

Implications des scénarios climatiques futurs

sur la gestion des sols et de l'eau à la ferme

Aubert Michaud, Ph.D.
Colline Gombault, M.Sc.
Jean-François Cyr, M.Sc.
Hélène Côté, M.Sc.



Centre de référence en agriculture
et agroalimentaire du Québec

Commission agrométéorologie

AVERTISSEMENT

Au moment de sa rédaction, l'information contenue dans ce document était jugée représentative du secteur de l'agrométéorologie au Québec. Son utilisation demeure sous l'entière responsabilité du lecteur. Certains renseignements ayant pu évoluer d'une manière appréciable depuis la rédaction, le lecteur est invité à en vérifier l'exactitude avant de les utiliser et de les mettre en application.

Ce feuillet technique a été réalisé grâce à l'appui financier d'Ouranos en partenariat avec Ressources naturelles Canada.



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

Canada

POUR INFORMATION

Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ)

Édifice Delta 1

2875, boulevard Laurier, 9^e étage

Québec (Québec) G1V 2M2

Téléphone : 418 523-5411

Télécopieur : 418 644-5944

Courriel : client@craaq.qc.ca

Site Internet : www.craaq.qc.ca

© Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, 2012

Publication n° PAGR0106

ISBN 978-2-7649-0239-4

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives Canada, 2012

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2012

RÉDACTION

Aubert Michaud, Ph.D., chercheur en conservation des sols et de l'eau, Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA), Québec

Colline Gombault, M.Sc., assistante de recherche, Université McGill, Département de géographie, Montréal

Jean-François Cyr, M.Sc., ingénieur, Centre d'expertise hydrique du Québec, Québec

Hélène Côté, M.Sc., spécialiste, Ouranos, Simulations climatiques, Montréal

RÉVISION

Anne Blondlot, agronome, Ouranos, Impacts et adaptation, Montréal

Gaétan Bourgeois, Ph.D., chercheur en bioclimatologie et modélisation, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement en horticulture, Saint-Jean-sur-Richelieu

Marc-Olivier Gasser, Ph.D., chercheur en conservation des sols et de l'eau, Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA), Québec

Bano Mehdi, M.Sc., étudiante au doctorat, Université McGill, Département de géographie, Montréal, Québec

Nicolas Tremblay, Ph.D., agronome, chercheur en nutrition des cultures, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement en horticulture, Saint-Jean-sur-Richelieu

COORDINATION

Lyne Lauzon, biologiste, chargée de projets aux publications, CRAAQ, Québec

Denise Bachand, M.Sc., chargée de projets, CRAAQ, Québec

ÉDITION

Danielle Jacques, M.Sc., agronome, CRAAQ, Québec

CONCEPTION GRAPHIQUE ET MISE EN PAGE

Nathalie Nadeau, technicienne en infographie, CRAAQ, Québec

PHOTO (page couverture)

Jacques Desjardins (IRDA)

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	1
DES PRÉCIPITATIONS ET DES TEMPÉRATURES SOUS INFLUENCE	1
RÉPONSES HYDROLOGIQUES EN CLIMAT ACTUEL	3
RÉPONSES HYDROLOGIQUES EN CLIMAT FUTUR	6
Redoux hivernaux et printemps hâtifs.....	8
Étés et automnes plus secs	10
ENJEUX ET PISTES D'ADAPTATION POUR LA PRODUCTION AGRICOLE.....	11
Aménagement hydroagricole et gestion de l'eau en climat futur.....	11
Pratiques culturales en climat futur	12
RÉFÉRENCES	14

INTRODUCTION

Les différents états du climat conditionnent la disponibilité et la circulation de l'eau sur le territoire. Au Québec, le bilan hydrique est excédentaire. Les précipitations annuelles sous forme de pluie et de neige excèdent globalement les quantités d'eau prélevées par les plantes ou évaporées dans l'atmosphère. La plus grande proportion de cette eau excédentaire rejoint les cours d'eau via le ruissellement de surface, les systèmes de drainage souterrain ou la résurgence de la nappe d'eau superficielle. Une faible fraction de l'eau excédentaire s'infiltré en profondeur et contribue aussi à la recharge de l'aquifère. Cependant, bien que le bilan hydrique demeure largement excédentaire sur une base annuelle, la distribution saisonnière des précipitations et des températures fait en sorte que des déficits hydriques surviennent régulièrement pendant la période de croissance des cultures. Reflétant la variabilité interannuelle des températures et des précipitations, les quantités d'eau ruisselées et les déficits hydriques varient d'une année à l'autre et ont une influence importante sur les rendements et la qualité des récoltes, de même que sur la qualité de l'eau des ruisseaux, des rivières et des lacs. Les printemps marqués par d'abondantes précipitations, par exemple, se traduisent par des retards dans les semis, compliquent la valorisation des engrais de ferme, accroissent les risques de compaction du sol et génèrent un abondant ruissellement de surface, principal vecteur de transport de sédiments et de nutriments des champs vers les cours d'eau. Les conditions climatiques, la productivité des cultures et la qualité des sols et de l'eau de surface sont donc intimement liées.

Ce feuillet dresse un portrait des impacts potentiels des changements climatiques sur la gestion des sols et de l'eau en milieu agricole et suggère quelques pistes d'adaptation. Dans un premier temps, les implications des changements climatiques sur le bilan hydrique et l'hydrologie des bassins versants agricoles sont abordées en s'appuyant sur des études récentes basées sur des modèles hydrologiques calibrés et validés au Québec, et alimentés par des simulations issues de modèles climatiques. À la lumière des changements attendus en climat futur dans la disponibilité en eau et de ses variations saisonnières, quelques pistes d'adaptation en matière d'aménagement des terres et de gestion des sols et des cultures sont ensuite abordées dans la perspective d'assurer, en climat futur, un égouttement adéquat des sols, des rendements

des cultures acceptables et la préservation de la qualité de l'eau des ruisseaux, des rivières et des lacs en milieu agricole.

DES PRÉCIPITATIONS ET DES TEMPÉRATURES SOUS INFLUENCE

Comme c'est le cas pour d'autres régions situées aux latitudes moyennes, le climat du Québec est fortement régi par la succession des systèmes météorologiques qui définissent nos régimes de températures et de précipitations. De plus, certains patrons de circulation atmosphérique, tels que El Niño Southern Oscillation (ENSO) et son opposé La Niña ainsi que l'oscillation nord-atlantique (ONA), influencent de façon cyclique la fréquence et l'intensité de ces systèmes. Ces phénomènes contribuent à la variabilité du climat québécois.

Les fluctuations que connaissent ces patrons de circulation peuvent engendrer des anomalies de températures et de précipitations au Québec pour certaines saisons. Par exemple, ONA cause des hivers froids et secs ou chauds et humides en Amérique du Nord (Coulibaly et Burn, 2005). El Niño est favorable aux hivers chauds et humides au Québec, surtout lorsqu'il est de forte intensité. Ce fut d'ailleurs l'un des facteurs ayant contribué à la crise du verglas de 1998. À l'inverse, La Niña amène des années particulièrement froides (Environnement Canada, 2010). Ces patrons de circulation peuvent aussi se superposer et, parfois, lorsque leurs phases coïncident, produire des conditions exceptionnelles comme le temps anormalement chaud et sec de 2009/2010 (Environnement Canada, 2011).

L'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, reconnue pour son rôle dans le réchauffement global planétaire, affecte également le climat local et régional (IPCC, 2007). Les modèles climatiques sont de nos jours les outils disponibles les plus sophistiqués pouvant fournir des projections assez fiables pour évaluer la réaction du système climatique à des changements de composition de l'atmosphère (IPCC, 2007). Afin de tenir compte des incertitudes liées aux changements climatiques, plusieurs projections climatiques ont été effectuées pour le Québec à partir de différents modèles climatiques et scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (Lepage *et al.*, 2011).

Les changements saisonniers des températures et des précipitations pour le sud du Québec, au-dessous du 48° parallèle, sont présentés au tableau 1. Ces changements ont été calculés à partir des résultats d'un ensemble de 126 simulations climatiques globales dont la résolution spatiale est d'environ 300 km. Les modèles globaux alimentent les modèles climatiques régionaux dont la résolution spatiale est plus fine (45 km environ). Les résultats des modèles régionaux vont dans le même sens que les résultats des modèles globaux, mais leur représentation plus détaillée des caractéristiques de la surface (topographie, sols, végétation, plans d'eau, etc.), bien qu'encore trop grossière pour certaines analyses, se rapproche davantage des échelles des études hydrologiques.

Les changements globaux présentés au tableau 1 auront des répercussions sur les saisons de croissance et de dormance, comme le montre l'Atlas agroclimatique du Québec (www.agrometeo.org), ainsi que sur les conditions hydriques des sols.

Des changements dans la variabilité climatique et dans les événements extrêmes pourraient avoir des conséquences importantes en agriculture. La figure 1 illustre les températures quotidiennes moyennes simulées par 5 projections du Modèle régional de climat canadien (MRCC 4.2.3) piloté par le Modèle canadien couplé de climat global (MCCG3). Les changements projetés pour ces températures en climat futur indiquent que l'occurrence de journées au-dessus de zéro augmenterait considérablement en hiver, ce qui pourrait favoriser une hausse de l'occurrence des événements de pluie et fonte hivernale. La variabilité climatique des températures hivernales diminuerait légèrement grâce à une moins grande fréquence de froids intenses, alors que les températures extrêmes chaudes augmenteraient peu en hiver (Ouranos, 2010).

