

**Étude des volumes de précipitation et
d'évaporation pour le calcul des
structures d'entreposage de fumier
dans un contexte de changements
climatiques**

Rapport final

Présenté à :
Ouranos



Institut de recherche
et de développement
en agroenvironnement

Projet IRDA # : 901013
Projet Ouranos # 550010-118

Répondant et responsable scientifique :
Stéphane Godbout, ing., P.Eng.,
agr., Ph.D.

Rapport élaboré par :
Stéphane Godbout, ing., P.Eng., agr., Ph.D.
Patrick Brassard, ing. jr, M. Sc.
Frédéric Pelletier, ing., M. Sc.
Michèle Grenier, M. Sc.
Patrick Grenier, Ph.D.
Luc Belzile, M. Sc.
Christine Landry, agr., Ph.D.
Frédéric Bolduc, agr.
Oussama Benslimane, agr.
David Bilodeau, B. Sc.

Octobre 2013



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

Table des matières

Table des matières	2
Liste des tableaux	5
Liste des figures	7
1 Introduction et mise en contexte	8
2 But et objectifs	9
3 Méthode de travail	10
3.1 Comités de travail	10
3.2 Structure du rapport.....	11
4 Choix d'un modèle d'évapotranspiration	11
4.1 Mise en contexte.....	11
4.2 Revue de littérature : Méthodes d'évaluation de l'évapotranspiration.....	12
4.2.1 Méthodes aérodynamiques	13
4.2.2 Méthodes combinatoires	13
4.2.3 Méthodes basées sur le rayonnement.....	14
4.2.4 Méthodes basées sur la température	14
4.2.5 Comparaison des différents modèles d'évapotranspiration.....	16
4.3 Résultats et discussion	17
5 Mise à jour des valeurs d'accumulation d'eau	18
5.1 Mise en contexte.....	18
5.2 Méthodologie : Détermination de l'accumulation en fonction des périodes de retour	19
5.2.1 Données d'observation (Grenier, 2013).....	19
5.2.2 Évaluation de l'accumulation d'eau.....	19
5.2.3 Analyse statistique	20
5.2.3.1 But de l'analyse statistique	20
5.2.3.2 Distribution de fréquence des données d'accumulation d'eau	21
5.2.3.3 Distribution des fréquences cumulées	21
5.2.3.4 Probabilité et récurrence	22
5.2.3.5 Possibilité d'ajustement des données à une fonction de distribution	
théorique	23
5.2.3.6 Modèle mathématique.....	23
5.2.3.7 Estimation de l'erreur statistique.....	25
5.3 Résultats et discussion	26
5.3.1 Utilisation du modèle de Thornthwaite pour le calcul de l'évapotranspiration.....	26
5.3.2 Utilisation du modèle de Baier et Robertson pour le calcul de l'évapotranspiration	
28	

5.3.3	Comparaison entre les accumulations calculées par les méthodes de Thornthwaite et de Baier et Robertson pour les années 1981-2009	28
6	Scénarios climatiques	29
6.1	Mise en contexte.....	29
6.2	Méthodologie	29
6.2.1	Choix des indicateurs climatiques et des balises de données climatiques à produire	29
6.2.2	Simulations climatiques (Grenier, 2013)	29
6.3	Résultats et discussion (Grenier, 2013)	30
7	Élaboration des scénarios agronomiques	32
7.1	Mise en contexte.....	32
7.2	Revue de littérature.....	32
7.2.1	Période d'épandage	32
7.2.2	Indicateurs agroclimatiques	33
7.2.2.1	Indices thermiques.....	34
	Dates du dernier gel printanier et du premier gel automnal.....	34
	Longueur de la saison de croissance	34
	Les cumuls thermiques.....	36
7.2.2.2	Indices hydriques.....	36
	Cumul des précipitations	36
7.3	Méthodologie	37
7.4	Résultats et discussion	38
7.4.1	Beauce.....	38
7.4.2	Montérégie	41
7.4.3	Lanaudière	42
7.5	Conclusion.....	42
8	Calcul des accumulations d'eau pour les périodes futures.....	43
8.1	Mise en contexte.....	43
8.2	Méthodologie	43
8.3	Résultats et discussion	44
8.3.1	Accumulations pour la période 2016-2044.....	44
8.3.2	Accumulations pour la période 2041-2069.....	46
9	Analyse économique	48
9.1	Mise en contexte.....	48
9.2	Méthodologie	49
9.3	Résultats et discussion	49
10	Conclusions et recommandations	54

11	Références	57
12	Annexes	63
	Annexe 1. Revue de littérature sur les modèles d'évapotranspiration.....	63
	Annexe 2. Mise à jour des valeurs d'accumulation	68
	Annexe 3. Accumulations d'eau pour la période 2016-2044	99
	Annexe 4. Accumulation d'eau pour la période 2041-2070	139
	Annexe 5. Comparaison des accumulations passées et futures (analyse de covariance)	149
	Annexe 6. Guide technique (version préliminaire)	150
	Annexe 7. Démonstration mathématique du calcul de la valeur nette actualisée (VAN)	163

Liste des tableaux

Tableau 1. Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration (adapté d'Oudin, 2004)	13
Tableau 2. Constantes de l'équation 6 pour les douze stations primaires	15
Tableau 3. Accumulations d'eau pour la station de La Pocatière, période d'octobre à mai	21
Tableau 4. Accumulations et fréquences cumulées pour la station de La Pocatière, période d'octobre à mai	22
Tableau 5. Comparaison des accumulations (mm) pour les périodes 1961-1990 et 1981-2009 avec la méthode de Thornthwaite	27
Tableau 6. Résultats des tests de comparaison des accumulations pour les périodes 1961-1990 et 1981-2009 avec la méthode de Thornthwaite	27
Tableau 7. Comparaison des deux méthodes d'évaluation de l'évapotranspiration pour les années 1981-2009	28
Tableau 8. Médianes des deltas (Δ) de températures moyennes (T_{moyen}) et de précipitations (Pr) des 71 simulations du modèle de circulation générale (MCG).....	32
Tableau 9. Saison de croissance, dans la région de la Beauce, pour les périodes actuelle et future (Atlas agroclimatique du Québec, 2012).....	35
Tableau 10. Saison de croissance, dans la région de la Montérégie, pour les périodes actuelle et future (Atlas agroclimatique du Québec, 2012).....	35
Tableau 11. Saison de croissance, dans la région de Lanaudière, pour les périodes actuelle et future (Atlas agroclimatique du Québec, 2012).....	35
Tableau 12. Cumul des précipitations pendant la période de croissance pour les périodes actuelle et future (Atlas agroclimatique du Québec, 2012)	37
Tableau 13. Registre d'épandage actuel d'une ferme typique en Beauce pour 2012 (élaboré par Frédéric Bolduc, agr., Fertior).....	39
Tableau 14. Scénario agronomique futur d'une ferme typique en Beauce tenant compte des impacts des changements climatiques sur la longueur de la saison de croissance à l'horizon 2041-2070 (élaboré par Frédéric Bolduc, agr., Fertior).....	40
Tableau 15. Volume de lisier produit annuellement par une entreprise porcine spécialisée.....	50
Tableau 16. Différences de maximum d'accumulation d'eau, par période d'entreposage et selon les deux périodes de récurrence, pour la période 2016-2044	50
Tableau 17. Coût de construction d'une structure d'entreposage	50
Tableau 18. Impact du différentiel des maximums d'accumulation d'eau, selon les périodes de récurrence de 10 et 25 ans, sur les coûts de construction des structures d'entreposage	52
Tableau 19. Coûts d'épandage futurs équivalents au coût de construction supplémentaire actuel d'une structure d'entreposage en valeurs actualisées (taux d'actualisation de 2,5 % et 5,0 %).....	53
Tableau A1.1. Facteurs LA utilisés dans l'équation de Thornthwaite (eq. 8).....	67
Tableau A2.1. Coordonnées des 52 stations météorologiques ainsi que la municipalité, regroupées par région	68

Tableau A2.2. Différence entre les statistiques sur les données mesurées et interpolées de précipitation, de Tmin et de Tmax pour la station de Farnham, durant l'année 1981 (Grenier, 2013).....	70
Tableau A2.3 Accumulation et son incertitude (précision relative) selon différentes périodes de retour, pour la période d'entreposage d'octobre à mai, pour les 52 sites, entre 1981 et 2009 (ET _p calculée selon la méthode de Thornthwaite).....	71
Tableau A2.4 Accumulation et son incertitude (précision relative) selon différentes périodes de retour, pour la période d'entreposage de septembre à juin, pour les 52 sites, entre 1981 et 2009 (ET _p calculée selon la méthode de Thornthwaite).....	73
Tableau A2.5 Comparaison des accumulations moyenne (mm) entre 1961-1990 et 1981-2009 pour 52 sites, pour deux périodes d'entreposage, pour une période de retour de 10 ans (ET _p calculée selon la méthode de Thornthwaite).....	75
Tableau A2.6 Accumulations moyennes, bornes inférieures et supérieures d'un intervalle de confiance à 90 % et erreur relative pour une période de retour de 10 ans, aux 52 sites, pour six périodes d'entreposage débutant le 1 ^{er} octobre, pour la période 1981-2009 (ET _p calculée selon Baier et Robertson)	77
Tableau A2.7 Accumulations moyennes, bornes inférieures et supérieures d'un intervalle de confiance à 90 % et précision relative pour une période de retour de 25 ans, aux 52 sites, pour six périodes d'entreposage débutant le 1 ^{er} octobre, pour la période 1981-2009 (ET _p calculée selon Baier et Robertson).....	88
Tableau A3. 1. Accumulations minimum, maximum et moyenne pour 8 scénarios climatiques, sur la période 2016-2044, pour 52 sites, en fonction des périodes d'entreposage débutant le 1 ^{er} octobre, pour une période de retour de 10 ans..	99
Tableau A3. 2. Accumulations minimum, maximum et moyenne pour 8 scénarios climatiques, sur la période 2016-2044, pour 52 sites, en fonction des périodes d'entreposage débutant le 1 ^{er} octobre, pour une période de retour de 25 ans.....	110
Tableau A3.3 Accumulations minimum, maximum et moyenne pour 8 scénarios climatiques, sur la période 2016-2044, pour 52 sites, en fonction des périodes d'entreposage débutant le 1 ^{er} septembre, pour une période de retour de 10 ans	121
Tableau A3.4. Accumulations minimum, maximum et moyenne pour 8 scénarios climatiques, sur la période 2016-2044, pour 52 sites, en fonction des périodes d'entreposage débutant le 1 ^{er} septembre, pour une période de retour de 25 ans	130
Tableau A4.1. Accumulations minimum, maximum et moyenne pour 8 scénarios climatiques sur la période 2041-2069, pour 52 sites, en fonction des périodes d'entreposage débutant le 1 ^{er} octobre, pour une période de retour de 10 ans.....	139
Tableau A4. 2. Accumulations minimum, maximum et moyenne pour 8 scénarios climatiques, sur la période 2041-2069, pour 52 sites, en fonction des périodes d'entreposage débutant le 1 ^{er} octobre, pour une période de retour de 25 ans.....	144

Liste des figures

Figure 1. Emplacement des 52 stations météorologiques (Adapté de : MAPAQ, 2011)	18
Figure 2. Accumulation par rapport à la fréquence cumulée, distribution empirique et selon le modèle polynomial, La Pocatière, période d'octobre à mai	24
Figure 3. Accumulation par rapport à la période de retour, distribution empirique et selon le modèle polynomial, La Pocatière, période d'octobre à mai	25
Figure 4. Mise à jour des valeurs d'accumulation pour une période d'entreposage d'octobre à mai et une période de retour de 10 ans	27
Figure 5. Diagrammes de dispersion des deltas de température et de précipitation, par saison	31
Figure 6. Comparaison des accumulations moyennes futures (2016-2044) et passées (1981-2009 et 1961-1990) pour une période d'entreposage d'octobre à mai (8 mois) et une période de retour de 10 ans, selon deux méthodes de calcul de l'évaporation	46
Figure 7. Comparaison des accumulations moyennes futures (2041-2069) et passées (1981-2009) pour une période d'entreposage d'octobre à mai (8 mois) et une période de retour de 10 ans	48

1 Introduction et mise en contexte

Deux aspects sont importants lors de la conception des structures d'entreposage de fumier à ciel ouvert, soit l'aspect technique (structure et construction) et le dimensionnement (les volumes de fumier et de précipitations à entreposer). Un guide technique a été développé en lien avec le premier aspect et deux documents spécifiques fournissent l'information pour le second.

Le guide technique d'entreposage des fumiers (AIAQ, CRAAQ et IRDA, 2012), récemment mis à jour, présente toutes les étapes nécessaires pour concevoir et construire une structure d'entreposage, soit les études préalables, la conception, la construction et le suivi après la construction.

Le premier des deux documents utilisés pour le calcul des volumes est la fiche technique sur la production journalière de déjections animales (IRDA, MAPAQ et AIAQ, 2012). Cette fiche constitue une mise à jour de l'ancien AGDEX 538/400.27 (CREAQ, 1999) pour tenir-compte de l'évolution des espèces animales et des techniques de productions animales.

Le second document pour le calcul des volumes, intitulé « Accumulation d'eau dans les installations d'entreposage des fumiers à ciel ouvert pour différentes municipalités au Québec en fonction de périodes de retour » (Joncas et al., 1993), permet de déterminer les accumulations d'eau (les précipitations moins l'évaporation) en tenant compte de la période d'entreposage (durée et dates). Les données de température et de précipitation nécessaires au calcul de l'accumulation couvraient la période de 1961 à 1990. Cette étude utilisait le modèle de Thornthwaite afin d'estimer l'évaporation à partir de la latitude et de la température mensuelle moyenne.

Dans les faits, le volume total de fumier ou de lisier (V_{fumier} en m^3) qui peut être entreposé dans une structure circulaire est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$V_{\text{fumier}} = \frac{\pi(D_{\text{ext}} - 2e)^2}{4} (H - F - (P - E)) \quad [1]$$

où D_{ext} est le diamètre extérieur de la structure d'entreposage (m), e est l'épaisseur du mur (m), H est la hauteur de la structure d'entreposage (m), F est le facteur de sécurité (m) pour éviter le débordement (AIAQ, CRAAQ et IRDA, 2012), P est la hauteur des précipitations (m) et E est la hauteur d'eau évaporée (m).

Selon les études climatiques réalisées par Ouranos (2010), le régime des précipitations et des températures dans le futur sera modifié. D'une façon générale, le climat se réchauffera sur l'ensemble du territoire québécois et de façon plus marquée en hiver qu'en été (Plummer et al., 2006). À l'horizon 2050, les températures moyennes risquent d'augmenter de 2,5 °C à 3,8 °C en hiver et de 1,9 °C à 3 °C en été dans le Sud du Québec (Ouranos, 2010), par rapport à la période de référence 1961-1990. En saison estivale, le changement attendu des précipitations est relativement faible dans le Sud du Québec à l'horizon 2050; en fait, l'ensemble des simulations considérées par Ouranos (2010) indiquent parfois une augmentation et parfois une

diminution des quantités totales. En hiver, malgré une hausse attendue des précipitations de l'ordre de 8,6 à 18,1 % à l'horizon 2050, une diminution de l'accumulation de neige au sol est prévue pour le Sud du Québec en raison de la hausse des températures qui causera un raccourcissement de la saison froide ainsi qu'une hausse des épisodes de pluie et des redoux hivernaux (Ouranos, 2010).

Par ailleurs, comme l'indiquent Bélanger et Bootsma (2002), les changements climatiques auront aussi plusieurs autres effets sur le monde agricole. Entre autres, les unités thermiques maïs (UTM) sur l'ensemble du territoire agricole québécois devraient passer d'en moyenne 2 390 durant la période 1961-1990 à environ 3 088 dans le futur (2041-2069). Les degrés-jours de croissance (DJC) devraient aussi augmenter de 26 à 31 % sur les mêmes périodes. Ces changements auront un impact important sur la régie des cultures, qui elle-même influence les périodes d'épandage et donc les volumes de fumier à entreposer. En effet, comme Joncas et al. (1993) considèrent l'accumulation d'eau dans les installations d'entreposage entre les moments où elles sont vidées à l'automne et au printemps, il y a lieu de croire qu'en raison du changement des précipitations, la période d'entreposage sera différente dans les années à venir.

Ainsi, en raison de l'accroissement de l'effet de serre, les précipitations, l'évaporation et les périodes d'épandage sont appelées à varier considérablement. L'impact global de ces changements sur les volumes d'eau dans les structures d'entreposage est encore méconnu. Il devenait donc essentiel de réviser les valeurs du guide de Joncas et al. (1993) pour éviter que les futurs ouvrages, souvent conçus pour 25 à 30 ans (AIAQ, CRAAQ et IRDA, 2012), soient sous-dimensionnés. Cela permettrait d'éviter les débordements ou la construction de structures supplémentaires.

2 But et objectifs

Le but du projet consistait à établir de nouvelles données d'accumulation d'eau pour la conception des structures d'entreposage des fumiers à ciel ouvert (précipitations, évaporation et période d'entreposage), considérant les changements climatiques. L'étude visait également à mettre à jour le guide technique utilisé pour la conception de structures d'entreposage en fonction des accumulations d'eau attendues. Afin d'atteindre le but du projet, les objectifs spécifiques suivants devaient être réalisés :

1. Choisir un modèle d'évapotranspiration permettant d'estimer l'évaporation d'une surface de lisier et de fumier;
2. Mettre à jour les accumulations d'eau pour la période 1981-2009 et comparer les résultats avec ceux de Joncas et al. (1993) pour la période 1961-1990.
3. Produire des scénarios climatiques pour les périodes 2016-2044 et 2041-2069;
4. Produire des scénarios agronomiques tenant compte des différenciations régionales (sols, pratiques, climats) et des changements climatiques anticipés;
5. Calculer les accumulations d'eau selon les scénarios agronomiques et climatiques produits aux étapes antérieures;
6. Réaliser une analyse de l'impact des changements proposés sur les coûts de construction.

3 Méthode de travail

3.1 Comités de travail

Un comité d'experts a été formé, regroupant des représentants de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), d'Ouranos, de l'Association des ingénieurs en agroalimentaire (AIAQ), du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), du ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP), de l'Université Laval, de COGENOR et de FERTIOR. Ce comité avait pour rôle d'encadrer le déroulement du projet et d'approuver le choix des différents scénarios agronomiques et climatiques considérés lors des analyses. Deux rencontres ont été fixées. La première, le 24 septembre 2012, avait pour but de déterminer les indicateurs climatiques et agronomiques en lien avec les volumes d'entreposage, de fixer les balises des données climatiques à fournir, de discuter du choix du modèle d'évapotranspiration et de former des sous-comités de travail. L'objectif de la deuxième rencontre, le 9 avril 2013, était de valider les premiers résultats et d'établir leur format de présentation dans le nouveau guide technique d'accumulation d'eau prenant en considération les scénarios climatiques et agronomiques sélectionnés. Le comité d'experts était composé de :

Stéphane Godbout, ing., P.Eng., Ph.D. et agr., IRDA;
Patrick Brassard, ing. jr, M. Sc., IRDA;
Frédéric Pelletier, ing. M.Sc., IRDA;
Michèle Grenier, statisticienne, M. Sc., IRDA;
Christine Landry, agr., Ph.D., IRDA;
Luc Belzile, agroéconomiste, M. Sc., IRDA;
Patrick Grenier, climatologue, Ph.D., Ouranos;
Anne Blondlot, agr., Ouranos;
Christine Landry, agr., Ph.D., IRDA;
Robert Lagacé, ing., Ph.D. et agr., Université Laval;
Marie-France Blais, ing., MDDEFP;
Pierre Vallée, ing., AIAQ;
Frédéric Bolduc, agr., FERTIOR;
Oussama Benslimane, agr., COGENOR;
Myriam Renaud, MAPAQ;
Caroline De Foy, ing., M.Sc., MAPAQ;

À la suite de la première rencontre du comité d'experts, deux sous-comités ont été formés. Le premier, appelé «scénarios agronomiques», a été formé d'Oussama Benslimane, Frédéric Bolduc, Patrick Brassard, Caroline De Foy, Stéphane Godbout et Christine Landry. Ce sous-comité s'est rencontré le 21 décembre 2012 afin de faire le point sur les scénarios agronomiques futurs à produire. Frédéric Bolduc (Beauce), Christine Landry (Montérégie) et Oussama Benslimane (Lanaudière) ont été mandatés pour mettre en place un scénario agronomique dans leur région respective.

Le 2^e sous-comité, nommé «scénarios climatiques», a été formé d'Anne Blondlot, Patrick Brassard, Stéphane Godbout, Michèle Grenier et Patrick Grenier. Une conférence téléphonique a eu lieu entre les membres du sous-comité le 13 décembre 2012. L'objectif de la rencontre était de définir les besoins en données climatiques.

3.2 Structure du rapport

La structure de ce rapport suit l'ordre des objectifs présentés à la section 2. Chaque objectif est présenté dans une section distincte (sections 4 à 9). Une mise en contexte, une revue de littérature (pour certains objectifs), la méthodologie, les résultats et discussion, puis une conclusion partielle (pour certains objectifs) sont présentés dans l'ordre.

4 Choix d'un modèle d'évapotranspiration

4.1 Mise en contexte

Afin d'évaluer le volume nécessaire d'une structure d'entreposage des fumiers, certains critères doivent être pris en considération. Parmi ces critères de conception, la quantité de déjections animales à entreposer, la quantité d'eau de pluie qui s'ajoutera dans la structure d'entreposage et la quantité d'eau perdue par évaporation, sont d'une grande importance. Joncas et al. (1993) utilisaient l'évapotranspiration potentielle (ET_p) calculée selon le modèle de Thornthwaite pour estimer l'évaporation dans les structures d'entreposage. L'évapotranspiration est définie comme étant la quantité d'eau transférée du sol vers l'atmosphère par évaporation et de la plante vers l'atmosphère par la transpiration. L' ET_p constitue une variable climatique englobant plusieurs phénomènes. Elle détermine le potentiel asséchant de l'environnement par rapport à une communauté végétale, le plus souvent le gazon (Joncas et al., 1993). L'hypothèse de base de leur étude était donc que l'évaporation d'une surface de lisier peut être évaluée à partir de celle d'un lac (EI). Une relation empirique entre EI et ET_p (éq. 2) a d'ailleurs été établie pour le sud du Québec (Pêches et Environnement Canada, 1978) :

$$0,8 EI \leq ET_p \leq EI \quad [2]$$

Ainsi, l' ET_p pourrait sous-estimer jusqu'à 20 % EI. Cette sous-estimation du volume d'eau évaporé pourrait avoir pour conséquence de surestimer l'accumulation nette d'eau dans les structures d'entreposage provenant des apports atmosphériques. Cependant, les précipitations sont aussi souvent sous-estimées, particulièrement en hiver, en milieu découvert. En résumé, bien qu'elle comporte certaines faiblesses, la méthode retenue par Joncas et al. (1993) constituait une approximation acceptable de l'évaporation pour la conception de structures d'entreposage de fumier et de lisier.

Cependant, il était nécessaire de vérifier si le modèle de Thornthwaite était toujours pertinent pour évaluer l'évaporation d'une surface de lisier. Pour ce faire, une revue de littérature sur les différentes méthodes d'évaluation de l'évapotranspiration devait être réalisée. Plusieurs bases de données scientifiques telles que Science Direct (www.sciencedirect.com), Agricola (agricola.nal.usda.gov), CABAbstract (www.ovid.com/site/catalog/DataBase/31.sp), Springer Link (<http://link.springer.com>) et Google Scholar (<http://scholar.google.ca>) ont été consultées. Quelques critères permettraient de sélectionner la méthode utilisée dans ce projet. D'abord, une approche nécessitant peu de variables météorologiques serait favorisée. En effet, la plupart des stations météorologiques du Québec fournissent seulement la température et les précipitations. Ensuite, il serait préférable d'utiliser un modèle ayant été calibré dans les conditions du Québec et qui a déjà été utilisé pour évaluer l'évaporation

d'une surface de lisier ou de fumier. Enfin, le comité d'experts a statué sur le fait qu'une méthode utilisant un pas de temps journalier serait à privilégier.

4.2 Revue de littérature : Méthodes d'évaluation de l'évapotranspiration

Afin d'évaluer l' ET_p , les méthodes du bilan hydrique peuvent être utilisées. Ces méthodes permettent de déterminer l'évaporation d'une surface humide ou d'une nappe d'eau libre. Pour ce faire, les bacs d'évaporation, l'évaporomètre Piche et les mesures lysimétriques peuvent être utilisés (Oudin, 2004).

Cependant, ce sont généralement des modèles empiriques (p. ex. Thornthwaite ou Baier et Robertson) et analytiques (p. ex. Penman ou Penman-Montheith) qui sont utilisés.

Xu et Singh (2001) ainsi qu'Oudin (2004) dénombrent cinq classes de méthodes d'estimation de l' ET_p : bilans hydrique, aérodynamique, combinatoire, de rayonnement, et de température (voir tableau 1). Les modèles dits empiriques, dont les méthodes basées sur la température, sont faciles d'utilisation, car ils nécessitent peu de variables. Quant à d'autres modèles dits analytiques, ils sont plus difficiles à utiliser, car ils requièrent une densité suffisante de stations de mesures climatologiques pour la radiation, le vent et la pression de vapeur d'eau.

La plupart des équations d' ET_p ont été développées pour des études spécifiques; elles sont adaptées au climat dans lequel elles ont été conçues, ce qui limite leur application dans d'autres contextes (Oudin, 2004). Par exemple, la méthode de Thornthwaite, développée dans l'Est des États-Unis (Lagacé, 2012), tend à sous-estimer l' ET_p en milieu aride et à surestimer l' ET_p dans le climat équatorial humide de l'Amazonie (Pereira et Pruitt, 2004).

Tableau 1. Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration (adapté d'Oudin, 2004)

<i>Classification</i>	<i>Méthode</i>	<i>Données nécessaires</i>	<i>Pas de temps</i>
Aérodynamique	Dalton (Oudin, 2004)	e_d, u	Journalier
Combinatoire	Penman (1948)	e_d, T, U, D	Journalier
	Penman-Monteith (Monteith, 1965)	e_d, T, U, D	Journalier
	Priestley-Taylor (1972)	T, D	Journalier
	Kimberly-Penman (Wright, 1982)	e_d, T, U, D	Journalier
	Thom-Oliver (1977)	e_d, T, U, D	Journalier
Température	Thornthwaite (1948)	T, D	Mensuel
	Blaney-Cridde (1950)	T, D	Mensuel
	Hamon (1961)	T	Journalier
	Romanenko (Xu et Singh, 2001)	e_d, T	Mensuel
	Linacre (1977)	e_d, T	Journalier
	Baier et Robertson (1965)	T, D	Journalier
Rayonnement	Turc (1955)	e_d, T, D	Journalier
	Jensen-Haise (1963)	T	5 jours
	Mc Guinness-Bordne (1972)	T	Mensuel
	Hargreaves (Hargreaves et Samani, 1982)	T	Mensuel
	Doorenbos-Pruitt (1977)	e_d, T, U, D	Journalier
	Abtew, (1996)	e_d, T, D	Journalier
	Makkink (1957)	T	Journalier

T = Température; U = Vitesse du vent; D = Durée d'ensoleillement / Rayonnement; e_d = Pression de vapeur effective de l'air.

4.2.1 Méthodes aérodynamiques

L'inconvénient est que ce type d'approche nécessite des conditions d'application similaires à celles dans lesquelles la formule a été élaborée (Singh et Xu, 1997). Les formules utilisant l'approche aérodynamique, telle que l'équation de Dalton (Oudin, 2004), s'écrivent sous la forme suivante (éq. 3) :

$$ET_p = C (e_s - e_a) \quad [3]$$

Où;

C = conductance aérodynamique;

e_s = pression de vapeur saturante à la température de la surface;

e_a = pression de vapeur dans l'air.

4.2.2 Méthodes combinatoires

Les méthodes combinatoires intègrent les effets de la radiation et du bilan de masse (McKenney et Rosenberg, 1993). Les méthodes de Penman (1948), Penman-Monteith

(Monteith, 1965), Priestley-Taylor (1972), Kimberly-Penman (Wright, 1982) et Thom et Oliver (1977) sont les plus utilisées; les trois premières sont décrites à l'annexe 1.

4.2.3 Méthodes basées sur le rayonnement

Turc (1955), McGuinness et Bordne (1972), Hargreaves (1982), Makkink (1957), Jensen et Haise (1963), Doorenbos et Pruitt (1977) et Abtew (1996) ont développé des modèles se basant sur le rayonnement qui sont issus du bilan d'énergie. Quelques unes de ces méthodes sont décrites à l'annexe 1.

4.2.4 Méthodes basées sur la température

Les modèles d'évaluation de l' ET_p basés sur la température ont été les premiers à faire leur apparition (Xu et Singh, 2001). La relation entre l'évapotranspiration et la température de l'air date des années 1920 (Jenson et al., 1990). Ainsi, plusieurs modèles ont été développés, dont les méthodes de Thornthwaite (1948) et de Baier et Robertson (1965) décrites ci-dessous, puis les méthodes de Blaney et Criddle (1950), Hamon (1961), Romanenko (Xu et Singh, 2001) et Linacre (1977) décrites à l'annexe 1.

Thornthwaite

L'équation de Thornthwaite (éq. 4) est celle utilisée par Joncas et al. (1993) pour estimer l'évaporation. Première équation publiée sur l'évapotranspiration, elle a été développée à partir des mesures sur des cases lysimétriques dans l'Est des États-Unis (Lagacé, 2012).

Le modèle de Thornthwaite (1948) est devenu rapidement l'un des plus populaires en raison de sa simplicité. Il ne nécessite que les températures moyennes mensuelles et la localisation de la station en latitude. La température est un paramètre déterminant dans toutes les méthodes empiriques du calcul de l'évapotranspiration. L'autre facteur déterminant est l'énergie (rayonnement) solaire, qui varie en fonction du temps et du lieu (Joncas et al., 1993). Selon Pédelaborde (1968) le modèle de Thornthwaite donne une excellente approximation de l'évapotranspiration potentielle (ET_p) puisque la température de l'air est assez représentative de la radiation nette. Cependant, selon l'endroit où la méthode de Thornthwaite est appliquée, cette dernière tend à sous-estimer l' ET_p pour les mois d'avril, de mai et de juin, et tend à surestimer l' ET_p pour les mois de septembre et d'octobre (Joncas et al., 1993). Sur une base annuelle, la méthode de Thornthwaite présente des valeurs comparables (Joncas et al., 1993) ou inférieures (McKenney et Rosenberg, 1993) à celles calculées selon la méthode de Penman, qui est considérée comme étant la plus réaliste par plusieurs hydrologistes (Oudin et al., 2004).

$$ET_p = 1,6 \times LA(10t_i/l)^a \quad [4]$$

Où;

ET_p = évapotranspiration potentielle mensuelle (cm);

LA = facteur de correction pour la durée du jour, le nombre de jours pour le mois et la latitude de la station, en unités de 30 jours égaux de 12 heures chacun (sans unité);

t_i = température moyenne mensuelle (°C);

I = total des valeurs mensuelles de l'indice de chaleur ($^{\circ}\text{C}$):

$$I = \sum_{i=1}^{12} (t_i / 5)^{1,514}, \text{ si } t_i < 0 \text{ alors } t_i = 0;$$

$$a = \text{constante} = 0,49239 + 0,01792 I - 0,0000771 I^2 + 0,000000675 I^3$$

Le tableau A1.1 (annexe 1) présente le facteur LA en fonction de la latitude et du mois pour les latitudes du Québec.

Baier et Robertson

Le modèle de Baier et Robertson (1965) a l'avantage de ne nécessiter que les températures de l'air maximale (T_{\max}) et minimale (T_{\min}) journalières (en $^{\circ}\text{C}$) pour le calcul de l' ET_p en mm j^{-1} (Lehoux, 1994). L'équation de Baier et Robertson (éq. 5) a été initialement calibrée avec les données d'évaporation mesurées par évaporimètre (Rochette, 1988) à six endroits au Canada (Baier et Robertson, 1965). La radiation solaire est une fonction de la radiation extraterrestre (au sommet de l'atmosphère) (R_{aext}) (en $\text{cal cm}^{-2} \text{j}^{-1}$) et de l'amplitude thermique journalière (Ecart) (en $^{\circ}\text{C}$).

$$ET_p = 0,094 * (-87,03 + 0,928 * T_{\max} + 0,933 * \text{Ecart} + 0,0486 * R_{\text{aext}}) \quad [5]$$

Cette équation a été utilisée longtemps dans sa forme originelle, mais quelques auteurs ont rapporté qu'elle induisait des erreurs considérables lorsqu'elle était utilisée dans conditions différentes de celles prévalant lors de sa calibration initiale. Il a donc été recommandé de calibrer l'équation localement, particulièrement pour le Québec où la variabilité spatiale climatique est grande. Au Québec, en raison de l'absence de lysimètres aux stations météorologiques, la calibration d'équations estimant l' ET_p passe par des formules semi-analytiques telle que celle de Penman (1948). Or, les observations nécessaires ne sont disponibles que dans douze stations au Québec, dites stations primaires, sur les quelques 220 existantes. Rochette (1988) a donc modifié et calibré l'équation de Baier et Robertson (1965) à l'aide des données prédites par le modèle de Penman, pour ces douze sites de mesures répartis dans différentes régions du Québec (éq. 6). Afin d'isoler l'effet des conditions météorologiques journalières sur l'amplitude thermique, la variable Ecart a été remplacée par Ecartx, qui représente la différence entre l'amplitude thermique journalière et sa moyenne pour le mois considéré ($^{\circ}\text{C}$). Les différentes constantes a, b, c et d, déterminées à la suite de la calibration, sont présentées au tableau 2 pour les douze stations primaires du Québec. Pour les autres stations météorologiques, l'équation 6 sera utilisée avec les constantes de la station primaire située dans la même région administrative.

$$ET_p = a + b \times T_{\max} + c \times \text{Ecartx} + d \times R_{\text{aext}} \quad [6]$$

Tableau 2. Constantes de l'équation 6 pour les douze stations primaires

	a	b	c	d
Ottawa	-19,127	0,035874	0,11854	0,0057791
Québec	-14,314	0,033280	0,11569	0,0048558
Montréal	-19,433	0,051969	0,12268	0,0053686

Sherbrooke	-20,383	0,030005	0,06377	0,0051860
Mirabel	-17,814	0,016362	0,11382	0,0055594
Ste-Agathe	-19,673	0,036771	0,10149	0,0051253
Baie-Comeau	-10,933	0,059490	0,12029	0,0035402
Sept-Iles	-10,919	0,051383	0,15488	0,0037636
Gaspé	-13,252	0,047837	0,07125	0,0040008
Mont-Joli	-12,712	0,092119	0,07247	0,0034760
Roberval	-15,637	0,053125	0,10799	0,0045910
Val D'Or	-18,175	0,046893	0,09767	0,0050317

4.2.5 Comparaison des différents modèles d'évapotranspiration

Afin d'évaluer l'efficacité des différents modèles, les ET_p , sont comparées soit : (1) avec les mesures lysimétriques, ou (2) avec un modèle de référence, généralement le modèle de Penman, considéré comme le plus réaliste d'un point de vue physique (Oudin, 2004).

Jenson et al. (1990) ont comparé 19 méthodes d'estimation d' ET_p aux mesures lysimétriques sur onze stations climatiques réparties aux États-Unis, au Danemark, en Australie et au Zaïre. Pour le pas de temps mensuel, ce sont les méthodes combinatoires (Penman, Penman-Monteith, Priestley-Taylor) qui produisent les meilleures estimations. La méthode Blaney-Criddle est la plus adéquate parmi les formules basées sur la température.

Xu et Singh (2001), ont évalué en Ontario un certain nombre de modèles basés sur la température et le rayonnement. Ils suggèrent d'utiliser les formules de Blaney-Criddle, Hargreaves et Thornthwaite pour un pas de temps mensuel. Xu et Singh (1998) ont évalué la performance de plusieurs approches à différents pas de temps. Selon eux, la méthode de Thornthwaite sur une base mensuelle tend à sous-estimer l'évaporation par rapport à la méthode du bac d'évaporation, alors que les méthodes de Penman et Romanenko résultent aux meilleurs estimations.

