



HAL
open science

Étude hydrogéologique de l'aquifère transfrontalier Milk River (Canada-USA) : modèles géologique, conceptuel et numérique pour la gestion raisonnée de la ressource

Marie-Amélie Pétré

► **To cite this version:**

Marie-Amélie Pétré. Étude hydrogéologique de l'aquifère transfrontalier Milk River (Canada-USA) : modèles géologique, conceptuel et numérique pour la gestion raisonnée de la ressource. Sciences de la Terre. Université Paris sciences et lettres; Institut national de la recherche scientifique (Québec, Canada). Centre Eau, terre, environnement, 2016. Français. NNT : 2016PSLEM097 . tel-02388738

HAL Id: tel-02388738

<https://pastel.hal.science/tel-02388738>

Submitted on 2 Dec 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT

de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres
PSL Research University

Préparée dans le cadre d'une cotutelle entre
MINES ParisTech et l'**Institut National de la Recherche
Scientifique (INRS) - Centre Eau Terre Environnement**

**Étude hydrogéologique de l'aquifère transfrontalier
Milk River (Canada-USA) : modèles géologique, conceptuel
et numérique pour la gestion raisonnée de la ressource**

Ecole doctorale n°398 Géosciences Ressources Naturelles et Environnement

Spécialité Géosciences et géoingénierie

**Soutenue par Marie-Amélie PÉTRÉ
le 20 décembre 2016**

Dirigée par **Patrick GOBLET**
Et **Alfonso RIVERA**



COMPOSITION DU JURY :

M. René THERRIEN
Université Laval, Président du jury

M. Florent BARBECOT
Université du Québec à Montréal,
Rapporteur

M. Kevin PARKS
Alberta Energy Regulator,
Rapporteur

M. Emmanuel LEDOUX
Mines ParisTech, Invité

M. René LEFEBVRE
INRS Centre Eau Terre Environnement,
co-directeur, Membre du jury

M. Alfonso RIVERA
Commission géologique du Canada,
Membre du jury

M. Patrick GOBLET
Mines ParisTech, Membre du jury

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toute l'équipe encadrante et notamment mon directeur de thèse, Alfonso Rivera, pour m'avoir permis de travailler sur le sujet passionnant des eaux souterraines transfrontalières et pour m'avoir fait confiance dans la réalisation de ce projet. Je suis très reconnaissante envers René Lefebvre d'avoir co-encadré mes travaux de thèse et pour ses discussions toujours enrichissantes et stimulantes. Je remercie vivement Patrick Goblet et Emmanuel Ledoux d'avoir accepté de co-encadrer cette thèse et d'avoir mis en place la cotutelle avec Mines ParisTech. Je remercie également les membres du jury, René Therrien, Florent Barbecot et Kevin Parks* d'avoir accepté d'évaluer mes travaux de recherche. *Thank you Mr Parks for reviewing my reseach work.

Un grand merci à Yves Michaud (CGC) pour son soutien, notamment financier, qui m'a permis de mener à bien cette thèse dans de bonnes conditions. Je remercie Nicolas Benoît, Daniel Paradis, Christine Rivard (CGC) et Jean-Marc Ballard (INRS) pour leur sympathie et leurs conseils techniques et scientifiques tout au long de mon parcours. Merci à Clarisse Deschênes-Rancourt (INRS) pour avoir bravé le froid hivernal de l'Alberta et parcouru ses routes glacées à mes côtés lors de la campagne de terrain.

Une mention spéciale à tout le personnel administratif qui m'a aidée dans les nombreuses démarches entre l'INRS, la CGC et l'École des Mines de Paris : Dominique Vassiliadis et Véronique Lachasse (Mines ParisTech), Suzanne Dussault et Linda Aubert (INRS) et enfin Christine Laberge et Lucie Sokolyk (CGC). Merci à vous toutes pour votre dévouement auprès des étudiants.

Merci à mes collègues étudiants-chercheurs pour leur présence, les nombreuses discussions scientifiques et autres déblocages techniques et les bons moments passés autour d'une poutine ou d'une crème glacée: Marc Laurencelle, Guillaume Légaré-Couture, Pierre Ladevèze, Patrick Brunet, Jean-Sébastien Gosselin, Véronique Bouzaglou, Shiva Tirdad et ceux que j'oublie... merci à tous d'avoir été là !

Je remercie aussi les membres de ma famille qui m'ont soutenue dans ce projet. Et je garde le meilleur pour la fin... mes derniers remerciements vont à mon conjoint pour son soutien inébranlable: merci de m'avoir encouragée tout au long de cette aventure québécoise !

RÉSUMÉ

Depuis le début du 20^{ème} siècle, les eaux souterraines de l'aquifère transfrontalier Milk River (MRA) ont constitué une importante ressource dans le sud de l'Alberta (Canada) et le nord du Montana (USA). L'utilisation intensive de cette ressource sous un climat semi-aride a provoqué une baisse importante des niveaux d'eau localement, si bien que des inquiétudes concernant la pérennité du MRA sont apparues dès les années 60. Les études précédentes du MRA étaient limitées par les frontières nationales, empêchant ainsi une compréhension complète de la dynamique de l'aquifère. L'objectif de cette thèse était de réaliser une étude transfrontalière du MRA afin de caractériser cette ressource régionale d'eau souterraine selon ses limites naturelles. À cette fin, trois modèles transfrontaliers ont été développés : un modèle géologique, un modèle conceptuel hydrogéologique et un modèle numérique d'écoulement souterrain. Des travaux de terrain de part et d'autre de la frontière Canada/USA et une revue de littérature exhaustive des études précédentes ont supporté la réalisation de ces modèles. De plus, une première évaluation des niveaux d'exploitation historiques du MRA a été réalisée en Alberta.

Le modèle géologique 3D (50 000 km²) représente le MRA (Membre Virgelle de la Formation Milk River/Eagle) et ses unités confinantes continûment à travers la frontière internationale. Le développement de ce modèle a requis une harmonisation des nombreuses nomenclatures stratigraphiques de la région et la délimitation transfrontalière du MRA.

Le modèle conceptuel hydrogéologique du MRA a montré deux flux d'écoulement souterrains transfrontaliers, dirigés du Montana vers l'Alberta. La Milk River intercepte la majeure partie du flux souterrain venant du sud, si bien que l'écoulement au nord de la rivière est très faible. Les analyses isotopiques confirment que les eaux du MRA sont principalement fossiles à l'exception de la zone de recharge située le long de la zone d'affleurement du MRA. Les zones du MRA avec une forte conductivité hydraulique et de faibles concentrations en chlorures correspondent à des voies d'écoulement préférentielles. L'émergence des eaux du MRA a lieu via la drainance à travers les unités confinantes notamment le long des vallées enfouies.

Le modèle numérique (26 000 km²) d'écoulement souterrain du MRA en régime permanent est une transposition des modèles géologique et conceptuel. Il montre que le modèle conceptuel précédemment développé est hydrauliquement plausible. Le modèle d'écoulement donne une meilleure compréhension du système aquifère en représentant la dynamique de l'écoulement souterrain dans la situation pré-exploitation. Le traçage de particules indique des temps de résidence advectifs de près de 750 000 ans à la limite nord du MRA, ce qui est inférieur aux âges obtenus par les analyses isotopiques (2 Ma).

La zone au sud de la Milk River bénéficie de la totalité du flux transfrontalier venant du Montana tandis que la zone au nord de la rivière ne reçoit qu'une partie du flux de recharge provenant du sud à cause de l'interception par la Milk River. Les bilans en eau des modèles conceptuels et numériques montrent tous les deux que l'extraction de l'eau souterraine dépasse de loin la recharge au nord de la Milk River. Un modèle d'écoulement transitoire serait requis pour définir le volume d'eau provenant de l'emmagasinement dans le MRA et préciser le rôle des aquitards durant le pompage. Par ailleurs, en tant que ressource internationale partagée, une gestion transfrontalière des eaux du MRA serait justifiée dans la région comprise entre la zone de recharge au Montana et le sud de la Milk River en Alberta. Ainsi, ces trois modèles transfrontaliers du MRA forment une base commune internationale de connaissances scientifiques à l'échelle de l'aquifère et pourraient supporter l'évaluation future du meilleur usage possible de cette ressource partagée et limitée. De futurs travaux peuvent inclure l'effet des champs de gaz localisés aux limites du MRA et les conditions paléo-hydrogéologiques liées à l'évolution géochimique de l'eau souterraine.

ABSTRACT

Since the beginning of the 20th century, groundwater from the Milk River Aquifer (MRA) has been an important water resource in southern Alberta (Canada) and northern Montana (USA). The intensive use of this resource under a semi-arid climate has locally led to important drops in water levels, thus raising concerns on the MRA sustainability since the 1960s. Previous MRA studies were limited by the national boundaries, thus preventing a full understanding of the aquifer dynamics. The objective of this thesis was to carry out a transboundary study of the MRA to define this regional groundwater resource within its natural boundaries. For this purpose, three cross-border models were developed: a geological model, a conceptual hydrogeological model and a numerical groundwater flow model. These developments were supported by focused field work on both sides of the Canada/USA border and a comprehensive review of previous studies. Furthermore, a first assessment of the historical exploitation levels of the MRA was done for southern Alberta.

The 3D geological model (50,000 km²) continuously represents the MRA (Virgelle Member of the Milk River/Eagle Formation) and confining units through the international border. Development of this model required harmonization of various stratigraphic nomenclatures in the study area and the transboundary delineation of the MRA extent.

The hydrogeological conceptual model of the MRA indicated two transboundary groundwater fluxes from Montana to Alberta. The Milk River intercepts most of the groundwater flux incoming from the south, thus leading to limited groundwater flow north of the Milk River. Isotopic analyses confirm that the MRA contains mostly fossil groundwater, with the exception of the recharge area located along the outcrop area of the aquifer. Areas within the MRA with a high hydraulic conductivity and low chloride concentrations correspond to preferential groundwater flowpaths. Discharge from the aquifer occurs as vertical leakage through the overlying confining units, especially along bedrock valleys.

The numerical steady-state groundwater flow model of the aquifer system (26,000 km²) is a transposition of the geological and conceptual models, and it shows that the previously developed conceptual model is hydraulically plausible. The groundwater flow model provides a better understanding of the aquifer system by representing the dynamics of groundwater flow under pre-development conditions. Particle tracking indicates advective residence times of up to 750,000 years in the northern limit of the aquifer, which is lower than ages obtained from isotopic analyses (2 Ma).

The area south of the Milk River benefits from all of the transboundary groundwater flux from Montana whereas north of the Milk River, only a portion of the recharge flux coming from the south is transmitted due to the interception of the Milk River. Groundwater budgets from both the conceptual and numerical models show that groundwater extraction far exceeds recharge north of the Milk River. A transient model would be required to determine how much water is derived from storage in the MRA and to assess the role of the confining units during pumping. Furthermore, as an internationally shared resource, a transboundary management of the MRA would be appropriate, especially in the area comprised between the recharge area in Montana and the Canadian reach of the Milk River.

Together, these transboundary models of the MRA constitute a common international basis of scientific knowledge at the aquifer scale and could support further assessments of the best possible exploitation of the shared but limited resource. Future works could include the study of the effects of the gas fields located at the limits of the MRA as well as paleo-hydrogeological conditions relative to the geochemical evolution of groundwater.

TABLE DES MATIÈRES

<i>REMERCIEMENTS</i>	<i>iii</i>
<i>RÉSUMÉ</i>	<i>v</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>vii</i>
SECTION 1: SYNTHÈSE	1
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	3
1.1 CONTEXTE	3
1.2 PROBLÉMATIQUE	3
1.3 COOPÉRATION INTERNATIONALE ET PARTENARIATS	5
1.4 OBJECTIFS DE RECHERCHE	7
1.5 MÉTHODOLOGIE	9
1.5.1 Revue de Littérature	9
1.5.2 Traitement pour l'uniformisation des données.....	10
1.5.3 Travail de terrain.....	10
1.5.4 Modélisation géologique	11
1.5.5 Interprétation hydrogéologique	12
1.5.6 Modélisation numérique.....	14
CHAPITRE 2 RÉGION D'ÉTUDE	17
2.1 SITUATION GÉNÉRALE ET CLIMAT	17
2.2 CADRE STRATIGRAPHIQUE ET GÉOLOGIE	19
2.3 HYDROGÉOLOGIE	24
2.3.1 Surface piézométrique et écoulement souterrain.	24
2.3.2 Artésianisme.....	27

2.3.3	Paramètres hydrogéologiques	27
2.3.4	Paléo-hydrogéologie	28
2.4	GÉOCHIMIE	30
2.5	USAGE DE L'EAU	32
 CHAPITRE 3 PRINCIPAUX RÉSULTATS ET DISCUSSION		35
3.1	MODÈLE GÉOLOGIQUE 3D UNIFIÉ	35
3.1.1	Construction du modèle de référence	35
3.1.2	Unification du cadre stratigraphique et harmonisation des données géologiques ..	36
3.1.3	Modèle géologique tridimensionnel unifié	39
3.2	MODÈLE CONCEPTUEL HYDROGÉOLOGIQUE.....	44
3.2.1	Conditions hydrogéologiques.....	44
3.2.2	Conditions hydrogéochimiques.....	51
3.2.3	Modèle conceptuel.....	54
3.3	MODÈLE D'ÉCOULEMENT 3D TRANSFRONTALIER	59
3.3.1	Ajustements des conditions limites et paramètres hydrogéologiques finaux	59
3.3.2	Évaluation de la performance du calage	63
3.3.3	Bilan en eau.....	68
3.3.4	Traçage de particules	70
3.3.5	Implications sur la gestion de l'eau souterraine.....	72
 CHAPITRE 4 CONCLUSION ET PERSPECTIVES		77
4.1	CONCLUSION GÉNÉRALE	77
4.2	CONTRIBUTION ORIGINALE DE LA THÈSE.....	78
4.3	PERSPECTIVES	80
	RÉFÉRENCES	81

SECTION 2: ARTICLES89

CHAPITRE 5 THREE-DIMENSIONAL UNIFIED GEOLOGICAL MODEL OF THE MILK RIVER TRANSBOUNDARY AQUIFER (ALBERTA, CANADA - MONTANA, USA) 91

5.1	INTRODUCTION.....	93
5.2	STUDY AREA.....	95
5.3	CORRELATIONS	97
5.4	GEOLOGICAL AND HYDROSTRATIGRAPHIC SETTINGS.....	101
5.5	AVAILABLE DATA AND METHODS	108
5.6	METHOD: DATA PROCESSING AND UNIFICATION OF THE GEOLOGICAL DATA.....	109
5.7	CONSTRUCTION OF THE 3D UNIFIED GEOLOGICAL MODEL.....	112
5.8	RESULTS	114
5.9	DISCUSSION.....	122
5.10	CONCLUSION AND PERSPECTIVES.....	126
5.11	ACKNOWLEDGMENTS	127
5.12	REFERENCES.....	128

CHAPITRE 6 A UNIFIED HYDROGEOLOGICAL MODEL OF THE MILK RIVER TRANSBOUNDARY AQUIFER, TRAVERSING ALBERTA (CANADA) AND MONTANA (USA).....135

6.1	INTRODUCTION.....	138
6.2	STUDY AREA AND MILK RIVER AQUIFER EXTENT.....	139
6.3	METHODS.....	142
6.4	GROUNDWATER USE	142
6.5	HYDROGEOLOGICAL SETTING	145
6.5.1	Hydrostratigraphy	145
6.5.2	Transmissivity of the aquifer	147
6.5.3	Potentiometric map, groundwater flow paths and artesian conditions	149
6.5.4	Transboundary groundwater fluxes.....	151

6.5.5	Recharge areas	152
6.5.6	Discharge areas	153
6.5.7	Cross formational flow	154
6.6	HYDROGEOCHEMICAL CONDITIONS.....	157
6.6.1	Water types and major ions	157
6.6.2	Stable and Radiogenic Isotopes	163
6.7	CONCEPTUAL MODEL	167
6.8	GROUNDWATER BUDGET	172
6.9	CONCLUSION	175
6.10	ACKNOWLEDGMENTS	176
6.11	APPENDIX.....	176
6.12	REFERENCES.....	177

CHAPITRE 7 STEADY-STATE REGIONAL GROUNDWATER FLOW MODEL OF THE MILK RIVER TRANSBOUNDARY AQUIFER (ALBERTA, CANADA- MONTANA, USA) 185

7.1	INTRODUCTION.....	188
7.2	STUDY AREA AND GEOLOGY	190
7.3	CONCEPTUAL HYDROGEOLOGICAL MODEL.....	192
7.4	GROUNDWATER FLOW MODEL.....	193
7.4.1	Conversion from the geological model to the numerical model	193
7.4.2	Model design	194
7.4.3	Boundary conditions and recharge	195
7.4.4	Hydraulic conductivity of the hydrostratigraphic units.....	197
7.5	CALIBRATION CRITERIA	198
7.5.1	Calibration target	199
7.5.2	Cross-formational flow	200
7.5.3	Qualitative information	200
7.6	ADJUSTMENTS OF BOUNDARY CONDITIONS AND HYDRAULIC PARAMETERS.....	201
7.7	ASSESSMENT OF THE CALIBRATION PERFORMANCE	203
7.8	WATER BALANCE	209

7.9	PARTICLE TRACKING	211
7.10	PARAMETER SENSITIVITY ANALYSIS.....	214
7.11	MODEL LIMITATIONS.....	217
7.12	IMPLICATIONS FOR GROUNDWATER MANAGEMENT	219
7.13	CONCLUSION	221
7.14	ACKNOWLEDGEMENTS	222
7.15	REFERENCES.....	222

ANNEXES..... 227

	Annexe I- Dépliant de la présentation des travaux de terrain.....	227
	Annexe II- Sondage réalisé auprès des municipalités et communautés de la région d'étude sur l'actuel usage de l'eau souterraine (correspond à <i>l'electronic supplementary material</i> du Chapitre 6)	227
	Annexe III- Modèle géologique tri-dimensionnel	227
	Annexe IV- Base de données géochimique.....	227
	Annexe V- Données géochimiques pour la détermination des types d'eau souterraine ...	227
	Annexe VI- Données de Niveaux d'eau- points de contrôle	227
	Annexe VII- Évaluation préliminaire des niveaux d'exploitation historiques des eaux de l'aquifère Milk River dans le sud de l'Alberta, Canada.....	227
	Annexe VIII- Données d'exploitation historique des eaux de l'aquifère Milk River dans le sud de l'alberta, Canada	227
	Annexe IX- Données de transmissivité- points de contrôle.....	227
	Annexe X- Bilan hydrologique mensuel en Alberta, Canada et au Montana, États-Unis..	227

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Parties prenantes du projet MiRTAP selon les trois niveaux de juridiction.....	6
Figure 1.2 Les trois étapes successives de l'étude transfrontalière de l'aquifère Milk River, correspondant aux trois articles présentés dans la thèse.....	9
Figure 1.3 Composantes du modèle conceptuel hydrogéologique de l'aquifère Milk River.....	13
Figure 2.1 Région d'étude.....	18
Figure 2.2 Tableau comparatif des nomenclatures stratigraphiques existantes dans la zone d'étude (modifiée de Rice et Cobban 1977, Meijer-Drees et Mhyr 1981 et Payenberg et al. 2002). * indique que la formation Lea Park peut être définie jusqu'à la Formation Pakowki, suivant Meijer-Drees et Mhyr (1981) et Dawson et al. (1994).	20
Figure 2.3 Carte géologique de la roche en place (modifiée d'Okulitch et al. 1996).	24
Figure 2.4 Cartes piézométriques historiques de l'aquifère Milk River dans la région d'étude... ..	25
Figure 2.5. Concentrations en chlorures (mmol/l) dans l'aquifère Milk River (Hendry et Schwartz 1988).	31
Figure 3.1 Coupe géologique transfrontalière avant l'unification du cadre stratigraphique.	36
Figure 3.2 Nomenclature stratigraphique proposée dans la présente étude et représentation des formations géologiques décrites dans le modèle géologique 3D. À noter que la Formation Two Medicine a été subdivisée en trois membres (équivalents des formations Judith River et Claggett et du Membre Deadhorse Coulee). Le cadre correspondant à la Formation Bearpaw contient aussi les sédiments superficiels dans le modèle 3D.	37
Figure 3.3 Modèle géologique 3D unifié de l'aquifère Milk River et des autres unités géologiques. a) Bloc 3D unifié indiquant la localisation des coupes géologiques. Le facteur d'exagération verticale est de 50. b) Coupe transfrontalière A-A' orientée sud-nord. Les flèches noires représentent la direction générale de l'écoulement souterrain d'après Meyboom (1960), Levings (1982) et Tuck (1993).	41
Figure 3.4 Élévation du toit de la Formation Milk River. L'intervalle entre chaque contour est de 50 m. L'aire grise correspond à la zone d'affleurement (ou de sous-affleurement) de la Formation Milk River.....	41
Figure 3.5 Limite géologique transfrontalière de l'aquifère Milk River.....	43
Figure 3.6 Carte transfrontalière de la transmissivité T de l'aquifère Milk River (valeurs krigées à partir des points de données disponibles indiqués sur la carte).	45
Figure 3.7 Carte piézométrique transfrontalière de l'aquifère Milk River. L'intervalle entre chaque contour est de 20 m.....	48

Figure 3.8 Gradients hydrauliques verticaux au sud de l'Alberta entre a) les sédiments superficiels et l'aquifère Milk River et b) l'aquifère Milk River et l'unité de grès sous-jacente Bow Island. c) diagramme représentant les tendances des flux verticaux (pas à l'échelle).	50
Figure 3.9 a) Diagramme de Piper montrant les six types d'eau identifiés dans l'aquifère Milk River b) Distribution spatiale des types d'eau souterraine dans la zone d'étude.	52
Figure 3.10 Concentration en chlorures dans l'aquifère Milk River. L'intervalle entre chaque contour est de 200 mg/L. Les lignes d'écoulement préférentielles indiquées par les flèches bleues sont déduites des faibles concentrations en chlorures.	53
Figure 3.11 Coupe hydrogéologique de l'aquifère Milk River située le long d'une ligne d'écoulement. La localisation de la coupe est indiquée au chapitre 6 (Figure 6.2).	55
Figure 3.12 Modèle conceptuel géochimique de l'aquifère Milk River représenté par une coupe partant des Sweetgrass Hills (Montana, États-Unis) vers la limite nord-est de l'aquifère en Alberta, Canada. Les types d'eau sont décrits selon la distribution spatiale de la figure 3.9b. La direction de l'écoulement dans l'aquifère Milk River est indiquée par des flèches noires. Le temps de résidence de l'eau souterraine indiqué est basé sur les données isotopiques (ka signifie millier d'années et Ma signifie million d'années)	57
Figure 3.13 Vue en plan du modèle conceptuel de l'aquifère Milk River.	58
Figure 3.14 Conditions aux limites du modèle numérique d'écoulement	60
Figure 3.15 Graphique des charges hydrauliques observées en fonction des charges hydrauliques simulées (en m.a.s.l) dans l'aquifère Milk River selon les différentes zones de calage. L'intervalle de calage (+/-50 m) est représenté (lignes pointillée grise). Les cibles de calage correspondant aux puits de monitoring sont indiquées en tant que « data » dans la légende. Les charges mesurées au sud de l'Alberta proviennent de l'interprétation de la piézométrie de 1960 de Toth et Corbet (1986).	64
Figure 3.16 Distribution spatiale des niveaux de calage des points d'observations dans l'aquifère Milk River.	66
Figure 3.17 Comparaison des cartes piézométriques observées et simulées	67
Figure 3.18 Conditions artésiennes simulées dans l'aquifère Milk River	68
Figure 3.19 Comparaison entre les composantes du bilan en eau souterraine issues du modèle conceptuel (Pétre et al. 2016) et du modèle numérique d'écoulement.	69
Figure 3.20 Traçage de particule inversé (temps de résidence en années) depuis le lac Pakowki. Les lignes équipotentielles sont aussi représentées. La localisation de la coupe est indiquée sur la figure 7.2 (Chapitre 7)	70
Figure 3.21 Traçage de particules inverse depuis la Milk River	71

Figure 3.22 Traçage de particules direct à partir de nœuds de l'aquifère Milk River..... 72

Figure 5.1 Successive stages of the Milk River transboundary aquifer study; this paper presents the initial step, the development of a 3D unified geological model. 95

Figure 5.2 Study area and extent of the Milk River Aquifer. "S.G. Arch" stands for Sweet Grass Arch..... 96

Figure 5.3 Comparative stratigraphic nomenclatures existing in the study area (modified from Rice and Cobban 1977; Meijer-Drees and Mhyr 1981 and Payenberg et al. 2002).* The Lea Park Formation may be drawn all the way through the Pakowki Formation, following Meijer-Drees and Mhyr (1981) and Dawson et al. (1994). 97

Figure 5.4 Proposed stratigraphic nomenclature in the present study and representation of the geological formations described in the 3D geological model (zones shown on Fig. 5a). Note that the Two Medicine Formation has been subdivided into three members (Judith River Formation, Claggett Formation and Deadhorse Coulee Member equivalents). The Bearpaw Formation box also includes the surficial sediments in the 3D model..... 99

Figure 5.5 a) Bedrock geological map of the study area (Adapted from Okulitch et al. 1996). b) Cross-section (indicated by "S-N" in Fig. 5.5a) showing the unconformity surface separating the Alderson Member from the three other members of the Milk River Formation. The encasing units are not represented on this cross section (Adapted from O'Connell 2014). 100

Figure 5.6 Stratigraphy and hydrostratigraphy of the main geological units of the study area.. 101

Figure 5.7 Transboundary cross-section (south-north) before the unification of the Milk River/Eagle Formation. The geological units above the Milk River/Eagle Formation are not represented in this section. The location of the cross-section is shown in Fig. 5.9a. 113

Figure 5.8. Examples of geo-referenced cross-sections included in the 3D geological model. 114

Figure 5.9 3D unified geological model of the Milk River Aquifer and other geological units. a) 3D unified block showing the locations of cross-sections. Vertical exaggeration factor is 50. Cross-sections A-A', B-B' and C-C' are transboundary, cross-section D-D' is located in southern Alberta and cross-section E-E' is located in northern Montana. b) Cross-sections through the 3D geological model. The black arrows represent the general groundwater flow directions. Legend for block diagram (Fig. 5.9a) and cross-sections (Fig. 5.9b)..... 118

Figure 5.10. Unified elevation contours of the top of several geological units (left) and isopach maps (right). The elevation reference is the mean sea level and the thickness is in meters. These maps are derived from the 3D geological model which comes from the various sources previously described in the "Data Collection" section. a) Elevation and thickness of the Milk River Formation (including Telegraph Creek, Virgelle, Deadhorse Coulee and

Alderson Members). b) Elevation and thickness of the Virgelle Member. c) Elevation and thickness of the Alderson Member. d) Elevation and thickness of the Pakowki/Claggett Formation.	120
Figure 6.1 Successive stages of the MRA study. This paper addresses the second step – the development of a unified hydrogeological conceptual model of the aquifer system.....	139
Figure 6.2 Study area, topography elevation and extent of the MRA. “S.G.Arch” stands for Sweet Grass Arch	141
Figure 6.3 Total estimated groundwater use from the MRA in southern Alberta, Canada.....	143
Figure 6.4 Water level of the Foremost observation well (AENV Id #221) (<i>black dots</i>) and annual groundwater diversion (<i>gray bars</i>) for the village of Foremost (HCL consultants 2004; Alberta Environment and Parks 2015)	144
Figure 6.5 Geological cross-section of the Milk River Formation and overlying and underlying geologic units. The location of the cross section is shown on Fig. 6.2. The geology of the igneous intrusives of the Sweet Grass Hills (including Middle Butte) is not represented and is assimilated to the Colorado Group.	147
Figure 6.6 Transboundary map of transmissivity T (kriged from available data points shown on the map) in the MRA.....	148
Figure 6.7 Transboundary potentiometric surface map of the MRA.....	150
Figure 6.8 Vertical hydraulic gradients in southern Alberta between a overlying surficial sediments and the MRA and b the MRA and the underlying Bow Island Sandstone. Negatives values reflect upward flow. c Vertical flow tendencies schematically represented in the diagram (not to scale)	156
Figure 6.9 a Piper diagram showing the six water types identified in the MRA b Spatial distribution of groundwater types in the study area	158
Figure 6.10 Cl concentrations in the MRA. Contour interval is 200 mg/L. Preferential flowpaths indicated by <i>blue arrows</i> are inferred from low Cl concentrations	162
Figure 6.11 Isotopic maps of the MRA; a ^3H concentration (in tritium units, TU) b ^{14}C concentration in dissolved inorganic carbon (DIC, in percent modern carbon) c $\delta^{13}\text{C}$ concentration in dissolved inorganic carbon (‰) d $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ ratio ($\times 10^{-15}$) and mean age calculated from equation (1) (see Appendix; Bentley et al. (1986))	164
Figure 6.12. Delineation of three natural zones (zone 1a/b, zone 2, and zone 3) of the MRA and their surface areas.....	167
Figure 6.13 Hydrogeological cross-section of the MRA located along a flow line. Location of the cross-section is shown on Fig. 6.2.....	169

Figure 6.14 Geochemical conceptual model of the MRA represented by a schematic cross-section from the Sweet Grass Hills (Montana, USA) to the north-eastern limit of the MRA in Alberta, Canada.....	171
Figure 6.15 Plan view of the conceptual model of the MRA	172
Figure 6.16 a Groundwater budget in zone 1 (see location on Fig. 6.2). The recharge located south of the Milk River (zone 1a) is mostly intercepted by the Milk River as the water flows down-gradient. The remaining flux beyond the Milk River corresponds to the inflow in zone 1b. b Comparison of the components of the budget which are in deficit in zone 1b. The reference of the scaling is taken from the recharge (100 %)	174
Figure 7.1 Successive stages of the MRA study. This paper addresses the third step- the development of the numerical groundwater flow model of the aquifer and its implications on the groundwater management	189
Figure 7.2 Study area and limits of the groundwater flow model	191
Figure 7.3 Conceptual model of the MRA. Location of the cross-section is shown on Fig. 7.2. (modified from Pétré et al. 2016)	193
Figure 7.4 Three-dimensional numerical model with geological units.	195
Figure 7.5 Boundary conditions in the model domain.....	196
Figure 7.6 Hydraulic conductivity of the Milk River Aquifer (derived from Pétré et al. 2016)	197
Figure 7.7 Location of the MRA water-level observation points in the model domain. A distinction is made between the observation points derived from historical potentiometric maps (<i>squares</i>) and those corresponding to monitoring wells (<i>triangles</i>).	201
Figure 7.8 Plot of simulated versus measured heads in the Milk River aquifer, for the calibration zones. The calibration target interval (+/- 50m) is also shown (grey dashed lines). The calibration targets derived from monitoring wells are indicated as “data” in the legend. The measured heads in southern Alberta are from Toth and Corbet’s (1986) interpretation. ...	205
Figure 7.9 Spatial distribution of levels of hydraulic head calibration for the observation points in the MRA	207
Figure 7.10 Comparison of observed and simulated potentiometric surfaces.....	208
Figure 7.11 Artesian conditions in the Milk River Formation.....	209
Figure 7.12 Comparison between the groundwater budget components from the conceptual model (Pétré et al. 2016) and the numerical model.....	211
Figure 7.13. Backward particle tracking (travel time in years) from the Pakowki Lake area. The hydraulic heads contours (m.a.s.l.) are also shown. The location of the cross-section is shown in Fig. 7.2	212

Figure 7.14 Backward particle tracking (residence time in years) from the nodes along the Milk River.....	213
Figure 7.15 Forward particle tracking from nodes in the MRA.....	214
Figure 7.16 Plots showing the parameter sensitivity analysis of the RMSE and calibration level 1 (for each calibration zone) to the following parameters: a) Recharge rate b) Anisotropy ratio of the Belly River Formation c) Anisotropy ratio of the Pakowki Formation d) Hydraulic conductivity of the Pakowki Formation e) Hydraulic conductivity of the bedrock valleys f) Hydraulic conductivity of the MRA in the south-east corner of the study area	217

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1 Gammes de valeurs initiales de conductivité hydraulique horizontale et d'anisotropie verticale pour chaque unité hydrostratigraphique et leurs valeurs finales dans le modèle numérique calé.....	62
Tableau 3-2 Niveau de calage pour les charges simulées dans l'aquifère Milk River	65
Table 6-1 Estimates of the two transboundary groundwater fluxes across the international border from Montana to Alberta	152
Table 6-2 Location of water types in the MRA.....	159
Table 6-3 Proposed processes explaining the geochemical patterns in the MRA.....	160
Table 7-1 Ranges of hydraulic conductivity and vertical anisotropy for each hydrostratigraphic units and their final (calibrated) values.....	203
Table 7-2 Hydraulic head calibration performance of the groundwater flow model in the calibration zones.....	204
Table 7-3 Levels of calibration for the simulated heads in the Milk River Aquifer.....	206

SECTION 1: SYNTHÈSE

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

Cette thèse de doctorat a été initiée dans le cadre du projet MiRTAP (Milk River Transboundary Aquifer), lancé en 2009 par la Commission géologique du Canada et faisant partie du programme géoscientifique des eaux souterraines. Ce programme fédéral a pour objectif d'évaluer une trentaine d'aquifères et de rendre accessibles les données ainsi acquises sur le réseau d'information sur les eaux souterraines (GIN 2015). L'aquifère Milk River, qui est l'objet de cette thèse, est l'un des dix aquifères transfrontaliers identifiés entre le Canada et les États-Unis (IGRAC 2015).

