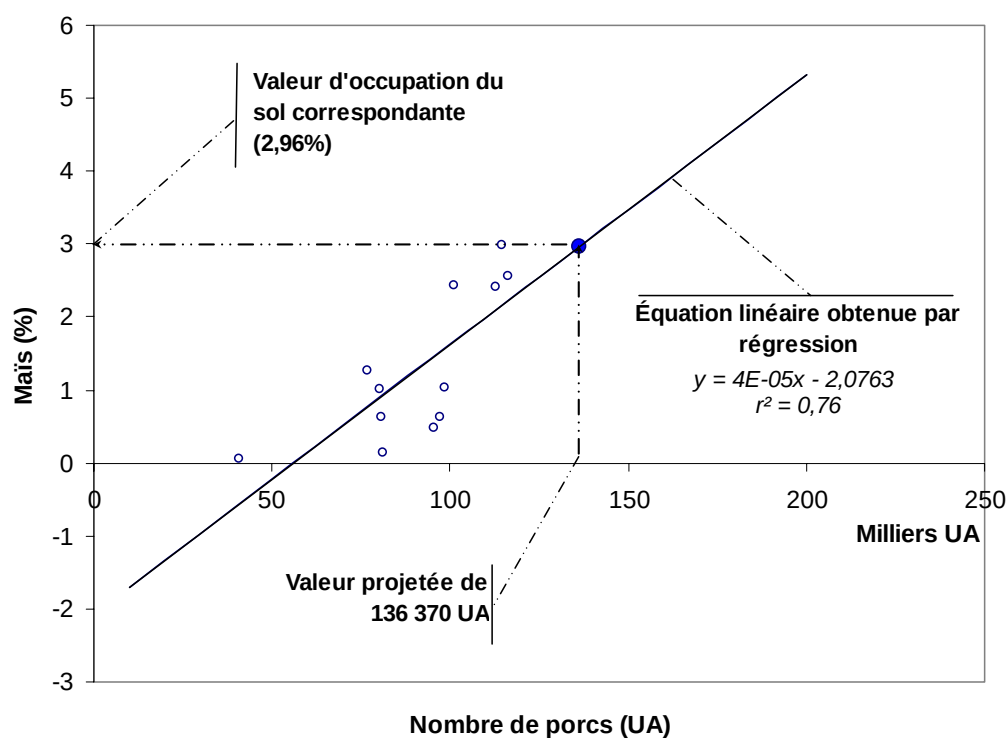


Figure K.4 : Quantification des classes d'occupation du sol par régression linéaire, exemple du maïs; la valeur projetée (à la Figure K.3) de 136 370 unités animales correspond à une occupation du sol par la classe « maïs » de 2,96%.

Le Tableau K.2 présente une synthèse des éléments statistiques ayant permis de quantifier les occupations du sol pour le scénario A.

Tableau K.2 : Synthèse des paramètres statistiques et résultats de la quantification des occupations du sol pour le scénario A.

Classe d'occupation du sol			
Maïs	Forêt	Céréales	Pâturage
Coefficient de corrélation avec cheptel porcin (r^2)			
0,76	-0,74	-0,09	0,79
Paramètres - régression linéaire (a,b)			
3,75E-05	-1,16E-04	2,46E-07	6,88E-05
-2,11	78,96	7,73	4,40
Valeur quantifiée de l'occupation du sol pour 2025 (%)			
3,0	63,2	7,8	13,8

K.1.3. Quantification du scénario B

Le second scénario dit « rustique » tente, à partir des conditions établies dans le scénario permanent, de reconstituer partiellement l'état du bassin tel qu'il était en 1976. La démarche de quantification de ce scénario se veut beaucoup plus simple que la précédente et se fonde sur le travail de télédétection pour l'année en question (voir Tableau K.1). Ainsi, la proportion du bassin couverte par la forêt est augmentée à 75,65%, alors que les pâturages sont réduits à 6,78%. Afin de simuler une dispersion des activités agricoles sur le territoire, une partie des classes maïs et pâturage sont relocalisées vers les sous-bassins en amont des sites de production de 1995. Le Tableau K.3 présente finalement une synthèse des occupations du sol à l'échelle du bassin pour les scénarios A et B.

Tableau K.3 : Quantification à l'échelle du bassin des scénarios A et B

Classe	Scénario permanent (1999)	Scénario A (productiviste)	Scénario B (rustique)
Urbain	3,57	3,57	3,57
Pâturage et foin	11,25	13,78	6,50
Céréales	3,76	7,76	3,77
Maïs	0,3	3,00	0,30 *
Eau	1,64	1,64	1,64
Milieu humide	2,26	2,26	2,25
Sol nu	2,09	6,00	2,08
Friche	12,83	3,60	4,75
Forêts	62,3	58,30	75,13

* production de maïs dispersée plutôt que réduite.

K.2 IMPLANTATION DES SCÉNARIOS DANS GIBSI

K.2.1. Contraintes liées à l'implantation

La quantification élaborée à la section précédente permet de tracer les grandes lignes des modifications d'occupation du sol à l'échelle du bassin. Cependant, la mise en œuvre des scénarios élaborés implique des considérations liées à la mécanique du système GIBSI.

Le procédé traitant l'information en lien avec l'occupation du sol inclus dans GIBSI impose une importante contrainte dans la mise en œuvre des scénarios. En effet, pour une unité spatiale donnée, toute modification de l'occupation du sol s'effectue nécessairement par un transfert complet de la classe choisie vers une autre. Il est donc impossible, à une échelle spatiale donnée, d'effectuer une modification partielle d'une classe d'occupation du sol. Pour y arriver, il faut procéder à un nombre calculé de transferts aux échelles inférieures. L'accumulation de ces derniers constitue la modification partielle à l'échelle supérieure. Dans le cas du présent travail, les modifications proposées pour les scénarios A et B s'expriment a priori à l'échelle du bassin versant. Tel qu'illustré à la Figure K.5, la mise en œuvre de ces modifications s'opère par une série de transferts de classe à l'échelle de la plus petite unité de spatiale de simulation (USS). Ce travail de patchwork implique toutefois une certaine subjectivité de par le nombre de manipulations impliquées. Il est en effet impossible de justifier chacune d'elles sur la base de critères objectifs rigoureusement respectés. Ce biais se justifie cependant par le fait que l'analyse se concentre sur les tendances macroscopiques des modifications appliquées sur le bassin.

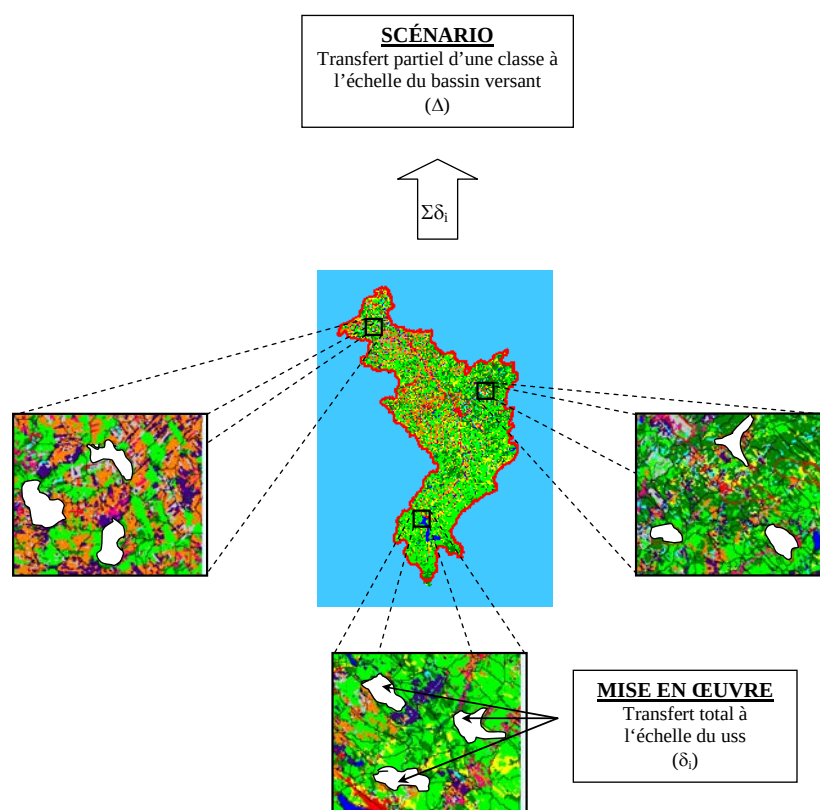


Figure K.5 : Mise en œuvre des modifications des occupations du sol dans GIBSI; un transfert partiel d'une classe paramétrable dans GIBSI à l'échelle du bassin (Δ) nécessite la sommation d'une série de transferts totaux à l'échelle des unités spatiales de simulation ($\Sigma\delta_i$).

K.2.2. Procédure d'implantation du Scénario A

Les transferts d'occupation du sol nécessaires à l'élaboration des scénarios doivent ainsi converger vers les valeurs quantifiées au tableau 5 tout en respectant les procédures suivantes :

- Tout d'abord simuler la densification de la production agricole en transformant la friche en classe agricole (pâturages, céréales et maïs); cette manœuvre se base sur l'hypothèse que les terres agricoles abandonnées depuis les années 1970, et aujourd'hui en friche, sont les plus susceptibles d'être réaffectées à la production agricole dans le cadre d'une relance; ces transferts sont préférentiellement effectués dans les zones de forte densité agricole, c'est-à-dire les sous-bassins localisés en aval (Beaurivage, Basse-Chaudière, Saint-Victor, Tring).
- Compléter la densification de la production agricole en utilisant la forêt; là où la friche est insuffisante pour atteindre les modifications fixées; il s'agit d'une mesure d'appoint.

- 0 Simuler la réduction du couvert forestier en transformant la forêt qui n'a pas été transformée en classe agricole en sol nu; opérer cette manipulation dans les zones forestières, préférentiellement là où la concentration en sol nu est initialement élevée.
- 0 Compléter la déforestation en transformant la friche en sol nu dans les zones de forte densité agricole; il s'agit d'une mesure d'appoint.

K.2.3. Procédure d'implantation du Scénario B

De même pour le second scénario :

- 0 Reconstituer le couvert forestier sur l'ensemble du bassin en transformant la friche en forêt; hypothèse que la période de simulation (d'ici 2025) est suffisante pour permettre ce transfert de classe.
- 0 Réduire les zones agricoles dans les sous-bassins en aval (en surproduction) en les transformant en friche; cette manœuvre se fait préférentiellement le long des cours d'eau.
- 0 Disperser les activités agricoles en reconstituant des zones agricoles dans les sous-bassins du centre (Haute-Chaudière, Du Loup, St-Victor); ces zones sont déterminées à partir de la carte des zones agricoles de 1976 déterminée par télédétection (Figure K.6).

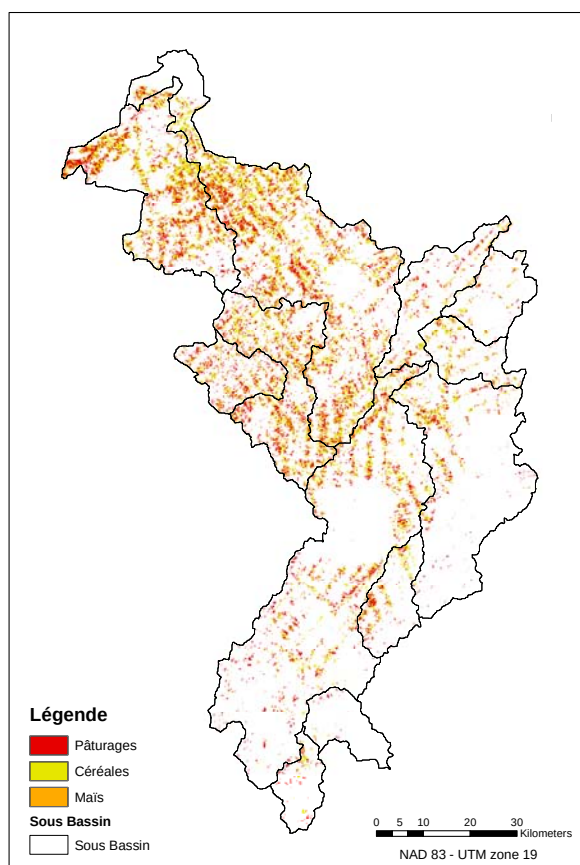


Figure K.6 : Distribution des terres agricoles sur le bassin en 1976, provenant d'images satellites classifiées.

Le Tableau K.4 présente la matrice de transition pour chaque scénario. Cet outil quantifie, à partir du scénario permanent, les transferts totaux (en pourcentage) des classes modifiées. Il est par exemple possible d'observer à la ligne « 8. Friche » du scénario A quelle proportion de cette occupation du sol fut modifiée en pâturage (16,83%), en céréales (23,14%), en maïs (18,96%), *etc.* Les valeurs inférieures à 1% correspondent soit à des mesures d'appoint ou bien à des erreurs de manipulations. Cette démarche permet de valider les scénarios suites aux manœuvres de mise en œuvre des scénarios dans le système GIBSI.