Oudin et al. (2004) a comparé 27 modèles d'évapotranspiration en France, en Australie et aux États-Unis, dans un contexte de modélisation pluie-débit. Ils concluent que des modèles simples se basant sur la radiation extraterrestre et sur la température sont aussi efficaces que les méthodes plus complexes comme le modèle de Penman. Ils suggèrent d'utiliser l'équation de McGuinness pour les modélisations pluie-débit. De plus, d'autres modèles se basant uniquement sur la température, tel que le modèle de Thornthwaite, peuvent être aussi efficaces que celui de Penman.

Amatya et al. (1995) ont comparé six modèles basés sur le rayonnement ou sur la température par rapport à la méthode de Penman-Monteith, considérée comme la référence. La méthode de Turc se rapprochait le plus de la méthode de Penman-Monteith. À l'opposé, les plus gros écarts ont été notés avec les méthodes de Thornthwaite (-16 %) et de Hargreaves (+15 %).

Rochette (1988) a calibré l'équation de Baier et Robertson dans plusieurs régions du Québec sur celle de Penman. Le modèle calibré a ainsi obtenu une très bonne corrélation avec celui de Penman pour les douze stations primaires du Québec. Les

écarts-types de l'erreur d'estimation des modèles régionaux étaient de 8 % pour 30 jours et de 4 % pour la saison entière.

La performance de chaque méthode dépend beaucoup du site considéré. Selon Oudin (2004), il est n'est pas recommandé de sélectionner une seule formule pour différents climats. De plus, les comparaisons étant effectuées par rapport à des mesures directes (bacs d'évaporation ou lysimètres) ou indirectes (formule de Penman), elles peuvent entraîner d'importantes différences selon l'appareillage choisi.

4.3 Résultats et discussion

Le choix d'une méthode de calcul de l' ET_p doit être fait avec beaucoup de prudence. En effet, la décision de ne garder qu'un nombre limité de variables météorologiques ou encore de remplacer des variables par d'autres qui leur sont corrélées et plus faciles à obtenir, augmente l'incertitude autour de l'estimation (Rochette, 1988).

Le modèle d' ET_p sélectionné pour estimer la quantité d'eau évaporée d'une structure d'entreposage de lisier devait nécessiter peu de variables, soit seulement la température et l'emplacement de la station météorologique. Au Québec, très peu de stations météorologiques possèdent tous les instruments de mesure nécessaires pour calculer l' ET_p avec des modèles complexes (Lepage et al., 2012). De plus, il est préférable que le modèle ait été calibré au Québec ou dans une région dont les conditions climatiques sont semblables. À la suite d'une consultation du comité d'experts, il s'est avéré que l'équation de Thornthwaite n'était plus d'usage car elle n'a jamais été calibrée au Québec. Parmi tous les autres modèles disponibles, c'est celui de Baier et Robertson qui a été sélectionné pour effectuer les calculs d'évaporation des structures d'entreposage de fumier et de lisier. Le fait que cette méthode nécessite qu'une variable météorologique (la température journalière; disponible dans toutes les stations météorologique du Québec) a dirigé le choix du comité. De plus, cette méthode a été calibrée au Québec par Rochette (1988) et utilisée dans une étude portant sur l'évaporation des surfaces de lisier et de fumier (Lehoux, 1994).

Joncas et al. (1993) avaient estimé que l'évaporation d'une surface de lisier correspondait à l'évapotranspiration potentielle. Cette hypothèse a donc été vérifiée par Lehoux (1994). Son étude avait comme objectif de faire le lien entre l'évaporation d'une structure d'entreposage de lisier ou de fumier et l'évapotranspiration calculée selon l'équation de Baier et Robertson calibrée par Rochette (1988). Des mesures d'évaporation ont été réalisées à l'aide de bacs flottants dans des structures d'entreposage de lisier et de fumier (les pertes possibles causées par des fuites n'ont pas été considérées). Les valeurs d'évaporation obtenues sur quatre sites dans la région de Québec, avec différentes régies du fumier et de lisier, ont été comparées aux valeurs d'évapotranspiration calculées à l'aide du modèle de Baier et Robertson (Rochette, 1988). Dans le cas du lisier entreposé à ciel ouvert, les ratios se situaient autour de 0,8. En ce qui concerne le fumier entreposé à l'air libre, le bilan massique a permis d'obtenir un ratio près de l'unité ($1,07 \pm 0,04$) par rapport à l'évapotranspiration de référence (Lehoux, 1994). De plus, l'évaporation du lisier de bovin était semblable à celle du lisier de porc.

Dans le cadre de ce projet, l'évaporation a donc été estimée avec la formule d'évapotranspiration du modèle de Baier et Robertson (1965) calibré par Rochette

(1988), et en multipliant le résultat par un facteur de 0,8. Le facteur de 0,8 associé à l'évaporation d'une surface de lisier a été choisi afin de s'assurer de ne pas surestimer l'évaporation, ce qui résulterait en une sous-estimation des accumulations d'eau.

5 Mise à jour des valeurs d'accumulation d'eau

5.1 Mise en contexte

Les accumulations d'eau présentées dans le document de Joncas et al. (1993) ont été évaluées pour 51 stations météorologiques réparties dans les douze régions agricoles du Québec. Joncas et al. (1993) avaient alors utilisé les sommaires mensuels de 1961 à 1990 de la banque de données de la Direction des réseaux atmosphériques du ministère de l'Environnement du Québec. L'étude utilisait les moyennes mensuelles de pluie, neige, précipitation totale, température minimale, température maximale et température moyenne. Il est apparu nécessaire d'effectuer une mise à jour de ces valeurs sur une période plus récente (1981 à 2009). Les accumulations ont été calculées pour les mêmes 51 stations météorologiques en plus de la station de Stanstead, mais classées selon les régions agricoles du MAPAQ (tableau A2.1, Annexe 2) (figure 1).

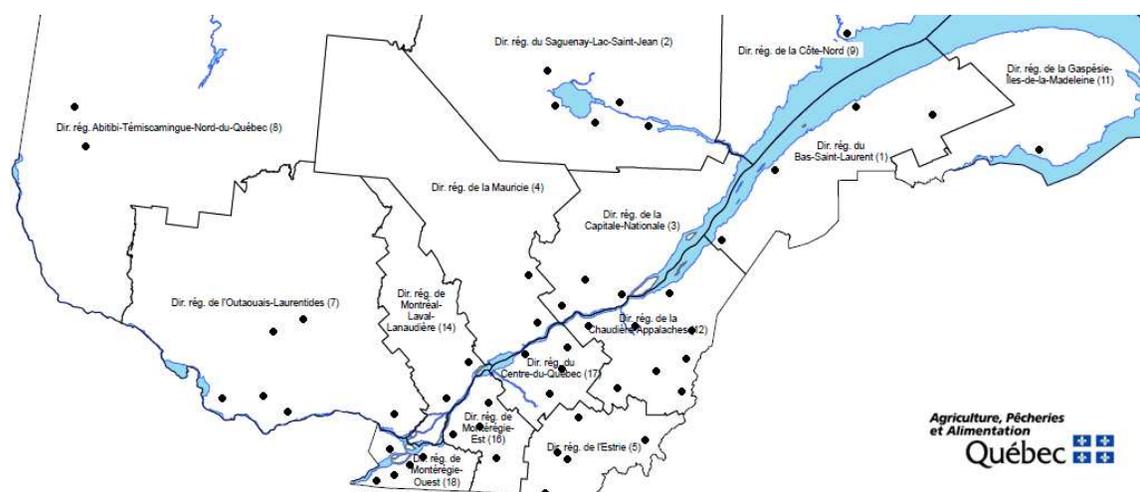


Figure 1. Emplacement des 52 stations météorologiques (Adapté de : MAPAQ, 2011)

Dans un premier temps, le modèle de Thornthwaite a été utilisé pour calculer l'évapotranspiration potentielle (ET_p) afin d'estimer l'évaporation, donnée nécessaire au calcul de l'accumulation. Comme le modèle de Thornthwaite est basé sur un pas de temps mensuel, les moyennes mensuelles ont d'abord été calculées à partir des données journalières. Pour des fins de comparaison avec les résultats de Joncas et al. (1993), les calculs ont été effectués sur leurs périodes d'entreposage, soit d'octobre à mai (243 jours) et de septembre à juin (303 jours). Ces périodes représentent les durées moyennes pour un entreposage sans vidange du réservoir et correspondaient à des durées considérées comme acceptables pour une bonne gestion des effluents d'élevage. Les périodes de retour des accumulations, choisies par Joncas et al. (1993), ont également été appliquées, soit 2, 5, 10, 15, 20 et 25 ans.

Dans un second temps, l'équation de Baier et Robertson (Rochette, 1988) a été utilisée pour le calcul de l' ET_P , à laquelle un facteur de 0,8 a été appliqué pour estimer l'évaporation. Cependant, seules les périodes de retour de 10 ans et de 25 ans ont été calculées. Ce choix a été fait car dans la 3^e édition du guide technique d'entreposage des fumiers (AIAQ, CRAAQ et IRDA, 2012), il est indiqué que le volume des eaux de précipitation avec une récurrence minimale de 10 ans doit être inclus. La période de 25 ans correspond à la durée de vie utile minimale de la structure.

De plus, au lieu de présenter seulement deux périodes d'entreposage, l'accumulation d'eau a été calculée sur une base mensuelle, débutant le 1^{er} octobre, pour des cumuls de 7, 8, 9, 10, 11 et 12 mois. Au delà du 1^{er} octobre l'épandage est interdit sauf exception (MDDEFP, 2012); c'est ce qui a justifié ce choix pour le début de la période d'entreposage. La durée réelle d'un entreposage sans vidange dépend principalement du mode de gestion utilisé par l'exploitation agricole.

5.2 Méthodologie : Détermination de l'accumulation en fonction des périodes de retour

5.2.1 Données d'observation (Grenier, 2013)

Les données climatiques journalières utilisées pour la mise à jour des valeurs d'accumulation d'eau sont : les précipitations totales (P_r), les températures minimales (T_{min}) et maximales (T_{max}) à 2 mètres au-dessus du sol. Il s'agit des "Observations quotidiennes interpolées sur grille de 10 X 10 km", version 2 (il n'y a pas de publication officielle pour cette version, mais la version 1 est référencée: Hutchinson et al., 2009). Aussi connues sous l'appellation "données RNCAN" (en référence à Ressources Naturelles Canada qui les produit), cette base de données couvre le Canada entre 1950 et 2010. L'interpolation des données entre les stations est effectuée grâce au logiciel ANUSPLIN (Hutchinson, 2004)

Les données RNCAN ont été utilisées en lieu et place des données provenant des stations météorologiques opérées par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP, 2011) car ces dernières n'étaient pas complètes pour certaines stations. Comblé des données manquantes se fait au moyen de techniques non-triviales, et cette tâche aurait constitué une charge de travail trop importante dans le cadre de ce projet. Une comparaison sommaire des données RNCAN avec les données de la station de Farnham pour l'année 1981 a été réalisée (tableau A2.2, Annexe 2). Les résultats de la comparaison suggèrent que le produit RNCAN suit bien les observations après réinterpolation aux coordonnées d'une station ayant initialement servi à créer ce produit, du moins dans les régions où le réseau de stations est relativement dense. Cependant, la fiabilité n'a pas pu être testée de manière détaillée, et il est connu que des erreurs subsistent dans ce produit.

5.2.2 Évaluation de l'accumulation d'eau

Une période d'entreposage chevauche 2 années consécutives, soit les mois d'automne d'une année et les mois d'hiver et de printemps de l'année suivante. Il y a donc une possibilité maximale de 29 saisons d'entreposage pour 30 années d'observation. L'accumulation représente une hauteur d'eau cumulative pour une période de plusieurs mois. Les hauteurs des accumulations de tous les épisodes de

pluie, faible ou intense, sont intégrées sans distinction. Il ne s'agit pas ici d'une étude sur des données de débit et de crues.

Afin d'évaluer l'évaporation, selon le modèle d'évapotranspiration de Thornthwaite (éq. 4) ou selon le modèle d'évapotranspiration de Baier et Robertson calibré par Rochette (1988) (éq. 6) et multiplié par un facteur de 0,8, les champs «température minimale journalière» et «température maximale journalière» de la banque de données d'observations climatiques ont été utilisés, ainsi que la latitude de la station. Pour chaque station, l'évaporation quotidienne a été calculée avec les deux méthodes. L'accumulation journalière est obtenue grâce à la différence entre les précipitations et l'évaporation quotidiennes. Le cumul mensuel provient de la sommation des résultats quotidiens sur un mois donné (équation 7) :

$$Acc_{\text{mois}} = \sum_{\text{jour}=1}^m P_{\text{jour}} - E_{\text{jour}} \quad [7]$$

Où :

Acc_{mois} = accumulation pour un mois donné (mm);

m = nombre de jours dans le mois;

P_{jour} = précipitation journalière pour un mois donné (mm);

E_{jour} = évaporation journalière pour un mois donné (mm).

L'accumulation totale pour une période d'entreposage résulte de la somme des accumulations mensuelles (éq. 8) :

$$Acc = \sum_{\text{mois}=1}^n Acc_{\text{mois}} \quad [8]$$

Où :

Acc = accumulation totale pour une période d'entreposage (mm);

n = dernier mois de la période d'entreposage.

5.2.3 Analyse statistique

5.2.3.1 But de l'analyse statistique

Le but de l'analyse statistique est d'interpréter la fréquence d'événements passés (l'accumulation d'eau sur une certaine période d'entreposage) en évaluant la probabilité d'occurrence d'événements comparables dans le futur. Cette approche est valide si l'hypothèse que la tendance des accumulations se poursuit dans un futur rapproché est respectée. Cette évaluation permet de déterminer la durabilité d'un ouvrage en fonction des événements qu'il risque de connaître durant sa vie utile.

La méthodologie de Joncas et al. (1993) a été utilisée pour calculer les nouvelles valeurs d'accumulation d'eau de la période 1981-2009. Un exemple de l'analyse statistique appliquée est présenté ci-dessous (sections 5.2.3.2 à 5.2.3.7) sur les données de la station de La Pocatière, pour une période d'entreposage d'octobre à mai (8 mois).

5.2.3.2 Distribution de fréquence des données d'accumulation d'eau

La première étape de l'analyse statistique consistait à établir la fréquence de chaque valeur (le nombre de fois qu'elle se produit dans la série par rapport au total de valeurs).

L'accumulation totale d'eau sur les huit mois d'entreposage est calculée pour chacune des 29 années, à partir des observations de température et de précipitations à la station de La Pocatière. L'analyse statistique portait sur ces cumuls maximum annuels (voir tableau 3).

Ces valeurs peuvent être considérées comme un échantillon indépendant tiré au hasard d'une population. La population, dans ce cas, serait l'ensemble des valeurs d'accumulation pour toutes les années passées. L'hypothèse posée est qu'il n'y a pas d'auto-corrélation dans la série chronologique ou que celle-ci serait fortuite.

Tableau 3. Accumulations d'eau pour la station de La Pocatière, période d'octobre à mai

Saison	Accumulation (mm)	Saison	Accumulation (mm)	Saison	Accumulation (mm)
1981-1982	444	1991-1992	472	2001-2002	377
1982-1983	732	1992-1993	406	2002-2003	409
1983-1984	576	1993-1994	543	2003-2004	582
1984-1985	375	1994-1995	423	2004-2005	586
1985-1986	420	1995-1996	638	2005-2006	616
1986-1987	297	1996-1997	547	2006-2007	554
1987-1988	377	1997-1998	399	2007-2008	626
1988-1989	460	1998-1999	385	2008-2009	486
1989-1990	434	1999-2000	596	2009-2010	406
1990-1991	546	2000-2001	388		

5.2.3.3 Distribution des fréquences cumulées

La distribution des fréquences cumulées a été ensuite obtenue en classant les observations dans un ordre croissant et en leur attribuant une fréquence proportionnelle au rang de chacune (un numéro d'ordre). La courbe des fréquences cumulées ou fonction de distribution représente la fréquence cumulée en fonction de la valeur de chaque observation. Pour une population donnée, la fréquence cumulée correspond à la probabilité de non-dépassement. Pour un échantillon d'une population, la fréquence cumulée permet d'estimer la probabilité de non-dépassement. La précision de cette estimation est fonction de la taille de l'échantillon et de sa représentativité. Il faut poser l'hypothèse que les observations représentent assez bien la population visée.

Pour chaque échantillon, la distribution des fréquences cumulées (éq. 9) a été déterminée; pour un échantillon donné, elle est définie comme la fonction de distribution empirique. Il existe plusieurs manières de calculer la fonction de

distribution empirique. La méthode qui a été utilisée est celle de Weibull. Il s'agit d'une méthode appropriée pour l'analyse des valeurs extrêmes (Gallichand, 2012).

$$\text{fréquence cumulée} = \frac{\text{rang}}{\text{nombre d'observations} + 1} \quad [9]$$

La fréquence cumulée des accumulations annuelles, pour la station de La Pocatière, pour la période d'entreposage d'octobre à mai, est présentée au tableau 4.

Tableau 4. Accumulations et fréquences cumulées pour la station de La Pocatière, période d'octobre à mai

Rang	Saison	Accumulation (mm)	Fréquence cumulée (%)	Rang	Saison	Accumulation (mm)	Fréquence cumulée (%)
1	1986-1987	297	3,33	16	1991-1992	472	53,33
2	1984-1985	375	6,67	17	2008-2009	486	56,67
3	1987-1988	377	10,00	18	1993-1994	543	60,00
4	2001-2002	377	13,33	19	1990-1991	546	63,33
5	1998-1999	385	16,67	20	1996-1997	547	66,67
6	2000-2001	388	20,00	21	2006-2007	554	70,00
7	1997-1998	399	23,33	22	1983-1984	576	73,33
8	1992-1993	406	26,67	23	2003-2004	582	76,67
9	2009-2010	406	30,00	24	2004-2005	586	80,00
10	2002-2003	409	33,33	25	1999-2000	596	83,33
11	1985-1986	420	36,67	26	2005-2006	616	86,67
12	1994-1995	423	40,00	27	2007-2008	626	90,00
13	1989-1990	434	43,33	28	1995-1996	638	93,33
14	1981-1982	444	46,67	29	1982-1983	732	96,67
15	1988-1989	460	50,00				

5.2.3.4 Probabilité et récurrence

D'un point de vue statistique, la probabilité P qu'un événement survienne est évaluée entre zéro et un (0 % à 100 %). Si la fréquence cumulative correspond à la probabilité de non-dépassement d'un événement x, cela équivaut à évaluer la probabilité P (X ≤ x) : qu'un événement X survenant au hasard soit plus petit ou égal à l'événement x. Par exemple, si une observation a une fréquence cumulative de 0,80, la probabilité qu'un événement survenant au hasard ait une valeur inférieure ou égale à cette observation est de 0,8 ou 80 %.

En hydrologie, la probabilité est généralement exprimée en termes de récurrence ou de période de retour (Tr) selon l'équation 10:

$$Tr = \frac{1}{1-P} \quad [10]$$

Où;

Tr = période de retour en année;

P = probabilité de non-dépassement d'un évènement (sans dimension, entre 0 et 1).

Par exemple, une probabilité de $P = 0,80$ de non-dépassement représente une probabilité de dépassement de $0,20$ et une période de retour de 5 ans pour cet évènement. Dans le cadre de ce projet, l'évènement dont il est question est l'accumulation d'eau totale pour une certaine période d'entreposage.

5.2.3.5 Possibilité d'ajustement des données à une fonction de distribution théorique

À partir de la fonction de distribution empirique, l'évaluation des probabilités de non-dépassement est possible. Cette évaluation peut aussi être réalisée en calculant une fonction de distribution théorique d'un type connu à partir de l'information contenue dans l'échantillon, généralement la moyenne et l'écart type. Ainsi, pour plusieurs phénomènes naturels et biologiques, la distribution de fréquence s'approche de la courbe de Gauss aussi appelée distribution normale.

L'ajustement des observations à une distribution normale a été considéré. Il faut d'abord signaler que le nombre d'observations disponibles (29 par station) permet difficilement de juger de la normalité du phénomène. De plus, certaines valeurs d'accumulation recherchées se situent vers la queue de la distribution, donc dans une région de valeurs extrêmes, les périodes de retour visées par l'étude variant de 2 à 25 ans. Si les valeurs observées se rapprochent beaucoup de celles que donne une distribution normale au centre de la distribution, l'écart augmente toutefois considérablement pour les valeurs éloignées de la moyenne. La courbe représentant la distribution normale a été calculée à partir de la moyenne et de l'écart type des observations disponibles pour chaque station. Les observations de quelques stations ont été comparées à la loi normale, comme dans Joncas et al. (1993), pour arriver à la même conclusion : la loi normale s'ajuste mal aux données.

5.2.3.6 Modèle mathématique

L'accumulation pour les différentes périodes de retour a été évaluée à partir de la distribution empirique des valeurs observées. C'est le modèle polynomial qui est finalement utilisé car il permet un très bon ajustement aux données qui seraient mal représentées par une droite, comme l'illustre la figure 2. Ainsi, pour chaque station et pour chaque période d'entreposage, une courbe a été ajustée aux données observées. Pour toutes les stations, il s'agissait d'une équation du cinquième degré, dont les facteurs diffèrent d'une station à l'autre. L'objectif est d'obtenir une fonction qui permettra d'estimer une accumulation à partir d'une fréquence cumulée donnée (ou d'une période de retour donnée) pour un site en particulier, en faisant l'hypothèse que les accumulations des années futures suivront la même tendance. La procédure PROC REG du logiciel SAS (version 9.2, 2008) a été utilisée à cette fin. En utilisant cette équation, la valeur de l'accumulation (ordonnée) en fonction de la probabilité de non-dépassement P (abscisse) est obtenue; la valeur de P est exprimée en

pourcentage. La figure 2 montre la courbe produite pour la station de La Pocatière pour une période d'entreposage d'octobre à mai. La courbe produite en remplaçant la probabilité de non-dépassement par la période de retour en abscisse est illustrée à la figure 3.

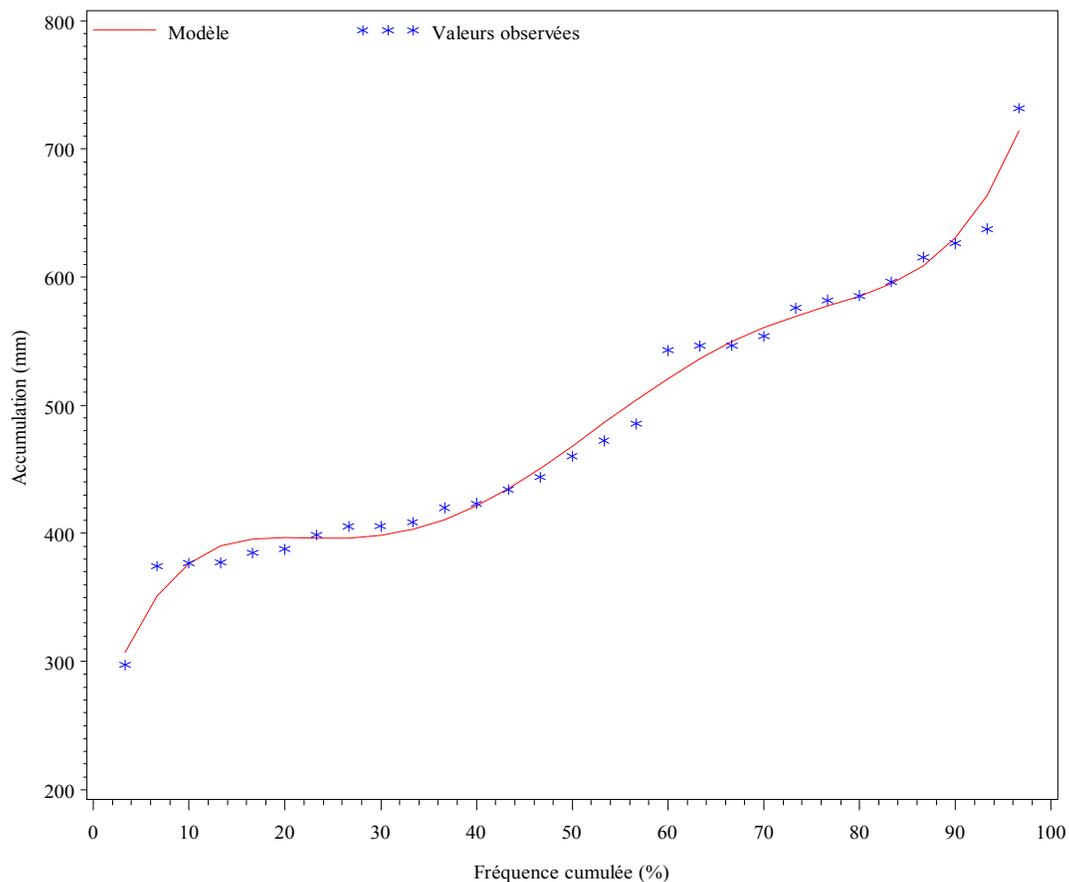


Figure 2. Accumulation par rapport à la fréquence cumulée, distribution empirique et selon le modèle polynomial, La Pocatière, période d'octobre à mai

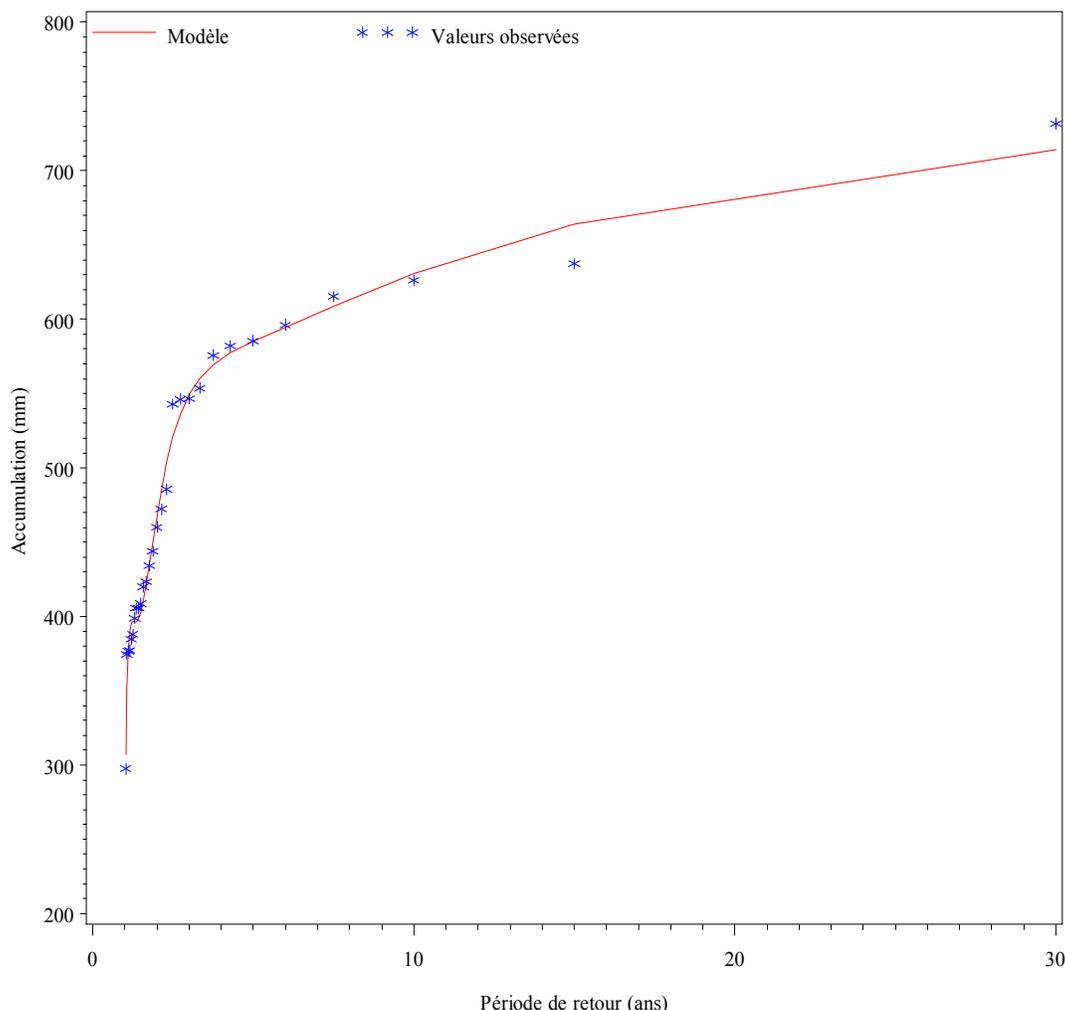


Figure 3. Accumulation par rapport à la période de retour, distribution empirique et selon le modèle polynomial, La Pocatière, période d'octobre à mai

5.2.3.7 Estimation de l'erreur statistique

Il est important de tenir compte de l'imprécision, car elle est inhérente à la méthode statistique utilisée. Il faut signaler que les périodes de retour obtenues par le traitement statistique décrit dans les dernières sections ont une précision limitée. La principale cause d'imprécision demeure le nombre réduit d'observations (29 ans ou moins) pour chaque station. L'erreur statistique varie pour chaque station et pour chaque période de retour. Les bornes inférieures et supérieures d'un intervalle de confiance à 90 %, pour l'estimation d'une valeur d'accumulation associée à une période de retour donnée, basée sur le modèle de régression polynomiale, ont été calculées. La précision relative a été ensuite calculée à partir de ces bornes selon l'équation 11 (Freund et Littell, 2000) :

$$\text{Précision relative (\%)} = \frac{\text{borne supérieure} - \text{borne inférieure}}{2 \times \text{accumulation}} \times 100\% \quad [11]$$

Bien que l'accumulation d'eau ne soit pas la composante principale du volume à entreposer, lors de la conception de la structure d'entreposage, le facteur de sécurité devra tenir compte de l'erreur statistique.

5.3 Résultats et discussion

5.3.1 Utilisation du modèle de Thornthwaite pour le calcul de l'évapotranspiration

Le modèle de Thornthwaite a d'abord été utilisé pour calculer l'évapotranspiration afin d'estimer l'évaporation, donnée nécessaire au calcul de l'accumulation d'eau, pour la période de 1981 à 2009. Ainsi, des tableaux semblables à ceux présentés par Joncas et al. (1993) ont été produits et sont présentés à l'annexe 2. Chaque tableau présente les valeurs d'accumulation et la précision relative pour des périodes allant d'octobre à mai (tableau A2.3) et de septembre à juin (tableau A2.4). Les accumulations pour des périodes de retour de 2, 5, 10, 15, 20 et 25 ans ont été calculées.

Une comparaison des accumulations calculées pour les périodes 1961-1990 et 1981-2009 avec le modèle de Thornthwaite et pour une période de retour de 10 ans, est présentée au tableau A2.5 (annexe 2). Un test de t (de Student) sur les données appariées a été appliqué par station pour vérifier s'il y a une différence significative entre les accumulations d'eau des deux périodes. Ce test a été appliqué pour les deux durées d'entreposage séparément. Cette analyse permet de conclure qu'il n'y a pas eu de différence significative d'accumulation moyenne entre les deux périodes de 30 ans, peu importe la période d'entreposage. Les statistiques de t pour les deux durées d'entreposage sont petites (1,15 et 0,22) et les probabilités observées des tests de t (50 degrés de liberté) dépassent largement le seuil de signification de 0,1. Il aurait fallu une statistique de t plus grande que 1,676 pour avoir une probabilité inférieure à 0,1, et ainsi pouvoir déclarer cette différence significative. Au tableau 5, sont présentées les moyennes d'accumulations, les écarts-types, les valeurs minimum et maximum par période de trente ans (29 périodes d'entreposage) et par période d'entreposage, calculés sur l'ensemble des 51 stations. Les différences moyennes pour les 51 stations, le nombre de degrés de liberté (DL), la valeur de la statistique de t et la probabilité observée du test de t, pour chaque période d'entreposage et pour les 51 stations, sont présentés au tableau 6. Un graphique illustrant les accumulations d'eau en fonction des stations météorologique présentées dans le même ordre qu'au tableau A2.1 (annexe 2), pour une période d'entreposage d'octobre à mai et une période de retour de 10 ans, est présenté à la figure 4.

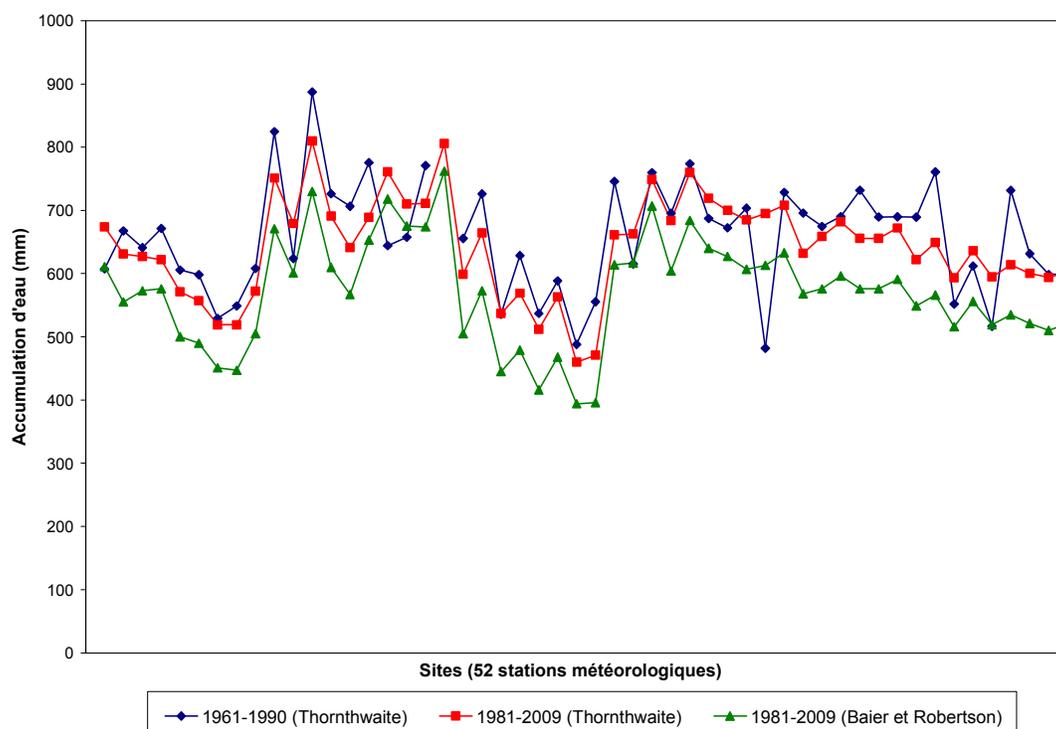
Tableau 5. Comparaison des accumulations (mm) pour les périodes 1961-1990 et 1981-2009 avec la méthode de Thornthwaite

	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Accumulation 1981-2009 (octobre à mai)	496	57	373	628
Accumulation 1961-1990 (octobre à mai)	488	59	353	650
Accumulation 1981-2009 (septembre à juin)	506	75	355	691
Accumulation 1961-1990 (septembre à juin)	504	74	364	731

Tableau 6. Résultats des tests de comparaison des accumulations pour les périodes 1961-1990 et 1981-2009 avec la méthode de Thornthwaite

Période d'entreposage	Nombre d'obs.	Moyenne	Écart -type	Erreur -type	Min	Max	DL	t	Prob
Octobre à mai	51	7,98	49,77	6,97	-91,0	170,2	50	1,15	0,2576
Sept. à juin	51	1,85	59,79	8,37	-133,5	190,9	50	0,22	0,8257

obs = observations; Moyenne = différence moyenne pour les 51 stations; Min = différence minimum; Max = différence maximum; DL = degrés de liberté; t = valeur de la statistique de t; Prob = probabilité observée du test de t.



Note : Les points (représentant des sites indépendants) sont reliés entre eux afin de faciliter la lecture du graphique.

Figure 4. Mise à jour des valeurs d'accumulation pour une période d'entreposage d'octobre à mai et une période de retour de 10 ans

5.3.2 Utilisation du modèle de Baier et Robertson pour le calcul de l'évapotranspiration

Dans un second temps, l'équation de Baier et Robertson (1965) calibrée par Rochette (1988), à laquelle un facteur de 0,8 a été appliqué (Lehoux, 1994), a servi à estimer l'évaporation pour la période de 1981 à 2009. L'accumulation a été calculée avec la méthodologie de la section 4.1. Cependant, seules les périodes de retour de 10 ans et de 25 ans ont été calculées. De plus, au lieu de présenter seulement deux périodes d'entreposage, l'accumulation d'eau a été calculée sur une base cumulative, débutant le 1^{er} octobre, pour des durées de 7, 8, 9, 10, 11 et 12 mois. Il est donc possible de comparer individuellement les périodes d'octobre à mai de 1961-1990 et 1981-2009 calculées selon le modèle de Thornthwaite, à la période d'entreposage de 8 mois pour la période de 1981 à 2009 calculée selon Baier et Robertson.

