

**Étude environnementale des systèmes
d'enclos d'hivernage de vaches-veaux :
modélisation des mouvements d'eau afin
d'optimiser le dimensionnement des
infrastructures**

Rapport final

Rapport présenté au :
Ministère du Développement Durable, de
l'Environnement et des Parcs du Québec



Institut de recherche
et de développement
en agroenvironnement

Projet IRDA # : 100043

Par :

Sébastien Fournel, ing. jr, M.Sc. et agr.,
étudiant gradué
Frédéric Pelletier, ing., M.Sc.
Stéphane Godbout, ing., P.Eng., Ph.D., agr.
Patrick Brassard, ing. jr,
étudiant gradué

16 mars 2012

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) est une corporation de recherche à but non lucratif, constituée en mars 1998 par quatre membres fondateurs soit le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) et le ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation (MDEIE).



Notre mission

L'IRDA a pour mission de réaliser des activités d'acquisition de connaissances, de recherche, de développement et de transfert visant à favoriser le développement durable de l'agriculture.

Pour en savoir plus

www.irda.qc.ca

Le rapport peut être cité comme suit :

Fournel, S., F. Pelletier, S. Godbout et P. Brassard. 2012. Étude environnementale des systèmes d'enclos d'hivernage de vaches-veaux : modélisation des mouvements d'eau afin d'optimiser le dimensionnement des infrastructures. Rapport final. IRDA. 33 pages.

**Étude environnementale des systèmes d'enclos
d'hivernage de vaches-veaux : modélisation des
mouvements d'eau afin d'optimiser le
dimensionnement des infrastructures**

Rapport final

Présenté au :

Ministère du Développement durable,
de l'Environnement et des Parcs du Québec
Direction des politiques en milieu terrestre
Édifice Marie-Guyart, 9e étage, boîte 71
675 boulevard René-Lévesque Est
Québec (Québec) G1R 5V7

Préparé par :

Copie originale signée

Sébastien Fournel, ing. jr, M.Sc. et agr.,
étudiant gradué
Université Laval / IRDA

Copie originale signée

Stéphane Godbout, ing., P.Eng., Ph.D. et agr.
IRDA

Copie originale signée

Frédéric Pelletier, ing., M.Sc.
IRDA

Copie originale signée

Patrick Brassard, ing. jr,
étudiant gradué
Université Laval / IRDA

16 mars 2012

Équipe de réalisation du projet :

Répondant et responsable
scientifique :

Stéphane Godbout, ing., P.Eng., Ph.D., et agr.,
IRDA

Chargé de projet :

Frédéric Pelletier, ing. M.Sc.

Collaborateurs :

Sébastien Fournel, ing. jr, M.Sc. et agr., étudiant
gradué, Université Laval / IRDA
Patrick Brassard, ing. jr, étudiant gradué,
Université Laval / IRDA

Les lecteurs qui souhaitent commenter ce rapport peuvent s'adresser à :

Stéphane Godbout
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)
2700, rue Einstein
Québec (Québec) G1P 3W8

Téléphone : 418 646-1075
Télécopie : 418 644-6855
Courriel : stephane.godbout@irda.qc.ca

Remerciements :

Les auteurs remercient le ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec pour le soutien financier à ce projet. Des remerciements sont aussi adressés au Dr Robert Lagacé pour son appui et ses connaissances.

Résumé

Une étude précédente effectuée sur une période de cinq hivers a démontré que la combinaison enclos d'hivernage et bande de végétation filtrante nécessite des modifications dans le but de réduire les pertes dans l'environnement. L'analyse des résultats a permis de constater que pour les enclos d'hivernage, plus de 70 % du volume annuel d'eau de ruissellement s'écoulait durant les mois de mars, avril et, mai avec plus de 80 % des charges annuelles d'éléments fertilisants analysés (N-NH₄, N-NO₃, N_{total} et P).

Un nouveau concept d'enclos d'hivernage visant à éliminer les rejets d'eau contaminée est présentement en développement. Ce nouveau concept prévoit une aire d'alimentation bétonnée couverte avec une aire d'exercice adjacente. Le concept inclut un bassin de sédimentation permettant de récolter les eaux de ruissellement de l'aire d'exercice et une bande végétative filtrante. Une analyse préliminaire a démontré que la construction d'un bassin de sédimentation à la sortie de l'aire d'exercice permettant de capter tout le volume d'eau de ruissellement produit par la fonte des neiges au printemps n'est pas économiquement viable.

Afin d'optimiser la conception du bassin, un modèle mathématique a été développé pour estimer les volumes d'eau à gérer dans le nouveau concept d'enclos d'hivernage. Le modèle prend en compte la température, les précipitations liquides et solides, l'évaporation, la neige au sol, le taux de fonte des neiges, l'infiltration et le ruissellement. Les données recueillies au cours des cinq hivers de l'étude précédente ont été utilisées pour fixer les paramètres du modèle. Différents scénarios de gestion de l'eau de ruissellement ont été étudiés à l'aide du modèle.

Considérant les résultats obtenus, il n'est pas nécessaire de concevoir un bassin de sédimentation permettant d'entreposer la totalité du volume d'eaux de ruissellement produit par la fonte de la neige. L'analyse des résultats démontre qu'il est possible de réduire le volume du bassin de sédimentation tout en minimisant les risques pour l'environnement et les coûts de construction.

Puisque le modèle a été développé à partir des résultats de projets antérieurs, les résultats obtenus avec ce dernier s'appliquent seulement pour le site de Deschambault. Une validation sera nécessaire pour appliquer le modèle sur d'autres fermes où différentes caractéristiques de site et des troupeaux plus importants peuvent être retrouvés.

Table des matières

Résumé.....	v
Table des matières.....	vi
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures	viii
1 Introduction et mise en contexte.....	9
2 But et objectifs du projet.....	11
2.1 But du projet	11
2.2 Objectifs du projet.....	11
3 Revue de littérature.....	12
4 Études préliminaires.....	14
4.1 Choix du modèle à utiliser	14
4.2 Essai de modélisation avec le logiciel CEQUEAU	14
4.3 Création d'un calculateur.....	16
5 Méthodologie.....	17
5.1 Développement du calculateur.....	17
5.2 Calibration et validation.....	19
6 Modélisation de la fonte des neiges sur l'enclos d'hivernage	21
6.1 Précipitations normales.....	21
6.2 Résultats de simulation 2007-2008.....	23
6.3 Analyse des volumes de ruissellement d'avril 2000 à 2008	25
6.4 Discussion et définition de scénarios.....	27
6.5 Méthode de calcul simplifiée des volumes de bassin	28
6.6 Méthode de calcul de la surface de la BVF	29
7 Conclusion	31
8 Références.....	32

Liste des tableaux

Tableau 1.	Liste des modèles de fonte des neiges (tiré de USACE, 1998)	13
Tableau 2.	Rapport du volume d'eau de ruissellement sur le volume d'eau de précipitation pour les enclos d'hivernage et les bandes végétatives filtrantes (valeurs moyennes pour les quatre années du projet) (tiré de Pelletier et al., 2008)	20
Tableau 3.	Volumes de ruissellement mesuré et modélisé pour 1999-2003	20
Tableau 4.	Précipitations de novembre à mai (1978-2008) pour la station de Deschambault.....	22
Tableau 5.	Ruissellement entre le 16 et le 28 avril 2008.....	24
Tableau 6.	Ruissellement (m ³) entre le 28 mars et le 29 avril de chaque année durant la période 2000-2008	26
Tableau 7.	Volumes de bassin possible selon les divers scénarios établis	28
Tableau 8.	Proportion du ruissellement par rapport aux précipitations totales établie par le calculateur pour les années 1999-2008	29

Liste des figures

Figure 1.	Schéma du mouvement de l'eau à modéliser dans le système d'enclos d'hivernage de vaches-veaux.....	10
Figure 2.	Fenêtre de projet du modèle CEQUEAU.....	15
Figure 3.	Fonction de production du logiciel CEQUEAU	16
Figure 4.	Tableau des données météorologiques à insérer dans le modèle (capture d'écran provenant du ordinateur).....	18
Figure 5.	Tableau des paramètres spatiotemporels, thermiques et hydrologiques à fixer pour le modèle (capture d'écran provenant du ordinateur)	19
Figure 6.	Résultats de simulation obtenus par le ordinateur pour les eaux évaporées, infiltrées et ruisselées (capture d'écran provenant du ordinateur).....	19
Figure 7.	Résultats de la simulation 2007-2008 et dimensionnement du bassin (capture d'écran provenant du ordinateur).....	23

1 Introduction et mise en contexte

En production de veaux d'embouche, les animaux sont habituellement logés au pâturage. Toutefois, afin de faciliter l'alimentation et la surveillance au cours de la période hivernale, ils sont restreints à une surface réduite appelée « aire d'hivernage ». Comme toute autre pratique agricole, elle est soumise à une réglementation environnementale concernant les écoulements dans le milieu, principalement par le biais de l'article 18 du Règlement sur les exploitations agricoles (REA; MDDEP, 2012). Celui-ci stipule que les eaux contaminées provenant d'une cour d'exercice ne doivent pas atteindre les eaux de surface.