En été, la moyenne des températures n'augmente pas autant qu'en hiver, mais la variabilité projetée serait plus forte que celle observée actuellement en raison de l'augmentation significative des journées très chaudes, pouvant accroître les stress hydriques et thermiques.

L'Atlas agroclimatique du Québec anticipe, pour l'horizon 2050, une augmentation de l'occurrence annuelle de températures supérieures à 30 °C d'environ 7 jours sur l'ensemble du Québec pour un scénario inférieur (carte) et une augmentation qui varie entre 8 et 21 jours selon un gradient nord-sud pour un

scénario supérieur (carte). Ces scénarios sont dérivés d'un ensemble de 15 simulations faisant intervenir divers modèles climatiques régionaux et globaux. Ils englobent 80 % des changements simulés.

En ce qui a trait aux précipitations, les quantités reçues ne varieraient pas significativement en été, mais augmenteraient pour les trois autres saisons, surtout en hiver. Toujours selon le tableau 1, ces changements s'accroîtraient avec le temps. D'autres études, utilisant cette fois 6 projections du MRCC, suggèrent que les précipitations de forte intensité seraient plus fréquentes en climat futur (Mailhot *et al.*, 2007; Huard et Chaumont, 2011) et que la saison des orages tendrait à s'allonger, ce qui contribuerait à augmenter la fréquence d'épisodes de ruissellement de surface et d'érosion en période estivale.

La quantité de neige au sol dépend à la fois des précipitations et des températures. Dans ce contexte, il n'est pas facile d'estimer l'effet des changements climatiques sur l'accumulation de neige. Une analyse basée sur un ensemble de 5 projections du Modèle régional de climat canadien (MRCC 4.2.3), piloté par le Modèle canadien couplé de climat global (MCCG3.1v2) intégrant le scénario d'émissions de gaz à effet de serre (GES) A2, aborde cette question. Le scénario A2 représente de fortes augmentations d'émissions mais, dans le contexte économique et géopolitique mondial actuel, il reflète assez bien les tendances observées (Raupach *et al.*, 2007). Dans le sud du Québec, une diminution de l'accumulation de neige au sol est attendue, en raison de la hausse des températures et du raccourcissement de la saison froide (Ouranos, 2010). En effet, par rapport à la période de référence 1961-1990, l'ensemble de 5 projections laisse entrevoir, pour l'horizon 2041-2070, une diminution du couvert de neige au mois de mars de 20 à 40 % pour l'extrême sud de la province et de 2 à 10 % un peu plus au nord (latitude de la ville de Québec) et en Gaspésie (Ouranos, 2010). Dans les régions agricoles les plus au nord, la hausse des températures et des précipitations pourrait faire augmenter faiblement les accumulations de neige.

Pour ce qui est de la circulation atmosphérique, l'habileté des modèles climatiques à reproduire des patrons comme ONA et ENSO s'améliore constamment et de nombreuses recherches à ce sujet sont présentement en cours. Toutefois, dans l'état actuel des connaissances, il est difficile d'évaluer comment les changements climatiques affecteront ENSO (Environnement Canada, 2010) et ONA.

TABEAU 1. CHANGEMENTS SAISONNIERS DES TEMPÉRATURES ET DES PRÉCIPITATIONS POUR LE SUD DU QUÉBEC (SUD DU 48^E PARALLÈLE) ÉVALUÉS À PARTIR D'UN ENSEMBLE DE 126 SIMULATIONS CLIMATIQUES GLOBALES¹

Saison	Paramètres	Changement à l'horizon 2020	Changement à l'horizon 2050	Changement à l'horizon 2080
Hiver	Températures	1,3 à 2,3 °C	2,5 à 3,8 °C	3,6 à 5,7 °C
	Précipitations	3,7 à 11,1 %	8,6 à 18,1 %	14,5 à 27,6 %
Printemps	Températures	1,0 à 1,7 °C	1,9 à 3,0 °C	2,7 à 4,3 °C
	Précipitations	2,0 à 8,6 %	4,4 à 13,1 %	8,9 à 22,2 %
Été	Températures	1,1 à 1,7 °C	1,9 à 3,0 °C	2,6 à 4,4 °C
	Précipitations	-1,5 à 4,4 %	-1,8 à 5,4 %	-4,9 à 6,0 %
Automne	Températures	1,2 à 1,9 °C	2,0 à 3,1 °C	2,7 à 4,5 °C
	Précipitations	-2,7 à 3,6 %	-0,7 à 7,7 %	0,4 à 12,8 %

1. Les changements sont calculés par rapport au climat de 1961-1990; les valeurs correspondent respectivement aux 25^e et 75^e percentiles des changements projetés. L'ensemble inclut 3 scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (SRES A1B, A2 et B1), 20 modèles de climat globaux (MCG) et plusieurs membres en combinaison MCG/SRES.

Source : Ouranos, 2010

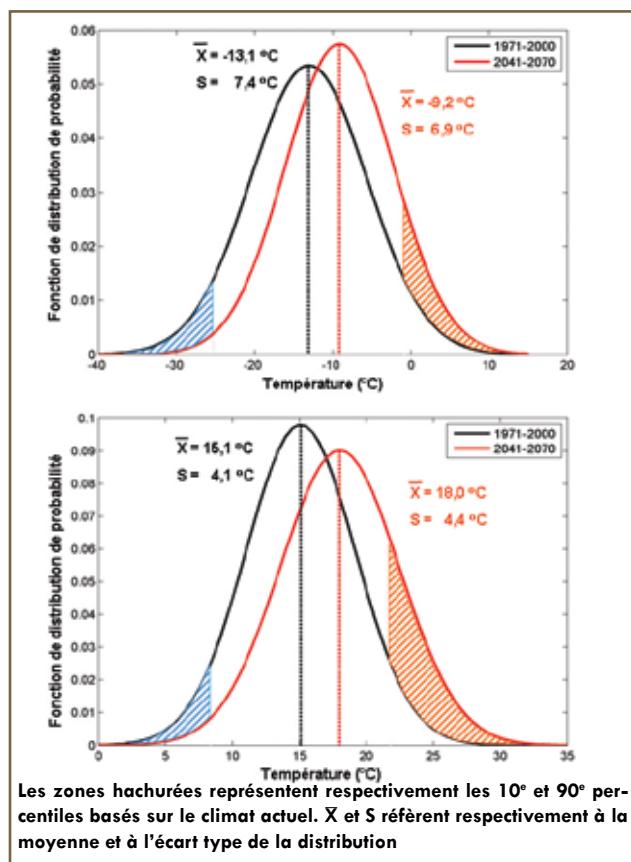


FIGURE 1. DISTRIBUTIONS HIVERNALE (A) ET ESTIVALE (B) DES TEMPÉRATURES QUOTIDIENNES MOYENNES SIMULÉES EN CLIMAT ACTUEL (1971-2000) ET PROJETÉES DANS LE FUTUR (2041-2070) POUR LA ZONE SUD DU QUÉBEC (SUD DU 48^E PARALLÈLE) PAR UN ENSEMBLE DE 5 SIMULATIONS MRCC4.2.3 PILOTÉ PAR 5 DIFFÉRENTS MEMBRES DU MCCG3 SUR LA BASE DU SCÉNARIO A2

Source : Ouranos, 2010

RÉPONSES HYDROLOGIQUES EN CLIMAT ACTUEL

Les régions agricoles du Québec reçoivent annuellement entre 800 et 1 200 mm de précipitations, dont une partie (100 à 400 mm) est stockée pendant l'hiver dans le couvert de neige pour être relâchée sous forme d'écoulements souterrains et par ruissellement de surface à la fin de l'hiver et au printemps. Bien qu'il soit influencé par le climat régional, l'utilisation du territoire et les types de sol, le bilan hydrique des parcelles et des bassins versants agricoles demeure généralement excédentaire en dehors de la période de croissance des plantes. Le tableau 2 illustre les réponses hydrologiques de deux petits bassins versants agricoles profitant d'un suivi hydrométrique et influencés par des conditions climatiques très contrastées, soit le ruisseau Fourchette en Beauce et le ruisseau aux Castors en Montérégie. L'observation en continu de la signature géochimique des ruisseaux a permis de quantifier l'origine des eaux exportées (Michaud *et al.*, 2009a, 2009b). En moyenne, entre 45 et 58 % du volume des précipitations annuelles se retrouve sous forme d'eau excédentaire qui ruisselle à la surface du sol (15 à 20 %) ou s'écoule souterrainement. L'étude des hydrogrammes des deux bassins versants démontre que la plus large part de l'eau excédentaire est exportée à la fin de l'hiver et au début du printemps, en réponse à la fonte du couvert de neige et des précipitations sur des sols gelés ou saturés.

D'importantes quantités d'eau sont également évacuées à l'occasion de redoux hivernaux, alors que des pluies provoquent un important ruissellement de surface en raison de l'état saturé ou gelé des sols. La figure 2 illustre les réponses hydrologiques des mêmes bassins expérimentaux en superposant les couverts de neige et les épisodes de fonte qui en découlent pour les périodes de novembre à avril (Drouin *et al.*, 2012). Bien que soumis à des accumulations de neige très contrastées, les régimes hydriques des deux bassins témoignent de hauteurs d'eau maximales au début du mois d'avril. Les différences régionales s'expliquent cependant par la présence d'un couvert de neige plus important au nord, générant des crues printanières plus importantes et concentrées sur une courte période. Les épisodes de ruissellement de surface n'en restent pas moins sévères

et même plus fréquents en hiver en Montérégie. Les températures plus élevées y favorisent en effet la fonte de neige et l'occurrence de pluies épisodiques lors de redoux au milieu de l'hiver.