Le tableau A2.6 (période de retour de 10 ans) et le tableau A2.7 (période de retour de 25 ans) présentent les accumulations d'eau moyennes pour des périodes d'entreposage débutant le 1^{er} octobre. Les bornes inférieures et supérieures d'un intervalle de confiance à 90 % pour une prédiction individuelle basée sur le modèle de régression polynomiale sont aussi présentées. La précision relative calculée à partir de ces bornes de l'intervalle de confiance est présentée dans la dernière colonne de chaque tableau.

5.3.3 Comparaison entre les accumulations calculées par les méthodes de Thornthwaite et de Baier et Robertson pour les années 1981-2009

Les accumulations moyennes issues des deux méthodes ont été comparées par station et par période de retour pour la durée d'entreposage de 8 mois (octobre à mai) (tableau 7). Le niveau de signification de leurs différences a été testé (Student t) pour les deux périodes de retour.

Tableau 7. Comparaison des deux méthodes d'évaluation de l'évapotranspiration pour les années 1981-2009

Période de retour	Méthode	Accumulation moyenne (mm)	Écart-type
10	Thornthwaite	643	78
10	Baier-Robertson	571	85
25	Thornthwaite	697	83
25	Baier-Robertson	626	92

Dans les deux cas, l'évapotranspiration calculée avec l'équation de Thornthwaite est inférieure à celle calculée à partir de l'équation de Baier et Robertson, de sorte que les accumulations calculées avec la première méthode sont supérieures à celles de la deuxième. Pour la période de retour de 10 ans, la différence moyenne est de 72 mm, la statistique $t = 28,6$ et la probabilité observée $P < 0,0001$. Cette différence est donc significative. Pour la période de 25 ans, la différence moyenne est de 71 mm et $t = 32,1$, la différence est aussi significative ($P < 0,0001$). Les résultats pour une période de retour de 10 ans sont illustrés à la figure 4. Chaque point représente une station et ces dernières sont dans le même ordre qu'au tableau A2.1 (annexe 2). Le modèle de Baier et Robertson (Rochette, 1988), auquel un facteur de 0,8 a été appliqué (Lehoux, 1994), tend à produire des accumulations plus faibles que celui de Thornthwaite pour

la période d'octobre à mai. Ceci est également vrai pour les autres périodes d'entreposage.

6 Scénarios climatiques

6.1 Mise en contexte

Selon les études de changements climatiques, le régime des précipitations et des températures dans le futur sera modifié. Il était donc nécessaire de voir comment les changements climatiques affecteront les accumulations d'eau servant au calcul du dimensionnement des structures d'entreposage. Il a été convenu de construire des scénarios climatiques pour les périodes futures 2016-2044 et 2041-2069, avec comme référence la période 1981-2009. Les séries temporelles devaient être préparées pour un ensemble de points ayant les coordonnées (latitude et longitude) des 52 stations météorologiques préétablies. Préalablement, il a été nécessaire d'inventorier et d'étudier les indicateurs climatiques les plus susceptibles d'entrer en jeu dans le calcul des volumes d'entreposage.

6.2 Méthodologie

6.2.1 Choix des indicateurs climatiques et des balises de données climatiques à produire

Lors de la première rencontre du comité d'experts, des discussions ont eu lieu afin de sélectionner les indicateurs climatiques et les scénarios climatiques à produire. Le comité a statué que les deux facteurs climatiques les plus pertinents pour l'évaluation des volumes d'entreposage sont les précipitations et la quantité d'eau évaporée. Ainsi, compte tenu de la méthode choisie pour évaluer l'évaporation (section 5), les variables nécessaires sont les précipitations (Pr) totales (liquides et solides, en mm jour⁻¹ ou kg m⁻² jour⁻¹), ainsi que les températures minimale (T_{min}) et maximale (T_{max}) atteintes quotidiennement (en °C) pour deux périodes futures, soit 2016-2044 et 2041-2069. Les données produites pouvaient ainsi être utilisées pour calculer l'accumulation d'eau pour un horizon relativement rapproché (2030) et pour un horizon plus éloigné (2050).

6.2.2 Simulations climatiques (Grenier, 2013)

Un scénario climatique décrit l'évolution de variables climatiques et est spécifique à chaque application. Les besoins d'une application impliquent des choix méthodologiques visant les modèles, le nombre de simulations, les régions étudiées, les périodes (passée et future), les variables ou indices, leur fréquence (quotidienne, mensuelle, etc), les statistiques appliquées (pour corriger ou analyser les séries temporelles) et le format de présentation final. Dans le cas présent, les variables d'intérêt sont les précipitations (Pr) totales (liquides et solides, en mm jour⁻¹ ou kg m⁻² jour⁻¹), ainsi que les températures minimale (T_{min}) et maximale (T_{max}) atteintes quotidiennement (en °C).

Les sorties brutes de quatre simulations de type « régional » provenant du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC, version 4.2.3) (Caya et Laprise, 1999; de Elia et Côté, 2010), à une résolution de 45 km, ont été utilisées pour construire les scénarios. Les simulations sont issues de modèles numériques qui décrivent les interactions

entre des variables ou des composantes climatiques (température, pression, vents, humidité, nuages, pollution, radiation, ozone, glace de mer, surface, végétation, gaz à effet de serre, etc.). Plus concrètement, il s'agit d'un programme informatique dans lequel les équations décrivant les interactions jugées les plus importantes sont codées, et qui simule l'évolution de l'état de l'atmosphère dans le temps, en partant de conditions initiales basées sur des observations ou sur les sorties d'un autre modèle.

Les données simulées contiennent des erreurs causées par l'imperfection des modèles numériques. Ces biais peuvent être corrigés. Pour le présent projet, deux méthodes de correction par quantile appelées « *daily scaling* » (DS) et « *daily translation* » (DT) (Mpelasoka and Chiew, 2009) ont été utilisées. Ces deux méthodes étaient reconnues comme les deux plus sophistiquées à Ouranos au moment de produire les scénarios. L'utilisation de deux méthodes au lieu d'une seule permet d'accroître la variété des scénarios disponibles. Ces méthodes nécessitent des observations, des simulations sur la période historique et sur les périodes futures. Elles ont également la propriété de ramener les données simulées (régionales) à l'échelle locale (station de mesure).

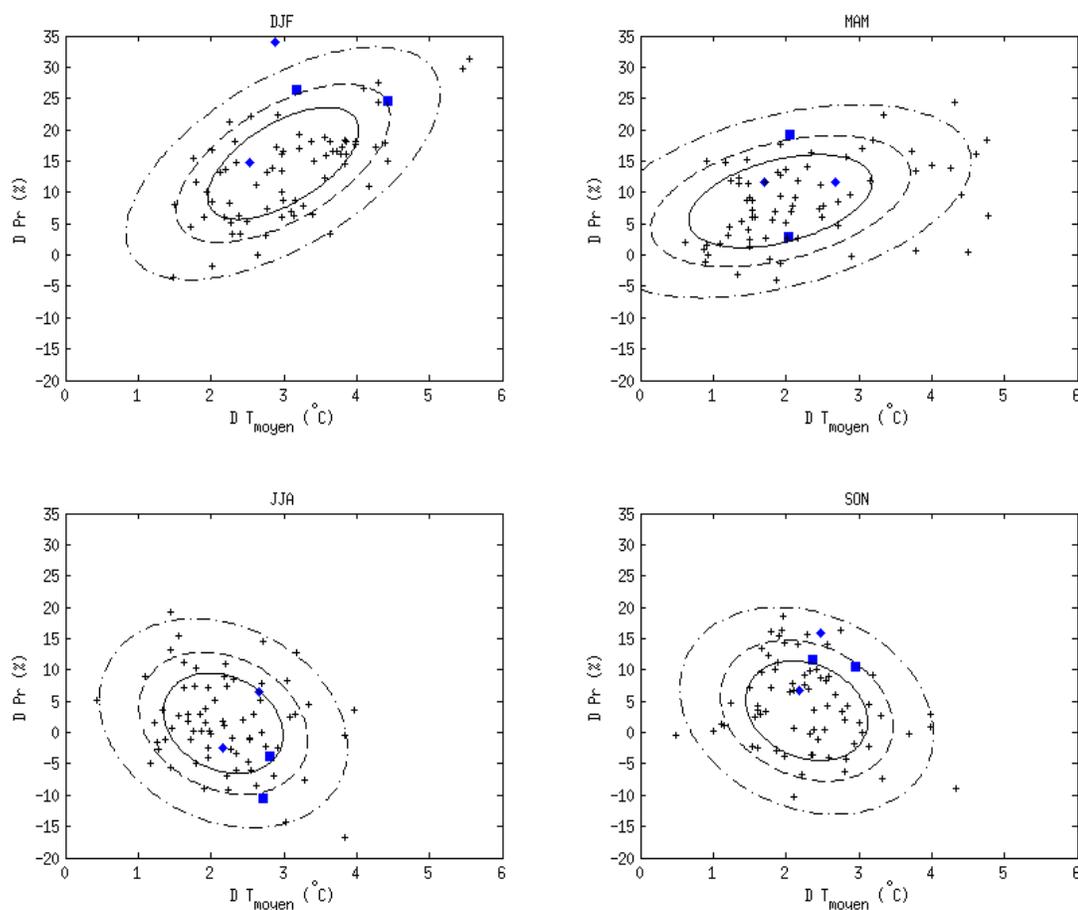
En résumé, les scénarios climatiques ont été construits pour les périodes futures 2016-2044 et 2041-2069, avec comme référence la période historique 1981-2009. Les séries temporelles ont été préparées pour un ensemble de points ayant les coordonnées (latitude et longitude) des 52 stations météorologiques et classées par directions régionales du MAPAQ (figure 1). Au total, 16 scénarios ont été produits (4 simulations x 2 périodes futures x 2 méthodes de correction), produisant des valeurs futures de T_{\min} , T_{\max} et Pr à une fréquence journalière. Les scénarios représentent une fenêtre d'éventualités, soit un éventail de futurs plausibles. Dans ce projet, comme le nombre de simulations est limité (4 sur une possibilité d'une centaine), le futur climat effectif pourrait être en dehors de cette fenêtre.

6.3 Résultats et discussion (Grenier, 2013)

Seize (16) fichiers de données présentant les précipitations, les températures maximales et les températures minimales, sur une base journalière, ont été produits.

La figure 5 présente les écarts ou deltas (Δ) de températures et de précipitations moyennes selon différentes simulations, pour chacune des saisons. Pour chaque simulation et chaque jour faisant partie d'une période, les valeurs de T_{\min} , T_{\max} et Pr sont moyennées sur les 52 stations. Les valeurs obtenues (une par jour, par variable, par simulation) sont ensuite moyennées sur tous les jours d'une période, et les Δ sont obtenus par soustraction entre les deux périodes. Afin de pouvoir présenter l'information relative aux trois variables sur un même plan, c'est ΔT_{moyen} qui est présenté, suivant l'estimation $\Delta T_{\text{moyen}} \sim (\Delta T_{\min} + \Delta T_{\max})/2$. Pour fin de comparaison avec un plus grand ensemble, la figure 5 a été produite avec les périodes 2046-2065 et 1981-2000; en effet, un plus grand nombre de projections globales sont disponibles pour cette fenêtre temporelle. L'intérêt des diagrammes de deltas (figure 5) réside dans le fait d'avoir une idée de l'incertitude couverte par les simulations choisies par rapport à l'ensemble des simulations disponibles. Les quatre simulations régionales considérées ici se situent en général regroupées près de la médiane (des 71 simulations globales) en termes de deltas de températures, et en général au-dessus de la médiane en termes de deltas de précipitations (à l'exception de JJA).

Les médianes pour ΔT moyen et ΔPr sont présentées au tableau 8 pour l'année et les 4 saisons : l'hiver (DJF), le printemps (MAM), l'été (JJA) et l'automne (SON). Les deltas indiquent le changement moyen sur une certaine région et entre deux périodes données. Dans ce cas-ci, il s'agit des changements de la température et des précipitations moyennes entre 1981-2000 et 2046-2065.



Note : Chaque symbole '+' noir correspond au delta d'une des 71 simulations globales (écart entre 1981-2000 et 2046-2065). Les quatre marqueurs de couleur correspondent aux simulations régionales choisies pour le projet; le symbole donne une information supplémentaire sur le pilote de modèle de circulation générale (MCG) de chaque simulation régionale : le losange pour MPI-ECHAM5 et le carré pour CCCma-CGCM3. (Tiré de Grenier, 2013).

Figure 5. Diagrammes de dispersion des deltas de température et de précipitation, par saison

Tableau 8. Médianes des deltas (Δ) de températures moyennes (T_{moyen}) et de précipitations (Pr) des 71 simulations du modèle de circulation générale (MCG)

	ΔT_{moyen} ($^{\circ}\text{C}$)	ΔPr (%)
Annuel	+ 2,4	+ 5,9
DJF	+ 3,0	+ 14,6
MAM	+ 1,9	+ 8,6
JJA	+ 2,2	+ 1,5
SON	+ 2,3	+ 3,5

7 Élaboration des scénarios agronomiques

7.1 Mise en contexte

L'ingénieur qui conçoit une structure d'entreposage de fumier et de lisier doit s'assurer que cette dernière répondra à sa durée de vie utile, qui est généralement de 25 à 30 ans (AIAQ, CRAAQ et IRDA, 2012). Cependant, d'ici 30 ans, les pratiques agronomiques risquent d'être passablement affectées par les changements climatiques. Entre autres, la saison de croissance sera modifiée, le dernier gel printanier sera devancé et le premier gel automnal retardé (Ouranos, 2004; Rochette et al., 2004; Lease et al., 2009; Atlas agroclimatique du Québec, 2012). Ces changements auront un impact direct sur le calendrier d'épandage et ainsi, sur les périodes d'entreposage.

Cette section propose d'abord une revue de littérature portant sur la période d'épandage des déjections animales et sur les indices agroclimatiques pouvant avoir un impact sur le moment propice à de l'épandage. Un aperçu des conséquences des changements climatiques sur ces indicateurs, ainsi que sur les pratiques agronomiques, est présenté. Les informations tirées de la littérature seront ensuite considérées pour l'établissement de scénarios agronomiques futurs dans trois régions agricoles du Québec (Beauce, Montérégie et Lanaudière). Ces scénarios agronomiques pourront alors servir de piste de réflexion pour l'ingénieur qui doit décider quelle période d'entreposage il considérera pour la conception d'une structure d'entreposage.

7.2 Revue de littérature

7.2.1 Période d'épandage

L'épandage se fait de préférence à un moment précis, à lequel les cultures prélèvent le maximum des éléments fertilisants contenus dans les fumiers et lorsque les risques pour l'environnement sont les plus faibles. Selon l'article 31 du Règlement sur les exploitations agricoles (REA) (MDDEFP, 2012), l'épandage de matières fertilisantes doit être réalisé sur un sol non gelé et non enneigé. Conséquemment, l'épandage de matières fertilisantes ne peut être fait que du 1^{er} avril au 1^{er} octobre de chaque année. Toutefois, les déjections animales peuvent être épandues après le 1^{er} octobre sur un sol non gelé et non enneigé (dans une proportion de moins de 35 % du volume annuel produit par le lieu d'élevage), si l'agronome responsable du plan agroenvironnemental de fertilisation (PAEF) y précise une nouvelle période d'interdiction.

Une étude réalisée à l'IRDA (Côté et al., 2002) indique qu'après le 1^{er} octobre, il n'est pas approprié d'apporter des fumiers et lisiers sur les prairies, car une charge ammoniacale et bactérienne importante peut être transportée par ruissellement vers les eaux de surface. L'humidité des sols est plus élevée qu'à d'autres saisons et le risque de ruissellement est plus grand. Le ruissellement peut aussi survenir lors des redoux hivernaux et à la fonte des neiges au printemps suivant. De plus, il ne faut pas épandre lorsque la nappe phréatique se trouve trop près de la surface (Côté et al., 2002), ce qui est souvent le cas au printemps.

Une enquête réalisée par Statistiques Canada (Beaulieu, 2004) démontre que le Québec s'est distingué des autres provinces canadiennes par le pourcentage relativement important d'agriculteurs qui épandent des fumiers au printemps (72,3 %) et à l'été (72,9 %) par rapport à ceux qui épandent à l'automne (43,0 %). Ces pourcentages élevés au printemps et à l'été pour le Québec peuvent s'expliquer par l'importance relative du secteur laitier dans la province. Les producteurs laitiers doivent vider les installations d'entreposage et épandre les fumiers sur les cultures fourragères au printemps et à l'été (Beaulieu, 2004).

Cantin (2010) a réalisé une étude portant sur la planification des épandages de fumier de poulet sur des sols argileux en production de blé biologique. L'étude démontre qu'il faut davantage se préoccuper des conditions météorologiques et des risques possibles de compaction du sol, plutôt que d'une quelconque date d'épandage.

En résumé, l'épandage des fumiers doit se faire généralement à l'intérieur de la période du 1^{er} avril au 1^{er} octobre pour respecter la réglementation et pour éviter la pollution des eaux de surface. Cependant, d'autres paramètres tels que le type de culture et d'élevage peuvent avoir une influence sur les périodes d'épandage. Enfin, les indicateurs agroclimatiques (indices hydriques et les indice thermiques) sont d'une grande importance pour l'agronome lorsque vient le temps d'établir le calendrier d'épandage.

7.2.2 Indicateurs agroclimatiques

Les indicateurs climatiques utilisés en agriculture (aussi appelés indicateurs agroclimatiques) expriment la relation entre les variables climatologiques comme la température de l'air et les précipitations et les concepts agronomiques comme les stades phénologiques d'une culture (Lepage et al., 2012). Ils sont utilisés en agriculture comme critère de décision, par exemple, à court terme, pour connaître le moment opportun pour procéder aux récoltes, aux semences, ou à l'épandage. À plus long terme, les indicateurs agroclimatiques peuvent aussi être utiles à la prise de décision de l'achat d'un système d'irrigation ou pour le choix d'une culture ou d'un cultivar. Les indices décrits ci-dessous devraient être pris en compte pour l'établissement des scénarios agronomiques car ils ont un impact sur les périodes d'épandage de fumier et de lisier.

7.2.2.1 Indices thermiques

Dates du dernier gel printanier et du premier gel automnal

Le dernier gel printanier est ici défini comme le dernier jour où la température minimale quotidienne est inférieure ou égale à la température gélive, c'est-à-dire à une température suffisamment basse pour provoquer des lésions aux végétaux. Le premier gel automnal correspond au premier jour où la température minimale quotidienne enregistrée est inférieure ou égale à la température létale. Cet indice est associé à divers niveaux de probabilité liés aux risques de fin de croissance de la culture ou de dommages potentiels à celle-ci (Lepage et al., 2012).

De récentes études ont tenté de dresser un portrait futur (horizon 2041-2070) de ces deux indices pour les arbres fruitiers au Québec (Lepage et al., 2012). Un devancement de 15 à 17 jours pour le dernier gel printanier et un retard de 11 à 17 jours pour le premier gel automnal ont été estimés, laissant présager une plus longue saison sans gel (Rochette et al., 2004; Lease et al., 2009).

Longueur de la saison de croissance

La longueur de la saison de croissance est définie comme la période durant laquelle les conditions climatiques d'une région permettent la croissance d'une culture donnée. Elle correspond à la période où la température moyenne se maintient au-dessus de 5 °C (Lepage et al., 2012). Selon certaines études, un allongement de la saison de croissance serait anticipé dans le futur dans le sud de l'Ontario et du Québec (Bootsma et al., 2004). Il est projeté, à l'horizon 2050 pour le sud du Québec, une augmentation moyenne des températures estivales de 1,9 à 3 °C et de 2,5 à 3,8 °C en hiver (Ouranos, 2010).

L'Atlas agroclimatique du Québec (2012) (www.agrometeo.org) a été consulté afin d'évaluer l'impact des changements climatiques sur la longueur de la saison de croissance dans les trois régions agricoles pour lesquelles un scénario agronomique sera élaboré. Les tableaux 9 à 11 présentent respectivement pour la Beauce, la Montérégie et Lanaudière, les scénarios de changement inférieur et supérieur par rapport à la période 1971-2000, concernant la longueur de la saison de croissance et les dates de début et de fin. Le scénario de changement inférieur est le 10^e percentile des changements projetés par 15 simulations climatiques sélectionnées alors que le scénario de changement supérieur est le 90^e percentile des changements projetés par les mêmes simulations climatiques. Les changements concernant les dates de début et de fin de la période de croissance sont exprimés en nombres de jours. En ajoutant ces valeurs aux normales 1971-2000, on obtient un aperçu du climat futur possible selon les deux scénarios de changement (Atlas agroclimatique du Québec, 2012). Les valeurs négatives indiquent des dates de début de la saison de croissance plus hâtives que les normales 1971-2000.

Tableau 9. Saison de croissance, dans la région de la Beauce, pour les périodes actuelle et future (Atlas agroclimatique du Québec, 2012)

	1971-2000 (Normale)	Horizon 2050 Scénario de changement inf.	Horizon 2050 Scénario de changement sup.
Début de période de croissance	27 avril – 1 ^{er} mai	- 6 à - 5	- 17 à - 15
Fin de période de croissance	28 octobre – 1 ^{er} novembre	+ 6 à + 7	+ 17 à + 18
Longueur de période de croissance (jours)	180 à 188	194 à 204	207 à 217

Tableau 10. Saison de croissance, dans la région de la Montérégie, pour les périodes actuelle et future (Atlas agroclimatique du Québec, 2012)

	1971-2000 (Normale)	Horizon 2050 Scénario de changement inf.	Horizon 2050 Scénario de changement sup.
Début de période de croissance	13 - 17 avril	- 6 à - 5	- 17 à - 15
Fin de période de croissance	10 - 14 novembre	+ 8 à + 9	+ 17 à + 18
Longueur de période de croissance (jours)	207 à 215	221 à 231	236 à 247

Tableau 11. Saison de croissance, dans la région de Lanaudière, pour les périodes actuelle et future (Atlas agroclimatique du Québec, 2012)

	1971-2000 (Normale)	Horizon 2050 Scénario de changement inf.	Horizon 2050 Scénario de changement sup.
Début de période de croissance	18 - 22 avril	- 6 à - 5	- 17 à - 15
Fin de période de croissance	2 - 5 novembre	+ 6 à + 7	+ 17 à + 18
Longueur de période de croissance (jours)	189 à 206	203 à 213	218 à 229

Les scénarios suggèrent un allongement de la saison de croissance, ce qui pourrait ainsi accroître le potentiel agronomique de cultures requérant une longue saison de croissance (tels le maïs et le soja) ou permettre l'exploitation d'une nouvelle culture, auparavant inadéquate pour les conditions d'une région (Lepage et al., 2011). À l'opposé, des cultures bien adaptées aux conditions plus fraîches, telles les petites céréales (blé, orge, avoine et seigle), pourraient être désavantagées (Ouranos, 2010). L'arrivée de nouvelles cultures dans certaines régions pourrait avoir un impact sur les pratiques d'épandage des déjections animales (périodes d'épandages et doses de fertilisants à appliquer). De plus, l'allongement de la période de croissance permettra l'épandage sur un sol non gelé plus tard à l'automne.

Les cumuls thermiques

- Degrés-jours de croissance

Les degrés-jours de croissance sont utilisés pour l'évaluation du développement des végétaux et des insectes dont la croissance dépend de la température et de l'accumulation d'une quantité de chaleur quotidienne (Plouffe et al., 2011). Selon l'Atlas agroclimatique du Québec (2012), Une augmentation de 412 à 458 degrés-jours (base 10 °C, cumul du 1^{er} avril au 31 octobre) devrait être remarquée pour le sud du Québec à l'horizon 2050 par rapport à la période 1971-2000 pour le scénario de changement supérieur (90e percentile des changements projetés par 15 simulations climatiques sélectionnées).

- Unités thermiques maïs (UTM)

Les unités thermiques maïs (UTM) correspondent à la quantité minimale de chaleur requise à la culture pour atteindre sa maturité; l'indice varie d'une espèce à l'autre (Lepage et al., 2012). Certaines études ont déjà mentionné qu'une hausse des UTM serait envisagée dans le futur (Bélanger et Bootsma, 2002; Bootsma et al., 2004) et une réévaluation de cet indice sera nécessaire éventuellement dans le contexte d'un climat variable et en évolution. Le cumul des UTM maïs pour la période 1971-2000, qui était de 2336 à 2846 UTM en Beauce, de 3101 à 3356 UTM en Montérégie et de 2847 à 3101 UTM dans Lanaudière, pourrait augmenter de 826 à 888 UTM à l'horizon 2050 (scénario de changement supérieur) pour ces trois régions (Atlas agroclimatique du Québec, 2012). Cette augmentation des UTM pourrait pousser certains agriculteurs à cultiver des hybrides de maïs plus performants, aux UTM plus élevés, et demandant donc plus de fertilisation. De plus grandes superficies en maïs pourraient aussi être cultivées dans certaines régions.

7.2.2.2 Indices hydriques

Cumul des précipitations

L'apport d'eau fourni par les précipitations est un indice utilisé dans plusieurs secteurs de production, notamment pour la gestion de l'irrigation des parcelles, l'évaluation du potentiel agricole d'une région donnée et le lessivage des pesticides (Lepage et al., 2012). Le cumul des précipitations peut être fait sur différentes périodes de temps, soient annuelles, mensuelles, hebdomadaires, etc. Une augmentation des précipitations de 4,4 à 13,1 % pour l'horizon 2050 par rapport au climat de 1961-1990 est prévue pour le sud du Québec (Ouranos, 2010). Les projections du cumul des précipitations pendant la période de croissance à l'horizon 2050 par rapport à la période 1971-2000 sont présentées au tableau 12. Les augmentations prévues du cumul des précipitations pourraient retarder certains travaux au champ tel que l'épandage du fumier.

Tableau 12. Cumul des précipitations pendant la période de croissance pour les périodes actuelle et future (Atlas agroclimatique du Québec, 2012)

	1971-2000 (Normale)	Horizon 2050 Scénario de changement inf.	Horizon 2050 Scénario de changement sup.
Beauce	639 à 672	+ 44 à + 62	+ 138 à + 155
Montérégie	639 à 672	+ 44 à + 62	+ 156 à + 174
Lanaudière	570 à 604	+ 44 à + 62	+ 138 à + 155

Une prolongation de la saison propice aux orages de même qu'une augmentation des événements de pluie intense sont aussi prévues pour l'horizon 2041-2070 (Ouranos, 2010). Ainsi, 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).

À l'opposé, la diminution du couvert de neige et sa fonte plus hâtive, projetées par les modèles climatiques, peuvent se traduire par un ressuyage des champs plus tôt au printemps. 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 (Michaud et al., 2012). 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.

7.3 Méthodologie

Des scénarios agronomiques pour une période future ont été établis pour trois grandes régions agricoles du Québec (Beauce, Montérégie et Lanaudière). Ces trois régions ont été choisies en raison de la place importante qu'y occupe l'agriculture et des différences au niveau des types de sols et du climat. Le mandat a été confié à des agronomes travaillant dans le milieu et en contact avec les pratiques ayant cours dans ces régions. Afin d'établir les scénarios de changement des pratiques culturales pouvant subvenir en fonction des changements climatiques, divers intervenants du milieu ont été contactés, principalement les conseillers du Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec (MAPAQ) et des Clubs conseils de la région de Montérégie Ouest.

Les agronomes se sont basés sur des cas types dans leur région pour concevoir leur scénario agronomique futur. Ainsi, un cas actuel typique pour chaque région a été déterminé par l'agronome. Ensuite, afin d'établir les scénarios agronomiques, divers facteurs ont été pris en considération. La revue de littérature (section 7.2) sur les indicateurs agroclimatiques a été consultée afin de prédire comment les pratiques

agronomiques pourront être modifiées dans le futur en raison des changements climatiques.

7.4 Résultats et discussion

7.4.1 Beauce

Le scénario agronomique pour la région de la Beauce a été réalisé pour une ferme typique de la région. Il s'agit d'une ferme ayant deux élevages, soit un élevage de bovins laitiers composés de 35 vaches laitières, leurs veaux de 11 jours et moins, 8 taures laitières de plus de 15 mois et 12 génisses de 11 jours à 15 mois, et un élevage de 413 porcs à l'engraissement.

Trois fenêtres d'épandage existent, soit au printemps (mai), à l'été (juin) et à l'automne (septembre). Selon le scénario futur d'épandage (tableau 14), en comparaison avec le registre d'épandage actuel (tableau 13), l'augmentation de la longueur de la période de croissance et l'augmentation des UTM permettra l'établissement de plus grandes superficies de maïs ensilage dans la région de la Beauce. En conséquence, une plus grande quantité de lisier sera épandue au printemps et il y aura une légère diminution de la quantité de lisier épandue à l'été et à l'automne. En effet, l'épandage dans la culture de maïs doit avoir lieu au printemps, contrairement aux cultures fourragères, sur lesquelles le fumier peut être épandu jusqu'à l'automne, soit après les 2^e et 3^e coupes de foin. Cependant, ces changements mineurs quant aux saisons pendant lesquelles le fumier est épandu n'ont pas d'impact sur la période d'entreposage nécessaire. Selon ce scénario agronomique, une période d'entreposage d'octobre à avril (7 mois) serait suffisante si le lisier est épandu à l'automne à la fin du mois de septembre et au printemps, au début de mois de mai. Le concepteur d'une structure d'entreposage pourrait considérer une période d'entreposage de 8 mois (octobre à mai) pour s'assurer d'une certaine sécurité au cas où l'épandage ne pourrait avoir lieu au début du mois de mai. Un retard pourrait effectivement être causé par des périodes de précipitations importantes au printemps, rendant ainsi l'accès au champ difficile en raison de l'humidité du sol. L'atlas agroclimatique du Québec (2012) prévoit pour la Beauce une augmentation du cumul des précipitations pendant la période de croissance pour l'horizon 2050 par rapport à la période 1971-2000 de 138 à 155 mm dans son scénario de changement supérieur (tableau 12).

Tableau 13. Registre d'épandage actuel d'une ferme typique en Beauce pour 2012 (élaboré par Frédéric Bolduc, agr., Fertior)

Numéro de parcelle	Culture	Superficie épandable (ha)	Date d'épandage	Quantité épandue (m ³)	Type de fumier
1	Prairie mil	1	juin	40	LBL+P ¹
			septembre	41	LBL+P
2	Prairie mil	2,56	juin	80	LBL+P
			septembre	82	LBL+P
3	Orge grainée	4,54			
4	Prairie mil	3,03	juin	95	LBL+P
			septembre	95	LBL+P
5	Prairie 40 % trèfle	2,97	mai	111	LBL+P
			juin	111	LBL+P
			septembre	95	LBL+P
6	Prairie mil	3,54	mai	127	LBL+P
			juin	111	LBL+P
7	Pâturage	2,93	mai	127	LBL+P
8	Prairie trèfle 10 %	2,78	mai	109	LBL+P
			septembre	82	LBL+P
9	Prairie mil	4,03	mai	143	LBL+P
			juin	111	LBL+P
10	Pâturage	2,96	mai	95	LBL+P
			septembre	68	
11	Prairie mil	4,04	mai	159	LBL+P
			septembre	136	LBL+P
MA4	Orge grainée	4,97	mai	143	LBL+P
MA5	Prairie 30 % trèfle	3,61	juin	95	LBL+P
			septembre	136	
PP1	Prairie mil	2,59	mai	111	LBL+P
			juin	80	LBL+P
PP2	Prairie mil	2,06	mai	80	LBL+P
			juin	64	LBL+P
		47,61	Total (m ³)	2729	%
			Printemps	1206	44
			Été	787	29
			Automne	736	27

LBL+P: Lisier de bovin laitier et de porc

Tableau 14. Scénario agronomique futur d'une ferme typique en Beauce tenant compte des impacts des changements climatiques sur la longueur de la saison de croissance à l'horizon 2041-2070 (élaboré par Frédéric Bolduc, agr., Fertior)

Numéro de parcelle	Culture	Superficie épanachable (ha)	Date d'épandage	Quantité épanchée (m ³)	Type de fumier
1	Maïs ensilage	1	mai	56	LBL+P
2	Maïs ensilage	2,56	mai	127	LBL+P
3	Maïs ensilage	4,54	mai	231	LBL+P
4	Prairie 60 % trèfle	3,03	juin	80	LBL+P
5	Orge grainée	2,97	mai	80	LBL+P
6	Prairie 40 % trèfle	3,54	mai sept	127 123	LBL+P LBL+P
7	Pâturage	2,93	mai	95	LBL+P
8	Prairie mil	2,78	mai juin sept	103 103 102	LBL+P LBL+P LBL+P
9	Prairie 40 % trèfle	4,03	juin sept	143 136	LBL+P LBL+P
10	Pâturage	2,96	mai	95	LBL+P
11	Orge grainée	4,04	mai	95	LBL+P
MA4	Prairie 20 % trèfle	4,97	mai juin sept	159 159 150	LBL+P LBL+P LBL+P
MA5	Prairie 60 % trèfle	3,61	juin	95	LBL+P
PP1	Prairie mil	2,59	mai juin sept	95 95 95	LBL+P LBL+P LBL+P
PP2	Prairie 20 % trèfle	2,06	mai juin sept	64 64 68	LBL+P LBL+P LBL+P
		47,61	Total (m ³)	2742	%
			Printemps	1328	48
			Été	739	27
			Automne	675	25

LBL+P: Lisier de bovin laitier et de porc

7.4.2 Montérégie

Le maïs et le soya dominent le paysage agricole montréalais couvrant respectivement 255 000 et 128 000 hectares (MAPAQ, 2012). La région est également très propice à l'horticulture légumière, mais celle-ci n'occupe pour l'instant que 17 000 hectares. À l'heure actuelle, la principale rotation en cours sur les terres agricoles de la Montérégie est donc composée de la succession culturale maïs-maïs-soya ou maïs-soya. La culture du maïs étant très exigeante pour les sols, certains producteurs ajoutent un semis d'engrais vert en post-récolte du soya dans la rotation courante. Certains producteurs tentent aussi depuis quelques années d'instaurer la culture du blé d'automne suivant la culture du soya, mais plus souvent qu'autrement, ces tentatives avortent par manque de chaleur. Le scénario actuel prépondérant est composé de maïs et de soya. Le maïs est semé à la fin avril et récolté à la fin octobre ou au début novembre. Le soya est semé au début mai et récolté à la fin septembre ou au début octobre, et est suivi parfois d'un engrais vert.

Ainsi, si le climat se réchauffe tel que prévu par les scénarios de changements climatiques, provoquant un allongement de la saison de croissance de 15 à 31 jours grâce à des automnes tardifs et des printemps hâtifs (tableau 10), les céréales d'automne et les cultures de conserves seront valorisées à la place des engrais verts. Le principal impact de ce changement sur les fenêtres d'épandage et quantités de lisier pouvant être épandues tient au fait que le blé d'automne et les cultures de conserves présentent des besoins en éléments nutritifs plus élevés que le soya (CRAAQ, 2010). De plus, des hybrides de maïs plus performants, aux UTM plus élevés, et demandant donc plus de fertilisation, pourraient être cultivés. La quantité de lisier épandu étant calculée en fonction des besoins en nutriments de la culture, si certaines années de soya sont remplacées par des années de blé d'automne – cultures de conserves et que des hybrides de maïs plus performants sont utilisés, de plus grandes quantités de lisier pourraient être épandues.

D'autre part, de nouvelles fenêtres d'épandage seraient générées. En effet, les engrais verts sont le plus souvent non fertilisés puisque ceux-ci sont semés suivant la culture principale dans le but de capter les éléments nutritifs résiduels et ne sont donc pas récoltés, mais enfouis afin de maintenir la qualité des sols. Leur remplacement par des cultures demandant une fertilisation permet de revenir au champ pour épandre des engrais de ferme. Deux nouvelles fenêtres d'application de lisier seraient donc créées : avant la céréale d'automne (à l'automne) et avant la culture de conserves (à l'été). La culture de conserves nécessite une quantité plus importante de fertilisants que la céréale d'automne. Sur les terres utilisées pour la production de foin, une coupe supplémentaire pourrait aussi survenir, permettant un épandage de plus. La production d'hybrides de maïs plus performants est lucrative pour les producteurs. La culture de conserves est également une culture de bonne valeur. Par exemple, le haricot frais ne demande qu'un mois de croissance et génère des revenus intéressants.