Afin de respecter cette réglementation, les intervenants du milieu, en collaboration avec la Fédération des productions de bovins du Québec (FPBQ), ont produit un document intitulé « Guide de bonnes pratiques agroenvironnementales pour la gestion des fumiers des bovins de boucherie » (FPBQ et al., 1999). Ce dernier suggère des aménagements particuliers pour l'enclos d'hivernage, l'aire occupée par les animaux, et un concept de bande végétative filtrante (BVF) pour éliminer les rejets dans l'environnement au cours de l'hiver et lors des événements de dégel au printemps. Suivant la parution de ce guide, un projet intitulé « Étude environnementale des enclos d'hivernage de vaches-veaux » (Pelletier et al., 2004) a été réalisé par l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). Cette étude avait pour objectifs 1) de comparer l'efficacité agroenvironnementale de quatre types d'aménagements d'enclos d'hivernage de vaches-veaux combinés à une BVF, tels que proposés par le Guide, et 2) de vérifier si les rejets dans l'environnement respectaient la nouvelle réglementation du REA. Une analyse approfondie des résultats obtenus (Pelletier et al., 2008) a démontré que l'aménagement actuel proposé par le Guide n'était pas en mesure de satisfaire l'article 18 du REA (MDDEP, 2012).

En 2010, Fournel et al. ont élaboré un concept théorique visant à éliminer les rejets d'eau contaminée. Ce nouveau concept prévoyait une aire d'alimentation bétonnée couverte par un bâtiment à toit mono-pente et conçue avec une aire d'exercice sans membrane. Également, ce concept incluait un bassin de sédimentation et une bande végétative filtrante. L'un des éléments clefs était le volume d'eau à gérer qui affectait directement le dimensionnement du bassin et de la bande. Afin de réduire entre autres le volume du bassin, les mêmes auteurs suggéraient une réduction de la superficie de l'aire d'exercice (basée sur la littérature) et une toiture sur l'aire d'alimentation. Comme le démontrait Fournel et al. (2010), le concept était excessivement sensible à la quantité d'eau à gérer au printemps lors de la fonte des neiges.

De plus, le concept incluait un puits de pompage positionné en aval de la BVF. Le puits de pompage avait pour but de réacheminer l'eau de ruissellement vers le bassin de sédimentation lorsque la BVF n'était pas en mesure d'absorber l'eau.

Par conséquent, il serait pertinent de réaliser une étude exhaustive du mouvement de l'eau dans le système d'hivernage afin d'être en mesure de dimensionner adéquatement l'ensemble des infrastructures et, par le même biais, de réduire les coûts.

La figure 1 présente le schéma du mouvement de l'eau à modéliser dans le système d'enclos d'hivernage de vaches-veaux. L'eau provenant de l'aire d'alimentation n'est pas

incluse dans l'analyse puisque cette dernière est couverte et que le fumier produit est géré de façon conventionnelle (entreposage dans une structure étanche et épandage au champ).

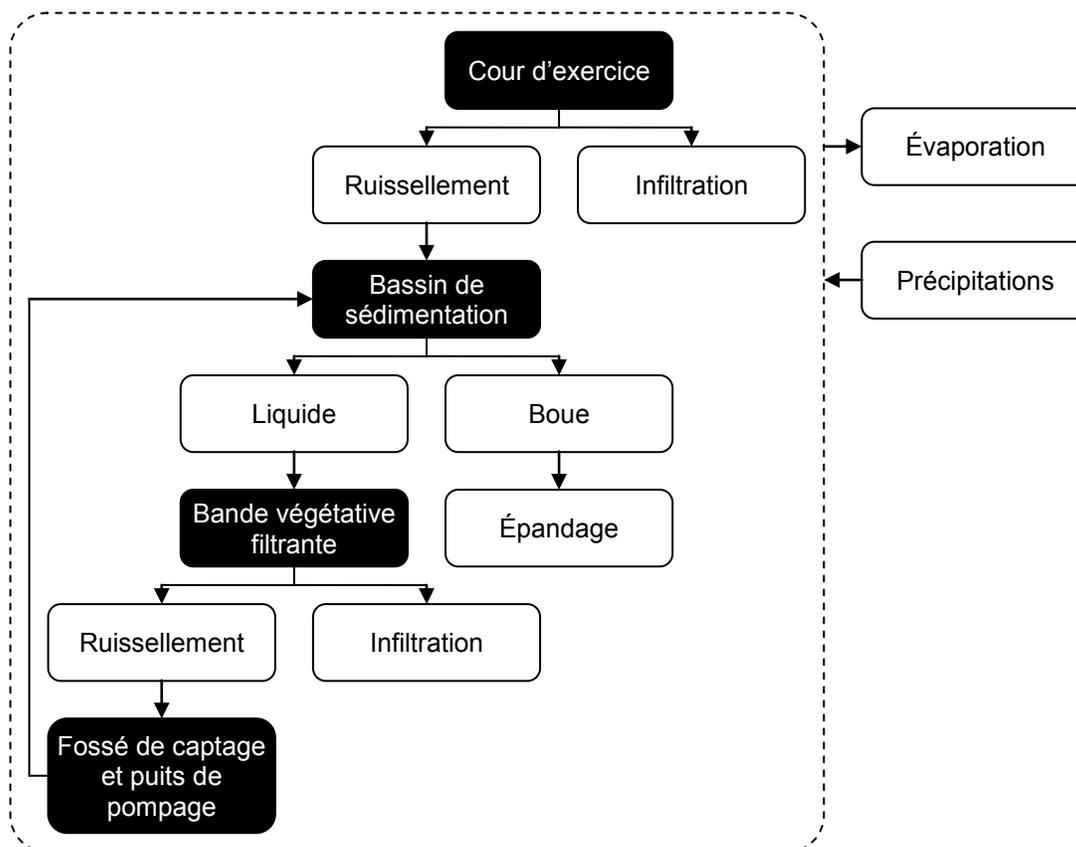


Figure 1. Schéma du mouvement de l'eau à modéliser dans le système d'enclos d'hivernage de vaches-veaux

2 But et objectifs du projet

2.1 But du projet

Le but du projet proposé est de fournir une méthode simplifiée de calcul pour évaluer précisément les volumes d'eau à gérer dans un système d'enclos d'hivernage de vaches-veaux.

2.2 Objectifs du projet

Les objectifs spécifiques associés au projet sont les suivants:

1. Réaliser une revue de littérature afin d'établir les modèles de simulation existants;
2. Modéliser le mouvement de l'eau dans le système d'enclos d'hivernage en fonction du temps et des données météorologiques disponibles;
3. Valider le modèle développé avec les données des projets antérieurs;
4. Proposer une méthode de calcul pour estimer les dimensions du bassin de sédimentation et de la BVF;
5. Développer des scénarios de gestion permettant de réduire le coût des infrastructures (bassins de sédimentation, BVF, etc.).

3 Revue de littérature

Depuis les années 1950, maints efforts ont été entrepris à travers le monde pour tenter de décrire les mouvements d'eau (USACE, 1998). Avec l'avènement de l'ordinateur, les premiers modèles hydrologiques informatisés ont vu le jour au milieu des années 1960. Ces premiers modèles dits globaux simulaient des débits pour des bassins considérés comme des tous non subdivisés. Les modèles suivants ont alors rapidement intégré la variabilité des phénomènes hydrologiques existant à l'intérieur des bassins. En même temps, d'autres modèles plutôt axés sur la caractérisation physique des bassins ont aussi été développés (Fortin et al., 1995).

Parmi la vaste gamme des modèles hydrologiques, certains ont été établis spécialement pour l'évaluation des flux d'eau lors de la fonte des neiges. Cette période printanière a été ciblée par Pelletier et al. (2008) comme étant critique en regard des apports d'eau à la BVF. Ce type de modèle serait donc plus approprié dans le cadre des aires d'hivernage.

Le *Snow Hydrology Guide* du ministère des Richesses Naturelles de l'Ontario (1989) et l'Organisation météorologique mondiale (WMO, 1986) ont listé les principaux modèles de fonte des neiges (tableau 1). Ces modèles ont surtout été développés en Amérique du Nord (Canada et États-Unis) et en Europe (Suède, Suisse, Allemagne, Pologne, Danemark et anciennes URSS et Tchécoslovaquie) par des organisations provenant de différents champs de pratique : météorologique, hydrologique, forestier, agricole, géologique, etc.