Les périodes estivale et automnale sont aussi parfois sujettes à d'intenses activités hydrologiques, générant du ruissellement de surface ayant un pouvoir très érosif. Les forts orages du mois de juin 2008 en Montérégie et en Beauce ont produit un ruissellement abondant, alors que l'intensité des pluies a dépassé le taux d'infiltration des sols (Figure 3). Bien que ces événements soient plutôt rares au Québec, l'érosion et les inondations qu'ils provoquent peuvent endommager le réseau de drainage de surface et affecter la productivité et la qualité des récoltes.

TABLEAU 2. PRÉCIPITATIONS, RUISSellement DE SURFACE ET ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS ESTIMÉS AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS SOUS EXPÉRImentation DU RUISSEAU FOURCHETTE (BEAUCE) ET DU RUISSEAU AUX CASTORS (MONTÉRégIE)

A. Bassin versant expérimental du ruisseau Fourchette (Beauce)

	Précipitations (mm)	Ruissellement de surface		Écoulements souterrains		Exportation totale (%) (ruissellement et écoulements souterrains)
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	
2007	1 278	256	20	418	33	53
2008	1 292	432	33	472	37	70
2009	1 179	188	16	474	40	56
2010	1 157	188	16	431	37	53
Moyenne	1 226	266	22	449	37	59

B. Bassin versant expérimental du ruisseau aux Castors (Montérégie)

	Précipitations (mm)	Ruissellement de surface		Écoulements souterrains		Exportation totale (%) (ruissellement et écoulements souterrains)
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	
2007	1 122	177	16	306	27	43
2008	948	204	22	323	34	56
2009	972	98	10	252	26	36
2010	1 067	163	15	305	29	44
Moyenne	1 027	161	16	296	29	45

Source : Michaud et Desjardins, 2011

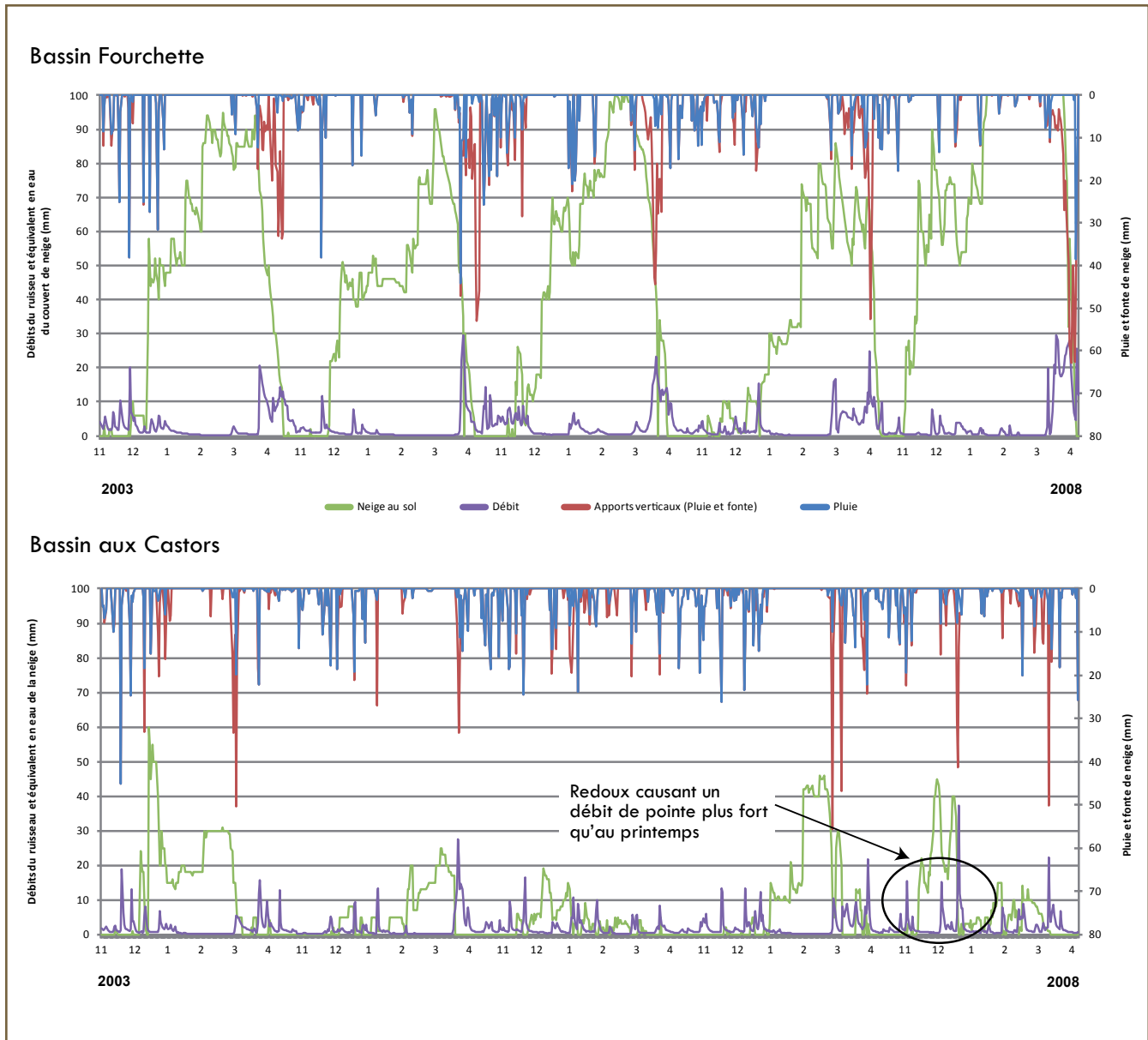


FIGURE 2. FONTE, PLUIES, COUVERT DE NEIGE ET DÉBITS JOURNALIERS HORS PÉRIODE DE CROISSANCE (DE NOVEMBRE À AVRIL) ESTIMÉS AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX DU RUISSEAU FOURCHETTE (BEAUCE) ET DU RUISSEAU AUX CASTORS (MONTÉRÉGIE)

Source : Drouin *et al.*, 2012

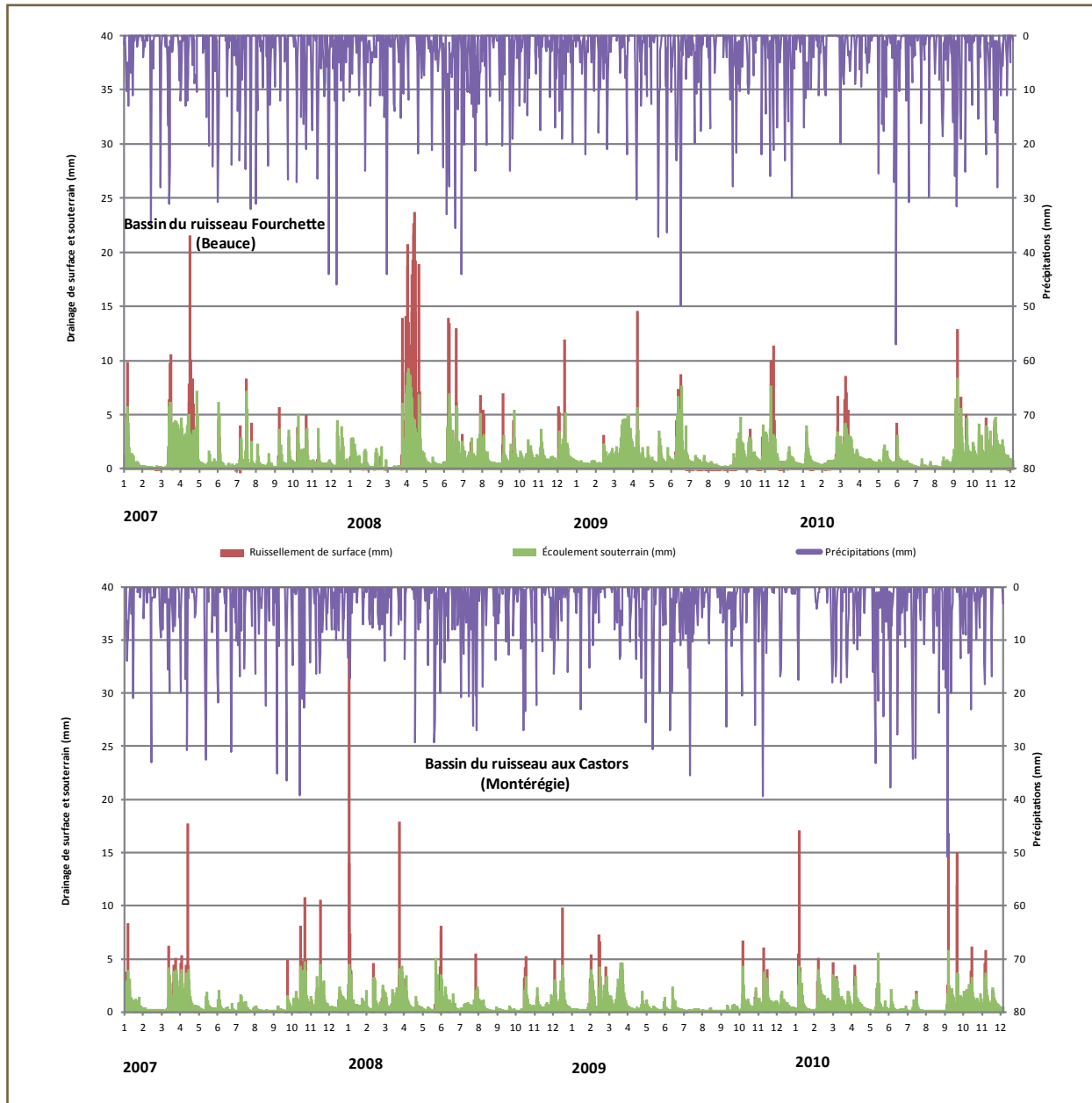


FIGURE 3. PRÉCIPITATIONS, RUISSellement DE SURFACE ET ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS JOURNALIERS ESTIMÉS AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX DU RUISSEAU FOURCHETTE (BEAUCE) ET DU RUISSEAU AUX CASTORS (MONTÉRÉGIE)