Le scénario futur potentiel inclut des cultures de maïs avec UTM plus grands (cultivars plus performants), de soya, de céréales d'automne et de haricot frais. Le maïs sera semé plus tôt en avril et récolté plus tard en novembre (possibilité d'engrais verts). Ensuite, le soya sera semé plus tôt en avril et récolté à la fin septembre ou au début

octobre, suivi de céréales d'automne, plantées en octobre et récoltées à la mi-juillet de l'année suivante. Le haricot frais pourra ensuite être semé à ce moment et être récolté à la fin de la saison.

Il est important de mentionner que les apports de lisier sont règlementés par le REA en fonction de la saturation en phosphore des sols. Puisque les sols agricoles de la Montérégie présentent une richesse en phosphore généralement élevée, il est à prévoir que même si les besoins des cultures sont augmentés, il se peut que les apports en lisier ne puissent être haussés. Par contre, les nouvelles fenêtres d'épandage donneraient une plus grande flexibilité au producteur.

7.4.3 Lanaudière

Un scénario agronomique a été réalisé pour une ferme type dans la région de Lanaudière. Le producteur cultive présentement du maïs, du soja et du blé en rotation sur ses 135 hectares de terre cultivables. Le producteur épand ses 3 000 m³ de lisier produits annuellement en utilisant deux fenêtres d'épandage. La première fenêtre d'épandage est avant le semis de maïs, généralement entre le 1^{er} et le 15 mai. La deuxième fenêtre d'épandage a lieu après la récolte de la céréale (blé), entre le 15 août et le 30 septembre, en implantant souvent un engrais vert. En cas de surplus, le lisier est épandu après la récolte du maïs, mais il s'agit d'une situation très rare. Les quantités apportées sont équivalentes à 40 m³ par hectare avant le semis de maïs et peuvent atteindre 50 m³ par hectare après la récolte de la céréale. Les apports de fertilisants après le soya ne sont pas nécessaires.

Ainsi, si le climat se réchauffe tel que prévu par les scénarios de changements climatiques, provoquant un allongement de la saison de croissance d'environ 10 à 26 jours grâce à des printemps plus hâtifs et des automnes plus tardifs (tableau 11), les cultures de conserves seront valorisées comme en Montérégie. Par exemple, en cas d'introduction d'une culture de haricot extra-fin hâtif dans le futur, une autre fenêtre d'épandage s'ouvrira après la récolte de cette culture, principalement avec une implantation d'engrais vert. Cette fenêtre aurait lieu à la fin du mois de juillet jusqu'à la mi-août. Le haricot fin pourra remplacer le soya dans la rotation qui pourra donc devenir : maïs – soya – blé - haricot fin – maïs – soya – blé - haricot fin. Dans ce cas, il y aura une alternance graminée/légumineuse avec deux fenêtres d'épandage dans les bonnes conditions, soit après la récolte du blé et après la récolte de haricot.

De plus, tout indique que les changements climatiques mèneront à un changement des moments d'épandages. Ces dernières années, selon Oussama Benslimane, agr., la période d'épandage au printemps, normalement située entre le 1^{er} et le 15 mai, a été souvent devancée lorsque les conditions de sol le permettaient. De même, les conditions du sol et du climat en automne permettaient des épandages plus tardifs.

7.5 Conclusion

Les conclusions des scénarios agronomiques démontrent que les producteurs bénéficieront de plus grandes et de plus nombreuses plages d'épandage dans le futur, en raison d'une plus grande diversité de cultures. De plus, l'établissement de nouvelles cultures nécessitant une plus longue période de croissance, comme le blé d'automne et les cultures de conserves, présentent des besoins en éléments nutritifs

plus élevés que les cultures qu'elles remplaceront, tel le soja. Cela permettra l'apport de plus grandes quantités de fumier et de lisier.

Cependant, quelques facteurs (augmentation du cumul des précipitations, événements de pluie intense) pourront avoir un impact sur le calendrier d'épandage. Il s'avérerait donc nécessaire de produire des données pouvant fournir une plus grande flexibilité pour le concepteur de structures d'entreposage. Ainsi, afin d'offrir cette flexibilité, les calculs d'accumulation d'eau pour le futur seront faits pour des périodes d'entreposage débutant le 1^{er} septembre et le 1^{er} octobre, pour des durées de 8 à 12 mois et de 7 à 12 mois, respectivement.

8 Calcul des accumulations d'eau pour les périodes futures

8.1 Mise en contexte

Ayant en main des scénarios climatiques pour les périodes 2016-2044 et 2041-2069, il était possible de calculer les accumulations d'eau pour ces deux périodes futures. Suivant les conclusions tirées des scénarios agronomiques, des données pouvant fournir une plus grande flexibilité au concepteur de structures d'entreposage par rapport au guide de Joncas et al. (1993) devaient être produites. Ainsi, les accumulations d'eau devaient être calculées sur plusieurs périodes de temps.

8.2 Méthodologie

La méthodologie de calculs d'accumulation, présentée dans la section 5.2 et utilisée pour les observations, a été appliquée aux scénarios climatiques pour les 52 sites correspondant aux stations météorologiques (tableau A2.1, annexe 2) réparties dans les différentes directions régionales du MAPAQ. Cependant, ce ne sont pas des valeurs d'accumulation observées qui ont été utilisées ici; ce sont les valeurs d'accumulations futures, calculées à partir des données de précipitations, de températures minimales et de températures maximales futures, simulées sur une base journalière (huit scénarios par période). Un nouveau modèle polynomial a été ajusté à ces valeurs d'accumulations futures. L'accumulation pour les différentes périodes de retour a ensuite été évaluée à partir de la distribution empirique des valeurs futures d'accumulation. La variabilité devait être présentée différemment que pour les accumulations des périodes 1961-1990 et 1981-2009. Dans ces deux cas, l'accumulation en fonction des périodes de retour a été calculée à partir de données climatiques observées de 30 années passées. L'erreur statistique sur ces valeurs d'accumulation a été estimée par intervalle de confiance et la théorie pour le calcul de cet intervalle est bien connue. Cependant, pour les périodes futures (2016-2044 et 2040-2069), ce sont les accumulations minimum et maximum des huit scénarios construits pour chaque période qui sont présentées en fonction de deux périodes de retour. Ces deux valeurs ont été calculées pour refléter la variabilité qui existe entre ces scénarios, car l'erreur statistique ne peut plus être calculée en appliquant une formule théorique simple.

L'évaporation nécessaire au calcul de l'accumulation d'eau a été estimée par l'équation d'évapotranspiration de Baier et Robertson, calibrée par Rochette (1988), à laquelle un facteur de 0,8 a été appliqué (Lehoux, 1994). Les accumulations ont été calculées pour deux périodes de retour, soient 10 ans et 25 ans.

Les valeurs d'accumulations calculées pour la période 2016-2044 couvrent des périodes d'entreposage de 7 à 12 mois sur une base cumulative débutant le 1^{er} octobre. Afin d'assurer le plus de flexibilité possible au concepteur, les calculs ont aussi été effectués sur une base cumulative débutant le 1^{er} septembre, pour des durées d'entreposage de 8 à 12 mois.

Les calculs de l'accumulation ont aussi été faits avec les données de la période 2041-2069. Cependant, comme ces données ne sont produites que pour des fins de comparaison avec les données des périodes précédentes (1981-2009 et 2016-2044), les calculs ont été faits seulement pour des périodes d'entreposage d'octobre à avril (7 mois), d'octobre à mai (8 mois) et d'octobre à juin (9 mois). Ces données étaient alors suffisantes pour évaluer les tendances générales en ce qui concerne l'accumulation d'eau pour les périodes 1981-2009, 2016-2044 et 2041-2069.

Les accumulations calculées pour les périodes 2016-2044 et 2041-2069 ont ainsi été comparées individuellement à celles de la période 1981-2009. Pour ce faire, les accumulations annuelles des 52 stations pour une durée d'entreposage de huit mois et une période de retour de 10 ans ont été compilées pour la période 1981-2009. Pour les périodes futures, les accumulations correspondantes (durée d'entreposage de huit mois débutant le 1^{er} octobre et période de retour de 10 ans) ont été compilées en considérant la moyenne des huit simulations, de sorte que 1508 résultats étaient disponibles pour chaque période (52 sites × 29 années). Dans le but de décrire l'évolution temporelle des accumulations et de comparer la moyenne des accumulations sur les périodes passée et futures, un modèle d'analyse de covariance a été ajusté à l'ensemble de données à l'aide de la procédure MIXED de SAS (Littell et al., 2006). Par régression linéaire, ce type de modèle permet de construire l'équation de l'accumulation en fonction des années pour chaque période. Il permet également de comparer les pentes de la régression (tendance) et les accumulations moyennes des deux périodes.

8.3 Résultats et discussion

8.3.1 Accumulations pour la période 2016-2044

Les tableaux A3.1 (récurrence 10 ans) et A3.2 (récurrence 25 ans) (annexe 3) présentent les accumulations minimales, maximales et moyennes des huit scénarios climatiques construits pour les 52 sites associés aux stations météorologiques, et pour les six périodes d'entreposage (octobre à avril (7 mois), octobre à mai (8 mois), octobre à juin (9 mois), octobre à juillet (10 mois), octobre à août (11 mois) et octobre à septembre (12 mois)). Les tableaux A3.3 (récurrence 10 ans) et A3.4 (récurrence 25 ans) présentent les accumulations minimales, maximales et moyennes des 8 scénarios pour les 52 sites, et pour cinq périodes d'entreposage (septembre à avril (8 mois), septembre à mai (9 mois), septembre à juin (10 mois), septembre à juillet (11 mois), septembre à août (12 mois)). Les accumulations minimale et maximale sont les valeurs calculées à partir des données des deux scénarios climatiques résultants aux accumulations les plus faibles et les plus élevées, respectivement, parmi les huit scénarios climatiques générés. Ces deux valeurs sont présentées pour refléter la variabilité qui existe entre ces scénarios.

Les accumulations moyennes calculées pour la période 2016-2044 ont ensuite été comparées à celles de la période 1981-2009 à l'aide de la même méthode de calcul

de l'évaporation. Les modèles de régression obtenus pour les deux périodes sont les suivants :

Période 1981-2009 : Accumulation (mm) = $414 + 0,96 \times \text{année}$;

Période 2016-2044 : Accumulation (mm) = $457 + 1,41 \times \text{année}$.

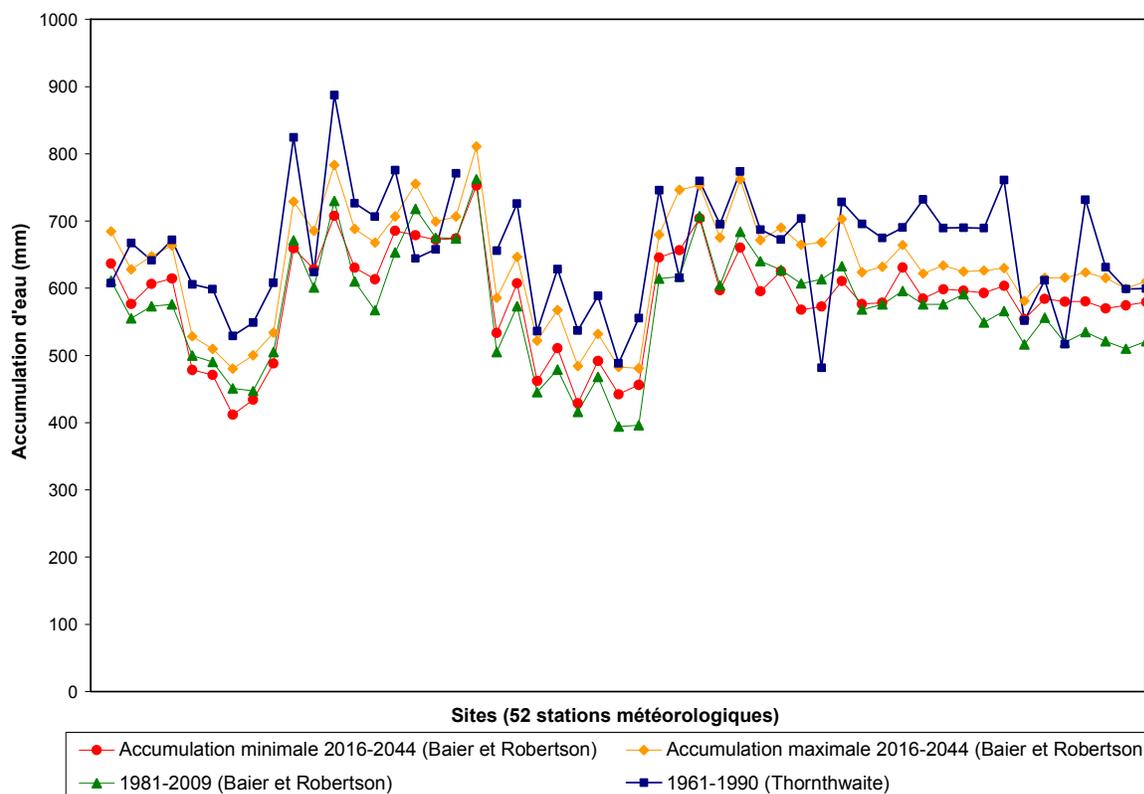
Où, année = 1,2, ... 29. Pour la période 2016-2044, la pente est légèrement plus forte que pour 1981-2009, mais cette différence n'est pas significative, selon le test de F pour l'effet de l'interaction an \times période ($P = 0,1945$) (tableau A5.1, annexe 5). L'effet des années est significatif ($P < 0,0001$), ce qui veut dire que la tendance à la hausse est significative, mais très faible, de l'ordre de 1 mm par année. L'ordonnée à l'origine est significativement différente pour les deux périodes ($P = 0,0032$). Les droites de régression étant presque parallèles, cela confirme que l'accumulation moyenne est significativement supérieure pour la période 2016-2044, par rapport à la période 1981-2009.

À la figure 6, chaque point associé à une des stations, présentées dans le même ordre qu'au tableau A2.1 (Annexe 2), représente l'accumulation calculée pour une période de retour de dix ans, pour une durée d'entreposage de huit mois, débutant le 1^{er} octobre. Il est possible de voir que pour toutes les stations, les moyennes d'accumulations maximales des années 2016-2044 sont plus élevées que les accumulations calculées à partir des observations de 1981-2009. Quant aux moyennes d'accumulations minimales de 2016-2044, les valeurs se rapprochent des résultats obtenus pour les années 1981-2009; certaines accumulations sont même inférieures pour quelques stations. Cela est possible, car d'une part, la hausse probable des températures favorisera une hausse de l'évaporation, et de l'autre, le signal de changement des précipitations est faible, surtout l'été (figure 5).

Enfin, pour plusieurs sites et pour toutes les périodes d'entreposage, les accumulations calculées pour la période 2016-2044 sont plus faibles que les accumulations pour la période 1961-1990, qui étaient présentées dans le guide de Joncas et al. (1993). Ces différences sont en partie causées par l'utilisation du modèle de Baier et Robertson par rapport au modèle de Thornthwaite qui avait été utilisé par Joncas et al. (1993). En effet, tel que démontré à la section 5.2.3, l'évapotranspiration calculée avec l'équation de Thornthwaite est significativement inférieure à celle calculée à partir de l'équation de Baier et Robertson, de sorte que les accumulations calculées avec la première méthode sont supérieures à celles de la deuxième. L'augmentation significative des accumulations causée par les changements climatiques, démontrée par l'analyse statistique, a donc un impact moins important que la diminution des accumulations provoquée par un changement de la méthode d'évaluation de l'évaporation (Baier et Robertson vs Thornthwaite).

Il faut noter que ce sont les valeurs calculées pour la période 2016-2044, pour des périodes de retour de 10 ans et de 25 ans, qui seront présentées dans le nouveau guide de calculs (version préliminaire présentée à l'annexe 6). Ce choix a été fait car les accumulations calculées pour cette période sont significativement plus élevées que celles calculées pour la période 1981-2009. L'option de présenter les valeurs d'accumulation pour la période 2041-2069 a été écartée car cette période ne couvre pas la durée de vie utile d'une structure d'entreposage (25 à 30 ans) qui serait

construite maintenant. Cependant, des calculs ont été fait à partir des données de 2041-2069 afin d'étudier l'évolution possible de l'accumulation d'eau dans le futur.



Note : Les points (représentant des sites indépendants) sont reliés entre eux afin de faciliter la lecture du graphique.

Figure 6. Comparaison des accumulations moyennes futures (2016-2044) et passées (1981-2009 et 1961-1990) pour une période d'entreposage d'octobre à mai (8 mois) et une période de retour de 10 ans, selon deux méthodes de calcul de l'évaporation

8.3.2 Accumulations pour la période 2041-2069

Les résultats des calculs d'accumulation d'eau pour la période 2041-2069 pour trois périodes d'entreposage : 7 mois (octobre à avril), 8 mois (octobre à mai) et 9 mois (octobre à juin) sont présentés à l'annexe 4 pour des périodes de retour de 10 (tableau A4.1) et de 25 ans (tableau A4.2).

Les accumulations calculées pour la période 2041-2069 ont ensuite été comparées à celles de la période 1981-2009. Les modèles de régression obtenus pour les deux périodes sont les suivants :

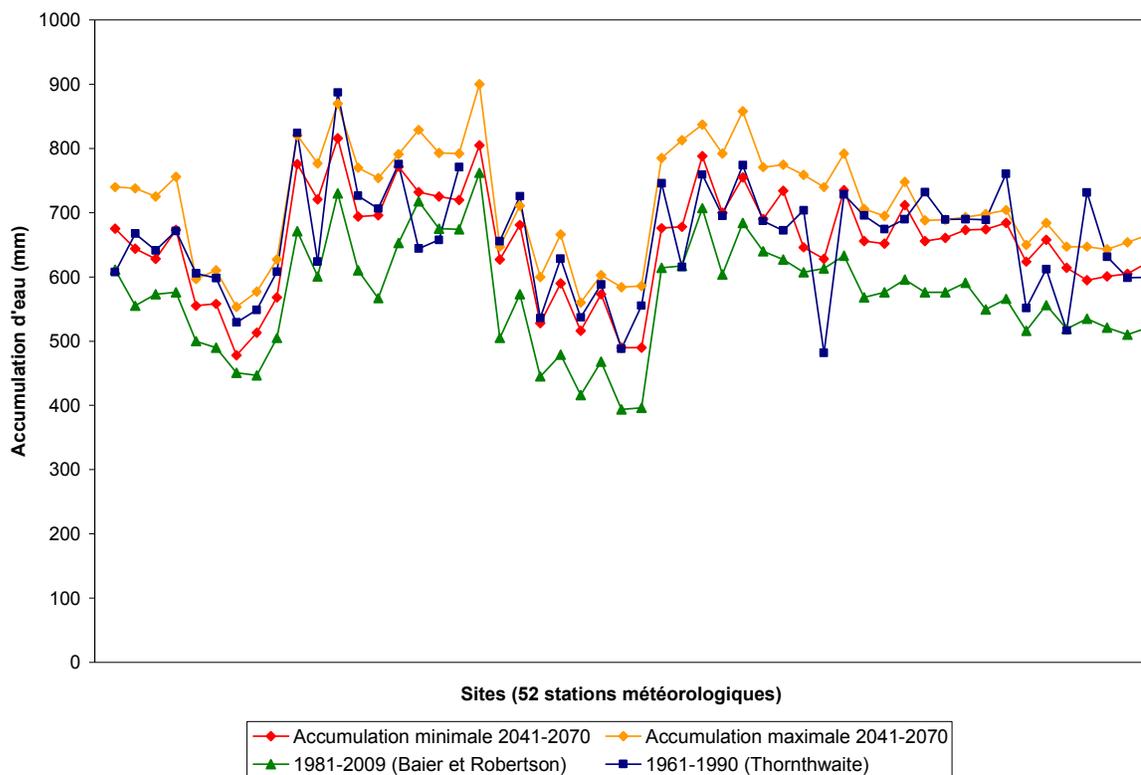
$$\text{Période 1981-2009 : Accumulation moyenne (mm)} = 414 + 0,96 \times \text{année}$$

$$\text{Période 2041-2069 : Accumulation moyenne (mm)} = 484 + 3,21 \times \text{année}$$

Où, année = 1,2, ... 29. La pente de la droite de régression pour la période 2041-2069 (3,2) est nettement plus forte que celle de la période 1981-2009 (0,96) et cette

différence est significative (effet année \times période, $P < 0,0001$) (tableau A5.2, annexe 5). Cela signifie qu'au fil des années, les accumulations moyennes s'accroissent graduellement. Cependant, cette tendance n'est pas suffisamment importante pour invalider l'analyse statistique réalisée à la section 5.2.3. Les accumulations calculées à partir des données climatiques futures sont significativement supérieures à celles des accumulations passées ($F = 22,56$, $Prob < 0,0001$, tableau A5.2, annexe 5). La première année, cette différence est de l'ordre de 70 mm (différence entre les ordonnées à l'origine). L'accumulation augmente plus rapidement pour la période 2041-2069, ce qui forcera la révision des calculs dans un maximum de 20 ans pour prendre en considération cette augmentation prévue des accumulations d'eau à l'horizon 2050.

Une analyse des résultats pour la période d'entreposage de 8 mois et pour la période de retour de 10 ans a aussi été réalisée. Les valeurs d'accumulations en fonction de chaque site sont représentées à la figure 7. Chaque point représente un site et ces dernières sont présentées dans le même ordre qu'au tableau A2.1 (Annexe 2). Il est possible de constater que pour presque toutes les stations, les accumulations calculées à partir des observations de 1981-2009 sont les plus faibles. Quant aux accumulations de 2041-2070 calculées selon le scénario supérieur, elles sont, pour la plupart des sites, plus élevées que les accumulations de 1961-1990. Les accumulations du scénario inférieur de 2041-2070 se rapprochent quant à elles des valeurs présentées dans le guide de Joncas et al. (1993). Ces conclusions s'appliquent aussi aux autres périodes d'entreposage.



Note : Les points (représentant des sites indépendants) sont reliés entre eux afin de faciliter la lecture du graphique.

Figure 7. Comparaison des accumulations moyennes futures (2041-2069) et passées (1981-2009) pour une période d'entreposage d'octobre à mai (8 mois) et une période de retour de 10 ans

9 Analyse économique

9.1 Mise en contexte

Avec les résultats techniques obtenus et présentés jusqu'ici, une analyse économique devait être réalisée. L'analyse initialement prévue évaluait la différence de coût entre une structure conçue avec le nouveau guide et une autre, avec les valeurs de l'ancien guide. Comme les résultats décrits à la section 8 démontrent que les accumulations présentées dans le nouveau guide ne seront pas nécessairement supérieures aux accumulations présentées dans le document de Joncas et al. (1993), cette analyse était moins nécessaire. Le concepteur utilisera d'emblée les nouvelles valeurs sachant que les coûts seront plus faibles. L'analyse finalement présentée se limite donc à établir les différences de coût entre une structure conçue avec les accumulations calculées selon une période de retour de 25 ans comparativement aux valeurs d'une période de retour de 10 ans.

La perspective est celle d'un agriculteur devant faire construire une nouvelle structure d'entreposage. Il devra choisir les caractéristiques de construction associées aux périodes de récurrence de 10 ou de 25 ans pour la période 2016-2044 (valeurs

présentées dans le nouveau guide). Dans le premier cas, il estimerait qu'il n'aura pas d'épandage supplémentaire à gérer dans le futur ou encore, que le coût de ces épandages additionnels sera moindre que le coût de construction additionnel relié à un ouvrage conçu pour des accumulations plus importantes. En contrepartie, la décision d'un agriculteur d'opter pour une construction d'une période de récurrence de 25 ans, pourrait être vue comme le paiement d'une prime d'assurance; le coût de construction supplémentaire éviterait des coûts d'épandage additionnels futurs.

9.2 Méthodologie

La méthodologie privilégiée consiste en une analyse coûts-bénéfices appliquée à une entreprise porcine spécialisée. Les caractéristiques de cette entreprise sont celles de l'étude du Centre d'Étude sur les Coûts de Production en Agriculture (CECPA, 2009). Cette étude du CECPA décrit bien la représentativité de l'échantillon pour illustrer la production porcine spécialisée et comment ce mode spécialisé est représentatif de la grande majorité de la production en raison de la concentration dans le secteur. À partir du cheptel de l'entreprise type de cette étude, les volumes de lisier produits par type d'animal et pour l'ensemble de l'entreprise ont été calculés en utilisant les valeurs références du Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec (CRAAQ, 2007). Il fut ainsi possible de calculer le volume de lisier généré et les accumulations d'eau supplémentaires associées aux périodes de retour de 10 et de 25 ans pour la période 2016-2044. Ensuite, le différentiel entre ces volumes additionnels a été utilisé pour estimer les coûts additionnels, le tout exprimé par structure d'entreposage et par mètre cube de lisier (m³). Mais avant, il a fallu s'assurer que les différences de maximum d'accumulation d'eau, par station et selon les deux périodes de retour, étaient significatives sur le plan statistique. Le logiciel Stata, version 12, a ainsi servi à appliquer un test de t païré sur l'ensemble de ces données. Ce test est approprié pour mesurer la différence statistique entre deux moyennes, dans ce cas-ci les moyennes de différences d'accumulation.

Une fois évalué le coût excédentaire de construction associé à la période de récurrence de 25 ans par rapport à celle de 10 ans, il a été possible de comparer ce coût additionnel à un coût d'épandage futur, ajusté à l'inflation, nécessaire à justifier ou non la construction d'une structure sur la base de la période de récurrence de 25 ans. Les coûts de construction ont été évalués à partir du document du CRAAQ (2009). De plus, une analyse de sensibilité a été prévue en considérant à chaque calcul l'effet d'un écart-type autour de la moyenne de l'impact sur les coûts (en moins et en plus).

9.3 Résultats et discussion

L'entreprise porcine spécialisée, telle que déterminée par le CECPA (2009) est de type naisseur-finisser comprenant en inventaire 228 truies et cochettes, 830 porcelets sevrés ainsi que 1 304 porcs en croissance. Sur la base des valeurs de références du CRAAQ (2007), l'évaluation du volume annuel de lisier de porc généré par cette entreprise est présentée au tableau 15. Au total, un élevage de cette envergure générera un peu plus de 4 000 m³ de lisier. C'est donc sur cette base que l'impact des accumulations supplémentaires est estimé.

Tableau 15. Volume de lisier produit annuellement par une entreprise porcine spécialisée

	Unités inventaires (ui) ¹	Volume annuel par u.i. ² (m ³ /ui)	Volume annuel total M ³
Truies et porcelets non sevrés	185	5,3	981
Porcelets sevrés	830	0,8	664
Porcs en croissance (avec trémies-abreuvoirs)	1 304	1,8	2 348
Cochettes	43	2,4	103
Total			4 096

1. Source: CECPA, 2009; 2. Source: CRAAQ, 2007.

Les résultats du test de t pairé, visant à évaluer les différences des maximums d'accumulation d'eau, démontrent qu'elles sont très significatives sur le plan statistique (tableau 16). Sur la base de ces résultats, l'impact sur les coûts de construction sera aussi significatif sur le plan statistique.

Tableau 16. Différences de maximum d'accumulation d'eau, par période d'entreposage et selon les deux périodes de récurrence, pour la période 2016-2044

Période d'épandage	Test de t pairé	Valeur P
7 mois	-16,23	< 0,0001
8 mois	-14,34	< 0,0001
9 mois	-17,36	< 0,0001
10 mois	-15,98	< 0,0001
11 mois	-19,15	< 0,0001
12 mois	-20,58	< 0,0001

Le coût de construction d'une structure d'entreposage (tableau 17) a été calculé pour deux dimensions différentes, soit l'une de 27,44 m de diamètre intérieur pouvant contenir environ 2 098 m³ de lisier, et une autre de 33,54 m de diamètre intérieur pouvant contenir environ 4 177 m³. Les deux scénarios ont été examinés car une entreprise générant environ 4 000 m³ de lisier, par exemple, une ferme qui a deux sites de production (maternité et engraissement) pourrait choisir d'entreposer ce lisier dans une seule structure, ou dans deux structures d'entreposage, soit une par site production.

Tableau 17. Coût de construction d'une structure d'entreposage

Type de structure d'entreposage	Nombre de structures	Volume total intérieur/structure (m ³)	Volume total intérieur (m ³)	Coût (\$/m ³)	Coût (\$)
3,66 m x 27,44 m	2	2 098	4 196	33,90	142 244
4,88 m x 33,54 m	1	4 177	4 177	27,89	116 497

Les résultats d'impact économique sont présentés au tableau 18. Dans la partie supérieure du tableau, l'impact est d'abord présenté en fonction du différentiel d'accumulation maximum entre les périodes de récurrence (10 ans vs 25 ans), et ce, pour toutes les périodes d'entreposage. La moyenne et l'écart-type se rapportent aux résultats pour les 52 stations météorologiques. La moyenne plus ou moins un écart-type est aussi présentée (les nombres ont été arrondis). Pour les deux structures d'entreposage décrites au tableau 17, les résultats sont exprimés en volume de lisier supplémentaire (m^3) en fonction des récurrences 10 et 25 ans, en impact monétaire (\$), en pourcentage de cet impact sur le coût de construction et en coût par m^3 (\$/ m^3)

Relativement aux moyennes d'accumulation d'eau pour les différentes périodes d'entreposage, l'impact est plutôt faible. En effet, la construction d'une structure de 27,44 m de diamètre prévoyant une période de récurrence de 25 ans plutôt que 10 ans représente une capacité supplémentaire variant entre 40 et 55 m^3 , selon les périodes d'entreposage. Pour la structure de 33,54 m de diamètre, ce même impact varie de 60 à 82 m^3 . L'impact des périodes de récurrence est donc faible par rapport au volume total d'une structure d'entreposage (plusieurs milliers de m^3).

Un écart de moins de 2000 \$ (1372 à 1853 \$) sépare les coûts associés aux deux périodes de retour pour une structure de 27,44 m de diamètre; cette somme est légèrement dépassée (1686 à 2277 \$) pour la structure de 33,54 m de diamètre, soit entre 1,0 et 2,0% des coûts de construction.

Tableau 18. Impact du différentiel des maximums d'accumulation d'eau, selon les périodes de récurrence de 10 et 25 ans, sur les coûts de construction des structures d'entreposage

		Périodes d'entreposage (mois)					
		7	8	9	10	11	12
Fosse de diamètre de 27,44 m intérieur, pour un volume d'environ 2098 m ³	Moyenne (mm)	73	86	68	88	82	92
	Écart-type (mm)	32	43	28	40	31	32
	Moyenne - 1 ET (mm)	40	43	40	49	51	60
	Moyenne + 1 ET (mm)	105	129	97	128	113	125
	Moyenne (m ³)	43	51	40	52	48	55
	Moyenne - 1 ET (m ³)	24	25	24	29	30	36
	Moyenne + 1 ET (m ³)	62	76	57	76	67	74
	Moyenne (\$)	1 460	1 724	1 372	1 773	1 640	1 853
	Moyenne - 1 ET (\$)	811	857	802	973	1 022	1 204
	Moyenne + 1 ET (\$)	2 108	2 591	1 942	2 573	2 257	2 502
	Impact (%)	1,03	1,21	0,96	1,25	1,15	1,30
	Impact - 1 ET (%)	0,57	0,60	0,56	0,68	0,72	0,85
	Impact + 1 ET (%)	1,48	1,82	1,36	1,81	1,59	1,76
	Impact (\$/m ³)	0,34	0,41	0,32	0,42	0,39	0,44
Impact - 1 ET (\$/m ³)	0,19	0,20	0,19	0,23	0,24	0,28	
Impact + 1 ET (\$/m ³)	0,50	0,61	0,46	0,60	0,53	0,59	
Structure de diamètre de 33,54 m intérieur, pour un volume d'environ 4177 m ³	Moyenne (m ³)	64	76	60	78	72	82
	Moyenne - 1 ET (m ³)	36	38	35	43	45	53
	Moyenne + 1 ET (m ³)	93	114	86	113	99	110
	Moyenne (\$)	1 795	2 119	1 686	2 180	2 016	2 277
	Moyenne - 1 ET (\$)	997	1 054	986	1 196	1 257	1 479
	Moyenne + 1 ET (\$)	2 592	3 185	2 386	3 163	2 775	3 075
	Impact (%)	1,54	1,82	1,45	1,87	1,73	1,95
	Impact - 1 ET (%)	0,86	0,90	0,85	1,03	1,08	1,27
	Impact + 1 ET (%)	2,22	2,73	2,05	2,71	2,38	2,64
	Impact (\$/m ³)	0,42	0,50	0,40	0,51	0,47	0,53
	Impact - 1 ET (\$/m ³)	0,24	0,25	0,23	0,28	0,30	0,35
	Impact + 1 ET (\$/m ³)	0,61	0,74	0,56	0,74	0,65	0,72

ET : Écart-type

L'ensemble de ces résultats démontre clairement que l'impact économique associé à une structure prévoyant une période de récurrence de 25 ans plutôt que de 10 ans est minime pour un producteur. Toutefois, dans le contexte où les agriculteurs doivent gérer leur entreprise de façon très rigoureuse, certains pourraient tout de même être réticents à déboursier le coût de construction supplémentaire; ils acceptent ainsi le risque de devoir gérer un ou des épandages additionnels dans le futur. Alors, la décision reposerait sur la comparaison entre les coûts d'épandage futurs et le coût d'opportunité actuel associé à la somme supplémentaire investie dans une structure d'entreposage (le coût d'opportunité étant le bénéfice abandonné d'une option

d'affaire qui n'est pas retenue). En d'autres termes, il s'agit de savoir si les sommes épargnées du fait de ne pas considérer la période de récurrence de 25 ans permettraient de couvrir les coûts futurs d'épandages supplémentaires. Pour que les deux options s'équivalent, le calcul de la valeur nette actualisée (VAN), telle qu'elle est utilisée dans les analyses coûts-bénéfices, doit être égal à zéro. La démonstration mathématique du calcul de la VAN est présentée à l'annexe 7 et les résultats sont présentés au tableau 19. Le taux d'actualisation utilisé est de 2,5 % et 5,0 %. Dans un contexte de bas taux d'intérêt comme c'est le cas présentement, un taux d'actualisation relativement faible est indiqué. À cet effet, une compilation de la moyenne des années 2008 à 2012 du taux de base des prêts aux entreprises (Banque du Canada, 2013) a résulté à un taux de 2,9 %.

Tableau 19. Coûts d'épandage futurs équivalents au coût de construction supplémentaire actuel d'une structure d'entreposage en valeurs actualisées (taux d'actualisation de 2,5 % et 5,0 %)

Années	Périodes d'entreposage (mois)	Coûts futurs d'épandage Structure = 2098 m ³ (\$/m ³) ¹		Coûts futurs d'épandage Structure = 4177 m ³ (\$/m ³) ¹	
		2,5 %	5,0 %	2,5 %	5,0 %
		15	7	-0,50	-0,72
	8	-0,59	-0,84	-0,72	-1,04
	9	-0,47	-0,67	-0,58	-0,83
	10	-0,60	-0,87	-0,74	-1,06
	11	-0,56	-0,80	-0,69	-0,99
	12	-0,63	-0,91	-0,77	-1,11
20	7	-0,56	-0,91	-0,69	-1,12
	8	-0,67	-1,08	-0,82	-1,32
	9	-0,53	-0,86	-0,65	-1,06
	10	-0,68	-1,11	-0,84	-1,36
	11	-0,63	-1,03	-0,78	-1,26
	12	-0,71	-1,16	-0,88	-1,42
25	7	-0,64	-1,17	-0,78	-1,43
	8	-0,75	-1,37	-0,92	-1,69
	9	-0,60	-1,10	-0,74	-1,35
	10	-0,77	-1,41	-0,95	-1,73
	11	-0,72	-1,31	-0,88	-1,61
	12	-0,81	-1,48	-0,99	-1,81

¹ Les montants sont négatifs car il s'agit de la contrepartie des coûts de constructions initiaux (positifs) pour obtenir une VAN égale à 0.

Comme le montrent les valeurs présentées au tableau 19, le coût de construction moindre associé à une période de retour de 10 ans serait justifié si les coûts d'épandage futurs ne dépasseraient jamais 2,00 \$/m³. Généralement, les coûts supplémentaires d'épandage devraient varier entre 0,50 \$/m³ et 2,00 \$/m³ dans des horizons de 15 à 25 ans afin de justifier la construction d'une structure d'entreposage en considérant une période de retour de 10 ans plutôt que de 25 ans.