Tableau K.4 : Matrices de transition quantifiant les transferts de classes du scénario permanent vers les scénarios A et B

		Scénario A (%)										
		1.Urbain	2.Pâturages	3.Céréales	4.Mais	5.Eau	6.Milieu humide	7.Sol nu	8.Friche	9.Feuillus	10.Conifère	Total
Permanent (%)	1.Urbain	100,00										3,55
	2.Pâturages		98,53	0,89				0,42	0,16			11,15
	3.Céréales			98,16	0,89			0,95				3,73
	4.Mais			0,54	93,92			5,54				0,31
	5.Eau					100,00						1,63
	6.Milieu humide						100,00					2,25
	7.Sol nu		0,18		0,61			98,15			1,06	2,08
	8.Friche		16,83	23,14	18,96			5,05	35,41		0,61	12,82
	9.Feuillus			1,03	0,03			0,89		98,05		40,10
	10.Conifère		1,02	2,11	0,47			5,13			91,28	22,38
Total		3,55	13,37	7,62	2,88	1,63	2,25	4,30	4,56	39,32	20,53	100,00
		Scénario B (%)										
		1.Urbain	2.Pâturages	3.Céréales	4.Mais	5.Eau	6.Milieu humide	7.Sol nu	8.Friche	9.Feuillus	10.Conifère	Total
Permanent (%)	1.Urbain	100,00										3,55
	2.Pâturages		51,26		0,05				47,53		1,16	11,15
	3.Céréales			100,00								3,73
	4.Mais				58,08				41,92			0,31
	5.Eau					100,00						1,63
	6.Milieu humide						100,00					2,25
	7.Sol nu							100,00				2,08
	8.Friche		6,67		1,88				2,86	2,57	86,02	12,82
	9.Feuillus									100,00		40,10
	10.Conifère										100,00	22,38
Total		3,55	6,57	3,73	0,43	1,63	2,25	2,08	5,79	40,43	33,53	100,00

ANNEXE L. EFFET DES SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL SUR L'HYDROLOGIE DANS UN CONTEXTE DE CC

L.1 EFFET SUR LA LAME D'EAU MENSUELLE

La Figure L.1 présente l'effet des scénarios A et B sur la lame d'eau mensuelle, dans le cas où on utilise la méthode des Deltas pour prédire l'effet des CC.

On constate que l'effet relatif des scénarios A et B est le même que l'on utilise les données de HadCM3-A2a ou celles de ECHAM4-A2, excepté pour le mois d'avril où le scénario A engendre une augmentation significative avec HadCM3-A2a et pas avec ECHAM4, tandis que le scénario B engendre une diminution qui est significative avec ECHAM4 mais pas avec HadCM3-A2a.

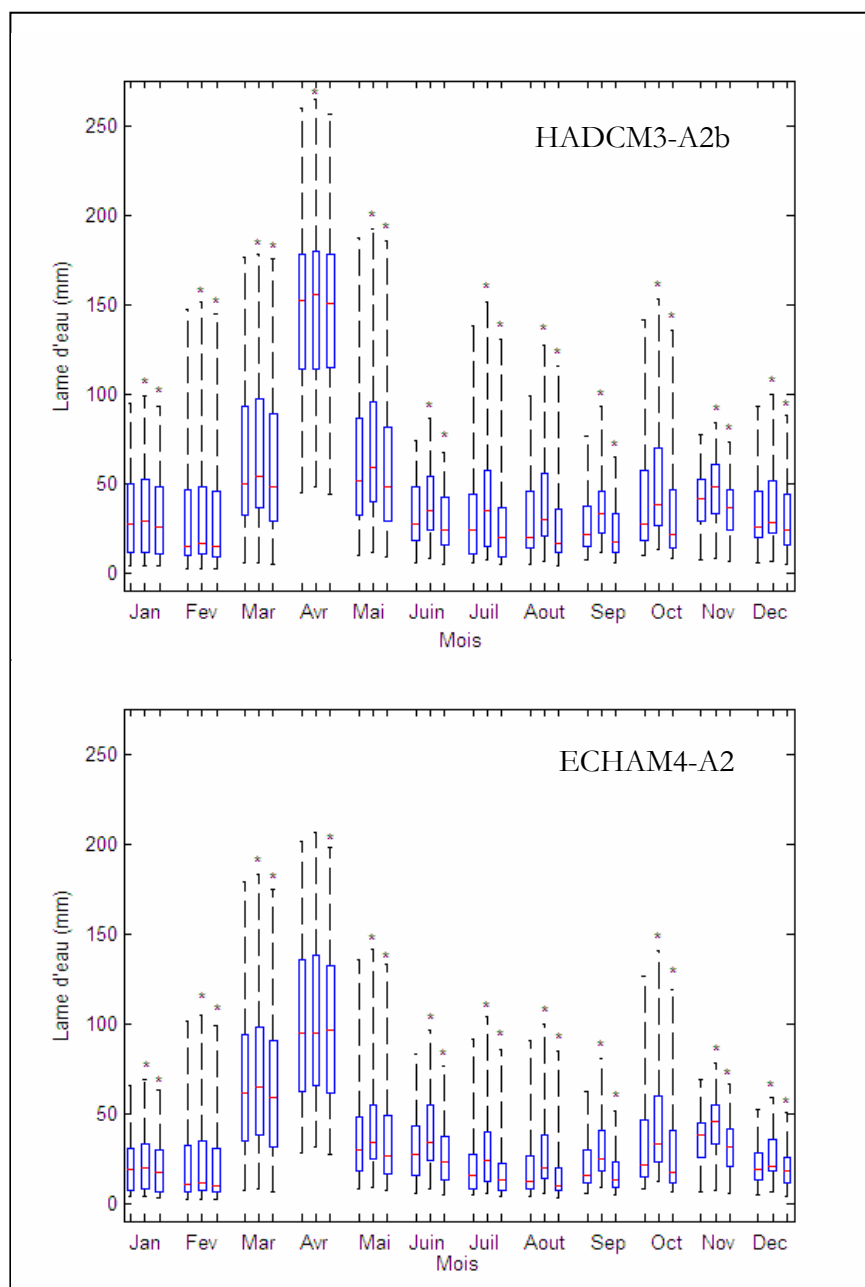


Figure L.1 : Lame d'eau mensuelle simulée à l'aide de la méthode des Deltas et des deux MCG-SEM, en considérant l'occupation du sol de référence (boîte de gauche) et les scénarios A (boîte du centre) et B (boîte de droite). Les étoiles indiquent un effet statistiquement significatif ($p < 0.05$) par rapport au scénario de référence

Les résultats moyens obtenus lorsque l'on considère les deux MCG-SEM utilisés comme équiprobables sont présentés à la section 6.2.3.2.

Il apparaît que le scénario A produit une augmentation comprise entre 6,2 et 20% entre les mois de novembre et de mai, soit un écart brut compris entre +0,33 et +5,27 mm. C'est au cours de l'été que, relativement à la valeur médiane du scénario 1995, la lame d'eau augmente le plus : au mois d'août, on a une augmentation de 46,7% à 66,5% correspondant à une augmentation brute de la lame d'eau de 10,9 et de 7,9 mm.

Le scénario B a un impact moins important que le Scénario A, et il aurait tendance à diminuer la lame d'eau hivernale et printanière par rapport à l'occupation de 1995 à un maximum de 14,3%. Au cours de la période estivale, la lame d'eau diminuerait de 16,5%, et de 19,2% au mois d'octobre. Ainsi, le scénario B présente une diminution de la lame d'eau de plus en plus importante du mois de février au mois de novembre. Cette évolution peut s'expliquer par une augmentation de l'utilisation de l'eau à l'échelle du bassin versant et donc par une diminution de l'alimentation de la rivière au cours de la période printanière, estivale et d'automne.

L.2 EFFET SUR LA CHARGE EN SÉDIMENTS

La Figure L.2 présente l'effet des scénarios A et B sur la charge mensuelle en sédiments, dans le cas où on utilise la méthode des Deltas pour prédire l'effet des CC.

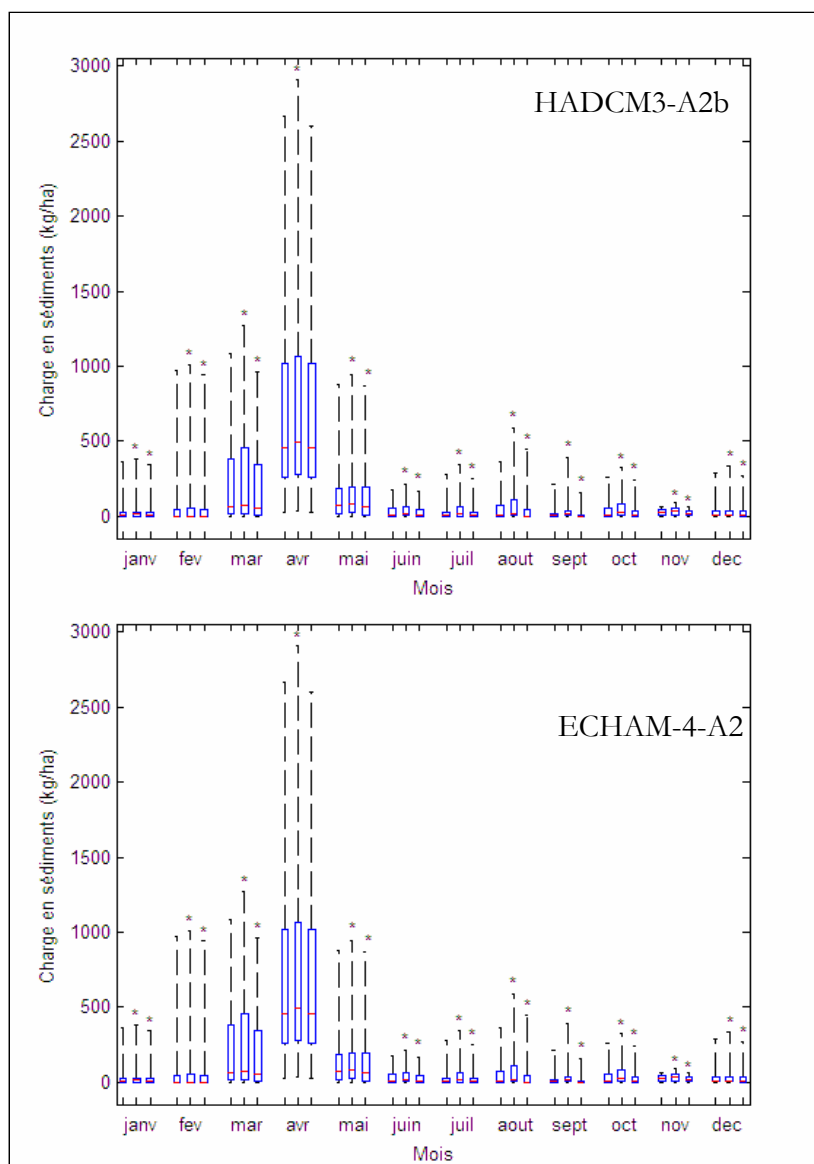


Figure L.2 : Charge de sédiments mensuelle simulée à l'aide de la méthode des Deltas et des deux MCG-SEM, en considérant l'occupation du sol de référence (boîte de gauche) et les scénarios A (boîte du centre) et B (boîte de droite). Les étoiles indiquent un effet statistiquement significatif ($p < 0.05$) par rapport au scénario de référence

Les résultats moyens obtenus lorsque l'on considère les deux MCG-SEM utilisés comme équiprobables sont présentés à la section 6.2.3.5.

L.3 COMPARAISON AVEC LES SOUS-BASSINS VERSANTS AGRICOLES DE SAINT VICTOR ET DE BEURIVAGE.

Si l'on compare ces résultats avec ceux issues des exutoires des sous-bassins versants agricoles de Saint Victor, et de Beaurivage, nous observons les mêmes évolutions que celles observées à l'échelle de l'ensemble de la Chaudière mais de manière majorée. Au cours des mois de juin à novembre, les sous-bassins versants de Saint Victor et de Beaurivage subissent des variations de l'écoulement suite aux changements d'occupations des sols beaucoup plus marqués.

Selon le scénario ODS A, l'augmentation de la lame d'eau de La Chaudière est de 10 à 13 mm, elle s'élève de 17 à plus de 20 mm aux exutoires de ces deux sous-bassins versants agricoles.

Selon le scénario d'occupation des sols B, la lame d'eau diminue au maximum de -5 mm à l'exutoire de la Chaudière. Aux exutoires des deux sous-bassins versants agricoles, la lame d'eau diminue de -10 à -15 mm pour les chroniques météorologiques futures. Ces constats sont valables pour l'ensemble des simulations selon la méthode des deltas.

Ces bassins versants présentant une grande surface agricole, donc fortement modifiés lors de la mise en place des deux scénarios d'occupation des sols, leur régime hydrique est donc très influencé lors des simulations hydrologiques.