La problématique des aquifères transfrontaliers fait l'objet d'une attention grandissante de la part de la communauté internationale. Plusieurs ouvrages à portée internationale spécifiant les enjeux spécifiques à la caractérisation et la gestion de ces ressources partagées ont notamment vu le jour (Machard de Gramont et al. 2010; RIOB 2013). Depuis 2010, l'aquifère Milk River a rejoint l'inventaire des aquifères transfrontaliers établi par le programme ISARM (Internationally Shared Aquifer Resource Management) (ISARM 2016). L'initiative ISARM a été lancée en 2002 par le Programme International Hydrologique (PHI) de l'UNESCO et a déjà identifié plus de 360 aquifères transfrontaliers à travers le monde. Cette initiative encourage les pays qui partagent une même ressource en eau souterraine à travailler conjointement vers un développement de l'aquifère qui soit durable et bénéfique pour toutes les parties. Par ailleurs, les travaux de cette thèse respectent les recommandations et les principes généraux portant sur l'étude des aquifères transfrontaliers formulés dans la résolution 68/118 sur le droit des aquifères transfrontaliers, adoptée par l'Assemblée générale des Nations Unies en décembre 2013 (Assemblée Générale des Nations Unies 2013). Ces recommandations portent notamment sur l'obligation générale de coopérer avec les États partageant la même ressource et de partager les données et informations relatives au système aquifère transfrontalier.

1.2 Problématique

Le sud de l'Alberta au Canada et le nord du Montana aux États-Unis connaissent un climat semi-aride. L'eau souterraine y est une ressource particulièrement précieuse; d'autant plus que la région a été classée comme connaissant une « forte menace sur la disponibilité de l'eau de

surface » (Environnement Canada 2012). Cela suggère que l'usage de l'eau souterraine pourrait faire l'objet de tensions et devenir un enjeu.

La province de l'Alberta et l'état du Montana partagent l'aquifère Milk River. Il a été reconnu depuis longtemps que l'usage intensif de l'eau souterraine de l'aquifère Milk River depuis le début du 20^{ème} siècle a engendré une baisse des niveaux d'eau importante et une disparition du caractère artésien de nombreux puits en Alberta (Meyboom 1960; AGRA Earth and Environmental Limited 1998). Des inquiétudes concernant la pérennité de cette ressource sont apparues dès les années 1960. Meyboom (1960) et Borneuf (1976) ont notamment dénoncé le manque de gestion de cette ressource en Alberta et le gâchis engendré par les puits artésiens qui coulaient librement à la surface du sol depuis des dizaines d'années.

Suite à une étude plus récente sur la déplétion de l'aquifère (AGRA Earth and Environmental Limited 1998), des recommandations pour la conservation de la ressource ont été émises. Il s'en est suivi un programme de conservation de 5 ans (1999-2004) lors duquel de nombreux puits ont été abandonnés (incluant des puits artésiens coulant librement). Malheureusement, il n'y a pas eu de suivi des niveaux d'eau à la suite de ce programme. Néanmoins, l'aquifère Milk River est toujours sollicité de part et d'autres de la frontière internationale et aucun accord n'a été établi entre le Canada (Alberta) et les États-Unis (Montana) pour le partage et l'utilisation de cette ressource commune.

En effet, l'eau souterraine est toujours une ressource principale pour l'usage domestique, municipal et pour l'abreuvement du bétail dans la région. Il n'y a pas d'obligation pour le propriétaire de puits de déclarer les volumes d'eau annuels prélevés. La demande en eau souterraine (historique et actuelle) provenant de l'aquifère Milk River n'est donc pas connue avec précision; seules des estimations pour des régions de la zone d'étude sont disponibles (Meyboom 1960; Zimmerman 1967; AGRA Earth and Environmental Limited 1998; HCL consultants 2004).

L'aquifère Milk River a fait l'objet de nombreuses études qui étaient toutes limitées par la frontière internationale (Meyboom 1960; Hendry et al. 1991; Alberta Innovates Technology Future 2010) ou encore par les limites des comtés (Stantec 2002; HCL consultants 2004; HCL consultants 2007). Une seule étude transfrontalière a néanmoins été menée par Robertson (1988), mais elle a une portée à l'échelle locale (moins de 300 km²).

Le manque d'étude transfrontalière peut s'expliquer par les raisons suivantes :

- Bien que l'étendue de l'aquifère en Alberta ait été globalement définie (Meyboom 1960; Printz 2004), sa délimitation au Montana n'a pas été clairement déterminée.
- De nombreuses nomenclatures stratigraphiques sont en usage dans la région d'étude. Les formations géologiques ne portent pas le même nom de part et d'autre de la frontière et les membres qui les constituent ne sont pas toujours définis de manière équivalente en Alberta et au Montana, ce qui rend toute étude transfrontalière particulièrement complexe.
- Les auteurs des précédentes études n'avaient pas nécessairement accès à la zone au-delà de la frontière, ou n'avaient pas accès aux données provenant de cette zone. En effet, le caractère transfrontalier et international de l'aquifère rend difficile l'accès et l'échange des données provenant de l'ensemble de la zone d'étude.

Ces raisons ont empêché une représentation complète de l'aquifère et une compréhension globale de sa dynamique selon ses limites physiques (et non politiques).

Afin de gérer cette ressource partagée de manière responsable et raisonnée, un portrait complet et actuel de l'aquifère est nécessaire à travers une étude hydrogéologique transfrontalière. Cette étude doit considérer les limites hydrogéologiques de l'aquifère à travers la frontière Canada/USA.

1.3 Coopération internationale et partenariats

L'étude hydrogéologique transfrontalière de l'aquifère Milk River implique de coopérer avec les parties prenantes des deux côtés de la frontière internationale. La présente étude entre le Canada et les États-Unis doit impliquer 6 niveaux juridiques (3 dans chaque pays) :

- Niveau fédéral (Canada, États-Unis)
- Niveau de la province de l'Alberta et de l'état du Montana
- Niveau municipal (en Alberta et au Montana)

La figure 1.1 présente les parties prenantes de l'étude. Plusieurs partenaires ont été identifiés et impliqués dès le début du projet MiRTAP en 2009 (Milk River Watershed Council Canada, Alberta Environnement, US Geological Survey). D'autres partenaires ont été intégrés plus tard au cours de la présente thèse (Montana Bureau of Mines and Geology, Department of Natural Resources and Conservation).

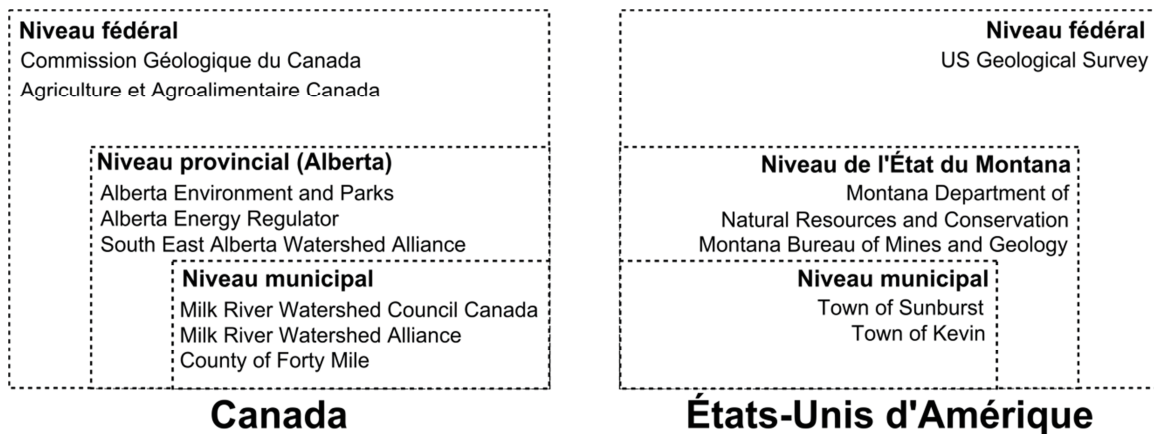


Figure 1.1: Parties prenantes du projet MiRTAP selon les trois niveaux de juridiction.

Plusieurs réunions de coordination et activités de coopération ont eu lieu au cours de ce travail de thèse :

- Décembre 2011 : Rencontre des partenaires de l'USGS (Helena, Montana). Recensement des données géologiques disponibles au Montana. **(M.-A. Pétré)**
- Avril 2012 : Réunion des parties prenantes canadiennes et américaines (Milk River, Alberta). Présentation des objectifs détaillés de l'étude et de l'avancement des travaux de développement du modèle géologique. **(M.-A. Pétré et A. Rivera)**
- Décembre 2012 (lors de la campagne de terrain en Alberta) : Réunion avec les partenaires canadiens (MRWCC, Alberta Environnement, SEAWA) pour rendre compte des travaux effectués sur le terrain. Rencontre de foreur (BCEC Drilling Ltd.) et de responsable de municipalité du sud de l'Alberta (ville de Taber). **(M.-A. Pétré)**
- Février 2013 : Rencontre avec les partenaires d'Alberta Environnement (Edmonton, Alberta) pour mettre au point le contenu de l'accord de partage de données avec la CGC. **(M.-A. Pétré)**
- Août 2013 : Rencontre avec les partenaires de l'USGS (Helena, Montana) afin de coordonner les travaux de terrain au Montana. **(M.-A. Pétré et A. Rivera)**
- Novembre 2013 : Collaboration avec R. Davison, consultant pour Davison Environmental Consulting, afin d'élaborer le contenu du contrat de service pour le travail de terrain additionnel en Alberta. **(M.-A. Pétré et A. Rivera)**
- Mai 2014 : Création et mise en ligne d'un site internet (<http://milkrivertransboundaryaquifer.weebly.com/>) présentant le projet de thèse et ses avancées à des fins de communication. Ce site a également permis d'identifier de

nouveaux partenaires potentiels comme le secrétariat transfrontalier de l'Alberta Environment and Sustainable Resource Development (ESRD). (**M.-A. Pétré**)

- Mars 2015 : Réunion de clôture du projet MiRTAP (CGC) en vidéo-conférence avec l'ensemble des partenaires du projet. (**M.-A. Pétré** et A. Rivera)

La coopération transfrontalière implique également le partage de données entre les partenaires. Les nouvelles données collectées sur le terrain ont été transmises aux partenaires américains et canadiens et seront accessibles à la fin 2016 dans les bases de données publiques du Montana (GWIC 2015) et du Réseau d'information sur les eaux souterraine de Ressources Naturelles Canada (GIN 2015).

1.4 Objectifs de recherche

Le caractère transfrontalier de l'aquifère Milk River a rendu jusqu'à présent son étude incomplète. En vue de la bonne gestion de cette ressource partagée, cette thèse propose de dépasser les limites juridictionnelles et de mener la première étude complète de l'aquifère. L'étude transfrontalière de l'aquifère Milk River s'articule ainsi selon trois (3) objectifs de recherche :

1) Création d'un modèle géologique unifié de l'aquifère

Le modèle géologique unifié de l'aquifère est la première composante du portrait intégré de la ressource et constitue un prérequis à toute étude hydrogéologique. Il est en effet nécessaire de bien comprendre la géologie, la stratigraphie et la géométrie des unités géologiques de la région avant de mener une étude hydrogéologique. Plus précisément, ce premier objectif porte sur les éléments suivants :

- Comprendre et unifier le cadre stratigraphique de la zone d'étude
- Délimiter l'étendue transfrontalière de l'aquifère Milk River
- Construire un modèle géologique transfrontalier de l'aquifère et des unités confinantes
- Déduire les implications hydrogéologiques du modèle géologique unifié

La réalisation de cet objectif a été documentée dans un 1^{er} article scientifique (Fig. 1.2; Chapitre 5)

2) Développement du modèle conceptuel hydrogéologique de l'aquifère

Lorsque la géologie, la stratigraphie et les limites de l'aquifère ont été comprises et bien définies à travers la frontière internationale, le second objectif de l'étude a été le développement du modèle conceptuel hydrogéologique de l'aquifère. Le modèle conceptuel hydrogéologique permet d'illustrer qualitativement le fonctionnement de l'aquifère et se concentre sur les tâches suivantes :

- Caractériser et donner une première approche quantitative de l'écoulement souterrain transfrontalier à l'échelle de l'aquifère
- Évaluer les flux inter-formation et les relations entre eau de surface et eau souterraine
- Rendre compte des propriétés hydrogéologiques de l'aquifère dans l'ensemble de la zone d'étude
- Définir les types d'eaux souterraines et leur évolution géochimique
- Déterminer le temps de résidence de l'eau souterraine

Le modèle conceptuel de l'aquifère Milk River a fait l'objet d'un second article scientifique (Fig. 1.2, Chapitre 6)

3) Construction d'un modèle numérique

Le troisième objectif de recherche est le développement d'un modèle numérique d'écoulement transfrontalier de l'aquifère. Ce modèle correspond à la transposition des modèles géologique et conceptuel au sein d'un modèle numérique. Le modèle numérique d'écoulement est développé à des fins d'interprétation du système aquifère. Le modèle est opéré en régime permanent (non dépendant du temps) afin de :

- Tester les hypothèses de fonctionnement de l'aquifère qui ont été proposées dans le modèle conceptuel
- Comparer les âges convectifs simulés avec les temps de résidence obtenus dans le modèle conceptuel
- Quantifier les composantes du bilan en eau souterraine dans la situation pré-développement, soit avant son exploitation par des puits
- Évaluer les niveaux d'exploitation historiques de l'aquifère

Un troisième article scientifique a été rédigé afin de documenter la réalisation de ce troisième objectif (Fig. 1.2, Chapitre 7)

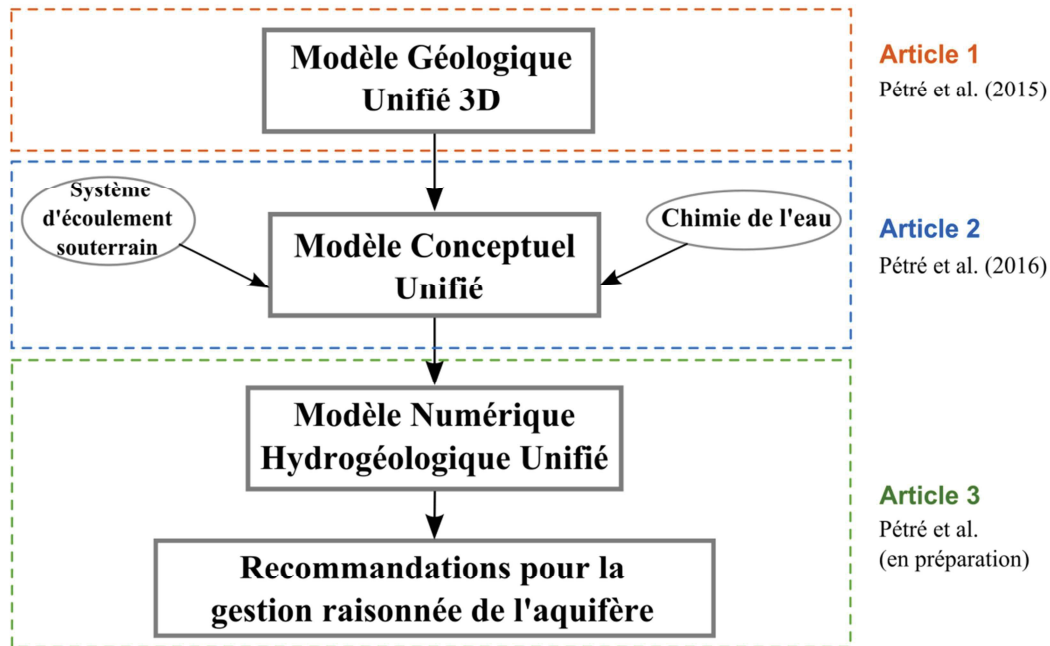


Figure 1.2 Les trois étapes successives de l'étude transfrontalière de l'aquifère Milk River, correspondant aux trois articles présentés dans la thèse.

1.5 Méthodologie

1.5.1 Revue de Littérature

Afin de dresser un portrait transfrontalier de l'aquifère Milk River, une revue de littérature exhaustive a tout d'abord été entreprise de chaque côté de la frontière. Cette étape comprend le recueil des précédentes études géologiques, stratigraphiques, hydrogéologiques et géochimiques dans la zone d'étude. De plus, les bases de données publiques (rapport de forage, réseau de puits d'observation, données climatiques et hydrologiques) au niveau fédéral et provincial ont été répertoriées. L'aquifère Milk River a une étendue régionale et les données hydrogéologiques qui lui sont associées sont éparses et inégalement réparties. En Alberta, l'aquifère a été étudié par de nombreux auteurs dans les années 60 et 80 (Meyboom 1960; Swanick 1982; Toth et Corbet 1986; Hendry et Schwartz 1988) et plus récemment par des consultants en hydrogéologie (AGRA Earth and Environmental 1998; Stantec 2002; HCL consultants 2004; HCL consultants 2007). Ces derniers ont produit des rapports d'évaluation de l'aquifère commandés par des comtés ou districts du sud de l'Alberta. Au Montana, les études de l'aquifère Milk River sont beaucoup moins nombreuses qu'en Alberta et proviennent en

majorité de l'USGS Wyoming-Montana Water Science Center et du Montana Bureau of Mines and Geology (Tuck 1993; Norbeck 2006).

1.5.2 Traitement pour l'uniformisation des données

Les données utiles à l'étude de l'aquifère ont été numérisées et traitées à des fins d'harmonisation (mêmes unités et même référence spatiale). En effet, les données provenant de deux pays et couvrant une large région (50 000 km²) présentent des unités, des systèmes de coordonnées et des références spatiales différentes. Cette étape d'uniformisation des données est déterminante pour la réalisation des modèles transfrontaliers à l'échelle de l'aquifère.

1.5.3 Travail de terrain

La revue de littérature a permis de mettre en évidence les parties de la région d'étude les moins étudiées où le manque de données est le plus important. Afin de collecter de nouvelles données, particulièrement dans les zones les moins étudiées, trois campagnes de terrain ont été effectuées lors de ce projet de thèse.

Les objectifs de ces travaux de terrains étaient de :

- 1) Mesurer les niveaux d'eau statiques des puits exploitant l'aquifère Milk River
- 2) Collecter des échantillons d'eau souterraine pour l'analyse isotopique (tritium, carbone-14 et chlore-36)
- 3) Mesurer la pression des puits artésiens jaillissant
- 4) Mener un sondage auprès des propriétaires de puits afin de connaître les usages actuels et le statut des puits

Campagne de terrain n°1 (Décembre 2012, Alberta)

Cette campagne de terrain a été réalisée dans le sud de l'Alberta par l'étudiante (Marie-Amélie Pétré), Clarisse Deschêne-Rancourt (INRS-ETE) et Daryl Jacques (PFRA AgriFood Canada, Regina). Afin de préparer cette campagne, une brochure expliquant les objectifs de l'étude et les activités prévues sur le terrain a été réalisée par l'étudiante et envoyée aux parties prenantes du projet et aux propriétaires de puits (Annexe I). Au total, 24 puits ont été visités, 17 échantillons d'eau souterraine ont été collectés et 13 niveaux d'eau statiques ont été mesurés. Concernant les analyses isotopiques, 17 échantillons ont été analysés pour le carbone-14; 16 échantillons

ont été analysés pour le tritium (laboratoire Eilab de Waterloo, Canada) et 10 échantillons ont été analysés pour le chlore-36 (laboratoire PrimeLab, Purdue University, USA). Un sondage a aussi été mené auprès des propriétaires des puits échantillonnés.

Campagne de terrain n°2 (été 2013, Montana)

Cette campagne de terrain a été préparée par l'étudiante en coopération avec le bureau de l'USGS à Helena (Montana) qui a réalisé les travaux de terrain. Cette campagne a permis de collecter 11 échantillons d'eau souterraine qui ont tous été analysés pour le tritium et carbone-14 (Laboratoire Eilab, Waterloo, Canada) et pour le chlore-36 (Center for AMS, Livermore, USA). Un sondage a aussi été réalisé auprès des propriétaires des puits échantillonnés.

Il est à noter que les paramètres physico-chimiques ont été mesurés *in situ* pour tous les échantillons d'eau souterraine. Cependant, l'analyse des ions majeurs a été réalisée uniquement lors de la campagne de terrain n°2 au Montana.

Campagne de terrain n°3 (décembre 2013, Alberta)

Un travail complémentaire en Alberta a été préparé par l'étudiante afin de compléter les sondages sur l'utilisation de l'eau souterraine et de mesurer les pressions des puits artésiens. La réalisation de ce travail a été confiée à Davison Environmental Consulting qui a collecté 4 mesures de pression de puits artésiens et mesuré 10 niveaux d'eau statiques. Le sondage a été réalisé auprès de municipalités et communautés du sud de l'Alberta et du nord du Montana. (Annexe II).

1.5.4 Modélisation géologique

Le modèle géologique 3D a été réalisé en compilant des données géologiques variées provenant de dix sources différentes. Ces jeux de données incluent notamment des diagraphies, des données de topographie du socle rocheux et d'élévation du toit d'unités géologiques ainsi que des coupes géologiques.

Afin de pouvoir utiliser ces données pour construire le modèle géologique, un travail spécifique sur le cadre stratigraphique de la région était nécessaire. En effet, les données géologiques collectées présentent non seulement des types et des unités variées mais elles suivent également différentes nomenclatures stratigraphiques qui sont en usage dans la région d'étude.

Ainsi, il était d'abord requis d'unifier le cadre stratigraphique de la région d'étude dans le but de construire un modèle qui représente les mêmes couches géologiques de part et d'autre de la

frontière. Une revue de littérature portant sur l'évolution des nomenclatures et sur les récents travaux de corrélations stratigraphiques a été réalisée afin d'émettre des hypothèses de travail et de proposer un cadre stratigraphique unifié.

Par la suite, les données géologiques ont été traitées de manière à obtenir un ensemble de données d'élévation pour chacune des unités géologiques du modèle, avec la même unité (mètre), le même système de coordonnées (latitude/longitude) et la même référence spatiale (North American Datum 1983). Le toit du modèle géologique correspond à la surface du sol. Pour représenter cette surface, les modèles numériques de terrain (MNT) du sud de l'Alberta et du nord du Montana ont été fusionnés, la taille du pixel étant de 500 m.

Le logiciel retenu pour construire le modèle géologique est Leapfrog Hydro (Aranz Geo Limited 2016). Ce logiciel récent a été choisi car il offre une passerelle vers la création de modèles numériques, notamment sous Feflow (Diersch 2014) à partir du modèle géologique. L'approche utilisée pour construire le modèle consiste à travailler avec un jeu de données d'élévation (avec des coordonnées x, y, z) représentant le toit de chaque couche géologique. Dans un premier temps, des surfaces de contact ont été créées à partir de ces points de données (Annexe III). Ensuite, des volumes ont été produits à partir des surfaces de contact pour lesquelles une chronologie a été préalablement déterminée. Les coupes géologiques numérisées ont servi de guide dans l'ajustement des surfaces géologiques (par édition manuelle des surfaces), en particulier là où les données étaient rares.

1.5.5 Interprétation hydrogéologique

La méthodologie appliquée au développement du modèle conceptuel hydrogéologique consiste à étudier de manière intégrée les principales composantes du modèle conceptuel hydrogéologique. Ces composantes incluent notamment l'étude du réseau d'écoulement de l'eau souterraine, les propriétés hydrogéologiques de l'aquifère, la géochimie et le temps de résidence de l'eau souterraine et le bilan en eau de l'aquifère (Fig. 1.3). La production de cartes hydrogéologiques et géochimiques suivant les limites transfrontalières de l'aquifère a servi de support au développement du modèle conceptuel.

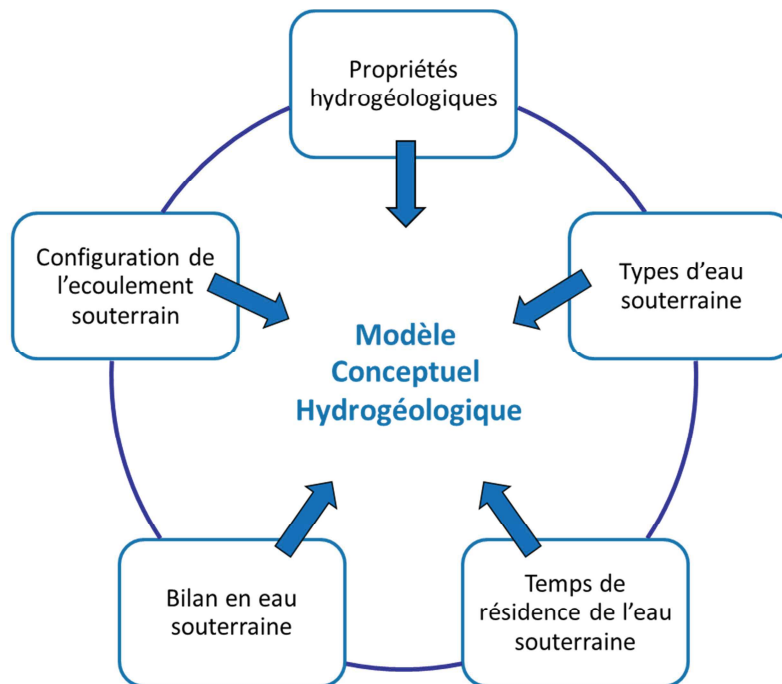


Figure 1.3 Composantes du modèle conceptuel hydrogéologique de l'aquifère Milk River.

Dans le cas des données géochimiques, une base de données transfrontalière a d'abord été créée. Elle regroupe les analyses portant sur les ions majeurs et mineurs, les paramètres physico-chimiques et les analyses isotopiques provenant de 16 sources qui ont été jointes et uniformisées (mêmes unités et référence spatiale) (Annexe IV). Cette base de données transfrontalière a facilité la production de cartes géochimiques et la détermination des types d'eau dans l'aquifère (Annexe V).

Concernant les données hydrogéologiques, les cartes piézométriques historiques provenant de quatre études différentes ont été numérisées et associées aux niveaux d'eau récents et à des données de pression afin de produire une carte piézométrique transfrontalière (Annexe VI).

Une revue de littérature portant sur l'usage de l'eau provenant de l'aquifère Milk River et le récent sondage qui a été réalisé dans le cadre de cette thèse ont permis de proposer un bilan en eau souterraine en Alberta, en aval (au nord) de la Milk River.

À la lumière des cartes transfrontalières hydrogéologiques et géologiques, il a été possible de formuler des hypothèses sur le fonctionnement du système aquifère. Des coupes conceptuelles transfrontalières hydrogéologiques et géochimiques intégrant l'ensemble des connaissances acquises ont été produites.

1.5.6 Modélisation numérique

Grâce aux modèles géologiques et conceptuel précédemment développés, le modèle numérique d'écoulement tridimensionnel de l'aquifère a été construit avec le simulateur numérique FEFLOW.

Un maillage d'éléments finis 2D a été créé dans le logiciel FEFLOW et appliqué sur toute l'épaisseur du modèle géologique 3D. La géométrie et les épaisseurs des unités géologiques ont été conservées. Le modèle numérique suit les limites hydrogéologiques de l'aquifère qui ont été précédemment définies. Toutefois, il est limité au sud-est par l'extension du modèle géologique qui ne couvre pas la région des Bear Paws Mountains. Le maillage a été raffiné le long de la Milk River où le gradient hydraulique horizontal est plus prononcé. Le modèle représente sept unités hydrostratigraphiques : les sédiments superficiels, le groupe Judith/Belly River, la formation Pakowki/Claggett, la Formation Milk River, le Groupe Colorado, l'unité Bow Island Sandstone et les vallées enfouies. Une valeur uniforme de conductivité hydraulique a été assignée à chacune des unités hydrostratigraphiques à l'exception de la Formation Milk River pour laquelle une distribution spatiale de conductivité hydraulique a été définie. L'unité du Bow Island Sandstone n'étant pas représentée dans le modèle géologique, elle a été ajoutée manuellement dans FEFLOW, au sein du Groupe Colorado à environ 400 m de la base de la Formation Milk River. Les vallées enfouies ont été représentées en assignant une valeur de conductivité hydraulique spécifique le long de leur tracé au niveau de la première couche du modèle.

Les conditions aux limites du modèle numérique consistent principalement en l'assignation de charges imposées le long du drainage en surface. Une condition de charge imposée a aussi été définie sur le pourtour de l'unité Bow Island Sandstone sur la base de sa carte piézométrique. Un taux de recharge a été défini selon 3 zones distinctes à partir du modèle conceptuel. Le modèle numérique est opéré en régime permanent afin de représenter la situation pré-développement (avant l'exploitation par les puits). Afin de caler le modèle, un ensemble de critères de calage (qualitatifs et quantitatifs) a été défini. À partir des cartes piézométriques de l'aquifère au Montana, 132 points d'observation (ou cible de calage) ont été créés en faisant l'hypothèse que ces cartes représentaient une situation similaire à la situation pré-exploitation. La même hypothèse a été formulée dans la partie sud de l'Alberta, en amont (sud) de la Milk River avec la définition de 80 cibles de calage. La carte piézométrique historique utilisée en Alberta est celle de Meyboom (1960) qui a aussi été réinterprétée par Toth et Corbet (1986).

Les charges simulées par le modèle ont été comparées aux deux interprétations. De plus, les études antérieures ont délimité une zone à l'intérieur de laquelle les puits produisant à partir de l'aquifère Milk River étaient jaillissants au début de l'exploitation de cet aquifère en Alberta. Cette information qualitative constitue un critère de calage supplémentaire. Enfin, le modèle est aussi calé sur la base des flux verticaux inter-formation qui ont été quantifiés dans le modèle conceptuel à partir de la piézométrie observée dans les sédiments superficiels et dans l'unité Bow Island Sandstone. Ainsi, l'approche originale utilisée pour le calage du modèle se base non seulement sur les niveaux d'eau observés mais considère un ensemble de critères fondés sur le modèle conceptuel. Une analyse de sensibilité a aussi été réalisée sur le modèle calé afin de tester la réponse du modèle aux variations de certains paramètres (recharge, conductivité hydraulique, anisotropie verticale). Afin d'explorer plus en détail le système d'écoulement régional, le traçage de particule a été utilisé. Ce traçage permet également de déterminer des âges advectifs de l'eau souterraine le long des lignes d'écoulement et de les comparer aux temps de résidence obtenus dans le modèle conceptuel grâce à la datation isotopique de l'eau souterraine. Enfin, afin d'évaluer le caractère soutenable de l'exploitation de l'aquifère, les composantes du bilan en eau simulées par le modèle numérique ont été comparées à l'estimation des niveaux d'exploitation historiques dans le sud de l'Alberta. L'estimation des niveaux d'exploitation historique a été produite à partir de la base de données des puits d'Alberta Environnement. Les résultats sont présentés dans l'Annexe VII et les données correspondantes sont regroupées dans l'Annexe VIII.

CHAPITRE 2 RÉGION D'ÉTUDE

2.1 Situation générale et climat

La région d'étude s'étend du sud de l'Alberta (Canada) au nord du Montana (États-Unis) (Fig. 2.1) dans la région des Prairies. Le climat de cette région est semi-aride, avec des étés courts et chauds et des hivers froids. Le climat de la région est influencé par la proximité des montagnes Rocheuses et des vents Chinook associés, et de manière plus locale par les Sweetgrass Hills et les Cypress Hills. Les précipitations moyennes annuelles s'échelonnent de 250 à 450 mm/an et l'évapotranspiration potentielle varie de 550 à 578 mm/an (Climate Canada 2015; NOAA 2015).

La topographie de la région est vallonnée et les principaux hauts topographiques sont les Sweetgrass Hills, les Cypress Hills, le Milk River Ridge et les Bear Paws Mountains. Les Sweetgrass Hills (2100 m d'altitude) sont un ensemble de trois buttes et de collines situées au Montana, à proximité de la frontière avec le Canada.