Source : Michaud et Desjardins, 2011

RÉPONSES HYDROLOGIQUES EN CLIMAT FUTUR

L'évaluation des effets des changements climatiques sur les débits des rivières, le ruissellement et le bilan hydrique est un exercice qui implique l'utilisation des projections issues des modèles climatiques comme intrants aux modèles hydrologiques. Les études portant sur la modélisation des effets du climat futur

procèdent à la calibration du modèle hydrologique basé sur des observations météorologiques et des relevés hydrométriques avant d'y introduire plusieurs projections climatiques produites par des modèles régionaux pour établir des scénarios hydrologiques variés. Chaque scénario est simulé pour une période de référence et une période future afin de déterminer les changements hydrologiques moyens entre les deux périodes.

Afin de favoriser une gestion durable des ressources en eau et de limiter la vulnérabilité du Québec face aux changements climatiques, le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) a déposé en 2012 un rapport sur la production d'un atlas hydroclimatique illustrant les impacts des changements climatiques sur le régime hydrique naturel des tributaires du fleuve Saint-Laurent à l'horizon 2050 (CEHQ, 2012). À cette fin, le modèle hydrologique Hydrotel a été calibré et validé à l'aide des données d'un ensemble de stations hydrométriques, puis utilisé pour simuler les débits de quelque 2 850 tronçons de cours d'eau à partir de 31 projections climatiques utilisant le scénario d'émission de GES A2 et couvrant la période de référence (1971-2000) et la période future (2041-2070). Les projections climatiques utilisées comme intrants proviennent de 4 modèles régionaux pilotés par divers modèles globaux (5 en tout), procurant ainsi un éventail de réponses et de changements hydrologiques possibles entre les deux périodes. L'analyse de la distribution des changements provenant de tous les scénarios hydrologiques ainsi produits a permis d'évaluer l'incertitude des

résultats ou leur niveau de confiance, en tenant compte de l'étalement de la distribution autour de la médiane des changements. En tout, les changements pour 7 indicateurs ont été extraits des scénarios hydrologiques pour le premier semestre (janvier à juillet) et le second semestre (juillet à décembre) de l'horizon 2050 (Tableau 3). D'après ces projections, une hausse probable du débit journalier moyen de 2 à 18 % est anticipée pour les latitudes situées au nord de Québec. Pour la zone située le long de l'axe Québec-Montréal, la direction du changement est incertaine, la médiane variant entre -6 et +6 %. Pour les régions plus au sud, on observe majoritairement une diminution médiane de 2 à 14 % pour l'Estrie et la Montérégie, et jusqu'à 18 % pour des cours d'eau du sud du bassin de l'Outaouais (CEHQ, 2012). L'atlas hydroclimatique sera disponible dans la seconde moitié de 2013 et présentera alors des résultats bonifiés par l'ajout d'un autre ensemble de simulations climatiques. Pour plus de précisions, le lecteur est invité à consulter le rapport préliminaire sur l'atlas (CEHQ, 2012, p. 21-23).

TABLEAU 3. SYNTHÈSE DE LA DIRECTION ET DE LA QUANTIFICATION DES CHANGEMENTS POUR LES DIFFÉRENTS INDICATEURS HYDROLOGIQUES, INCLUANT LE DÉBIT JOURNALIER MOYEN (QM), LE JOUR MARQUANT LA MOITIÉ DE LA CRUE PRINTANIÈRE (MV26), LES CRUES MAXIMALES DE RÉCURRENCES DE 2 ANS (Q2), 20 ANS (Q20) ET 100 ANS (Q100), AINSI QUE LES ÉTIAGES¹ DE 7 JOURS DE RÉCURRENCES DE 2 ANS (Q2-7) ET 10 ANS (Q10-7). LES INDICES JJ ET JD RÉFÈRENT RESPECTIVEMENT AUX PÉRIODES DE JANVIER À JUIN ET DE JUILLET À DÉCEMBRE. LE CODE DE COULEUR EXPRIME L'APPRÉCIATION DE LA CONFIANCE ACCORDÉE À LA DIRECTION ANTICIPÉE DU CHANGEMENT, DE MÊME QUE L'INCERTITUDE ASSOCIÉE À LA QUANTIFICATION DE L'INDICATEUR

Indicateur	Direction du changement	Quantification		Commentaire	
		$\Delta 50$	$\Delta 10$ $\Delta 90$		
Crue	Q2 _{jj}	Augmentation au nord Diminution au sud	-0,3	-14,4 17,5	Gradient sud-nord -8% au sud / 5% au nord
	Q20 _{jj}	Augmentation	4,3	-14,0 27,0	
	Q100 _{jj}	Augmentation	6,0	-17,6 36,8	
	Q2 _{jd}	Augmentation au nord Diminution au sud	0,4	-21,8 24,7	Gradient sud-nord -20% au sud / +15% au nord
	Q20 _{jd}	Augmentation	13,3	-17,6 50,8	
	Q100 _{jd}	Augmentation	17,0	-23,0 73,2	
Étiage	Q2-7 _{jd}	Augmentation au nord Diminution au sud	-24,7	-40,4 7,0	Gradient sud-nord -50% au sud / + 10% au nord
	Q10-7 _{jd}	Diminution	-31,0	-48,8 2,1	Gradient sud-nord -65% au sud / 0% au nord
Autres	QM	Augmentation au nord Diminution au sud	1,3	-6,8 12,1	Gradient sud-nord -10% au sud / +15% au nord
	MV26	Diminution	-8,4	-12,7 -4,7	

Légende:	Niveau de confiance	Incertitude
	Élevé	Faible
	Modéré	Modéré
	Faible	Élevée

1. L'étiage correspond au niveau le plus bas d'un cours d'eau.

D'autres études faisant intervenir de nombreuses simulations climatiques (90 en tout) issues de modèles globaux combinés à divers scénarios d'émissions de gaz à effet de serre montrent que les débits annuels augmenteraient en moyenne de 1 à 15 % selon les différents bassins considérés à l'horizon 2050, avec des changements plus prononcés pour le nord du Québec (Ouranos, 2010). De même, il apparaît que les réponses hydrologiques, déjà bien distinctes d'une saison à l'autre, seront encore plus prononcées avec des hivers hydrologiquement plus actifs et des étés plus secs (Chaumont et Chartier, 2005; Minville *et al.*, 2009; Boyer *et al.*, 2010; Sulis *et al.*, 2011; Gombault, 2012a). En somme, les hausses de température et de précipitations projetées en climat futur affecteraient le bilan hydrique de façon beaucoup plus marquée sur une base saisonnière, particulièrement en périodes hivernale et printanière, que sur une base annuelle.

Redoux hivernaux et printemps hâtifs

D'après les résultats de l'atlas hydroclimatique, les changements concernant les crues printanières (débits maximaux journaliers entre janvier et juillet) sont relativement faibles et incertains pour la plupart des régions du Québec (incertitudes modérées allant de 30 % pour les crues survenant aux 2 ans à 55 % pour les crues survenant aux 100 ans), ce qui est amplement supérieur aux changements projetés, dont l'ordre de grandeur des médianes ne dépasse guère 10 %. En effet, le changement attendu pour les crues 20 ans et 100 ans va dans le sens d'une hausse pour 85 % du territoire avec des moyennes respectives de +4 et +6 % (excepté au sud du Saint-Laurent et pour la rivière des Outaouais où les simulations indiquent peu de changements). Le changement attendu pour les crues 2 ans présente, quant à lui, un gradient positif vers le nord avec des valeurs médianes de changements comprises entre -8 % au sud et +5 % au nord (CEHQ, 2012).

Une analyse des débits mensuels montre une augmentation des niveaux d'eau entre décembre et mars pour la plupart des études mentionnées précédemment (Ouranos, 2010; Chaumont et Chartier, 2005; Minville *et al.*, 2009; Boyer *et al.*, 2010; Sulis *et al.*, 2011; Gombault, 2012a). Ces hausses de débit s'expliquent par la hausse des précipitations liquides causées par des températures qui passeraient au-dessus de zéro plus souvent en hiver ainsi que par une hausse de la quantité totale de précipitations. Aussi, ces redoux hivernaux provoquent des épisodes de fonte du couvert de neige contribuant de la même façon à

la hausse des débits hivernaux et du ruissellement, mais aussi à la baisse moyenne du pic printanier du mois d'avril.