Selon les références économiques du CRAAQ (2012), le coût d'épandage moyen du lisier se situe à 2,74 \$/m³. Ce coût ne correspond pas au coût d'épandage prévu dans les ententes d'épandage auxquelles conviennent plusieurs entreprises porcines sans sol et qui doivent exporter leur lisier à plusieurs dizaines de kilomètres du site d'exploitation. Dans ces conditions, le coût varie souvent entre 5,00 et 6,00 \$/m³. Dans ce contexte, il serait très peu réaliste, sinon impossible, d'espérer des coûts futurs d'épandage qui varieraient entre 0,50 et 2,00 \$/m³.

En conclusion, le choix de construire une structure d'entreposage de lisier en considérant une période de retour de 10 ans ne serait pas justifiable si l'agriculteur veut réaliser des économies. Il serait donc plus justifié pour un agriculteur d'opter pour les coûts de construction se basant des accumulations d'eau d'une récurrence de 25 ans.

10 Conclusions et recommandations

Le guide de Joncas et al. (1993) était utilisé jusqu'à maintenant par les concepteurs de structures d'entreposage de lisier et de fumier afin d'évaluer les accumulations d'eau à considérer dans le calcul des volumes d'entreposage. Le présent projet avait comme but de mettre à jour ce guide de conception et visait à établir de nouvelles données incluant l'impact des changements climatiques pour la conception des structures d'entreposage (précipitation, évaporation et périodes d'entreposage).

Le modèle d'évapotranspiration de Baier et Robertson (1965) calibré au Québec par Rochette (1988), auquel un facteur de 0,8 à été appliqué (Lehoux, 1994), a été sélectionné pour calculer l'évaporation d'une surface de lisier et de fumier. Il s'est avéré que l'évaporation calculée avec l'ancienne méthode (équation de Thornthwaite; Joncas et al., 1993) est significativement inférieure à celle calculée à partir de la nouvelle méthode (Baier et Robertson), lorsque les calculs sont fait pour une même période de temps. Conséquemment, les accumulations calculées avec l'ancienne méthode sont significativement supérieures à celles calculées avec la nouvelle méthode. De plus, l'analyse statistique a démontré qu'il n'y a pas de différence significative d'accumulation moyenne entre les périodes 1961-1990 et 1981-2009, peu importe la période d'entreposage, lorsque la même méthode d'estimation de l'évaporation est utilisée.

Ensuite, des scénarios climatiques et agronomiques futurs ont été établis. Les scénarios climatiques ont été construits pour les périodes futures 2016-2044 et 2041-2069 (huit scénarios par période), avec comme référence la période 1981-2009. Les séries temporelles ont été préparées pour un ensemble de points ayant les coordonnées (latitude et longitude) des 52 stations météorologiques étudiées par Joncas *et al.* (1993). Les variables quotidiennes produites sont les précipitations (Pr) totales (liquides et solides, en mm jour⁻¹ ou kg m⁻² jour⁻¹), ainsi que les températures minimale (T min) et maximale (T max) (en °C). Les scénarios représentent une fenêtre d'éventualités, soit un éventail de futurs plausibles. Dans ce projet, comme le nombre de simulations est limité (4 sur une possibilité d'une centaine), le futur climat effectif pourrait être en dehors de cette fenêtre.

Les scénarios agronomiques réalisés pour les régions de la Beauce, la Montérégie et Lanaudière, démontrent que les producteurs bénéficieront de plus nombreuses fenêtres d'épandage dans le futur, en raison d'un allongement de la période de croissance, qui permettrait une plus grande diversité de cultures. De plus, l'établissement de nouvelles cultures nécessitant une plus longue période de croissance, comme le blé d'automne et les cultures de conserves, présentent des besoins en éléments nutritifs plus élevés que les cultures qu'elles remplaceront, tel le soya. Cela permettra l'apport de plus grandes quantités de fumier et de lisier. Cependant, quelques facteurs (augmentation du cumul des précipitations, événements de pluie intense) pourront avoir un impact sur le calendrier d'épandage.

De nouvelles valeurs d'accumulation d'eau ont été produites à partir des huit scénarios climatiques construits pour la période 2016-2044. Suivant les conclusions des scénarios agronomiques, et afin d'offrir le plus de flexibilité possible au producteur, les accumulations d'eau ont été calculées pour six périodes d'entreposage débutant le 1^{er} octobre pour des durées de 7 à 12 mois, et pour cinq autres périodes d'entreposage débutant le 1^{er} septembre pour des durées de 8 à 12 mois. Les accumulations minimum et maximum des huit scénarios sont présentées en fonction de deux périodes de retour (10 et 25 ans) et des différentes périodes d'entreposage. Ces deux valeurs ont été calculées pour refléter la variabilité qui existe entre ces scénarios, car l'erreur statistique ne peut plus être calculée en appliquant une formule théorique simple. Des tests statistiques ont démontré que les valeurs d'accumulation d'eau moyennes estimées pour les années 2016-2044 sont significativement supérieures à celles des années 1981-2009. Ces différences illustrent l'impact des changements climatiques. Malgré cela, les accumulations moyennes calculées pour la période 2016-2044 sont, dans plusieurs cas, plus faibles que dans l'ancien guide de Joncas et al. (1993). En effet, l'utilisation du modèle de Baier et Robertson pour évaluer l'évaporation, en remplacement du modèle de Thornthwaite, a eu comme impact de hausser l'évaporation. Ainsi, l'impact des changements climatiques sur l'augmentation des accumulations d'eau est compensé en partie par l'utilisation d'un nouveau modèle d'évapotranspiration.

Afin d'estimer leur évolution, les accumulations ont été calculées de la même façon pour la période 2041-2069. Un survol des résultats obtenus a permis de conclure à une tendance à la hausse des accumulations dans le futur. En effet, les valeurs obtenues pour la période 2041-2069 sont en moyenne plus élevées que celles obtenues pour la période 2016-2044, qui elles sont plus élevées que celles de la période 1981-2009. Ce sont cependant les accumulations des années 2016-2044, calculées selon des périodes de retour de 10 ans et de 25 ans, qui ont été conservées pour concevoir le nouveau guide technique. Ce choix a été fait car les valeurs minimum et maximum des huit scénarios futurs sont dans l'ensemble plus élevées que les valeurs moyennes obtenues de la même façon que pour les années 1981-2009. L'option de présenter les valeurs d'accumulation pour la période 2041-2069 dans le nouveau guide a été écartée car cette période ne couvre pas la durée de vie utile d'une structure d'entreposage (25 à 30 ans) qui serait construite maintenant. Dans le nouveau guide, les accumulations pour des périodes d'entreposage débutant en octobre pour des durées de 7 à 9 mois, et pour des périodes d'entreposage débutant en septembre pour des périodes de 8 à 10 mois, sont présentées. Ces périodes d'entreposage ont été sélectionnées car ce sont les périodes qui seront le plus

souvent considérées par l'ingénieur concevant ce type de structure. En collaboration avec l'agronome, l'ingénieur pourra statuer sur la période d'entreposage à considérer dans chaque cas précis en fonction du type de culture et de l'élevage.

L'analyse économique a permis de comparer les coûts de construction en fonction des accumulations calculées pour une période de retour de 10 ans ou de 25 ans avec les données de 2016-2044, et d'autre part, par rapport aux coûts d'épandages futurs pour un ferme porcine type. Cette analyse a démontré qu'il est plus rentable pour un agriculteur d'opter pour une structure pouvant recevoir des événements dont la période de retour est de 25 ans plutôt que de 10 ans. Même en considérant différents taux d'actualisation (entre 2,5 % et 5,0 %), cette décision demeure la meilleure.

Il faut noter qu'en plus de l'évaporation et des précipitations, divers facteurs peuvent affecter les accumulations d'eau dans une structure d'entreposage. Par exemple, la présence de bâtiments ou autres obstacles près de la structure d'entreposage, ayant un effet brise-vent, pourrait influencer considérablement l'accumulation de neige. Des vents dominant peuvent aussi influencer les apports de pluie et de neige. Ainsi, un facteur de sécurité spécifié dans le Guide technique d'entreposage des fumiers (AIAQ, CRAAQ et IRDA, 2012), de l'ordre de 100 à 300 mm, doit obligatoirement être appliqué afin de s'assurer du non-débordement de la structure d'entreposage.

Comme les valeurs mises à jour dans le cadre de cette étude résultent dans plusieurs cas en une diminution de l'accumulation d'eau par rapport aux valeurs du document de Joncas et al. (1993), le débordement éventuel de certaines structures ne serait pas causé par une sous-évaluation des accumulations d'eau. En effet, la quantité de déjections animales à entreposer, qui représente la plus grande proportion du volume, peut augmenter significativement dans le temps. C'est pourquoi le concepteur d'une structure d'entreposage doit estimer l'augmentation possible du cheptel dans le futur.

Enfin, le calcul des accumulations pour les deux périodes futures a révélé une tendance à l'augmentation en raison des changements climatiques. Ainsi, les auteurs recommandent qu'un exercice semblable à celui réalisé dans le cadre de ce projet soit réalisé d'ici vingt ans afin de maintenir à jour les valeurs d'accumulation à considérer dans le calcul du dimensionnement des structures d'entreposage.

11 Références

- Atlas agroclimatique du Québec. 2012. (En ligne) <http://dev.agrometeo.org/atlas/index/> true. Page consultée le 10 décembre 2012.
- AIAQ, CRAAQ et IRDA. 2012. L'entreposage des fumiers (3^e édition). Guide technique. 50 pages.
- Amatya, D.M., R.W. Skaggs, et J.D. Gregory. 1995. Comparison of methods for estimating REF-ET. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 121 (6): 427-435.
- Abtew, W., 1996. Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in south Florida. *Water Resources Bulletin*, 32(3): 465-473.
- Baier W. et G. W. Robertson. 1965. Evaluation of latent evaporation from simple weather observations. *Canadian Journal of Plant Sciences* 45: 276-284.
- Banque du Canada. 2013. (En ligne) <http://www.banqueducanada.ca/taux/taux-dinteret/taux-dinteret-au-canada/>. Page consultée le 13 septembre 2013.
- Beaulieu, S. M. 2004. *La gestion des fumiers au Canada*. Gestion environnementales des fermes au Canada. Statistiques Canada. 55 pages
- Bélanger, G. et A. Bootsma. 2002. *Impact des changements climatiques sur l'agriculture au Québec*. 65^e Congrès de l'Ordre des agronomes du Québec, Changements climatiques : comprendre pour mieux agir. 20 p.
- Bootsma, A., D. Anderson et S. Gameda. 2004. *Potential impacts of climate change on agroclimatic indices in southern regions of Ontario and Quebec*. Technical Bulletin. ECORC Contribution No. 03-284. 14 p.
- Blaney, H.F. et Criddle, W.D., 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington D.C., 48 pp.
- Caya D. et Laprise R. (1999) A semi-implicit semi-lagrangian regional climate model : The Canadian RCM. *Monthly Weather Review*, 127(3), p. 341–362.
- Centre d'étude sur les coûts de production en agriculture (CECPA). 2009. Étude sur le coût de production des entreprises porcines de type naisseur-finisser en 2007 au Québec. CECPA, 100 pages.
- Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2007. Caractéristiques des effluents d'élevage - Valeurs références pour les volumes et pour les concentrations d'éléments fertilisants - Production porc (Lisiers). CRAAQ, 7 pages.

- Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2009. Structure d'entreposage de fumier et lisier - Coût de construction. AGDEX 729/538. CRAAQ, 3 pages.
- Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2010. Guide de référence en fertilisation, 2^e édition, 473 pages.
- Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2012. Machinerie - Coûts d'utilisation et coûts à forfaits suggérés. AGDEX 740/825. CRAAQ, 25 pages.
- Cantin, J. 2010. Impacts des périodes d'épandage de fumier sur la culture de blé. Rapport final. Club ConseilSol. 44 pages.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2010. Guide de référence en fertilisation 2^{ème} édition. 473 pages.
- Côté, D., M. Giroux, A. Ndayegamiye et S. P. Guertin. 2002. Période d'épandage des engrais de ferme et risque environnemental. IRDA, 7 pages.
- CREAQ. 1999. Fumier de ferme – Production. AGDEX 538/400.27. 6 pages.
- de Elia R. and Côté H. 2010. Climate and climate change sensitivity to model configuration in the Canadian RCM over North America. *Meteorol. Zeit.*, vol. 19, no. 4, p. 325-339.
- Doorenbos, J. et Pruitt, W.O., 1977. Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 24. FAO, Rome, Italy.
- Freund, Rudolf J. et Littell, Ramon C. 2000. SAS System for Regression, Third Edition. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Gallichand, J. 2012. Hydrologie agricole et environnement – Notes de cours. Université Laval.
- Grenier, P. 2013. Étude des volumes de précipitations et d'évaporation pour le calcul des structures d'entreposage de fumier dans un contexte de changements climatiques. Rapport interne sur les données climatiques fournies dans le cadre du projet. Ouranos. 27 pages.
- Hamon, W.R. 1961. Estimating potential evaporation. In: J.o.H. Division (Editor), Proceedings of the American Society of Civil Engineers, pp. 107-120.
- Hargreaves, G.H. et Z.A. Samani. 1982. Estimating potential evapotranspiration. Technical Note Journal of Irrigation and Drainage Engineering 108 (3): 225-230

- Hutchinson M.F. 2004. ANUSPLIN version 4.3. Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University, Canberra. (En ligne) <http://fennerschool.anu.edu.au/publications/software/anusplin.php>.
- Hutchinson M. F., D.W. McKenney, K. Lawrence, J.H.Pedlar, R.F.Hopkinson, E. Milewska et P. Papadopol. 2009. Development and Testing of Canada-Wide Interpolated Spatial Models of Daily Minimum–Maximum Temperature and Precipitation for 1961–2003. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48, p. 725–741.
- IRDA, MAPAQ et AIAQ. 2012. Déjections animales - Production 2012. Fiche synthèse, 2 p.
- Jensen, M.E. et Haise, H.R., 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE*, 89(LR4): 15-41.
- Jenson, M.E., R.D. Burman et R.G. Allen. 1990. Evapotranspiration and water requirements. *ASCE Manual 70*, New York, USA, 32 pp.
- Joncas, R., J. Champagne et G. Jacques. 1993. Accumulation d'eau dans les installations d'Entreposage des fumiers à ciel ouvert pour différentes municipalités au Québec en fonction de périodes de retour. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec, Canada.
- Lagacé, R., 2012. Infiltration et drainage: GAA-7003, Notes de cours, chapitre 9 : Évapotranspiration. Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval, Québec.
- Lease, N., A. Pichette et D. Chaumont. 2009. *Projet d'étude sur l'adaptation aux changements climatiques du secteur de la pomme au Québec*. Direction de l'agroenvironnement et du développement durable, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec et Ouranos. 58 p.
- Lehoux, N. 1994. L'évaporation du lisier et fumier pour quelques sites au Québec. Mémoire de maîtrise. Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation. Département de génie rural. Université Laval. 72 pages.
- 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, Feuille technique. Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 11 pages.
- Lepage, M-P., G. Bourgeois et G. Bélanger. 2012. Indices agrométéorologiques pour l'aide à la décision dans un contexte de climat variable et en évolution, Feuille technique. Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 11 pages.
- Linacre, E.T., 1977. A simple formula for estimating evaporation rates in various climate, using temperature data alone. *Agricultural Meteorology*, 18: 409-424.

- Littell, Ramon C., George A. Milliken, Walter W. Stroup, Russell D. Wolfinger et Oliver Schabenberger. 2006. *SAS for Mixed Models, Second Edition*. Cary, N.C. SAS Institute Inc.
- Makkink, G.F., 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. Instrn Wat. Engrs*, 11: 277-288.
- McGuinness, J.L. et E.F. Bordne. 1972. A comparison of lysimeter-derived potential evapotranspiration with computed values. Technical Bulletin 1452, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, Washington D.C., 71 pp.
- McKenney, M.S. et N.J. Rosenberg. 1993. Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agricultural and forest meteorology* 64: 81-110.
- Michaud, A., C Gombault, J-F. Cyr et H. Côté. 2012. Implication des scénarios climatiques futurs sur la gestion des sols et de l'eau à la ferme. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 16 pages.
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). 2011. Directions régionales, Québec.
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). 2012. Profil régional de l'industrie bioalimentaire au Québec. Estimation pour 2011. 118 pages [En ligne] http://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollection/Documents/Publications/Profilregionalbioalimentaire_Complet.pdf (consulté le 6 mai 2013).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP). 2012. Règlement sur les exploitations agricoles (REA). [En ligne] http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q2R26.htm. (consultée le 1^{er} novembre 2012).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). 2011. *CLIMATOLOGIE*, Direction du suivi de l'état de l'environnement, Québec.
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and the environment, The state and movement of water in living organisms, XIXth symposium. Cambridge University Press, Swansea, pp. 205-234.
- Mpelasoka F.S. et Chiew F.H.S. (2009) Influence of rainfall scenario construction methods on runoff projections. *Journal of Hydrometeorology*, 10, p. 1168–1183.
- Oudin, L. 2004. Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent come entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de doctorat, École Nationale de Génie Rural, des Eaux et Forêts. Paris, France. 495 pages.

- Oudin, L., F. Hervieu, C. Michel, C. Perrin, V. Andréassian, F. Anctil et C. Loumagne. 2004. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2-Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of hydrology* 303: 290-306.
- Ouranos. 2004. S'adapter aux changements climatiques, Ouranos, Montréal, Québec. 91 pages.
- Ouranos. 2010. Savoir s'adapter aux changements climatiques. Rédaction : 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. Ouranos, Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques, Montréal (Québec). 128 p.
- Pêches et Environnement Canada. 1978. Atlas du Canada, Ottawa, Pêches et Environnement Canada, catalogue EN-3726/1978.
- Pédélaborde, P. 1968. Les bilans hydriques. *Cahiers de géographe du Québec*, vol. 12, 25: 5-23.
- Pereira, A.R. et W.O. Pruitt. 2004. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. *Agriculture Water Management* 66: 251-257.
- Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London*, 193: 120-145.
- Plouffe, D., G. Bourgeois, R. Audet et M.-P. Lesage. 2011. Indices agroclimatiques pour faciliter la prise de décision en agriculture. CRAAQ. 5 pages.
- Plummer, D.A., D. Caya, A. Frigon, H. Côté, M. Giguère, D. Paquin, S. Biner, R. Harvey et R. de Elia. 2006. Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM. *Journal of Climate*, Vol. 19, n°13, pp. 3112-3132.
- Priestley, C.H.B. et R.J. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat fluxes and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100: 81-92.
- Rochette P. 1988. Contribution au zonage agroclimatique du Québec méridional. Thèse de doctorat. Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation. Département de phytologie. Université Laval. 272 pages.
- Rochette, P., G. Bélanger, Y. Castonguay, A. Bootsma et D. Mongrain. 2004. *Climate change and winter damage to fruit trees in eastern Canada*. *Canadian Journal of Plant Science* 84: 1113-1125.
- SAS Institute Inc. 2002-2008. Cary, North Carolina, USA.

- Singh, V.P. et C.-Y. Xu. 1997. Evaluation and generalization of 13 mass-transfer equations for determining free water evaporation. *Hydrological Processes*, 11(3): 311-323.
- Thom, A.S. et H.R. Oliver. 1977. On Penman's equation for estimating regional evaporation. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 103: 345-357
- Thornthwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38 : 54-94.
- Turc, L. 1955. Le bilan d'eau des sols. Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. *Ann. Agr.*, 6: 5-131.
- Valiantzas, J.D. 2006. Simplified version for the Penman evaporation equation using routine weather data. *Journal of Hydrology* 331: 690-702.
- 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.
- Wright, J.L. 1982. New evapotranspiration crop coefficients. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 108(IR2): 57-74.
- Xu, C.-Y. et V.P. Singh. 1998. Dependence of evaporation on meteorological variables at different time-scale and intercomparison of estimation methods. *Hydrological process* 12: 429-442.
- Xu, C.-Y. et V.P. Singh. 2001. Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. *Hydrological process* 15: 305-319.

12 Annexes

Annexe 1. Revue de littérature sur les modèles d'évapotranspiration

Penman

Le modèle de Penman (1948), ainsi que ces différentes variantes, ont été largement utilisés pour déterminer l'évapotranspiration et l'évaporation à l'échelle d'un lac (Valiantzas, 2006). La méthode de Penman est d'ailleurs considérée comme étant la plus réaliste par plusieurs hydrologistes (Oudin et al., 2004). Les travaux de Penman ont permis de définir une formule d' ET_p en combinant l'approche aérodynamique de Dalton et une approche par le bilan d'énergie (éq. A1.1 et A1.2). Elle tente de faire une moyenne pondérée des deux composantes (Lagacé, 2012).

$$ET_p = \frac{\Delta H + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad [A1. 1]$$

$$E_a = K (1 + 0,74 C_v V_{10}) (e_s - e_a); \quad [A1. 2]$$

Où;

ET_p = évapotranspiration (mm/j);

E_a = évaporation due au bilan de masse (mm/j);

H = radiation nette (mm/j);

Δ = pente de la pression de vapeur saturée à la température moyenne de l'air (kPa/°C);

γ = Constante psychrométrique = 0,065 kPa/°C;

e_s = pression de vapeur saturée à la température de l'air (kPa);

e_a = pression de vapeur actuelle (kPa);

K = constante d'unité = 2,6 mm/j kPa;

V_{10} = Vitesse du vent à 10 m (m/s);

C_v = coefficient de vitesse du vent = 0,54 s/m (V en m/s).

Version simplifiée de Penman

L'équation de Penman (1948) nécessite plusieurs paramètres météorologiques qui ne sont souvent pas mesurées aux stations météorologiques. Valiantzas (2006) a développé un modèle simplifié de l'équation de Penman qui peut être utilisé lorsque les valeurs de vitesse du vent ne sont pas disponibles (éq. A1.3). Cette équation est applicable avec un pas de temps mensuel ou journalier.

$$ET_o = 0,038R_s \sqrt{T = 9,5} - 2,4 \left(\frac{R_s}{R_A} \right)^2 + 0,075(T + 20) \left(1 - \frac{RH}{100} \right) \quad [A1.3]$$

Où;

ET_p = évapotranspiration (mm/j);

T = température de l'air (°C);

R_s = radiation solaire reçue au sol (MJ m⁻²j⁻¹);

R_A = radiation extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$);
 RH = humidité relative (%).

Les valeurs de ET_p issues de cette équation ont été comparées à celles obtenues avec le modèle Penman-Monteith. Les valeurs provenant des deux modèles sont bien corrélées entre elles ($R^2 = 0,951$). Les observations météorologiques utilisées pour valider le modèle proviennent de 13 pays d'Europe, d'Asie et d'Afrique.

Penman-Monteith

La méthode de Penman-Monteith (Monteith, 1965) est adaptée aux cultures bien approvisionnées en eau (Lagacé, 2012) (éq. A1.4); elle s'applique à un pas de temps journalier.

$$ET_p = \frac{1/\lambda \Delta (R_N - G) + \gamma E_o}{\Delta + \gamma(1 + C_d V_2)} \quad [A1.4]$$

$$E_o = \frac{C_n}{T + 273} (e_s - e_r) V_2 \quad [A1.5]$$

Où;

ET_p = évapotranspiration (mm/j)

R_N = radiation nette à la surface de la culture ($\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$);

G = flux de chaleur au sol ($\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$);

λ = chaleur latente de l'eau ($2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$ d'eau);

γ = Constante psychrométrique = $0,065 \text{ kPa/}^\circ\text{C}$;

Δ = pente de la pression de vapeur saturée à la température moyenne de l'air ($\text{kPa/}^\circ\text{C}$);

T = température moyenne de l'air ($^\circ\text{C}$);

V_2 = vitesse moyenne du vent à une hauteur de 1,5 à 2,5 m (m/s);

e_s = pression moyenne de vapeur saturée à une hauteur de 1,5 à 2,5 m (kPa);

e_r = pression moyenne de vapeur du point de rosée à une hauteur de 1,5 à 2,5 m (kPa);

C_n = constante du numérateur fonction de la culture de référence (Lagacé, 2012);

C_d = constante du dénominateur en fonction de la culture de référence (Lagacé, 2012).

Priestley-Taylor

L'approche de Priestley et Taylor (1972) consiste à relier le terme aérodynamique dans la formulation de Penman à une fraction du terme énergétique (Oudin, 2004). L'équation d'évapotranspiration (ET_p) en m-j^{-1} (éq. A1.6) ne nécessite que deux variables météorologiques à mesurer, soit la température et le rayonnement solaire (tableau 1).

$$ET_p = \frac{\alpha_{pt} \Delta R_N}{\lambda \rho_w (\Delta + \gamma)} \quad [A1.6]$$

Où;

α_{pt} = paramètre à calibrer selon les conditions locales (sans unité) ;

$\gamma = 1,74$ en climat aride et $1,26$ en climat humide;
 Δ = pente de la pression de vapeur saturée à la température moyenne de l'air ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$);
 R_N = radiation nette à la surface de la culture ($\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$);
 λ = chaleur latente de l'eau ($2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$ d'eau);
 γ = Constante psychrométrique = $0,065 \text{ kPa}/^\circ\text{C}$;
 ρ_w = masse volumique de l'eau = 1000 kg m^{-3} .

Blaney et Criddle

L'équation de Blaney et Criddle (1950) (éq. A1.7), utilisées pour un pas de temps mensuel, a été développée principalement pour les zones arides et semi-arides de l'ouest américain (Lagacé, 2012). Elle conduit généralement à une sous-estimation de l' ET_p (en mm j^{-1}) en région aride et à une surestimation de celle-ci en région humide (Xu et Singh, 2001).

$$ET_p = kp(0,46T_a + 8,13) \quad [A1.7]$$

Où :

k = coefficient d'évapotranspiration fonction de la culture variant entre $0,70$ et $1,25$ (Lagacé, 2012);

p = pourcentage mensuel d'heures de clarté par rapport au total annuel (Lagacé, 2012);

T_a = température moyenne mensuelle de l'air ($^\circ\text{C}$).

Hamon

L'équation A1.8 représente l'approximation de l' ET_p (exprimée en mm j^{-1}) selon Hamon (1961).

$$ET_p = \frac{0,14 \times DL^2 \times \exp \frac{T_a}{16}}{\lambda \rho_w} \quad [A1.8]$$

Où :

DL = durée d'ensoleillement d'une journée sans nuages, dépendant exclusivement de la latitude de la station (heures)

T_a = température de l'air ($^\circ\text{C}$);

λ = chaleur latente de l'eau ($2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$ d'eau);

γ = Constante psychrométrique = $0,065 \text{ kPa}/^\circ\text{C}$;

ρ_w = masse volumique de l'eau = 1000 kg m^{-3} .

Romanenko

La formule de Romanenko (Xu et Singh, 2001) (éq. A1.9) est utilisée pour estimer l' ET_p en m j^{-1} . Elle est valide pour un pas de temps mensuel et est basée sur une relation entre l' ET_p , la température et l'humidité relative.

$$ET_p = 4,5 \times 10^{-3} \left(1 + \frac{T_a}{25}\right)^2 \left(1 - \frac{e_d}{e_a}\right) \quad [A1.9]$$

Où :

T_a = température de l'air (°C);
 e_d = pression de vapeur effective de l'air (kPa);
 e_a = pression de vapeur saturante de l'air à T_a (kPa).

Linacre

L'équation de Linacre (1977) (éq. A1.10) s'applique à une végétation bien alimentée en eau avec un albédo d'environ 0,25.

$$ET_p = \frac{\frac{500T_h}{(100-A)} + 15(T_a - T_d)}{(80 - T_a)} \quad [A1.10]$$

Où :

ET_p = évapotranspiration potentielle (mm j⁻¹);
 A = latitude (degrés);
 T_a = température de l'air (°C);
 T_h = température mensuelle mesurée au niveau de la mer (°C);
 $= T_a + 0,006h$, h étant l'altitude (m);
 T_d = température moyenne du point de rosée (°C).

Turc

La méthode de Turc (1955) a été développée à partir de nombreuses mesures avec des cases lysimétriques en Europe, en Afrique du nord, en Asie et en Inde (Lagacé, 2012). Elle est bien adaptée aux climats tempérés (Oudin, 2004). L' ET_p est estimée pour un mois de 30 jours, en mm mois⁻¹ selon l'équation A1.11.

$$ET_p = 0,40(R_s + 50) \left(\frac{T}{T + 15} \right) \quad [A1.11]$$

Où :

T = température moyenne mensuelle de l'air (°C);
 R_s = radiation solaire globale au sol (cal cm⁻² jour⁻¹).

McGuinness et Bordne

La formule de McGuinness et Bordne (1972) a été développée en Ohio, pour un pas de temps mensuel et peut prendre en compte les températures négatives. Elle s'exprime en m j⁻¹, selon l'équation A1.12 :

$$ET_p = \frac{R_g}{\lambda \rho_w} \frac{T_a + 5}{68} \quad [A1.12]$$

Où :

R_g = rayonnement solaire global au sol (MJ m⁻² j⁻¹);
 λ = chaleur latente de l'eau (2,45 MJ kg⁻¹ d'eau);
 ρ_w = masse volumique de l'eau (kg m⁻³);
 T_a = température de l'air (°C).

Hargreaves

La méthode de Hargreaves (1982) (éq. A1.13) estime l' ET_p (en $m\ j^{-1}$) avec un pas de temps mensuel et ne nécessite que les températures minimale et maximale de l'air.

$$ET_p = 0,0023 \times R_A \times TD^{1/2} (T_a + 17,8) \quad [A1.13]$$

Où :

T_a = température moyenne mensuelle ($^{\circ}C$);

TD = différence entre les températures maximale et minimale mensuelles moyennes ($^{\circ}C$);

R_A = rayonnement extraterrestre ($MJ\ m^{-2}\ j^{-1}$).

Tableau A1.1. Facteurs LA utilisés dans l'équation de Thornthwaite (eq. 8)

Latitude (degré)	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
45	0,80	0,81	1,02	1,13	1,28	1,29	1,31	1,21	1,04	0,94	0,79	0,75
45,5	0,80	0,81	1,02	1,13	1,29	1,30	1,31	1,22	1,04	0,94	0,79	0,75
46	0,79	0,81	1,02	1,13	1,29	1,31	1,31	1,22	1,04	0,94	0,79	0,74
46,5	0,78	0,81	1,02	1,14	1,30	1,32	1,32	1,22	1,04	0,94	0,79	0,74
47	0,77	0,80	1,02	1,14	1,30	1,32	1,33	1,22	1,04	0,93	0,78	0,73
47,5	0,77	0,80	1,02	1,14	1,31	1,33	1,34	1,23	1,05	0,93	0,78	0,73
48	0,76	0,80	1,02	1,14	1,31	1,33	1,34	1,23	1,05	0,93	0,77	0,72
48,5	0,76	0,80	1,02	1,14	1,32	1,38	1,35	1,24	1,05	0,93	0,77	0,72
49	0,75	0,79	1,02	1,14	1,32	1,43	1,35	1,24	1,05	0,93	0,76	0,71

Annexe 2. Mise à jour des valeurs d'accumulation

Tableau A2.1. Coordonnées des 52 stations météorologiques ainsi que la municipalité, regroupées par région

Numéro de la région	Région (Direction régionale du MAPAQ)	Nom de la station météorologique	Municipalité	Latitude	Longitude
1	Bas-Saint-Laurent	Causapscal	Causapscal	48,3688	67,2360
		La Pocatière	La Pocatière	47,3500	70,0300
		Mont-Joli-A	Mont-Joli	48,5857	68,1425
		Trois-Pistoles	Trois-Pistoles	48,1521	69,1284
2	Saguenay-Lac-Saint-Jean	Bagotville-A	Bagotville	48,3300	71,0000
		Lac-Sainte-Croix	Hébertville	48,4221	71,7469
		Normandin	Normandin	48,8445	72,5439
		Roberval-A	Roberval	48,5200	72,2600
		Saint-Ambroise	Saint-Ambroise	48,5667	71,3383
3	Capitale-Nationale	Quebec-A	Québec	46,8000	71,3800
		Saint-Alban	Saint-Alban	46,7272	72,1144
		Sainte-Catherine	Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier	46,8500	71,6167
4	Mauricie	Lac-aux-Sables	Lac-aux-Sables	46,8664	72,4009
		Sainte-Anne-de-la-Pérade	Sainte-Anne-de-la-Pérade	46,5892	72,2297
5	Estrie	Asbestos	Asbestos	45,7700	71,9500
		Lac-Mégantic-2	Lac-Mégantic	45,5942	70,8857
		Lennoxville-CDA	Lennoxville	45,3700	71,8200
		Sherbrooke-A	Sherbrooke	45,4300	71,6800
		Stanstead	Stanstead	45,0167	72,0995
7	Outaouais-Laurentides	Angers	Angers	45,5608	75,5118
		Lachute	Lachute	45,6556	74,3246
		Maniwaki	Maniwaki	46,3787	75,9619
		Mont-Laurier	Mont-Laurier	46,5740	75,4740
		Shawville	Shawville	45,5947	76,4385
		Wakefield	Wakefield	45,7001	75,9497
8	Abitibi-Témiscamingue-Nord-du-Québec	Amos	Amos	48,5667	78,1333
		Val-d'Or-A	Val-d'Or	48,0700	77,7800
9	Côte-Nord	Baie-Comeau-A	Baie-Comeau	49,1300	68,2000
11	Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine	Caplan	Caplan	48,1075	65,6906

Numéro de la région	Nom de la station	Municipalité	Latitude	Longitude	
12	Chaudière-Appalaches	Disraeli	Disraeli	45,9070	71,4064
		Sainte-Germaine	Lac-Etchemin	46,4332	70,5023
		Montmagny	Montmagny	46,9787	70,5896
		Saint-Éphrem	Saint-Éphrem-de-Beauce	46,0622	70,9585
		Saint-Flavien	Saint-Flavien	46,4738	71,5411
		Saint-Prosper	Saint-Prosper	46,1913	70,4858
		Saint-Theophile	Saint-Théophile	45,9194	70,5439
		Scott	Scott	46,5000	71,0800
14	Montréal-Laval-Lanaudière	Berthierville	Berthierville	46,0317	73,1821
		L'Assomption-CDA	L'Assomption	45,8200	73,4300
16	Montérégie-Est	Farnham	Farnham	45,2924	72,9032
		Fleury	Fleury	45,8069	72,9917
		Saint-Hubert-A	Saint-Hubert	45,5200	73,4100
		Saint-Hyacinthe-2	Saint-Hyacinthe	45,5882	72,9722
17	Centre-du-Québec	Daveluyville	Daveluyville	46,2059	72,1373
		Drummondville	Drummondville	45,8761	72,4746
		Nicolet	Nicolet	46,1846	72,6143
		Saint-Guillaume	Saint-Guillaume	45,8638	72,7701
18	Montérégie-Ouest	Coteau-du-Lac	Coteau-du-Lac	45,3220	74,1638
		Huntingdon	Huntingdon	45,0806	74,1802
		Saint-Anicet	Saint-Anicet	45,1406	74,3444
		Sainte-Clothilde-CDA	Sainte-Clotilde	45,1681	73,6800
		Sainte-Martine	Sainte-Martine	45,2300	73,6279

Tableau A2.2. Différence entre les statistiques sur les données mesurées et interpolées de précipitation, de T_{min} et de T_{max} pour la station de Farnham, durant l'année 1981 (Grenier, 2013)

		Données à la Station (MDDEFP)	Données interpolées (RNCAN)	Différence (MDDEFP-RNCAN)
Pr (mm/jour)	Moyenne	3,5	3,2	0,3
	Écart-type	7,0	6,2	1,7
T _{min} (°C)	Moyenne	1,7	1,6	0,1
	Écart-type	11,6	11,5	0,8
T _{max} (°C)	Moyenne	11,6	11,5	0,2
	Écart-type	12,1	12,0	0,5

T_{min} = température minimale, T_{max} = température maximale.