L'aquifère tient son nom de la Milk River qui coule vers le fleuve Missouri sur une distance de 1173 km. La Milk River prend sa source dans le nord-ouest du Montana, et entre en Alberta par l'ouest. Elle coule vers l'est et traverse la ville de Milk River puis retourne dans le Montana. Le bassin versant de la Milk River couvre 6664 km² et est également transfrontalier. Il s'étend sur les provinces de l'Alberta et de la Saskatchewan et l'état du Montana. Il s'agit du plus petit bassin versant de la province de l'Alberta.

Les réseaux de drainage superficiels au-dessus de l'aquifère font partie du bassin versant de la Milk River et du bassin versant de la South Saskatchewan River. Une des caractéristiques de la région est la présence de « coulées », qui sont des vallées en « V » (ou ravins) aux bords abruptes. Les coulées ont été créées soit par l'érosion glaciaire, après le dernier âge glaciaire ou bien par l'érosion continue de l'eau et du vent (Dormaar 2010). Il existe aussi un bassin de drainage interne fermé (endoréique) qui renferme le lac Pakowki (profondeur moyenne de 1.2 m). Ce lac intermittent couvre au maximum une surface de 123 km² (Sosiak et Branch 1997). Depuis 1921, le débit de la Milk River est augmenté artificiellement de 1 à 16 m³/s pendant la saison de l'irrigation via le canal St. Mary au Montana (MacCulloch et Wagner-Watchel 2010).

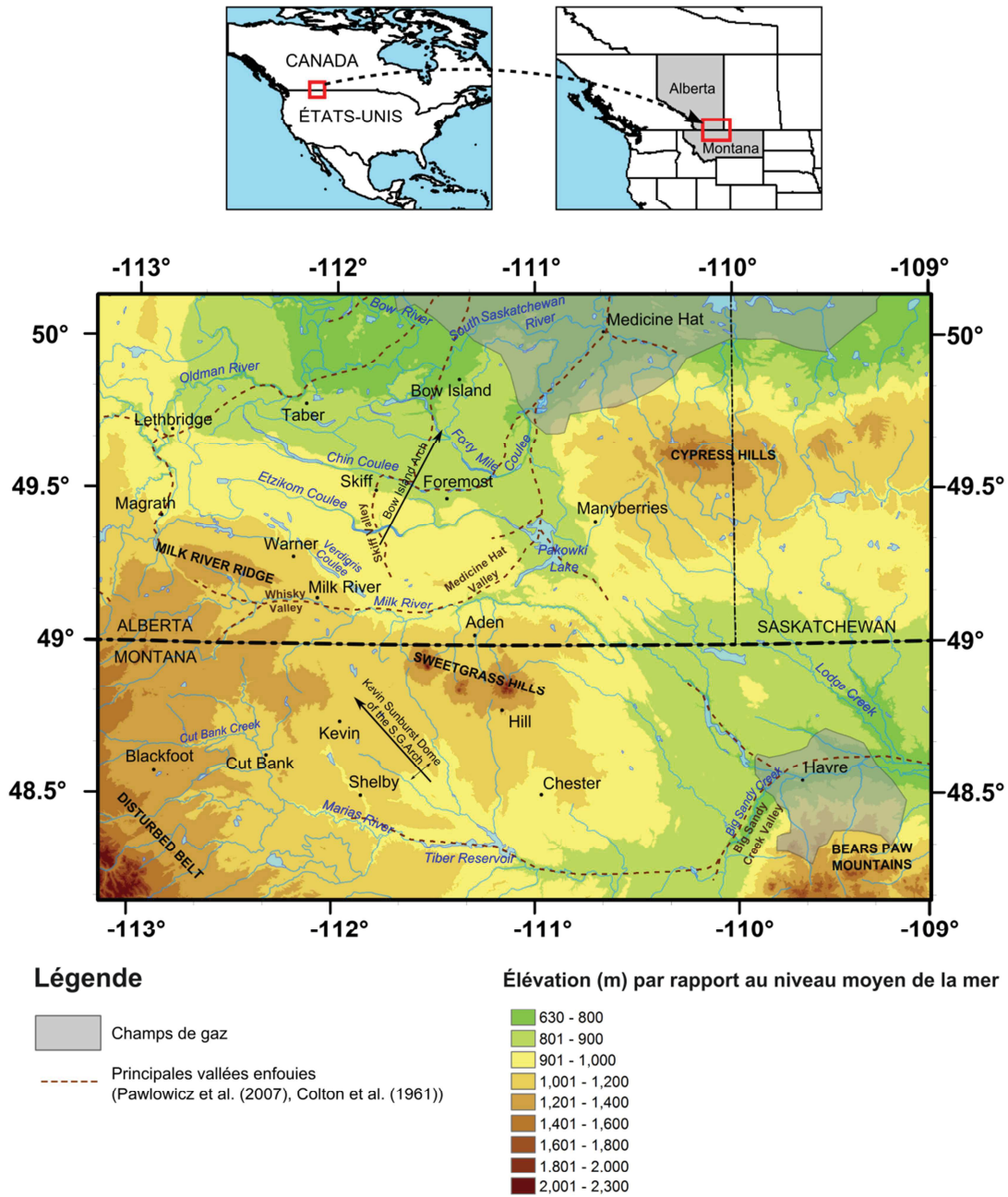


Figure 2.1 Région d'étude.

2.2 Cadre stratigraphique et géologie

Corrélation stratigraphique

Du fait du caractère transfrontalier et régional de la zone d'étude, les unités géologiques n'ont pas la même terminologie de chaque côté de la frontière et le découpage des membres qui les composent diffère également. Les nomenclatures stratigraphiques ont évolué au long du 20^{ème} siècle suivant les progrès des travaux de caractérisation de la Formation Milk River (appelée Formation Eagle au Montana). Ainsi, les nomenclatures stratigraphiques diffèrent entre l'Alberta et le Montana mais également au sein même du Montana (à l'est et à l'ouest de l'arche Sweetgrass) (Fig. 2.2).

En Alberta, Dowling (1915, 1917) fut le premier à identifier la Formation Milk River en tant que « Milk River Sandstone ». Le Milk River Sandstone était décrit selon 2 parties (supérieure et inférieure) qui ont porté plusieurs terminologies successives (Evans 1931; Russell et Landes 1940).

Au nord du Montana, Stanton et al. (1905) furent les premiers à décrire la Formation Eagle comme un grès massif de couleur blanche recouvert d'une alternance de lits de grès et de shale avec de nombreux filons de lignite. Rice (1980) divisa la Formation Eagle en 3 membres : le membre de base Virgelle, un membre central et un membre supérieur ne portant pas de nom.

Concernant les couches recouvrant la Formation Milk River, Stanton et al. (1905) établirent que l'unité Pakowki Shale en Alberta était identique à l'unité Claggett Shale au Montana. De même, ils montrèrent que le Groupe Belly River qui recouvre la Formation Pakowki en Alberta était identique à la Formation Judith River au Montana. Plus récemment, Payenberg et al. (2002) ont confirmé que les formations Claggett et Pakowki avaient bien le même âge (Fig. 2.2). Dans la partie nord-est de la zone d'étude, l'équivalent stratigraphique de la Formation Pakowki est la Formation Lea Park (Williams et Dyer 1930).

Meijer-Drees et Mhyr (1981) ont proposé une nomenclature stratigraphique dans le sud-est de l'Alberta. Ils définissent la Formation Milk River comme l'équivalent stratigraphique de la Formation Telegraph Creek et d'Eagle Sandstone tel que défini par Rice et Cobban (1977). Ils définissent aussi le membre Deadhorse Coulee comme occupant le même intervalle que les membres central et supérieur d'Eagle Sandstone. Dans la région des Sweetgrass Hills, Tuck (1993) a nommé l'intervalle entre le membre Virgelle et la Formation Claggett la « partie

supérieure » d'Eagle Sandstone. Cette partie supérieure a une lithologie très similaire à celle du membre Deadhorse Coulee.

Jusqu'au début des années 2000, une claire corrélation régionale des formations Milk River et Eagle n'était pas possible, en raison des différences dans la lithologie et les gammes d'âge (Russell 1970) et la faible exposition de la formation Eagle au nord du Montana (Payenberg et al. 2003).

Payenberg et al. (2002) et Payenberg (2002b) ont réévalué les relations lithostratigraphiques et chronostratigraphiques des roches du Crétacé Supérieur entre l'Alberta et le Montana. Ils utilisèrent les nouvelles avancées en géochronologie, en magnéto-stratigraphie ainsi qu'une base de données paléontologique. Leur travail a permis notamment de montrer que les membres Telegraph Creek, Virgelle et Deadhorse Coulee étaient continus et corrélés au travers de la frontière internationale (Payenberg 2002a). Ils ont introduit aussi le Membre Alderson de la Formation Lea Park dans la nomenclature de l'Alberta.

		Rice et Cobban (1977)		Meijer-Drees et Mhyr (1981)				Payenberg et al. (2002)		
Période	Étage	ZONE PARC NATIONAL GLACIER		CENTRE MONTANA		SUD-EST ALBERTA		SUD-CENTRE ALBERTA	SUD-EST ALBERTA	NORD-CENTRE MONTANA
		CRÉTACÉ SUPÉRIEUR	CAMPANIEN	BEARPAW		BEARPAW		BEARPAW		FORMATION PAKOWKI
FORMATION TWO MEDICINE				JUDITH RIVER		JUDITH RIVER		Hiatus		FORMATION EAGLE
SANTONIEN	EAGLE		Upper Member		MILK RIVER	Deadhorse Coulee	Lea Park	Membre Alderson		
			Middle Member					Membre Deadhorse Coulee		Membre Deadhorse Coulee
			Virgelle Sandstone					Virgelle Sandstone		Formation* Lea Park
Telegraph Creek			Telegraph Creek		Virgelle Telegraph Creek		Membre Virgelle			
Marias River Shale			NIOBRARA		Colorado		Lloyd-minster		FORMATION TELEGRAPH CREEK	

Figure 2.2 Tableau comparatif des nomenclatures stratigraphiques existantes dans la zone d'étude (modifiée de Rice et Cobban 1977, Meijer-Drees et Mhyr 1981 et Payenberg et al. 2002). * indique que la formation Lea Park peut être définie jusqu'à la Formation Pakowki, suivant Meijer-Drees et Mhyr (1981) et Dawson et al. (1994).

Géologie

Le substratum de la région est composé d'une succession de sédiments marins et non marins datant du Crétacé. Les dépôts du Tertiaire ont été érodés dans toute la région sauf au niveau des Cypress Hills. La zone d'étude est presque entièrement couverte de dépôts glaciaires et

préglaciaires de moins de 50 m d'épaisseur. Ils peuvent néanmoins atteindre de 50 à 100 m d'épaisseur au niveau des vallées enfouies (Hydrogeological Consultants 2007).

Les unités géologiques du Crétacé Supérieur sont décrites succinctement ci-dessous et sont représentées sur la carte géologique du socle rocheux (Fig. 2.3).

Groupe Colorado

Le Groupe Colorado est l'unité géologique de base de la zone d'étude. Elle consiste principalement en des shales marins bentonitiques gris foncé à noirs. Son épaisseur varie de 500 à 600 m au sud de l'Alberta et de 450 à 500 m au nord du Montana (Cobban et al. 1976; Hendry et al. 1991). Le Groupe Colorado n'affleure pas en Alberta (Williams et Dyer 1930) mais affleure dans une grande partie du nord du Montana, depuis les Sweetgrass Hills jusqu'à Great Falls (Cobban et al. 1976). Il constitue un aquitard régional dans la zone d'étude avec une conductivité hydraulique variant de 10^{-14} à 10^{-10} m/s (Hendry et Schwartz 1988). Le groupe Colorado contient plusieurs fines couches de grès, une des plus importantes étant le Bow Island Sandstone. Le Bow Island Sandstone fait environ 25 m d'épaisseur et est séparé de la Formation Milk River par environ 400 m de shales (Swanick 1982; Phillips et al. 1986; Hendry et Schwartz 1988).

Formation Milk River/ Formation Eagle

La Formation Milk River (Eagle Sandstone au Montana) s'est déposée lors du Crétacé Supérieur (Rice 1980; Payenberg et al. 2001). La Formation Milk River a été divisée en trois membres : le membre de base Telegraph Creek, le membre central Virgelle, et le membre supérieur Deadhorse Coulee. La Formation Milk River a une épaisseur de 150 m dans le coin sud-ouest de la partie canadienne de la zone d'étude et devient plus fine vers le nord-est (O'Connell 2014). Elle sous-affleure au sud de l'Alberta près de la frontière et forme des anneaux d'affleurement (Fig. 2.3). Depuis les zones de sous-affleurement, la formation Milk River plonge vers le nord, l'est et l'ouest selon une configuration radiale (Meyboom 1960; Schwartz et Muehlenbachs 1979; Toth et Corbet 1986). La Formation Milk River est confinée par les shales peu perméables de la formation Pakowki/Claggett et ceux du Groupe Colorado.

Membre Telegraph Creek

Le membre Telegraph Creek est une unité de transition entre les shale du Groupe Colorado et le grès du Membre Virgelle. Il consiste en une couche interstratifiée de shale sableux, de siltstone et de grès schisteux. Son épaisseur varie de 30 à 52 m au nord du Montana (Cobban 1950; Tuck 1993; Payenberg et al. 2001).

Membre Virgelle

Le Membre Virgelle recouvre le Membre Telegraph Creek et comporte une couche de grès de granulométrie fine à moyenne, de couleur gris à jaune clair avec des lits fins de siltite. Le membre Virgelle fait jusqu'à 69 m d'épaisseur au sud de l'Alberta et varie de 15 à 60 m d'épaisseur à l'ouest de l'arche Sweetgrass (Lorenz 1981; O'Connell 2014).

Membre Deadhorse Coulee

Cette unité correspond à la partie supérieure de la Formation Milk River et consiste en une couche interstratifiée de shale, de siltite et de grès à grain fin avec des veines de charbon (Tovell 1956; Payenberg 2002b). Le Membre Deadhorse Coulee a une épaisseur maximale de 60 m au sud de l'Alberta. Son épaisseur diminue vers le nord-est jusqu'à atteindre 10 m d'épaisseur environ à proximité de la surface de discordance séparant le membre Alderson des autres membres de la Formation Milk River.

Alderson Member

En Alberta, le membre Alderson de la formation Lea Park (Meijer-Drees et Mhyr 1981) recouvre sans concordance la formation Milk River au nord, nord-est et à l'est de la zone d'étude. Le membre Alderson contient le champ de gaz de Medicine Hat. La lithologie du Membre Alderson consiste en une couche interstratifiée de sable à grains très fins, de silt et de boue (O'Connell 2014). Le membre Alderson a une épaisseur de 85 m au sud-est de l'Alberta et d'environ 100 m dans le coin nord-est de la zone d'étude (Meijer-Drees et Mhyr 1981; O'Connell 2014)

Formation Pakowki/Claggett

La Formation Milk River est recouverte par une épaisse unité de shales marins, la Formation Pakowki (Claggett au Montana) dont l'épaisseur peut atteindre 130 m. La Formation Pakowki/Claggett consiste en de shales marins noirs finement stratifiés, avec quelques lits de grès (Tovell 1956, cité par Payenberg et al. 2003). Cette formation a été déposée lors d'un épisode transgressif du Crétacé Supérieur; cependant l'invasion marine n'a pas atteint la partie ouest de l'arche Sweetgrass (Stebinger 1917a; Williams et Dyer 1930). Par conséquent, le biseau de shale marin s'amincit progressivement vers l'ouest. Le toit de la Formation Pakowki/Claggett correspond à celui de la Formation Lea Park dans le sud de l'Alberta (Williams et Dyer 1930; Meijer-Drees et Mhyr 1981; Dawson et al. 1994). La Formation Pakowki/Claggett est un aquitard régional; la conductivité hydraulique de cette unité est de l'ordre de 10^{-11} m/s (Toth et Corbet 1986; Anna 2011).

Formation Two Medicine

Cette formation d'origine non marine affleure au nord-ouest du Montana (Fig. 2.3). Elle consiste en du mudstone et du grès et fait environ 600 m d'épaisseur (Lorenz 1981). A l'ouest de l'arche Sweetgrass, la Formation Two medicine regroupe la partie supérieure de la Formation Eagle (i.e. l'équivalent du membre Deadhorse Coulee), la Formation Claggett qui est difficilement identifiable, et la Formation Judith River (Pierce et Hunt 1937; Zimmerman 1967; Gill et Cobban 1973). La Formation Two Medicine recouvre le membre Virgelle qui est facilement identifiable.

Groupe Belly River/ Formation Judith River

Le Groupe Belly River (Judith River Formation au Montana) affleure dans une grande partie de la zone d'étude (Fig. 2.3). Il est composé de : la formation Dinosaur Park (partie supérieure, peu présente dans la zone d'étude); la Formation Oldman (partie centrale) et la Formation Foremost (partie inférieure) (Eberth et Hamblin 1993; Hamblin 1997). Les shales foncés, le grès et les veines de charbon de la Formation Foremost sont recouverts par du grès massif jaune et gris de la Formation Oldman et par du grès épais et de la siltite de la Formation Dinosaur Park. Le Groupe Belly River/Formation Judith River fait environ 320 m d'épaisseur à Lethbridge et moins de 182 m d'épaisseur au nord du Montana (Williams et Dyer 1930; Pierce et Hunt 1937). Cet ensemble constitue un aquifère qui présente une conductivité hydraulique allant de 9.0×10^{-8} à 8.8×10^{-7} m/s (Anna 2011).

Formation Bearpaw

La formation Bearpaw recouvre le Groupe Belly River/Formation Judith River (ou la Formation Two Medicine à l'ouest de l'arche Sweetgrass au Montana). Cette formation est constituée de shale gris foncés d'origine marine. La Formation Bearpaw affleure selon une bande étroite d'orientation nord-sud dans la partie ouest de la zone d'étude et à proximité des Cypress Hills en Alberta. La Formation Bearpaw fait environ 70 m d'épaisseur au nord-ouest de la zone d'étude et constitue un aquitard régional (Tokarsky 1974).

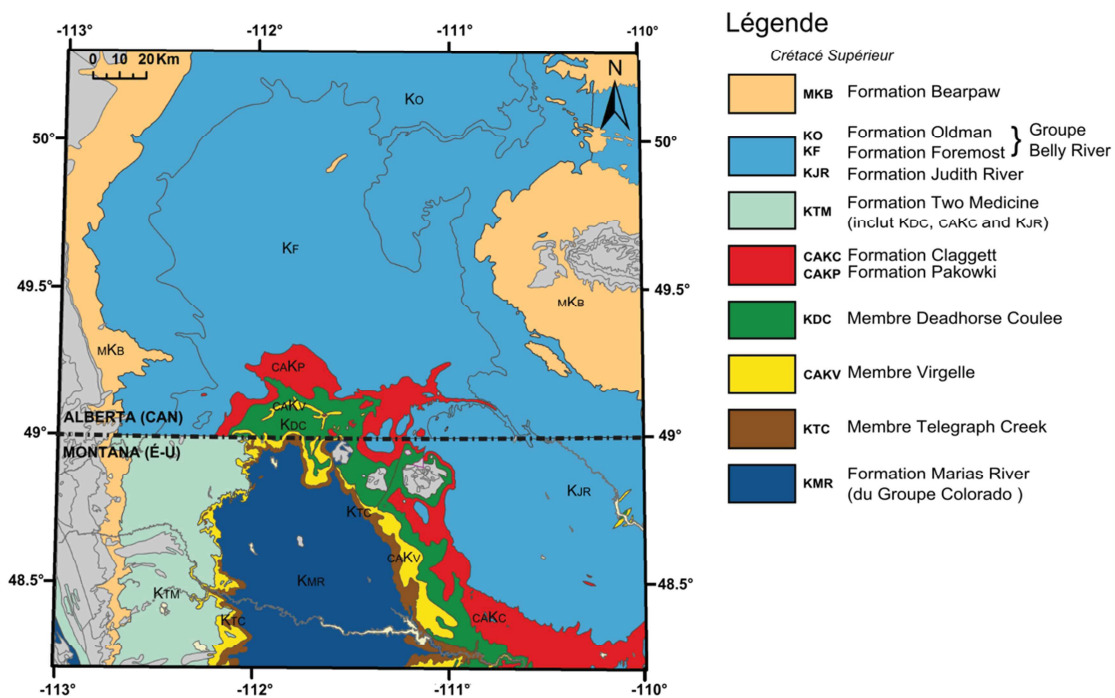


Figure 2.3 Carte géologique de la roche en place (modifiée d'Okulitch et al. 1996).

2.3 Hydrogéologie

2.3.1 Surface piézométrique et écoulement souterrain.

La surface piézométrique de l'aquifère Milk River a été cartographiée en Alberta par Meyboom (1960), Borneuf (1974), Toth et Corbet (1986), et AGRA Earth and Environmental Limited (1998) et au nord du Montana par Zimmerman (1967), Levings (1982) et Tuck (1993). La figure 2.4

(piézométrie en pieds) montre l'étendue de ces cartes historiques qui sont limitées par la frontière et qui, par conséquent, couvrent uniquement une partie de l'étendue de l'aquifère.

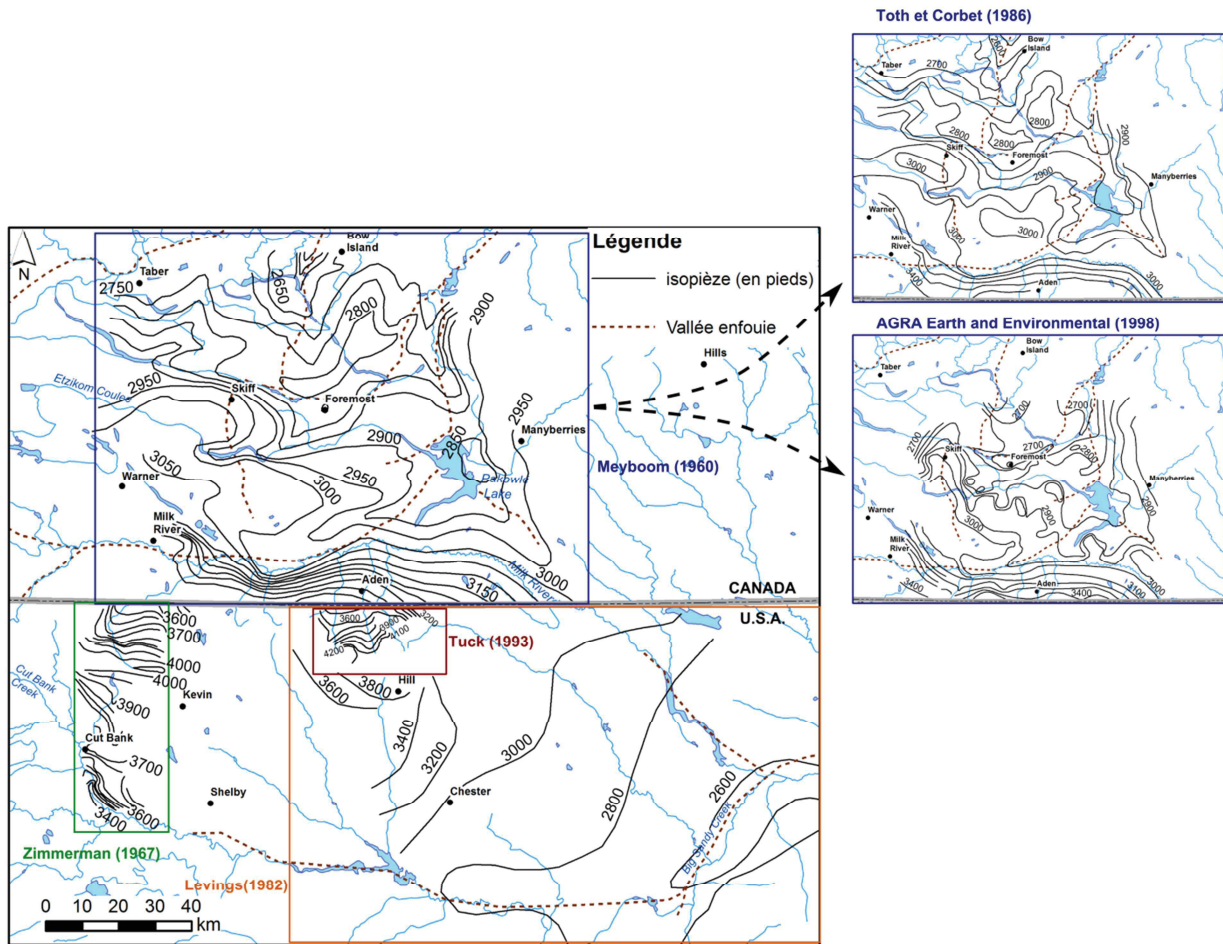


Figure 2.4 Cartes piézométriques historiques de l'aquifère Milk River dans la région d'étude.

Meyboom (1960) a identifié les anneaux d'affleurement autour des Sweetgrass Hills comme étant la principale zone de recharge de l'aquifère. Il affirme que les zones d'émergence sont localisées dans la région du lac Pakowki et le long des coulees en raison de la présence de nombreux puits artésiens jaillissant, mais aussi au niveau de la ville de Foremost en raison d'un fort pompage. Meyboom (1960) mentionne que le gradient hydraulique général était orienté vers le nord, l'est et l'ouest avant toute exploitation de la ressource. Le développement de l'aquifère a eu pour effet d'accentuer le gradient vers le nord et de l'inverser à l'ouest et à l'est, l'eau convergeant vers les cônes de dépression causés par l'important pompage. Meyboom (1960)

précise que l'émergence naturelle de l'aquifère est très faible et est constituée de sources le long de la rive sud de la Milk River.

Toth et Corbet (1986) ont réinterprété les données de Meyboom (1960) et ont proposé une carte piézométrique qui mimait la topographie. Ils suggèrent ainsi que les zones de recharge sont situées non seulement dans les Sweetgrass Hills mais aussi dans les autres hauts topographiques de la région (Cypress Hills, Milk River Ridge, Lucky Strike Upland) et au niveau de la zone d'affleurement de l'aquifère près de la frontière. Ils émettent l'hypothèse selon laquelle les zones d'émergence sont concentrées le long des vallées enfouies, via le phénomène de drainance verticale à travers les aquitards (vallées de Medicine Hat, Skiff et Lethbridge).

Au Montana, Levings (1982) a produit une carte piézométrique régionale de la formation Eagle Sandstone. Cette carte montre que l'eau souterraine s'écoule depuis les Sweetgrass Hills vers le nord, le sud, le sud-est et l'est. Selon Levings (1982), les monts Bears Paw constituent une zone de recharge. Au nord de ces montagnes, les isopièzes indiquent une émergence de l'aquifère au niveau de Big Sandy Creek et de la Milk River. Levings (1982) doute que la drainance verticale puisse se produire en raison de la présence de l'épais aquitard Claggett. Il suggère que cette baisse de la surface piézométrique peut être causée par la dépressurisation d'Eagle sandstone à cause de la production de gaz.

Dans la région des Sweetgrass Hills, Tuck (1993) a proposé une carte piézométrique du membre Virgelle. L'eau souterraine s'écoule généralement depuis les zones de recharge sur les flancs des Sweetgrass Hills vers le nord. L'émergence de l'aquifère se fait via les puits de pompages, l'écoulement par les sources et les surfaces de suintement et la drainance vers les autres unités géologiques.

Dans la région de Cut Bank, Zimmerman (1967) a indiqué que la recharge du membre Virgelle se faisait via l'infiltration de la précipitation le long de la zone d'affleurement de l'aquifère et grâce au flux de drainance provenant des autres formations. L'eau souterraine s'écoule vers le nord et le sud-ouest depuis une ligne de partage des eaux souterraine située au nord de Cut Bank. L'émergence naturelle du membre Virgelle est située le long de Cut Bank Creek, au sud de Cut Bank (Fig. 2.4) et au nord vers l'affleurement de Virgelle près de la confluence de Red River avec la Milk River en Alberta.

En résumé, Meyboom (1960) a montré que les zones de recharge de l'aquifère étaient situées principalement au niveau des anneaux d'affleurement autour des Sweetgrass Hills et dans une

moindre mesure dans la zone de sous-affleurement près de la frontière. Au Montana, l'écoulement est dirigé depuis les Sweetgrass Hills vers le nord et vers le sud-est (Levings 1982; Tuck 1993). À l'ouest de l'arche Sweetgrass, Zimmerman (1967) a montré qu'un écoulement existait depuis une ligne de partage des eaux située au nord de Cut Bank, dirigé vers le nord et le sud (Fig. 2.4).

2.3.2 Artésianisme

Dans les conditions de pré-exploitation, presque tous les puits dans le sud de l'Alberta étaient jaillissants (Borneuf 1976; Phillips 1986; Hendry et al. 1991). Les zones artésiennes étaient situées principalement au nord du village de Foremost et à l'est dans la région du lac Pakowki. Meyboom (1960) a comptabilisé environ 200 puits jaillissants dans le Membre Virgelle en Alberta. Les dépressions de la surface piézométrique au niveau des coulées en Alberta sont attribuées à la présence de puits artésiens jaillissants fortement (Meyboom 1960). Au Montana, les puits jaillissants se trouvent dans la région de Cut Bank, en raison de la plongée vers l'ouest de la Formation Milk River (Zimmerman 1967). Tuck (1993) a également identifié quelques puits jaillissants dans la région des Sweetgrass Hills. Cependant, de nombreux puits ont perdu leur caractère artésien en raison de l'usage intensif de la ressource en eau souterraine (AGRA Earth and Environmental Limited 1998).

2.3.3 Paramètres hydrogéologiques

En Alberta, les études de Meyboom (1960) et Swanick (1982) ont montré qu'il existait une zone de haute transmissivité de l'aquifère selon l'axe nord-ouest. Cette zone correspond à des dépôts de grès plus épais dans l'aquifère. Les 32 valeurs de transmissivité obtenues de l'arrêt de l'écoulement (*shut-in test*) sur des puits jaillissants varient de 1.4×10^{-6} à 5.2×10^{-4} m²/s.

Persram (1992, non publié, cité par AGRA Earth and Environmental Limited 1998) a calculé des valeurs de transmissivité à partir de 42 tests de pompage. Ces valeurs varient de 1.2×10^{-6} à 1.3×10^{-4} m²/s et sont plus faibles que celles de Meyboom (1960). Persram a montré une zone de forte transmissivité à tendance nord-est, ce qui n'est pas en accord avec les observations de Meyboom (1960). Par la suite, AGRA Earth and Environmental Limited (1998) a associé de nouvelles données de transmissivité à celles de Persram (1992) et Meyboom (1960) et a montré que les zones de forte transmissivité étaient localisées au sud et autour du lac Pakowki. Les

valeurs de transmissivité faible ($< 1.7 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) sont localisées au nord-est de la zone d'étude et dans la partie ouest ($6.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

Au Montana, dans la région de Cut Bank et dans les Sweetgrass Hills, les valeurs de transmissivité pour le Membre Virgelle varient de 1.0×10^{-4} à $7.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (Zimmerman 1967; Tuck 1993). Ces valeurs sont plus élevées qu'en Alberta et peuvent être expliquées par la fracturation du membre Virgelle qui affecte localement la transmissivité (Zimmerman 1967). Tous les points de données de transmissivité de l'aquifère sont regroupés dans l'Annexe IX.

2.3.4 Paléo-hydrogéologie

Cette section décrit succinctement les principaux événements géologiques de la région d'étude qui ont eu des implications sur le système aquifère.

La Formation Milk River s'est déposée au Crétacé supérieur (entre 87 et 82 Ma) et a été affectée par le soulèvement de l'arche Sweetgrass (350 à 65 Ma). Les principaux éléments structuraux qui composent l'arche Sweetgrass sont le South Arch, le Kevin Sunburst Dome et le Bow Island Arch (Meyboom 1960). Cet ensemble d'éléments tectoniques majeurs a provoqué la configuration radiale plongeante observée sur toutes les unités géologiques de la région. Par la suite, l'intrusion ignée des Sweetgrass Hills (65-50 Ma) a accentué la pente des unités du socle rocheux ainsi que leur structure radiale.