La figure 4 illustre les changements moyens (2041-2070 vs 1971-2000) possibles dans les bilans hydriques en milieu agricole en prenant pour exemples des parcelles drainées souterrainement, en culture de maïs sur un sol relativement bien égoutté (groupe hydrologique B) et une prairie sur le même type de sol non drainé. Ces bilans sont simulés dans un sous-bassin de la rivière aux Brochets situé dans la portion sud-est de la Montérégie, à partir du modèle hydrologique SWAT-Qc (Michaud *et al.*, 2008) calibré et validé pour la période 1971-2000 (Gombault, 2012a) et alimenté par 3 projections du MRCC 4.2.3 piloté par le Modèle canadien couplé de climat global (MCCG3.1v2, membres 3, 4 et 5) et par une projection du modèle climatique Arpège. Contrairement à la plupart des autres modèles hydrologiques utilisés, le modèle SWAT-Qc est conçu spécifiquement pour le milieu agricole, car il simule les pratiques de gestion et le drainage artificiel. Dans le cas du maïs, la hausse des températures de l'ordre de 3,35 à 4,20 °C, combinée à une augmentation des précipitations de l'ordre de 26 à 75 mm (décembre à février), se traduirait par une augmentation des hauteurs d'eau ruisselées de l'ordre de 18 à 30 mm, soit entre deux et trois fois le taux de ruissellement de surface de la période de référence (Gombault, 2012b). Alors qu'en climat actuel (1971-2000), en périodes hivernale et printanière, la neige constitue entre 43 et 46 % des précipitations totales, ce ratio diminuerait de 28 à 41 % en climat futur projeté pour la période 2041-2070 dans le bassin de la rivière aux Brochets (Gombault, 2012a).

Les changements attendus en ce qui concerne les températures et les précipitations auraient aussi pour effet de devancer la fonte du couvert de neige en climat futur, qui se situerait dès lors en mars plutôt qu'au début avril. En effet, les changements de l'indicateur MV26 présenté dans l'Atlas des impacts climatiques sur les régimes hydriques du Québec méridional indiquent un devancement d'environ 9 jours de la date à laquelle la moitié du volume d'eau de la crue s'est écoulé. Ceci se traduirait par un devancement de la crue printanière d'une à deux semaines pour l'horizon 2041-2070 avec une incertitude d'environ 8 jours (CEHQ, 2012). Une autre combinaison de modèles prévoit un devancement de la crue pouvant atteindre 2 mois pour un bassin dans le sud du Québec (Ouranos, 2010). Découlant d'une crue printanière relativement plus hâtive, les drains

souterrains assécheraient les sols plus tôt en climat futur. Dans le cas de l'exemple présenté à la figure 4, la hauteur d'eau drainée en avril augmente de l'ordre de 50 mm et diminue du même ordre en mai. À notre connaissance, peu d'études se sont penchées sur les changements possibles dans les bilans hydriques en milieu agricole drainé artificiellement. Par conséquent, les informations présentées ne sont pas encore validées en dehors du bassin par d'autres études et ne sont fournies qu'à titre indicatif pour des conditions similaires.

Malgré une fonte et un ressuyage plus hâtifs, le bilan hydrique printanier du bassin de la rivière aux Brochets, tout comme celui de la parcelle de maïs (Figure 4), demeure relativement inchangé pour ces 4 projections, puisque l'augmentation projetée de l'évapotranspiration semble contrebalancer l'augmentation des précipitations. Ainsi, et contrairement aux débits hivernaux, l'augmentation projetée

du débit printanier de la rivière demeure relativement stable. Le cheminement emprunté par les eaux excédentaires serait cependant appelé à changer. Le taux de ruissellement de surface au printemps établi par les 4 projections en climat futur est en effet réduit de 15 à 50 mm (8 à 42 %) en raison d'une fonte de neige moins importante. En contrepartie, les écoulements souterrains vers le cours d'eau sont favorisés, avec une augmentation projetée de 23 à 40 mm (11 à 22 %). Ceci laisse entrevoir que le dégel des sols est lui aussi hâtif, permettant à l'eau de s'infiltrer dans le sol et d'être évacuée par les drains et écoulements souterrains. Sulis *et al.* (2011) ont aussi simulé, à partir du modèle hydrologique CATHY et du MRCC, une augmentation de la recharge des nappes en hiver qui favorise les écoulements souterrains hivernaux et printaniers. En revanche, en raison du devancement de la fonte, la recharge diminue au printemps, étant transférée plus tôt dans l'année.

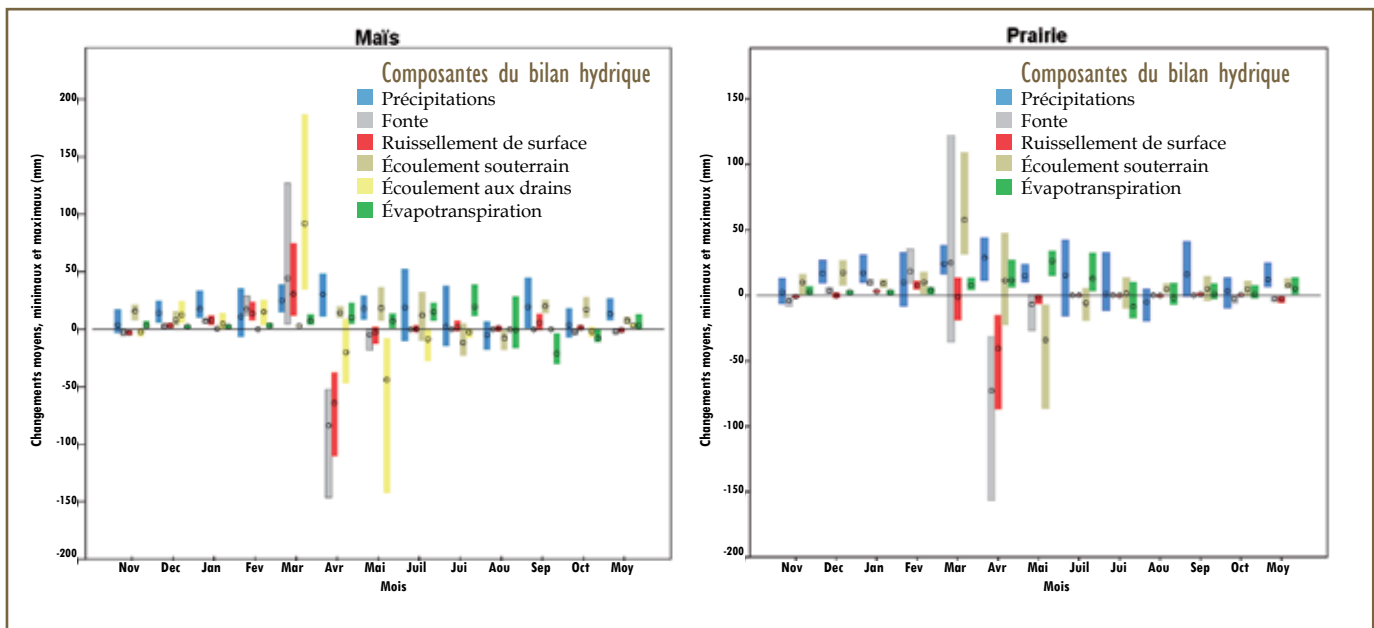


FIGURE 4. MOYENNES (CERCLES), LIMITES SUPÉRIEURES ET INFÉRIEURES DES CHANGEMENTS MENSUELS POSSIBLES (2041-2070 VS 1971-2000) DANS LES BILANS HYDRIQUES D'UNE CULTURE DE MAÏS EN SOL DRAINÉ DE GROUPE HYDROLOGIQUE B ET D'UNE CULTURE DE PRAIRIE SUR LE MÊME TYPE DE SOL NON DRAINÉ, SIMULÉS POUR LE BASSIN VERSANT DU RUISSEAU WALBRIDGE (MONTÉRÉGIE) À PARTIR DU MODÈLE HYDROLOGIQUE SWAT-QC CALIBRÉ ET VALIDÉ POUR LA PÉRIODE 1970-2000, ALIMENTÉ PAR 4 PROJECTIONS DU MRCC 4.2.3 ET PILOTÉ PAR LE MODÈLE CANADIEN COUPLÉ DE CLIMAT GLOBAL (MCCG3.1V2, MEMBRE 3,4 ET 5) ET DU MODÈLE ARPÈGE, MEMBRE 1

Source : Gombault, 2012b

Étés et automnes plus secs

Pour la période estivale, les résultats de nombreuses projections rassemblées dans le rapport d'Ouranos et les études citées précédemment prévoient une baisse des débits mensuels moyens (Ouranos, 2010; Chaumont et Chartier, 2005; Minville *et al.*, 2009; Boyer *et al.*, 2010; Sulis *et al.*, 2011; Gombault, 2012a).