Tableau A2.3 Accumulation et son incertitude (précision relative) selon différentes périodes de retour, pour la période d'entreposage d'octobre à mai, pour les 52 sites, entre 1981 et 2009 (ET_p calculée selon la méthode de Thornthwaite)

Région	Municipalité	Période de retour (ans)					
		2	5	10	15	20	25
		Accumulation (mm) et (précision relative (%))					
1	Causapscal	532 (4,4)	640 (3,7)	674 (3,6)	693 (3,6)	706 (3,7)	715 (3,8)
	La Pocatière	468 (4,9)	585 (4,0)	631 (3,8)	664 (3,7)	687 (3,8)	702 (3,9)
	Mont-Joli	495 (3,9)	584 (3,4)	627 (3,2)	651 (3,2)	666 (3,3)	676 (3,4)
	Trois-Pistoles	519 (4,5)	575 (4,1)	622 (3,9)	667 (3,7)	698 (3,7)	720 (3,8)
2	Bagotville	412 (2,8)	499 (2,4)	571 (2,1)	609 (2,0)	632 (2,0)	646 (2,1)
	Hébertville	419 (6,0)	484 (5,4)	557 (4,7)	599 (4,5)	624 (4,5)	641 (4,7)
	Normandin	363 (5,7)	441 (4,8)	519 (4,1)	563 (3,9)	591 (3,9)	609 (4,0)
	Roberval	386 (3,7)	447 (3,3)	519 (2,9)	563 (2,7)	590 (2,7)	609 (2,8)
	Saint-Ambroise	429 (5,9)	512 (5,0)	572 (4,6)	604 (4,4)	622 (4,5)	635 (4,7)
3	Québec	597 (4,1)	686 (3,6)	751 (3,4)	788 (3,3)	812 (3,4)	827 (3,5)
	Saint-Alban	566 (3,8)	624 (3,6)	679 (3,3)	717 (3,2)	742 (3,3)	759 (3,4)
	Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier	641 (5,5)	741 (4,9)	810 (4,5)	841 (4,5)	859 (4,6)	870 (4,8)
4	Lac-aux-Sables	556 (5,2)	624 (4,7)	691 (4,3)	734 (4,2)	761 (4,2)	779 (4,4)
	Sainte-Anne-de-la-Perade	543 (4,5)	598 (4,1)	641 (3,9)	673 (3,8)	695 (3,9)	710 (4,0)
5	Asbestos	543 (3,2)	648 (2,8)	689 (2,7)	714 (2,6)	730 (2,7)	740 (2,8)
	Lac-Mégantic	551 (3,0)	674 (2,5)	761 (2,3)	797 (2,2)	816 (2,3)	828 (2,4)
	Lennoxville	517 (3,8)	653 (3,1)	710 (2,9)	730 (2,9)	740 (3,0)	747 (3,1)
	Sherbrooke	522 (4,0)	662 (3,3)	711 (3,1)	727 (3,1)	736 (3,2)	741 (3,4)
	Stanstead	590 (5,3)	720 (4,4)	806 (4,0)	855 (3,9)	884 (4,0)	904 (4,1)
7	Angers	471 (3,7)	559 (3,2)	599 (3,1)	616 (3,0)	625 (3,2)	631 (3,3)
	Lachute	523 (4,3)	634 (3,6)	664 (3,5)	685 (3,5)	699 (3,6)	709 (3,7)
	Maniwaki	449 (4,1)	501 (3,8)	537 (3,6)	558 (3,5)	572 (3,6)	581 (3,7)
	Mont-Laurier	493 (5,7)	534 (5,4)	569 (5,1)	599 (5,0)	619 (5,1)	634 (5,2)
	Shawville	392 (2,7)	484 (2,3)	512 (2,2)	518 (2,2)	520 (2,3)	521 (2,4)
	Wakefield	455 (3,0)	533 (2,6)	563 (2,5)	573 (2,5)	578 (2,7)	581 (2,8)
8	Amos	401 (2,4)	444 (2,2)	460 (2,1)	470 (2,1)	477 (2,2)	482 (2,3)
	Val-d'Or	408 (3,3)	450 (3,0)	471 (3,0)	483 (2,9)	490 (3,1)	495 (3,2)
9	Baie-Comeau	526 (5,2)	593 (4,7)	661 (4,3)	699 (4,2)	721 (4,2)	737 (4,4)
11	Caplan	500 (5,4)	625 (4,4)	663 (4,2)	686 (4,2)	700 (4,3)	711 (4,5)

Région	Municipalité	Période de retour (ans)					
		2	5	10	15	20	25
		Accumulation (mm) et (erreur relative (%))					
12	Disraeli	559 (2,8)	712 (2,3)	749 (2,2)	755 (2,2)	756 (2,3)	756 (2,4)
	Montmagny	521 (3,3)	639 (2,8)	684 (2,6)	717 (2,6)	739 (2,6)	754 (2,7)
	Lac-Étchemin	596 (2,1)	722 (1,8)	760 (1,7)	779 (1,7)	791 (1,8)	799 (1,8)
	Saint-Ephrem-de-Beauce	534 (4,0)	676 (3,3)	719 (3,1)	725 (3,2)	726 (3,3)	726 (3,5)
	Saint-Flavien	559 (3,3)	669 (2,8)	700 (2,7)	715 (2,8)	724 (2,9)	730 (3,0)
	Saint-Prosper	530 (3,3)	640 (2,8)	685 (2,6)	710 (2,6)	725 (2,7)	735 (2,8)
	Saint-Theophile	512 (2,6)	625 (2,2)	695 (2,0)	722 (2,0)	735 (2,0)	744 (2,1)
	Scott	555 (2,6)	683 (2,2)	708 (2,1)	713 (2,2)	714 (2,3)	715 (2,4)
14	Berthierville	469 (3,7)	573 (3,1)	632 (2,9)	665 (2,8)	685 (2,8)	699 (2,9)
	L'Assomption	470 (4,1)	596 (3,3)	659 (3,1)	687 (3,0)	702 (3,1)	713 (3,2)
16	Farnham	521 (3,3)	657 (2,7)	682 (2,7)	691 (2,7)	698 (2,8)	702 (2,9)
	Fleury	487 (4,3)	588 (3,6)	656 (3,3)	700 (3,2)	728 (3,2)	747 (3,3)
	Saint-Hubert	489 (3,7)	598 (3,1)	656 (2,9)	694 (2,8)	719 (2,8)	736 (2,9)
	Saint-Hyacinthe	496 (4,0)	611 (3,4)	672 (3,1)	712 (3,0)	738 (3,0)	756 (3,1)
17	Daveluyville	511 (4,4)	588 (3,9)	622 (3,8)	643 (3,7)	657 (3,9)	666 (4,0)
	Drummondville	510 (3,3)	593 (2,9)	649 (2,7)	689 (2,6)	715 (2,7)	732 (2,7)
	Nicolet	471 (3,5)	546 (3,1)	593 (2,9)	616 (2,8)	630 (2,9)	639 (3,0)
	Saint-Guillaume	489 (4,6)	585 (4,0)	636 (3,7)	669 (3,6)	691 (3,7)	705 (3,8)
18	Coteau-du-Lac	477 (6,9)	561 (6,0)	595 (5,8)	636 (5,5)	666 (5,6)	687 (5,7)
	Huntingdon	459 (5,5)	591 (4,4)	614 (4,3)	627 (4,3)	636 (4,4)	642 (4,6)
	Saint-Anicet	462 (5,9)	577 (4,9)	600 (4,8)	618 (4,7)	631 (4,9)	640 (5,1)
	Sainte-Clotilde	469 (4,1)	567 (3,5)	594 (3,4)	615 (3,4)	630 (3,5)	641 (3,6)
	Sainte-Martine	477 (4,3)	572 (3,6)	602 (3,5)	628 (3,4)	646 (3,5)	658 (3,7)

Tableau A2.4 Accumulation et son incertitude (précision relative) selon différentes périodes de retour, pour la période d'entreposage de septembre à juin, pour les 52 sites, entre 1981 et 2009 (ET_p calculée selon la méthode de Thornthwaite)

Région	Municipalité	Période de retour (ans)					
		2	5	10	15	20	25
		Accumulation (mm) et (précision relative (%))					
1	Causapscal	559 (5,2)	636 (4,7)	692 (4,4)	725 (4,3)	745 (4,4)	758 (4,6)
	La Pocatière	462 (3,2)	600 (2,5)	653 (2,4)	676 (2,3)	689 (2,4)	697 (2,5)
	Mont-Joli	502 (3,8)	583 (3,4)	624 (3,2)	641 (3,2)	649 (3,3)	655 (3,5)
	Trois-Pistoles	522 (3,9)	620 (3,4)	680 (3,2)	704 (3,1)	716 (3,2)	723 (3,4)
2	Bagotville	422 (4,9)	501 (4,2)	574 (3,8)	609 (3,6)	629 (3,7)	642 (3,8)
	Hébertville	427 (3,6)	482 (3,3)	538 (3,0)	577 (2,9)	603 (2,9)	620 (3,0)
	Normandin	358 (11,7)	429 (10,0)	501 (8,7)	542 (8,2)	566 (8,3)	582 (8,5)
	Roberval	373 (6,2)	441 (5,4)	497 (4,8)	534 (4,6)	557 (4,7)	573 (4,8)
	Saint-Ambroise	459 (2,8)	516 (2,5)	569 (2,3)	597 (2,3)	614 (2,3)	625 (2,4)
3	Québec	638 (2,6)	736 (2,3)	805 (2,2)	848 (2,1)	876 (2,1)	894 (2,2)
	Saint-Alban	594 (2,3)	703 (2,0)	751 (1,9)	778 (1,8)	794 (1,9)	805 (2,0)
	Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier	700 (3,0)	808 (2,7)	881 (2,5)	923 (2,4)	950 (2,5)	967 (2,6)
4	Lac-aux-Sables	593 (3,9)	684 (3,5)	745 (3,2)	788 (3,1)	816 (3,2)	835 (3,3)
	Sainte-Anne-de-la-Perade	553 (2,6)	662 (2,2)	708 (2,1)	727 (2,1)	738 (2,1)	744 (2,2)
5	Asbestos	557 (3,4)	694 (2,8)	761 (2,6)	793 (2,5)	811 (2,6)	823 (2,7)
	Lac-Mégantic	574 (2,8)	743 (2,2)	827 (2,0)	858 (2,0)	874 (2,0)	884 (2,1)
	Lennoxville	520 (3,6)	682 (2,8)	758 (2,5)	787 (2,5)	802 (2,6)	812 (2,7)
	Sherbrooke	526 (4,6)	700 (3,6)	768 (3,3)	789 (3,3)	799 (3,4)	805 (3,6)
	Stanstead	627 (4,4)	744 (3,8)	862 (3,3)	931 (3,2)	973 (3,2)	1001 (3,3)
7	Angers	478 (4,2)	572 (3,6)	615 (3,4)	631 (3,4)	640 (3,5)	645 (3,7)
	Lachute	531 (4,4)	647 (3,7)	690 (3,5)	714 (3,5)	730 (3,6)	740 (3,7)
	Maniwaki	438 (7,1)	507 (6,3)	537 (6,0)	557 (6,0)	569 (6,1)	578 (6,4)
	Mont-Laurier	509 (7,5)	569 (6,8)	594 (6,6)	614 (6,6)	628 (6,8)	637 (7,0)
	Shawville	387 (2,5)	459 (2,1)	477 (2,1)	483 (2,1)	487 (2,2)	489 (2,3)
	Wakefield	458 (3,9)	529 (3,5)	554 (3,3)	564 (3,4)	568 (3,5)	571 (3,7)
8	Amos	423 (4,6)	455 (4,4)	502 (4,1)	534 (3,9)	554 (4,0)	568 (4,1)
	Val-d'Or	419 (4,3)	475 (3,9)	521 (3,6)	540 (3,6)	550 (3,7)	557 (3,8)
9	Baie-Comeau	527 (2,5)	605 (2,2)	675 (2,0)	712 (1,9)	735 (2,0)	749 (2,0)
11	Caplan	482 (5,1)	616 (4,1)	695 (3,7)	735 (3,6)	759 (3,6)	775 (3,7)

Région	Municipalité	Période de retour (ans)					
		2	5	10	15	20	25
		Accumulation (mm) et (erreur relative (%))					
12	Disraeli	588 (3,4)	746 (2,8)	815 (2,6)	845 (2,5)	862 (2,6)	873 (2,7)
	Montmagny	544 (3,6)	669 (3,0)	747 (2,7)	782 (2,7)	802 (2,7)	815 (2,9)
	Lac-Etchemin	641 (4,4)	778 (3,8)	832 (3,6)	866 (3,5)	889 (3,6)	904 (3,7)
	Saint-Ephrem-de-Beauce	552 (3,8)	720 (3,0)	780 (2,8)	790 (2,8)	792 (3,0)	792 (3,1)
	Saint-Flavien	587 (5,3)	708 (4,5)	764 (4,3)	789 (4,2)	803 (4,4)	812 (4,6)
	Saint-Prosper	557 (3,5)	692 (2,9)	748 (2,7)	769 (2,7)	781 (2,8)	788 (3,0)
	Saint-Theophile	523 (5,6)	667 (4,5)	752 (4,0)	780 (4,0)	793 (4,1)	800 (4,3)
	Scott	591 (2,9)	708 (2,5)	768 (2,3)	802 (2,3)	823 (2,3)	837 (2,4)
14	Berthierville	452 (6,0)	581 (4,8)	654 (4,3)	691 (4,2)	713 (4,2)	727 (4,4)
	L'Assomption	454 (5,4)	592 (4,3)	662 (3,9)	698 (3,8)	720 (3,8)	734 (4,0)
16	Farnham	526 (5,4)	654 (4,4)	712 (4,1)	748 (4,0)	771 (4,1)	787 (4,2)
	Fleury	484 (6,0)	580 (5,2)	661 (4,6)	717 (4,3)	753 (4,3)	777 (4,4)
	Saint-Hubert	467 (6,2)	574 (5,2)	648 (4,6)	696 (4,4)	727 (4,5)	748 (4,6)
	Saint-Hyacinthe	491 (6,1)	598 (5,1)	671 (4,6)	725 (4,4)	761 (4,4)	786 (4,5)
17	Daveluyville	506 (2,6)	604 (2,3)	666 (2,1)	700 (2,0)	721 (2,1)	735 (2,2)
	Drummondville	511 (5,3)	598 (4,6)	669 (4,2)	723 (4,0)	758 (4,0)	783 (4,1)
	Nicolet	458 (5,4)	561 (4,5)	617 (4,2)	640 (4,1)	652 (4,3)	660 (4,4)
	Saint-Guillaume	491 (5,0)	573 (4,4)	644 (4,0)	698 (3,8)	733 (3,8)	758 (3,9)
18	Coteau-du-Lac	449 (4,5)	563 (3,7)	601 (3,5)	629 (3,4)	649 (3,5)	662 (3,6)
	Huntingdon	440 (4,8)	575 (3,7)	614 (3,6)	628 (3,6)	636 (3,7)	642 (3,9)
	Saint-Anicet	438 (4,7)	562 (3,7)	601 (3,5)	622 (3,5)	635 (3,6)	644 (3,8)
	Sainte-Clotilde	446 (5,4)	545 (4,6)	591 (4,3)	619 (4,2)	637 (4,3)	649 (4,4)
	Sainte-Martine	454 (5,8)	552 (4,8)	598 (4,5)	627 (4,4)	646 (4,5)	659 (4,7)

Tableau A2.5 Comparaison des accumulations moyenne (mm) entre 1961-1990 et 1981-2009 pour 52 sites, pour deux périodes d'entreposage, pour une période de retour de 10 ans (ET_p calculée selon la méthode de Thornthwaite)

Région	Municipalité	Entreposage d'octobre à mai			Entreposage de septembre à juin		
		Années 1961-1990	Années 1981-2009	Différence	Années 1961-1990	Années 1981-2009	Différence
1	Causapscal	499	537	38	509	544	36
	La Pocatière	454	486	33	445	482	38
	Mont-Joli	505	493	-12	489	483	-5
	Trois-Pistoles	496	506	10	491	517	27
2	Bagotville	438	425	-13	453	427	-26
	Hébertville	465	421	-44	485	421	-64
	Normandin	396	373	-23	395	355	-40
	Roberval	419	388	-31	414	373	-41
	Saint-Ambroise	463	436	-27	504	448	-56
3	Québec	627	586	-41	682	631	-51
	Saint-Alban	497	541	45	536	585	49
	Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier	490	629	139	517	691	175
4	Lac-aux-Sables	559	536	-23	596	578	-18
	Sainte-Anne-de-la-Pérade	520	518	-2	553	544	-8
5	Asbestos	536	546	10	553	571	18
	Lac-Mégantic	484	575	91	510	615	105
	Lennoxville	481	536	56	474	551	78
	Sherbrooke	563	541	-21	608	561	-47
7	Angers	498	467	-31	504	469	-35
	Lachute	544	519	-25	560	531	-29
	Maniwaki	414	431	17	418	425	7
	Mont-Laurier	493	473	-20	517	487	-29
	Shawville	439	397	-41	426	375	-51
	Wakefield	487	448	-39	488	442	-47
8	Amos	384	390	6	436	407	-29
	Val-d'Or	448	396	-52	477	410	-67
9	Baie-Comeau	592	511	-81	613	514	-99
11	Caplan	486	520	34	492	511	19

Région	Municipalité	Accumulation (mm)					
		Entreposage d'octobre à mai			Entreposage de septembre à juin		
		Années 1961-1990	Années 1981-2009	Différence	Années 1961-1990	Années 1981-2009	Différence
12	Disraeli	567	582	15	624	618	-6
	Montmagny	531	532	2	553	556	3
	Lac-Échemin	562	602	40	624	658	34
	Saint-Éphrem-de-Beauce	470	551	81	509	583	74
	Saint-Flavien	651	559	-91	731	598	-133
	Saint-Prosper	492	536	44	548	575	27
	Saint-Théophile	353	523	170	365	556	191
	Scott	519	561	42	550	599	49
13	Saint-Anicet	454	463	8	439	448	10
14	Berthierville	494	469	-25	486	459	-27
	L'Assomption	471	481	10	448	470	22
16	Farnham	525	531	6	526	538	12
	Fleury	536	489	-47	562	480	-82
	Saint-Hubert	498	491	-7	485	472	-13
	Saint-Hyacinthe	497	503	6	499	493	-6
17	Daveluyville	497	502	5	514	511	-3
	Drummondville	540	507	-34	551	507	-44
	Nicolet	423	461	39	417	455	38
	Saint-Guillaume	439	487	47	446	481	35
18	Coteau-du-Lac	380	468	88	377	454	77
	Huntingdon	484	466	-19	478	452	-26
	Sainte-Clotilde	438	463	25	425	447	22
	Sainte-Martine	421	470	49	417	454	37

Tableau A2.6 Accumulations moyennes, bornes inférieures et supérieures d'un intervalle de confiance à 90 % et erreur relative pour une période de retour de 10 ans, aux 52 sites, pour six périodes d'entreposage débutant le 1^{er} octobre, pour la période 1981-2009 (ET_p calculée selon Baier et Robertson)

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1 ^{er} octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)
1	Causapscal	7	601	569	634	5,39
		8	611	589	633	3,56
		9	590	575	605	2,61
		10	595	578	612	2,88
		11	613	585	641	4,63
		12	659	641	677	2,71
	La Pocatière	7	559	541	576	3,11
		8	555	537	573	3,31
		9	555	541	570	2,55
		10	581	562	600	3,30
		11	587	561	613	4,49
		12	631	608	653	3,56
	Mont-Joli	7	561	536	587	4,55
		8	573	549	597	4,21
		9	556	535	578	3,85
		10	541	523	559	3,34
		11	559	528	591	5,65
		12	590	564	616	4,44
	Trois-Pistoles	7	573	554	593	3,39
		8	576	553	598	3,93
		9	598	583	613	2,50
		10	620	593	647	4,35
		11	636	609	663	4,25
		12	683	656	710	3,99
2	Bagotville	7	482	469	495	2,72
		8	500	482	517	3,42
		9	489	471	507	3,74
		10	500	479	520	4,08
		11	485	469	501	3,37
		12	541	524	557	3,03

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)
2	Hébertville	7	472	464	480	1,70
		8	490	466	513	4,76
		9	474	445	503	6,13
		10	504	484	523	3,86
		11	492	476	509	3,39
		12	574	558	590	2,81
	Normandin	7	437	416	459	4,93
		8	451	434	468	3,77
		9	419	393	446	6,36
		10	434	413	456	4,88
		11	430	404	455	5,88
		12	463	437	490	5,76
	Roberval	7	437	424	451	3,12
		8	446	428	465	4,03
		9	436	424	448	2,68
		10	458	434	481	5,18
		11	433	409	457	5,64
		12	501	481	522	4,13
	Saint-Ambroise	7	480	469	491	2,29
		8	505	483	527	4,32
		9	486	466	506	4,08
		10	508	485	530	4,48
		11	506	481	530	4,89
		12	570	552	589	3,27
3	Québec	7	648	626	669	3,26
		8	671	641	700	4,39
		9	693	664	723	4,28
		10	756	729	783	3,57
		11	773	742	805	4,05
		12	834	798	869	4,29

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)
3	Saint-Alban	7	585	568	601	2,86
		8	601	584	619	2,91
		9	622	603	640	3,00
		10	660	639	681	3,16
		11	683	665	702	2,75
		12	764	739	789	3,31
	Sainte-Catherine-de-la- Jacques-Cartier	7	695	674	717	3,09
		8	730	694	767	5,01
		9	759	734	783	3,21
		10	814	781	847	4,07
		11	845	818	872	3,21
		12	919	887	951	3,49
4	Lac-aux-Sables	7	584	569	599	2,55
		8	610	585	636	4,24
		9	620	601	640	3,15
		10	676	659	694	2,64
		11	688	661	714	3,80
		12	757	731	783	3,44
	Sainte-Anne-de-la- Pérade	7	558	548	568	1,71
		8	567	544	589	3,92
		9	587	573	600	2,35
		10	619	598	640	3,36
		11	632	613	651	2,99
		12	699	672	726	3,89
5	Asbestos	7	631	614	648	2,68
		8	653	637	670	2,53
		9	695	670	720	3,58
		10	751	734	767	2,17
		11	810	790	831	2,57
		12	847	830	863	1,92

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)
5	Lac-Mégantic	7	693	670	715	3,22
		8	718	697	739	2,94
		9	758	730	786	3,68
		10	798	775	822	2,93
		11	843	801	885	4,95
		12	893	864	922	3,25
	Lennoxville	7	631	612	650	3,02
		8	675	658	691	2,44
		9	704	682	726	3,13
		10	770	744	796	3,40
		11	821	802	840	2,33
		12	828	803	852	3,01
	Sherbrooke	7	638	624	652	2,25
		8	674	659	689	2,18
		9	709	686	732	3,24
		10	775	754	796	2,71
		11	829	804	854	2,99
		12	838	806	870	3,84
	Stanstead	7	717	666	768	7,07
		8	762	726	798	4,76
		9	798	771	825	3,42
		10	842	814	871	3,39
		11	919	889	950	3,34
		12	944	909	978	3,64
7	Angers	7	514	500	529	2,80
		8	505	490	520	2,95
		9	490	465	516	5,15
		10	466	453	480	2,95
		11	483	463	503	4,17
		12	515	502	529	2,71

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)
7	Lachute	7	585	569	601	2,66
		8	573	547	599	4,57
		9	567	546	587	3,58
		10	566	541	591	4,42
		11	564	536	592	4,92
		12	587	563	611	4,11
	Maniwaki	7	457	445	468	2,44
		8	445	428	463	3,99
		9	408	384	432	5,85
		10	416	396	436	4,81
		11	424	402	447	5,28
		12	439	422	457	4,03
	Mont-Laurier	7	494	479	509	3,06
		8	479	452	505	5,53
		9	451	421	481	6,70
		10	464	442	486	4,80
		11	484	462	506	4,57
		12	517	506	528	2,11
	Shawville	7	430	417	443	3,04
		8	416	409	423	1,65
		9	376	361	391	3,96
		10	346	330	362	4,61
		11	353	339	367	3,97
		12	353	337	369	4,51
Wakefield	7	477	463	490	2,87	
	8	468	456	479	2,42	
	9	439	416	462	5,21	
	10	428	411	445	3,97	
	11	440	423	456	3,82	
	12	456	442	469	3,00	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)
8	Amos	7	421	407	435	3,26
		8	394	383	405	2,74
		9	398	378	418	5,11
		10	439	421	457	4,08
		11	460	440	480	4,39
		12	512	489	534	4,33
	Val-d'Or	7	419	414	425	1,28
		8	396	383	408	3,14
		9	398	386	410	2,96
		10	435	417	453	4,12
		11	438	424	451	3,11
		12	484	462	505	4,45
9	Baie-Comeau	7	611	593	629	2,92
		8	614	587	642	4,40
		9	617	593	641	3,85
		10	658	624	691	5,10
		11	672	636	709	5,46
		12	707	686	727	2,94
11	Caplan	7	586	566	607	3,47
		8	617	590	644	4,41
		9	627	603	651	3,88
		10	636	611	660	3,87
		11	652	618	685	5,15
		12	678	644	713	5,09
12	Disraeli	7	680	662	697	2,55
		8	707	690	724	2,39
		9	744	723	764	2,71
		10	795	772	817	2,81
		11	841	824	858	2,04
		12	874	845	903	3,34

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)
12	Montmagny	7	598	577	620	3,59
		8	604	584	624	3,31
		9	625	598	653	4,40
		10	674	644	703	4,38
		11	691	664	717	3,87
		12	744	714	774	4,02
	Lac-Échemin	7	674	646	702	4,17
		8	684	666	701	2,57
		9	718	694	742	3,40
		10	793	766	819	3,33
		11	834	809	859	3,04
		12	882	854	909	3,14
	Saint-Éphrem-de- Beauce	7	629	611	647	2,88
		8	640	624	657	2,59
		9	673	656	690	2,55
		10	711	692	730	2,66
		11	743	715	771	3,75
		12	773	748	797	3,21
	Saint-Flavien	7	614	603	624	1,73
		8	627	610	644	2,68
		9	633	615	651	2,89
		10	697	664	729	4,64
		11	719	690	748	4,02
		12	760	739	780	2,70
Saint-Prosper	7	600	578	622	3,63	
	8	607	593	622	2,37	
	9	640	624	655	2,38	
	10	689	670	707	2,71	
	11	716	694	739	3,12	
	12	744	722	766	2,93	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)
12	Saint-Théophile	7	599	576	621	3,78
		8	613	592	634	3,37
		9	637	615	658	3,36
		10	689	669	708	2,78
		11	708	684	731	3,32
		12	723	695	751	3,88
	Scott	7	625	605	645	3,22
		8	633	618	649	2,50
		9	642	623	662	3,08
		10	715	685	746	4,26
		11	745	711	779	4,55
		12	785	767	803	2,30
14	Berthierville	7	546	528	564	3,33
		8	568	550	587	3,19
		9	561	530	591	5,41
		10	571	552	590	3,27
		11	576	556	595	3,43
		12	590	559	622	5,29
	L'Assomption	7	560	544	577	2,98
		8	576	559	594	3,10
		9	547	521	573	4,74
		10	522	501	544	4,14
		11	509	476	541	6,39
		12	526	492	559	6,36
16	Farnham	7	579	564	595	2,72
		8	596	577	614	3,11
		9	584	560	608	4,10
		10	610	584	635	4,17
		11	620	595	645	4,04
		12	640	618	663	3,52

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)
16	Fleury	7	563	545	582	3,34
		8	576	554	598	3,87
		9	553	518	588	6,38
		10	544	504	583	7,27
		11	542	497	587	8,29
		12	547	501	593	8,36
	Saint-Hubert	7	573	552	593	3,54
		8	576	561	591	2,63
		9	545	525	564	3,59
		10	547	526	567	3,79
		11	542	512	572	5,46
		12	541	504	577	6,75
	Saint-Hyacinthe	7	576	556	597	3,58
		8	591	575	608	2,77
		9	566	537	594	5,02
		10	562	538	585	4,13
		11	559	517	601	7,54
		12	562	532	592	5,32
17	Daveluyville	7	554	543	566	2,12
		8	549	526	572	4,18
		9	559	546	572	2,31
		10	600	580	620	3,36
		11	611	586	637	4,16
		12	645	630	659	2,21
	Drummondville	7	563	550	577	2,34
		8	566	546	587	3,62
		9	550	526	574	4,36
		10	563	537	588	4,53
		11	578	560	595	3,06
		12	593	568	619	4,26

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)	
17	Nicolet	7	512	504	519	1,47	
		8	516	496	536	3,93	
		9	499	484	514	3,05	
		10	501	480	523	4,30	
		11	506	478	533	5,48	
		12	526	503	550	4,48	
	Saint-Guillaume	7	551	539	564	2,30	
		8	556	536	576	3,53	
		9	530	501	560	5,55	
		10	533	502	563	5,75	
		11	534	504	565	5,75	
		12	542	510	574	5,90	
	18	Coteau-du-Lac	7	536	525	547	1,98
			8	519	490	549	5,72
			9	501	486	517	3,12
			10	491	469	514	4,60
			11	475	451	498	5,03
			12	497	461	532	7,11
		Huntingdon	7	536	525	547	2,07
			8	535	515	555	3,76
			9	508	493	523	2,97
			10	491	470	512	4,22
			11	464	439	490	5,50
			12	495	467	524	5,71
Saint-Anicet		7	529	518	540	2,10	
		8	521	499	544	4,29	
		9	498	482	515	3,24	
		10	481	458	503	4,76	
		11	453	439	468	3,22	
		12	488	469	507	3,84	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)
18	Sainte-Clotilde	7	515	500	530	2,88
		8	510	491	529	3,79
		9	484	462	506	4,58
		10	473	453	492	4,23
		11	448	428	468	4,49
		12	484	464	505	4,15
	Sainte-Martine	7	523	508	538	2,94
		8	521	502	539	3,61
		9	494	475	513	3,92
		10	483	460	505	4,66
		11	463	443	483	4,26
		12	496	477	516	3,87

Tableau A2.7 Accumulations moyennes, bornes inférieures et supérieures d'un intervalle de confiance à 90 % et précision relative pour une période de retour de 25 ans, aux 52 sites, pour six périodes d'entreposage débutant le 1^{er} octobre, pour la période 1981-2009 (ETp calculée selon Baier et Robertson)

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1 ^{er} octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)
1	Causapscal	7	638	601	675	5,78
		8	647	622	672	3,82
		9	670	653	688	2,61
		10	664	645	684	2,94
		11	660	628	693	4,89
		12	700	680	720	2,90
	La Pocatière	7	605	585	624	3,26
		8	629	608	650	3,32
		9	595	579	611	2,71
		10	627	605	649	3,48
		11	611	581	641	4,91
		12	673	647	699	3,79
	Mont-Joli	7	600	571	629	4,84
		8	618	591	645	4,44
		9	584	560	609	4,16
		10	611	590	631	3,36
		11	626	590	661	5,74
		12	627	598	657	4,75
	Trois-Pistoles	7	617	594	639	3,58
		8	668	642	694	3,85
		9	653	636	670	2,61
		10	703	672	734	4,36
		11	748	717	779	4,11
		12	775	744	806	3,99
2	Bagotville	7	514	499	529	2,90
		8	573	554	593	3,39
		9	552	531	573	3,77
		10	533	510	556	4,35
		11	498	480	517	3,78
		12	549	531	568	3,39

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)
2	Hébertville	7	501	492	510	1,82
		8	572	545	598	4,63
		9	539	506	572	6,13
		10	555	533	577	3,98
		11	557	538	576	3,44
		12	608	589	626	3,02
	Normandin	7	504	479	528	4,86
		8	537	518	556	3,60
		9	493	463	524	6,14
		10	529	505	553	4,55
		11	541	512	569	5,31
		12	601	571	632	5,05
	Roberval	7	489	473	504	3,17
		8	534	514	555	3,83
		9	492	478	505	2,70
		10	496	469	523	5,43
		11	507	479	534	5,49
		12	563	540	587	4,18
	Saint-Ambroise	7	495	483	508	2,52
		8	566	542	591	4,39
		9	548	525	570	4,11
		10	550	525	576	4,69
		11	563	535	591	4,99
		12	632	611	653	3,36
3	Québec	7	683	659	707	3,51
		8	746	712	779	4,49
		9	763	730	797	4,42
		10	838	807	868	3,66
		11	849	813	885	4,19
		12	906	865	947	4,48

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)
3	Saint-Alban	7	628	609	647	3,03
		8	687	667	707	2,89
		9	705	684	727	3,01
		10	774	750	797	3,06
		11	797	776	818	2,68
		12	850	821	879	3,38
	Sainte-Catherine-de-la- Jacques-Cartier	7	729	704	753	3,35
		8	789	748	831	5,27
		9	813	785	841	3,41
		10	894	856	932	4,21
		11	920	890	951	3,34
		12	959	923	996	3,80
4	Lac-aux-Sables	7	632	615	648	2,68
		8	697	668	727	4,22
		9	728	705	750	3,07
		10	829	809	849	2,45
		11	852	823	882	3,48
		12	904	874	933	3,27
	Sainte-Anne-de-la- Pérade	7	586	575	597	1,86
		8	634	608	659	3,98
		9	643	627	658	2,44
		10	713	689	736	3,33
		11	738	716	759	2,91
		12	771	740	802	4,00
5	Asbestos	7	664	645	683	2,89
		8	718	700	737	2,62
		9	752	724	780	3,76
		10	795	776	813	2,33
		11	860	836	883	2,75
		12	898	879	916	2,06

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)
5	Lac-Mégantic	7	764	738	789	3,32
		8	792	768	816	3,03
		9	843	811	875	3,76
		10	931	905	958	2,86
		11	992	945	1040	4,78
		12	1025	992	1058	3,22
	Lennoxville	7	677	655	699	3,20
		8	712	693	731	2,63
		9	769	744	794	3,25
		10	843	813	872	3,53
		11	904	882	925	2,40
		12	921	893	950	3,08
	Sherbrooke	7	673	657	689	2,42
		8	706	689	722	2,37
		9	759	733	785	3,45
		10	845	821	869	2,83
		11	908	879	936	3,10
		12	926	890	963	3,95
	Stanstead	7	807	749	865	7,14
		8	865	824	906	4,76
		9	938	907	970	3,32
		10	1022	990	1055	3,17
		11	1052	1017	1087	3,31
		12	1075	1036	1114	3,63
7	Angers	7	561	544	577	2,92
		8	546	529	563	3,10
		9	515	486	543	5,58
		10	524	508	540	2,98
		11	526	503	549	4,35
		12	543	527	559	2,93

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)
7	Lachute	7	620	602	638	2,86
		8	621	592	651	4,79
		9	607	583	630	3,81
		10	623	595	652	4,56
		11	631	599	662	4,99
		12	692	664	719	3,97
	Maniwaki	7	470	457	483	2,70
		8	475	455	495	4,25
		9	440	412	467	6,17
		10	445	423	468	5,11
		11	443	418	468	5,75
		12	472	452	493	4,26
	Mont-Laurier	7	524	507	541	3,28
		8	532	502	562	5,65
		9	507	473	542	6,77
		10	521	496	546	4,86
		11	540	515	565	4,65
		12	565	553	577	2,20
	Shawville	7	453	438	467	3,29
		8	426	418	434	1,84
		9	422	405	438	4,01
		10	398	380	416	4,56
		11	382	366	398	4,17
		12	400	382	419	4,53
Wakefield	7	510	494	526	3,05	
	8	488	475	501	2,64	
	9	485	459	511	5,37	
	10	486	467	505	3,97	
	11	475	456	494	4,01	
	12	497	481	512	3,13	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)
8	Amos	7	431	415	446	3,62
		8	405	393	418	3,03
		9	443	420	466	5,21
		10	484	464	504	4,20
		11	486	463	509	4,73
		12	539	514	564	4,66
	Val-d'Or	7	426	420	432	1,43
		8	425	411	439	3,32
		9	424	411	438	3,16
		10	435	415	456	4,70
		11	449	433	465	3,54
		12	577	553	602	4,24
9	Baie-Comeau	7	657	637	678	3,09
		8	698	667	729	4,40
		9	695	668	722	3,89
		10	753	715	791	5,06
		11	743	702	785	5,61
		12	787	763	811	3,00
11	Caplan	7	610	587	633	3,80
		8	661	629	693	4,81
		9	682	654	710	4,06
		10	725	697	753	3,86
		11	705	666	743	5,42
		12	729	690	768	5,38
12	Disraeli	7	701	681	720	2,81
		8	726	707	745	2,65
		9	776	753	799	2,95
		10	829	804	854	3,06
		11	864	845	884	2,25
		12	898	865	932	3,69