ANNEXE M. MISE EN PLACE DES PARCELLES EXPÉRIMENTALES

Cette section est extraite du rapport de Duchemin et Dufour (Duchemin et Dufour, 2005). On présente ici les principales étapes de la mise en place du dispositif expérimental utilisé pour mesurer les volumes d'eau ruisselée et les concentrations de matières en suspension résultant de l'érosion hydrique de sols agricoles soumis à des simulations de pluies. Les travaux d'aménagement ont été effectués durant les mois de mai 2005 à octobre 2005 à la Ferme expérimentale de l'IRDA située à Saint-Lambert-de-Lauzon. Ces travaux consistaient à aménager des parcelles expérimentales ainsi qu'un système de collecte des eaux de ruissellement.

Les figures M.2 à M13 illustrent les principales étapes d'aménagement du site expérimental alors que la Figure M.14 présente le plan général du site et la Figure M.15 présente ses composantes de drainage.

M.1 PRÉSENTATION DU SITE EXPÉRIMENTAL

La présence d'un champ disponible associée à la proximité d'une source de courant électrique et d'eau courante a contribué au choix de l'emplacement du site expérimental. Le site occupe une superficie d'environ 330 m² et se compose de six parcelles de 3 m de largeur par 6 m de longueur regroupées en trois blocs de deux parcelles. Chaque parcelle a été délimitée par une butte de terre engazonnée (billon) de 15 cm de hauteur afin de circonscrire les eaux de pluie et de ruissellement à l'intérieur des parcelles. La pente moyenne des parcelles est de 3%. Le sol varie d'un loam argileux à un loam limoneux. Le Tableau M.1 présente les caractéristiques physiques du site en date du 10 août 2005.

Tableau M.1 : Caractéristiques du site expérimental

Parcelle	Texture	% Sable :	% Limon :	% Argile :	Matière organique	Pente
		[0,05 à 2 mm]	[0,002 à 0,05 mm]	[0 à 0,002 mm]	%	%
1	Loam limoneux	27	47	26	4,3	3,2
2	Loam argileux	24	48	28	4,6	3,3
3	Loam	28	46	26	4,6	2,6
4	Loam argileux	23	48	29	4,7	2,7
5	Loam	25	48	27	3,9	3,3
6	Loam limoneux	26	50	24	3,7	3,2
	Moyenne :	25,5	47,8	26,7	4,3	3,1
	Écart-type :	1,9	1,3	1,8	0,4	0,3

M.2 DESCRIPTION DU SYSTÈME DE COLLECTE DES EAUX DE RUISSELLEMENT

L'eau des précipitations tombe sur les parcelles et ruisselle vers l'aval où elle est captée par des collecteurs (gouttières de métal) de 3 m de largeur. Chaque gouttière possède une pente de 4% à l'extrémité de laquelle se trouve un orifice de 5 cm par lequel s'écoule l'eau de ruissellement jusqu'à une série de six réservoirs de plastique de 800 L. Puisque ces contenants devaient être enfouis dans le sol, à l'aval des parcelles expérimentales, des panneaux de contreplaqués OSB de 6,35 mm d'épaisseur (0,25 po.) ont été fixés autour des réservoirs afin de les solidifier et contrer la pression du sol sur leurs parois.

La topographie du site sélectionné pour l'implantation des parcelles présente une élévation basse par rapport aux champs voisins. Puisque cette zone devient saturée d'eau lors de la fonte des neiges ainsi que lors de pluies intenses, un système de drains a été installé sous les réservoirs afin d'éviter les risques de soulèvement. Ainsi, une tranchée de 31 m de longueur par 1,5 m de largeur a été creusée en aval des parcelles, sur toute la longueur du site expérimental. À son point le plus haut, la tranchée a 1,15 m de profond alors que son point le plus bas est à 1,46 m de profondeur. La tranchée a donc une pente de 1%. Un drain agricole perforé de 10 cm de diamètre (4 po.) a été déposé au fond de la tranchée. Environ 15 cm de pierres à drain ont été disposées entre le fond de la tranchée et la base des réservoirs afin de faciliter l'infiltration de l'eau vers le drain.

L'eau drainée est dirigée vers une station de pompage formée d'un cylindre métallique de 1,22 m de diamètre et 3 m de hauteur. Un trou perforé à la base du cylindre permet le passage du drain. Cette station a été aménagée pour élever l'eau de drainage jusqu'à un ponceau situé à

proximité du site. Ce ponceau est connecté à un drain de ferme dont l'exutoire se jette dans un fossé de route. Une pompe submersible (1/3 HP; 9,36 m³/heure), installée 70 cm plus bas que l'arrivée du drain, permet de pomper l'eau jusqu'au ponceau. Cette pompe est mise en marche automatiquement lorsque le niveau d'eau excède une certaine limite. Une échelle fixée à la paroi du cylindre permet d'accéder au bas du puits. Pour alimenter la pompe de la station de pompage, une ligne électrique a dû être aménagée à proximité. Une prise de courant double a été fixée sur la paroi intérieure du puits, dans sa partie supérieure. À noter que la pompe qui alimentera en eau le simulateur de pluie pourra également être branchée à cette prise de courant. Il faudra toutefois faire attention de ne pas faire fonctionner les deux pompes simultanément, puisque la ligne électrique ne fournit pas assez de puissance.

Les six réservoirs ont été installés et mis à niveau dans la tranchée. La partie supérieure des réservoirs a été découpée afin d'en faciliter l'accès lors des prises d'échantillons d'eau et des vidanges par pompage. Une couche de « gravelle » d'environ 30 cm de largeur a été placée autour des réservoirs, sur toute leur hauteur. La gravelle est un matériel de remblayage constitué de sable et de roches de petite dimension (2 à 7 cm) qui présente une grande conductivité hydraulique. De cette façon, l'eau de surface peut facilement s'infiltrer vers le drain souterrain. Le sol d'origine a été utilisé pour remblayer le haut de la tranchée. Des tuyaux en ABS blanc perforés de 10 cm de diamètre (4 po.) ont été placés entre les deux réservoirs de chacun des blocs de parcelles. Ces regards ont été aménagés afin de faciliter le drainage du sol entre les réservoirs, recevoir l'eau résiduelle lors de la vidange des réservoirs et permettre le nettoyage du drain agricole (« flush »). Ces eaux se déversent toutes vers la station de pompage. Des couvercles de bois ont été fabriqués pour recouvrir les six réservoirs ainsi que le puits de la station de pompage. Ces couvercles ont reçu deux couches de « créosote » afin de prévenir leur détérioration par l'eau.

Un « circuit de contournement » constitué de deux valves a été aménagé entre les parcelles et les réservoirs afin de contrôler l'écoulement de l'eau de ruissellement lors des simulations de pluies. Ce système bi-valves permet de diriger l'eau en provenance des gouttières vers les réservoirs de 800 L ou vers les regards d'évacuation. Si l'eau de ruissellement est dirigée directement vers les regards, elle s'écoulera jusqu'au puits de pompage alors que si l'eau de ruissellement est dirigée vers les réservoirs, elle s'y accumulera jusqu'à ce que l'épisode de ruissellement soit terminé.

Suite aux simulations de pluies, une mesure de la hauteur d'eau dans les réservoirs permettra de connaître le volume d'eau ruisselée à l'aval de chaque parcelle. Puisque les réservoirs présentent des arrêtes et des coins de formes irrégulières, ils ont dû être étalonnés afin d'établir une relation entre la hauteur d'eau accumulée et le volume d'eau emmagasinée. Ainsi, des déversements consécutifs de 20 L d'eau ont été effectués dans un réservoir et la hauteur d'eau

résultante a été mesurée. Une courbe d'étalonnage mettant en relation la hauteur d'eau et le volume d'eau accumulée dans le réservoir est présentée à la Figure M.14. La courbe d'ajustement obtenue correspond une relation polynomiale d'ordre 3 avec une forte corrélation ($R^2=0,9998$). Les deuxième et troisième termes de la relation influencent peu la variation du volume d'eau emmagasinée. De façon générale, pour chaque augmentation de 1 mm d'eau dans le réservoir correspond une augmentation de 1 Litre d'eau ruisselée.

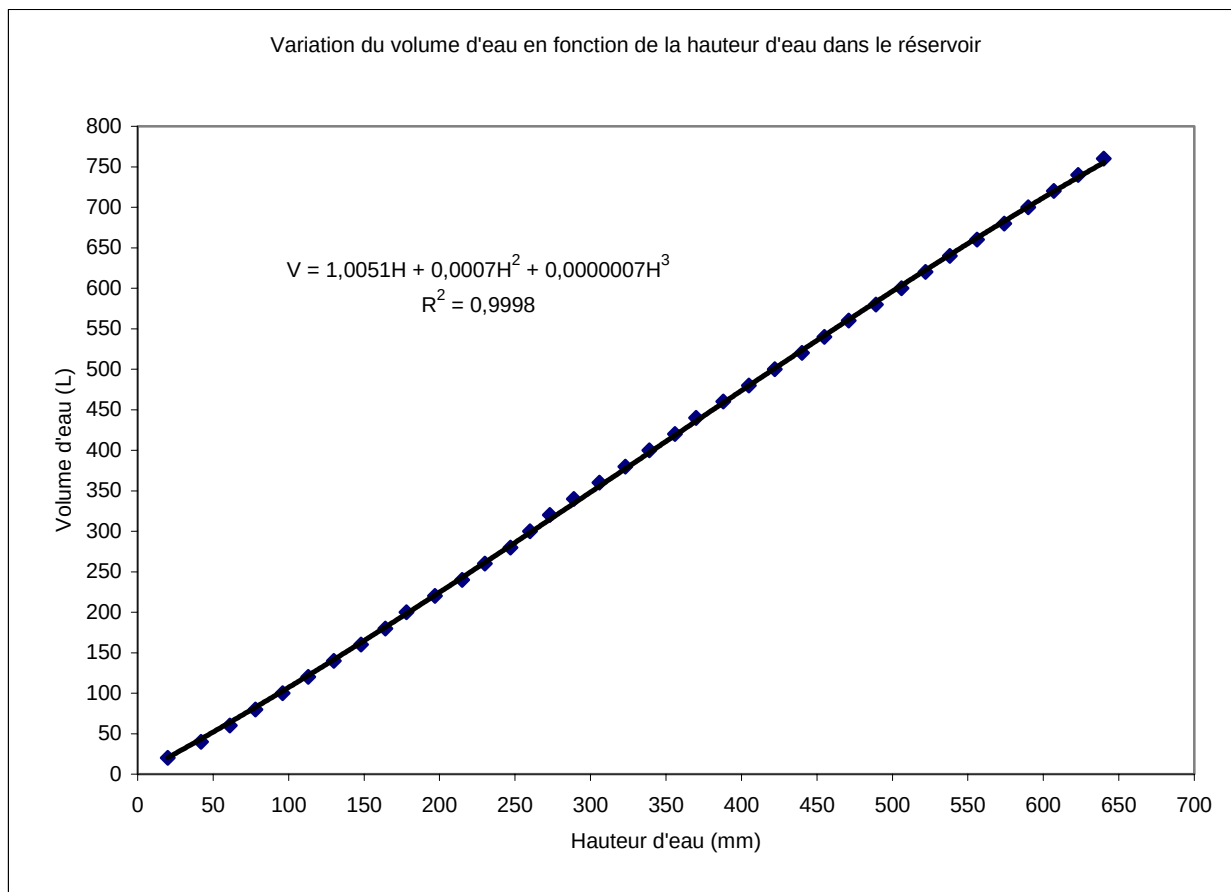


Figure M.1 : Relation entre la hauteur d'eau et le volume d'eau accumulée dans un réservoir.

Un échantillon d'eau sera prélevé dans chacun des réservoirs afin d'en connaître la concentration en matières en suspension (MES). Cette concentration (mg/L) et le volume d'eau accumulée (L) seront utilisés pour calculer la charge en MES (kg) résultant de l'événement pluvieux. Cette charge répartie sur l'ensemble d'une parcelle (18 m²) permettra d'obtenir le taux d'érosion nette (kg/m²) de l'événement pluvieux. La comparaison des taux

d'érosion nette entre différents événements pluvieux d'intensités différentes permettra d'estimer l'impact des CC sur l'érosion hydrique.

M.3 PRINCIPALES ÉTAPES D'AMÉNAGEMENT DU SITE EXPÉRIMENTAL



Figure M.2 : Délimitation des parcelles et nivellement des pentes.



Figure M.3 : Installation des gouttières de métal en aval des parcelles.



Figure M.4 : Confection des réservoirs utilisés pour la collecte des eaux de ruissellement



Figure M.5 : Excavation de la tranchée et aménagement des drains d'évacuation.



Figure M.6 : Installation des regards et des réservoirs



Figure M.7 : Aménagement de la station de pompage



Figure M.8 : Électrification de la station de pompage.



Figure M.9 : Accès au puits et installation de la pompe submersible.