Toth et Corbet (1986) ont très bien décrit l'évolution de la topographie dans la région d'étude après le Paléocène (66-56 Ma). La paléo-surface appelée *Cypress Plain* a existé pendant environ 30 millions d'années (37-5 Ma) et son élévation générale est indiquée par le sommet des Cypress Hills (1460 m). Cette surface a été érodée pendant ces 5 derniers millions d'années. En effet, le bassin de l'Alberta a connu un rapide soulèvement et une intense érosion qui a modifié considérablement la topographie. Environ 700 m d'érosion ont lieu pendant le Pliocène et Pléistocène (5-1.8 Ma). En réponse, la matrice rocheuse dissipe progressivement l'effet de l'érosion afin de se réajuster à la nouvelle topographie, ce qui implique une importante réduction de la pression d'eau, tant dans les unités aquifères que les aquitards. L'érosion a mis au jour l'aquifère Milk River selon des anneaux d'affleurement autour des trois collines des Sweetgrass Hills. Hendry et Schwartz (1988) et Hendry et al. (1991) ont ainsi déduit des travaux de Toth et Corbet (1986) que le système aquifère actuel impliquant une recharge de l'aquifère par l'eau météorique a pu opérer depuis 0.5 à 2 Ma. Cette recharge d'eau météorique induit un écoulement dans le MRA qui mène à un lessivage des eaux de formation alors présentes dans

l'aquifère (Meyboom 1960) qui est indiqué par des traceurs géochimiques de l'eau souterraine dans le MRA (chlorures et isotopes stables de l'eau) (Hendry and Schwartz 1988).

Les vallées préglaciaires (Lethbridge, Medicine Hat et Skiff Valleys) apparaissent ensuite (0.05-1.8 Ma) et incisent le socle rocheux jusqu'à 30 m de profondeur. La glaciation du Pléistocène qui a suivi (0.015-0.05 Ma) bloque à la fois la recharge de l'aquifère et l'émergence de l'eau souterraine en surface. La topographie de la région d'étude au moment de la glaciation est très semblable à la topographie actuelle (Toth et Corbet 1986). Toth et Corbet (1986) ont estimé que les pressions d'eau dans l'aquifère Milk River et les unités qui le recouvrent sont complètement ajustées à cette topographie, mais ce n'est pas le cas de l'aquitard Colorado qui n'a pas encore dissipé totalement ces pressions d'eau suite à l'effet de l'érosion à cause de la faible perméabilité et de sa plus grande profondeur d'enfouissement. Le rebond isostatique qui a suivi l'important épisode d'érosion a contribué à la sous-pressurisation des shales du groupe Colorado à cause de l'expansion de leur volume. L'écoulement dans le groupe Colorado est alors influencé par le rebond élastique des shales et un gradient hydraulique vertical est observé vers le Groupe Colorado depuis la Formation Milk River. Toth et Corbet (1986) décrivent alors l'aquitard Colorado comme un puits de potentiel, dû au changement de volume des shales qui provoquent un flux advectif depuis la Formation Milk River.

A partir de 0.024 Ma, la déglaciation a lieu avec la déposition d'une dizaine de mètres de dépôts glaciaires (*drift*) dans la zone d'étude, à l'exception de la région des Cypress Hills qui n'a pas été affectée par l'activité glaciaire ainsi que le long des *coulees* où les dépôts glaciaires ont été érodés.

Dans le système aquifère actuel (<0.015 Ma), les principaux reliefs en Alberta sont les Cypress Hills et le Milk River Ridge. Toth et Corbet (1986) suggèrent que ces hauts topographiques constituent des zones de recharge de l'aquifère Milk River. Au Montana, l'aquifère affleure autour des Sweetgrass Hills qui ont aussi été identifiés comme une zone de recharge.

Lors de la déglaciation, les vallées préglaciaires (*bedrock valley*) se remplissent de matériaux glaciaires. Par ailleurs, les chenaux d'écoulement d'eau de fonte (*meltwater channel*) apparaissent (i.e Milk River Canyon, Etzikom Coulee, Chin Coulee et Forty Mile Coulee). La rivière Milk incise le Membre Virgelle en creusant sa vallée actuelle, ce qui bouleverse le système hydraulique dans l'aquifère Milk River. En effet, l'incision de la rivière Milk dans l'aquifère provoque un ajustement du système d'écoulement et mène à une émergence naturelle de l'eau souterraine circulant dans le MRA à travers des sources présentes le long de la berge sud de la rivière Milk. Près de la zone d'affleurement du MRA, les sources abaissent

suffisamment le niveau d'eau dans l'aquifère pour provoquer un changement des conditions artésiennes à des conditions de nappe libre (Meyboom 1960). Le gradient hydraulique horizontal s'accroît au sud de la rivière (Swanick 1982). La Milk River intercepte une partie du flux souterrain provenant du sud, ce qui limite fortement la progression de l'écoulement au nord de la rivière. Ainsi, le phénomène de lessivage des eaux de formation par les eaux de recharge météoriques (Meyboom 1960) est interrompu ou à tout le moins fortement diminué suite à l'incision de la rivière Milk.

Les conditions géochimiques observées (notamment la distribution spatiale des halogènes et des isotopes stables décrite à la section suivante) sont représentatives des conditions hydrogéologiques qui régnaient avant l'incision de la rivière Milk. Cela suggère également que les conditions artésiennes observées dans l'aquifère au nord de la zone d'étude ne sont plus soutenues présentement et qu'elles sont héritées des conditions hydrogéologiques et géologiques antérieures à l'apparition de la rivière Milk actuelle.

2.4 Géochimie

La géochimie de l'aquifère Milk River est caractérisée par une évolution systématique des ions majeurs en Alberta. En effet, les concentrations en ions chlorure, sodium et bicarbonate augmentent le long de l'écoulement tandis que les concentrations en sulfate, calcium et magnésium diminuent depuis la zone de recharge vers l'aval hydraulique (Hendry et Schwartz 1990). La distribution spatiale des halogènes (Cl, I, Br) est marquée par la présence de deux couloirs d'eau plus diluée (Hendry et Schwartz 1988; Fabryka-Martin et al. 1991) (Fig. 2.5). Cette même distribution est aussi observée pour les isotopes stables (^{18}O et D) (Hendry et Schwartz 1988).

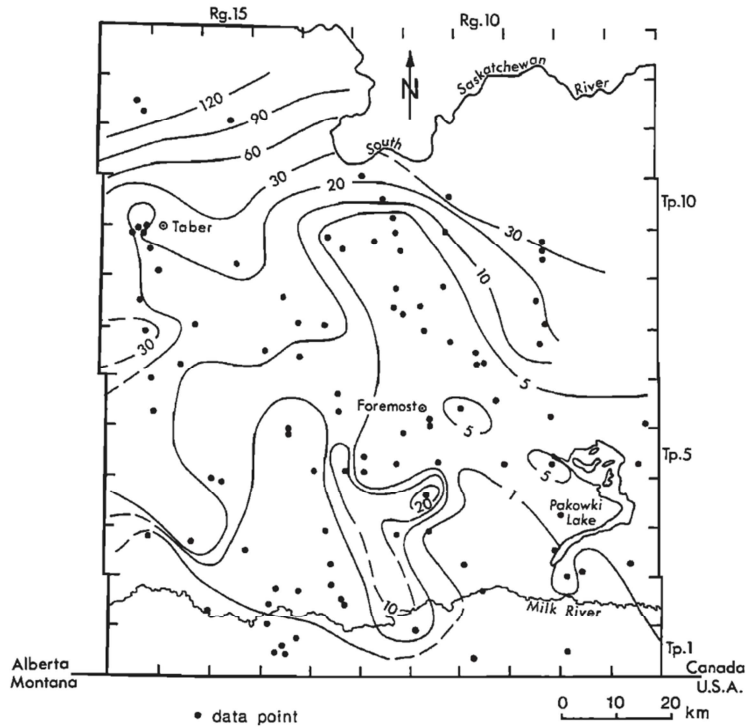


Figure 2.5. Concentrations en chlorures (mmol/l) dans l'aquifère Milk River (Hendry et Schwartz 1988).

L'origine de la distribution des ions non réactifs et des isotopes stables (^{18}O et D) a fait l'objet d'un débat, récemment résumé par Fröhlich (2013). En particulier, cinq mécanismes ont été avancés pour expliquer l'augmentation de la concentration en chlorure le long de l'écoulement:

- 1) la dispersion mégascopique avec un drainage des eaux de formation (*connate water*) dirigé vers le haut (Schwartz et Muehlenbachs 1979)
- 2) le déplacement des eaux de formation par un processus de mélange à grande échelle avec les eaux de recharge (Domenico et Robbins 1985)
- 3) la filtration membranaire (Phillips et al. 1986)
- 4) la diffusion d'ion chlorure dans l'aquifère depuis les aquitards (Hendry et Schwartz 1988)
- 5) la diffusion d'eau salée depuis les membres les moins perméables de la Formation Milk River (source saline interne) (Fabryka-Martin et al. 1991)

Comme l'indique Fabryka-Martin et al. (1991), ces mécanismes contribuent probablement tous dans une certaine mesure à la géochimie de l'aquifère.

L'aquifère Milk River a été choisi dans le cadre d'un projet international de l'IAEA (International Atomic Energy Agency) afin de tester de multiples méthodes isotopiques de datation d'eau

souterraine ancienne en Alberta. Plusieurs articles ont résulté de ce projet et sont résumés dans Fröhlich et al. (1991) et Fröhlich (2013). Les analyses isotopiques indiquent des temps de résidence de l'eau souterraine atteignant plus d'un million d'années à l'extrême nord de la zone d'étude.

Au Montana, les études géochimiques de l'aquifère sont beaucoup plus rares et les analyses isotopiques de l'eau souterraine sont inexistantes. Seuls les types d'eau souterraine ont été définis localement dans la région de Cut Bank (Zimmerman 1967) et dans les Sweetgrass Hills (Tuck 1993).

2.5 Usage de l'eau

L'eau de l'aquifère Milk River a été principalement utilisée pour des usages agricoles (abreuvement du bétail), domestique et municipal. Au Montana, l'aquifère a aussi été exploité pour la récupération secondaire de pétrole. Les données portant sur l'usage de l'eau sont rares car les détenteurs de permis ne sont pas tenus de mesurer les volumes d'eau réellement prélevés. Seules des estimations historiques sont disponibles. En 1937, la Commission géologique du Canada a répertorié 250 puits complétés dans l'aquifère Milk River. Plus tard, Meyboom (1960) identifia 409 puits en Alberta et estima la production annuelle à 1.16×10^6 m³/an. Ce chiffre comprend environ 0.29×10^6 m³/an de flux « perdu » à la surface du sol via les puits jaillissants librement à la surface.

La problématique des puits jaillissant qui ont été laissés libres de couler à la surface du sol a été dénoncée par Borneuf (1976) qui déplorait le manque de gestion de la ressource. Il indiqua que dans la région du lac Pakowki certains puits jaillissant ont coulé à la surface pendant 25 ans, gâchant de ce fait environ 2.5×10^6 m³/an.

L'usage de l'eau en Alberta a quasiment doublé entre les années 1960 et le début des années 1990. Persram (1992, non publié, cité par AGRA Earth and Environmental Limited 1998) a estimé la consommation totale de 2.07×10^6 m³/an (incluant environ 0.27×10^6 m³/an de flux « perdu » à la surface via les puits jaillissants).

En 1998, l'étude sur l'épuisement de l'eau souterraine de l'aquifère (AGRA Earth and Environmental Limited 1998) a montré que les niveaux d'eau récents avaient chuté de 15 à 30 m en moyenne dans la zone nord et centrale de la région d'étude en Alberta. A la suite de cette étude, un programme de conservation de l'aquifère a été mené en Alberta de 1999 à 2004 et durant lequel un total de 1 027 puits a été répertorié. Avec la participation des compagnies de

forage locales, 101 puits ont été cimentés durant le programme de conservation. Parmi ces 101 puits, 22 étaient des puits jaillissants, ce qui a permis d'économiser environ 6.0×10^4 m³/an d'eau souterraine. A la suite de ce programme il n'y a pas eu de suivi des niveaux d'eau, la réponse de l'aquifère aux mesures de conservation n'a donc pas été observée. Au début des années 2000, HCL Consultants (2004 et 2007) ainsi que Stantec (2002) ont estimé l'usage de l'eau provenant de l'aquifère Milk River dans les trois comtés de la région d'étude en Alberta. La somme de ces estimations atteint 1.21×10^6 m³/an, ce qui est plus faible que dans les années 1990.

Au Montana, dans la région de Cut Bank, Zimmerman (1967) a estimé l'usage total à environ 1.6×10^6 m³/an. Dans la région des Sweetgrass Hills, Tuck (1993) a estimé qu'environ 1.3×10^5 m³/an étaient extraits de l'aquifère, dont 21% correspondait au flux perdu à la surface par les puits jaillissants. Les estimations récentes d'usage de l'eau au Montana ne sont pas disponibles.

CHAPITRE 3 PRINCIPAUX RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Modèle géologique 3D unifié

3.1.1 Construction du modèle de référence

Les données géologiques dans la région d'étude proviennent de dix sources (Borneuf 1974; Tokarsky 1974; Feltis et al. 1981; Noble et al. 1982; Okulitch et al. 1996; Atkinson et Lyster 2010; Glombick 2010; Montana Geological Society 2013; O'Connell 2014; données non publiées) et sont de nature variée (données d'élévation ou de profondeur, diagraphies, coupes géologiques). Ces données géologiques suivent différentes nomenclatures stratigraphiques (Fig. 2.2 et section 2.2), ce qui est problématique pour la construction du modèle transfrontalier.

Afin d'illustrer ce problème et à titre de comparaison avec le modèle final, un premier modèle géologique 3D a été construit avant de procéder à l'harmonisation du cadre stratigraphique. La coupe transfrontalière orientée sud-nord qui est extraite du modèle de référence (Fig. 3.1) représente la Formation Milk River en Alberta et son équivalent au Montana, la Formation Eagle. On observe que le degré d'information géologique est plus élevé en Alberta qu'au Montana. En effet, les membres constitutifs de la Formation Milk River (Telegraph Creek, Virgelle et Deadhorse Coulee) sont représentés individuellement en Alberta (O'Connell 2014), alors que seule la formation équivalente Eagle est représentée au Montana (Feltis et al. 1981). Les unités géologiques avant l'unification sont placées côte à côte sur la coupe AA' de sorte que les couches géologiques sont séparées abruptement au niveau de la frontière.

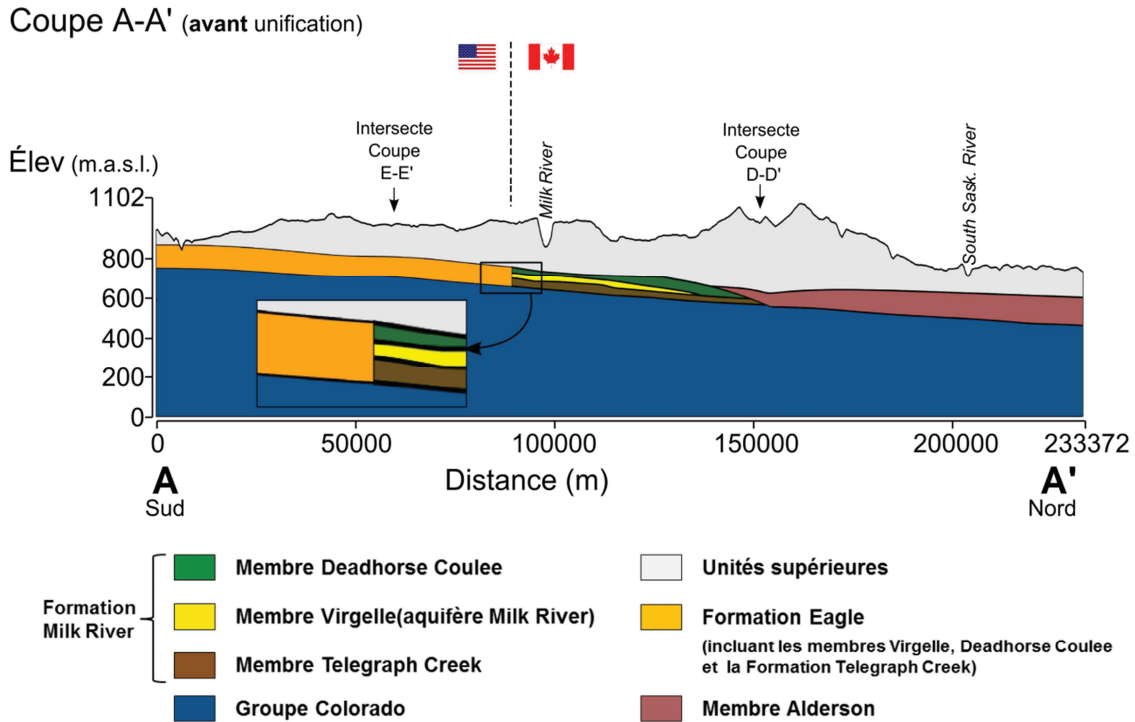


Figure 3.1 Coupe géologique transfrontalière avant l'unification du cadre stratigraphique.

3.1.2 Unification du cadre stratigraphique et harmonisation des données géologiques

Afin d'obtenir le même degré d'information géologique dans l'ensemble de la région d'étude, il est nécessaire d'unifier à la fois le cadre stratigraphique de la région d'étude et d'harmoniser les données géologiques variées. Cela implique d'identifier les couches géologiques équivalentes de part et d'autre de la frontière puis de combiner les données géologiques correspondantes.

Un examen détaillé des données géologiques et leur stratigraphie ainsi que les travaux de corrélation historiques et récents (Rice et Cobban 1977; Meijer-Drees et Mhyr 1981; Payenberg et al. 2002) ont permis d'émettre des hypothèses de travail et de proposer une nomenclature stratigraphique unifiée selon quatre zones de la région d'étude (Fig. 3.2). Les quatre zones comportent chacune une succession d'unités géologiques et sont définies ainsi :

Zone 1 : partie sud-ouest de la région d'étude en Alberta, au sud-ouest de la limite de dépôt de Virgelle;

Zone 2 : partie nord-est de la région d'étude en Alberta, au nord-est de la limite de dépôt de Virgelle;

Zone 3 : nord-ouest du Montana, à l'ouest de l'arche Sweetgrass;

Zone 4 : nord-est du Montana, à l'est de l'arche Sweetgrass.

La localisation de ces zones est indiquée au chapitre 5 (Fig. 5.5a).

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
	Formation Bearpaw	Formation Bearpaw	Formation Bearpaw	Formation Bearpaw
	Groupe Belly River	Groupe Belly River	Formation	Formation Judith River
	Formation Pakowki	Fm. Pakowki	Two	Formation Claggett
Milk River Formation	Membre DHC	Lea Park Formation	Medicine	Formation Eagle
	Membre Virgelle		Membre Alderson	Membre DHC
	Membre Telegraph Creek		Membre Alderson	Membre Virgelle
	Membre Telegraph Creek		Membre Telegraph Creek	Formation Telegraph Creek
	Groupe Colorado	Groupe Colorado	Groupe Colorado	Groupe Colorado

Figure 3.2 Nomenclature stratigraphique proposée dans la présente étude et représentation des formations géologiques décrites dans le modèle géologique 3D. À noter que la Formation Two Medicine a été subdivisée en trois membres (équivalents des formations Judith River et Claggett et du Membre Deadhorse Coulee). Le cadre correspondant à la Formation Bearpaw contient aussi les sédiments superficiels dans le modèle 3D.

Les hypothèses de travail qui ont conduit à l'harmonisation des données géologiques sont les suivantes :

Dans la zone 1, la couche de la Formation Eagle (Feltis 1981) a été subdivisée en trois parties, équivalentes aux trois membres constitutifs de la Formation Milk River. Les trois membres ont été reconstitués à l'aide des descriptions détaillées d'une centaine de diagraphies de la Montana Geological Society (2013). De plus, Les données géologiques décrivant la formation Milk River étaient manquantes dans une zone de 14 townships (1300 km²) à proximité de la

frontière (O'Connell 2014). Dans cette zone, la formation Milk River était trop superficielle pour être incluse dans les relevés géophysiques relatifs aux puits de diagraphie. Afin de combler ce manque de données, le fichier de la topographie du socle rocheux a été utilisé. Il a été supposé que le toit du socle rocheux correspondait au toit du Membre Deadhorse Coulee là où ce membre affleurerait. La même hypothèse a été faite pour les zones d'affleurements de Pakowki et de Belly River qui sont définies dans la carte géologique d'Okulitch et al. (1996).

Dans la zone 3, les membres constitutifs de la Formation Two Medicine ont également été décrits individuellement à partir de diagraphies (Montana Geological Society 2013). Certains des puits de Feltis et al. (1981) faisaient aussi partie des diagraphies de la Montana Geological Society (2013). La comparaison de ces puits a montré clairement que ce que Feltis et al. (1981) nommait Eagle Sandstone incluait les membres Telegraph Creek et Virgelle à l'ouest de l'arche Sweetgrass (zone 3). En revanche, à l'est de l'arche Sweetgrass (zone 4) une troisième partie recouvrant Virgelle et faisant 30 à 35 m d'épaisseur était également incluse dans la couche Eagle sandstone. Cette partie supérieure correspondrait au membre central de la Formation Eagle, tel que défini par Payenberg et al. (2002), c'est-à-dire à l'équivalent du membre Deadhorse Coulee en Alberta. Sur la base de ces observations, il a été supposé qu'à l'est de l'arche Sweetgrass (zone 4), le toit de Eagle Sandstone décrit par Feltis et al. (1981) correspondait au toit du membre Deadhorse Coulee tandis qu'à l'ouest de l'arche Sweetgrass (zone 3), il correspondait au toit du membre Virgelle. Dans la zone 3, la partie supérieure de la Formation Eagle est incluse dans la Formation Two Medicine et n'est pas décrite individuellement. Il restait à savoir quel intervalle de la partie inférieure de la formation Two Medicine équivalait au membre Deadhorse Coulee. Il a été décidé de définir les premiers 75 m à la base de la Formation Two Medicine comme équivalent au membre Deadhorse Coulee. Cette valeur se base sur la description des diagraphies de Montana Geological Society (2013), la définition de la Formation Two Medicine (WEBLEX Canada 2013) et Rice et Cobban (1977). Ainsi, un jeu de données représentant le toit du membre Deadhorse Coulee à l'ouest de l'arche Sweetgrass a été créé et ajouté au modèle.

Les couches géologiques recouvrant Eagle sandstone au Montana sont décrites seulement à l'est de l'arche Sweetgrass (zone 4) par Feltis et al. (1981) et la Montana Geological Society (2013). À l'ouest de l'arche Sweetgrass (zone 3) ces couches sont toutes incluses dans la formation Two Medicine. La formation Two Medicine est équivalente à la partie supérieure de la Formation Eagle et aux formations Claggett et Judith River (Zimmerman 1967). Ainsi, le toit de la formation Two Medicine a été assimilé au toit de la formation Judith River en zone 3.

Le toit de la Formation Pakowki a été considéré comme le toit de la formation Lea Park en Alberta (Williams et Dyer 1930; Meijer-Drees et Mhyr 1981; Dawson et al. 1994). Les données géologiques de Feltis (1981) et de la Montana Geological Society (2013) décrivent bien la formation Claggett au nord du Montana, à l'est de l'arche Sweetgrass (zone 4). Cependant, il n'existe pas de données décrivant la formation Claggett à l'ouest de l'arche Sweetgrass (zone 3) car l'invasion marine durant laquelle la formation Claggett/Pakowki a été déposée n'a pas atteint cette région. La formation Claggett s'amincit progressivement en biseau à l'ouest de l'arche Sweetgrass et là où elle disparaît, la Formation Judith River/Belly River recouvre l'équivalent du membre Deadhorse Coulee.

Il a été supposé que le toit du groupe Belly River en Alberta (zone 1) était l'équivalent stratigraphique du toit de la formation Judith River au Montana (Russell 1970). En Alberta, le toit du Groupe Colorado a été considéré comme le mur des membres Telegraph Creek en zone 1 et comme celui du membre Alderson en zone 2. Enfin, il a été décidé que la formation Bearpaw et les sédiments superficiels seraient regroupés en une seule couche dans le modèle géologique, située entre le toit de la formation Judith River/Belly River et la surface du sol.

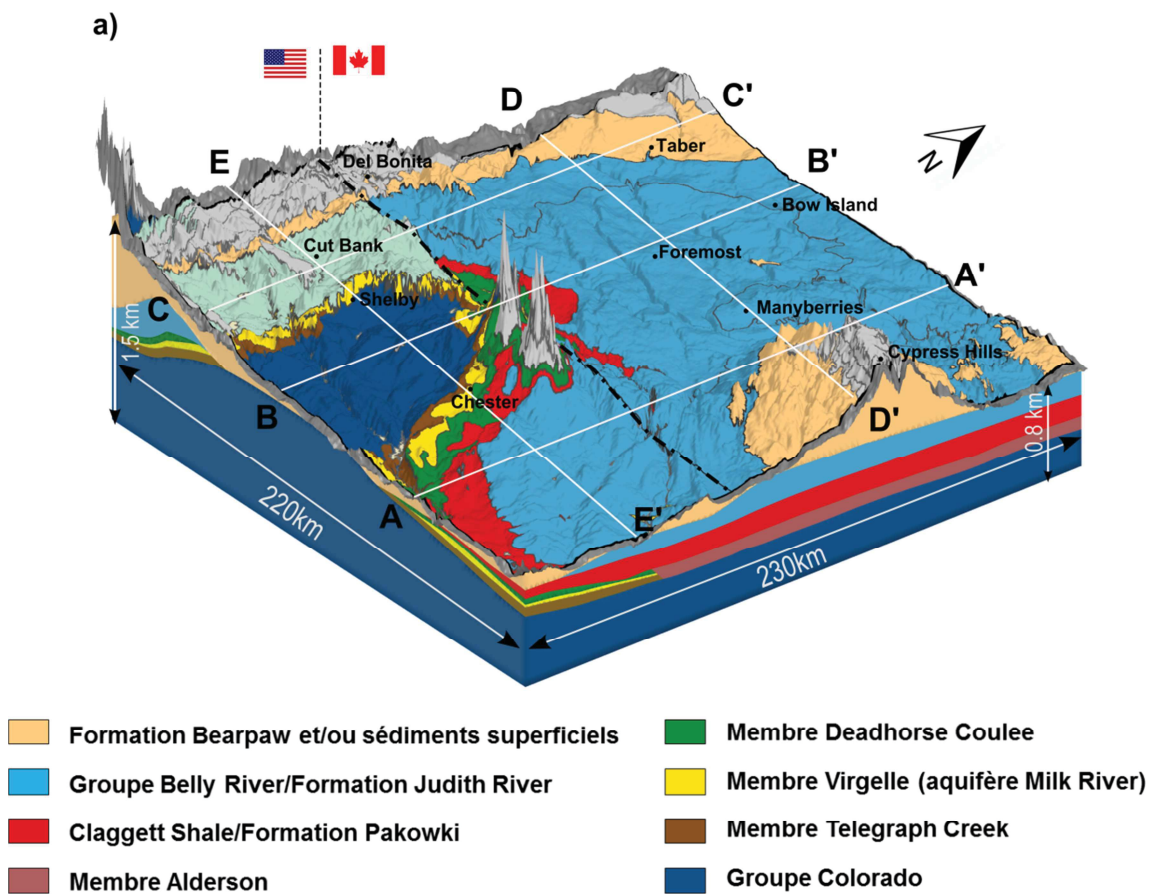
Ainsi, l'ensemble de ces hypothèses de travail a permis de produire un jeu de données géologiques transfrontalier harmonisé permettant la construction du modèle géologique unifié.

3.1.3 Modèle géologique tridimensionnel unifié

Le modèle géologique 3D unifié couvre 50 000 km² (Fig. 3.3a). La carte de la géologie du socle rocheux est superposée sur le modèle. Les unités géologiques représentées sont (en ordre ascendant): le groupe Colorado, le membre Telegraph Creek, le membre Virgelle, le membre Deadhorse Coulee, Le membre Alderson, la formation Claggett/Pakowki, la formation Judith River/Groupe Belly River, la formation Bearpaw et les sédiments superficiels (regroupés).

La formation Milk River est maintenant représentée de chaque côté de la frontière avec le même degré d'information, comme le montre la coupe AA' (Fig. 3.3b). Les trois membres constitutifs de la formation Milk River, en particulier l'aquifère Milk River (i.e. le membre Virgelle) sont représentés de manière continue du sud de l'Alberta jusqu'au nord du Montana. Ce modèle représente le Membre Alderson distinctement des trois autres membre de la formation Milk River. Jusqu'à présent, la relation entre ces 3 membres avaient été décrite conceptuellement mais n'avait jamais été incluse dans un modèle géologique. La discordance régionale entre les

trois membres de la formation Milk River et le Membre Alderson est ainsi représentée selon une zone de chevauchement (Fig. 3.3b).



b)

Coupe A-A' (après unification)

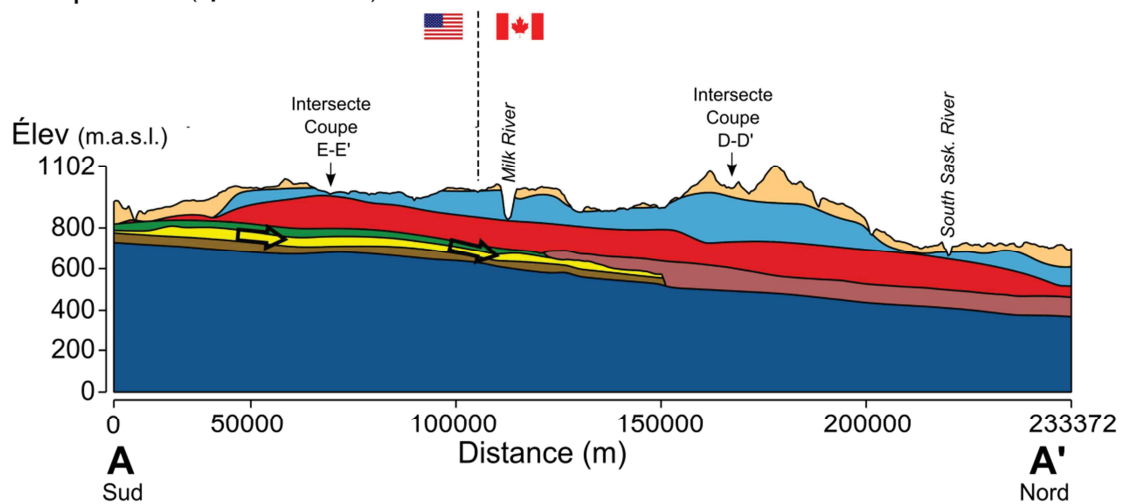


Figure 3.3 Modèle géologique 3D unifié de l'aquifère Milk River et des autres unités géologiques. a) Bloc 3D unifié indiquant la localisation des coupes géologiques. Le facteur d'exagération verticale est de 50. b) Coupe transfrontalière A-A' orientée sud-nord. Les flèches noires représentent la direction générale de l'écoulement souterrain d'après Meyboom (1960), Levings (1982) et Tuck (1993).

Le modèle géologique unifié représente les zones de sous-affleurement de l'aquifère près des Sweetgrass Hills et au voisinage de la frontière internationale. Ces zones ont été précédemment identifiées comme des zones de recharge de l'aquifère. Cependant, l'extension du modèle au Montana indique aussi la présence de deux zones de sous-affleurement localisée de part et d'autre de l'arche Sweetgrass. Ces deux branches d'affleurement peuvent avoir des implications hydrogéologiques en constituant des zones de recharge additionnelles.

Par ailleurs, le modèle unifié 3D a représenté la configuration semi-radiale de la formation Milk River (Fig. 3.4) déjà décrite par Meyboom (1960) en Alberta. De plus, le modèle complète cette représentation en montrant que la configuration semi-radiale de la formation Milk River se prolonge vers le Montana.

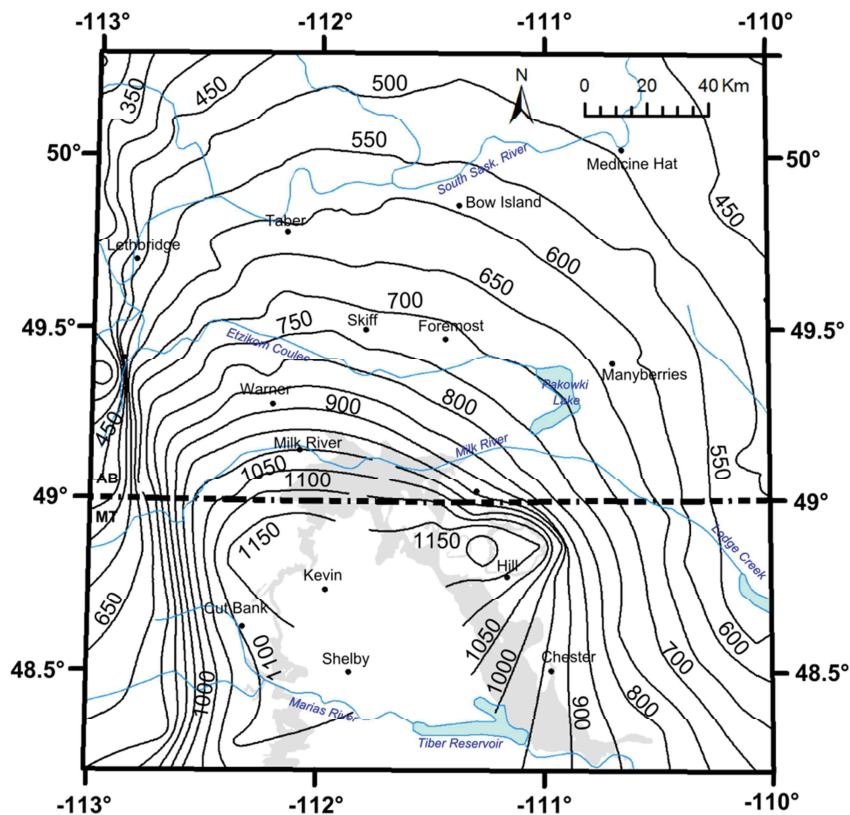


Figure 3.4 Élévation du toit de la Formation Milk River. L'intervalle entre chaque contour est de 50 m. L'aire grise correspond à la zone d'affleurement (ou de sous-affleurement) de la Formation Milk River.