Ces outils de prédiction se différencient notamment sur le plan des caractéristiques d'utilisation et des paramètres considérés lors de la modélisation. En effet, certains modèles ne fonctionnent que pour des événements isolés, alors que d'autres simulent en continu pour des périodes à court ou long terme. De plus, certains paramètres tels l'élévation, les pourcentages de forêt et de clairière, le déficit calorifique, le stockage de l'eau, la densité de la neige, la radiation solaire ou le pourcentage des surfaces imperméables ne sont pas pris en compte par tous les modèles (USACE, 1998). En conséquence, plusieurs facteurs doivent être pris en considération pour effectuer un choix judicieux de modèle.

Tableau 1. Liste des modèles de fonte des neiges (tiré de USACE, 1998)

Nom du modèle	Pays d'origine	Référence
Point Energy/Mass Balance Model	États-Unis	Anderson (1976)
HSP-F (Hydrologic Simulation Program-Fortran)	États-Unis	Johanson et al. (1984)
NWSRFS (National Weather Service River Forecast System)	États-Unis	Anderson (1973)
SSARR (Streamflow Simulation and Reservoir Regulation)	États-Unis	USACE (1991)
HEC-1 (Hydrologic Engineering Center-1)	États-Unis	USACE (1990)
USDAHL-74 (Revised Model of Watershed Hydrology)	États-Unis	WMO (1986)
SCS (SCS Snowmelt Model)	États-Unis	WMO (1986)
SWMM (Storm Water Management Model)	États-Unis	WMO (1986)
USGS (U.S. Geological Survey Model)	États-Unis	WMO (1986)
SIMFLO (Continuous Streamflow Simulation Model)	Canada	Bishop and Watt (1975)
GAWSER (Guelph Agricultural Watershed Storm- Event Runoff Model)	Canada	Ghate and Whiteley (1977)
MOEHYDRO2 (Comprehensive Watershed Model)	Canada	Logan (1976)
WRB (Water Resources Branch Model)	Canada	Kite (1978)
UBC (University of British Columbia Watershed Model)	Canada	Quick and Pipes (1977)
QFORECAST (Continuous Simulation and Real-Time Forecast Model)	Canada	WMO (1986)
SRM (Snowmelt Runoff Model)	Suisse	Martinec (1975)
HBV (Conceptual Runoff Model for Swedish Catchments)	Suède	Bergström (1975)
SHE (Systems Hydrologique European Snow Model)	France	Morris and Godfrey (1978)
CEQUEAU	Canada	WMO (1986)
ERM (Empirical Regressive Model)	Tchécoslovaquie	WMO (1986)
NEDBOR-AFSSSTROMNINGSMODEL (Rainfall -Runoff Model v. II)	Danemark	WMO (1986)
TANK (Tank Model with Snow Model)	Japon	WMO (1986)
IHDM (Institute of Hydrology Distributed Model)	Royaume-Uni	Morris (1983)
PRMS (Precipitation-Runoff Modeling System)	États-Unis	Leavesley et al. (1983)
YETI	Tchécoslovaquie	WMO (1986)
SCHNEE	Allemagne	WMO (1986)
WSRM (Winter Season Runoff Model)	Pologne	WMO (1986)
HRO (Hydro Resources Optimization)	États-Unis	WMO (1986)
GMTs-1 (Model of Snowmelt Formation of Lowland Rivers)	URSS	WMO (1986)
GMTs-2 (Model of Snowmelt Formation in a Mountainous Basin)	URSS	WMO (1986)
GMTs-3 (Model of Snowmelt Rainfall Runoff Formation)	URSS	WMO (1986)

4 Études préliminaires

4.1 Choix du modèle à utiliser

Dans le cadre du présent projet sur la modélisation des mouvements d'eau d'une aire d'hivernage située sur le territoire québécois, le choix d'un modèle ayant été conçu et validé au Québec serait davantage approprié. C'est pourquoi, parmi les modèles canadiens présentés au tableau 1, l'outil CEQUEAU fut ciblé étant donné que son développement s'est effectué à l'Institut national de recherche scientifique secteur eau, terre et environnement (INRS-ETE) de Québec.

Depuis sa création en 1971, le modèle CEQUEAU a été appliqué non seulement à plus de soixante rivières du Québec, mais aussi à quelques bassins du Canada, de l'Europe et de l'Afrique. Par ailleurs, lors de l'intercomparaison de divers modèles hydrologiques portant sur la fonte de neige parrainée par l'Organisation météorologique mondiale (WMO, 1986), l'outil CEQUEAU fut l'un des onze modèles testés sur six rivières de six pays différents. Aujourd'hui, il est utilisé quotidiennement par quelques organismes québécois pour la prévision de débits en temps réel (INRS-ETE, 2000), en plus d'avoir été testé par l'équipe du D^r Aubert Michaud de l'IRDA lors d'un précédent projet (Drouin et al., 2012). Le choix de ce modèle devenait donc incontournable vu sa disponibilité à l'IRDA.

4.2 Essai de modélisation avec le logiciel CEQUEAU

Le modèle hydrologique CEQUEAU est un modèle déterministe matriciel à bilan de type conceptuel avec des paramètres distribués. Il prend en compte les caractéristiques physiques du bassin versant ainsi que leurs variations dans l'espace et dans le temps. Pour ce faire, il découpe le bassin versant en « carreaux entiers » et en « carreaux partiels ». Ces surfaces élémentaires permettent d'attribuer des caractéristiques physiographiques comme le couvert végétal ou le réseau de drainage à une partie définie du bassin (INRS-ETE, 2000).

Après avoir enregistré dans CEQUEAU (figure 2) les données physiques de l'enclos comme petit bassin versant et les données météorologiques pour Deschambault, plusieurs problèmes sont ressortis. D'abord, CEQUEAU – comme la majorité des autres modèles hydrologiques – a été développé à l'échelle du bassin versant (surface de 1 à 1000 km²) pour prédire le débit de rivières en certains points. Or, l'enclos d'hivernage ne correspond en rien à ces standards.

Par ailleurs, avant d'effectuer une simulation, le modèle requiert un calage basé sur la prise de mesures de débit à l'aide d'une station hydrométrique et l'établissement de paramètres précis tels que la hauteur de la nappe et le taux d'infiltration. Évidemment, ces informations n'étaient pas disponibles ou, du moins, inconnues. Une autre approche a donc dû être choisie étant donné l'impossibilité d'effectuer la simulation.