Figure M.10 : Aménagement des réservoirs et raccordement aux parcelles



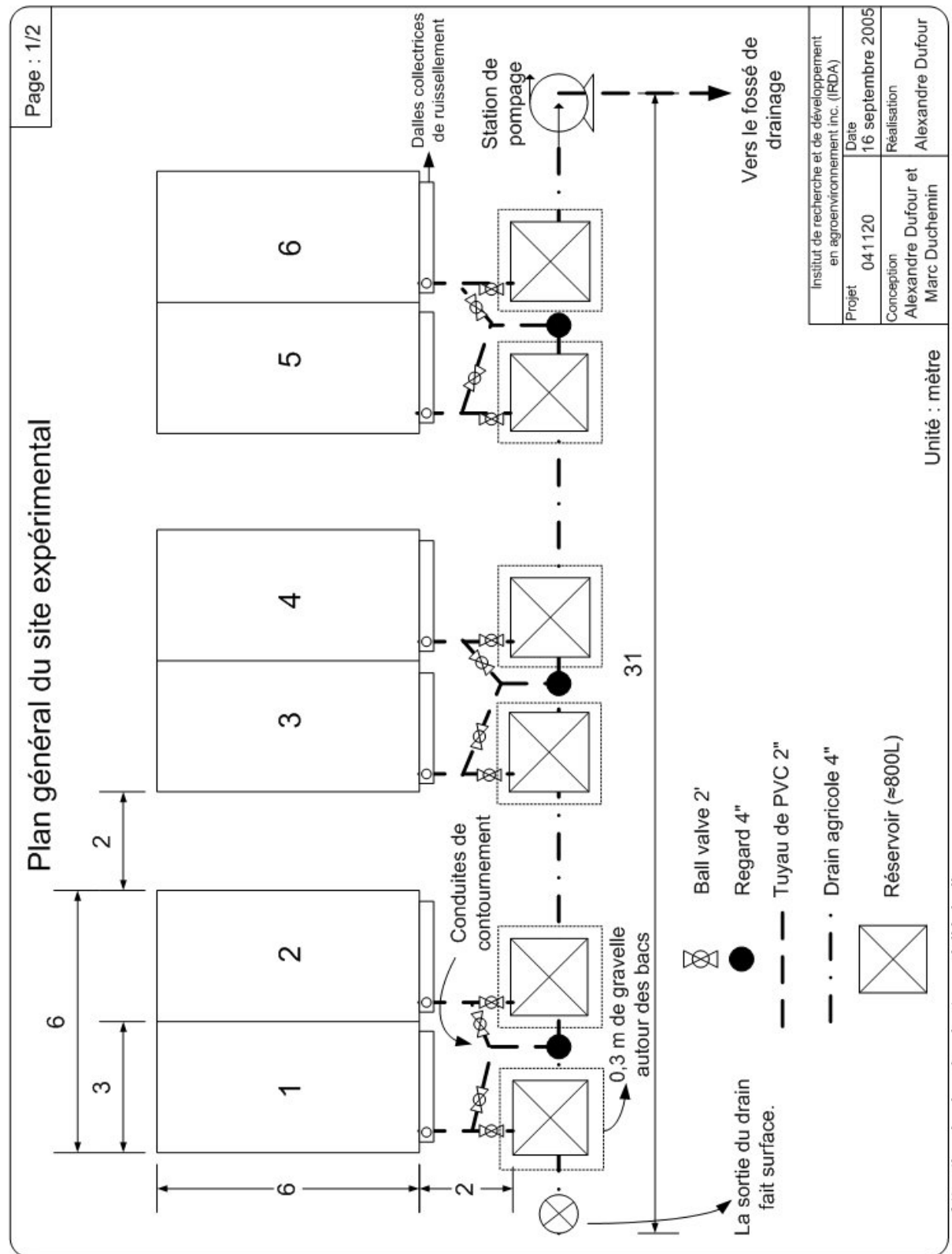
Figure M.11 : Installation du circuit de contournement bi-valves



Figure M.12 : Vue générale du site expérimental.



Figure M.13 : Vue générale du site expérimental



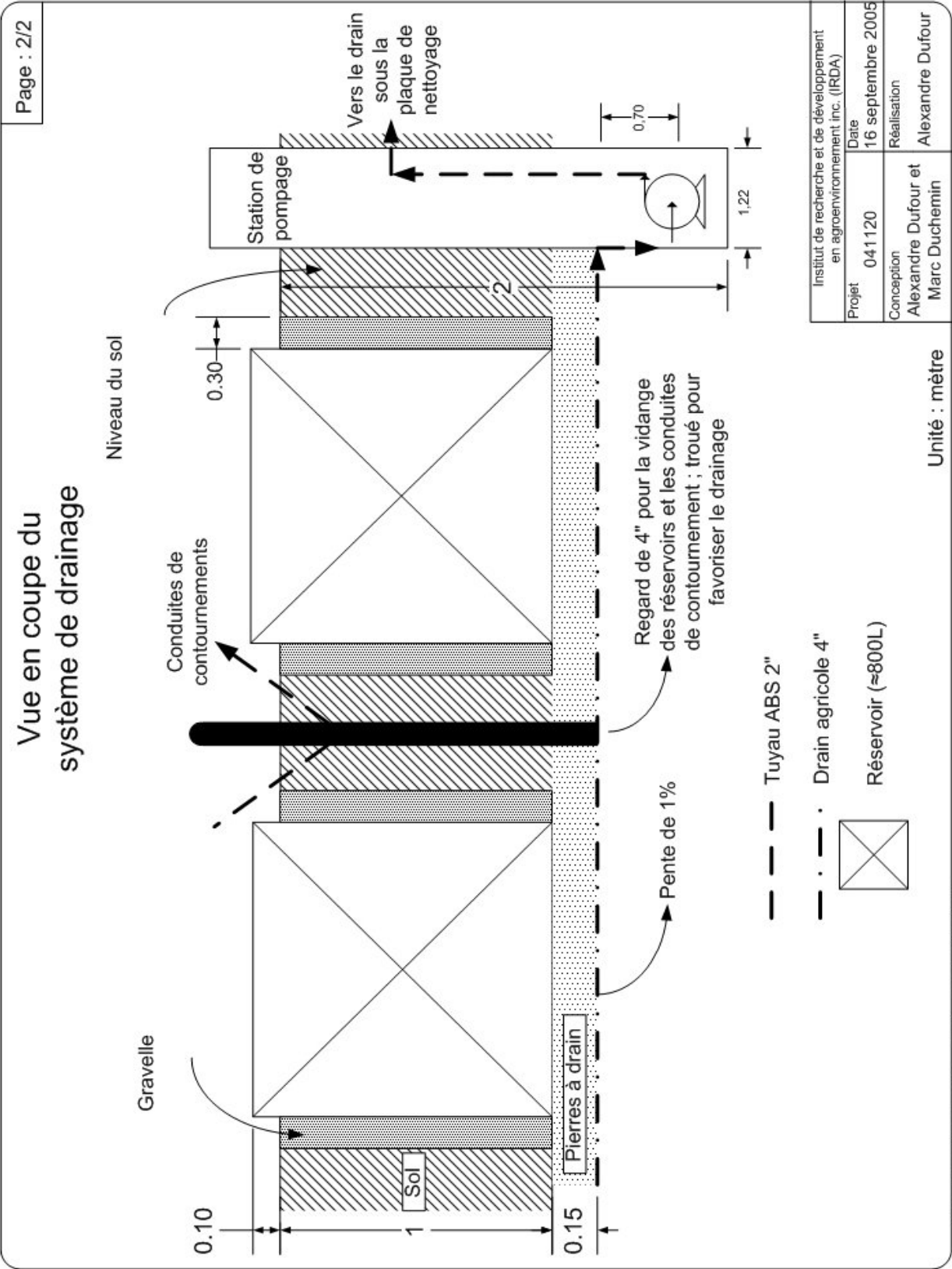


Figure M.15 : Composantes du système de drainage

ANNEXE N. STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES SIMULATIONS DE PLUIES POUR L'ORGE ET LE SOYA

Tableau N.1 : Intensités de pluie (mm/h)

Simulations	N	Moyenne	Écart-type	Coefficient de variation	Médiane	Quartile inférieure	Quartile supérieure
Sim30orge1	3	49,00	2,95	6,01%	48,40	46,40	52,20
Sim30orge2	3	55,87	4,03	7,21	56,40	51,60	59,60
Sim30soya1	3	49,00	2,95	6,01%	48,40	46,40	52,20
Sim30soya2	3	55,87	4,03	7,21%	56,40	51,60	59,60
Sim45orge1	3	32,47	1,36	4,18%	32,30	31,20	33,90
Sim45orge2	3	41,10	1,35	3,29%	41,20	39,70	42,40
Sim45soya1	3	32,47	1,36	4,18%	32,30	31,20	33,90
Sim45soya2	3	41,10	1,35	3,29%	41,20	39,70	42,40
Sim60orge1	3	26,70	0,60	2,25%	26,70	26,10	27,30
Sim60orge2	3	31,03	2,38	7,67%	30,60	28,90	33,60
Sim60soya1	3	26,70	0,60	2,25%	26,70	26,10	27,30
Sim60soya2	3	31,30	2,38	7,67%	30,60	28,90	33,60

Tableau N.2 : Début du ruissellement (minutes)

Simulations	N	Moyenne	Écart-type	Coefficient de variation	Médiane	Quartile inférieure	Quartile supérieure
Sim30orge1	3	1,84	0,14	7,82%	1,78	1,73	2,00
Sim30orge2	3	4,06	1,22	30,16%	4,53	2,67	4,98
Sim30soya1	3	2,25	0,78	34,78%	1,87	1,73	3,15
Sim30soya2	3	2,99	1,54	51,69%	3,33	1,30	4,33
Sim45orge1	3	2,62	0,28	10,76%	2,65	3,32	2,88
Sim45orge2	3	2,53	0,66	25,95%	2,88	1,77	2,93
Sim45soya1	3	2,66	0,95	35,62%	3,10	1,57	3,30
Sim45soya2	3	2,62	1,07	40,75%	2,32	1,73	3,80
Sim60orge1	3	2,17	0,98	45,31%	1,62	1,58	3,30
Sim60orge2	3	1,94	0,86	44,42%	2,33	0,95	2,53
Sim60soya1	3	3,19	1,57	49,28%	4,00	1,38	4,20
Sim60soya2	3	2,44	0,97	39,80%	2,95	1,32	3,05

Tableau N.3 : Durée du ruissellement (minutes)

Simulations	N	Moyenne	Écart-type	Coefficient de variation	Médiane	Quartile inférieure	Quartile supérieure
Sim30orge1	3	30,42	0,53	1,73%	30,17	30,07	31,03
Sim30orge2	3	29,25	2,50	8,55%	28,22	27,43	32,10
Sim30soya1	3	29,69	0,93	3,14%	29,83	28,70	30,55
Sim30soya2	3	30,81	1,81	5,88%	30,17	29,40	32,85
Sim45orge1	3	45,03	0,74	1,65%	45,40	44,18	45,52
Sim45orge2	3	46,38	0,98	2,11%	46,18	45,52	47,45
Sim45soya1	3	45,62	1,29	2,82%	44,98	44,78	47,10
Sim45soya2	3	46,87	1,21	2,58%	47,53	45,47	47,60
Sim60orge1	3	60,16	1,09	1,80%	60,65	58,92	60,92
Sim60orge2	3	62,22	1,18	1,90%	61,60	61,48	63,58
Sim60soya1	3	58,31	2,88	4,95%	58,58	55,30	61,05
Sim60soya2	3	62,35	0,99	1,58%	62,38	61,35	63,32

Tableau N.4 : Volume de ruissellement (litres)

Simulations	N	Moyenne	Écart-type	Coefficient de variation	Médiane	Quartile inférieure	Quartile supérieure
Sim30orge1	3	55,33	23,46	42,40%	50,00	35,00	81,00
Sim30orge2	3	83,33	12,22	14,66%	86,00	70,00	94,00
Sim30soya1	3	117,67	57,59	48,94%	114,00	62,00	177,00
Sim30soya2	3	118,67	45,39	38,25%	95,00	90,00	171,00
Sim45orge1	3	83,33	6,35	7,62%	87,00	76,00	87,00
Sim45orge2	3	113,00	6,25	5,53%	115,00	106,00	118,00
Sim45soya1	3	132,67	15,01	11,31%	132,00	118,00	148,00
Sim45soya2	3	143,33	22,37	15,61%	133,00	128,00	169,00
Sim60orge1	3	53,67	18,50	34,48%	44,00	42,00	75,00
Sim60orge2	3	98,00	25,63	26,16%	95,00	74,00	125,00
Sim60soya1	3	79,33	32,75	41,28%	69,00	53,00	116,00
Sim60soya2	3	125,33	47,44	37,85%	108,00	89,00	179,00

Tableau N.5 : Débit de ruissellement (Litres/minute)

Simulations	N	Moyenne	Écart-type	Coefficient de variation	Médiane	Quartile inférieure	Quartile supérieure
Sim30orge1	3	1,81	0,74	40,69%	1,66	1,16	2,61
Sim30orge2	3	2,85	0,33	11,70%	2,93	2,48	3,13
Sim30soya1	3	3,92	1,82	46,32%	3,82	2,16	5,79
Sim30soya2	3	3,81	1,22	32,09%	3,23	2,98	5,21
Sim45orge1	3	1,85	0,16	8,58%	1,91	1,67	1,97
Sim45orge2	3	2,44	0,15	5,98%	2,42	2,30	2,59
Sim45soya1	3	2,90	0,26	9,06%	2,95	2,62	3,14
Sim45soya2	3	3,06	0,44	14,52%	2,93	2,69	3,55
Sim60orge1	3	0,89	0,30	33,26%	0,75	0,69	1,23
Sim60orge2	3	1,57	0,39	24,50%	1,55	1,20	1,97
Sim60soya1	3	1,35	0,51	37,59%	1,25	0,90	1,90
Sim60soya2	3	2,00	0,73	36,41%	1,73	1,45	2,83