L'Atlas sur l'impact des changements climatiques sur les régimes hydriques du Québec méridional du CEHQ indique que les étiages d'une durée de 7 jours consécutifs et d'une récurrence de 2 ans diminueraient pour 90 % du territoire. La diminution de ces étiages pourrait atteindre 50 % dans le sud, mais serait moins forte en montant vers le nord où on pourrait même rencontrer une légère augmentation de 10 %. L'incertitude est de 45 %, mais pour 95 % du territoire modélisé, la diminution est jugée probable à très probable (Tableau 3). Les étiages de 7 jours et d'une récurrence de 10 ans diminueraient un peu plus. D'autre part, les crues estivales de récurrences de 2 ans (Q2), 20 ans (Q20) et 100 ans (Q100) auraient tendance à augmenter, sauf les crues 2 ans qui diminueraient au sud du Saint-Laurent. L'augmentation des crues sans hausse significative des précipitations s'expliquerait par la hausse d'évènements de précipitations intenses. L'incertitude reliée à ces crues reste cependant élevée en raison de la difficulté qu'éprouvent encore les modèles climatiques à simuler ces précipitations intenses. Des étiages plus sévères accompagnés de crues plus élevées, indiquant que les conditions hydrologiques estivales seront plus variables, sont cohérentes avec les projections climatiques énoncées précédemment et qui permettent d'anticiper des périodes plus chaudes et sèches prolongées, entrecoupées de précipitations plus intenses.

Le scénario inférieur de l'Atlas agroclimatique du Québec indique, lui aussi, que les conditions estivales futures pourraient être plus sèches. Les surplus d'eau (précipitations moins évapotranspiration) pendant la saison de croissance connaîtront une diminution de l'ordre de 43 à 62 mm pour les régions plus au sud et de 24 à 42 mm ailleurs au Québec (carte). Parallèlement, les déficits s'aggraveront. Cependant, le scénario supérieur prévoit plutôt des augmentations des surplus d'eau (carte) de l'ordre de 53 à 91 mm selon un gradient nord-sud. L'incertitude reste donc élevée.

Selon la figure 4, qui illustre les changements possibles dans les bilans hydriques de parcelles de maïs

et prairie d'un sous-bassin de la rivière aux Brochets, les 4 simulations utilisées projettent une réduction moyenne du ruissellement et du débit de la rivière. Soulignons cependant que la réduction du débit estival de la rivière serait relativement moindre que celle qui découlerait normalement de la seule baisse des précipitations, simulées pour ce cas-ci, combinée à l'augmentation de l'évapotranspiration. En fait, l'accroissement des écoulements souterrains en périodes hivernale et printanière bénéficierait à la recharge de l'aquifère, qui contribue dès lors à l'écoulement de base du cours d'eau en période estivale.

Bien que la période estivale soit généralement ponctuée de périodes de déficits hydriques (Gasser *et al.*, 2010), des précipitations intenses génèrent parfois d'importants épisodes de ruissellement accompagnés de forts taux d'érosion. Les crues des 11 et 19 juin 2008 (Figure 3) témoignent de ce phénomène, alors que des précipitations totalisant 34 et 35 mm s'abattent en Montérégie et en Beauce respectivement. La forte intensité des précipitations dépasse dès lors la capacité d'infiltration des sols, générant un abondant ruissellement de surface de même que d'importantes charges de sédiments. Les courbes IDF (intensité, durée, fréquence) des précipitations, récemment mises à jour pour les différentes régions agricoles du Québec (Mailhot et Talbot, 2011), traduisent bien la variabilité spatiale et temporelle de ces épisodes de forte activité hydrologique de surface. La simulation des précipitations de forte intensité sur de très courtes durées en climat futur demeure cependant compliquée par la dimension typiquement restreinte des cellules orageuses, comparativement à la taille de 45 X 45 km des cellules des grilles sur lesquelles les simulations régionales de climat sont actuellement disponibles pour le Québec. Dans le cadre d'une étude récente, Huard et Chaumont (2011) ont analysé l'augmentation de l'intensité des précipitations maximales annuelles pour différentes périodes de retour (2, 5, 10 et 25 ans) et deux durées d'évènements (12 et 24 heures) qui sont mieux simulées par les modèles régionaux de climat. Ils ont montré que les modèles projettent une augmentation de l'ordre de 10 % des précipitations maximales à l'horizon 2041-2070 avec un niveau d'incertitude qui augmente avec la rareté des évènements.

Dans le cas de la figure 4 et des simulations produites pour le bassin de la rivière aux Brochets, l'augmentation projetée des précipitations automnales ne se traduit pas par une augmentation sensible

du débit de la rivière. Compte tenu que les projections automnales du taux d'évapotranspiration demeurent relativement inchangées, les excédents hydriques profiteraient dès lors à la recharge de l'aquifère (Gombault, 2012a). Une conclusion similaire a été rapportée par Sulis *et al.* (2011) pour le bassin versant de la rivière des Anglais en Montérégie-Ouest. Cependant, le nombre de projections climatiques utilisées est trop faible pour évaluer la certitude de ce résultat.

ENJEUX ET PISTES D'ADAPTATION POUR LA PRODUCTION AGRICOLE

Les effets des changements climatiques sur le bilan hydrique et la réponse hydrologique des cours d'eau posent certains défis, mais offrent aussi plusieurs opportunités en matière de gestion des sols, des cultures et de l'eau. L'aménagement des terres, les pratiques culturales, les pratiques d'irrigation et les modalités de la fertilisation sont particulièrement concernés.

Aménagement hydroagricole et gestion de l'eau en climat futur

L'augmentation de la fréquence des redoux hivernaux attendus dans le contexte des changements climatiques constitue un enjeu important pour le régime hydrique des bassins versants agricoles québécois. Actuellement, le dimensionnement des ouvrages hydrauliques en milieu agricole est en bonne partie dicté par l'intensité des précipitations, calculée à partir des observations météorologiques de longue durée pour les mois de mai à octobre (courbes IDF). L'estimation du débit de pointe demeure la principale préoccupation en période non hivernale, alors que les ouvrages sont soumis à de fortes intensités de précipitations. Dans la perspective où les épisodes de fonte et de pluie hivernale sont appelés à croître en fréquence au Québec en climat futur, il devient dès lors important de développer des critères et des outils de conception des ouvrages hydroagricoles adaptés aux épisodes de redoux hivernaux.

Si le volume de ruissellement global est plus élevé, les risques de provoquer une inondation sont probablement augmentés, dans la mesure où les ouvrages et les cours d'eau offriront une capacité résiduelle moindre s'ils sont plus généralement sollicités, devenant alors plus vulnérables à un épisode de pointe

qui surviendrait au cours de cette période de forte hydraulicité générale. Par ailleurs, une augmentation du volume, même sans augmentation du débit de pointe, peut être problématique si des ouvrages de rétention sont impliqués. Il se peut alors qu'il y ait débordement si l'ouvrage n'a pas le temps de se vidanger assez rapidement ou s'il n'a tout simplement pas de débit de soutirage. Enfin, en ce qui a trait à l'érosion, on peut penser que, même si le débit de pointe n'était pas augmenté, le seul fait qu'un débit relativement élevé s'écoule sur une période prolongée favoriserait une érosion soutenue.

Parallèlement à la prise en compte des redoux hivernaux dans la conception des ouvrages hydrauliques en milieu agricole, rappelons que l'augmentation projetée des intensités de précipitations en climat futur estival (Huard et Chaumont, 2011) appelle aussi à majorer le dimensionnement des ouvrages hydrauliques. L'aménagement des cours d'eau municipaux est aussi concerné, dans la mesure où les risques d'inondation en période hivernale s'accroissent. En plus de la protection antiérosive des secteurs névralgiques pour le maintien de l'efficacité du réseau de drainage souterrain, la conservation, voire la restauration des milieux humides et des plaines inondables peuvent jouer un rôle important dans le laminage des crues et le captage des sédiments transportés par les crues hivernales. Par exemple, l'application du principe de « corridor de liberté » consiste à préserver les zones de méandres naturelles et les zones inondables des cours d'eau (Kondolf, 2011). L'efficacité du corridor de liberté ou de la plaine inondable aménagés tient cependant à leur capacité de stockage et de sédimentation qui peut être limitée. La vocation de certaines plaines inondables, compromise par le creusage du cours d'eau, peut aussi être rétablie. Le « pincement » de la section hydraulique du cours d'eau pratiqué en France (EPAMA, 2006) contribue par exemple à laminar la crue et à favoriser la sédimentation en marge du cours d'eau, sans pour autant limiter la libre circulation des poissons. Plus près de chez nous, au Vermont, d'importantes charges de sédiments retenues par des plaines inondables ont été documentées suivant la « reconnection » de plaines inondables (VANR et VAT, 2008).

Au sud de la province, pour les parcelles profitant d'un relief plat, le contrôle du drainage souterrain constitue une autre opportunité intéressante en matière de gestion des sols et de l'eau en climat futur. La diminution du couvert de neige et sa fonte

plus hâtive projetées par les modèles climatiques se traduiront vraisemblablement par un ressuyage des champs et un assèchement des sols plus tôt au printemps. L'approche consiste alors à limiter l'action des drains en installant des chambres de contrôle auprès des collecteurs du réseau de drains souterrains. Un tel contrôle du rabattement de la nappe phréatique pourrait s'avérer rentable dans les sols et les cultures présentant les conditions favorables à de telles installations en contribuant au maintien de la réserve en eau utile du sol à son niveau optimal. Le drainage contrôlé présente par ailleurs un avantage non négligeable au plan de la réduction des pertes d'éléments nutritifs par lessivage, particulièrement l'azote (N). Les mesures de flux de nitrates au drain colligées en parcelles expérimentales de grandes cultures au Québec font état de pertes annuelles de l'ordre de 30 à 60 kg N/ha selon la source de la fertilisation azotée (Giroux et Royer, 2006). La réduction du volume des eaux de drainage souterrain exportées se traduit dès lors par un stockage de l'azote dans le profil du sol, au bénéfice des cultures. Sur la base d'une concentration moyenne de nitrates observée dans les drains souterrains en Montérégie de l'ordre de $8,1 \pm 5,3$ mg N-NO₃/litre (Poirier, 2012), une réduction de la hauteur d'eau drainée de l'ordre de 100 mm correspond à une réduction des exportations de nitrates de l'ordre de $7,3 \pm 0,3$ kg N-NO₃/ha.