Cette étude a permis également de proposer une délimitation géologique transfrontalière de l'aquifère Milk River (Fig. 3.5). L'aquifère Milk River est limité au nord, au nord-est et à l'est par une surface de discordance qui est graduellement recouverte par le membre Alderson. Le membre Alderson contient le champ de gaz Medicine Hat au nord-est de la zone d'étude, ce qui constitue une limite naturelle de l'aquifère. Au Montana, le champ de gaz Tiger Ridge forme la limite sud-est de l'aquifère. La Marias River au Montana a été considérée comme la limite sud de l'aquifère. Bien que l'aquifère Milk River puisse exister plus au sud, cette limite physiographique a été retenue en vue du modèle hydrogéologique ultérieur et considérant les données disponibles. Enfin, la limite ouest de l'aquifère a été tracée en tenant compte de la présence de puits crépinés dans le membre Virgelle. A l'ouest de cette limite, bien que le membre Virgelle soit toujours présent (jusqu'à la longitude -113° environ), aucun puits n'a été creusé dans cette unité car l'aquifère est trop profond (Stantec 2002).

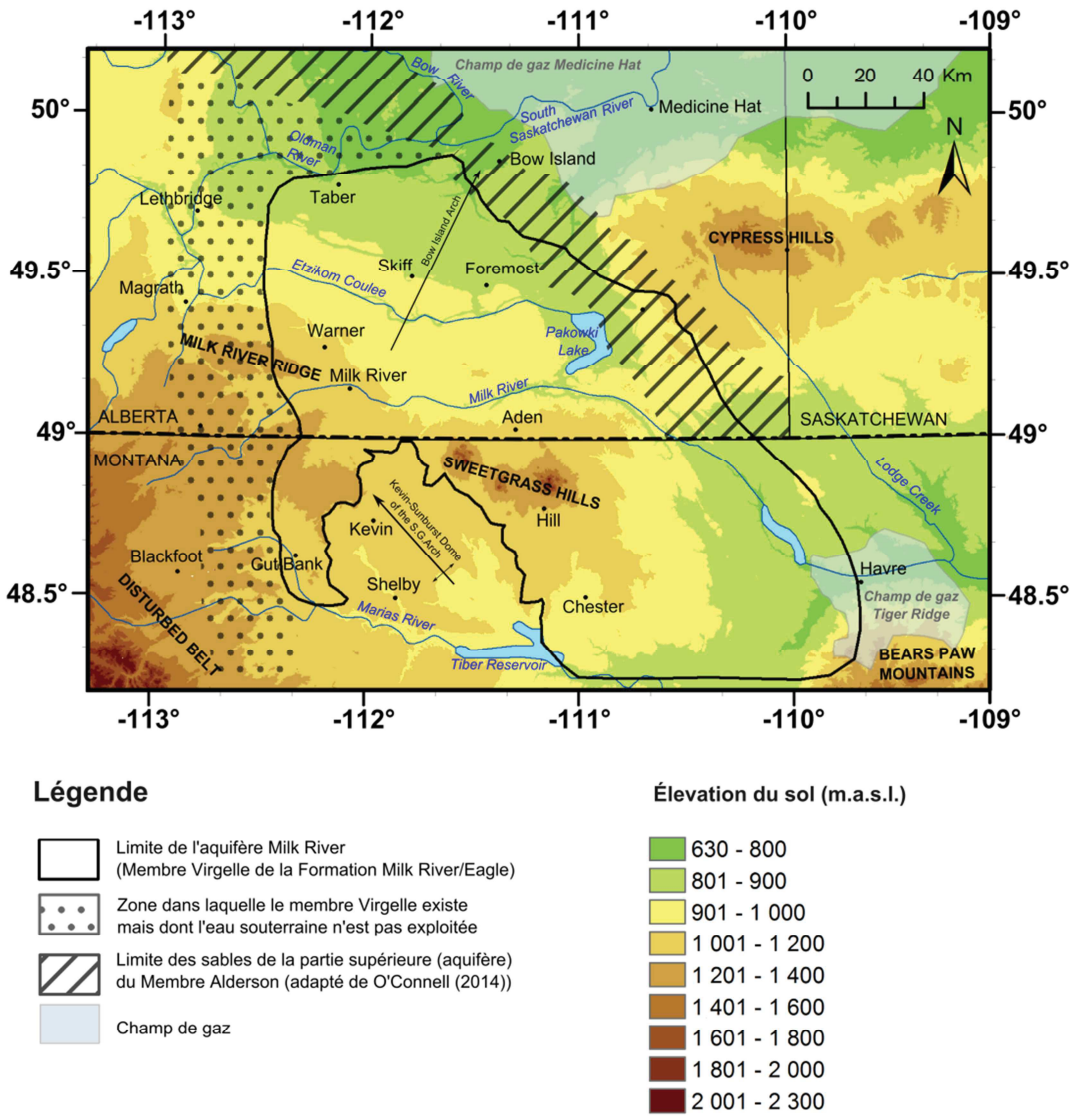


Figure 3.5 Limite géologique transfrontalière de l'aquifère Milk River.

Ainsi, ce modèle géologique transfrontalier constitue une composante majeure de l'étude de l'aquifère Milk River. Il forme la base des modèles transfrontaliers ultérieurs qui sont présentés dans les sections suivantes.

Les fichiers du modèle géologique 3D sont inclus dans l'Annexe III. L'illustration des autres coupes géologiques parcourant le modèle (Fig. 3.3a) ainsi que des cartes d'élévation du toit des principales unités géologiques et leurs isopaques sont présentées au chapitre 5 (Fig. 5.9b et 5.10).

3.2 Modèle conceptuel hydrogéologique

3.2.1 Conditions hydrogéologiques

La première carte transfrontalière de la transmissivité (T) de l'aquifère Milk River a été produite en compilant 133 données de T provenant de Meyboom (1960); Persram (Alberta Environmental Protection, Hydrogeology Branch, rapport non publié, 1992) cité par AGRA (1998); AGRA (1998); Zimmerman (1967); Tuck (1993); Levings (1982); Norbeck (2006) et Water Right Solutions Inc. (Cool Spring Colony - Demande pour 'Beneficial Water Use Hydrogeologic Assessment', soumise pour la demande de permis en eau # 40G 30045714, rapport non publié, 2009).

Les données de T, leur distribution spatiale et le log T (interpolé par krigeage dans ArcGIS) sont présentés à la figure 3.6.

Les valeurs de T les plus élevées se trouvent au niveau des Sweetgrass Hills et dans la région sud-ouest de l'aquifère au Montana. Les failles et fractures (porosité secondaire) autour de l'intrusion ignée des Sweetgrass Hills ont augmenté la T du Membre Virgelle localement (Tuck 1993). Dans le coin sud-ouest de la zone d'étude, Zimmerman (1967) a indiqué que les déformations structurelles ont pu grandement affecter la T du Membre Virgelle, qui transmet l'eau principalement via le grès fracturé. Dans la partie sud-est de la région d'étude au Montana, la T est basse ($1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$). En Alberta, la combinaison de l'ensemble des données disponibles montre une zone centrale de faible T entourée de couloirs plus transmissifs, comme précédemment évoqué par AGRA Earth and Environmental Limited (1998).

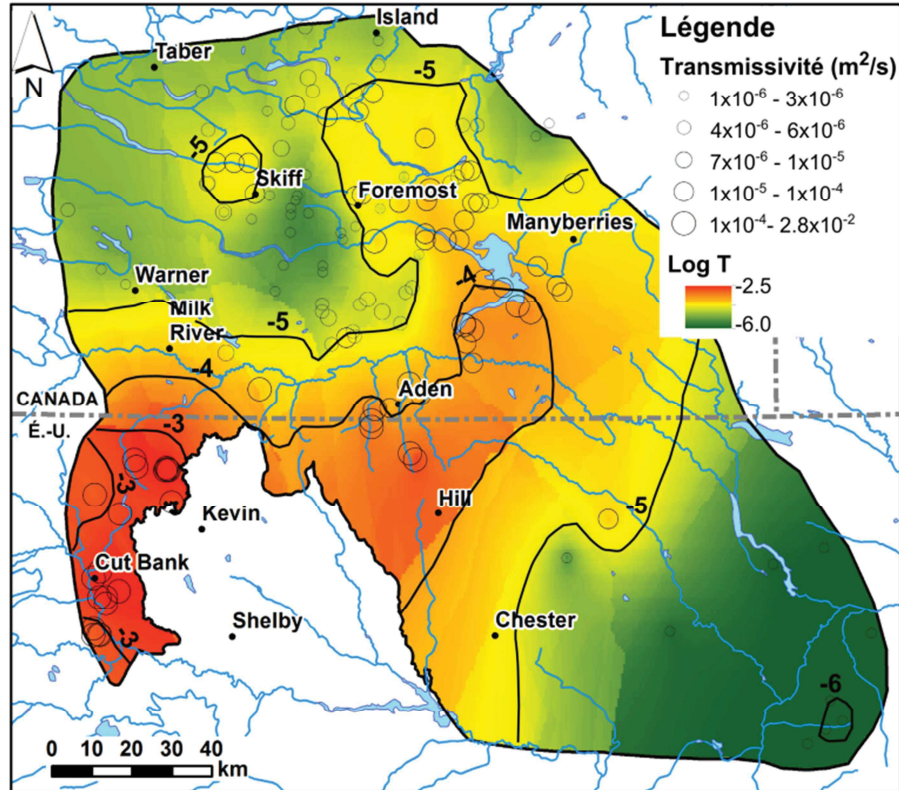


Figure 3.6 Carte transfrontalière de la transmissivité T de l'aquifère Milk River (valeurs krigées à partir des points de données disponibles indiqués sur la carte).

Carte piézométrique

La première carte piézométrique transfrontalière de l'aquifère Milk River (Fig. 3.7) a été réalisée en compilant les cartes historiques de Zimmerman (1967), AGRA Earth and Environmental Limited (1998), Tuck (1993) et Levings (1982). De plus, quatre profils pression-profondeur provenant de Berkenpas (1991) ont été convertis en charge hydraulique équivalente et utilisés pour compléter la carte piézométrique aux limites nord et est de l'aquifère en Alberta. Un effort particulier a été fait pour harmoniser l'ensemble des jeux de données, en particulier au niveau de la frontière Canada/États-Unis afin de représenter au mieux le caractère transfrontalier de l'écoulement de l'eau souterraine. Un jeu de données de 40 mesures de niveau d'eau récentes (2006-2014) collecté durant les travaux de terrain de cette thèse (2012-2013), ou provenant des bases de données publiques (GWIC (2015), Alberta Environment and Parks (2015)) et de PFRA (rapport non publié, 2014) a été utilisé pour valider la carte transfrontalière et confirmer la configuration de l'écoulement souterrain régional qui en résulte (Annexe VI).

Les charges hydrauliques les plus élevées ont été mesurées dans les Sweetgrass Hills et dans une région au nord de Cut Bank. Ces zones correspondent aux zones de recharge où l'aquifère Milk River affleure ou sous-affleure. Des charges hydrauliques élevées ont été aussi mesurées à l'est de Manyberries, Alberta et dans le coin sud-est de la zone d'étude au Montana, indiquant une composante d'écoulement d'eau souterraine provenant des autres unités géologiques. Cette eau provient des Cypress Hills (Toth et Corbet 1986) et des Bear Paws Mountains (Levings 1982). Les zones de bas piézométriques sont localisées au niveau du lac Pakowki, au nord de la région d'étude en Alberta et le long de Cut Bank Creek et Big Sandy Creek au Montana. Les données suggèrent que ces bas piézométriques sont corrélés avec les talwegs des vallées enfouies dans la zone d'étude. Les vallées enfouies peuvent influencer l'émergence de l'eau souterraine de l'aquifère Milk River, comme le suggère Borneuf (1976) au sud de l'Alberta. L'écoulement souterrain converge localement vers les zones de fort pompage, incluant le village de Foremost et la colonie Starbrite (15 km au sud de Foremost). Les graphiques de pression-profondeur de Berkenpas (1991) indiquent la présence d'une région de très faible écoulement (conditions hydrostatiques) au sud-est du lac Pakowki (le long de l'isopièze 910 m sur la Fig. 3.7)

A partir de ces observations, deux flux transfrontaliers ont été mis en évidence :

- (i) Un flux est provenant des Sweetgrass Hills dirigé vers le nord
- (ii) Un flux ouest provenant du nord de la région de Cut Bank dirigé vers le nord

Une première quantification de ces flux transfrontaliers a été estimée à partir de la carte piézométrique et de la carte de la transmissivité de l'aquifère (Fig. 3.6). Le flux transfrontalier total traversant la frontière internationale depuis le Montana vers l'Alberta a été estimé à 9.0×10^6 m³/an (dont 3.9×10^6 m³/an provenant du flux est, et 5.1×10^6 m³/an pour le flux ouest).

Dans le cadre de cette thèse, quatre nouvelles mesures de pression ont été obtenues sur des puits coulant en Alberta en 2013 (Fig. 3.7). Ces mesures ont été prises au nord de la zone d'étude et dans la région du lac Pakowki, ce qui est toujours cohérent avec le tracé proposé par Dowling (1917). Ces pressions varient de 50 à 221 kPa (5 à 22 m d'eau) et donnent une indication sur les conditions actuelles de l'artésianisme au sein de l'aquifère Milk River.

Bien que la carte piézométrique transfrontalière soit basée sur quatre cartes représentatives de différentes époques et échelles, les 40 points de données récents sont en accord avec les cartes historiques; à l'exception des zones de fort pompage pour lesquelles une mise à jour des isopièzes était nécessaire. De plus, les charges hydrauliques obtenues à partir des gradients de

pression régionaux aux limites nord et est de la zone d'étude (Berkenpas 1991) sont aussi cohérents avec les charges hydrauliques observées. C'est pourquoi la carte piézométrique est considérée comme valide à l'échelle régionale.

La recharge de l'aquifère Milk River se fait principalement via l'infiltration des précipitations sur les zones d'affleurement ou de sous-affleurement. Le taux de recharge potentielle a été estimé à environ 50 mm/an à partir de la méthode de bilan (*Soil-Moisture Balance*; Rushton et al. 2006, Annexe X). Le taux de recharge effective a été estimé en faisant l'hypothèse que le flux observé le long de la frontière (environ 9.0×10^6 m³/an) était dû uniquement à la fraction de la recharge potentielle qui avait réellement atteint l'aquifère. En divisant ce flux total par la surface de l'affleurement de l'aquifère qui contribue au flux transfrontalier (9.28×10^8 m²), un taux de recharge effective de 9.6 mm/an a été calculé. Ce taux de recharge effective représente 2.4% des précipitations annuelles totales (environ 400 mm/an dans la zone d'affleurement près de la frontière). Dans la région des Prairies, les taux de recharge sont compris entre 2 et 9% des précipitations annuelles (Rehm et al. 1982). Robertson (1988), en utilisant un modèle numérique a même obtenu des valeurs de recharge localement au niveau de la zone d'affleurement inférieures à 1% des précipitations annuelles. Cette faible valeur a été expliquée par la forte évapotranspiration causée par les vents Chinook (forts vents chauds et secs). Le pourcentage obtenu dans la présente étude est donc proche de celui de Robertson (1988) et dans les valeurs inférieures de la gamme de Rehm et al. (1982)

L'émergence naturelle de l'aquifère Milk River se produit via des sources et des surfaces de suintement le long de la rive sud de la Milk River et de ses affluents en Alberta (Meyboom 1960; Milk River Watershed Council Canada 2008). Au Montana, l'émergence a lieu au niveau des Sweetgrass Hills, le long de Cut Bank Creek et de l'escarpement de Virgelle (Zimmerman 1967; Tuck 1993). La carte piézométrique (Fig. 3.7) montre que la pente de la surface piézométrique est beaucoup plus prononcée au sud de la Milk River qu'au nord. Cela suggère que la Milk River et ses affluents interceptent une partie substantielle du flux qui se dirige vers le nord. En comparant la magnitude des flux en amont et en aval de la Milk River, l'interception par la rivière a été estimée à près de 96% du flux provenant du sud.

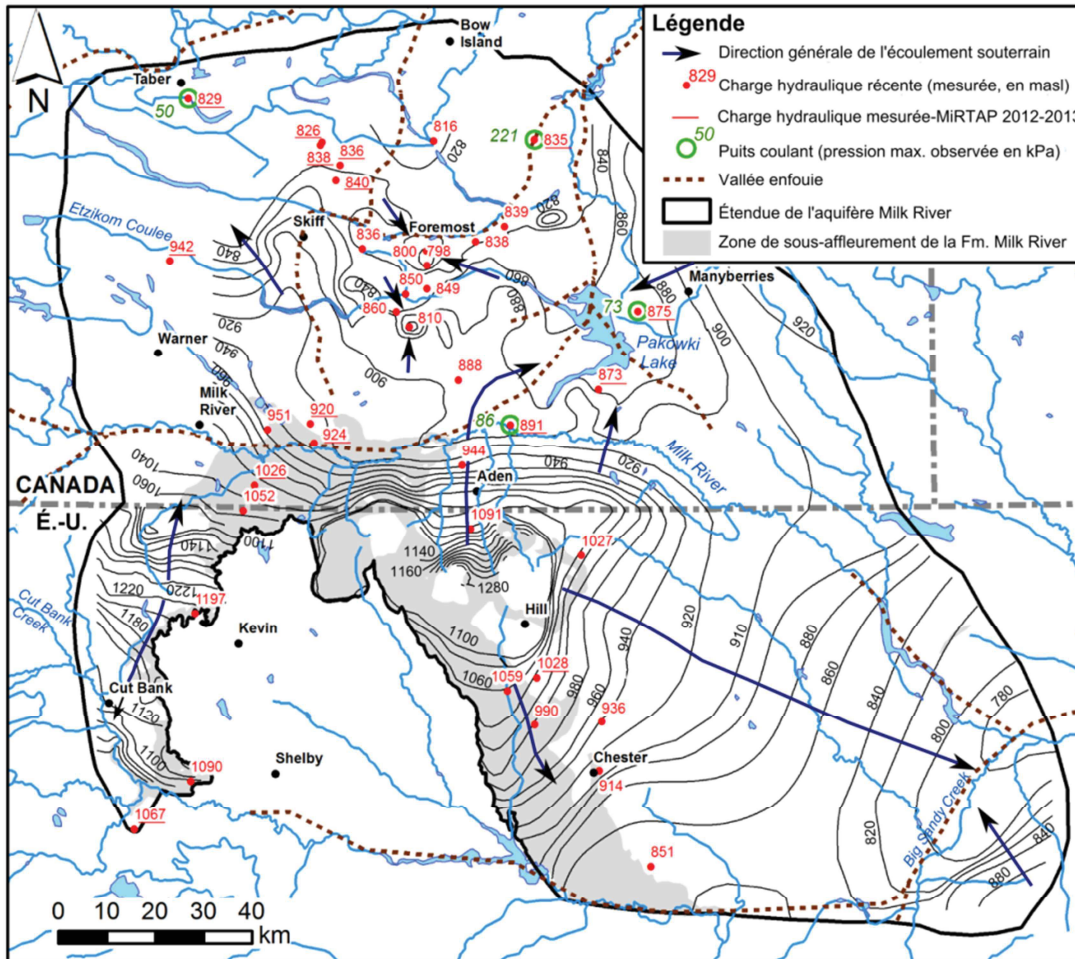


Figure 3.7 Carte piézométrique transfrontalière de l'aquifère Milk River. L'intervalle entre chaque contour est de 20 m.

Flux inter-formation

Aucune autre émergence naturelle en surface n'ayant été identifiée, le phénomène de drainage à travers les aquitards (ou flux inter-formation) doit être envisagé comme le principal mécanisme d'émergence naturelle de l'aquifère. Afin d'évaluer ce mécanisme, les gradients hydrauliques verticaux entre l'aquifère Milk River et les unités aquifères qui l'encadrent ont été calculés et représentés spatialement en Alberta, où les données requises étaient disponibles. La figure 3.8a représente le gradient hydraulique vertical entre les sédiments superficiels et l'aquifère Milk River et la figure 3.8b représente le gradient hydraulique vertical entre l'aquifère et Bow Island Sandstone. Les charges hydrauliques dans l'aquifère proviennent de AGRA Earth and Environmental Limited (1998), celles des sédiments superficiels proviennent de Swanick (1982) et les charges hydrauliques de Bow Island Sandstone proviennent de Lies et Letourneau (1995).

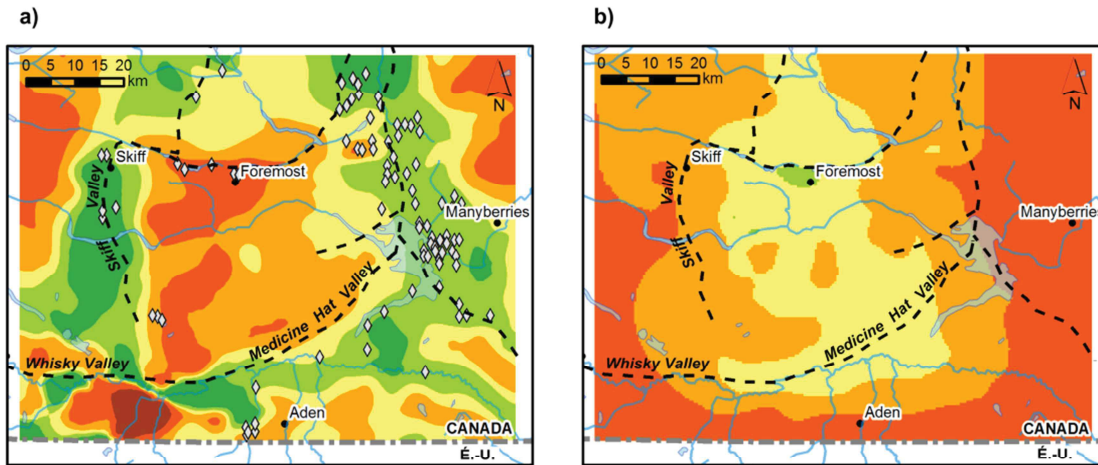
L'épaisseur entre l'aquifère et la base des sédiments superficiels a été obtenue du modèle géologique 3D (Pétre et al. 2015). L'épaisseur moyenne du groupe Colorado entre l'aquifère Milk River et Bow Island sandstone a été prise à 400 m (Swanick 1982; Phillips et al. 1986).

Un gradient vertical négatif indique un flux potentiel dirigé vers le haut tandis qu'un gradient positif indique un flux potentiel dirigé vers le bas.

Le gradient hydraulique vertical entre les sédiments superficiels et l'aquifère Milk River est négatif à proximité des vallées enfouies (Medicine Hat, Skiff et Whisky) (Fig. 3.8a). Cela indique une composante de flux dirigé vers le haut depuis l'aquifère Milk River vers les sédiments superficiel (condition d'émergence). Ce flux vers le haut est confirmé par la présence de nombreux puits artésiens jaillissant. Le flux de drainance semble être facilité par la présence des vallées enfouies qui ont incisé la roche de socle (Formations Belly/Judith River et Pakowki/Claggett), réduisant ainsi la distance entre l'aquifère et les sédiments superficiels.

Dans la partie centrale de la carte et les hauts topographiques, le gradient hydraulique vertical est positif, indiquant un flux dirigé vers le bas depuis les sédiments superficiels vers l'aquifère (conditions de recharge). Cette observation est en faveur de l'interprétation de Toth et Corbet (1986) qui ont indiqué que les hauts topographiques constituaient des zones de recharge pour l'aquifère.

La figure 3.8b montre que le gradient hydraulique vertical entre l'aquifère Milk River et Bow Island Sandstone est positif. Cela indique une composante de flux dirigé vers le bas depuis l'aquifère vers le Groupe Colorado. Ce flux de drainance est cohérent avec Toth et Corbet (1986) et Hendry et Schwartz (1988) qui suggèrent que le Groupe Colorado est un puits de potentiel pour l'aquifère Milk River. Ce mécanisme résulterait du rebond élastique des shales dans le Groupe Colorado après les 700 m d'érosion de la surface du sol qui ont eu lieu durant le Pliocène et Pléistocène (Toth et Corbet 1986, section 2.3.4). La figure 3.8c résume par une coupe schématique les implications des gradients hydrauliques verticaux sur les flux interformation depuis et vers l'aquifère Milk River.



Légende

- - Talweg de vallée enfoncée
- ◇ Puits coulant (AGRA 1998)

Gradient hydraulique vertical



c)

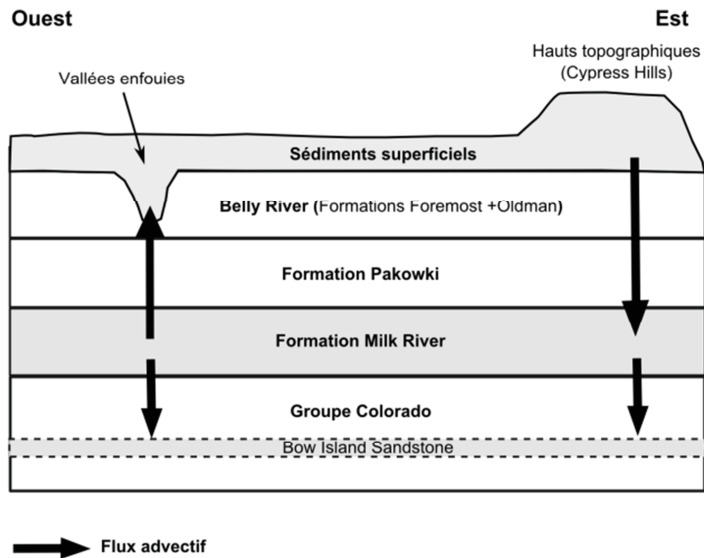


Figure 3.8 Gradients hydrauliques verticaux au sud de l'Alberta entre a) les sédiments superficiels et l'aquifère Milk River et b) l'aquifère Milk River et l'unité de grès sous-jacente Bow Island. c) diagramme représentant les tendances des flux verticaux (pas à l'échelle).

3.2.2 Conditions hydrogéochimiques

Carte géochimique et types d'eau

Les types d'eau souterraine dans l'aquifère Milk River ont été déterminés à partir d'analyses chimiques historiques (Tuck 1993; Milk River Watershed Council Canada 2008; Wozniak et al. 2011; GWIC 2015) et récentes (projet MiRTAP en 2013, dans le cadre de cette thèse). Seules les analyses avec une erreur d'équilibre ionique inférieure à +/- 10% ont été retenues; constituant un jeu de données de 151 échantillons. Comme le montre le diagramme de Piper de la figure 3.9a, six types d'eau ont ainsi été définis. Leur distribution spatiale est présentée à la figure 3.9b.

Le groupe 1 correspond aux eaux de type Ca-Mg-HCO₃. Ce groupe est présent au niveau des Sweetgrass Hills au Montana et peut également contenir des sulfates en ion mineur. Les types d'eau présentant majoritairement des sulfates (groupes 2 et 3) sont localisés principalement à proximité de la zone de d'affleurement de la Formation Milk River. Les types d'eau du groupe 4 (Na-HCO₃-SO₄) et du groupe 5 (Na-HCO₃) prédominent au-delà de la zone de d'affleurement au sud de l'Alberta et au nord du Montana. Le groupe 6 (Na-Cl) est présent dans les zones les moins transmissives de l'aquifère.

A partir des lignes d'écoulement générales définies à la figure 3.7, l'évolution des types d'eau qui a été déduite va des groupes 1 et 2 vers les groupes 3, 4, 5 et 6.

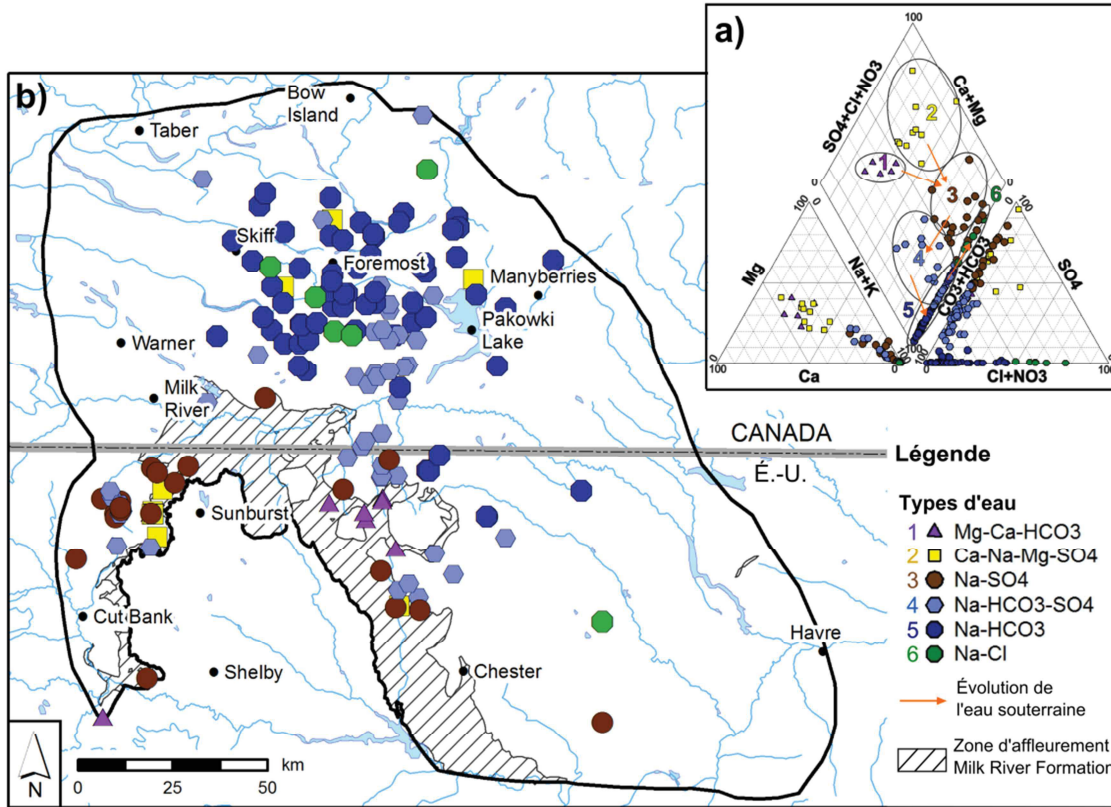


Figure 3.9 a) Diagramme de Piper montrant les six types d'eau identifiés dans l'aquifère Milk River b) Distribution spatiale des types d'eau souterraine dans la zone d'étude.

L'étude des ions chlorures est également très informative du système d'écoulement régional. La carte transfrontalière de la concentration en ions chlorures dans l'aquifère (Fig. 3.10) montre une augmentation depuis la zone de recharge vers le nord en Alberta et vers le sud-est et sud-ouest au Montana. Cette augmentation de concentration suit la direction générale d'écoulement. Cependant, la distribution spatiale des concentrations en chlorure est complexe en Alberta où 2 couloirs d'eau plus diluée sont présents et correspondent à des zones de transmissivités plus fortes de l'aquifère (Fig. 3.6). Hendry et Schwartz (1988) ont utilisé la distribution des chlorures dans l'aquifère pour déterminer les principaux chemins d'écoulement en supposant que le flux d'eau souterraine suivait les zones de faibles concentrations en chlorures. La figure 3.10 montre aussi qu'un chemin d'écoulement dirigé vers le lac Pakowki devrait aussi exister ainsi qu'un autre chemin d'écoulement vers le sud-est au Montana.