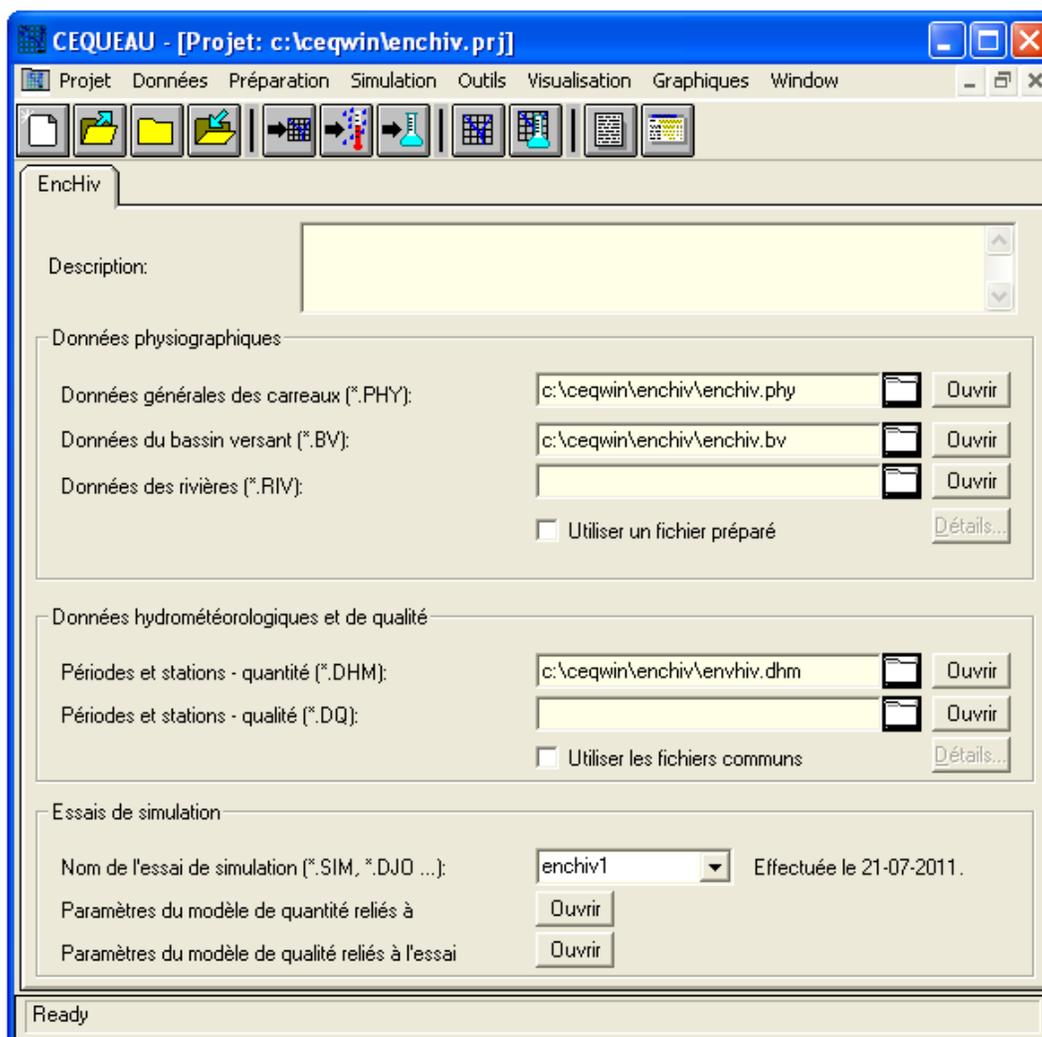


Figure 2. Fenêtre de projet du modèle CEQUEAU

4.3 Création d'un calculateur

Malgré l'échec de la simulation à l'aide de CEQUEAU, le manuel de l'utilisateur (Morin et Paquet, 2007) explique les grandes lignes de la démarche, laquelle inclut les principales équations utilisées par le modèle. Ainsi, l'option choisie fut de développer un calculateur Excel à partir de ces équations et des données météorologiques disponibles. Tel qu'illustré par l'encadré noir sur la fonction de production du logiciel CEQUEAU (figure 3), le calculateur permettra de prédire les quantités d'eaux de ruissellement, d'infiltration et d'évapotranspiration à partir des valeurs de précipitations et d'équations de fonte.

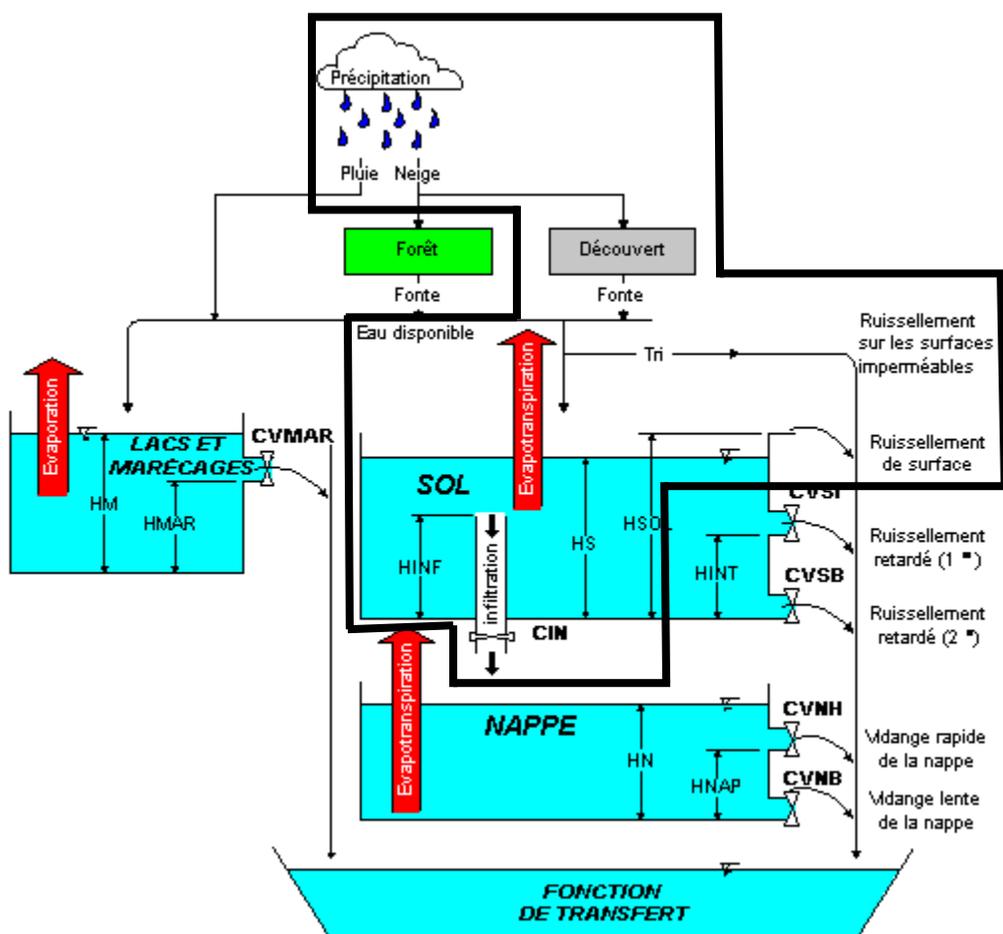


Figure 3. Fonction de production du logiciel CEQUEAU

5 Méthodologie

5.1 Développement du calculateur

Le modèle de fonte simplifié du calculateur repose sur une équation générale qui effectue de façon quotidienne le bilan des stocks de neige sur l'enclos. L'équation de ce bilan s'écrit ainsi :

$$SND_i = SND_{i-1} + PJN_i - TED_i, \quad (1)$$

où :

- SND_i, stock de neige à la fin du jour i ;
- SND_{i-1}, stock de neige à la fin du jour i-1 ;
- PJN_i, la précipitation solide du jour i ;
- TED_i, la fonte de neige pour le jour i.

Afin de modéliser la fonte de neige journalière (TED_i), l'équation 1 requiert aussi d'autres données météorologiques : les températures minimale, moyenne et maximale ainsi que la quantité de pluie. Par conséquent, la première étape du calculateur consiste à introduire ces données, en plus des précipitations solides (PJN_i), dans un tableau récapitulatif l'ensemble des valeurs météorologiques quotidiennes nécessaires au modèle. Un aperçu des résultats pour la station météorologique de Deschambault pour novembre 2007 (Environnement Canada, 2011) est donné à la figure 4.

La modélisation de la fonte de neige journalière (TED_i) se fait par une succession d'équations prenant en compte divers paramètres spatiotemporels, thermiques et hydrologiques. Les premiers comprennent la latitude de l'enclos et l'insolation maximale servant à la détermination de l'évapotranspiration potentielle. Les paramètres thermiques concernent les températures ou les coefficients liés à la fonte et au mûrissement de la neige. Ils permettront, en comparaison avec les températures de l'air, de connaître si la neige fond et dans quelle proportion. Les paramètres hydrologiques servent au bilan en eau du sol et déterminent les quantités d'eau de fonte qui s'infiltrent ou ruissellent. Un onglet du calculateur permet donc de fixer la valeur de ces paramètres. La figure 5 illustre l'exemple pour l'enclos d'hivernage de Deschambault. Les valeurs sont les coefficients par défaut du logiciel CEQUEAU (Morin et Paquet, 2007), excepté lorsqu'il s'agit des données géographiques ou météorologiques relatives à Deschambault.

À partir des données issues des figure 4 et figure 5, le calculateur simule les différents mouvements d'eau de façon quotidienne. Pour ce faire, il calcule d'abord des index de température et de mûrissement du stock de neige lui permettant de connaître l'impact de la pluie qui tombe sur le couvert neigeux. Ainsi, le modèle est en mesure d'évaluer la quantité de précipitations liquides absorbée par la neige et celle atteignant le sol. Puis, en fonction du rayonnement solaire pour un jour donné, l'outil mesure les fontes potentielle et réelle de neige.

Mois	Jour	Température minimale journalière (°C)	Température moyenne journalière (°C)	Température maximale journalière (°C)	Pluie (mm)	Neige (cm)	Neige totale au sol (cm)
11	1	5	7,8	10,5	0	0	0
11	2	-2,5	2,3	7	0	0	0
11	3	-3	2	7	0	0	0
11	4	-1	4,5	10	0	0	0
11	5	-4,5	2	8,5	8,6	0	0
11	6	4	5	6	6,8	0	0
11	7	-1,5	2,3	6	0,6	0	0
11	8	-0,5	1,8	4	0	0	0
11	9	-1	1,5	4	0	0	0
11	10	-3,5	-0,3	3	0	0	0
11	11	-6	-1	4	0	0	0
11	12	-7	-1,3	4,5	1	1	0
11	13	0	3,8	7,5	0	0	0
11	14	-1,5	5,8	13	1	0	0
11	15	4,5	5,5	6,5	7,8	0	0
11	16	-0,5	1	2,5	0	0	0
11	17	-1,5	0,3	2	0	0	0
11	18	-6	-2,3	1,5	0	0	0
11	19	-9	-4,5	0	0	0,5	0
11	20	-4,5	-2,5	-0,5	0	7	0
11	21	-1	0	1	0	4,8	6
11	22	-0,5	0	0,5	0	15	8
11	23	-8	-6,5	-5	0	0	22
11	24	-9,5	-5	-0,5	0	1,5	22
11	25	-11	-4,8	1,5	0	0	23

Figure 4. Tableau des données météorologiques à insérer dans le modèle (capture d'écran provenant du calculateur)

Du coup, il est possible d'effectuer les bilans de la quantité de neige (équation 1), de l'équivalent en eau de la neige fondue et de la quantité totale d'eau se retrouvant au sol. Cette dernière quantité peut ensuite s'évaporer, s'infiltrer ou ruisseler. C'est à cette étape que les paramètres spatiotemporels et hydrologiques sont utilisés.