Tableau N.6 : Concentration de MES (mg/Litre)

Simulations	N	Moyenne	Écart-type	Coefficient de variation	Médiane	Quartile inférieure	Quartile supérieure
Sim30orge1	3	792,67	794,75	100,26%	470,00	210,00	1698,00
Sim30orge2	3	193,00	90,74	47,01%	234,00	89,00	256,00
Sim30soya1	3	278,00	223,19	80,28%	194,00	109,00	531,00
Sim30soya2	3	164,00	115,72	70,56%	116,00	80,00	296,00
Sim45orge1	3	507,33	594,48	117,18%	269,00	69,00	1184,00
Sim45orge2	3	707,00	765,36	108,26%	528,00	47,00	1546,00
Sim45soya1	3	164,33	134,08	81,59%	93,00	81,00	319,00
Sim45soya2	3	185,33	157,26	84,85%	129,00	64,00	363,00
Sim60orge1	3	1705,67	1978,47	115,99%	1032,00	152,00	3933,00
Sim60orge2	3	620,67	724,65	116,75%	400,00	32,00	1430,00
Sim60soya1	3	393,67	389,17	107,01%	144,00	134,00	831,00
Sim60soya2	3	161,33	129,51	80,27%	101,00	73,00	310,00

Tableau N.7 : Débit de MES (mg/minute)

Simulations	N	Moyenne	Écart-type	Coefficient de variation	Médiane	Quartile inférieure	Quartile supérieure
Sim30orge1	3	1,78	2,30	129,68%	0,55	0,35	4,43
Sim30orge2	3	0,53	0,22	41,54%	0,64	0,28	0,69
Sim30soya1	3	1,30	1,53	117,68%	0,42	0,42	3,08
Sim30soya2	3	0,72	0,72	100,15%	0,35	0,26	1,54
Sim45orge1	3	0,97	1,19	122,40%	0,45	0,13	2,33
Sim45orge2	3	1,69	1,86	109,81%	1,21	0,12	3,75
Sim45soya1	3	0,50	0,44	88,70%	0,24	0,24	1,00
Sim45soya2	3	0,61	0,59	97,05%	0,38	0,17	1,29
Sim60orge1	3	1,89	2,57	136,16%	0,72	0,11	4,84
Sim60orge2	3	1,11	1,49	133,41%	0,48	0,05	2,81
Sim60soya1	3	0,61	0,81	131,35%	0,17	0,13	1,55
Sim60soya2	3	0,38	0,43	111,51%	0,15	0,13	0,88

Tableau N.8 : Érosion nette (kg/ha)

Simulations	N	Moyenne	Écart-type	Coefficient de variation	Médiane	Quartile inférieure	Quartile supérieure
Sim30orge1	3	30,43	39,84	130,92%	9,10	5,80	76,40
Sim30orge2	3	8,83	4,08	46,16%	10,00	4,30	12,20
Sim30soya1	3	21,93	26,21	119,51%	6,90	6,70	52,20
Sim30soya2	3	12,70	13,36	105,20%	5,80	4,20	28,10
Sim45orge1	3	23,97	29,09	121,27%	11,40	3,30	57,20
Sim45orge2	3	44,33	49,20	110,99%	31,10	3,10	98,80
Sim45soya1	3	12,73	11,66	91,59%	6,10	5,90	26,20
Sim45soya2	3	16,07	15,81	98,39%	9,50	4,60	34,10
Sim60orge1	3	63,90	87,20	136,47%	24,10	3,70	163,90
Sim60orge2	3	39,13	52,62	134,47%	16,40	1,70	99,30
Sim60soya1	3	20,57	27,57	134,06%	5,10	4,20	52,40
Sim60soya2	3	13,40	15,07	112,48%	5,00	4,40	30,80

ANNEXE O. ARTICLE

Cet article (Quilbé *et al.*, 2007b) porte sur l'ensemble du projet avec l'approche rétrospective et l'approche prédictive et fait suite à la présentation réalisée à la conférence internationale *Man and River Systems 2*, à Paris du 4 au 6 décembre 2006. Il a été accepté pour publication dans un numéro spécial de la revue *Hydrology and Earth System Science Discussion*, et est sous presse au moment d'imprimer ce rapport.

Hydrological responses of a watershed to historical land use evolution and future land use scenarios under climate change conditions

Renaud Quilbé¹, Alain N. Rousseau^{1,*}, Jean-Sébastien Moquet¹, Stéphane Savary¹, Simon Ricard¹, Mohamed Slim Garbouj¹

¹ Institut National de la Recherche Scientifique – Centre Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE), Université du Québec, 490 rue de la Couronne, Québec (QC), Canada, G1K 9A9

* Corresponding author

Tel : +1-418-654-2621 ; Fax : +1-418-654-2600

E-mail address: alain.rousseau@ete.inrs.ca

Abstract

Watershed runoff is closely related to land use, but this influence is difficult to quantify. This study focused on the Chaudière River watershed (Québec, Canada) and had two objectives: (i) to quantify the influence of historical agricultural land use evolution on watershed runoff; and (ii) to assess the effect of future land use evolution scenarios under climate change conditions (CC). To achieve this, we used the integrated modeling system GIBSI. Past land use evolution was constructed using satellite images that were integrated into GIBSI. The general trend was an increase of agricultural land in the 80's, a slight decrease in the beginning of the 90's and a steady state over the last ten years. Simulations based on thirty years of daily meteorological series showed strong correlations between land use evolution and water discharge at the watershed outlet, especially for summer and fall seasons. For the prospective approach, we first assessed the effect of CC and then defined two opposite land use evolution scenarios for the horizon 2025 based on two different trends: agriculture intensification or sustainable development. Simulation results showed that CC would induce an increase of water discharge during winter and a decrease the rest of the year, while land use scenarios would have a more drastic effect, agriculture intensification counterbalancing the effect of CC during summer and fall. Due to the large uncertainty linked to CC simulations, it is difficult to conclude that one land use scenario provides a better adaptation to CC than another, but this study shows that land use is a key factor that has to be taken into account when predicting potential, future, hydrological responses of a watershed.

1. Introduction

River hydrology and water quality is influenced by many natural and anthropogenic factors that occur at the watershed scale. It is well known that land use constitutes one of these factors, and that deforestation of one piece of land for agricultural or urban purpose can affect locally water balance and pollutant fate. This influence of land use is difficult to quantify, especially over the long term and at a large scale such as the watershed scale where complex interactions occur. The recent development of decision support systems based on a geographic information system (GIS) and a distributed hydrological model provides practical and useful tools to achieve this goal (Fohrer et al., 2001). All the studies based on such models show that deforestation for agricultural land or urbanisation induces an increase in water discharge and peak flow, but with various intensities. For instance, Costa *et al.* (2003) showed that increase of agricultural land from 30% to 49% of the Tocantins River watershed (Brazil, 767,000 km²) led to a 24% increase of the mean annual water discharge. On the other hand, Fohrer *et al.* (2001) found only a moderate effect of land use change scenarios on the annual water balance of the small Dietzhölze watershed (Germany, 82 km²). Moreover, Dunn and MacKay (1995) showed using the distributed SHETRAN model that land use change has more influence on lowland subwatersheds than on highland subwatersheds. Thus, the intensity of the effect of land use on water regime depends on the size, the slope and land use characteristics of the watershed (see also Cognard-Plancq et al., 2001; Matheussen et al., 2000). Obviously, it also depends on the hydrological model used and the physical processes simulated. Note that it is also possible to use these models to define an optimal land use change that would enable to achieve a specific objective such as reducing peak flow or nonpoint source pollution (Yeo et al., 2004).

Assessment of land use effect on hydrology is of special interest regarding the expected climate changes (CC). Indeed, most of the studies that have tried to forecast the effect of CC on hydrology and water quality consider that the watershed configuration would stay the same in the future as today (for instance Wood and Maurer, 2002). However, it is likely that land use will continue to evolve over the next decades, notably as an adaptation to CC and to regional and world economies, and that it will have an important influence on future watershed hydrology (Kite, 1993).

In this study, we used the integrated modeling system GIBSI (see description below) to assess the effect of agricultural land use on the hydrology and soil erosion of the Chaudière River watershed (Québec, Canada), both under past and future conditions. Indeed, it is important to understand what happened in the past before trying to assess what would be the role and influence of both CC and land use evolution on future watershed hydrology (Crooks and Davies, 2001). Note that GIBSI has already been used to assess the effect of clear cutting on watershed hydrology (Lavigne et al., 2004) leading to consistent results. The first part of this

study consists in determining the land use changes over the Chaudière River watershed between years 1970 and 2003 using remote sensing. The resulting land use maps will be compared and finally introduced in the geographic database of GIBSI to assess the impact of land use evolution on hydrological regime. Then, the second part of the study focuses on defining land use evolution scenarios and simulating their influence on hydrology and soil erosion under future climatic conditions.

2. GIBSI

GIBSI is an integrated modelling system designed to assist stakeholders in decision making process for water management at the watershed scale (Rousseau *et al.*, 2000; Villeneuve *et al.*, 1998). It is basically composed of a MySQL® database management server, a GIS and a graphical user interface (GUI). The modeling part is based on the semi-distributed hydrological model HYDROTEL (Fortin *et al.*, 2001a). The hydrological model is sensitive to land use configuration by the mean of the Manning coefficient (for generation of surface runoff), leaf area index and root depth (for actual evapotranspiration calculation). The erosion model of GIBSI is based on RUSLE (Renard *et al.*, 1997; Wischmeier and Smith, 1978) which has been complemented by Yalin's equation (Yalin, 1963) to account for sediment transport capacity and the sediment routing model of SWWRB (Arnold and Williams, 1995). Other models can be used (*i.e.* nitrogen, phosphorus and pathogens transport), but they were not considered in this study. All models run on a daily time step with meteorological data (precipitation, minimum and maximum temperature) as inputs. Outputs are daily streamflow and water quality data at any computational segment of the river network. Pre- and post-processing tools enable to easily define management scenarios, run simulations and analyse the results. The 1995 land use configuration is used by default in the database and for simulations. It was determined based on a satellite image processed and validated with 1994 survey data (Villeneuve *et al.*, 1998).

3. The Chaudière River watershed

The Chaudière River watershed is located south of Quebec City and covers an area of 6 682 km² (Fig. 1). It was selected because it is representative of many watersheds of the Saint-Lawrence River valley, with various land uses: 63% forest, 17% agricultural land, 15% bush, 3% urban development and 2% surface water. Soils vary from loamy sand in the lower part of the watershed to clay loam in the middle part and loam in the upper part. Agriculture is dominated by animal production, especially pig and dairy farming. This implies that most of farmed lands are forages and pasture (75% of agricultural land in 1995). The population of the watershed is around 180 000 inhabitants. For the application of GIBSI, the study watershed was subdivided into 1870 elementary basins or spatial simulation units (SSUs, with a mean area

of $3.6 \pm 1.9 \text{ km}^2$), 10 lakes ($5.6 \pm 8.3 \text{ km}^2$), 1799 river segments ($1.9 \pm 1.2 \text{ km}$), and 46 lake segments ($1.5 \text{ km} \pm 4.4 \text{ km}$). Calibration of the hydrological model HYDROTEL was performed on the whole watershed (Fortin et al., 2001b) considering measured and simulated streamflows at the outlet. A first calibration of the erosion model was also performed in 2002 (unpublished). Note that improvements and further calibration of this model are in progress. Several management-oriented applications of GIBSI on the Chaudière River watershed have been performed over the last ten years and are described by Quilbé et al., 2007.

4. Data and Methods

4.1. Effect of historical land use evolution

4.1.1. Past land use evolution reconstruction

This part is described in details by Savary *et al.* (2007)¹⁶. Identification of land use evolution was based on seven Landsat satellite images acquired over the 1965-2004 period (Table 1). Their selection was based on several criteria such as the period of the year (summer period is better for crop identification) and watershed cover. The image processing methodology includes three steps: pre-processing, classification and analysis. Pre-processing operations are essential for exploiting satellite products and allow the analyst to work within a geo-referenced environment and to restore image quality. They include radiometric and geometric transformations, as well as image resizing for the watershed area. Classification started with the identification of clouds and water classes using mask application. Then, a supervised object-oriented classification was performed using eCognition (Definens Imaging, 2001) which considers not only pixel spectral characteristics but also forms, textures and neighbourhood notions. As field land use knowledge was not available, training site definition was mainly supported by visual image interpretation and previous works on the Chaudière River watershed (Dolbec et al., 2005; Gauthier, 1996). Finally, correction of unclassified regions (clouds) was made using the nearest date class availability. The resulted land use classes are presented in Table 2.