Les chemins d'écoulement préférentiels déduits des faibles concentrations en chlorures (Fig. 3.10) sont cohérents avec les indications fournies par la carte piézométrique et correspondent

aux zones de plus forte transmissivité. La configuration des concentrations en chlorures en Alberta suggère que les eaux de recharge plus diluées déplacent les eaux connées selon les zones les plus transmissives de l'aquifère, plutôt que de suivre un front de recharge uniforme (Fabryka-Martin et al. 1991). Une preuve de ceci pourrait être la zone de forte concentration en chlorures qui se trouve au sud de Foremost et à l'est de Chester au Montana qui sont des zones moins perméables.

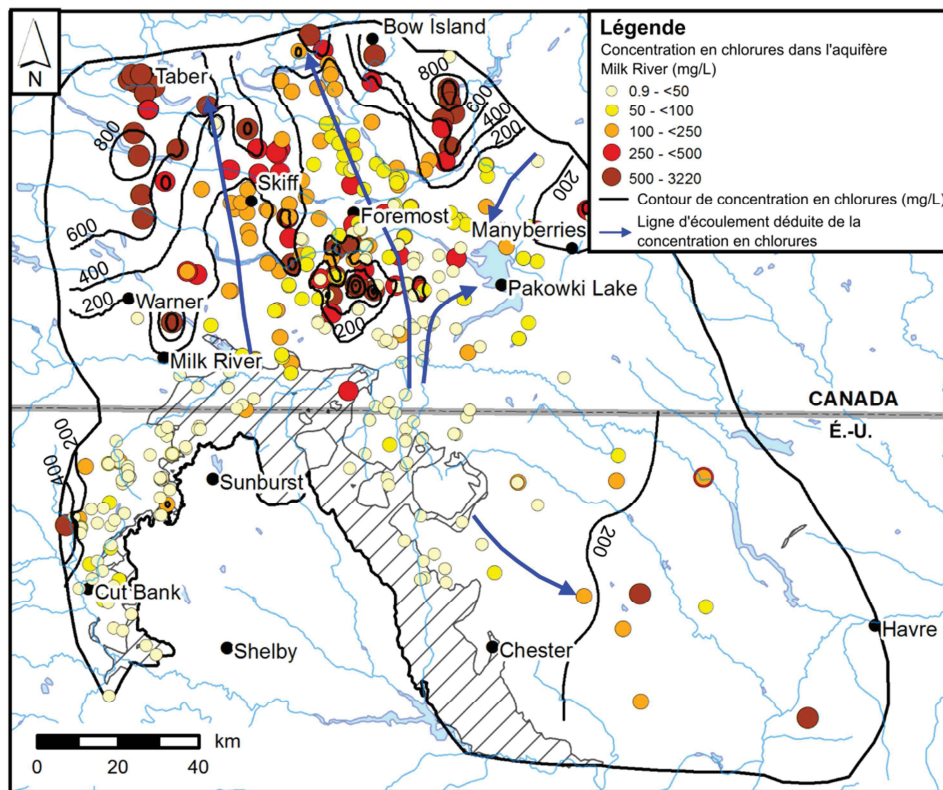


Figure 3.10 Concentration en chlorures dans l'aquifère Milk River. L'intervalle entre chaque contour est de 200 mg/L. Les lignes d'écoulement préférentielles indiquées par les flèches bleues sont déduites des faibles concentrations en chlorures.

Les analyses isotopiques ont montré que les échantillons d'eau présentant une concentration en tritium (période de 12,3 ans) au-dessus du seuil de détection étaient localisés dans la zone d'affleurement de la Formation Milk River, en Alberta et au Montana. Cela indique une composante de recharge moderne dans cette zone (Clark et Fritz 1997). Le tritium est absent du reste de la zone d'étude.

Les analyses d'eau pour la datation au carbone-14 (période de 5 730 ans) ont montré que la plupart des régions au sud de l'Alberta avaient des concentrations qui n'excédaient pas 2 pmc (pourcent de carbone moderne). Cela indique que l'eau souterraine contient très peu ou pas de

^{14}C . De ce fait, le temps de résidence de l'eau souterraine est plus grand que 30 000 ans dans ces régions avec de faibles valeurs de ^{14}C (Clark et Fritz 1997). Les plus grandes concentrations en ^{14}C ont été mesurées près de la frontière Canada/États-Unis en amont de la Milk River, dans la région des Sweetgrass Hills et dans le coin sud-ouest de la zone d'étude au Montana.

Comme il n'y a plus de ^{14}C détectable dans le reste de la zone d'étude, le chlore-36 (période de 300 000 ans) a été utilisé comme outil de datation de l'eau souterraine. La distribution spatiale du rapport $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ montre que la valeur du rapport diminue le long de l'écoulement, alors que la concentration en chlorures augmente. Dans la partie nord de la zone d'étude et au sud-est des Sweetgrass Hills, le rapport $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ atteint une valeur de 4 à 8×10^{-15} . Cette gamme correspond à la valeur de l'équilibre séculaire dans le grès (taux de production égale le taux de désintégration), ce qui indique que l'eau dans ces zones est plus vieille que 2.5 Ma (Bentley et al. 1986).

Les isochrones tracées à partir de la formule standard de Bentley et al. (1986) varient de 0.5 Ma en amont hydraulique à 2 Ma en aval hydraulique (voir Chapitre 6, figure 6.11). La présence d'eau très ancienne à la limite nord de la zone d'étude et au sud-est est cohérente avec l'hydrodynamique de l'aquifère et les types d'eau évoluées qui y sont observés. Les âges isotopiques sont toutefois plus grands que les âges hydrodynamiques. En effet, les âges hydrodynamiques estimés dans les études précédentes varient de 250 000 à 500 000 ans à la limite nord de l'aquifère (Schwartz et Muehlenbachs 1979; Swanick 1982; Hendry et Schwartz 1988). Or, ces âges ne prennent pas en compte le phénomène de dispersion qui a lieu dans l'aquifère. Fabryka-Martin et al. (1991) et Fröhlich et al. (1991) suggèrent que les temps de résidence de l'eau souterraine obtenus des modèles hydrodynamiques devraient être considérés comme une limite basse de l'âge moyen de l'eau souterraine tandis que les âges basés sur le ^{36}Cl devraient être considérés comme la limite haute.

3.2.3 Modèle conceptuel

L'aquifère Milk river présente des conditions de nappe libre ou semi-captive dans la zone d'affleurement et de sous-affleurement du membre Virgelle, tel que présenté sur la coupe conceptuelle hydrogéologique de la figure 3.11. L'aquifère présente des conditions artésiennes dans la partie nord de la zone d'étude. L'étude de l'écoulement souterrain et la quantification des flux en amont et en aval de la rivière Milk montre que l'émergence de l'aquifère en Alberta se produit par l'interception du flux par la Milk River. La carte piézométrique et les données isotopiques indiquent que le flux est intercepté sur toute la longueur de la Milk River et une

partie de Verdigris Coulee, même si la connexion hydraulique est indirecte. Ce mécanisme d'émergence pourrait être favorisé par la présence de vallées enfouies sous l'actuelle Milk River.

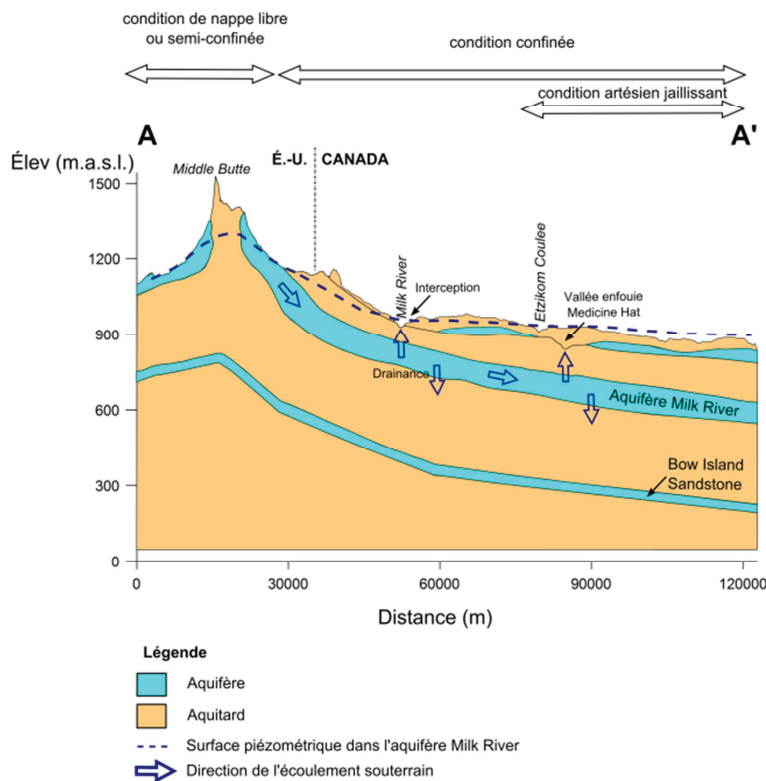


Figure 3.11 Coupe hydrogéologique de l'aquifère Milk River située le long d'une ligne d'écouement. La localisation de la coupe est indiquée au chapitre 6 (Figure 6.2).

Les eaux modernes (définies par des concentrations en tritium élevées) sont situées dans la zone d'affleurement près de la frontière (Fig. 3.12), mais aussi à l'ouest de l'arche Sweetgrass. Cela suggère que la totalité de la ceinture d'affleurement autour de l'arche Sweetgrass pourrait constituer une zone de recharge de l'aquifère. De plus, les hydrogrammes de trois puits d'observations situés dans la branche d'affleurement au Montana (GWIC ID 88838, 45363, 90371) montrent que les fluctuations du niveau d'eau suivent les changements météorologiques, ce qui appuie l'hypothèse selon laquelle ces puits sont situés dans une zone de recharge. Cette hypothèse diffère des études précédentes, dans lesquelles l'emphase était mise particulièrement sur les Sweetgrass Hills comme zone de recharge principale (Meyboom 1960; Domenico et Robbins 1985).

Il n'y a plus de ^{14}C dans les eaux de l'aquifère Milk River au nord de la Milk River. Cette observation suggère qu'une grande partie du flux souterrain est intercepté par la Milk River. Par conséquent le flux résiduel et le gradient hydraulique sont très faibles au-delà de la rivière. Il en

résulte des vitesses d'écoulement lentes et de très grands temps de résidence, comme indiqué par les traceurs isotopiques. Au Montana, la disparition du ^{14}C est simplement due à la désintégration radioactive le long de l'écoulement. Au sud-ouest de l'arche Sweetgrass au Montana, la diminution du ^{14}C est moins prononcée. Cette observation est cohérente avec les faibles concentrations en chlorures, la forte transmissivité et la prévalence de types d'eau peu évolués contenant des sulfates définissant cette zone. Toutes ces indications montrent que l'écoulement de l'eau souterraine est plus actif dans cette partie de l'aquifère.

Au nord de la Milk River et dans la région sud-est de la zone d'étude, des eaux anciennes voire très anciennes (jusqu'à 2 Ma) sont présentes, comme l'indiquent les données de ^{36}Cl . L'écoulement souterrain est faible et les types d'eau sont plus évolués. Berkenpas (1991) a fourni des preuves qu'une région de flux très faible voire nul existait au sud-est du Lac Pakowki et au sud de Manyberries (conditions hydrostatiques). Le type d'eau évolué (Na-HCO_3) et le grand temps de résidence que l'on observe dans cette zone sont cohérents avec les indications de Berkenpas (1991).

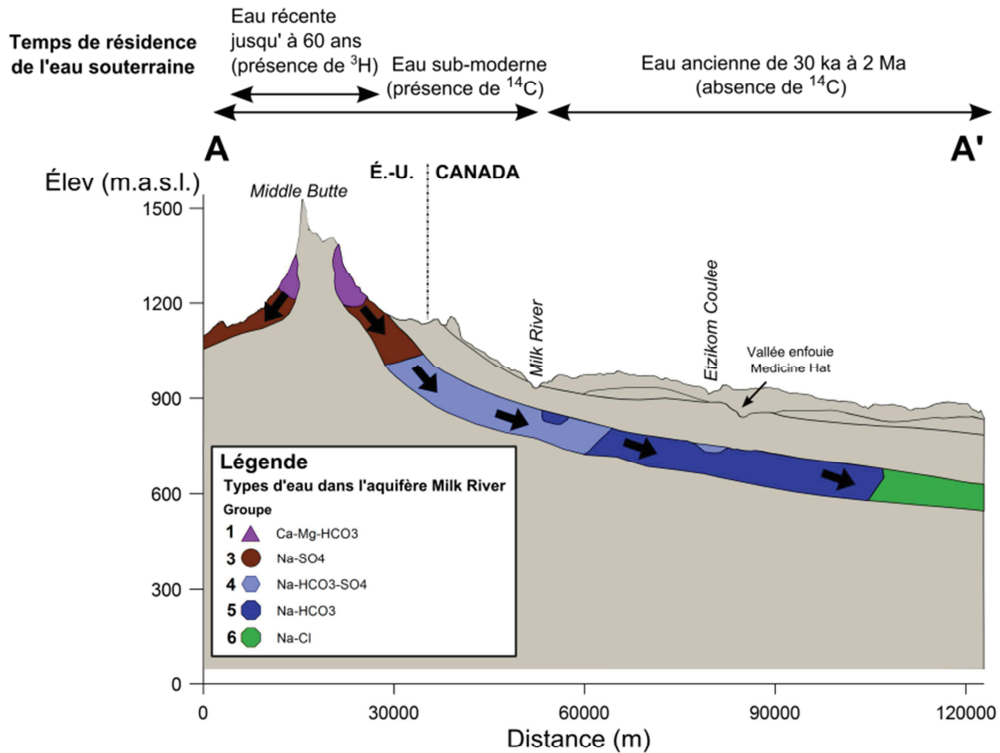


Figure 3.12 Modèle conceptuel géochimique de l'aquifère Milk River représenté par une coupe partant des Sweetgrass Hills (Montana, États-Unis) vers la limite nord-est de l'aquifère en Alberta, Canada. Les types d'eau sont décrits selon la distribution spatiale de la figure 3.9b. La direction de l'écoulement dans l'aquifère Milk River est indiquée par des flèches noires. Le temps de résidence de l'eau souterraine indiqué est basé sur les données isotopiques (ka signifie millier d'années et Ma signifie million d'années)

Une vue en plan du modèle conceptuel hydrogéologique de l'aquifère Milk River est présenté sur la figure 3.13. La région de recharge active correspond à la présence de tritium dans les eaux de l'aquifère et est limitée à la zone d'affleurement/sous-affleurement de l'aquifère. Un influx d'eau souterraine semble arriver des hauts topographiques (Cypress Hills, Bear Paws Mountains). La région d'écoulement actif correspond à la présence de ^{14}C et est située au-delà de la zone de recharge et en amont de la Milk River. La région d'écoulement souterrain faible est présente dans la majeure partie de la zone d'étude et est définie par l'absence de ^{14}C et la présence de types d'eau évolués. A l'exception de la Milk River, il n'y a pas de zone d'émergence naturelle directe; mais l'émergence peut avoir lieu via la drainance verticale le long des vallées enfouies et à travers l'aquitard Colorado, comme le montrent les gradients hydrauliques verticaux (Fig. 3.8). La drainance verticale pourrait aussi être favorisée dans la partie nord-ouest de la zone d'étude en raison de l'amincissement progressif de la Formation

Pakowki/Claggett (Swanick 1982; Pétré et al. 2015). Au Montana, la carte piézométrique indique que le même mécanisme d'émergence pourrait avoir lieu selon un flux depuis la formation Eagle dirigé vers le haut à travers les formations Claggett et Judith River jusqu'aux sédiments superficiels de la région de Big Sandy Creek. De plus, la présence des Bear Paws Mountains dans le coin sud-est de la zone d'étude empêcherait l'écoulement souterrain de progresser plus à l'est et cela inciterait par conséquent la drainage verticale.

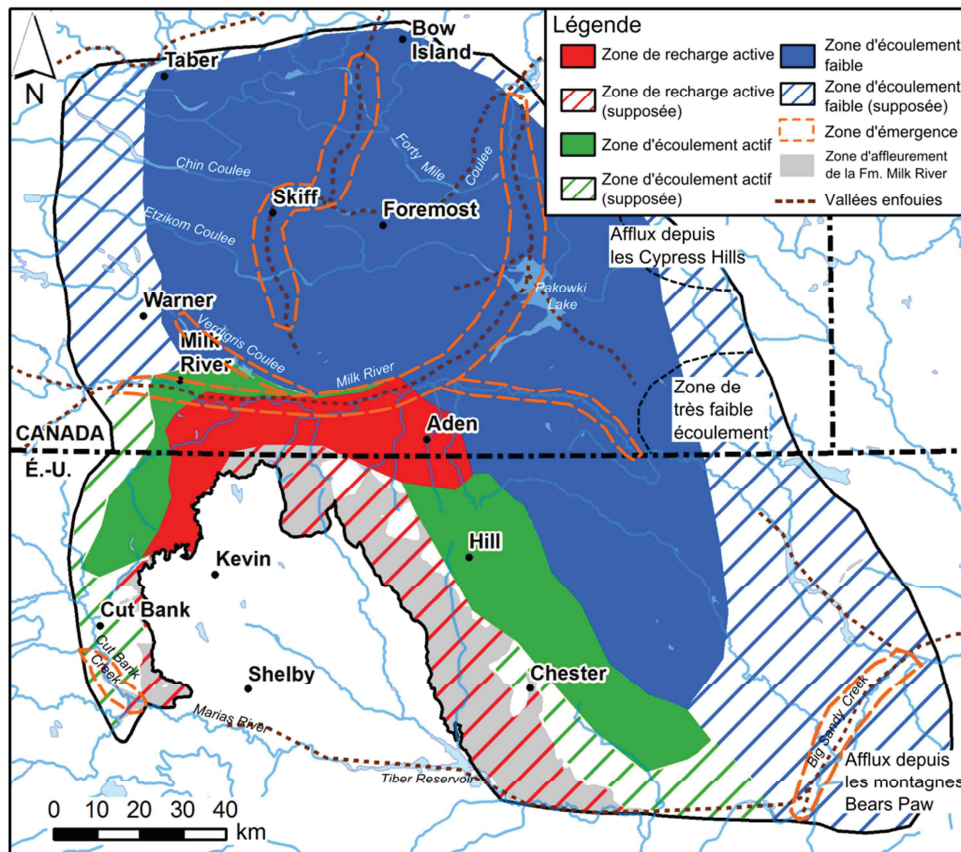


Figure 3.13 Vue en plan du modèle conceptuel de l'aquifère Milk River.

En conclusion, les données hydrogéologiques et géochimiques de chaque côté de la frontière ont été rassemblées afin de produire le premier modèle conceptuel transfrontalier de l'aquifère Milk River. La compilation de données historiques et des données nouvellement acquises ont contribué à étendre la compréhension de l'hydrogéologie de l'aquifère au nord du Montana et au sud de l'Alberta. Le travail présenté ci-dessus a permis une claire délimitation des limites naturelles de l'aquifère et de ses 3 sous-systèmes qui le composent, suivant les limites naturelles de l'aquifère.

De plus, les flux transfrontaliers est et ouest ont été identifiés et quantifiés. La définition des types d'eau de chaque côté de la frontière montre une continuité de ces derniers et des processus impliqués dans leur évolution. Les données isotopiques (^3H , ^{14}C et ^{36}Cl) au Montana et en Alberta montrent que la totalité de la ceinture d'affleurement autour de l'arche Sweetgrass correspond à une zone de recharge pour l'aquifère. Des changements de gradient hydraulique latéral au sud et au nord de la Milk River suggèrent que la rivière intercepte une majeure partie du flux qui s'écoule dans l'aquifère en direction du nord. Cette étude a également défini des zones d'écoulements actifs et faibles, voire très faibles. Le mécanisme d'émergence de l'aquifère à travers les vallées enfouies à la fois en Alberta et au Montana a été proposé. Une évaluation des usages en eau souterraine historique et actuel a été réalisé ainsi qu'un bilan en eau à l'échelle de l'aquifère.

Globalement, l'aquifère n'est pas significativement renouvelé; à l'exception de la zone de recharge, il constitue une ressource fossile. Ce modèle conceptuel est une composante majeure de l'étude transfrontalière de l'aquifère Milk River. Avec le précédent modèle géologique transfrontalier, il forme la base du développement du futur modèle numérique d'écoulement souterrain de l'aquifère.

3.3 Modèle d'écoulement 3D transfrontalier

Le modèle numérique d'écoulement permet d'intégrer l'ensemble des données sur le système aquifère comprenant l'aquifère Milk River et les autres unités hydrogéologiques. Ce modèle permet de développer une compréhension quantitative de l'écoulement et ainsi de vérifier la plausibilité du modèle conceptuel et de préciser certains éléments du fonctionnement du système aquifère. Ce modèle permettra éventuellement d'évaluer l'effet des conditions historiques d'exploitation de l'aquifère Milk River. La présente section décrit les conditions utilisées pour le modèle numérique, le processus de calage du modèle et les principaux résultats obtenus.

3.3.1 Ajustements des conditions limites et paramètres hydrogéologiques finaux

Les conditions aux limites appliquées dans le modèle d'écoulement sont résumées sur la Figure 3.14d. Sur la première couche du modèle (*slice* 1), des conditions de charges imposées ont été assignées le long du réseau de drainage en surface (Fig. 3.14a). La valeur de l'élévation du sol a été imposée le long des rivières et des *coulees*. Au niveau de la ceinture d'affleurement de

l'aquifère au Montana, la valeur de l'élévation du sol moins 3 mètres a été assignée afin de représenter l'écoulement souterrain qui peut quitter le système le long de l'escarpement du Membre Virgelle. Sur le périmètre extérieur de la couche correspondant à Bow Island Sandstone (*slice* 14), une charge imposée de 750 m a été assignée à partir de la carte piézométrique de Bow Island Sandstone produite par Swanick (1982) en Alberta (Fig. 3.14b).

Un taux de recharge de 0 mm/an a été appliqué au niveau de la zone d'affleurement des aquitards (Fig. 3.14c). Dans la zone d'affleurement de l'aquifère Milk River, un taux de recharge de 10 mm/an a été assigné en se basant sur les précédentes estimations du modèle conceptuel. Dans le reste du modèle, un taux de recharge de 1mm/an a été assigné.

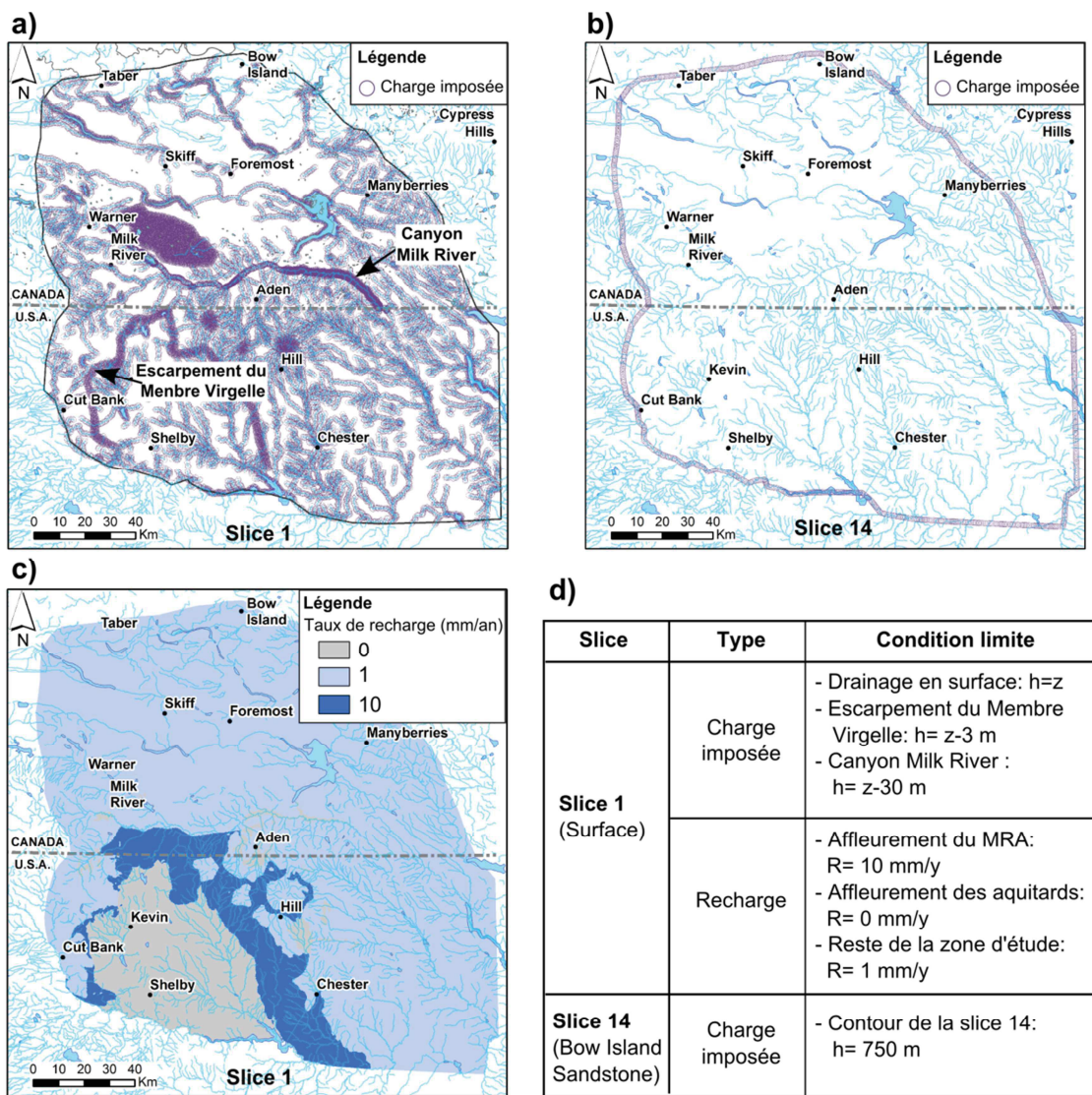


Figure 3.14 Conditions aux limites du modèle numérique d'écoulement (h est la charge hydraulique et z correspond à l'élévation par rapport au niveau de la mer)

Afin d'améliorer la correspondance entre les charges hydrauliques observées et simulées les ajustements suivants ont dû être apportés aux conditions limites ou aux paramètres hydrogéologiques originaux qui avaient été intégrés dans le modèle numérique.

La densité du réseau de drainage a été ajustée localement durant le processus de calage. Il a été densifié dans une région faiblement drainée au centre de la zone d'étude en Alberta et au contraire décimé au nord de la coulée Etzikom afin de mieux représenter la distribution spatiale de la zone artésienne. Ces modifications impliquent que l'émergence de l'eau souterraine dans le réseau de drainage de surface après la fuite de l'eau souterraine provenant de l'aquifère Milk River à travers les aquitards exerce un contrôle important sur les charges hydrauliques dans l'aquifère et ainsi sur les conditions artésiennes. Ceci implique aussi que l'émergence de l'eau à travers les aquitards est assez diffuse, plutôt que localisée, mais tout de même affectée par le réseau de drainage. Cet ajustement est en accord avec l'observation de Meyboom (1960) qui a identifié des puits jaillissants fortement le long des principales coulées.

Dans la région du canyon Milk River, le modèle numérique de terrain du modèle ne permettait pas la représentation du canyon de 150 m de profondeur et de 1500 m de large. La condition de charge imposée au niveau du canyon a été modifiée à 30 m en dessous du niveau du sol afin de reproduire l'incision du canyon, augmentant ainsi l'interception du flux d'eau souterraine. Cet ajustement a produit une meilleure correspondance avec les cibles de calage, ce qui suggère que le canyon Milk River est un élément important dans le mécanisme d'émergence de l'eau souterraine circulant l'aquifère.

Quelques tests hydrauliques récemment conduits dans la partie sud-est de la zone d'étude au Montana suggèrent que la conductivité hydraulique de la formation Milk River/Eagle est plus élevée que celle définie dans le modèle (Fig. 3.6). Afin de considérer ces nouvelles observations, la conductivité hydraulique de l'aquifère Milk River a été localement multipliée par un certain facteur qui a été ajusté lors du calage. Le modèle numérique supporte ainsi les récentes mesures des propriétés de l'aquifère.

Enfin, Miller et Norbeck (1996), ont donné une valeur de conductivité hydraulique à l'aquitard Pakowki/Claggett dans la région de East Butte (la butte la plus à l'est des Sweet Grass Hills) beaucoup plus élevée que la valeur uniforme qui a été utilisée initialement dans le modèle. En appliquant cette valeur plus élevée (9×10^{-8} m/s), de meilleurs résultats ont été obtenus dans cette région, suggérant ainsi qu'une zonation de la conductivité hydraulique de l'aquitard Pakowki/Claggett est nécessaire. Ceci indique que cet aquitard n'a probablement pas des propriétés hydrauliques uniformes dans la région d'étude. Le tableau 3.1 ci-dessous regroupe

les gammes de valeurs initiales et les valeurs finales (calées) de la conductivité hydraulique horizontale et de l'anisotropie verticale des unités hydrostratigraphiques du modèle.

Tableau 3-1 Gammes de valeurs initiales de conductivité hydraulique horizontale et d'anisotropie verticale pour chaque unité hydrostratigraphique et leurs valeurs finales dans le modèle numérique calé

Unités Hydrostratigraphiques	Conductivité hydraulique horizontale K_x (m/s)	Anisotropie verticale (K_x/K_z)	Sources	Valeurs finales	
				Conductivité hydraulique horizontale K_x (m/s)	Anisotropie verticale (K_x/K_z)
Sédiments superficiels (till)	7×10^{-8}	1	Robertson (1988); Hendry et Buckland (1990)	7×10^{-8}	1
Formation Belly/Judith River	9×10^{-8} - 8.8×10^{-7}	10 - 10^4	Hendry et Buckland (1990); Anna (2011)	5×10^{-7}	10^3
Formation Pakowki/Claggett	10^{-9} - 10^{-11}	5	(Swanick 1982; Hendry et Schwartz 1988)	1×10^{-9} 9×10^{-8} (région de East Butte)	5
Formation Milk River	Distribution spatiale de la Fig. 3.6	10	Pétre et al. (2016)	Distribution spatiale de la Fig. 3.6 (facteur 50 au sud-est Montana)	10
Groupe Colorado	10^{-9} - 10^{-12}	10	Toth et Corbet (1986); Robertson (1988); Hendry et Buckland (1990)	1×10^{-10}	10
Bow Island Sandstone	10^{-6} - 10^{-8}	10	Schwartz et al. (1981)	5×10^{-7}	10
Vallées enfouies	10^{-3} - 10^{-4}	1	Cummings et al. (2012b)	1×10^{-6}	1

3.3.2 Évaluation de la performance du calage

Les résultats du calage du modèle numérique d'écoulement ont été évalués quantitativement et qualitativement.

Le graphique représentant les charges hydrauliques mesurées par rapport aux charges simulées par le modèle est présenté en Figure. 3.15. La cible de calage a été définie à $\pm 50\text{m}$, considérant l'incertitude des mesures ainsi que la perte de charge globale dans le système suite à l'exploitation. La carte présentant les différentes régions de calage et les points de contrôle est présentée au Chapitre 7 (Fig. 7.6). On observe que la correspondance entre les charges simulées et observées est bien contenue dans l'intervalle de calage pour une majorité de cibles de calage. Le modèle tend toutefois à surestimer les charges simulées dans les zones de calage au sud-est dans le Montana et au sud de la Milk River en Alberta. En Alberta, l'hypothèse de stationnarité qui a été faite ne semble pas être juste d'après le travail d'évaluation des niveaux d'exploitation historiques de l'aquifère qui a suivi le développement du modèle numérique (Annexes VII et VIII). Cette évaluation des niveaux d'exploitation montre en effet qu'il y a plus d'exploitation de l'eau souterraine qu'attendu dans la zone au sud de la Milk River. Cette région contribue même entre 14 et 50% à l'extraction totale de l'eau souterraine de l'aquifère Milk River sur la période allant de 1908 à 2015. Ainsi, les charges hydrauliques mesurées ne sont pas représentatives des conditions pré-développement de l'aquifère. Par conséquent, il est normal que le modèle numérique simule des charges plus élevées que les observations. Dans la région sud-est au Montana, la référence est très incertaine. En effet, cette région associe la plus grande incertitude dans le modèle géologique sous-jacent au modèle numérique (en raison d'un manque de données géologiques) ainsi que dans les charges hydrauliques mesurées qui proviennent d'une carte piézométrique à l'échelle régionale (Levings 1982).