La figure 6 présente, à titre d'exemple, les résultats de simulation obtenus par le calculateur le 8 janvier 2008. Ce jour-là, la température moyenne fut de 2,3°C et 14 mm de pluie sont tombés. Le temps doux et les précipitations liquides ont entraîné une fonte de neige équivalant à 20,75 mm d'eau. Au total, 34,18 mm d'eau ont atteint le sol (PLUFON). Avec un coefficient de ruissellement de 30%, 10,26 mm d'eau ont ruisselé directement sur le sol (RUIS1). L'eau restante est ajoutée au bilan en eau du sol (EAUTER) atteignant maintenant 76,24 mm. De cette quantité, 0,71 mm sont évaporés (ETOT) et 1,69 mm, infiltrés (XINF). Finalement, étant donné que la quantité d'eau au

sol ne dépasse pas le seuil fixé à 79 mm pour la hauteur de sol (HSOL; figure 5), aucun ruissellement de surface (RUIS2) ne survient par la suite.

Variable	Description	Unité	Valeur
XLA	latitude moyenne de l'enclos	°	46
JONEI	insolation maximale de l'année		80
STRNE	seuil de transformation pluie-neige	°C	1,0
TFD	taux potentiel de fonte	mm/°C/jour	2,5
TSD	seuil de température de fonte	°C	1,0
TTD	coefficient de déficit calorifique		0,7
TTS	température du mûrissement du stock de neige	°C	1,0
XIT	valeur de l'index de Thornthwaite		31,132
XXA	exposant de la formule de Thornthwaite		0,9949
CRUIS	coefficient de ruissellement		0,30
HPOT	seuil de prélèvement de l'eau à taux potentiel	mm	60
HINF	seuil d'infiltration du sol vers la nappe	mm	65
TOINF	coefficient d'infiltration dans la nappe		0,15
XINFMA	infiltration maximale	mm/jour	10,0
HSOL	hauteur de sol	mm	79

Figure 5. Tableau des paramètres spatiotemporels, thermiques et hydrologiques à fixer pour le modèle (capture d'écran provenant du calculateur)

Date	Eau de neige fondue (mm)	PLUFON (mm)	ETHORN (mm)	RUIS1 (mm)	EAUTER (mm)	ETOT (mm)	XINF (mm)	RUIS2 (mm)
8 janvier	20,75	34,18	0,71	10,26	76,24	0,71	1,69	0,00

Figure 6. Résultats de simulation obtenus par le calculateur pour les eaux évaporées, infiltrées et ruisselées (capture d'écran provenant du calculateur)

5.2 Calibration et validation

Afin de vérifier la validité du modèle, une simulation de la fonte des neiges des années 1999 à 2003 a été réalisée. Ces années correspondent à la période expérimentale du premier projet d'enclos d'hivernage à l'IRDA (Pelletier et al., 2004 et 2008) dont les quantités d'eau moyennes de précipitations et de ruissellement sont connues pour les enclos d'hivernage et leur BVF correspondante (tableau 2).

Comme le calculateur considère une surface engazonnée et uniforme, les résultats de modélisation seront comparés à ceux de l'enclos 1, correspondant davantage à la description. Considérant une surface d'enclos de 1454,4 m², les paramètres ont été calibrés de façon à ce que les résultats de modélisation correspondent à l'ordre de grandeur des valeurs de 1999 à 2003.

Tableau 2. Rapport du volume d'eau de ruissellement sur le volume d'eau de précipitation pour les enclos d'hivernage et les bandes végétatives filtrantes (valeurs moyennes pour les quatre années du projet) (tiré de Pelletier et al., 2008)

Enclos d'hivernage ou bande végétative filtrante	Volume d'eau de précipitation sur l'enclos ou la bande		Volume d'eau de ruissellement provenant de l'enclos ou de la bande		Rapport du volume d'eau de ruissellement sur le volume d'eau de précipitation
	mm	m ³ année ⁻¹	mm	m ³ année ⁻¹	%
EH 1	1 087	1 581	329	478	30
EH 2	1 087	1 581	210	306	19
EH 3	1 087	391	356	128	34
EH 4	1 087	65	1 027	62	96
BVF 1	1 087	1 435	194	256	18
BVF 2	1 087	1 435	141	186	12
BVF 3	1 087	1 435	133	175	12
BVF 4	1 087	1 435	142	188	13

Le tableau 3 présente les volumes de ruissellement mesurés et simulés pour chaque mois d'hiver (novembre à mai). Chaque valeur représente la moyenne des quatre années du projet. Les différences lors des mois de novembre, de janvier et de février sont causées par la sensibilité du modèle aux temps doux et aux pluies en temps hivernal. Par conséquent, il a tendance à surestimer la fonte et le ruissellement durant cette période. Au printemps, cette surestimation affecte à la baisse les volumes modélisés de ruissellement. Néanmoins, la majorité du ruissellement, autant mesuré que simulé, survient entre mars et mai. À la toute fin de la saison, malgré de légères différences mois par mois, le volume total de ruissellement est le même (394 m³).

Tableau 3. Volumes de ruissellement mesuré et modélisé pour 1999-2003

Mois	Ruissellement 1999-2003 (m ³)	
	Mesuré	Modélisé
Novembre	18,3	32,1
Décembre	34,1	37,0
Janvier	0,2	13,8
Février	1,4	17,3
Mars	111,7	78,3
Avril	190,0	162,3
Mai	38,5	53,2
Total	394,2	394,1

6 Modélisation de la fonte des neiges sur l'enclos d'hivernage

6.1 Précipitations normales

Le dimensionnement du bassin est basé sur la hauteur d'eau qui précipite sur l'ensemble de la période hivernale. Pour ce faire, les précipitations mensuelles des trente dernières années ont été relevées à partir d'Environnement Canada (2011) pour la station de Deschambault (tableau 4). La somme des précipitations mensuelles pour la période mi-novembre à mi-mai a ensuite été comptabilisée pour les années où cela est possible.

Selon le théorème central limite, qui affirme que toute somme de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées, si en nombre suffisant, tend vers une variable aléatoire gaussienne (Collin, 2009), il est possible de considérer la moyenne et la variance de l'échantillon des sommes de précipitations mensuelles comme une distribution normale. En prenant en compte une période de récurrence de 10 ans pour les installations d'entreposage des fumiers à ciel ouvert (Joncas et al., 1993), une valeur de 596 mm est obtenue pour la période allant du 15 novembre au 15 mai.

Parmi les années recensées, l'hiver 2007-2008 pourrait représenter une année type alors que les précipitations de la mi-novembre à la mi-mai ont atteint 602 mm (tableau 4). Cette période fut donc sélectionnée pour effectuer la simulation avec le calculateur.

Tableau 4. Précipitations de novembre à mai (1978-2008) pour la station de Deschambault

	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Somme*
2008	M	M	88	104	137	79	59	602
2007	78	125	M	40	76	138	68	n.d.
2006	92	M	156	102	40	88	95	575
2005	101	92	42	56	65	154	47	536
2004	100	146	42	51	77	7	114	529
2003	146	221	30	47	79	90	120	390
2002	95	37	46	75	99	97	135	464
2001	86	36	34	93	71	34	66	466
2000	64	168	109	74	59	114	123	529
1999	72	77	98	64	68	41	75	443
1998	77	95	M	M	M	47	38	n.d.
1997	M	M	167	119	94	51	99	662
1996	76	145	87	109	16	167	79	570
1995	120	93	130	68	81	69	132	533
1994	123	59	69	51	61	116	126	485
1993	114	68	81	56	63	127	134	487
1992	94	48	92	77	94	62	80	437
1991	29	59	61	57	90	85	109	532
1990	108	131	112	67	59	69	81	480
1989	145	60	84	40	70	53	181	443
1988	112	49	59	109	41	89	35	430
1987	102	63	59	11	67	78	88	386
1986	111	72	139	25	52	95	195	516
1985	52	82	37	53	75	65	81	421
1984	126	87	58	55	47	74	108	505
1983	172	131	73	109	55	163	233	690
1982	117	115	71	29	89	49	39	332
1981	56	47	20	152	74	94	110	465
1980	45	48	24	24	64	106	60	386
1979	98	88	84	11	70	62	66	413
1978	87	111	46	3	69	51	33	n.d.
							Moyenne	490
							Écart-type	83
							Normale	596

* : somme de la mi-novembre à la mi-mai;

M : donnée manquant;

n.d. : non déterminé.