4.1.2. Effect on hydrology and erosion

The classified images were integrated into GIBSI by automatic modification of the land use tables of the database. Simulations were run with measured meteorological sequences over 30 years (1970-1999). Each year was simulated independently. Results include daily streamflow and sediment concentration series at any computational segment of the river network of the

¹⁶ Savary, S., Garbouj, M.S., Rousseau, A.N. and Quilbé, R. : Impact of land use changes on the hydrology of the Chaudière River watershed. In preparation for Hydrol. Proc., 2007.

Chaudière River watershed. We checked the effect at the watershed outlet as it integrates the effect of both land use evolution and climate change over the whole watershed.

4.2. Effect of future land use evolution

This prospective approach had to take into account not only potential evolution of land use in a near future, but also the evolution of climate. The time interval considered in this study is 30 years, the reference period being from 1970 to 1999 and the future period from 2010 to 2039. The choice of a short term prediction implies that modeled changes in watershed hydrology will be slight but avoids a too important uncertainty in climate change and especially agricultural evolution prediction. As stated by Butcher (1999), it is impossible to develop realistic land use projections for a period of more than 20 to 30 years. The general approach is depicted on Fig. 2.

4.2.1. Determination of future meteorological series

The meteorological variables that have to be determined for the future period are the input variables of the semi-distributed hydrological model HYDROTEL which are daily minimum temperature (TMIN), maximum temperature (TMAX) and precipitation (P). Several methods exist, the most popular being the use of General Circulation Models (GCMs) based on greenhouse gas emission scenarios (GES). GCMs accurately predict climatic variables such as wind and temperature at a large scale. However, hydrology depends on meteorological variables such as precipitation, minimum and maximum temperatures or evapotranspiration, at the land surface level and at a fine spatial and temporal scale (Xu, 1999). To fill this gap and determine future local meteorological sequences from GCM output, we used two methods: (1) delta (or incremental) method and (2) statistical downscaling (SD). Note that a third method combining the delta method with the downscaled data was also used for comparison purposes, but results will not be presented here (see Quilbé *et al.* 2007¹⁷). For the delta method, several GCMs and GESs were available. We selected the three GCMs that gave the best results as compared to measured data over the reference period: (i) the third version of the Coupled General Circulation Model (CGCM3) from the Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis - this version is based on CGCM2 (Flato *et al.*, 2000) and incorporates a new version of the atmospheric component as described by Scinocca and McFarlane (2004); (ii) the third version of the Hadley Centre for Climate Prediction and Research model HadCM3 (Johns *et al.*, 2001); and (iii) the Max Planck Institute for Meteorology model ECHAM4 (Roeckner *et al.*, 1996). Several GESs can be considered for each GCM, as reported in the Special Report on

¹⁷ Quilbé, R., Rousseau, A.N., Moquet, J.-S., Dibike, Y.B. and Gachon, P.: Assessing the effect of climate change on river flow using general circulation models and hydrological modelling. Application to the Chaudière River (Québec, Canada). In preparation for Can. Water Resour. J., 2007.

Emission Scenarios (SRES). Basically, scenarios family A2 and scenarios family B2 correspond to pessimistic and optimistic GES, respectively. For each scenario family, several simulation members (M) are available and characterized by different initial conditions (for instance A2-a and A2-b). We selected the GESs-M combinations that gave the largest range of future meteorological conditions (see Table 3). For the SD method, the only available GCM was HadCM3, based on two GESs (see Table 3). The SD procedure was performed with SDSM (Wilby et al., 2002) for nine meteorological stations out of the 40 available stations. More details about methods and results are given by Quilbé *et al.* (2007²).

4.2.2. Land use evolution scenarios

The base case scenario regarding land use was the 1995 configuration. Then, two opposite scenarios of future land use evolution were defined to represent a wide range of possible configurations.

(i) Scenario A is based on the assumption that pig production will remain the priority incentive of agricultural development in the region. Thus, the evolution of pig production over the last 30 years is extrapolated to the next 20 years, from 89 739 in 1995 to 136 370 animal units in 2025 (1 animal unit corresponds to 30.3 pigs). As a consequence of this increase, land use has to be adjusted. Indeed, increased pig production implies conversion of more agricultural land for pig food production (that is grain corn) and manure spreading, to the detriment of cereals, pasture, shrub land and forest areas. Four land use classes were found to be correlated with pig production over the past 30 years: corn, pasture, forest and cereals. Then, the future class areas were extrapolated based on regression curves and future pig production.

(ii) Scenario B is based on the assumption that agriculture will make a radical change and come back to the land use configuration of 1976, with reforestation to the detriment of shrub land and pasture. This scenario also considers a spatial dispersion of corn and cereal lands over the whole watershed.

For both scenarios, the shrub land class is used as a buffer class to implement deforestation or reforestation. For scenario A, we make the assumption that, as most of these lands were farmed in the 70s, they are the most likely to be farmed again. Thus, new corn fields replaced shrub land, and then on forest area when there is no more shrub land. For scenario B, we considered that these lands will naturally transform into young forests. Note that urban area is considered to stay the same as today.

These changes were integrated into GIBSI using the land use management GUI. One limitation of this system is that, for a given spatial management unit (watershed, subwatershed, municipality or SSU), every change in land use is done by a complete transfer of one class to

another. Therefore, we made a calculated number of transfers on different SSUs (for example all forest transformed into shrub land on one SSU, and all pasture transformed into corn on another SSU) so that the overall proportions are respected at the watershed scale. The corresponding land use distributions are depicted on Fig. 3.

Note that this procedure presents some subjectivity, especially in the case of scenario A. However, what is important is the general tendency at the watershed scale and the results should be considered as possible tendencies with respect to present conditions and not be interpreted in a quantitative way.

4.2.3. Effect on hydrology and erosion

GIBSI simulations were performed with original meteorological sequences and with modified (*i.e.* future) sequences, over 30 years. As for the retrospective approach, each year was simulated independently. Regarding water quantity, comparisons between present and future are made with respect to mean annual, seasonal and monthly water discharge. In order to see the effect of climate change and land use evolution on low-flow events, a frequency analysis was performed using HYFRAN© software (Chaire en hydrologie statistique, 2002). We determined critical streamflow sequences over seven and thirty consecutive days. These are Q_2 , Q_{10-7} and Q_{5-30} corresponding to return periods of respectively two, ten and five years. We also considered the spring peak flow. Finally, the annual and seasonal sediment loads were compared. It should be noted that, by using the models under climate change conditions, we may not be in the calibration domain any more. Thus, we made the assumption that the calibration parameter set remains optimal (Droque *et al.*, 2004).

5. Results

5.1. Effect of historical land use evolution

Figure 4 presents the temporal evolution of land use over the Chaudière River watershed. We can see that the agricultural land class is characterised by fluctuations attributed to the cereals class variability, while pasture area is steadier. These fluctuations of agricultural lands are inversely correlated to forest evolution. This is due to the fact that new agricultural lands are mostly taken from shrub lands (shrub is included in the forest class), while shrub replaces agricultural lands when neglected. The mean annual runoff, simulated with GIBSI and based on 30-year meteorological series, was also found to be strongly correlated with agricultural land ($r^2 = 0.97$), with a minimum of 492 mm for the 1981 land use configuration and a maximum of 555 mm for the 1990 land use configuration (see Fig. 5), and a coefficient of variation (c_v) of 4.6%. Note also that the effect of land use on water discharge is statistically significant ($p < 0.001$, Friedmann test). It should also be noted that this effect of agricultural land on annual

runoff is homogeneous over the thirty years of simulations, meaning that the relative effect is stronger for dry years. It is also important to note that this effect is more important from June to November, while there is no effect in winter and spring. Indeed, in the latter period, runoff occurs mostly under saturated soil conditions, since evapotranspiration is then negligible it means that the kind of vegetation (*i.e.* crop vs. forest) does not influence water balance. Besides, the mean spring peak flow, although correlated to land use, does not vary a lot (minimum of 1309 m³/s with 1981 land use configuration, maximum of 1337 m³/s with 1999 land use configuration, $c_v = 0.8\%$, $p < 0.001$). On the other hand, in summer and fall, runoff is due to rainfall events, thus dense vegetation cover such as forest makes a big difference as compared to farmed land. For these reasons, good correlations were also found between agricultural land and summer low flow sequences as obtained with the frequency analysis, with determination coefficients of 0.95, 0.93 and 0.93 respectively for Q_{2-7} , Q_{10-7} and Q_{5-30} . These results confirm that the hydrological regime of the Chaudière River watershed is highly sensitive to land use. We also used GIBSI to investigate the effect of land use evolution on erosion. The annual sediment load was found to vary much more than annual runoff ($c_v = 67.5\%$, $p < 0.001$) but to be less correlated with agricultural land area ($r^2 = 0.75$). We can see on Fig. 5 that, the evolution of these two variables is slightly different in some periods. Indeed, runoff increases from 1976 to 1981 while sediment load decreases, and the opposite occurs from 1995 to 1999.

5.2. Effect of future land use evolution under climate change

5.2.1. Effect of climate change

First, we assessed the effect of future CC on water discharge and erosion, the other factors being equal, *i.e.* considering that no change occurs in land use (*i.e.*, 1995 configuration, that is the reference land use). The results of simulations obtained with the future meteorological sequences are compared to those performed with the meteorological sequences for the reference period (measured data for delta method or simulated data for SD). Figure 6 shows the annual water discharge obtained with the Delta method (delta) over the thirty years of simulation. We can see an important dispersion depending on the GCM-GES-M combination used. If we assume all GCM-GES-M combinations as equiprobable, the mean trend is a slight decrease of annual discharge (mean of -2.7%) which is statistically significant ($p < 0.01$ with a paired *t*-test). Actually, water discharge would increase in winter and decrease during the rest of the year (Fig. 7). This is in all likelihood due to the higher temperatures predicted by GCMs in winter that induce less snow, more rain, and an earlier snowmelt, and more evapotranspiration during summer. This effect on water discharge also implies an effect on erosion as simulated with GIBSI with a mean of -12.5% ($p < 0.001$). The GCM-GES-M combinations that induce an increase in water discharge also induce an increase in annual sediment load and inversely

(not shown). However, it is interesting to note that the absolute effect (increase or decrease depending on GCM-GES-M) on sediment load is not homogeneous over the thirty years of simulation: it is stronger on wet years than on dry years. Meanwhile, the effect on water discharge is homogeneous (Fig. 6). This means that the main effect of CC would more specifically concern water discharge during dry years and erosion during wet years. Regarding daily streamflow, results obtained with SD method are probably more reliable than those from delta method as the former accounts for a change in precipitation frequency and intensity while the latter does not. Unfortunately, only one GCM (HadCM3) could be considered. The results show a decrease in spring peakflow for HadCM3-A2a (-3.8% for the mean over the thirty years, not significant) and HadCM3-B2a (-12.9%, $p < 0.05$). Finally, regarding summer low flows, results are heterogeneous. The HadCM3-A2a combination induces a strong increase of Q_{2-7} but a decrease of Q_{5-30} and Q_{10-30} , while HadCM3-B2a induces an increase of all sequences. Note that all these results are discussed in details in Quilbé *et al.* (2007²).

5.2.2. Effects of land use evolution scenarios

The previous results only account for the effect of CC without any change in watershed configuration. The next step was to simulate the effect of the two land use evolution scenarios under these CC conditions. Regarding the delta method, we consider here only the two GCM-GES-M combinations that give the extreme effect on water discharge, *i.e.* ECHAM4-B2 and HadCM3-A2b (see Fig. 4), as they represent the whole range of possible future conditions. The results are depicted on Fig. 8 and show that, in both cases, Scenario A would induce an important increase of water discharge from May to November, while Scenario B would induce a slight decrease over the same period. Regarding annual runoff, the mean effect would be 13.6% ($p < 0.001$) and -7.2% ($p < 0.001$), respectively for Scenarios A and B (considering the two GCM-GES-M as equiprobable). Since the mean effect of CC would be a slight decrease of annual runoff, these results mean that an intensification of agriculture (Scenario A) would mitigate and even counterbalance the effect of CC while a scenario B would intensify this effect. As shown in the first part of this study, these results are due to the strong correlation between agricultural land area and water discharge. As Scenario A includes an increase of agricultural land to the detriment of shrub land and forest, this implies an increase of runoff over the watershed in spring and fall. It is the opposite effect for Scenario B. The same effect was found regarding low flow sequences with the SD method, with an increase for Scenario A and a decrease for Scenario B. We can see on Fig. 9 that the fact to consider land use scenarios A and B induces a stronger effect on low flow sequences than when considering only CC without any land use change (1995 land use configuration). Note that these results are obtained from only one GCM and that other GCMs may lead to a different pattern. Regarding erosion, the mean annual sediment load was found to increase with Scenario A (+11.7%, $p < 0.001$,

considering the two GCM-GES-M as equiprobable) and decrease with Scenario B (-4.8%, $p < 0.001$). This follows the water discharge trend.