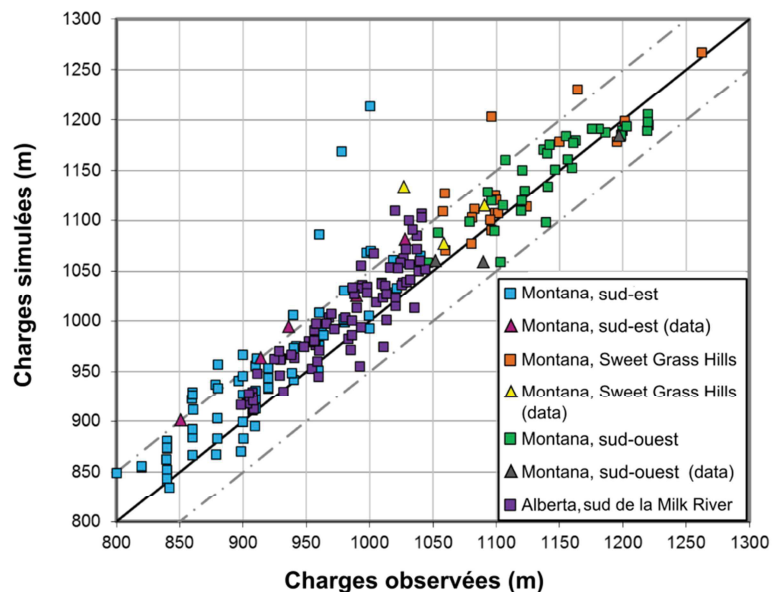


Figure 3.15 Graphique des charges hydrauliques observées en fonction des charges hydrauliques simulées (en m.a.s.l) dans l'aquifère Milk River selon les différentes zones de calage. L'intervalle de calage (+/-50 m) est représenté (lignes pointillée grise). Les cibles de calage correspondant aux puits de monitoring sont indiquées en tant que « data » dans la légende. Les charges mesurées au sud de l'Alberta proviennent de l'interprétation de la piézométrie de 1960 de Toth et Corbet (1986).

Afin de mieux visualiser la distribution spatiale de l'erreur dans le modèle, le niveau de calage de chaque cible a été calculé. Le plus haut niveau de calage (niveau 1) indique que les charges simulées sont dans la cible de calage (+/- 50 m). Les niveaux de calage 2 et 3 correspondent aux charges simulées qui présentent une erreur deux et trois fois plus grande que la cible de calage (soit respectivement +/- 100 m et +/- 150 m).

Le tableau 3.2 montre les niveaux de calage dans chacune des zones de calage du modèle. Le coin sud-ouest de la zone d'étude au Montana est la zone la mieux calée (97.4% des points d'observations sont dans la cible de calage), suivi par la zone des Sweet Grass Hills. La zone de calage qui a le plus faible niveau de calage est la zone sud-est au Montana (75% des points d'observation sont dans la cible de calage). Cette région a la plus grande incertitude associée aux points d'observation. Les points d'observation sont obtenus de la carte piézométrique à l'échelle régionale du Montana. Elle présente seulement quelques isopièzes dans la partie sud-est de la zone d'étude. Les points d'observation obtenus des cartes piézométriques réalisées à plus petite échelle, comme celle de Tuck (1993) ou Zimmerman (1967) dans les Sweet Grass Hills ou la zone sud-ouest sont bien plus précis. Ainsi, l'incertitude est plus grande au sud-est et moindre dans les autres zones de calage. Dans le sud de l'Alberta, les points d'observation

dérivés de la carte piézométrique de Toth et Corbet (1986) montrent un plus haut niveau de calage (91.3% des points d'observation sont dans la cible de calage).

Tableau 3-2 Niveau de calage pour les charges simulées dans l'aquifère Milk River

Zone de calage	Nombre total de points d'observation	Niveaux de calage					
		Niveau 1		Niveau 2		Niveau 3	
		Nb. de points d'obs.	%	Nb. de points d'obs.	%	Nb. de points d'obs.	%
Montana, sud-ouest	38	37	97.4	1	2.6	0	0.0
Montana, sud-est	72	54	75.0	16	22.2	2	2.8
Montana, Sweetgrass Hills	22	17	77.3	5	22.7	0	0.0
Alberta, sud de la Milk River (Toth et Corbet 1986)	80	73	91.3	7	8.8	0	0.0
Alberta, sud de la Milk River (Meyboom 1960)	80	53	66.3	27	33.7	0	0.0

La distribution spatiale des niveaux de calage pour chaque point d'observation est présentée sur la Fig. 3.16. Le plus bas niveau de calage (niveau 3) est situé près de East Butte dans les Sweet Grass Hills. La topographie accidentée dans cette zone explique la difficulté d'obtenir un calage satisfaisant dans cette région. Dans la région sud-est au Montana, il est plus difficile d'obtenir un niveau de calage 1 en raison de l'incertitude liée à la géologie sous-jacente dans le modèle. En effet, les données géologiques sont rares dans cette région et l'erreur qui en résulte dans la géométrie des unités géologiques peut expliquer la baisse de la performance du calage.

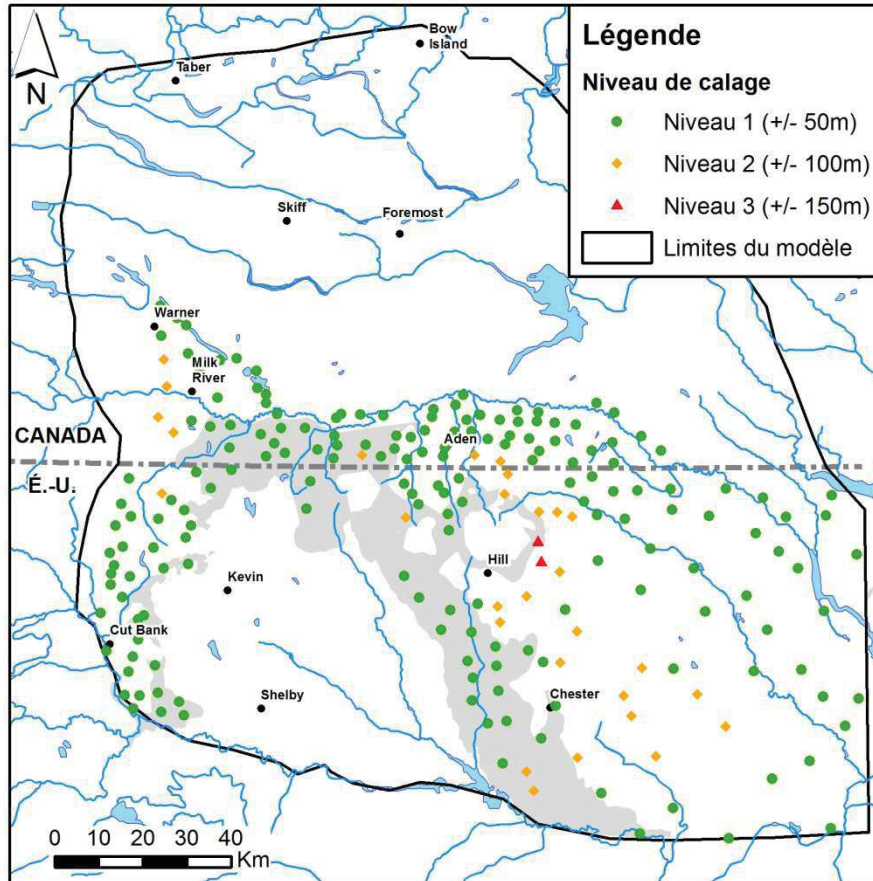


Figure 3.16 Distribution spatiale des niveaux de calage des points d'observations dans l'aquifère Milk River.

La performance de calage a aussi été évaluée qualitativement en comparant les cartes piézométriques observées et simulées, tel que présenté en Fig. 3.17.

Cette carte montre que les configurations de l'écoulement régional sont similaires dans le nord du Montana et en amont de la Milk River en Alberta. La ligne de partage des eaux souterraines au nord de Cut Bank a bien été reproduite par le modèle. L'écoulement radial depuis les Sweet Grass Hills vers le nord, est et sud-est est aussi reproduit de manière satisfaisante. En Alberta, la carte piézométrique observée est celle de Toth et Corbet (1986) car leur interprétation de la distribution des charges hydrauliques présente une meilleure correspondance avec les charges simulées que l'interprétation de Meyboom (1960).

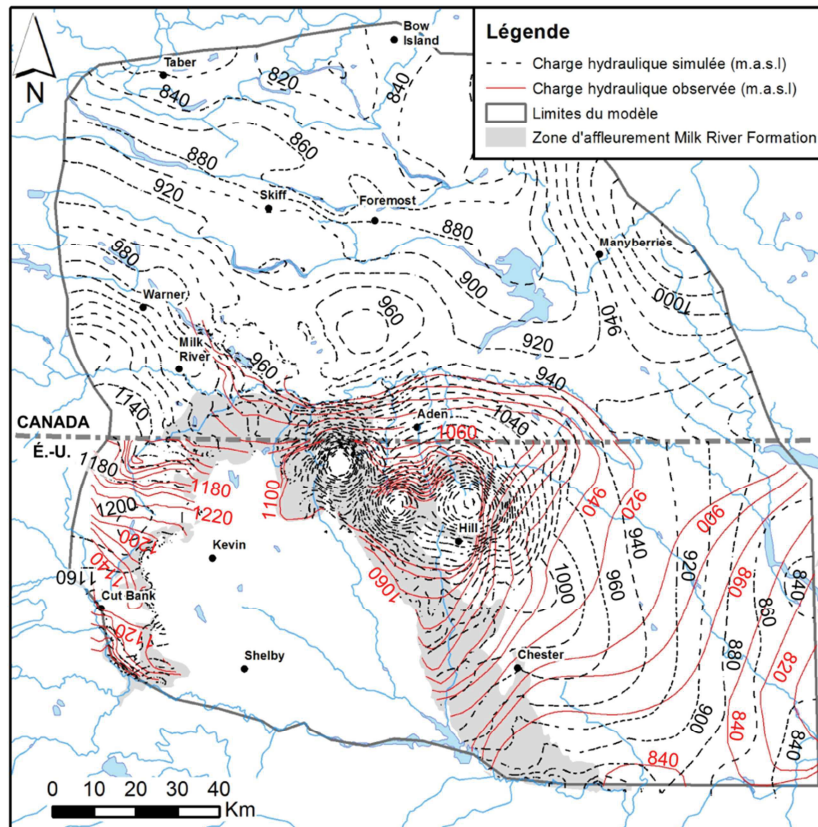


Figure 3.17 Comparaison des cartes piézométriques observées et simulées

Les conditions artésiennes dans l'aquifère Milk River qui ont été simulées par le modèle sont principalement situées au nord de la zone d'étude, le long des coulées Etzikom et Chin, à proximité du lac Pakowki et le long de la Milk River à l'est dans le Montana (Fig. 3.18). En Alberta, cette localisation est cohérente avec le tracé de Dowling (1917). Dans le modèle, 68% des nœuds de l'aquifère Milk River dans la région artésienne sont effectivement simulés en tant que nœuds artésiens jaillissants. Au niveau des quatre mesures de pression récentes obtenues sur des puits jaillissants en Alberta, l'intensité de l'artésianisme qui y est simulé est plus grande que celle mesurées. Ce résultat était attendu dans la mesure où les conditions artésiennes pré-développement doivent avoir eu une plus grande intensité que les conditions récentes. Le modèle numérique représente donc de manière satisfaisante la localisation et l'intensité des conditions artésiennes de l'aquifère en Alberta. Au sud-est, dans le Montana, l'artésianisme est simulé le long de la Milk River et de Sage Creek. Cette région est très peu décrite dans les études précédentes. Il est néanmoins possible que des conditions artésiennes existent à cet endroit en raison du niveau de confinement élevé de l'aquifère et de l'incision plus marquée des rivières.

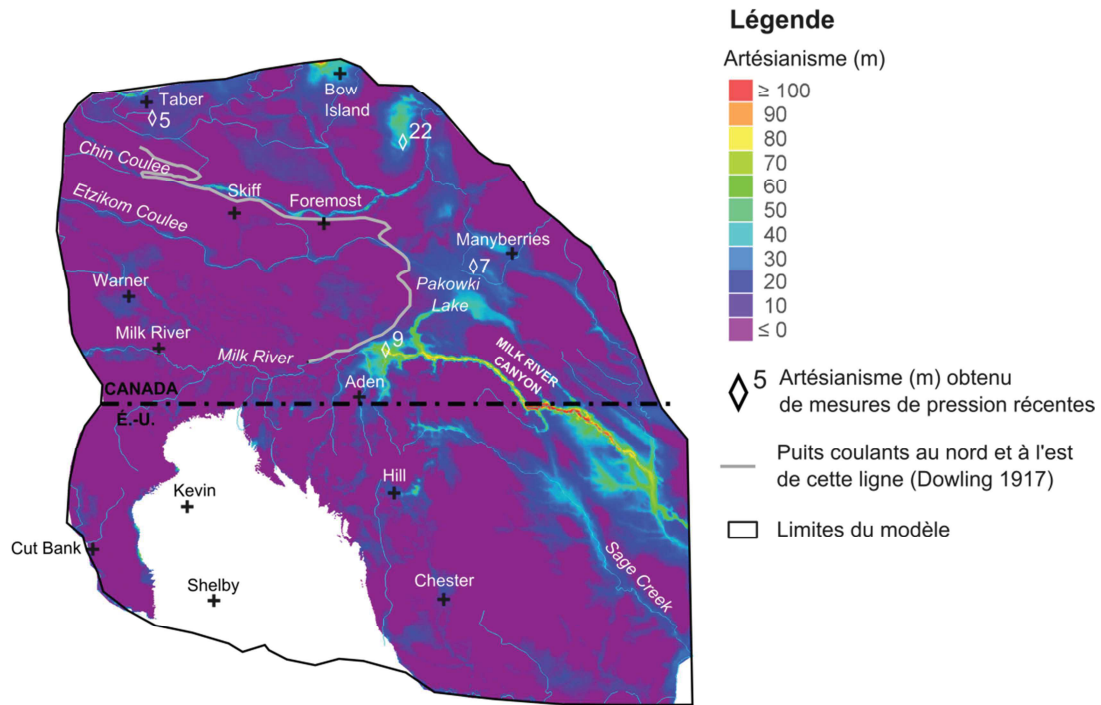


Figure 3.18 Conditions artésiennes simulées dans l'aquifère Milk River

3.3.3 Bilan en eau

L'écoulement souterrain annuel simulé dans la totalité du domaine du modèle numérique est de l'ordre de $243 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ et le bilan global présente une erreur de $44 \text{ m}^3/\text{an}$. A des fins de comparaison avec le modèle conceptuel hydrogéologique, un bilan en eau souterraine a été réalisé dans le sous-domaine compris au nord de la Milk River en Alberta et à l'est de la ville de Warner, là où la majorité des puits sont présents. Les composantes du bilan en régime permanent ont été quantifiées et sont résumées ci-dessous et sur la figure 3.19.

Quantification des flux transfrontaliers (flux de recharge) : le modèle numérique d'écoulement simule un flux transfrontalier total de $7.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ (dont $4.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ provenant du flux est et $3.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ provenant du flux ouest). Cette valeur est du même ordre de grandeur que le flux transfrontalier total qui avait été estimé dans le modèle conceptuel ($9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$). Ce flux transfrontalier est également assimilé au taux de recharge effective de l'aquifère en faisant l'hypothèse qu'il est uniquement dû à la portion de la recharge potentielle qui atteint l'aquifère (ref. section 6.5.5). Un taux de recharge effective de $10 \text{ mm}/\text{an}$ a été appliqué dans le modèle numérique au niveau de la zone d'affleurement de l'aquifère pour produire les flux transfrontaliers simulés.

Interception de l'écoulement souterrain par la Milk River: Le flux intercepté par la Milk River et ses affluents est d'environ $6.53 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$. Cette valeur représente 93% du flux arrivant du sud. Le modèle numérique représente ainsi la Milk River comme l'élément d'émergence principal de l'eau souterraine circulant dans l'aquifère Milk River. Le flux simulé qui est transmis au-delà de la Milk River est de $4.7 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{an}$.

Quantification des flux verticaux inter-formation: au sud de l'Alberta en aval de la Milk River, le modèle d'écoulement simule un flux de drainance vertical de $3.8 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{an}$ dirigé vers le bas (de l'aquifère Milk River vers le groupe Colorado) et un flux dirigé vers le haut d'environ $2.9 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{an}$ au niveau des vallées enfouies (à travers l'aquitard Pakowki/Claggett). Ce mécanisme d'émergence de l'eau souterraine l'aquifère avait été proposé par Toth et Corbet (1986) mais n'avait pas encore été quantifié.

Apport d'eau depuis les unités supérieures: L'aquifère Milk River reçoit un flux d'eau souterraine d'environ $2.4 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{an}$ depuis les unités supérieures, en particulier à proximité des hauts topographiques (Cypress Hills) Ce résultat vient supporter l'affirmation de Toth et Corbet (1986) selon laquelle l'aquifère Milk River reçoit un apport d'eau depuis les hauts topographiques de la région.

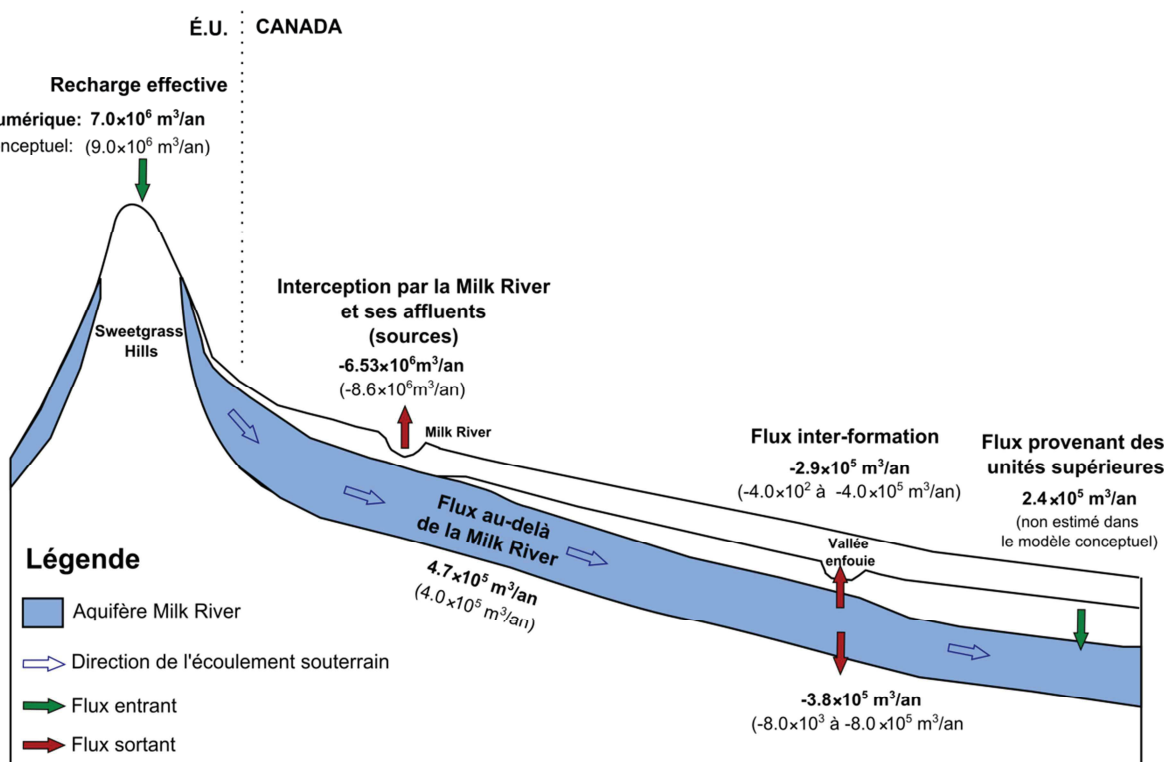


Figure 3.19 Comparaison entre les composantes du bilan en eau souterraine issues du modèle conceptuel (valeurs en caractère gras) (Pétré et al. 2016) et du modèle numérique d'écoulement

Comme mentionné plus haut dans la partie 1.5.6 (Méthodologie), le modèle numérique a été calé de manière à ce que les directions et magnitudes des flux souterrains soient en accord avec le modèle conceptuel hydrogéologique. Par conséquent, la comparaison entre les flux simulés par le modèle numérique et estimés dans le modèle conceptuel montre que le modèle conceptuel est hydrauliquement plausible. Le bilan en eau au nord de la Milk River a une erreur de 5.6% qui est liée au niveau de discrétisation relativement faible du sous-domaine considéré dans le modèle pour réaliser le calcul des flux internes verticaux.

3.3.4 Traçage de particules

Le traçage de particule inversé (*backward*) a été réalisé dans la zone du lac Pakowki afin de déterminer la zone de contribution à son alimentation. La figure 3.20 représente les lignes d'écoulement et les temps de résidence sur la coupe AA' (localisation à la figure 7.2 du Chapitre 7). L'écoulement de l'eau souterraine converge depuis East Butte des Sweet Grass Hills vers l'aval hydraulique du lac Pakowki en moins de 60 000 ans. Les temps de résidence plus longs (>70 000 ans) proviennent des hauts topographiques des Cypress Hills.

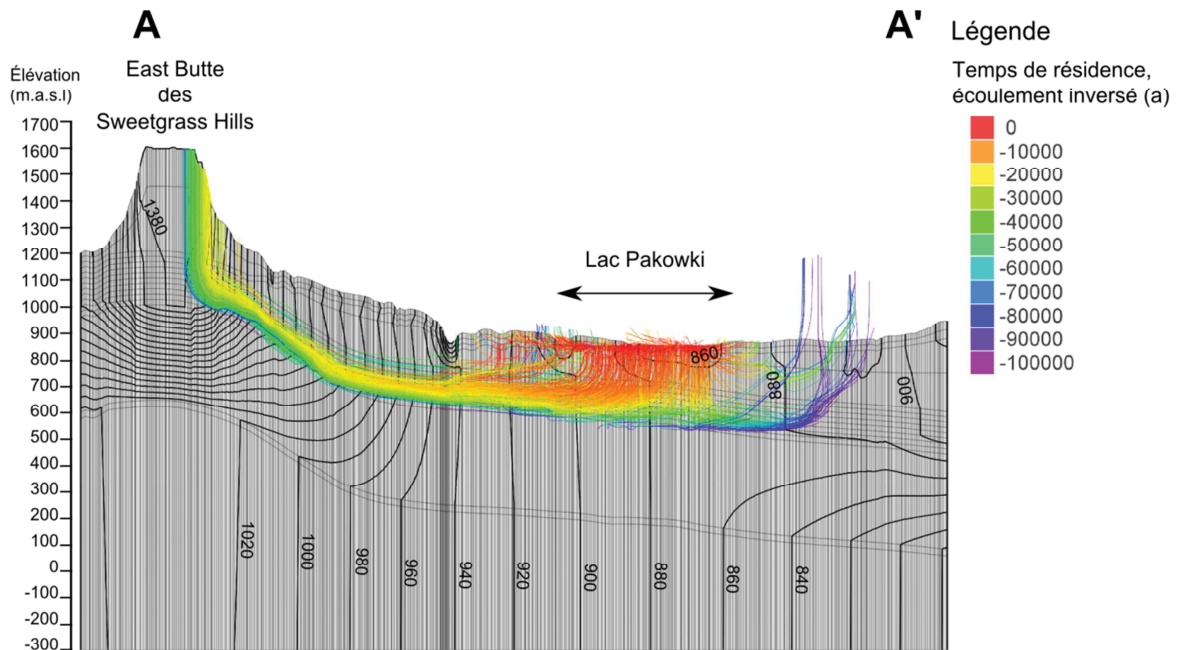


Figure 3.20 Traçage de particule inversé (temps de résidence en années) depuis le lac Pakowki. Les lignes équipotentielles sont aussi représentées. La localisation de la coupe est indiquée sur la figure 7.2 (Chapitre 7)

Une vue en plan (Fig. 3.21) montre que la zone de contribution d'eau souterraine à la Milk River est principalement située au nord du Montana. L'écoulement de l'eau souterraine va des Sweet Grass Hills vers la Milk River en 5 000 à 20 000 ans. Un autre apport présentant un temps de résidence plus long (jusqu'à 50 000 ans) provient du Milk River Ridge, situé à l'ouest de Warner en Alberta. Ces temps de transport advectif sont cohérents avec les données isotopiques indiquant que la zone en amont de la Milk River est dans la gamme de datation du carbone 14 (Pétre et al. 2016), soit moins de 50 000 ans.

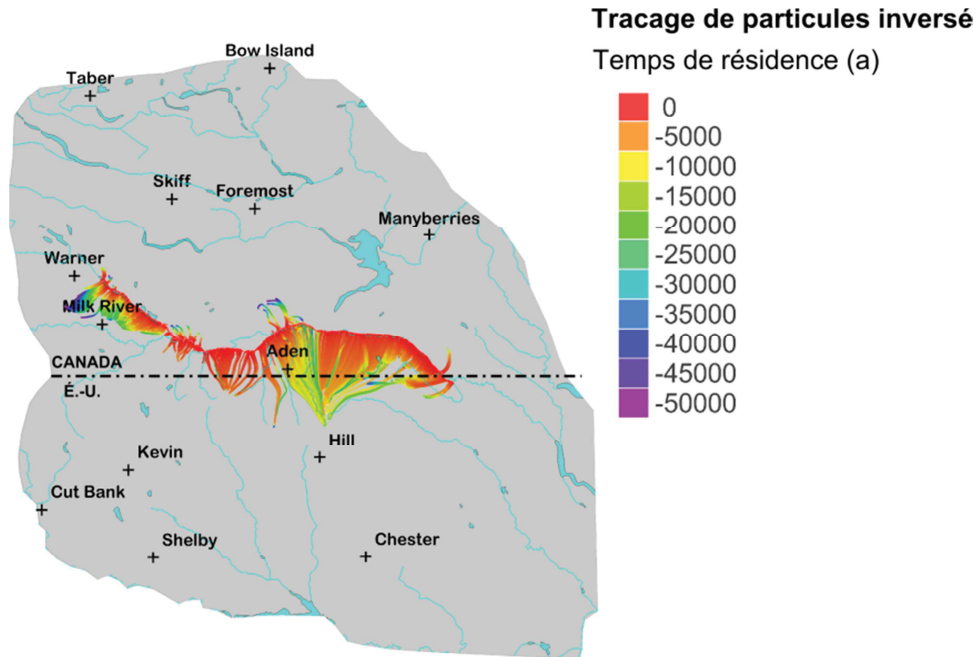


Figure 3.21 Traçage de particules inverse depuis la Milk River

Le traçage de particules direct (*forward*) a aussi été appliqué dans la zone d'étude. La figure 3.22 présente les trajets des particules et leur temps de résidence. Au Montana, le temps de résidence est particulièrement faible dans le coin sud-ouest de la zone d'étude (inférieur à 25 000 ans). Cela est cohérent avec la présence d'eau récente contenant du tritium dans cette région (Pétre et al. 2016). Cependant dans la partie sud-est au Montana, l'écoulement met 100 000 à 200 000 ans à atteindre la limite sud-est du modèle. En Alberta, au-delà de la Milk River, l'écoulement souterrain de part et d'autre de la zone centrale de faible conductivité hydraulique (entre Skiff et Foremost) met jusqu'à 750 000 Ma pour atteindre la limite nord du modèle. En revanche, les flux qui passent à travers la zone de faible conductivité peuvent atteindre des temps de résidence de 1.4 Ma. On peut ainsi reconnaître les voies d'écoulement préférentiel définies précédemment à partir des concentrations en chlorures (Hendry et Schwartz 1988; Pétre et al. 2016). Les temps de transport advectifs sont plus petits que les

temps de résidence obtenus des données isotopiques (jusqu'à 2 Ma). Cependant, les temps de résidence sont plus élevés que les précédentes estimations, allant de 250 000 à 500 000 ans (Schwartz et Muehlenbachs 1979; Swanick 1982; Hendry et Schwartz 1988). Il est normal que les temps de transport advectif soient inférieurs aux âges isotopiques parce que le traçage de particule ne tient pas compte de la dispersion et du mélange de l'eau avec des eaux d'âge important provenant soit des intervalles de shale dans l'aquifère Milk River ou de l'apport d'eau à partir des aquitards encaissant l'aquifère, particulièrement suite à l'exploitation de l'aquifère.

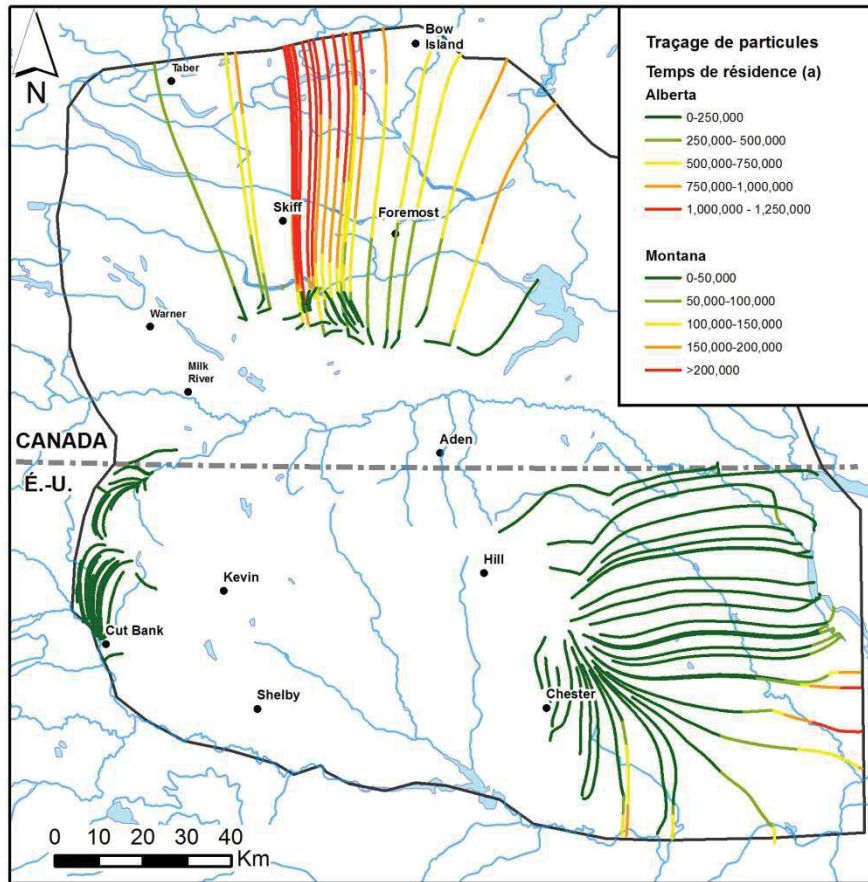


Figure 3.22 Traçage de particules direct à partir de nœuds de l'aquifère Milk River.

3.3.5 Implications sur la gestion de l'eau souterraine

Les résultats du modèle numérique d'écoulement du MRA ont des implications sur la gestion de la ressource. Comme décrit dans les sections précédentes, le modèle numérique démontre que le modèle conceptuel du MRA est plausible hydrauliquement en représentant de manière

satisfaisante la localisation de la limite de partage des eaux au Montana ainsi que les flux transfrontaliers et les principales composantes du bilan en eau. Ainsi, le modèle numérique confirme que le MRA est une ressource partagée internationalement, avec deux flux transfrontaliers dirigés depuis la zone de recharge au Montana vers le nord en Alberta.

De ce fait, il paraît justifié d'envisager la mise en place d'une gestion commune de cette ressource partagée entre le Canada et les États-Unis. La zone de gestion appropriée serait comprise entre le nord de la limite de partage des eaux au Montana et le sud de la rivière Milk et de Verdigris Coulee en Alberta (définie aussi comme la « zone 1a » par Pétré et al. (2016)).

Par ailleurs, la bonne gestion d'une ressource en eau souterraine nécessite de comprendre la distribution spatiale des prélèvements d'eau au cours du temps. Cette information est peu disponible dans la région d'étude car les usagers n'ont pas d'obligation légale de mesurer les volumes d'eau réellement prélevés. Cependant, une évaluation des niveaux d'exploitation historique du MRA lors de la période 1908-2015 a été réalisée au cours de la présente étude en Alberta. Les résultats de cette évaluation et la méthodologie associée sont détaillées dans les annexes VII et VIII. L'estimation de l'exploitation de l'eau souterraine dans l'aquifère Milk River augmente de 0.47×10^6 m³/an en 1920 à 1.8×10^6 m³/an en 1990, puis diminue jusqu'à 0.85×10^6 m³/an en 2015. Ces chiffres sont cohérents avec les estimations historiques issues des études précédentes (Meyboom 1960; Persram 1992; HCL consultants 2004 et 2007).