Source :

http://climate.weatheroffice.gc.ca/climateData/dailydata_f.html?timeframe=2&Prov=QUE&StationID=5220&dlyRange=1971-07-01|2011-11-30&Year=2011&Month=11&Day=01

6.2 Résultats de simulation 2007-2008

La figure 7 présente les résultats de simulation ainsi que le calcul pour le dimensionnement du bassin. Le ruissellement simulé atteint 379,5 mm pour la période allant de la mi-novembre 2007 à la mi-mai 2008. Pour cet hiver, 191 mm d'eau sont perdus du système soit par évapotranspiration (52 mm), soit par infiltration (139 mm). En fonction de la nouvelle surface par vache ($45 \text{ m}^2 \text{ vache}^{-1}$) établie par Fournel et al. (2010) pour l'aire d'exercice et le nombre de vaches avec leur veau fixé à 10 (Pelletier et al., 2004 et 2008), le volume de ruissellement atteint donc $170,8 \text{ m}^3$ avec une surface d'enclos de 450 m^2 . À ce volume doit être ajouté celui des précipitations tombant directement sur le bassin durant la période hivernale. Une partie des précipitations totales ($619,7 \text{ mm}$) sera évapotranspirée. D'après Joncas et al. (1993), entre octobre et, mai, environ 16% des précipitations tombant dans une fosse d'entreposage de la région de Portneuf sont évaporées. Ainsi, le volume de précipitations considéré est de $191,6 \text{ m}^3$. Après plusieurs itérations faisant varier la profondeur, la longueur et la largeur du bassin sans dépasser les limites physiques de l'enclos (pentes, largeur et longueur maximales, fond assez large pour le curage des sédiments par un tracteur), le volume final du bassin serait de $362,8 \text{ m}^3$ pour pouvoir contenir toute l'eau provenant du ruissellement et des précipitations. Avec une profondeur de 1,9 m, cela représente un bassin de 23,3 m de large par 15,8 m de long.

<u>Paramètre</u>	<u>Valeur</u>		<u>Limite</u>	
Nombre de vaches	10			
Surface par vache ($\text{m}^2 \text{ vache}^{-1}$)	45			
Pente pour vidange (?:1)	10			
Pente côtés (?:1)	2			
Ruissellement (mm)	379,5			
Surface de l'enclos (m^2)	450,0			
Volume de ruissellement (m^3)	170,8			
Profondeur du bassin (m)	1,9	vs.	2	OK!
Largeur totale du bassin (m)	23,3	vs.	23,3	OK!
Longueur totale du bassin (m)	15,8	vs.	31,75	OK!
Largeur pente ouest (m)	19			
Largeur pente est, nord et sud (m)	3,8			
Largeur au fond du bassin (m)	1	vs.	0	OK!
Longueur au fond du bassin (m)	8,2	vs.	2,5	OK!
Aire du bassin (m^2)	368,1			
Précipitations totales (mm)	619,7			
% d'évapotranspiration des préc.	16			
Volume de précipitations (m^3)	191,6			
Volume d'eau à contenir (m^3)	362,4			
Volume du bassin (m^3)	362,8	vs.	362,4	OK!

Figure 7. Résultats de la simulation 2007-2008 et dimensionnement du bassin (capture d'écran provenant du calculateur)

Malgré des réductions importantes du volume de ruissellement en considérant les pertes simulées par évapotranspiration et infiltration, le volume final du bassin demeure très élevé, spécialement en regard du nombre de vaches. Un regard attentif aux résultats (figure 7) permet de constater que l'apport d'eau des précipitations (191,6 m³) représente plus de la moitié de l'eau à gérer, tant et si bien que couvrir le bassin devrait être une option à envisager. Or, cette possibilité ne serait envisageable que dans la mesure où la dimension du bassin serait à nouveau réduite.

Tel qu'observé au tableau 3, la majorité du ruissellement survient entre les mois de mars et mai. Une étude approfondie de cette période jour après jour permet d'évaluer rapidement qu'entre le 16 et le 28 avril 2008, le ruissellement a atteint 259 mm résultant en un volume de 116,6 m³ (tableau 5). Cela représente donc 68% du volume total de ruissellement survenant durant les deux dernières semaines d'avril. Une attention particulière doit également être portée sur le 28 avril alors que le ruissellement de 35,2 m³ compte à lui seul pour 30%. Ce résultat est le fruit d'une pluie de 32,4 mm.

Tableau 5. Ruissellement entre le 16 et le 28 avril 2008

Date	Ruissellement	
	mm	m ³
16 avril	9,1	4,1
17 avril	12,8	5,8
18 avril	12,1	5,4
19 avril	6,6	3,0
20 avril	11,9	5,4
21 avril	12,3	5,5
22 avril	15,7	7,1
23 avril	22,5	10,1
24 avril	19,3	8,7
25 avril	11,4	5,1
26 avril	22,6	10,2
27 avril	24,4	11,0
28 avril	78,2	35,2
Somme	258,8	116,6

6.3 Analyse des volumes de ruissellement d'avril 2000 à 2008

En inspectant le ruissellement simulé pour chaque année de la décennie 1999-2008 entre mars et, mai, il est possible de noter qu'une grande partie du ruissellement survient entre le 28 mars et le 29 avril (tableau 6). Le maigre volume de ruissellement ($12,2 \text{ m}^3$) en avril 2006 fut causé par de faibles chutes de neige hivernales jumelées à d'importantes quantités de pluie tombées durant les mois de janvier, février et mars ayant entraîné une fonte prématurée. Sinon, les autres années ont engendré des volumes de ruissellement variant entre $38,1$ et $143,3 \text{ m}^3$, représentant 34 à 85% du ruissellement total. La moyenne des neuf années atteint $68,5 \text{ m}^3$. Entre 2000 et 2006, la majorité du ruissellement s'est généralement écoulé durant une courte période de 2 à 5 jours (en bleu, tableau 6). Pour 2007 et 2008, la période critique de ruissellement a duré 9 et 14 jours, respectivement (en rouge, tableau 6).

Tableau 6. Ruissellement (m³) entre le 28 mars et le 29 avril de chaque année durant la période 2000-2008

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
28 mars	12,7	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
29 mars	9,3	0,0	0,3	15,8	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0
30 mars	1,9	0,0	2,0	0,0	1,8	0,0	0,0	1,4	0,0
31 mars	2,2	0,0	1,8	0,0	0,7	0,8	0,3	0,0	0,0
1 ^{er} avril	0,3	0,0	10,3	0,0	0,5	1,3	1,4	0,0	1,0
2 avril	0,2	0,0	4,9	0,0	0,8	24,1	0,0	9,6	0,0
3 avril	2,5	0,3	1,1	0,0	0,2	8,7	0,7	0,0	0,0
4 avril	2,2	0,4	0,0	0,0	0,0	11,3	1,8	0,0	0,0
5 avril	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	1,1
6 avril	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6	0,6	0,0	0,0
7 avril	0,7	0,0	0,0	0,0	0,9	4,4	0,4	0,0	0,8
8 avril	7,6	0,2	0,0	0,0	1,4	1,3	0,0	0,0	0,8
9 avril	2,8	1,7	2,3	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	1,1
10 avril	0,0	1,2	4,8	0,3	0,0	2,6	0,0	0,0	2,4
11 avril	0,0	0,5	1,3	2,3	0,0	0,3	0,0	0,0	2,4
12 avril	0,0	14,9	16,5	1,4	1,1	0,3	0,3	0,0	0,0
13 avril	0,0	6,2	12,7	1,5	2,3	4,1	0,7	0,4	0,7
14 avril	1,7	0,2	16,6	0,6	4,0	0,0	1,0	1,3	1,5
15 avril	0,7	0,3	7,2	3,0	2,1	0,0	1,5	14,6	0,4
16 avril	0,0	3,0	12,0	0,0	0,4	0,0	0,1	5,0	4,1
17 avril	0,0	0,6	2,3	0,0	2,3	0,0	0,0	4,0	5,8
18 avril	0,0	0,4	0,2	0,0	6,3	0,0	0,0	3,0	5,4
19 avril	0,1	0,6	0,5	0,2	12,8	0,3	0,0	3,0	3,0
20 avril	0,0	3,0	0,0	0,0	5,6	0,0	0,0	9,0	5,3
21 avril	0,2	9,9	0,0	1,3	0,6	0,0	0,0	9,2	5,6
22 avril	0,5	12,7	0,0	2,1	0,1	0,0	0,0	7,9	7,1
23 avril	4,7	3,1	0,0	1,6	0,0	3,3	2,6	13,0	10,1
24 avril	0,3	0,7	0,0	0,8	0,3	2,8	0,0	0,0	8,7
25 avril	0,0	0,0	0,8	0,9	0,0	0,2	0,6	0,0	5,1
26 avril	0,0	0,1	0,0	6,0	0,0	0,0	0,2	0,2	10,2
27 avril	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,9	0,0	1,6	11,0
28 avril	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	4,0	0,0	0,7	35,2
29 avril	0,0	0,3	0,3	0,0	0,0	0,3	0,0	2,0	14,5
Total 28 mars au 29 avril	50,5	60,6	97,6	38,1	43,8	83,8	12,2	86,2	143,3
Total 15 nov. au 15 mai	119,6	115,2	117,3	84,6	130,7	140,2	143,3	101,0	170,8
Proportion (%)	35	44	69	38	28	50	7	71	70