En ce qui a trait au phosphore (P), considérant que jusqu'à 40 % du flux annuel de P transite par les drains en sol argileux (Poirier, 2012; Jamieson *et al.*, 2003), la réduction du volume des eaux drainées pourrait aussi constituer une mesure efficace pour prévenir l'eutrophisation des plans d'eau en bassins versants à vocation agricole. Reconnaisant l'intérêt agroenvironnemental du drainage contrôlé, l'organisme Conservation de la Nation Sud (CNS) propose des structures de drainage contrôlé aux agriculteurs de l'Est ontarien dont les champs relèvent de sa compétence. Les frais sont pris en charge par l'organisme, à la condition que les structures soient gérées par le bénéficiaire selon les principes de gestion bénéfique de drainage (CNS, 2012). L'application d'une telle mesure devrait cependant s'accompagner d'une planification rigoureuse, de façon à exclure toute augmentation sensible du taux de ruissellement de surface, en moyenne dix fois plus concentré en phosphore que les eaux de drainage. Dans l'exemple du sous-bassin de la rivière aux Brochets, les réductions projetées pour le ruissellement de surface en climat futur de l'ordre de 50 mm en avril (Figure 4) devraient profiter à la faisabilité de cette pratique.

Enfin, l'implantation de systèmes d'irrigation de précision est une autre piste d'adaptation s'adressant plus spécifiquement au secteur maraîcher, appelé à gérer un déficit hydrique plus important en climat futur durant la période estivale. En plus d'assurer une meilleure gestion de l'eau d'irrigation, cette avenue permet d'apporter les fertilisants avec l'eau d'irrigation. Cette fertigation permet ainsi de mieux contrôler la perte de nutriments en fournissant aux plantes les quantités exactes dont elles ont besoin, en temps opportun. Les risques de lessivage sont par ailleurs réduits grâce à une meilleure absorption des nutriments par les plantes et à la possibilité de réduire la quantité de fertilisants appliquée. La fertigation réduirait aussi les besoins d'irrigation grâce à un meilleur développement du système racinaire des plantes (Yelle, 2006).

Pratiques culturales en climat futur

En climat futur, le principal facteur limitant de la productivité des récoltes demeurera vraisemblablement le même qu'en climat actuel : les propriétés physiques du sol. Des quatre symptômes de problèmes de croissance des cultures répertoriés dans *Les profils de sol agronomiques - Un outil de diagnostic de l'état des sols* (Weill, 2011), tous peuvent être causés par la compaction des sols et un égouttement du sol déficient. D'abord, un sol qui ne s'égoutte pas assez rapidement au printemps retarde les semis, qui doivent se faire dans des conditions de sol suffisamment ressuyé (Gasser *et al.*, 2010). Un sol froid et humide pendant une période prolongée après les semis favorise le pourrissement des semences, occasionnant une levée inégale, des pertes de rendement (Weill, 2011) et, parfois, un réensemencement du champ comme ce fut le cas durant le printemps tardif de 2011 en Montérégie (Gouvernement du Québec, 2011). Un mauvais égouttement des sols et des conditions de pluies excessives durant la saison de culture raccourcissent les périodes durant lesquelles les travaux au champ peuvent être exécutés sans produire d'effet adverse sur la qualité du profil cultural. L'utilisation de la machinerie lourde en conditions de sol humide a pour effet de compacter le sol non seulement à la surface, mais jusqu'en profondeur sous la couche de labour (Weill, 2011). Une compaction excessive du sol réduit la capacité d'infiltration de l'eau, les échanges de gaz de même que la présence d'oxygène dans le sol. Outre les problèmes d'égouttement, la compaction restreint la croissance des racines à un volume limité du sol. Qu'elles soient atrophiées, déformées

ou confinées, la capacité des racines à aller chercher l'eau, l'oxygène et les éléments nutritifs dans un sol compacté est alors limitée et se traduit par des problèmes de croissance et des pertes de rendements.

En climat futur, le ressuyage hâtif des terres au printemps présente *a priori* de nombreux avantages au plan des pratiques agricoles et de la préservation des propriétés physiques du sol. La faisabilité de la culture sur résidus, telle que mise en œuvre dans le travail réduit du sol et le semis direct, sera favorisée. L'humidité élevée du sol découlant de la présence de résidus de culture constitue en effet un des principaux facteurs limitants de ces pratiques. Une augmentation des superficies en cultures annuelles non labourées à l'automne est donc appréhendée, particulièrement sur les sols lourds (argileux) où, jusqu'à présent, la pratique du semis direct est demeurée relativement moins répandue qu'en sol plus léger.

La présence d'une couverture de résidus devrait aussi réduire l'impact des déficits hydriques en été par son influence sur l'infiltration et la conservation de l'eau dans le sol. De la même façon, la rotation des cultures et l'introduction de cultures de couverture seront facilitées par l'allongement de la saison de croissance. Les cultures de couverture implantées à la dérobée, suivant la récolte d'une céréale à paille ou un retour de prairie par exemple, profiteront d'une période de croissance allongée et d'une capacité accrue de stockage des nitrates résiduels. Le principe de la « culture éponge » sera ainsi favorisé en climat futur, alors que la hausse des températures estivales et automnales sera propice à une minéralisation accrue de l'azote.

La pratique d'épandage des engrais de ferme en présemis des cultures est aussi appelée à prendre de l'ampleur en raison d'une portance du sol relativement plus élevée au printemps en climat futur. Un sol plus sec est relativement moins susceptible de voir ses propriétés physiques se dégrader lors du passage des poids lourds, ce qui en soi est une bonne nouvelle. Bien que les résultats de modèles hydrologiques avec intrants issus des modèles climatiques laissent entrevoir une baisse sensible du ruissellement de surface pour cette période de l'année en climat futur (environ 60 mm pour l'exemple du bassin de la rivière aux Brochets modélisé par Gombault, 2012a) les mois d'avril et mai demeureront néanmoins vulnérables aux épisodes de ruissellement (Figure 3). Rappelons que le ruissellement de surface interagit

avec les premiers millimètres de la surface du sol, où il est susceptible de prélever les formes réactives du phosphore des engrais de ferme fraîchement apportés. L'incorporation des engrais de ferme épandus en présemis au printemps conserve ainsi toute sa pertinence en climat futur, à titre de pratique agroenvironnementale simple et très efficace pour réduire le prélèvement des formes réactives de phosphore par le ruissellement de surface. Pour une parcelle profitant à la fois du semis direct et de l'épandage d'engrais de ferme, une importante mesure d'adaptation consistera à intégrer un travail superficiel du sol au printemps qui concilie la gestion du couvert de résidus et l'incorporation des lisiers et fumiers. La parcelle profite ainsi d'une protection optimale contre l'érosion durant la période la plus à risque de ruissellement de surface, tout en minimisant les pertes de phosphore dans l'environnement.

En ce qui a trait à l'azote, l'incorporation hâtive des engrais de ferme constitue aussi une méthode efficace de prévention des pertes d'azote par volatilisation ammoniacale. Une saison de croissance hâtive et plus humide en climat futur favorisera cependant le lessivage des nitrates en début de saison, renforçant la pertinence de fractionner les apports de fertilisants azotés. La détermination sur mesure de l'apport d'engrais azoté au moyen du dosage des nitrates du sol en début d'été, selon une approche validée au Québec par Nyiraneza *et al.* (2010), constitue une autre mesure d'adaptation qui présente des bénéfices à la fois pour la ferme en matière de coût de la fertilisation des cultures et pour la communauté dans son ensemble en termes de qualité de l'eau.

En terminant, rappelons qu'un sol bien structuré et fertile réunit les conditions favorables au bon développement des racines, leur permettant de puiser plus facilement dans le sol les éléments nutritifs et l'eau nécessaire à la croissance de la culture. Un profil cultural de bonne qualité régularise mieux qu'un sol dégradé les mouvements d'eau, les échanges de chaleur et de gaz et la disponibilité des nutriments à travers les différentes couches de sol (Gasser *et al.*, 2010). La sensibilité des plantes à la sécheresse et aux excès d'eau est alors réduite. Un sol possédant de bonnes propriétés physiques, découlant d'un aménagement des terres et de pratiques culturales optimales, constitue ainsi un important, sinon le principal gage de productivité des cultures au Québec compte tenu de la courte saison de production et du bilan hydrique excédentaire. C'est aussi le meilleur rempart contre

les modifications du régime hydrique en climat futur, en prévenant les effets adverses des excès ainsi que des déficits en eau.

RÉFÉRENCES

Atlas agroclimatique du Québec (www.agrometeo.org) (consulté en mai 2012).

Boyer, C., D. Chaumont, I. Chartier et A.G. Roy. 2010. *Impact of Climate Change on the Hydrology of St. Lawrence tributaries*. *Journal of Hydrology* 384(1-2): 65-83.