It is important to keep in mind that important uncertainty and many assumptions are linked to the methodological approach that was used to determine the future meteorological sequences (see Quilbé *et al.*, 2007²). For instance, the use of different methods (delta *versus* statistical downscaling) and different data sets (*i.e.* GCM-GES-M combinations) led to a wide range of results, some of them being contradictory. Moreover, the intensity of extreme meteorological events are not well predicted by those methods, even statistical downscaling (Gachon *et al.*, 2005), so that the effect on peak flow and low flow are also tainted with uncertainty. Also, the hydrological model calibration was performed for a specific time period and land use configuration, and we have to make the assumption that the resulting calibration parameter set remains optimal under different climate and land use conditions. Finally, important factors are not taken into account by this approach, such as potential implementation of irrigation. Consequently, it is difficult to conclude that one land use evolution scenario would be better than another under CC conditions. Bouraoui *et al.* (1998) performed the same kind of approach with the ANSWERS model to assess the expected effects of long term CC (doubling of CO₂) and land use management scenarios on the water balance, particularly drainage below the crop root zone. They showed that CC will induce a decrease of groundwater recharge and that this effect will be much smaller with alternative techniques such as winter wheat and/or alfalfa. In this case, sustainable agriculture would mitigate the effect of CC. Moreover, this kind of interpretation should first consider what is desirable regarding water uses, which is a water management issue. In this regard, the effect of CC and land use scenarios on pollutant loads and water quality has also to be considered as it was shown that some land use changes drastically affect many water quality parameters (Tong and Chen, 2002; Wilby *et al.*, 2006).

Further work should use more confident techniques such as dynamical downscaling based on Regional Climatic Models, to predict the effect of CC in a more reliable way. However, a major problem rising in such studies is that, on one hand, the assessment of CC effect on hydrology has to consider a long term trend (at least 2050 horizon) to produce an effect that is strong enough to be clearly related to CC and not to GCMs output variability, while on the other hand, realistic land use evolution scenarios can only be determined at short term (Butcher, 1999).

6. Conclusion

The first part of this study clearly shows the strong effect that land use, and especially agricultural land use, had on the hydrological regime of the Chaudière River watershed.

Therefore, as illustrated in the second part of this study, it is of major importance to take into account possible future land use evolution when forecasting the behaviour of a watershed within a CC context. Yet, due to the uncertainty linked to the prediction of CC effect, it is difficult to conclude about the mitigation effect of the two opposite land use scenarios considered in this study. However, they induce much stronger effects than CC on the water regime and sediment load of the Chaudière River, confirming that land use will be a key factor in adaptation to CC.

Acknowledgements

This research was partly funded by a grant from the Climate Change Action Fund (Natural Resources Canada, grant A946) and by OURANOS (Consortium on regional climatology and adaptation to climate change). We wish to thank Sébastien Tremblay (INRS-ETE) for precious computing help, as well as Philippe Gachon, Yonas Dibike, Nathalie Gauthier and Diane Chaumont (OURANOS) for helpful discussion and providing data.

References

Arnold, J. G. and Williams, J. R.: SWRRB - A watershed scale model for soil and water resources management, In: Singh, V. P. (Editor), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publication, Highlands ranch, pp. 847-908, 1995.

Bouraoui, F., Vachaud, G. and Chen, T.: Prediction of the effect of climatic changes and land use management on water resources, *Physics and Chemistry of The Earth*, 23(4): 379-384, 1998.

Butcher, J. B.: Forecasting future land use for watershed assessment, *Journal of the American Water Resources Association*, 35(3): 555-565, 1999.

HYFRAN - Hydrological Frequency Analysis, v. 1.1, INRS-ETE / HYDRO-QUÉBEC / ALCAN / CRSNG, 2002

Cognard-Plancq, A.-L., Marc, V., Didon-Lescot, J.-F. and Normand, M.: The role of forest cover on streamflow down sub-Mediterranean mountain watersheds: a modelling approach, *Journal of Hydrology*, 254(1-4): 229-243, 2001.

Costa, M. H., Botta, A. and Cardille, J. A.: Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia, *Journal of Hydrology*, 283(1-4): 206-217, 2003.

Crooks, S. and Davies, H.: Assessment of Land Use Change in the Thames Catchment and its Effect on the Flood Regime of the River, *Physics and Chemistry of The Earth (B)*, 26(7-8): 583-591, 2001.

Definens Imaging: eCognition. Online user guide, pp. <http://www.definiens-imaging.com>, 2001

Dolbec, J. F., Rousseau, A. N. and Quilbé, R.: Développement d'un process de classification d'images satellitaires afin de détecter les changements d'occupation du sol sur le bassin versant de la rivière Chaudière pour la période 1970 à 2000 : Exemple de l'image Landsat-5 du 6 août 1987, Rapport N° 802, INRS-ETE, Québec, 2005.

Droge, G., Pfister, L., Leviandier, T., El Idrissi, A., Iffly, J.-F., Matgen, P., Humbert, J. and Hoffmann, L.: Simulating the spatio-temporal variability of streamflow response to climate change scenarios in a mesoscale basin, *Journal of Hydrology*, 293(1-4): 255-269, 2004.

Dunn, S. M. and Mackay, R.: Spatial variation in evapotranspiration and the influence of land use on catchment hydrology, *Journal of Hydrology*, 171(1-2): 49-73, 1995.

Flato, G. M., Boer, G. J., Lee, W., McFarlane, N., Ramsden, D. and Weaver, A.: The CCCma global coupled model and its climate, *Climate Dynamic*, 16: 451-467, 2000.

Fohrer, N., Haverkamp, S., Eckhardt, K. and Frede, H.-G.: Hydrologic Response to land use changes on the catchment scale, *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26(7-8): 577-582, 2001.

Fortin, J., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J. and Villeneuve, J. P.: A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. Part I: Description of the model, *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(2): 91-99, 2001a.

Fortin, J. P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R. and Fitzback, J.: A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data, part 2: Application to the Chaudière watershed, *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(2): 100-108, 2001b.

Gachon, P., St-Hilaire, A., Ouarda, T., Nguyen, V. T. V., Lin, C., Milton, J., Chaumont, D., Goldstein, J., Hessami, M., Nguyen, T. D., Selva, F., Nadeau, M., Roy, P., Parishkura, D., Major, D., Choux, M. and Bourque, A.: A first evaluation of the strength and weaknesses of statistical downscaling methods for simulating extremes over various regions of eastern Canada, Final report, Sub-component, Climate Change Action Fund (CCAF), Environment Canada, Montréal, Québec, Canada, 2005.

Gauthier, Y.: Rapport technique présenté dans le cadre de GIBSI, Rapport technique n° RT-462a, INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec, 1996.

Johns, T. C., Gregory, J. M., Ingram, W. J., Johnson, C. E., Jones, A., Lowe, J. A., Mitchell, J. F. B., Roberts, D. L., Sexton, D. H. M., Stevenson, D. S., Tett, S. F. B. and Woodge, M. J.: Anthropogenic climate change for 1860 to 2100 simulated with the HadCM3 model under updated emissions scenarios, Hadley Centre Technical Note 22, The Hadley Centre for Climate Prediction and Research, The Met Office, Bracknell, U.K., 2001.

Kite, G. W.: Application of a land class hydrological model to climatic change, *Water Resources Research*, 29(7): 2377-2384, 1993.

Lavigne, M. P., Rousseau, A. N., Turcotte, R., Laroche, A. M., Fortin, J. P. and Villeneuve, J. P.: Validation and use of a distributed hydrological modeling system to predict short term effects of clear cutting on the hydrological regime of a watershed, *Earth Interactions*, 8(3): 1-19, 2004.

Matheussen, B., Kirschbaum, R. L., Goodman, I. A., O'Donnell, G. M. and Lettenmaier, D. P.: Effects of land cover change on streamflow in the interior Columbia River Basin (USA and Canada), *Hydrological Processes*, 14(5): 867-885, 2000.

Quilbé, R. and Rousseau, A. N.: GIBSI : An integrated modelling system for watershed management - Sample applications and current developments. *Hydrology and Earth System Sciences Discussion* (in press), 2007.

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., D.K., M. and D.C., Y.: Predicting Soil Erosion by Water : A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), US Department of Agriculture, Washington, 1997.

Roeckner, E., Arpe, K., Bengtsson, L., Christoph, M., Claussen, M., Dümenil, L., Esch, M., Giorgetta, M., Schlese, U. and Schulzweida, U.: The atmospheric general circulation model ECHAM4: model description and simulation of present-day climate, 218, Max Planck Institut für Meteorology, 1996.

Rousseau, A. N., Mailhot, A., Turcotte, R., Duchemin, M., Blanchette, C., Roux, M., Etong, N., Dupont, J. and Villeneuve, J. P.: GIBSI - An integrated modelling system prototype for river basin management, *Hydrobiologia*, 422/423: 465-475, 2000.

Scinocca, J. F. and McFarlane, N. A.: The variability of modeled tropical precipitation, *Journal of Atmospheric Sciences*, 61: 1993-2015, 2004.

Tong, S. T. Y. and Chen, W.: Modeling the relationship between land use and surface water quality, *Journal of Environmental Management*, 66(4): 377-393, 2002.

Villeneuve, J. P., Blanchette, C., Duchemin, M., Gagnon, J. F., Mailhot, A., Rousseau, A. N., Roux, M., Tremblay, J. F. and Turcotte, R.: Rapport Final du Projet GIBSI : Gestion de l'Eau des Bassins Versants à l'Aide d'un Système Informatisé. Mars 1998 : Tome 1., R-462, INRS-Eau, Sainte-Foy, 1998.

Wilby, R. L., Dawson, C. W. and Barrow, E. M.: SDSM - a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, *Environmental Modelling & Software*, 17(2): 145-157, 2002.

Wilby, R. L., Whitehead, P. G., Wade, A. J., Butterfield, D., Davis, R. J. and Watts, G.: Integrated modelling of climate change impacts on water resources and quality in a lowland catchment: River Kennet, UK, *Journal of Hydrology*

Hydro-ecological functioning of the Pang and Lambourn catchments, UK - Results from the Lowland Catchment Research (LOCAR) initiative, 330(1-2): 204-220, 2006.

Wischmeier, W. H. and Smith, D. D.: Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning, Agricultural Handbook No. 537, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 1978.

Wood, A. W. and Maurer, E. P.: Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States, Journal of Geophysical Research, 107(D20): 4429, 2002.

Xu, C.-Y.: Climate Change and Hydrologic Models: A Review of Existing Gaps and Recent Research Developments, Water Resources Management, 13(5): 369-382, 1999.

Yalin, Y. S.: An expression for bed-load transportation, Journal of the Hydraulics Division ASCE, 89: 221-250, 1963.

Yeo, I., Gordon, S. I. and Guldman, J. M.: Optimizing patterns of land use to reduce peak runoff flow and nonpoint source pollution with an integrated hydrological and land-use model, Earth Interactions, 8(6): 1-20, 2004.

Figure captions

Figure 1: The Chaudière River watershed

Figure 2: General approach used to assess the effect of CC and land use evolution scenarios on hydrology

Figure 3: Repartition of land use on the watershed for base case scenario, Scenario A and Scenario B

Figure 4: Evolution of agricultural and forest land use on the Chaudière River watershed over the past 30 years

Figure 5: Evolution of the mean annual water discharge (full line) and the mean annual sediment load (dotted line) at the outlet of the Chaudière River watershed simulated with GIBSI as a function of land use configuration

Figure 6: Effect of CC on annual water discharge at the outlet of the Chaudière River watershed using the delta method and several GCM-GES-M combinations

Figure 7: Monthly water discharge as simulated for reference period (left box plots) and future period with all GCM-GES-M combinations considered as equiprobable (right box plots). Red line indicates the median value, box-plot limits indicate 1st and 3rd quartiles, and bars indicate maximum and minimum values. Stars indicate that the means are statistically different (paired *t*-test, $p < 0.05$)

Figure 8: Effect of land use scenarios A (middle box) and B (left box) on monthly water discharge as compared to reference land use (right box) obtained from GIBSI simulations, Delta method and two GCM-GES-M combinations (HadCM3-A2b and ECHAM4-B2). Red line indicates the median value, box-plot limits indicate 1st and 3rd quartiles, and bars indicate maximum and minimum values. Stars indicate that the means are statistically different (paired *t*-test, $p < 0.05$)

Figure 9: Effect of CC (Sc95 vs. ref) and land use evolution scenarios (ScA and ScB vs. Sc95) on low flow statistical sequences (m^3/s) obtained with downscaling method and the two GCM-GES-M used (HadCM3-A2a and HadCM3-A2b)

Table 1: Satellite images used for the characterisation of land use evolution on the Chaudière River watershed

Acquisition date	Satellite and Sensor
09/04/1976	Landsat-2 MSS
09/14/1981	Landsat-2 MSS
09/06/1987	Landsat-5 TM
07/29/1990	Landsat-5 TM
08/28/1995	Landsat-5 TM
07/14/1999	Landsat-7 ETM+
09/02/2003	Landsat-5 TM+

Table 2 : Land use classes used in GIBSI

Class number	Land Use classes
1	Urban
2	Pasture
3	Cereals
4	Corn
5	Water
6	Wetland
7	Bare Soil
8	Shrub land
9	Deciduous Forest
10	Evergreen Forest