6.4 Discussion et définition de scénarios

À la lumière des résultats, même le développement d'un modèle simple de fonte des neiges ne permet pas de réduire significativement le volume de ruissellement en soustrayant les pertes par évapotranspiration et par infiltration. Évidemment, la construction d'un bassin en terre de grande dimension implique de prendre en considération les précipitations tombant sur sa surface doublant le volume d'eau à gérer. Le gain sur le volume de ruissellement n'est donc plus autant appréciable. Les coûts de construction et de gestion du bassin demeurent dispendieux.

Dans un souci de réduire le volume du bassin, la solution serait de le recouvrir. Cependant, la grande surface du bassin nécessiterait une structure complexe et coûteuse. Dans une perspective expérimentale, la solution serait d'en arriver à des réservoirs prismatiques fermés de petits volumes. Pour y parvenir, le volume d'eau considéré devrait se baser sur une gestion du risque de débordement plutôt que de devoir contenir l'ensemble de l'eau tombant sur l'enclos d'hivernage. En ce sens, plusieurs options pourraient être envisagées.

Mis à part un bassin en terre de 363 m^3 , le second scénario pourrait être de contenir les 117 m^3 du 16 avril au 28 avril 2008. Comme cette année correspond à l'année type, ce volume pourrait s'avérer une option plus que sécuritaire. D'après le tableau 3, ce volume ne serait dépassé qu'au cours du mois d'avril pour 2008, tandis qu'il pourrait pratiquement contenir les eaux des années 2000 à 2003 et 2007. Pour ce qui est des autres années, les surplus pourraient être acheminés vers la BVF puisqu'elle pourrait être apte à recevoir de petits volumes étant donné que l'hiver à ce moment de l'année tire à sa fin. De plus, le risque de contamination devrait être moins élevé en raison des aménagements effectués (aire d'alimentation bétonnée et couverte), dans la mesure où le nouveau concept établi par Fournel et al. (2010) est mis en place.

Le troisième scénario consisterait en la moyenne du ruissellement entre le 28 mars et le 29 avril (68 m^3) établie à partir du tableau 6. Dans ce cas-ci, le remplissage complet du bassin nécessiterait plusieurs jours consécutifs avec un ruissellement abondant. Lors de mois d'avril 2003 et 2008, ce volume fut atteint en un minimum de 4 à 5 jours. Une gestion plus serrée des surplus d'eau devrait être envisagée.

Le quatrième scénario serait de considérer 50% de la moyenne correspondant environ au ruissellement quotidien maximal de 34 m^3 obtenu le 28 avril 2008. Cette option engendrerait une gestion à la journée. Avant le rejet vers la BVF, l'utilisateur devrait s'assurer que les eaux de ruissellement aient eu suffisamment le temps de décanter.

Le dernier scénario serait un volume d'environ 17 m^3 , correspondant au quart de la moyenne. Parmi les volumes quotidiens (tableau 6), seuls les 2 avril 2005 et 28 avril 2008 ont surpassé cette valeur. Le choix de cette option entraîne un risque de débordement qu'il faut assumer et gérer.

Le tableau 7 résume les scénarios énumérés.

Tableau 7. Volumes de bassin possible selon les divers scénarios établis

	Scénarios				
	1	2	3	4	5
Type de bassin	Ouvert	Fermé	Fermé	Fermé	Fermé
Contenu du bassin	Ruissellement du 15 novembre au 15 mai d'une année type + précipitations tombant sur le bassin	Ruissellement durant la période critique d'une année type	Moyenne du ruissellement du 28 mars au 29 avril des 10 dernières années	Environ 50% du scénario 3	Environ 25 % du scénario 3
Volume (m ³)	363	117	68	34	17

6.5 Méthode de calcul simplifiée des volumes de bassin

Dans le but de rendre la méthode uniforme et applicable, peu importe la région où se situe l'enclos d'hivernage, une équation simple de calcul a été développée. Évidemment, le scénario 1, excessivement sensible au dimensionnement du bassin en fonction des précipitations tombant sur sa surface, ne peut être estimé par l'équation 2. Dans le cas des autres scénarios, la formule prendrait la forme suivante :

$$V = N \times A \times P \times R \times S, \quad (2)$$

où :

- V, volume du bassin (m³);
- N, nombre de têtes;
- A, aire ou surface par tête (m² tête⁻¹);
- P, précipitations normales sur l'enclos entre la mi-novembre et la mi-mai (m);
- R, coefficient de ruissellement;
- S, coefficient associé au scénario choisi.

Parmi ces paramètres, le nombre de têtes (N) et les précipitations (P) dépendent du troupeau du producteur et de la région où il se situe. La surface par tête (A) est fixée à 45 m², telle que définie par Fournel et al. (2010) dans l'élaboration du nouveau concept. Les coefficients de ruissellement (R) et de scénario (S) doivent donc être fixés.

Dans le premier cas, le modèle a permis de calculer les précipitations totales de la période s'étirant du 15 novembre au 15 mai et les quantités d'eau ruisselées entre 1999 et 2008. Ces données ont donc permis de connaître la proportion du ruissellement par rapport aux précipitations totales. La moyenne et l'écart type ont ensuite permis de mesurer la proportion équivalant à un intervalle de confiance à 90%. Au final, le coefficient de ruissellement (R) sera fixé à 0,6 (tableau 8). Quant au coefficient de scénario (S), un calcul simple avec les données de 2007-2008 permet d'attribuer une valeur de 0,7 au scénario 2, 0,4 au scénario 3, 0,2 au scénario 4 et 0,1 au scénario 5.

Tableau 8. Proportion du ruissellement par rapport aux précipitations totales établie par le calculateur pour les années 1999-2008

Hiver (novembre à mai)	Ruissellement (mm)	Précipitations (mm)	Proportion (%)
1999-2000	266	554	48
2000-2001	256	446	57
2001-2002	261	466	56
2002-2003	188	407	46
2003-2004	290	539	54
2004-2005	312	546	57
2005-2006	319	570	56
2006-2007	224	461	49
2007-2008	380	620	61
		Moyenne	54
		Écart type	5
		Normale	60

6.6 Méthode de calcul de la surface de la BVF

Le calcul de la surface de la BVF s'effectue d'après la méthode établie par le ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires Rurales de l'Ontario (MAAARO, 2006). La procédure exige d'abord le calcul de la surface minimale d'infiltration basée essentiellement sur le débit de rejet et la conductivité hydraulique du sol de la BVF :

$$S_{\min} = \frac{Q}{K \times 86,4} \quad (3)$$

où :

S_{\min} , surface minimale de la BVF (m^2);
 Q , débit d'eau de transfert vers la BVF ($L s^{-1}$);
 K , conductivité hydraulique ($m j^{-1}$);
 $86,4$, facteur de conversion.

Pour un coefficient de Manning de 0,24 (canal enherbé) et une profondeur d'écoulement de 0,0127m (0,5 po), la longueur et la largeur minimales sont déterminées. Dans les deux cas, il est nécessaire de connaître la vitesse d'écoulement, calculée à partir de l'équation de Manning :

$$V = \frac{P^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (4)$$

où :

V, vitesse d'écoulement dans la BVF (m s^{-1});
 P, profondeur d'écoulement (0,0127 m);
 S, pente (m m^{-1});
 n, coefficient de Manning (0,24).

La longueur minimale correspond à la distance parcourue par l'effluent en 15 minutes. Elle est obtenue à partir des données du MAAARO (2006) ayant permis de modéliser l'équation suivante :

$$L_{\min} = 907,01 \times V - 0,292 \quad (5)$$

où :

L_{\min} , longueur minimale de la BVF (m);
 V, vitesse d'écoulement dans la BVF (m s^{-1}).