CEHQ. 2012. *Production de l'atlas 2012 illustrant les impacts des changements climatiques sur le régime hydrique des tributaires du fleuve Saint-Laurent à l'horizon 2050*. J.F. Cyr, S. Lachance-Cloutier, S. Ricard, D. Roussel et R. Turcotte. Rapport préliminaire- mars, Centre d'expertise hydrique du Québec, Québec.

Chaumont, D. et I. Chartier. 2005. *Développement de scénarios hydrologiques à des fins de modélisation de la dynamique sédimentaire des tributaires du Saint-Laurent dans un contexte de changements climatiques*. Rapport technique, Ouranos, Montréal. 37 p.

CNS. 2012. *Structures de drainage contrôlé disponibles* [en ligne]. Conservation de la Nation Sud <http://www.nation.on.ca/fr/> (consulté en mai 2012).

Coulibaly, P. et D.H. Burn. 2005. *Spatial and temporal variability of Canadian seasonal streamflows*. *Journal of Climate* 18(1): 191-210.

Drouin, A., J.-D. Sylvain, A. Michaud, O. Le Bourgeois, I. Beaudin, M. Grenier, G. Baribeau et J. Desjardins. 2012. *Indicateurs de redoux hivernaux adaptés à la prévision hydrologique en bassins versants agricoles*. Rapport de projet de recherche, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Ouranos, PACC-26 et ICAR.

Environnement Canada. 2010. *El Nino* [en ligne]. <http://www.ec.gc.ca/adsc-cmda/default.asp?lang=Fr&n=208ED67A-1> (consulté en novembre 2011).

Environnement Canada. 2011. *Les anomalies de l'hiver 2009-2010 et leurs causes* [en ligne]. Présentation PowerPoint du Service Météorologique du Canada. http://www.climat-quebec.qc.ca/home.php?id=special_analyses&mpn=climate_mon (consulté en novembre 2011).

EPAMA. 2006. *Aménagement de la zone de ralentissement dynamique de crue de Mouzon* [en ligne]. G. Rouas, S. Renou et A. Gadet. Document de synthèse. 28 p. http://www.epama.fr/documents/doc_synthese_zrzc_mouzon.pdf (consulté en avril 2012).

Gasser, M.-O., J. Gallichand, A. Michaud, M. Duchemin et S. Allaire. 2010. *La gestion de l'eau et du profil cultural*. Dans : Guide de référence en fertilisation, 2^e édition. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Québec. 473 p.

Giroux, M. et R. Royer. 2006. *Influence des modes de fertilisation sur les pertes d'éléments nutritifs dans les drains agricoles sous le maïs-grain, l'orge et le canola*. Observatoire de la qualité des sols du Québec, site de Saint-Lambert-de-Lauzon, Cahier no. 6, Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA), Québec.

Gombault, C. 2012a. *Modelling water quality of the Pike River Watershed under four climate change scenarios*. Mémoire de maîtrise, Université McGill, Montréal. 170 p. <http://webpages.mcgill.ca/staff/deptshare/FAES/066-Bioresource/Theses/index.htm> (à venir).

Gombault, C. 2012b. *Changements moyens (2041-2070 vs 1971-2000) dans les bilans hydriques de cultures de maïs en sol drainé de groupe hydrologique B (a), ainsi qu'en culture de prairie sur le même type de sol non drainé (b) simulés pour le bassin versant du ruisseau Walbridge, en Montérégie*. Brace Center. Université McGill, Sainte-Anne-de-Bellevue, Québec.

Gouvernement du Québec. 2011. *Bilan de mi-saison 2011 en assurance récolte : Région de la Montérégie* [en ligne]. <http://209.171.32.187/gouvqc/communiqués/ME/Juillet2011/12/c4683.html>

Huard, D. et D. Chaumont. 2011. *Extrêmes de précipitations en climat futur sur les régions agricoles du Québec*. Ouranos, Montréal. 65 p.

- IPCC. 2007. *How reliable are the Models used to make projections of future climate change ?* [en ligne]. Dans : Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/faq-8-1.html (consulté en novembre 2011)
- Jamieson, A., C.A. Madramootoo et P. Enright. 2003. *Phosphorus losses in surface and subsurface runoff from a snowmelt event on an agricultural field in Quebec*. Canadian Biosystems Engineering / Le génie des biosystèmes au Canada 45: 1.1-1.7.
- Kondolf, G.M. 2011. *Setting goals in river restoration: when and where can the river "heal itself"?* Dans : Stream Restoration in Dynamic Fluvial Systems: Scientific Approaches, Analyses, and Tools, Simon, A., Bennett, S.J., Castro, J.M. (Eds). Geophysical Monograph Series, Vol. 194, AGU, Washington, D.C. p. 29-43.
- Lepage, M.P., L. Bourdages et G. Bourgeois. 2011. *Interprétation des scénarios de changements climatiques afin d'améliorer la gestion des risques pour l'agriculture* [en ligne]. 15 p. http://www.ouranos.ca/media/publication/164_PAGR0102.pdf (consulté en novembre 2011).
- Mailhot, A., S. Duchene, D. Caya et G. Talbot. 2007. *Assessment of future change in intensity-duration-frequency (IDF) curves for Southern Québec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM)*. Journal of Hydrology 347 (1-2): 197-210.
- Mailhot A. et G. Talbot . 2011. *Mise à jour des estimateurs Intensité-Durée-Fréquence (IDF) et Hauteur-Durée-Fréquence (HDF) pour le sud-Québec*. Institut national de la recherche scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Tome I - Données et méthodes. Rapport de recherche No R-1259, 60p. Tome II - Résultats. Rapport de recherche No R-1260. Québec. 281 p.
- Michaud, A.R., S. Seydoux, I. Beaudin et C. Gombault. 2008. *Combinaisons de pratiques de gestion bénéfiques et qualité de l'eau : Étude par modélisation hydrologique de deux bassins versants en Montérégie (Québec)*. Série technique de l'initiative nationale d'élaboration des normes agroenvironnementales, Rapport no 4-64. 141 p.
- Michaud, A.R., J. Desjardins, M. Grenier et R. Lauzier. 2009b. *Suivi de la qualité de l'eau des bassins versants expérimentaux Ewing et Aux Castor - Dans le cadre du projet Lisière verte* [en ligne]. Rapport final de projet, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Coopérative de solidarité du bassin versant de la rivière aux Brochets, AAC (PAS-CAA) et MAPAQ, Québec. 27 p. <http://www.irda.qc.ca/fr/Articles-scientifiques/197>
- Michaud A. et J. Desjardins. 2011. *Fonte, pluies, couvert de neige et débits hors période de croissance (de novembre à avril) des ruisseaux Fourchette et Castor entre 2003 et 2008*. Données et graphiques Excel, IRDA, Québec.
- Michaud, A.R., J. Deslandes, J. Desjardins et M. Grenier. 2009a. *Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles* [en ligne]. Rapport final de projet. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), MAPAQ, Club du bassin LaGuerre, Dura-Club, Club de fertilisation de la Beauce, Fonds d'action québécois pour le développement durable, Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec et Programme d'aide technique de Couverture végétale du Canada. Québec, 155 p. <http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Rapport%20final.pdf>
- Minville, M., F. Brissette, S. Krau et R. Leconte. 2009. *Adaptation to Climate Change in the Management of a Canadian Water-Resources System Exploited for Hydropower*. Water Resource Management 23 (14): 2965-2986
- Nyiraneza, J., A. N'Dayegamiye, M.-O. Gasser, M. Giroux, M. Grenier, C. Landry et S. Guertin. 2010. *Soil and Crop Parameters Related to Corn Nitrogen Response in Eastern Canada*. Agronomy Journal 102: 1478-1490.
- Ouranos. 2010. *Savoir s'adapter aux changements climatiques* [en ligne]. C. DesJarlais, M. Allard, D. Bélanger, A. Blondlot, A. Bouffard, A. Bourque, D. Chaumont, P. Gosselin, D. Houle, C. Larrivée, N. Lease, A.T. Pham, R. Roy, J.-P. Savard, R. Turcotte et C. Villeneuve. Montréal. 128 p. http://www.ouranos.ca/fr/publications/documents/sscc_francais_br-V22Dec2011_000.pdf (consulté en novembre 2011).
- Poirier, C.P. 2012. *Phosphorus composition in relation to the physico-chemical parameters of surface and tile drain water in agricultural watershed of the Monteregie-East, Qc, Canada*. Thèse de doctorat, Université McGill, Montréal. 128 p.

Raupach, M.R., G. Marland, P. Ciais, C. Le Quéré, J. G. Canadell, G. Keppler et C.B Field. 2007. *Global and Regional Drivers of Accelerating CO₂ emissions*. PNAS 104 (24): 10288-10293.

Sulis, M., C. Paniconi, C. Rivard, R. Harvey et D. Chaumont. 2011. *Assessment of climate change impacts at the catchment scale with a detailed hydrological model of surface-subsurface interactions and comparison with a land surface model*. Water Resources Research 47.

VANR et VAT. 2008. *Sediment Storage and Phosphorus Removal Evaluation*. Vermont Agency of Natural Resources and Agency of Transportation Black Creek Floodplain Restoration Project. Fiche technique. 4 p.

Weill, A. 2011. *Les profils de sol agronomiques. Un outil de diagnostic de l'état des sols*. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 132 p.

Yelle, P.-E. 2006. *Essais et pratiques de fertigation au Québec*. Colloque sur l'irrigation : L'eau source de qualité et de rendement, 10 février, Boucherville, Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 8 p.