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)
12	Montmagny	7	671	647	695	3,64
		8	674	652	697	3,37
		9	693	661	724	4,51
		10	783	750	817	4,28
		11	777	747	808	3,91
		12	833	799	867	4,08
	Lac-Etchemin	7	750	718	782	4,25
		8	728	708	748	2,75
		9	805	778	833	3,44
		10	849	819	879	3,54
		11	898	869	926	3,21
		12	942	911	974	3,34
	Saint-Éphrem-de-Beauce	7	661	641	682	3,12
		8	652	633	671	2,89
		9	699	680	719	2,79
		10	729	707	751	2,99
		11	770	739	802	4,11
		12	793	765	821	3,55
	Saint-Flavien	7	641	629	653	1,89
		8	650	631	669	2,94
		9	703	682	724	2,96
		10	743	706	780	4,95
		11	778	745	810	4,22
		12	821	797	844	2,84
Saint-Prosper	7	676	651	700	3,66	
	8	662	646	678	2,47	
	9	720	703	738	2,40	
	10	728	707	749	2,91	
	11	766	740	791	3,31	
	12	803	778	827	3,08	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)
12	Saint-Théophile	7	682	657	708	3,77
		8	670	647	694	3,50
		9	733	708	757	3,32
		10	776	754	798	2,81
		11	835	809	862	3,19
		12	865	833	897	3,68
	Scott	7	671	649	694	3,41
		8	643	625	661	2,80
		9	721	699	744	3,12
		10	785	751	820	4,41
		11	813	774	851	4,74
		12	863	842	883	2,38
14	Berthierville	7	587	566	607	3,53
		8	634	613	654	3,25
		9	601	566	635	5,74
		10	621	600	642	3,42
		11	683	660	705	3,28
		12	696	661	732	5,10
	L'Assomption	7	617	598	636	3,08
		8	635	614	655	3,20
		9	594	565	624	4,96
		10	572	548	597	4,29
		11	594	557	631	6,22
		12	614	576	652	6,19
16	Farnham	7	602	584	620	2,98
		8	621	600	642	3,39
		9	652	625	679	4,18
		10	660	632	689	4,38
		11	668	640	697	4,26
		12	680	655	706	3,77

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)
16	Fleury	7	622	601	643	3,44
		8	669	644	695	3,78
		9	650	610	690	6,17
		10	630	585	676	7,21
		11	680	629	731	7,51
		12	690	638	742	7,53
	Saint-Hubert	7	625	602	648	3,69
		8	655	638	673	2,63
		9	640	618	663	3,47
		10	637	613	660	3,70
		11	667	633	700	5,04
		12	682	640	723	6,08
	Saint-Hyacinthe	7	628	605	652	3,74
		8	673	654	691	2,76
		9	665	632	697	4,86
		10	643	617	670	4,10
		11	668	620	716	7,18
		12	686	652	720	4,95
17	Daveluyville	7	581	568	595	2,30
		8	594	568	620	4,38
		9	625	610	640	2,35
		10	638	616	661	3,59
		11	670	641	698	4,32
		12	691	675	707	2,34
	Drummondville	7	619	604	634	2,42
		8	655	632	678	3,55
		9	667	640	695	4,09
		10	639	610	668	4,54
		11	684	664	704	2,94
		12	699	670	728	4,11

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)
17	Nicolet	7	534	525	542	1,60
		8	560	537	583	4,11
		9	538	521	556	3,22
		10	534	509	558	4,59
		11	559	528	590	5,63
		12	563	536	590	4,76
	Saint-Guillaume	7	594	579	608	2,43
		8	629	607	652	3,56
		9	623	590	657	5,38
		10	604	569	639	5,76
		11	661	626	696	5,29
		12	673	636	709	5,40
18	Coteau-du-Lac	7	573	560	585	2,10
		8	612	578	646	5,52
		9	573	555	590	3,10
		10	582	557	608	4,41
		11	579	552	607	4,68
		12	593	553	634	6,76
	Huntingdon	7	570	558	583	2,21
		8	566	543	589	4,04
		9	532	515	549	3,22
		10	523	499	546	4,51
		11	495	466	524	5,86
		12	514	482	546	6,25
	Saint-Anicet	7	543	530	556	2,32
		8	567	542	593	4,48
		9	527	509	545	3,49
		10	532	506	558	4,89
		11	503	487	520	3,29
		12	505	484	527	4,21

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Moyenne (mm)	Borne Inférieure (mm)	Borne Supérieure (mm)	Précision relative (%)
18	Sainte-Clotilde	7	549	532	566	3,06
		8	554	533	576	3,96
		9	533	508	558	4,73
		10	528	506	551	4,30
		11	511	488	534	4,48
		12	522	499	545	4,39
	Sainte-Martine	7	564	546	581	3,10
		8	573	552	595	3,73
		9	549	527	571	4,00
		10	538	512	564	4,75
		11	534	512	557	4,19
		12	541	519	562	4,03

Annexe 3. Accumulations d'eau pour la période 2016-2044

Tableau A3. 1. Accumulations minimum, maximum et moyenne pour 8 scénarios climatiques, sur la période 2016-2044, pour 52 sites, en fonction des périodes d'entreposage débutant le 1^{er} octobre, pour une période de retour de 10 ans

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1 ^{er} octobre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
1	Causapscal	7	606	653	639
		8	637	684	657
		9	629	708	667
		10	666	740	695
		11	681	752	716
		12	704	800	747
	La Pocatière	7	559	613	595
		8	577	628	606
		9	584	655	618
		10	601	665	635
		11	591	666	632
		12	626	715	665
	Mont-Joli	7	570	637	606
		8	606	647	620
		9	600	673	627
		10	600	686	632
		11	599	677	644
		12	648	712	669
Trois-Pistoles	7	593	646	615	
	8	615	663	635	
	9	617	698	647	
	10	641	734	672	
	11	647	736	679	
	12	683	788	717	
2	Bagotville	7	465	529	501
		8	478	528	507
		9	473	563	518
		10	487	575	536
		11	513	577	545
		12	561	636	597

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
2	Hébertville	7	470	508	491
		8	471	510	493
		9	453	542	497
		10	488	560	516
		11	503	561	529
		12	576	624	592
	Normandin	7	438	473	453
		8	412	481	446
		9	409	498	441
		10	432	517	463
		11	446	533	475
		12	493	566	516
	Roberval	7	448	492	473
		8	434	500	463
		9	422	502	463
		10	447	529	484
		11	452	544	498
		12	517	579	542
	Saint-Ambroise	7	479	518	503
		8	488	534	512
		9	472	570	519
		10	512	590	549
		11	543	600	573
		12	604	657	631
3	Québec	7	632	723	694
		8	659	729	710
		9	698	808	760
		10	751	841	797
		11	764	856	816
		12	850	951	899

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
3	Saint-Alban	7	603	676	648
		8	628	685	658
		9	659	760	705
		10	685	798	745
		11	694	807	760
		12	793	891	837
	Sainte-Catherine-de-la- Jacques-Cartier	7	676	769	735
		8	708	783	755
		9	751	869	810
		10	797	912	850
		11	817	940	876
		12	917	1035	970
4	Lac-aux-Sables	7	616	682	646
		8	630	688	651
		9	655	752	690
		10	663	774	718
		11	680	780	731
		12	773	855	805
	Sainte-Anne-de-la- Pérade	7	590	664	638
		8	613	668	645
		9	638	738	684
		10	660	761	724
		11	662	770	734
		12	751	849	807
5	Asbestos	7	660	708	682
		8	685	707	698
		9	734	772	748
		10	756	816	785
		11	797	896	850
		12	857	988	929

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
5	Lac-Mégantic	7	664	721	686
		8	679	755	710
		9	713	815	753
		10	722	888	795
		11	807	965	863
		12	868	1029	930
	Lennoxville	7	644	679	662
		8	672	699	683
		9	697	744	715
		10	725	804	755
		11	774	872	810
		12	812	941	875
	Sherbrooke	7	641	684	662
		8	674	707	686
		9	695	758	719
		10	723	816	758
		11	768	888	814
		12	815	962	884
	Stanstead	7	721	788	745
		8	753	811	776
		9	784	867	811
		10	817	924	859
		11	867	1003	920
		12	926	1071	980
7	Angers	7	530	592	567
		8	533	585	562
		9	552	579	564
		10	543	598	571
		11	535	626	579
		12	581	678	630

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
7	Lachute	7	591	668	632
		8	607	646	632
		9	611	655	634
		10	600	651	637
		11	602	680	644
		12	641	728	686
	Maniwaki	7	471	533	510
		8	462	522	503
		9	464	516	495
		10	483	500	491
		11	470	501	489
		12	522	551	534
	Mont-Laurier	7	513	572	549
		8	511	567	546
		9	522	585	553
		10	530	561	543
		11	527	560	544
		12	578	614	597
	Shawville	7	429	512	478
		8	429	484	467
		9	426	470	451
		10	432	453	440
		11	406	462	434
		12	444	500	469
Wakefield	7	488	555	531	
	8	492	532	520	
	9	507	531	519	
	10	493	548	519	
	11	475	562	519	
	12	531	603	563	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation			
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)	
8	Amos	7	440	483	460	
		8	442	482	460	
		9	432	500	460	
		10	442	514	483	
		11	459	538	504	
		12	540	587	567	
	Val-d'Or	7	460	484	472	
		8	456	481	470	
		9	444	497	472	
		10	478	507	492	
		11	497	511	506	
		12	551	595	562	
	9	Baie-Comeau	7	584	659	627
			8	645	679	654
9			642	726	671	
10			637	765	699	
11			666	781	714	
12			705	835	755	
11	Caplan	7	626	724	672	
		8	656	747	693	
		9	658	754	704	
		10	674	747	712	
		11	702	793	736	
		12	730	817	780	
12	Disraeli	7	673	719	703	
		8	704	753	728	
		9	748	807	781	
		10	767	879	829	
		11	835	980	903	
		12	897	1067	978	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
12	Montmagny	7	582	660	631
		8	597	675	649
		9	622	731	683
		10	666	747	711
		11	672	770	725
		12	740	847	789
	Lac-Échemin	7	643	735	699
		8	660	762	722
		9	700	789	760
		10	746	844	798
		11	785	923	851
		12	862	990	935
	Saint-Éphrem-de-Beauce	7	583	647	626
		8	595	671	643
		9	625	716	684
		10	632	762	709
		11	702	869	779
		12	763	925	842
	Saint-Flavien	7	613	680	662
		8	625	690	671
		9	656	753	716
		10	675	781	744
		11	697	818	772
		12	787	916	858
Saint-Prosper	7	557	643	604	
	8	568	665	624	
	9	600	690	654	
	10	609	743	680	
	11	663	828	740	
	12	736	885	811	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
12	Saint-Théophile	7	565	642	606
		8	573	668	619
		9	603	707	652
		10	597	758	678
		11	656	824	730
		12	723	870	789
	Scott	7	603	675	654
		8	611	703	672
		9	649	752	713
		10	694	776	745
		11	721	825	779
		12	789	905	851
14	Berthierville	7	561	643	601
		8	576	624	599
		9	574	660	615
		10	588	668	628
		11	602	702	651
		12	650	747	702
	L'Assomption	7	578	656	612
		8	578	632	601
		9	562	630	601
		10	568	642	599
		11	563	671	608
		12	595	704	645
16	Farnham	7	635	668	653
		8	631	664	651
		9	646	679	662
		10	639	711	674
		11	641	733	689
		12	683	786	748

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
16	Fleury	7	572	639	606
		8	584	622	601
		9	572	650	611
		10	567	651	605
		11	569	682	621
		12	604	712	662
	Saint-Hubert	7	597	652	624
		8	599	633	614
		9	584	621	603
		10	581	631	601
		11	578	679	616
		12	600	707	653
	Saint-Hyacinthe	7	591	645	618
		8	596	625	612
		9	588	648	616
		10	588	645	614
		11	581	677	630
		12	611	714	670
17	Daveluyville	7	574	634	613
		8	593	626	616
		9	607	678	643
		10	614	696	666
		11	641	724	695
		12	706	800	762
	Drummondville	7	594	651	625
		8	604	630	621
		9	610	664	633
		10	620	654	643
		11	622	693	672
		12	667	756	726

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation			
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)	
17	Nicolet	7	541	602	578	
		8	554	581	569	
		9	549	620	577	
		10	553	605	583	
		11	548	609	590	
		12	607	674	647	
	Saint-Guillaume	7	578	638	609	
		8	584	615	603	
		9	574	652	612	
		10	581	641	612	
		11	576	667	626	
		12	630	707	676	
	18	Coteau-du-Lac	7	568	630	597
			8	580	616	597
			9	573	603	593
			10	566	622	604
			11	565	648	599
			12	607	684	633
Huntingdon		7	567	635	590	
		8	580	624	594	
		9	558	600	583	
		10	544	641	599	
		11	533	655	593	
		12	587	702	639	
Saint-Anicet		7	558	626	586	
		8	570	615	590	
		9	552	592	580	
		10	530	625	591	
		11	529	646	586	
		12	574	689	630	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
18	Sainte-Clotilde	7	565	602	582
		8	574	599	584
		9	567	582	577
		10	551	604	579
		11	547	628	580
		12	591	670	629
	Sainte-Martine	7	574	615	594
		8	579	610	593
		9	576	594	583
		10	563	615	587
		11	551	634	585
		12	599	674	634

Tableau A3. 2. Accumulations minimum, maximum et moyenne pour 8 scénarios climatiques, sur la période 2016-2044, pour 52 sites, en fonction des périodes d'entreposage débutant le 1^{er} octobre, pour une période de retour de 25 ans

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1 ^{er} octobre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
1	Causapscal	7	632	751	683
		8	668	752	705
		9	689	751	727
		10	690	820	750
		11	754	840	784
		12	760	864	809
	La Pocatière	7	589	668	643
		8	605	692	651
		9	615	683	654
		10	632	717	682
		11	636	747	680
		12	666	825	725
	Mont-Joli	7	596	708	652
		8	627	703	672
		9	630	728	677
		10	626	796	694
		11	660	799	715
		12	697	811	747
Trois-Pistoles	7	619	693	655	
	8	624	709	676	
	9	628	762	686	
	10	668	847	742	
	11	683	857	753	
	12	747	883	798	
2	Bagotville	7	485	575	532
		8	492	559	530
		9	482	592	547
		10	524	620	570
		11	539	615	571
		12	617	706	646

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
2	Hébertville	7	501	549	524
		8	501	538	518
		9	472	576	521
		10	526	595	552
		11	519	608	563
		12	621	652	633
	Normandin	7	458	514	486
		8	433	512	479
		9	440	538	478
		10	450	540	491
		11	483	554	518
		12	525	594	559
	Roberval	7	482	528	500
		8	467	525	493
		9	450	548	496
		10	468	569	526
		11	502	566	537
		12	572	615	592
	Saint-Ambroise	7	515	557	533
		8	513	556	535
		9	480	606	543
		10	527	615	581
		11	570	632	603
		12	634	766	683
3	Québec	7	677	778	752
		8	732	822	780
		9	783	849	825
		10	804	928	865
		11	792	917	870
		12	897	1022	972

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
3	Saint-Alban	7	656	734	704
		8	697	766	728
		9	742	806	771
		10	714	864	807
		11	714	861	812
		12	834	961	903
	Sainte-Catherine-de-la- Jacques-Cartier	7	720	831	793
		8	777	859	825
		9	832	909	870
		10	841	953	914
		11	837	985	926
		12	960	1104	1031
4	Lac-aux-Sables	7	657	739	698
		8	699	733	717
		9	736	784	752
		10	707	847	782
		11	694	855	783
		12	801	903	853
	Sainte-Anne-de-la- Pérade	7	653	729	703
		8	684	752	723
		9	717	781	760
		10	681	845	789
		11	682	856	792
		12	790	954	887
5	Asbestos	7	733	756	747
		8	733	807	775
		9	802	832	822
		10	797	901	858
		11	833	1006	913
		12	902	1108	1009

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
5	Lac-Mégantic	7	680	811	734
		8	719	817	765
		9	733	864	810
		10	741	912	837
		11	834	1004	889
		12	918	1081	973
	Lennoxville	7	702	771	723
		8	689	805	755
		9	742	835	790
		10	734	902	815
		11	785	982	872
		12	881	1081	955
	Sherbrooke	7	697	782	725
		8	696	819	758
		9	743	851	789
		10	733	919	812
		11	783	1018	877
		12	874	1107	961
Stanstead	7	771	875	813	
	8	776	929	859	
	9	826	959	885	
	10	838	1030	921	
	11	890	1080	978	
	12	993	1178	1055	
7	Angers	7	577	661	621
		8	597	670	627
		9	608	654	631
		10	617	728	672
		11	615	749	676
		12	655	843	729

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
7	Lachute	7	654	798	719
		8	659	805	718
		9	634	768	709
		10	605	820	730
		11	634	836	739
		12	714	870	791
	Maniwaki	7	480	576	539
		8	501	575	533
		9	504	597	547
		10	521	579	545
		11	508	567	539
		12	537	616	581
	Mont-Laurier	7	510	615	575
		8	546	607	575
		9	563	642	607
		10	566	621	597
		11	566	616	595
		12	609	683	646
	Shawville	7	462	541	514
		8	495	543	517
		9	482	557	513
		10	512	575	544
		11	458	561	526
		12	492	652	563
Wakefield	7	519	611	567	
	8	540	600	566	
	9	553	607	582	
	10	570	657	615	
	11	549	652	608	
	12	601	749	654	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation			
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)	
8	Amos	7	458	501	482	
		8	463	523	491	
		9	457	529	493	
		10	459	554	518	
		11	488	589	543	
		12	561	669	613	
	Val-d'Or	7	483	513	498	
		8	492	507	500	
		9	477	539	503	
		10	511	548	528	
		11	532	557	548	
		12	593	640	612	
	9	Baie-Comeau	7	622	725	674
			8	700	732	718
9			686	827	739	
10			705	842	757	
11			704	864	772	
12			790	903	837	
11	Caplan	7	657	752	718	
		8	728	806	756	
		9	699	829	760	
		10	725	856	781	
		11	727	855	781	
		12	756	879	833	
12	Disraeli	7	750	787	768	
		8	760	821	792	
		9	819	870	849	
		10	792	935	881	
		11	876	1075	953	
		12	957	1176	1041	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
12	Montmagny	7	614	702	678
		8	639	744	698
		9	651	766	721
		10	688	803	747
		11	681	807	748
		12	783	945	844
	Lac-Échemin	7	670	797	747
		8	717	826	778
		9	765	846	824
		10	771	886	849
		11	818	1049	916
		12	934	1107	1017
	Saint-Éphrem-de-Beauce	7	627	708	675
		8	651	731	697
		9	683	779	749
		10	653	822	770
		11	758	966	843
		12	807	1014	902
	Saint-Flavien	7	663	762	714
		8	674	768	729
		9	709	805	775
		10	696	868	794
		11	707	871	813
		12	811	1017	933
Saint-Prosper	7	577	724	653	
	8	621	719	677	
	9	659	754	724	
	10	648	792	751	
	11	680	934	799	
	12	782	989	880	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
12	Saint-Théophile	7	584	739	659
		8	611	712	668
		9	641	750	709
		10	626	783	731
		11	687	873	765
		12	745	920	829
	Scott	7	636	742	706
		8	666	779	735
		9	725	804	776
		10	749	878	807
		11	733	892	829
		12	845	975	922
14	Berthierville	7	636	709	680
		8	634	741	689
		9	646	737	696
		10	620	774	711
		11	638	791	728
		12	688	815	778
	L'Assomption	7	646	747	700
		8	643	765	700
		9	644	722	683
		10	605	750	680
		11	582	739	676
		12	626	778	728
16	Farnham	7	708	769	730
		8	683	810	740
		9	704	783	746
		10	681	841	758
		11	679	839	760
		12	715	904	845

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation			
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)	
16	Fleury	7	656	721	688	
		8	653	753	692	
		9	655	738	693	
		10	614	771	693	
		11	604	771	697	
		12	646	793	748	
	Saint-Hubert	7	688	773	719	
		8	671	791	717	
		9	647	742	689	
		10	622	789	694	
		11	616	772	686	
		12	647	822	743	
	Saint-Hyacinthe	7	672	733	698	
		8	662	763	699	
		9	662	729	693	
		10	623	774	700	
		11	628	772	707	
		12	651	817	762	
	17	Daveluyville	7	646	703	671
			8	643	723	682
			9	686	739	710
			10	644	782	725
			11	670	799	747
			12	726	888	823
Drummondville		7	660	722	697	
		8	661	746	702	
		9	702	733	716	
		10	655	790	727	
		11	653	804	743	
		12	701	892	807	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation			
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)	
17	Nicolet	7	621	661	644	
		8	619	682	652	
		9	634	685	654	
		10	582	710	655	
		11	586	714	655	
		12	641	775	715	
	Saint-Guillaume	7	669	715	690	
		8	658	740	691	
		9	670	725	696	
		10	618	750	690	
		11	622	752	705	
		12	668	828	762	
	18	Coteau-du-Lac	7	649	773	696
			8	630	777	683
			9	622	722	669
			10	609	779	690
			11	635	752	684
			12	660	791	725
Huntingdon		7	630	778	684	
		8	626	792	671	
		9	614	729	655	
		10	595	769	672	
		11	614	747	661	
		12	662	789	708	
Saint-Anicet		7	627	766	681	
		8	620	774	669	
		9	600	706	650	
		10	579	746	664	
		11	591	729	656	
		12	656	770	704	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
18	Sainte-Clotilde	7	640	744	678
		8	629	760	669
		9	615	700	642
		10	582	759	660
		11	597	744	650
		12	654	776	697
	Sainte-Martine	7	655	753	689
		8	645	770	683
		9	624	714	655
		10	596	769	670
		11	601	755	659
		12	655	793	708

Tableau A3.3 Accumulations minimum, maximum et moyenne pour 8 scénarios climatiques, sur la période 2016-2044, pour 52 sites, en fonction des périodes d'entreposage débutant le 1^{er} septembre, pour une période de retour de 10 ans

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er septembre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
1	Causapscal	8	663	708	684
		9	673	737	701
		10	665	764	707
		11	681	807	730
		12	713	809	752
	La Pocatière	8	617	673	642
		9	640	676	655
		10	630	711	655
		11	645	726	677
		12	648	731	674
	Mont-Joli	8	609	688	642
		9	636	702	658
		10	626	734	662
		11	624	743	662
		12	643	734	678
	Trois-Pistoles	8	630	691	658
		9	651	714	678
		10	654	750	688
		11	680	782	710
		12	690	784	723
2	Bagotville	8	533	603	568
		9	535	605	571
		10	531	642	581
		11	550	657	593
		12	567	655	602
	Hébertville	8	548	587	569
		9	537	596	562
		10	528	623	567
		11	554	641	581
		12	573	648	598

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er septembre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
2	Normandin	8	479	539	506
		9	468	547	495
		10	455	565	489
		11	471	579	504
		12	481	595	517
	Roberval	8	501	548	527
		9	487	547	516
		10	477	566	515
		11	498	595	535
		12	512	606	548
	Saint-Ambroise	8	559	608	583
		9	552	621	584
		10	542	655	592
		11	580	674	614
		12	607	688	637
3	Québec	8	730	816	776
		9	751	834	793
		10	794	919	843
		11	842	971	889
		12	865	988	909
	Saint-Alban	8	699	763	725
		9	710	789	736
		10	739	867	780
		11	760	928	819
		12	771	935	837
	Sainte-Catherine-de-la- Jacques-Cartier	8	787	861	821
		9	811	898	842
		10	858	992	902
		11	900	1050	944
		12	928	1074	974

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er septembre (mois)	Accumulation			
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)	
4	Lac-aux-Sables	8	684	749	717	
		9	698	768	726	
		10	724	843	767	
		11	753	891	792	
		12	768	895	807	
	Sainte-Anne-de-la-Pérade	8	680	758	713	
		9	683	774	717	
		10	720	842	755	
		11	730	882	792	
		12	739	877	804	
	5	Asbestos	8	726	796	751
			9	756	805	776
			10	796	873	823
			11	823	913	863
			12	875	953	922
Lac-Mégantic		8	727	781	752	
		9	760	811	777	
		10	776	869	818	
		11	808	932	861	
		12	886	1017	929	
Lennoxville		8	699	753	724	
		9	733	758	746	
		10	752	805	781	
		11	773	848	814	
		12	841	905	869	
Sherbrooke	8	697	754	726		
	9	732	761	747		
	10	742	819	781		
	11	768	861	816		
	12	833	928	875		

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er septembre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
5	Stanstead	8	777	836	808
		9	820	871	839
		10	855	933	880
		11	890	981	923
		12	940	1051	984
7	Angers	8	572	653	619
		9	572	634	609
		10	590	651	618
		11	590	645	623
		12	588	665	631
	Lachute	8	641	720	684
		9	659	716	684
		10	657	732	684
		11	643	724	683
		12	645	708	688
	Maniwaki	8	498	613	561
		9	487	587	550
		10	492	580	543
		11	506	569	535
		12	512	548	529
Mont-Laurier	8	541	646	602	
	9	538	634	598	
	10	558	644	606	
	11	571	626	596	
	12	572	605	589	
Shawville	8	455	563	518	
	9	454	541	504	
	10	450	522	486	
	11	443	489	469	
	12	436	492	464	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er septembre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
7	Wakefield	8	529	617	581
		9	528	599	567
		10	548	604	569
		11	540	582	566
		12	526	601	565
8	Amos	8	522	582	544
		9	516	595	541
		10	501	596	537
		11	507	594	554
		12	523	619	575
	Val-d'Or	8	537	575	555
		9	525	578	547
		10	518	586	542
		11	544	580	557
		12	559	590	573
9	Baie-Comeau	8	647	704	672
		9	680	738	704
		10	676	786	717
		11	672	830	743
		12	712	836	759
11	Caplan	8	678	755	720
		9	714	783	745
		10	703	798	755
		11	717	789	758
		12	744	839	782
12	Disraeli	8	741	812	777
		9	762	827	802
		10	803	906	854
		11	834	953	902
		12	911	1049	978

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er septembre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
12	Montmagny	8	657	756	706
		9	690	762	726
		10	697	812	748
		11	747	850	791
		12	758	878	798
	Lac-Échemin	8	730	811	778
		9	760	835	802
		10	783	874	834
		11	842	919	880
		12	879	990	936
	Saint-Éphrem-de-Beauce	8	638	715	686
		9	652	735	704
		10	684	796	742
		11	696	821	769
		12	765	916	841
	Saint-Flavien	8	685	780	726
		9	692	788	744
		10	731	862	791
		11	754	904	825
		12	779	926	857
Saint-Prosper	8	625	707	670	
	9	654	729	691	
	10	679	756	721	
	11	701	790	749	
	12	746	867	805	
Saint-Théophile	8	632	693	666	
	9	647	716	678	
	10	668	754	708	
	11	685	791	736	
	12	733	865	788	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er septembre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
12	Scott	8	664	765	722
		9	686	780	745
		10	720	842	782
		11	770	882	827
		12	796	908	858
14	Berthierville	8	619	689	654
		9	627	689	654
		10	616	734	671
		11	642	731	683
		12	664	737	698
	L'Assomption	8	618	689	656
		9	625	679	650
		10	600	701	648
		11	617	678	644
		12	613	685	646
16	Farnham	8	677	736	708
		9	677	732	714
		10	690	763	726
		11	689	749	730
		12	699	774	746
	Fleury	8	619	679	650
		9	608	668	646
		10	624	710	657
		11	616	683	652
		12	622	700	660
	Saint-Hubert	8	631	690	662
		9	637	674	657
		10	625	675	646
		11	619	662	645
		12	615	687	650

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er septembre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
16	Saint-Hyacinthe	8	630	691	657
		9	619	678	655
		10	631	704	659
		11	624	677	655
		12	633	702	669
17	Daveluyville	8	636	707	669
		9	639	715	674
		10	663	772	703
		11	672	796	728
		12	700	812	755
	Drummondville	8	647	712	670
		9	642	705	670
		10	664	739	685
		11	674	736	697
		12	677	749	719
	Nicolet	8	602	672	629
		9	600	675	625
		10	594	712	635
		11	604	702	636
		12	607	683	641
Saint-Guillaume	8	631	695	656	
	9	625	684	650	
	10	625	722	660	
	11	632	705	659	
	12	643	707	673	
18	Coteau-du-Lac	8	611	678	641
		9	603	662	638
		10	605	671	636
		11	593	673	642
		12	593	664	635

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er septembre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
18	Huntingdon	8	607	707	643
		9	603	698	647
		10	593	667	642
		11	581	678	649
		12	571	685	639
	Saint-Anicet	8	603	695	639
		9	597	683	641
		10	592	669	635
		11	572	671	639
		12	568	669	629
	Sainte-Clotilde	8	602	664	635
		9	601	658	637
		10	596	676	634
		11	587	674	634
		12	584	659	634
	Sainte-Martine	8	616	668	643
		9	613	666	644
		10	609	678	637
		11	600	673	639
		12	598	659	637

Tableau A3.4. Accumulations minimum, maximum et moyenne pour 8 scénarios climatiques, sur la période 2016-2044, pour 52 sites, en fonction des périodes d'entreposage débutant le 1^{er} septembre, pour une période de retour de 25 ans

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er septembre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
1	Causapscal	8	692	778	733
		9	730	777	756
		10	764	806	782
		11	748	876	801
		12	781	891	836
	La Pocatière	8	653	738	692
		9	677	728	703
		10	672	767	713
		11	676	797	726
		12	673	809	723
	Mont-Joli	8	647	741	700
		9	696	737	717
		10	675	771	723
		11	688	834	734
		12	715	837	750
	Trois-Pistoles	8	646	742	703
		9	711	754	736
		10	700	816	748
		11	727	896	792
		12	728	905	798
2	Bagotville	8	575	667	615
		9	557	648	611
		10	550	706	629
		11	576	697	640
		12	588	700	644
	Hébertville	8	556	638	601
		9	536	650	597
		10	557	701	614
		11	590	697	624
		12	588	721	635

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er septembre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
2	Normandin	8	510	589	543
		9	494	605	531
		10	479	633	533
		11	507	621	548
		12	534	645	570
	Roberval	8	522	597	563
		9	495	603	553
		10	513	637	558
		11	543	637	576
		12	558	648	591
	Saint-Ambroise	8	575	657	618
		9	562	674	618
		10	572	729	640
		11	615	726	662
		12	636	751	686
3	Québec	8	813	875	844
		9	867	883	877
		10	888	971	928
		11	917	1002	959
		12	905	1009	962
	Saint-Alban	8	746	848	783
		9	790	835	811
		10	810	933	863
		11	832	960	890
		12	835	944	896
	Sainte-Catherine-de-la- Jacques-Cartier	8	860	932	886
		9	912	944	921
		10	929	1047	978
		11	979	1074	1015
		12	979	1094	1029

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er septembre (mois)	Accumulation			
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)	
4	Lac-aux-Sables	8	733	844	787	
		9	777	859	810	
		10	772	928	846	
		11	807	945	866	
		12	814	946	865	
	Sainte-Anne-de-la-Pérade	8	727	845	775	
		9	785	821	800	
		10	801	888	845	
		11	794	927	873	
		12	793	932	871	
	5	Asbestos	8	792	919	830
			9	832	890	863
			10	870	935	908
			11	889	1003	954
			12	908	1042	998
Lac-Mégantic		8	769	866	810	
		9	816	866	844	
		10	855	922	885	
		11	853	991	914	
		12	910	1055	969	
Lennoxville		8	765	843	801	
		9	817	867	835	
		10	848	873	861	
		11	844	942	898	
		12	884	1023	947	
Sherbrooke	8	761	841	799		
	9	809	857	836		
	10	848	889	863		
	11	826	961	899		
	12	867	1058	949		

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er septembre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
5	Stanstead	8	857	929	891
		9	880	981	944
		10	902	1004	957
		11	915	1083	990
		12	958	1128	1037
7	Angers	8	626	730	679
		9	651	728	689
		10	659	714	689
		11	648	783	721
		12	653	799	727
	Lachute	8	692	836	771
		9	726	856	780
		10	698	829	772
		11	650	864	792
		12	669	874	795
	Maniwaki	8	553	663	606
		9	531	656	586
		10	514	680	598
		11	566	636	591
		12	552	638	591
Mont-Laurier	8	572	699	639	
	9	577	686	632	
	10	599	741	660	
	11	610	679	642	
	12	612	691	645	
Shawville	8	495	604	552	
	9	511	573	545	
	10	503	583	544	
	11	529	611	574	
	12	533	594	558	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er septembre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
7	Wakefield	8	562	660	618
		9	585	646	616
		10	598	651	630
		11	585	707	657
		12	595	702	650
8	Amos	8	556	627	579
		9	531	653	575
		10	536	656	580
		11	568	654	605
		12	555	697	618
	Val-d'Or	8	557	637	589
		9	539	651	576
		10	537	642	573
		11	562	627	593
		12	573	640	601
9	Baie-Comeau	8	726	783	748
		9	748	785	775
		10	718	887	798
		11	736	901	804
		12	767	936	822
11	Caplan	8	730	837	775
		9	787	837	817
		10	783	848	815
		11	773	875	827
		12	802	872	843
12	Disraeli	8	814	895	848
		9	870	895	882
		10	917	948	931
		11	891	1020	978
		12	957	1122	1037

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er septembre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
12	Montmagny	8	700	820	766
		9	756	822	795
		10	785	910	828
		11	782	915	836
		12	801	909	837
	Lac-Échemin	8	807	880	847
		9	859	903	884
		10	890	992	932
		11	902	1038	960
		12	966	1098	1023
	Saint-Éphrem-de-Beauce	8	687	799	749
		9	754	798	778
		10	777	875	823
		11	738	909	850
		12	800	1009	908
	Saint-Flavien	8	741	853	797
		9	785	858	825
		10	825	925	871
		11	798	975	896
		12	815	969	915
Saint-Prosper	8	699	754	735	
	9	741	778	761	
	10	782	842	809	
	11	751	901	834	
	12	808	981	885	
Saint-Théophile	8	678	767	727	
	9	725	761	742	
	10	755	803	780	
	11	715	854	803	
	12	790	916	842	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er septembre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
12	Scott	8	732	853	797
		9	787	849	830
		10	825	924	868
		11	836	959	895
		12	829	965	917
14	Berthierville	8	674	815	738
		9	695	796	750
		10	724	809	760
		11	677	820	767
		12	685	843	775
	L'Assomption	8	687	817	751
		9	700	811	755
		10	715	779	748
		11	660	799	741
		12	619	799	724
16	Farnham	8	737	877	804
		9	786	864	816
		10	774	851	822
		11	772	903	837
		12	748	899	825
	Fleury	8	696	812	741
		9	710	794	745
		10	704	786	751
		11	673	815	748
		12	639	822	738
	Saint-Hubert	8	705	836	765
		9	723	831	772
		10	708	792	752
		11	659	830	754
		12	646	823	735

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er septembre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
16	Saint-Hyacinthe	8	698	820	750
		9	714	799	755
		10	710	793	752
		11	686	811	756
		12	652	820	743
17	Daveluyville	8	692	797	732
		9	730	778	756
		10	741	809	783
		11	738	855	809
		12	763	869	826
	Drummondville	8	720	815	754
		9	749	788	767
		10	750	803	780
		11	736	820	793
		12	728	836	795
	Nicolet	8	656	794	712
		9	692	756	722
		10	680	770	729
		11	673	773	733
		12	672	770	728
Saint-Guillaume	8	696	832	748	
	9	731	780	753	
	10	712	804	762	
	11	698	791	759	
	12	682	797	757	
18	Coteau-du-Lac	8	661	807	734
		9	676	822	734
		10	644	778	714
		11	624	817	729
		12	652	812	722

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er septembre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
18	Huntingdon	8	643	831	734
		9	678	859	738
		10	640	800	708
		11	618	842	719
		12	636	827	711
	Saint-Anicet	8	640	819	728
		9	675	835	730
		10	643	767	701
		11	600	817	709
		12	609	809	699
	Sainte-Clotilde	8	664	804	734
		9	687	823	734
		10	662	772	709
		11	624	821	719
		12	621	812	703
	Sainte-Martine	8	673	808	744
		9	700	828	748
		10	675	780	722
		11	640	829	732
		12	631	822	715

Annexe 4. Accumulation d'eau pour la période 2041-2070

Tableau A4.1. Accumulations minimum, maximum et moyenne pour 8 scénarios climatiques sur la période 2041-2069, pour 52 sites, en fonction des périodes d'entreposage débutant le 1^{er} octobre, pour une période de retour de 10 ans