Table 3: GCM-GES-M combinations used with the two methods for determining future meteorological series

GCM	GES	Member	Delta	SD
CGCM3	A2	1	x	-
	B1	3	x	-
HadCM3	A2	a	x	x
		b	x	-
	B2	a	x	x
		b	-	-
ECHAM4	A2	-	x	-
	B2	-	x	-

Figure 1

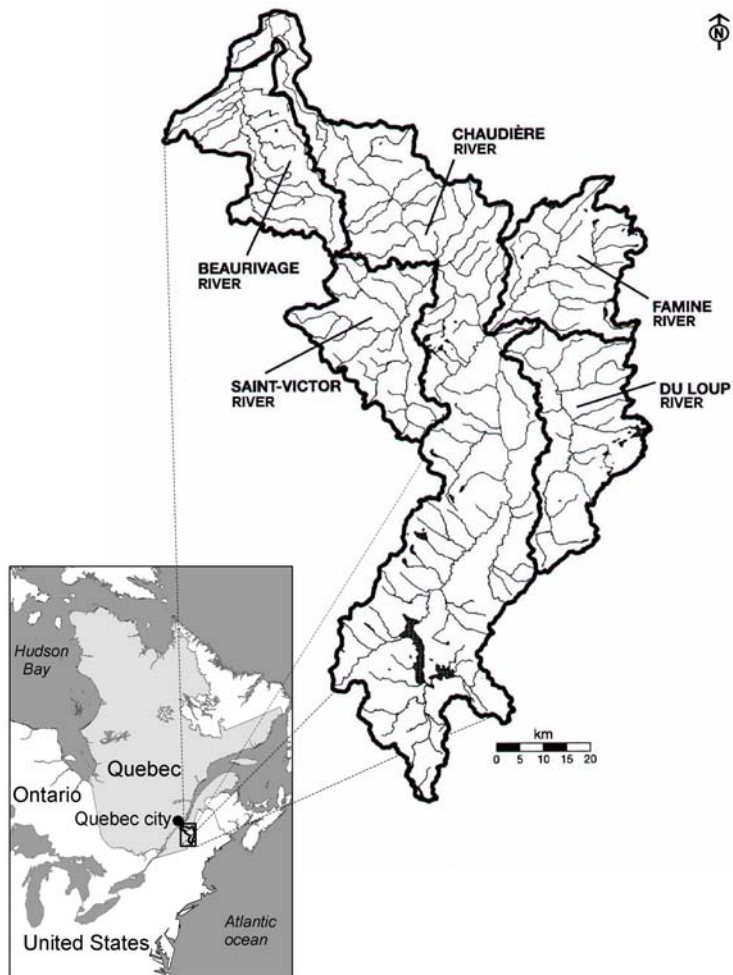


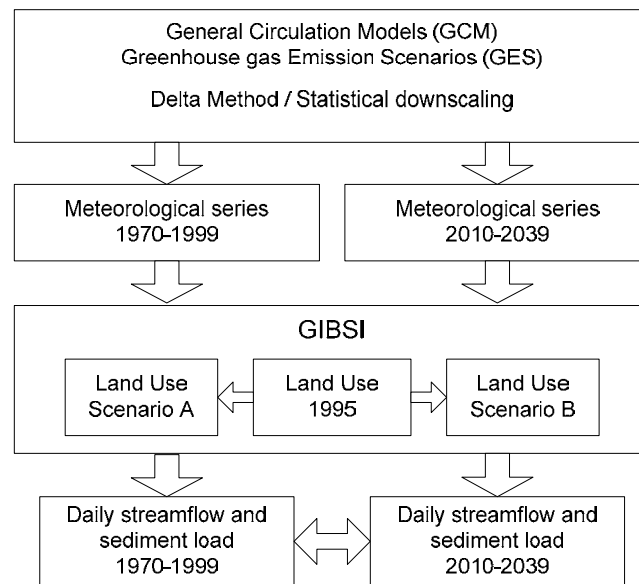
Figure 2

Figure 3

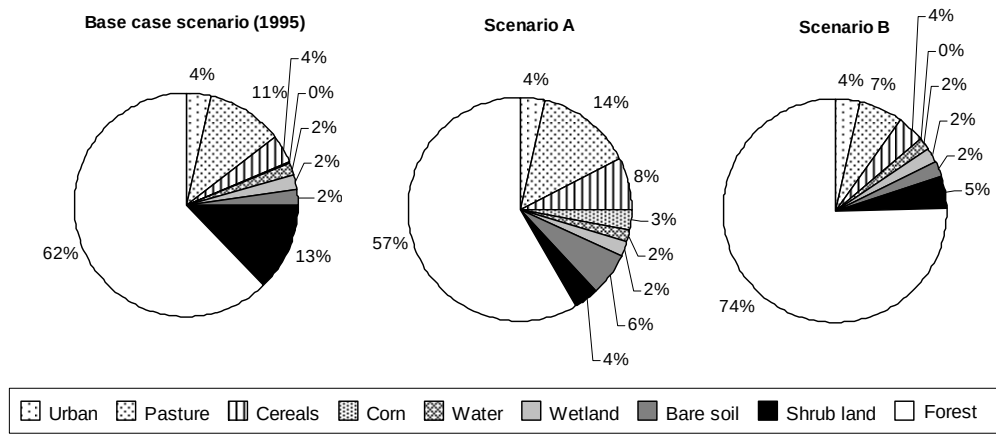


Figure 4

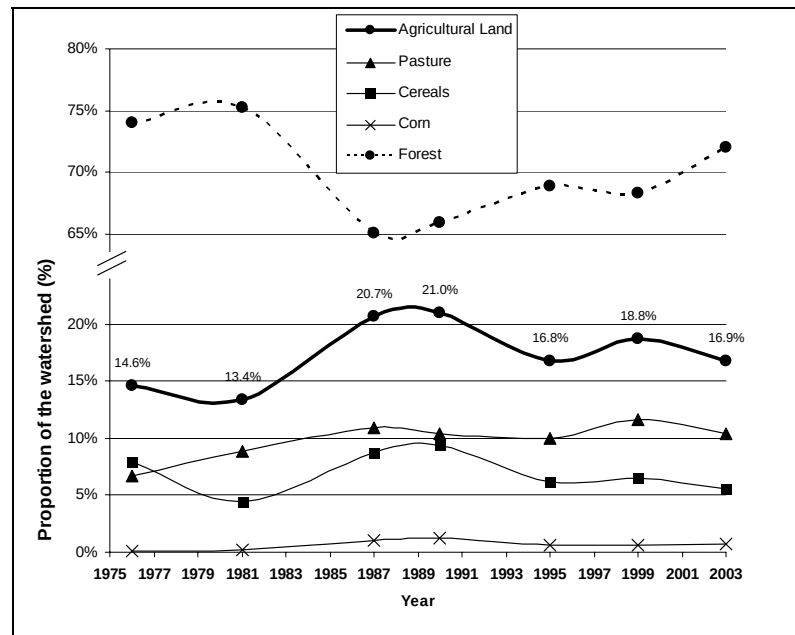


Figure 5

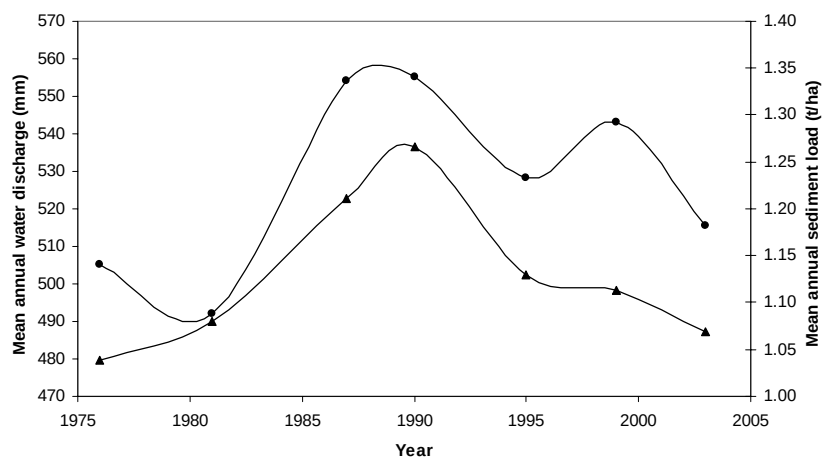


Figure 6

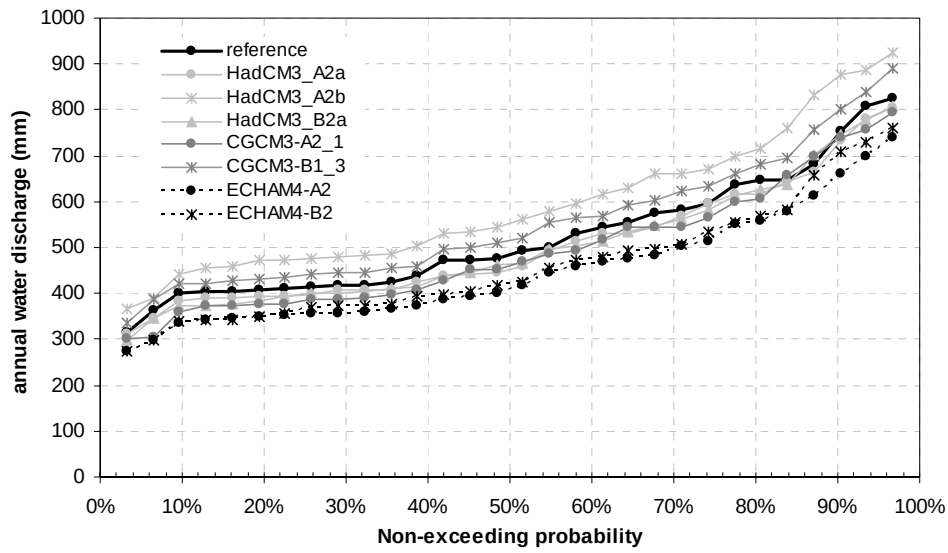


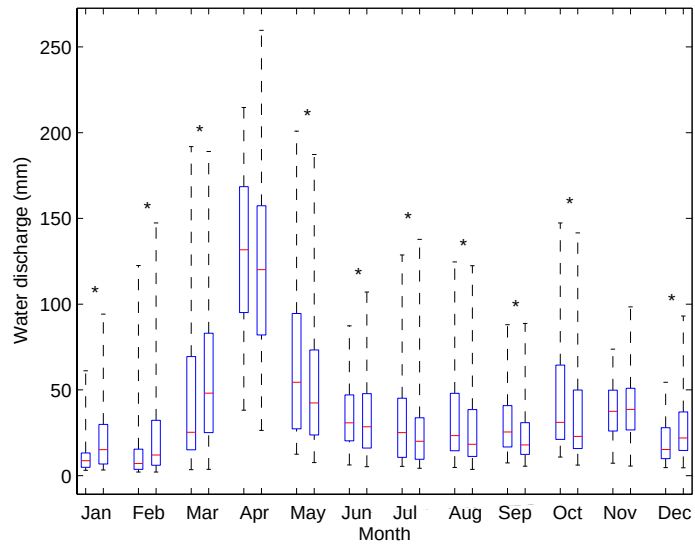
Figure 7

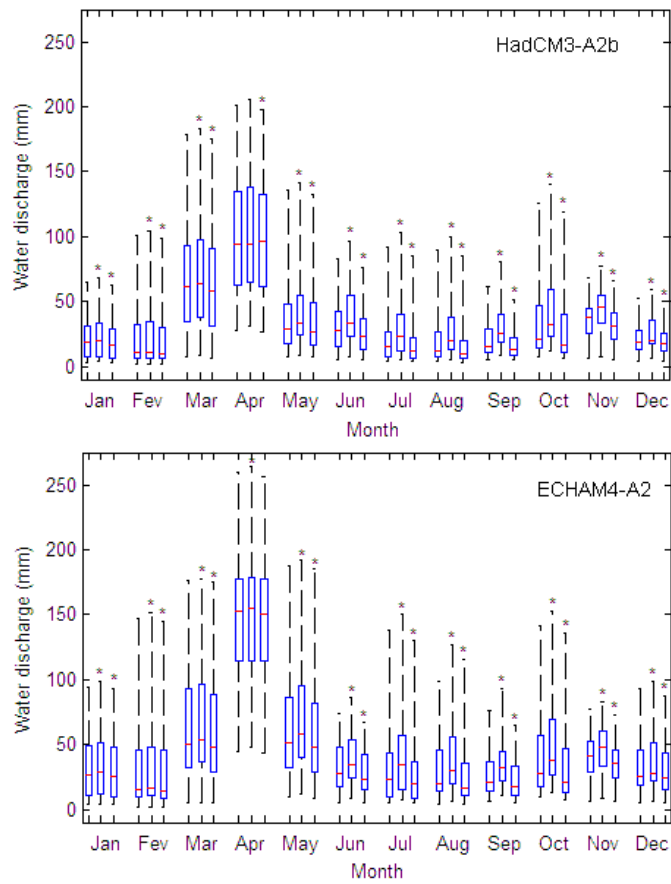
Figure 8

Figure 9