La largeur minimale se calcule ainsi :

$$l_{\min} = \frac{Q}{P \times V \times 1000} \quad (5)$$

où :

l_{\min} , largeur minimale de la BVF (m);
 Q, débit d'eau de transfert vers la BVF (L s^{-1});
 P, profondeur d'écoulement (0,0127 m);
 V, vitesse d'écoulement dans la BVF (m s^{-1}).

Le respect de ces 3 conditions minimales permet de fixer les dimensions de la BVF.

Le nouveau concept d'enclos d'hivernage, incluant le bassin de sédimentation, sera expérimenté au cours des prochains hivers sur le site de Deschambault. L'expérimentation permettra de valider les différentes hypothèses posées lors du développement du modèle. La gestion des débordements potentiels du bassin de sédimentation sera un des aspects les plus importants à suivre lors de la réalisation du projet. Suite aux résultats obtenus lors de l'expérimentation, il sera possible de revoir la méthode de calcul de la bande végétative filtrante. Le taux de rétention de l'eau et la facilité de gestion des débordements du bassin de sédimentation pourraient permettre de réduire la surface de la BVF.

7 Conclusion

La revue de littérature réalisée démontre qu'il existe plusieurs modèles, mais que peu sont adaptés à l'échelle de l'aire d'hivernage. Le modèle développé dans le présent projet, inspiré du logiciel CEQUEAU, permet d'estimer les volumes d'eau à gérer dans le nouveau concept d'enclos d'hivernage.

Le modèle prend en compte la température, les précipitations liquides et solides, l'évaporation, la neige au sol, le taux de fonte des neiges, l'infiltration et le ruissellement. Les données recueillies au cours des cinq hivers de l'étude précédente ont été utilisées pour fixer les paramètres du modèle. Différents scénarios de gestion de l'eau de ruissellement ont été étudiés à l'aide du modèle.

Considérant les résultats obtenus, il n'est pas nécessaire de concevoir un bassin de sédimentation permettant d'entreposer la totalité du volume d'eau de ruissellement produit par la fonte de la neige. L'analyse des résultats démontre qu'il est possible de réduire le volume du bassin de sédimentation tout en minimisant les risques pour l'environnement et les coûts de construction.

Puisque le modèle a été développé à partir des résultats de projets antérieurs, les résultats obtenus avec ce dernier s'appliquent seulement pour le site de Deschambault. Une validation sera nécessaire pour appliquer le modèle sur d'autre ferme où différentes caractéristiques de site et des troupeaux plus importants peuvent être retrouvés.

Le nouveau concept d'enclos d'hivernage sera expérimenté au cours des prochains hivers sur le site de Deschambault. L'expérimentation permettra de valider les différentes hypothèses posées lors du développement du modèle. La gestion des débordements potentiels du bassin de sédimentation sera un des aspects les plus importants à suivre lors de la réalisation du projet. Suite aux résultats obtenus lors de l'expérimentation, il sera possible de revoir la méthode de calcul de la bande végétative filtrante. Le taux de rétention de l'eau et la facilité de gestion des débordements du bassin de sédimentation pourraient permettre de réduire la surface de la BVF.

8 Références

- Anderson, E.A. 1973. National weather service river forecast system – Snow accumulation and ablation model. NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO-17, U.S. Dept. Commerce, Silver Spring, MD.
- Anderson, E.A. 1976. A point energy and mass balance model of snow cover. NOAA Technical Report National Weather Service-19, U.S. Dept. Commerce, Silver Spring, MD.
- Bergström, S. 1975. The development of a snow routine for the HBV-2 model. *Nordic Hydrology* 3:73-92.
- Bishop, R. and W.E. Watt. 1975. SIMFLO – A continuous streamflow simulation model. Canadian Hydrology Symposium, Winnipeg, Canada.
- Colin, J. 2009. Dispositifs expérimentaux (BVG-7002) : notes de cours. Université Laval. Chapitre 3 – Statistiques inférentielles.
- Drouin, A., A. Michaud, R. Lagacé, A. Mailhot, G. Talbot, D. Huard, S. Biner, N.-P. Rocha et O. le Bourgeois. 2011. La refonte des normes et procédure de conception d'ouvrages hydrauliques en milieu rural. Programme scientifique et résumés du 25e Congrès annuel de l'Association québécois de spécialistes en sciences du sol, Hôtel-Musée Première Nations, Wendake, Québec, 25 au 27 mai 2011.
- Environnement Canada. 2011. Données climatiques en ligne. (En ligne) http://climate.weatheroffice.gc.ca/climateData/canada_f.html. Page consultée le 29 août 2011.
- Fortin, J.-P., R. Moussa, C. Bocquillon et J.-P. Villeneuve. 1995. Hydrotel, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par télédétection et les systèmes d'information géographique. *Revue des sciences de l'eau* 8(1) :97-124.
- Fournel, S., P. Brassard et S. Whissell. 2010. Établissement d'un nouveau concept d'aire d'hivernage de vaches-veaux. Rapport final. Projet d'ingénierie. Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval, 109 p.
- FPBQ, MAPAQ et MENV. 1999. Guide de bonnes pratiques agroenvironnementales pour la gestion des fumiers des bovins de boucheries. Fédération des producteurs de bovins du Québec. 28 pages plus annexes.
- INRS-ETE. 2000. Modèle hydrologique CEQUEAU. (En ligne) <http://www1.ete.inrs.ca/activites/modeles/cequeau/index.html>. Page consultée le 1er août 2011.
- Ghate, S.R. and H.R. Whitely. 1977. Gawser model user's manual. School of Engineering, University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada, Technical report: 126-137.
- Johanson, R.C., J.D. Imhoff, and H.H. Davis Jr. 1984. User's manual for hydrological simulation program. FORTRAN (SHP-F), EPA 600/9-80-015, U.S. EPA, Athens, GA.
- Joncas, R., J. Champagne et G. Jacques. 1993. Accumulation d'eau dans les installations d'entreposage des fumiers à ciel ouvert. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec et ministère de l'Environnement du Québec. 35 p.

- Kite, G.W. 1978. Development of a hydrologic model for a Canadian watershed. *Canadian Journal of Civil Engineering* 5:126.
- Leavesley, G.H., R.W. Lichty, B.M. Troutman, and L.G. Saindou. 1983. Precipitation-runoff modeling system, User's manual. U.S. Geological Survey Water Resources Investigators Report B3-4238.
- Logan, L.A. 1976. A computer-aided snowmelt model for augmenting winter streamflow simulation in a southern Ontario drainage basin. *Canadian Journal of Civil Engineering* 3:531.
- MAAARO. 2006. Guide de conception des systèmes de bandes de végétation filtrantes. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario. Publication 826F. ISBN 1-4249-0713-6.
- Martinec, J. 1975. Snowmelt-runoff model for stream flow forecasts. *Nordic Hydrology* 6(3):145-154.
- MDDEP. 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. Page consultée le 12 mars 2012.
- Ministère des Richesses Naturelles de l'Ontario. 1989. Snow Hydrology Guide. Publié par le ministère des Richesses Naturelles de l'Ontario, Queen's Park, Ontario, Canada.
- Morin, G. et P. Paquet. 2007. Modèle hydrologique CEQUEAU, INRS-ETE, rapport de recherche no R000926, 458 p.
- Morris, E.M. and J. Godfrey. 1978. The European hydrological system snow routine. Proceedings of Modeling of Snow Cover Runoff, S.C. Colbeck and M. Ray, ed., U.S. Army Cold Regions Research Engineering Laboratory, Hanover, NH: 269-278.
- Morris, E.M. 1983. Modeling the flow of mass and energy within a snowpack for hydrological forecasting. *Annals of Glaciology* 4:198-203.
- Pelletier, F., S. Godbout et R. Joncas. 2008. Étude environnementale des enclos d'hivernage de vaches-veaux : analyses complémentaires. Rapport final. Révision # 00. IRDA. 69 pages.
- Pelletier, F., R. Joncas et M. Côté. 2004. Étude environnementale des enclos d'hivernage de vaches-veaux. IRDA. Décembre 2004. 102 pages.
- Quick, M.C. and A. Pipes. 1977. UBS watershed model. *Hydrological Sciences Bulletin* XXII(1):153.
- USACE. 1998. Engineering and design: Runoff from snowmelt. Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC 20314-1000. Manual No. 1110-2-1406.
- USACE. 1991. User manual SSARR Model, streamflow synthesis and reservoir. U.S. Army Corps of Engineers, North Pacific Division.
- USACE. 1990. HEC-1 flood hydrograph package, user's manual. U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- WMO. 1986. Intercomparison of models of snowmelt runoff. Operational hydrology report No. 23, World Meteorological Organization (Organisation météorologique mondiale), Genève, Suisse.