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1 ^{er} octobre (mois)	Accumulation			
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)	
1	Causapscal	7	657	698	677	
		8	679	745	706	
		9	679	743	710	
	La Pocatière	7	641	709	668	
		8	648	741	685	
		9	649	760	691	
	Mont-Joli	7	623	694	659	
		8	627	728	682	
		9	643	697	676	
	Trois-Pistoles	7	655	734	695	
		8	675	763	724	
		9	681	747	723	
	2	Bagotville	7	556	600	573
			8	556	608	573
			9	558	586	574
Hébertville		7	549	596	573	
		8	558	619	576	
		9	561	610	578	
Normandin		7	483	544	522	
		8	476	560	514	
		9	483	554	517	
Roberval		7	518	570	546	
		8	512	587	540	
		9	514	583	539	
Saint-Ambroise		7	563	611	584	
		8	568	633	591	
		9	583	624	599	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1 ^{er} octobre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
3	Québec	7	761	797	783
		8	790	819	804
		9	804	878	852
	Saint-Alban	7	701	766	731
		8	728	778	753
		9	739	821	783
	Sainte-Catherine-de-la- Jacques-Cartier	7	796	865	830
		8	828	877	855
		9	856	947	906
4	Lac-aux-Sables	7	687	767	724
		8	702	780	741
		9	720	800	763
	Sainte-Anne-de-la- Pérade	7	674	751	714
		8	701	756	731
		9	713	788	756
5	Asbestos	7	738	762	750
		8	774	794	782
		9	829	857	845
	Lac-Mégantic	7	723	780	760
		8	733	838	799
		9	785	888	846
	Lennoxville	7	697	744	725
		8	726	795	759
		9	768	848	810
	Sherbrooke	7	696	744	728
		8	721	794	761
		9	766	846	813
	Stanstead	7	769	832	801
		8	810	899	849
		9	855	970	904
7	Angers	7	617	665	643
		8	626	652	642
		9	628	694	652

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation			
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)	
7	Lachute	7	660	723	696	
		8	685	713	698	
		9	690	736	704	
	Maniwaki	7	534	607	583	
		8	526	606	576	
		9	510	596	559	
	Mont-Laurier	7	581	660	629	
		8	588	674	631	
		9	579	663	629	
	Shawville	7	523	581	554	
		8	515	566	539	
		9	486	558	523	
	Wakefield	7	579	628	607	
		8	571	609	597	
		9	564	639	599	
	8	Amos	7	491	558	519
			8	488	586	529
			9	507	583	532
Val-d'Or		7	496	578	535	
		8	489	591	537	
		9	507	576	535	
9	Baie-Comeau	7	643	737	692	
		8	682	787	730	
		9	726	782	746	
11	Caplan	7	625	765	698	
		8	679	819	736	
		9	701	815	744	
12	Disraeli	7	762	807	785	
		8	791	839	818	
		9	843	909	877	
	Montmagny	7	680	752	705	
		8	706	791	735	
		9	736	821	765	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation			
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)	
12	Lac-Etchemin	7	733	814	773	
		8	758	860	808	
		9	805	904	847	
	Saint-Éphrem-de-Beauce	7	679	735	707	
		8	692	774	736	
		9	734	830	779	
	Saint-Flavien	7	712	748	736	
		8	743	774	756	
		9	772	830	805	
	Saint-Prosper	7	635	718	676	
		8	648	761	709	
		9	687	806	744	
	Saint-Théophile	7	629	703	672	
		8	630	748	698	
		9	657	788	729	
	Scott	7	720	757	733	
		8	742	791	763	
		9	792	848	810	
	14	Berthierville	7	619	708	668
			8	657	709	682
			9	667	725	693
		L'Assomption	7	624	717	672
			8	652	698	674
			9	651	707	671
	16	Farnham	7	680	728	714
			8	716	747	729
			9	739	772	750
Fleury		7	616	693	667	
		8	657	689	678	
		9	678	699	687	
Saint-Hubert		7	639	720	683	
		8	661	696	681	
		9	655	692	671	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation			
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)	
16	Saint-Hyacinthe	7	627	704	678	
		8	673	697	689	
		9	688	702	695	
17	Daveluyville	7	638	692	674	
		8	678	698	690	
		9	697	735	720	
	Drummondville	7	642	703	684	
		8	686	706	699	
		9	708	730	720	
	Nicolet	7	586	662	634	
		8	624	654	642	
		9	629	672	648	
	Saint-Guillaume	7	613	690	666	
		8	657	684	676	
		9	677	693	686	
	18	Coteau-du-Lac	7	614	674	647
			8	620	649	638
			9	619	653	635
Huntingdon		7	622	657	637	
		8	602	652	625	
		9	592	642	612	
Saint-Anicet		7	614	656	638	
		8	608	646	627	
		9	593	634	612	
Sainte-Clotilde		7	620	659	639	
		8	609	656	635	
		9	603	648	630	
Sainte-Martine		7	632	679	655	
		8	627	666	652	
		9	622	658	645	

Tableau A4. 2. Accumulations minimum, maximum et moyenne pour 8 scénarios climatiques, sur la période 2041-2069, pour 52 sites, en fonction des périodes d'entreposage débutant le 1^{er} octobre, pour une période de retour de 25 ans

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation			
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)	
1	Causapscal	7	673	735	710	
		8	717	894	774	
		9	768	873	804	
	La Pocatière	7	697	760	738	
		8	711	829	772	
		9	713	889	793	
	Mont-Joli	7	655	759	708	
		8	652	873	766	
		9	686	858	792	
	Trois-Pistoles	7	715	802	754	
		8	735	880	819	
		9	771	886	848	
	2	Bagotville	7	573	679	631
			8	604	689	651
			9	626	712	666
Hébertville		7	586	671	618	
		8	606	704	643	
		9	608	709	660	
Normandin		7	508	620	562	
		8	511	647	564	
		9	549	644	590	
Roberval		7	541	685	597	
		8	557	714	607	
		9	554	715	617	
Saint-Ambroise		7	579	650	626	
		8	621	684	656	
		9	623	732	678	
3		Québec	7	856	882	874
			8	903	942	922
			9	951	1004	977

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation			
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)	
3	Saint-Alban	7	817	875	845	
		8	849	919	882	
		9	866	959	910	
	Sainte-Catherine-de-la- Jacques-Cartier	7	904	949	925	
		8	948	1002	978	
		9	979	1066	1037	
4	Lac-aux-Sables	7	785	872	829	
		8	793	917	863	
		9	813	940	892	
	Sainte-Anne-de-la- Pérade	7	780	842	820	
		8	802	881	851	
		9	818	913	872	
5	Asbestos	7	806	854	827	
		8	859	917	877	
		9	888	943	916	
	Lac-Mégantic	7	792	833	814	
		8	826	904	868	
		9	852	976	910	
	Lennoxville	7	776	800	790	
		8	824	878	840	
		9	849	908	879	
	Sherbrooke	7	776	817	795	
		8	826	892	846	
		9	843	909	882	
	Stanstead	7	841	880	861	
		8	890	971	926	
		9	937	1013	981	
	7	Angers	7	675	823	738
			8	664	805	731
			9	648	809	712
Lachute		7	728	913	796	
		8	734	882	793	
		9	747	866	786	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation		
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
7	Maniwaki	7	578	758	669
		8	557	725	658
		9	533	692	626
	Mont-Laurier	7	648	802	719
		8	631	799	718
		9	621	777	700
	Shawville	7	539	690	624
		8	519	684	613
		9	502	671	592
	Wakefield	7	591	770	687
		8	572	747	678
		9	564	758	659
8	Amos	7	543	635	580
		8	537	634	585
		9	545	663	602
	Val-d'Or	7	548	690	606
		8	552	654	603
		9	542	673	610
9	Baie-Comeau	7	695	802	744
		8	739	882	819
		9	805	902	871
11	Caplan	7	677	839	773
		8	756	919	827
		9	766	906	840
12	Disraeli	7	828	875	854
		8	863	943	901
		9	898	977	944
	Montmagny	7	727	821	784
		8	755	887	822
		9	776	942	855
	Lac-Etchemin	7	773	888	841
		8	807	981	892
		9	850	1027	929

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation			
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)	
12	Saint-Éphrem-de-Beauce	7	721	791	764	
		8	753	859	808	
		9	779	914	845	
	Saint-Flavien	7	805	820	815	
		8	830	884	853	
		9	865	916	889	
	Saint-Prosper	7	675	775	729	
		8	693	868	778	
		9	726	908	814	
	Saint-Théophile	7	677	769	725	
		8	694	848	766	
		9	701	890	800	
	Scott	7	778	841	810	
		8	804	909	854	
		9	848	951	900	
	14	Berthierville	7	695	849	758
			8	713	851	785
			9	714	856	793
L'Assomption		7	694	883	769	
		8	710	862	782	
		9	706	841	767	
16	Farnham	7	735	865	796	
		8	793	854	818	
		9	792	835	815	
	Fleury	7	698	823	756	
		8	722	815	778	
		9	737	805	774	
	Saint-Hubert	7	713	899	787	
		8	736	869	795	
		9	710	829	764	
	Saint-Hyacinthe	7	693	844	762	
		8	737	841	787	
		9	738	815	774	

Région	Municipalité	Période d'entreposage débutant le 1er octobre (mois)	Accumulation			
			Minimum (mm)	Maximum (mm)	Moyenne (mm)	
17	Daveluyville	7	724	761	749	
		8	760	801	775	
		9	779	805	793	
	Drummondville	7	734	813	767	
		8	781	808	791	
		9	764	806	789	
	Nicolet	7	675	760	716	
		8	702	754	732	
		9	709	749	730	
	Saint-Guillaume	7	699	807	752	
		8	734	800	772	
		9	738	783	763	
	18	Coteau-du-Lac	7	681	857	740
			8	701	821	737
			9	672	787	709
Huntingdon		7	677	817	720	
		8	674	781	714	
		9	647	743	692	
Saint-Anicet		7	676	824	723	
		8	669	782	713	
		9	646	750	692	
Sainte-Clotilde		7	675	821	729	
		8	684	805	738	
		9	656	778	714	
Sainte-Martine		7	696	839	748	
		8	713	823	758	
		9	680	793	729	

Annexe 5. Comparaison des accumulations passées et futures (analyse de covariance)

Tableau A5.1. Comparaison des périodes 1981-2009 et 2016-2044 (analyse de covariance)

Effet	Num DL	Den DL	F	Prob.
Période	1	102	9,09	0,0032
Année	1	2910	46,46	< 0,0001
Année * Période	1	2910	1,68	0,1945

Num DL: degrés de liberté au numérateur, Den DL: degrés de liberté au dénominateur, F: valeur de la statistique de F; Prob = probabilité observée du test de F.

Tableau A5.2. Comparaison des périodes 1981-2009 et 2041-2069 (analyse de covariance)

Effet	Num DL	Den DL	F	Prob.
Période	1	102	22,56	< 0,0001
Année	1	2 910	140,85	< 0,0001
Année * période	1	2 910	41,08	< 0,0001

Num DL: degrés de liberté au numérateur, Den DL: degrés de liberté au dénominateur, F: valeur de la statistique de F; Prob = probabilité observée du test de F.

Annexe 6. Guide technique (version préliminaire)

Introduction

Il y a deux aspects importants à considérer lors de la conception des structures d'entreposage de fumier : l'aspect technique (structure et construction) et le dimensionnement (le volume de fumier et de précipitations à entreposer). Un guide technique a été développé en lien avec le premier aspect (AIAQ, CRAAQ et IRDA, 2012) et deux documents spécifiques fournissent l'information pour le second. Le premier des deux documents sur le dimensionnement est une fiche technique sur la production journalière de déjections animales ; qui a été mise à jour récemment (IRDA, MAPAQ et AIAQ, 2012). Le second document, nécessaire au calcul des volumes, a pour titre : « Accumulation d'eau dans les installations d'entreposage des fumiers à ciel ouvert pour différentes municipalités au Québec en fonction de périodes de retour » (Joncas et al., 1993). Il sert à déterminer le volume d'eau de précipitations à considérer dans le calcul du dimensionnement des structures d'entreposage. Selon les modèles climatiques, le régime des précipitations et des températures dans le futur sera modifié. Les résultats de Joncas et al. (1993), directement influencés par ces variables météorologiques et basés sur la période 1961 à 1990, devaient donc être révisés. Le présent guide technique constitue la version mise à jour de ce document et tient compte des scénarios climatiques pour la période 2016-2044. Il a été élaboré dans le cadre d'un projet intitulé « Étude des volumes de précipitation et d'évaporation pour le calcul des structures d'entreposage de fumier dans un contexte de changements climatiques » (Godbout et al., 2013). Les coûts relatifs à ces travaux ont été assumés par Ouranos, qui a également généré et fourni les scénarios climatiques.

Hypothèses

Huit scénarios climatiques construits pour la période future 2016-2044, avec comme référence la période historique 1981-2009, ont été utilisés pour la conception de ce guide. Un scénario climatique décrit l'évolution de variables climatiques d'intérêt pour une application donnée (Grenier, 2013). Dans le cas présent, les variables quotidiennes produites sont les précipitations totales (liquides et solides, en mm jour⁻¹ ou en kg m⁻² jour⁻¹), ainsi que les températures minimales et maximales (en °C). Les séries temporelles ont été préparées pour un ensemble de points ayant les coordonnées (latitude et longitude) de 52 stations météorologiques du MDDEFP, réparties dans les différentes directions régionales du MAPAQ (figure 1).

Le modèle de Baier et Robertson, qui a été calibré pour le Québec par Rochette (1988), a été sélectionné pour calculer l'évaporation. Un facteur de 0,8 y a été appliqué pour tenir compte de la composition du liquide (du lisier plutôt que de l'eau), selon les résultats de l'étude de Lehoux (1994).

Des tests statistiques ont démontré que les valeurs d'accumulations moyennes présentées dans ce document, produites à partir de scénarios climatiques de la période 2016-2044, sont significativement supérieures à celles des années 1981-2009. Malgré cela, les accumulations calculées sont dans plusieurs cas plus faibles que dans l'ancien guide de Joncas et al. (1993). En effet, l'utilisation du

modèle de Baier et Robertson pour évaluer l'évaporation, en remplacement du modèle de Thornthwaite, a eu comme impact de hausser l'évaporation. Par conséquent, l'augmentation des accumulations d'eau liée aux changements climatiques est compensée par l'utilisation d'un nouveau modèle d'évapotranspiration.

Limites

Les accumulations minimales et maximales proposées dans ce document (tableaux 1, 2, 3 et 4) en fonction des périodes de retour de 10 ans et de 25 ans, et des différentes périodes d'entreposage, ont été calculées à partir des données climatiques d'un sous-ensemble des scénarios futurs plausibles pour les années 2016-2044. Ces deux valeurs sont ainsi présentées pour refléter la variabilité qui existe entre les scénarios produits, car l'erreur statistique ne peut pas être calculée en appliquant une formule théorique simple.

Comme les modèles climatiques ne sont pas parfaits, des corrections ont été appliquées aux données simulées à partir des observations aux stations météorologiques durant la période de référence 1981-2009. Le post-traitement choisi améliore du même coup la résolution : les résultats régionaux (45 km²) sont ramenés à l'échelle locale (le site de mesure). Les huit scénarios climatiques corrigés constituent une fenêtre d'éventualités, soit un ensemble de futurs plausibles. Il est important de savoir que ce sous-ensemble ne couvre pas toute la plage des éventualités; le climat pourrait potentiellement évoluer en dehors de cette fenêtre.

Utilisation des données fournies

Les valeurs d'accumulation d'eau présentées au tableau 1 (période de retour de 10 ans) et au tableau 2 (période de retour de 25 ans) couvrent les périodes d'entreposage d'octobre à avril (7 mois), d'octobre à mai (8 mois) et d'octobre à juin (9 mois). Les valeurs d'accumulation d'eau présentées au tableau 3 (période de retour de 10 ans) et au tableau 4 (période de retour de 25 ans) couvrent les périodes d'entreposage de septembre à avril (8 mois), de septembre à mai (9 mois) et de septembre à juin (10 mois). Les accumulations des périodes de 7 à 12 mois (débutant en octobre) et de 8 à 12 mois (débutant en septembre) sont présentées dans un rapport plus exhaustif (Godbout et al., 2013) afin d'offrir encore plus de flexibilité au concepteur. Il est de la responsabilité de l'ingénieur et de l'agronome de sélectionner une période d'entreposage en fonction de l'élevage et des cultures en présence chez chacun des producteurs. Des scénarios agronomiques pour la Beauce, la Montérégie et Lanaudière sont présentés dans le rapport de Godbout et al. (2013) comme piste de réflexion pour le concepteur.

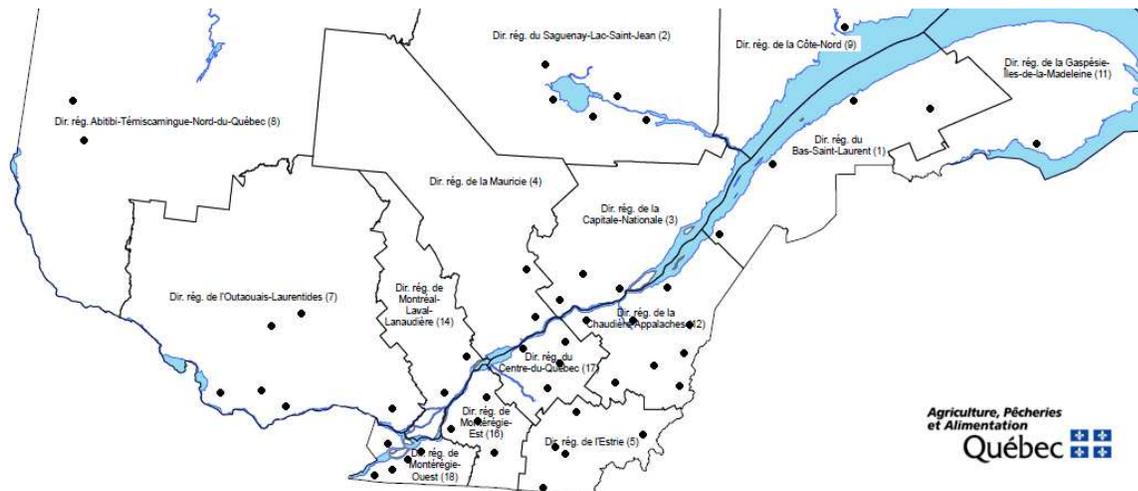


Figure 1. Emplacement des 52 stations météorologiques (adaptée de MAPAQ, 2011)

Valeurs de conception

Tableau 1. Accumulations minimales et maximales (mm) pour la période 2016-2044, pour 52 municipalités, selon des périodes d'entreposage débutant le 1er octobre et pour une période de retour de 10 ans

Région	Municipalité	Accumulations d'eau (mm)					
		7 mois		8 mois		9 mois	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	Causapscal	606	653	637	684	629	708
	La Pocatière	559	613	577	628	584	655
	Mont-Joli	570	637	606	647	600	673
	Trois-Pistoles	593	646	615	663	617	698
2	Bagotville	465	529	478	528	473	563
	Hébertville	470	508	471	510	453	542
	Normandin	438	473	412	481	409	498
	Roberval	448	492	434	500	422	502
	Saint-Ambroise	479	518	488	534	472	570
3	Québec	632	723	659	729	698	808
	Saint-Alban	603	676	628	685	659	760
	Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier	676	769	708	783	751	869
4	Lac-aux-Sables	616	682	630	688	655	752
	Sainte-Anne-de-la-Pérade	590	664	613	668	638	738
5	Asbestos	660	708	685	707	734	772
	Lac-Mégantic	664	721	679	755	713	815
	Lennoxville	644	679	672	699	697	744
	Sherbrooke	641	684	674	707	695	758
	Stanstead	721	788	753	811	784	867
7	Angers	530	592	533	585	552	579
	Lachute	591	668	607	646	611	655
	Maniwaki	471	533	462	522	464	516
	Mont-Laurier	513	572	511	567	522	585
	Shawville	429	512	429	484	426	470
	Wakefield	488	555	492	532	507	531
8	Amos	440	483	442	482	432	500
	Val-d'Or	460	484	456	481	444	497
9	Baie-Comeau	584	659	645	679	642	726
11	Caplan	626	724	656	747	658	754

Région	Municipalité	Accumulations d'eau (mm)					
		7 mois		8 mois		9 mois	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
12	Disraeli	673	719	704	753	748	807
	Montmagny	582	660	597	675	622	731
	Lac-Etchemin	643	735	660	762	700	789
	Saint-Ephrem-de-Beauce	583	647	595	671	625	716
	Saint-Flavien	613	680	625	690	656	753
	Saint-Prosper	557	643	568	665	600	690
	Saint-Théophile	565	642	573	668	603	707
	Scott	603	675	611	703	649	752
14	Berthierville	561	643	576	624	574	660
	L'Assomption	578	656	578	632	562	630
16	Farnham	635	668	631	664	646	679
	Fleury	572	639	584	622	572	650
	Saint-Hubert	597	652	599	633	584	621
	Saint-Hyacinthe	591	645	596	625	588	648
17	Daveluyville	574	634	593	626	607	678
	Drummondville	594	651	604	630	610	664
	Nicolet	541	602	554	581	549	620
	Saint-Guillaume	578	638	584	615	574	652
18	Coteau-du-Lac	568	630	580	616	573	603
	Huntingdon	567	635	580	624	558	600
	Saint-Anicet	558	626	570	615	552	592
	Sainte-Clotilde	565	602	574	599	567	582
	Sainte-Martine	574	615	579	610	576	594

Tableau 2. Accumulations minimales et maximales (mm) pour la période 2016-2044, pour 52 municipalités, selon des périodes d'entreposage débutant le 1er octobre et pour une période de retour de 25 ans

Région	Municipalité	Accumulation d'eau (mm)					
		7 mois		8 mois		9 mois	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	Causapscal	632	751	668	752	689	751
	La Pocatière	589	668	605	692	615	683
	Mont-Joli	596	708	627	703	630	728
	Trois-Pistoles	619	693	624	709	628	762
2	Bagotville	485	575	492	559	482	592
	Hébertville	501	549	501	538	472	576
	Normandin	458	514	433	512	440	538
	Roberval	482	528	467	525	450	548
	Saint-Ambroise	515	557	513	556	480	606
3	Québec	677	778	732	822	783	849
	Saint-Alban	656	734	697	766	742	806
	Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier	720	831	777	859	832	909
4	Lac-aux-Sables	657	739	699	733	736	784
	Sainte-Anne-de-la-Pérade	653	729	684	752	717	781
5	Asbestos	733	756	733	807	802	832
	Lac-Mégantic	680	811	719	817	733	864
	Lennoxville	702	771	689	805	742	835
	Sherbrooke	697	782	696	819	743	851
	Stanstead	771	875	776	929	826	959
7	Angers	577	661	597	670	608	654
	Lachute	654	798	659	805	634	768
	Maniwaki	480	576	501	575	504	597
	Mont-Laurier	510	615	546	607	563	642
	Shawville	462	541	495	543	482	557
	Wakefield	519	611	540	600	553	607
8	Amos	458	501	463	523	457	529
	Val-d'Or	483	513	492	507	477	539
9	Baie-Comeau	622	725	700	732	686	827
11	Caplan	657	752	728	806	699	829

Région	Municipalité	Accumulations d'eau (mm)					
		7 mois		8 mois		9 mois	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
12	Disraeli	750	787	760	821	819	870
	Montmagny	614	702	639	744	651	766
	Lac-Etchemin	670	797	717	826	765	846
	Saint-Ephrem-de-Beauce	627	708	651	731	683	779
	Saint-Flavien	663	762	674	768	709	805
	Saint-Prosper	577	724	621	719	659	754
	Saint-Théophile	584	739	611	712	641	750
	Scott	636	742	666	779	725	804
14	Berthierville	636	709	634	741	646	737
	L'Assomption	646	747	643	765	644	722
16	Farnham	708	769	683	810	704	783
	Fleury	656	721	653	753	655	738
	Saint-Hubert	688	773	671	791	647	742
	Saint-Hyacinthe	672	733	662	763	662	729
17	Daveluyville	646	703	643	723	686	739
	Drummondville	660	722	661	746	702	733
	Nicolet	621	661	619	682	634	685
	Saint-Guillaume	669	715	658	740	670	725
18	Coteau-du-Lac	649	773	630	777	622	722
	Huntingdon	630	778	626	792	614	729
	Saint-Anicet	627	766	620	774	600	706
	Sainte-Clotilde	640	744	629	760	615	700
	Sainte-Martine	655	753	645	770	624	714

Tableau 3. Accumulations minimales et maximales (mm) pour la période 2016-2044, pour 52 municipalités, selon des périodes d'entreposage débutant le 1er septembre et pour une période de retour de 10 ans

Région	Municipalité	Accumulations d'eau (mm)					
		8 mois		9 mois		10 mois	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	Causapscal	663	708	673	737	665	764
	La Pocatière	617	673	640	676	630	711
	Mont-Joli	609	688	636	702	626	734
	Trois-Pistoles	630	691	651	714	654	750
2	Bagotville	533	603	535	605	531	642
	Hébertville	548	587	537	596	528	623
	Normandin	479	539	468	547	455	565
	Roberval	501	548	487	547	477	566
	Saint-Ambroise	559	608	552	621	542	655
3	Québec	730	816	751	834	794	919
	Saint-Alban	699	763	710	789	739	867
	Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier	787	861	811	898	858	992
4	Lac-aux-Sables	684	749	698	768	724	843
	Sainte-Anne-de-la-Pérade	680	758	683	774	720	842
5	Asbestos	726	796	756	805	796	873
	Lac-Mégantic	727	781	760	811	776	869
	Lennoxville	699	753	733	758	752	805
	Sherbrooke	697	754	732	761	742	819
	Stanstead	777	836	820	871	855	933
7	Angers	572	653	572	634	590	651
	Lachute	641	720	659	716	657	732
	Maniwaki	498	613	487	587	492	580
	Mont-Laurier	541	646	538	634	558	644
	Shawville	455	563	454	541	450	522
	Wakefield	529	617	528	599	548	604
8	Amos	522	582	516	595	501	596
	Val-d'Or	537	575	525	578	518	586
9	Baie-Comeau	647	704	680	738	676	786
11	Caplan	678	755	714	783	703	798

Région	Municipalité	Accumulations d'eau (mm)					
		8 mois		9 mois		10 mois	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
12	Disraeli	741	812	762	827	803	906
	Montmagny	657	756	690	762	697	812
	Lac-Etchemin	730	811	760	835	783	874
	Saint-Ephrem-de-Beauce	638	715	652	735	684	796
	Saint-Flavien	685	780	692	788	731	862
	Saint-Prosper	625	707	654	729	679	756
	Saint-Théophile	632	693	647	716	668	754
	Scott	664	765	686	780	720	842
14	Berthierville	619	689	627	689	616	734
	L'Assomption	618	689	625	679	600	701
16	Farnham	677	736	677	732	690	763
	Fleury	619	679	608	668	624	710
	Saint-Hubert	631	690	637	674	625	675
	Saint-Hyacinthe	630	691	619	678	631	704
17	Daveluyville	636	707	639	715	663	772
	Drummondville	647	712	642	705	664	739
	Nicolet	602	672	600	675	594	712
	Saint-Guillaume	631	695	625	684	625	722
18	Coteau-du-Lac	611	678	603	662	605	671
	Huntingdon	607	707	603	698	593	667
	Saint-Anicet	603	695	597	683	592	669
	Sainte-Clotilde	602	664	601	658	596	676
	Sainte-Martine	616	668	613	666	609	678

Tableau 4. Accumulations minimales et maximales (mm) pour la période 2016-2044, pour 52 municipalités, selon des périodes d'entreposage débutant le 1er septembre et pour une période de retour de 25 ans

Région	Municipalité	Accumulations d'eau (mm)					
		8 mois		9 mois		10 mois	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	Causapscal	692	778	730	777	764	806
	La Pocatière	653	738	677	728	672	767
	Mont-Joli	647	741	696	737	675	771
	Trois-Pistoles	646	742	711	754	700	816
2	Bagotville	575	667	557	648	550	706
	Hébertville	556	638	536	650	557	701
	Normandin	510	589	494	605	479	633
	Roberval	522	597	495	603	513	637
	Saint-Ambroise	575	657	562	674	572	729
3	Québec	813	875	867	883	888	971
	Saint-Alban	746	848	790	835	810	933
	Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier	860	932	912	944	929	1047
4	Lac-aux-Sables	733	844	777	859	772	928
	Sainte-Anne-de-la-Pérade	727	845	785	821	801	888
5	Asbestos	792	919	832	890	870	935
	Lac-Mégantic	769	866	816	866	855	922
	Lennoxville	765	843	817	867	848	873
	Sherbrooke	761	841	809	857	848	889
	Stanstead	857	929	880	981	902	1004
7	Angers	626	730	651	728	659	714
	Lachute	692	836	726	856	698	829
	Maniwaki	553	663	531	656	514	680
	Mont-Laurier	572	699	577	686	599	741
	Shawville	495	604	511	573	503	583
	Wakefield	562	660	585	646	598	651
8	Amos	556	627	531	653	536	656
	Val-d'Or	557	637	539	651	537	642
9	Baie-Comeau	726	783	748	785	718	887
11	Caplan	730	837	787	837	783	848

Région	Municipalité	Accumulations d'eau (mm)					
		8 mois		9 mois		10 mois	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
12	Disraeli	814	895	870	895	917	948
	Montmagny	700	820	756	822	785	910
	Lac-Etchemin	807	880	859	903	890	992
	Saint-Ephrem-de-Beauce	687	799	754	798	777	875
	Saint-Flavien	741	853	785	858	825	925
	Saint-Prosper	699	754	741	778	782	842
	Saint-Théophile	678	767	725	761	755	803
	Scott	732	853	787	849	825	924
14	Berthierville	674	815	695	796	724	809
	L'Assomption	687	817	700	811	715	779
16	Farnham	737	877	786	864	774	851
	Fleury	696	812	710	794	704	786
	Saint-Hubert	705	836	723	831	708	792
	Saint-Hyacinthe	698	820	714	799	710	793
17	Daveluyville	692	797	730	778	741	809
	Drummondville	720	815	749	788	750	803
	Nicolet	656	794	692	756	680	770
	Saint-Guillaume	696	832	731	780	712	804
18	Coteau-du-Lac	661	807	676	822	644	778
	Huntingdon	643	831	678	859	640	800
	Saint-Anicet	640	819	675	835	643	767
	Sainte-Clotilde	664	804	687	823	662	772
	Sainte-Martine	673	808	700	828	675	780

Conclusion

Plusieurs structures d'entreposage des fumiers et des lisiers ne sont pas couvertes et reçoivent librement les eaux provenant des précipitations de pluie ou de neige. Ces apports supplémentaires d'eau doivent être pris en considération par le concepteur de ces ouvrages. Le présent guide constitue une mise à jour du précédent préparé par Joncas et al. (1993) et tient compte des changements climatiques en cours.

Les accumulations d'eau proposées dans ce guide prennent en considération la variabilité (bornes inférieure (min) et supérieure (max)) provenant des modèles climatiques. Les scénarios climatiques ont été construits pour la période 2016-2044, avec comme référence la période 1981-2009. Lors de l'utilisation de ces données, il faut garder en tête que la plage de valeurs présentées ne couvre pas tous les futurs possibles. Le climat pourrait prendre une trajectoire au-dessus ou en-dessous de des bornes indiquées.

Les valeurs fournies dans ce guide tiennent compte indirectement de la variabilité naturelle du climat. En effet, les accumulations extrêmes ont été estimées pour des périodes de retour de 10 et 25 ans.

Pour faciliter l'application des résultats à la réalité opérationnelle, différentes périodes d'entreposage ont été considérées : d'octobre à avril (7 mois), d'octobre à mai (8 mois) d'octobre à juin (9 mois), de septembre à avril (8 mois), de septembre à mai (9 mois) et de septembre à juin (10 mois). Il est de la responsabilité de l'ingénieur et de l'agronome de sélectionner une période d'entreposage en fonction de l'élevage et du type de culture en présence chez chacun des producteurs.

L'analyse économique a révélé que la construction d'un ouvrage d'entreposage pouvant contenir les accumulations ayant une récurrence de 25 ans, comparativement à 10 ans, augmenterait les coûts de construction de moins de 2 % du coût total de construction. Il est donc recommandé au concepteur de considérer les valeurs associées à la période de retour de 25 ans.

Il faut noter qu'en plus de l'évaporation et des précipitations, divers facteurs peuvent affecter les accumulations d'eau dans une structure d'entreposage. Par exemple, la présence de bâtiments ou autres obstacles près de la structure d'entreposage, ayant un effet brise-vent, pourrait influencer considérablement l'accumulation de neige. Des vents dominant peuvent aussi influencer les apports de pluie et de neige. Ainsi, un facteur de sécurité spécifié dans le Guide technique d'entreposage des fumiers (AIAQ, CRAAQ et IRDA, 2012), de l'ordre de 100 à 300 mm, doit obligatoirement être appliqué afin de s'assurer du non-débordement de la structure d'entreposage.

Tous les résultats présentés dans le présent guide se retrouvent dans le rapport de Godbout et al. (2013) téléchargeable sur le site d'Ouranos (www.ouranos.ca).

Références

- AIAQ, CRAAQ et IRDA. 2012. L'entreposage des fumiers (3^e édition). Guide technique. 50 pages.
- Godbout, S., P. Brassard, F. Pelletier, M. Grenier, P. Grenier, L. Belzile, C. Landry, F. Bolduc, O. Benslimane et D. Bilodeau. 2013. Étude des volumes de précipitation et d'évaporation pour le calcul des structures d'entreposage de fumier dans un contexte de changements climatiques. Rapport final. IRDA. 150 pages.
- Grenier, P. 2013. Étude des volumes de précipitations et d'évaporation pour le calcul des structures d'entreposage de fumier dans un contexte de changements climatiques. Rapport interne sur les données climatiques fournies dans le cadre du projet. Ouranos. 27 pages.
- IRDA, MAPAQ et AIAQ. 2012. Déjections animales - Production 2012. Fiche synthèse, 2 p.
- Joncas, R., J. Champagne et G. Jacques. 1993. Accumulation d'eau dans les installations d'Entreposage des fumiers à ciel ouvert pour différentes municipalités au Québec en fonction de périodes de retour. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec, Canada.
- Lehoux, N. 1994. L'évaporation du lisier et fumier pour quelques sites au Québec. Mémoire de maîtrise. Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation. Département de génie rural. Université Laval. 72 pages.
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). 2011. Directions régionales, Québec.
- Rochette P. 1988. Contribution au zonage agroclimatique du Québec méridional. Thèse de doctorat. Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation. Département de phytologie. Université Laval. 272 pages.

Annexe 7. Démonstration mathématique du calcul de la valeur nette actualisée (VAN)

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1 + a)^t} = 0$$

où VAN = valeur actualisée nette

$$VAN = \sum_{t=0}^5 \frac{B_t - C_t}{(1 + a)^t} = 0$$

Pour une perspective de 5 ans

$$0 = \frac{B_0 - C_0}{(1 + a)^0} + \frac{B_1 - C_1}{(1 + a)^1} + \frac{B_2 - C_2}{(1 + a)^2} + \frac{B_3 - C_3}{(1 + a)^3} + \frac{B_4 - C_4}{(1 + a)^4} + \frac{B_5 - C_5}{(1 + a)^5}$$

$$0 = \frac{0 - c_{i0}}{(1 + a)^0} + \frac{0 - c_{j1}}{(1 + a)^1} + \frac{0 - c_{j2}}{(1 + a)^2} + \frac{0 - c_{j3}}{(1 + a)^3} + \frac{0 - c_{j4}}{(1 + a)^4} + \frac{0 - c_{j5}}{(1 + a)^5}$$

où, c_{i0} = le coût d'investissement supplémentaire dans la structure d'entreposage au début de la période.

$c_{j1}, c_{j2}, c_{j3}, c_{j4} = 0$, les coûts d'épandage supplémentaires aux périodes 1 à 4.

$c_{j5} > 0$, le coût d'épandage supplémentaire à la période 5.

$$-\left(\frac{0 - c_{i0}}{(1 + a)^0}\right) = \frac{0 - c_{j5}}{(1 + a)^5}$$

$$\frac{c_{i0}}{(1 + a)^0} = \frac{-c_{j5}}{(1 + a)^5}$$

$$c_{j5} = -\left(\frac{c_{i0}}{(1 + a)^0} \times ((1 + a)^5)\right)$$

$$c_{j5} = -(c_{i0} * (1 + a)^5)$$