Les zones qui contribuent le plus à l'extraction de l'eau souterraine circulant dans l'aquifère Milk River sont situées au sud de la rivière Milk (à l'est d'Aden), dans la partie centrale de la zone d'étude (au nord de la rivière Milk) et au nord-est de la zone d'étude (au sud-est de Bow Island). Contrairement à ce qui était pensé précédemment, la région située au sud de la rivière Milk fait l'objet de prélèvements d'eau souterraine importants. En effet, les études précédentes ont généralement mis l'emphase sur la zone au nord de la rivière Milk qui regroupe les plus importants consommateurs d'eau souterraine et où les inquiétudes sur le déstockage de la ressource ont été reportées (Meyboom 1960; AGRA Earth and Environmental Limited 1998). Tel que décrit dans la section "bilan en eau souterraine" (section 3.3.3), l'écoulement souterrain au nord de la Milk River est très faible (4.7×10^5 m³/y) à cause de l'interception de la majorité du flux provenant du sud par la Milk River. Le flux transmis au-delà de la Milk River représente le seul mécanisme externe de renouvellement de l'eau souterraine. Ainsi, la zone au nord de la rivière Milk reçoit seulement une partie du flux de recharge tandis que la région au sud de la rivière Milk bénéficie de la totalité du flux transfrontalier provenant du sud.

L'évaluation des niveaux d'exploitation de l'eau souterraine montre aussi que depuis le début des années 20, l'extraction de l'eau souterraine au sud de l'Alberta dépasse la valeur du flux d'eau souterraine au nord de la rivière Milk. En effet, ces chiffres impliquent que le bilan en eau est déficitaire dans la zone au nord de la rivière Milk en raison du stress induit sur la ressource (causé par le pompage). Comme stipulé par Theis (1940) ou plus récemment par Konikow et Leake (2014), lors du pompage une partie de l'eau souterraine est toujours obtenue de l'emmagasinement, mais au cours du temps le système aquifère s'ajuste aux prélèvements de l'eau souterraine par une augmentation de la recharge et/ou une diminution de l'émergence. Dans le cas du MRA, le mécanisme de drainance à partir des unités de confinement ou une diminution de l'interception de la rivière Milk pourraient compenser l'effet de l'usage intensif de l'eau souterraine dans l'aquifère. Il faut toutefois déterminer si cette compensation est complète ou partielle à long terme.

Un bilan en eau souterraine dynamique réalisé dans un modèle transitoire de l'aquifère serait ainsi nécessaire pour évaluer la quantité d'eau obtenue de l'emmagasinement dans l'aquifère ou des aquitards (Konikow et Neuzil 2007). Le modèle d'écoulement en régime permanent ainsi que l'évaluation des niveaux d'exploitation historiques réalisés dans cette thèse pourraient être utilisés respectivement comme conditions initiales et sollicitations transitoires pour le développement d'un tel modèle transitoire. De plus, le suivi de la qualité de l'eau souterraine des approvisionnements en eau pourrait aider à déterminer l'évolution possible dans le temps de l'origine de l'eau souterraine exploitée dans la mesure où les aquitards contiennent de l'eau plus salée que dans le MRA (Hendry et Schwartz 1988)

En conclusion, ce modèle numérique d'écoulement en régime permanent synthétise l'ensemble des données géologiques et hydrogéologiques de l'aquifère Milk River de chaque côté de la frontière internationale. Le calage du modèle a montré une correspondance satisfaisante entre les charges hydrauliques simulées et observées. Cependant, la performance de calage dans la zone sud-est au Montana est moins bonne en raison d'incertitudes plus grandes dans les observations mais aussi dans le modèle géologique sous-jacent au modèle numérique. Le modèle numérique représente correctement les conditions artésiennes en Alberta ainsi que les composantes du bilan en eau au nord de la rivière Milk. Le traçage de particules indique des temps de résidence allant jusqu'à 750 000 ans à l'extrême nord de l'aquifère. Ainsi, le modèle numérique d'écoulement vérifie la plausibilité hydraulique des hypothèses de fonctionnement de l'aquifère qui ont été précédemment formulées dans le modèle conceptuel hydrogéologique :

l'interception majeure par la rivière Milk du flux provenant du sud, la présence d'eau fossile au nord de la rivière Milk et le rôle des vallées enfouies sur l'émergence de l'eau souterraine circulant au sein de l'aquifère. Le modèle numérique confirme que l'aquifère Milk River est une ressource internationale partagée, avec deux flux transfrontaliers dirigés du Montana vers l'Alberta. En tant que ressource transfrontalière, une gestion conjointe de l'aquifère Milk River serait justifiée dans la région comprise entre la zone de recharge au Montana et la zone au sud de la rivière Milk en Alberta. Ce modèle numérique d'écoulement constitue une composante importante de l'étude transfrontalière de l'aquifère Milk River et il forme un prérequis pour les travaux ultérieurs impliquant la représentation des prélèvements d'eau via le pompage.

CHAPITRE 4 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

4.1 Conclusion générale

L'aquifère Milk River est un aquifère captif typique qui présente des conditions de nappe libre ou semi-captive dans sa zone de recharge et qui a une extension en profondeur avec des conditions captives et artésiennes. Toutefois, cet aquifère se distingue par la présence d'eau souterraine très ancienne (au-delà du million d'années) et le fait qu'il ne possède pas d'exutoire évident. L'importance et l'intérêt scientifique de cet aquifère peut être démontré par le grand nombre d'études dont il a fait l'objet, en particulier les analyses isotopiques visant à dater ses eaux souterraines anciennes. Malheureusement, les nombreuses études antérieures étaient limitées par la frontière internationale et ne bénéficiaient donc pas de la pleine connaissance des cadres géologique et hydrogéologique de l'aquifère. De plus, les eaux de l'aquifère Milk River constituent une ressource importante pour la population de la zone d'étude depuis près d'un siècle. L'exploitation intensive de l'aquifère au cours du 20^{ème} siècle a soulevé des inquiétudes sur la pérennité de la ressource et nécessite la réalisation d'un portrait complet de l'aquifère pour évaluer pleinement le potentiel d'exploitation.

En effet, bien que le caractère transfrontalier de l'aquifère Milk River ait été reconnu au cours du 20^e siècle, la délimitation transfrontalière de l'aquifère n'avait pas été faite jusqu'à ce jour. Les flux d'eau souterraine transfrontaliers n'avaient pas été clairement définis ni quantifiés.

Ainsi, afin d'offrir un portrait global de l'aquifère, trois modèles transfrontières ont été développés. Les conditions géologiques ont été d'abord définies et intégrées dans le modèle géologique tri-dimensionnel de l'aquifère. Ce modèle géologique a nécessité au préalable une harmonisation des nomenclatures stratigraphiques afin de représenter l'aquifère de manière continue à travers la frontière internationale et de délimiter son étendue. Par la suite, les conditions hydrogéologiques transfrontalières ont été précisées au sein du modèle conceptuel hydrogéologique en associant les données hydrogéologiques et géochimiques. Le modèle conceptuel a notamment mis en lumière les mécanismes impliqués dans l'écoulement régional de l'aquifère et a délimité la zone de recharge active ainsi que les zones d'écoulement actifs et lents. L'émergence de l'eau souterraine circulant dans l'aquifère se fait via le mécanisme de drainance à travers les aquitards qui le confinent. Grâce à ces deux modèles, il a été possible de développer le modèle numérique d'écoulement transfrontalier de l'aquifère dans la situation pré-exploitation. Le modèle d'écoulement a permis de valider la plausibilité hydraulique du

modèle conceptuel et d'évaluer quantitativement la dynamique de l'aquifère. Enfin, les modèles conceptuel et numérique ont démontré que l'aquifère Milk River était une ressource internationale partagée et ils ont permis de délimiter la région appropriée en vue de la gestion transfrontalière des eaux de l'aquifère. Ainsi, les trois modèles transfrontaliers développés dans cette thèse forment un socle commun de connaissances qui permettra de faciliter la coopération transfrontalière et la gestion commune de la ressource.

4.2 Contribution originale de la thèse

Cette thèse montre la pertinence d'une approche transfrontalière dans l'étude des aquifères partagés entre plusieurs pays et la nécessité de prendre en compte l'ensemble de l'aquifère selon ses limites naturelles. Cette approche respecte les recommandations pour l'étude des aquifères transfrontaliers formulées notamment dans la résolution 68/118 de l'Assemblée Générale des Nations Unies sur le droit des aquifères transfrontaliers et le guide méthodologique pour la gestion concertée des systèmes aquifères transfrontaliers (Machard de Gramont et al. 2010). Ces travaux sont aussi en accord avec la procédure recommandée dans le guide de la stratégie ISARM Americas (UNESCO 2015).

Les travaux réalisés dans cette thèse ont permis d'identifier les parties prenantes et de les impliquer dans le projet de thèse via différents médias (réunions de coordination, prospectus aux propriétaires de puits, site internet, visite de terrain...). Ce travail de communication et sensibilisation a été nécessaire à la réussite de cette étude transfrontalière.

Trois modèles régionaux à l'échelle de l'aquifère ont été construits (modèle géologique, conceptuel et numérique) et ont fourni un nouvel éclairage de la dynamique du système. L'intégration de l'ensemble des données géologiques, hydrogéologiques et géochimiques de part et d'autres de la frontière internationale a permis de définir la délimitation transfrontalière de l'aquifère et de quantifier les flux transfrontaliers dirigés du Montana vers l'Alberta.

Cette thèse a également montré que la difficulté de travailler à une échelle régionale, transfrontalière de surcroît, résidait dans la disparité des données et le contraste des connaissances entre l'Alberta et le Montana. Les études précédentes portant sur l'aquifère Milk River ont été majoritairement réalisées en Alberta. Dans le cadre de cette thèse, les travaux d'unification et d'harmonisation des données existantes et l'ajout de nouvelles analyses géochimiques dans les régions peu étudiées ont permis d'augmenter les connaissances et d'améliorer la compréhension de l'écoulement régional au sein de l'aquifère.

De plus, cette thèse contribue à résoudre le problème du manque d'accès aux données qui expliquait en partie le manque de représentation globale de l'aquifère dans le passé. En effet, l'ensemble des résultats de cette thèse et toutes les données historiques et récentes associés au développement des modèles transfrontaliers est rendue accessible au public et en particulier aux parties prenantes de ce projet. Les travaux présentés dans cette thèse constituent ainsi un prérequis en vue de la gestion concertée de la ressource.

Le développement des trois modèles présentés dans la thèse a nécessité la réalisation des tâches suivantes :

- Revue de littérature exhaustive dans la région d'étude couvrant les études géologiques, stratigraphiques, hydrogéologiques, hydrologiques et géochimiques de l'aquifère Milk River.
- Harmonisation des nomenclatures stratigraphiques dans le domaine d'étude.
- Unification des données géologiques (numérisation, conversion dans les mêmes systèmes de coordonnées, de référence spatiale et d'unité) et fusion des fichiers de modèle numérique de terrain dans le domaine d'étude.
- Intégration des données géologiques dans un modèle géologique tri-dimensionnel afin de produire des coupes géologiques transfrontalières, des cartes d'élévation et des isopaques de toutes les unités hydrostratigraphiques de la région.
- Identification des régions de l'aquifère où le niveau de connaissance n'est pas adéquat.
- Planification et réalisation de travaux de terrain en coopération avec les parties prenantes canadiennes et américaines.
- Communication avec les parties prenantes du projet, les consultants, les propriétaires de terrain et les foreurs de la région d'étude (voir section 1.3).
- Réalisation de nouvelles analyses isotopiques dans les régions les moins étudiées, notamment au Montana où les analyses isotopiques étaient absentes.
- Création d'une base de données géochimique unifiée regroupant l'ensemble des analyses chimiques et isotopiques disponibles et nouvellement acquises qui ont été préalablement unifiées (mêmes unités et système de coordonnées).
- Unification et assemblage des données hydrogéologiques afin de produire la carte de transmissivité de l'aquifère, la carte piézométrique unifiée et celle des gradients hydrauliques verticaux.

- Intégration de l'ensemble des données géologiques, hydrogéologique et géochimiques disponibles dans un modèle numérique d'écoulement.
- Exploitation et traitement de données provenant de la base de données des puits de l'Alberta afin d'évaluer les niveaux d'exploitation historiques de l'aquifère Milk River et leur répartition spatiale au cours des dernières décennies (1908-2015).

4.3 Perspectives

Les cadres géologique et hydrogéologique ainsi que le modèle numérique qui ont été produits dans cette thèse peuvent servir de base à de futurs travaux présentés ci-dessous:

- Le développement d'un modèle numérique d'écoulement opéré en régime transitoire dans lequel les niveaux d'exploitation historiques de l'aquifère seraient représentés. Un tel modèle permettrait en premier lieu de valider le modèle d'écoulement en régime permanent et pourrait ensuite être utilisé en outil de prédiction en simulant divers scénarios d'exploitation servant de base à l'établissement d'un plan de gestion conjointe.
- L'aquifère Milk River étant limité par des champs de gaz en Alberta et au Montana, il serait intéressant d'évaluer l'effet de l'exploitation des champs de gaz sur les niveaux d'eau dans l'aquifère.
- Les résultats du modèle conceptuel suggèrent que les mécanismes responsables de l'évolution géochimique de l'eau de l'aquifère au Montana pourraient être semblables à ceux proposés en Alberta. Une étude géochimique complète de part et d'autre de la frontière serait nécessaire afin de déterminer quels mécanismes contrôlent véritablement la composition de l'eau souterraine.
- L'étude de l'évolution des conditions paléo-hydrogéologiques pendant lesquelles l'aquifère Milk River a été rechargé, afin d'expliquer la présence et les conditions d'évolution de l'eau souterraine ancienne contenue dans l'aquifère.
- L'évaluation de la plausibilité hydraulique des différents mécanismes d'évolution géochimiques. Le modèle numérique peut servir de support à cette évaluation car il représente l'ensemble du système d'écoulement, contrairement aux travaux d'interprétation géochimique précédents qui considéraient des géométries simples (une seule dimension).

RÉFÉRENCES

AGRA Earth and Environmental Limited (1998) Evaluation of depletion of the Milk River aquifer. AGRA Earth & Environmental, Edmonton

Alberta Innovates Technology Future (2010) Milk River Aquifer Hydrogeology Report. Prepared for the Geological Survey of Canada, Quebec Division

Anna LO (2011) Effects of groundwater flow on the distribution of biogenic gas in parts of the northern Great Plains of Canada and United States. U.S. Geological Survey

Aranz Geo Limited (2016) Leapfrog Hydro. Disponible sur <http://www.leapfrog3d.com/>

Assemblée Générale des Nations Unies (2013) Résolution 68/118 sur le droit des aquifères transfrontaliers. 68^e session, 16 décembre 2013. Accessible en ligne: http://www.un.org/fr/documents/view_doc.asp?symbol=A/RES/68/118 (consulté en octobre 2016)

Atkinson N, Lyster S (2010) Bedrock Topography of Alberta, Canada. Energy Resources Conservation Board, ERCB/AGS Map, 550

Bentley HW, Phillips FM, Davis SN (1986) Chlorine-36 in the terrestrial environment. *Handb Environ Isot Geochem* 2:427–480

Berkenpas PG (1991) The Milk River Shallow Gas Pool: Role of the Updip Water Trap and Connate Water in Gas Production From the Pool. Society of Petroleum Engineers

Borneuf DM (1976) Hydrogeology of the Foremost Area. Alberta Research Council, Earth Sciences Report 1974-04

Borneuf DM (1974) Hydrogeological map of the Foremost area, Alberta : NTS mapsheets 72E. Alberta Geological Survey, Map 110

Clark ID, Fritz P (1997) *Environmental Isotopes in Hydrogeology*, 1^e édition. CRC Press, Boca Raton, Florida

Climate Canada (2015) Canadian Climate Normals. 1981-2010 Climate Normals and Averages. http://climate.weather.gc.ca/climate_normals/index_e.html

Cobban WA (1950) Telegraph Creek Formation of Sweetgrass Arch, North-Central Montana: GEOLOGICAL NOTES. *AAPG Bull* 34:1899–1900

Cobban WA, Erdmann CE, Lemke RW, Maughan EK (1976) Type sections and stratigraphy of the Blackleaf and Marias River formations (Cretaceous) of the Sweetgrass Arch. *Mont U S Geol Surv Prof Pap* 974:36–60

Cummings DI, Russell HAJ, Sharpe DR (2012) Buried-valleys and till in the Canadian Prairies: geology, hydrogeology, and origin

Dawson, F.M., Evans CG, Marsh R, Richardson R (1994) Uppermost cretaceous and tertiary strata of the western Canada sedimentary basin; in *Geological Atlas of the Western Canada Sedimentary Basin*, G.D. Mossop and I. Shetsen (comp.), Canadian Society of Petroleum Geologists and Alberta Research Council, URL <http://www.ags.gov.ab.ca/publications/wcsb_atlas/atlas.html>

Diersch H-JG (2014) *FEFLOW: finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media*. Springer

Domenico PA, Robbins GA (1985) The displacement of connate water from aquifers. *Geol Soc Am Bull - GEOL SOC AMER BULL*. doi: 10.1130/0016-7606(1985)962.0.CO;2

Dormaar JF (2010) *The Alberta Stretch of the Milk River and the Mystique of Its Surrounding Landscape*. Lethbridge Historical Society

Dowling DB (1915) Water supply, southeastern Alberta. Summary Report 1915; Geological Survey of Canada, Summary Report (1915), 1916; p. 102-110

Dowling DB (1917) View of model of the southern plains of Alberta, from southeast. Geological Survey of Canada, Multicoloured Geological Map 1647, 1917; 1 sheet, doi:10.4095/108095

Eberth DA, Hamblin AP (1993) Tectonic, stratigraphic, and sedimentologic significance of a regional discontinuity in the upper Judith River Group (Belly River wedge) of southern Alberta, Saskatchewan, and northern Montana. *Can J Earth Sci* 30:174–200. doi: 10.1139/e93-016

Environment Canada (2012) Water Availability in Canada. Retrieved May 2015 from <http://www.ec.gc.ca/indicateurs-indicators/default.asp?lang=en&n=1B1433B4-1>

Evans, C. S. (1931) Milk River area and the Red Coulee Oil Field, Alberta. Geological Survey of Canada, Summary Report (1930), p. 1-30

Fabryka-Martin J, Whittemore DO, Davis SN, et al. (1991) Geochemistry of halogens in the Milk River aquifer, Alberta, Canada. *Appl Geochem* 6:447–464. doi: 10.1016/0883-2927(91)90044-P

Feltis RD, Lewis BD, Frasure RL, et al. (1981) Selected geologic data from the Northern Great Plains area of Montana. U.S. Geological Survey

Fröhlich K (2013) Milk river aquifer, Alberta, Canada — A case study. Chapter 11. In: Isotope methods for dating old groundwater. Glynn PD and Plummer LN, International Atomic Energy Agency, Vienna, pp 259–272

Fröhlich K, Ivanovich M, Hendry MJ, et al. (1991) Application of isotopic methods to dating of very old groundwaters: Milk River aquifer, Alberta, Canada. *Appl Geochem* 6:465–472. doi: 10.1016/0883-2927(91)90045-Q

Gill JR, Cobban WA (1973) Stratigraphy and geologic history of the Montana group and equivalent rocks, Montana, Wyoming, and North and South Dakota. United States Geological Survey

GIN (2015) Groundwater Information Network. Natural Resources Canada. <http://gin.gw-info.net>

Glombick PM (2010) Top of the Belly River Group in the Alberta Plains: Subsurface Stratigraphic Picks and Modelled Surface. Open file Report 2010-10. Energy Resources Conservation Board, ERCB/AGS

GWIC (2015) Ground Water Information Center; Montana Bureau of Mines and Geology; Montana Tech of the University of Montana; <http://mbmaggwic.mtech.edu/>

Hamblin AP (1997) Regional Distribution and Dispersal of the Dinosaur Park Formation, Belly River Group, Surface and Subsurface of Southern Alberta. *Bull Can Pet Geol* 45:377–399

HCL consultants (2004) County of Forty Mile No. 8, Parts of the South Saskatchewan River and Missouri River Basins. Regional Groundwater Assessment, Tp 001 to 013, R 05 to 14, W4M

HCL consultants (2007) M.D. of Taber, Part of the South Saskatchewan River Basin. Regional Groundwater Assessment, Parts of Tp 007 to 015, R 12 to 20, W4M

Hendry J, Schwartz FW, Robertson C (1991) Hydrogeology and hydrochemistry of the Milk River aquifer system, Alberta, Canada: a review. *Appl Geochem* 6:369–380. doi: 10.1016/0883-2927(91)90037-P

Hendry MJ, Buckland GD (1990) Causes of Soil Salinization: 1. A Basin in Southern Alberta, Canada. *Ground Water* 28:385–393. doi: 10.1111/j.1745-6584.1990.tb02268.x

Hendry MJ, Schwartz FW (1988) An alternative view on the origin of chemical and isotopic patterns in groundwater from the Milk River Aquifer, Canada. *Water Resour Res* 24:1747–1763. doi: 10.1029/WR024i010p01747

Hendry MJ, Schwartz FW (1990) The Chemical Evolution of Ground Water in the Milk River Aquifer, Canada. *Ground Water* 28:253–261. doi: 10.1111/j.1745-6584.1990.tb02253.x

Hydrogeological Consultants (2007) Regional groundwater assessment. Part of the South Saskatchewan River Basin Parts of Tp 007 to 015, R 12 to 20, W4M. Prepared for M.D. of Taber

IGRAC (2015) International Groundwater Resources Assessment Center. Tranboundary Aquifer of the World 2015. Special edition for the 7th World Water Forum 2015. <http://www.unigrac.org/downloads>

ISARM (2016) Internationally Shared Aquifer Resources Management. isarm.org (consulté en octobre 2016)

Konikow LF, Leake SA (2014) Depletion and Capture: Revisiting “The Source of Water Derived from Wells.” *Groundwater* 52:100–111. doi: 10.1111/gwat.12204

Konikow LF, Neuzil CE (2007) A method to estimate groundwater depletion from confining layers

Levings GW (1982) Potentiometric-surface map of water in the Eagle Sandstone and equivalent units in the Northern Great Plains area of Montana. United States Geological Survey

Lies H, Letourneau J (1995) Numerical Modelling of the Hydrodynamically Trapped Milk River Gas Field, Western Canada. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. Vol. 34 Issue 10

Lorenz JC (1981) Sedimentary and Tectonic History of the Two Medicine Formation, Late Cretaceous (Campanian), Northwestern Montana. Princeton University

MacCulloch G, Wagner-Watchel J (2010) Milk River Main Channel. Channel losses and gains assessment, Field study 2007. Preliminary Report. Environment Canada, Meteorological Service of Canada. Water Survey Division, Calgary, Alberta

Machard de Gramont H, Noel C, Oliver J-L, et al. (2010) Vers une gestion concertée des systèmes aquifères transfrontaliers : guide méthodologique. AFD, Paris

Meijer-Drees NC, Mhyr DW (1981) The Upper Cretaceous Milk River and Lea Park Formations in Southeastern Alberta. *Bull Can Pet Geol* 29:42–74

Meyboom P (1960) Geology and groundwater resources of the Milk River sandstone in southern Alberta. Research Council of Alberta

Milk River Watershed Council Canada (2008) Milk River State of the Watershed Report 2008. Milk River Watershed Council Canada. Milk River, Alberta. 155p

Miller KJ, Norbeck P M (1996) Ground-water evaluation of the East Butte of the Sweet Grass Hills, North-Central Montana. Montana Bureau of Mines and Geology Open-File Report 351

Montana Geological Society (2013) Northwest Geologic Service Sample Logs. Northern Rockies Geological Data Center

NOAA (2015) National Centers for Environmental Information. Data Tools: 1981-2010 Normals. <http://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/datatools/normals>

Noble R, Bergantino R, Patton TW, et al. (1982) Contours in Feet on Top of the Judith River Aquifer, in Occurrence and characteristics of ground water in Montana. Volume 1. The Great Plains Region

Norbeck P M (2006) Sunburst water-supply renovation: April 2006 project report to the Montana Department of Natural Resources and Conservation. Open-File Report 548. Montana Bureau of Mines and Geology

O'Connell S (2014) The Milk River Transboundary Aquifer in Southern Alberta. Geological Survey of Canada, Open File Report 7751. Belfield Consultants

Okulitch AV, Lopez DA, Jerzykiewicz T (1996) Bedrock geology, Lethbridge, Alberta-Saskatchewan-Montana

Payenberg THD (2002a) Integration of the Alderson Member in southwestern Saskatchewan into a litho- and chronostratigraphic framework for the Milk River/Eagle coastline in southern Alberta and north-central Montana. In: Summary of Investigations 2002, Volume 1, Saskatchewan Geological Survey, Sask. Energy Mines, Misc. Rep. 2002-4.1

Payenberg THD (2002b) Litho-, Chrono- and Allostratigraphy of the Santonian to Campanian Milk River and Eagle Formations in Southern Alberta and North-central Montana [microform]: Implications for Differential Subsidence in the Western Interior Foreland Basin. Thesis (Ph.D.)--University of Toronto

Payenberg THD, Braman DR, Davis DW, Miall AD (2002) Litho- and chronostratigraphic relationships of the Santonian-Campanian Milk River Formation in southern Alberta and Eagle

Formation in Montana utilising stratigraphy, U-Pb geochronology, and palynology. *Can J Earth Sci* 39:1553–1577

Payenberg THD, Braman DR, Miall AD (2003) Depositional environments and stratigraphic architecture of the Late Cretaceous Milk River and Eagle formations, southern Alberta and north-central Montana: relationships to shallow biogenic gas. *Bull Can Pet Geol* 51:155–176

Payenberg THD, Miall AD, Braman DR (2001) Sequence stratigraphy of the Milk River Formation in southern Alberta and Eagle Formation in northern Montana. *Canadian Society of Petroleum Geologists*

Persram AS (1992) (draft report, unpublished): Hydrogeology of the Milk River Formation in Southern Alberta, Alberta Environmental Protection, Hydrogeology Branch, internal (draft) report

Pétre M-A, Rivera A, Lefebvre R (2015) Three-dimensional unified geological model of the Milk River Transboundary Aquifer (Alberta, Canada – Montana, USA). *Can J Earth Sci* 52:96–111. doi: 10.1139/cjes-2014-0079

Pétre M-A, Rivera A, Lefebvre R, et al. (2016) A unified hydrogeological conceptual model of the Milk River transboundary aquifer, traversing Alberta (Canada) and Montana (USA). *Hydrogeol J* 1–25. doi: 10.1007/s10040-016-1433-8

Phillips FM, Bentley HW, Davis SN, et al. (1986) Chlorine 36 dating of very old groundwater: 2. Milk River Aquifer, Alberta, Canada. *Water Resour Res* 22:2003–2016. doi: 10.1029/WR022i013p02003

Pierce WG, Hunt CB (1937) Contributions to economic geology (short papers and preliminary reports), 1934-36. Geology and mineral resources of north-central Chouteau, western Hill, and eastern Liberty counties, Montana. United States Geological Survey

Printz J (2004) Milk River Aquifer Reclamation & Conservation Program 1999-2004 Summary Report

Rehm BW, Moran SR, Groenewold GH (1982) Natural groundwater recharge in an upland area of central North Dakota, USA. *J Hydrol* 59:293–314

Rice DD (1980) Coastal and deltaic sedimentation of Upper Cretaceous Eagle Sandstone; relation to shallow gas accumulations, North-central Montana. *AAPG Bull* 64:316–338

Rice DD, Cobban WA (1977) Cretaceous stratigraphy of the Glacier National Park area, northwestern Montana. *Bull Can Pet Geol* 25:828–841

RIOB (2013) Manuel de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau dans les Bassins des Fleuves, des Lacs et des Aquifères Transfrontaliers. Réseau International des Organismes de Bassin, Partenariat Mondial de l'eau, Office International de l'Eau. <http://www.riob.org/riob/information-et-publications/article/manuel-de-la-gestion-integree-des> (consulté en octobre 2016)

Robertson C (1988) Potential impact of subsurface irrigation return flow on a portion of the Milk River and Milk River Aquifer in southern Alberta. University Of Alberta Dept Of Geology

Rushton KR, Eilers VHM, Carter RC (2006) Improved soil moisture balance methodology for recharge estimation. *J Hydrol* 318:379–399. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.06.022

Russell LS (1970) Correlation of the Upper Cretaceous Montana Group between southern Alberta and Montana. *Can J Earth Sci* 7:1099

Russell LS, Landes RW (1940) Geology of the southern Alberta Plains. Geological Survey of Canada Memoir 221, 219 pages

Schwartz FW, Muehlenbachs K (1979) Isotope and ion geochemistry of groundwaters in the Milk River Aquifer, Alberta. *Water Resour Res* 15:259–268. doi: 10.1029/WR015i002p00259

Schwartz FW, Muehlenbachs K, Chorley DW (1981) Flow-system controls of the chemical evolution of groundwater. *Dev Water Sci* 16:225–243

Sosiak AJ, Branch AWS (1997) Pakowki Lake Water Quality Study (1996). Water Sciences Branch, Water Management Division, Natural Resources Service

Stantec (2002) Regional groundwater assessment of potable groundwater in county of Warner No5, Alberta. County of Warner No5

Stanton TW, Hatcher JB, Knowlton FH (1905) Geology and paleontology of the Judith river beds. United States Geological Survey

Stebinger E (1917) Contributions to economic geology, 1916, Part II, Mineral fuels-- Possibilities of oil and gas in north-central Montana. United States Geological Survey

Swanick GB (1982) The hydrochemistry and age of the water in the Milk River aquifer, Alberta, Canada. Masters thesis. The University of Arizona

Theis CV (1940) The source of water derived from wells. *Civ Eng* 10:277–280

Tokarsky O (1974) Hydrogeology of the Lethbridge–Ferne area, Alberta. Alberta Geological Survey, Earth Sciences Report 1974-01

Toth J, Corbet T (1986) Post-Paleocene evolution of regional groundwater flow-systems and their relation to petroleum accumulations, Taber area, southern Alberta, Canada. Bull Can Pet Geol 34:339–363

Tovell WM (1956) Some Aspects of the Geology of the Milk River and Pakowki Formations (Southern Alberta). Thesis, University of Toronto

Tuck LK (1993) Reconnaissance of geology and water resources along the north flank of the Sweet Grass Hills, north-central Montana. U.S. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 93-4026. 68 p

UNESCO (2015) Estrategia regional para la evaluación y gestión de los Sistemas Acuíferos Transfronterizos en las Américas; ISARM Américas Series; Vol.:4; Montevideo, (Rivera, A. ed.) UNESCO Office Montevideo; Washington, OAS, 2015, 189pp, ISBN 978-92-9089-196-3

WEBLEX Canada (2013) Natural Resources Canada. Government of Canada. <http://weblex.nrcan.gc.ca>

Williams MY, Dyer WS (1930) Geology of southern Alberta and southwestern Saskatchewan. Geological Survey of Canada. Memoir 163. doi:10.4095/100794

Wozniak PRJ, Grasby SE, Chen Z (2011) Preliminary analysis of the GIC Alberta groundwater data - a prospective data source for regional scale aquifer assessment. Geological Survey of Canada, Open File 5573, doi:10.4095/289059

Zimmerman E (1967) Water resources of the Cut Bank area, Glacier and Toole Counties, Montana. Montana Bureau of Mines and Geology. Bulletin 60. 37 p

SECTION 2: ARTICLES

CHAPITRE 5 THREE-DIMENSIONAL UNIFIED GEOLOGICAL MODEL OF THE MILK RIVER TRANSBOUNDARY AQUIFER (ALBERTA, CANADA - MONTANA, USA)

Marie-Amélie Pétré^{1ab}, Alfonso Rivera^a, René Lefebvre^b

^aGeological Survey of Canada, Québec Division, Québec, QC, Canada

^bInstitut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement, Québec, QC, Canada

Canadian Journal of Earth Sciences (2015), vol.52, p 96-111

DOI: [dx.doi.org/10.1139/cjes-2014-0079](https://doi.org/10.1139/cjes-2014-0079)

Soumis le 18 avril 2014. Accepté le 7 août 2014 avec révisions mineures. Accepté définitivement le 6 septembre 2014. Publié le 6 janvier 2015. Suites aux commentaires des examinateurs de la thèse, certaines modifications ont été faites à la version de l'article présentée dans la thèse par rapport à la version publiée.

Contribution de l'étudiante et des co-auteurs :

Marie-Amélie Pétré a rassemblé et harmonisé les données géologiques et a construit le modèle géologique 3D. Elle a également rédigé l'article et réalisé les figures.

Alfonso Rivera et **René Lefebvre** ont tous deux supervisé le projet et ont révisé et commenté l'article.

Version française du titre et du résumé

Modèle géologique tridimensionnel unifié de l'aquifère transfrontalier Milk River (Alberta, Canada- Montana, USA)

Résumé

L'aquifère transfrontalier Milk River (Canada/USA) a été intensivement sollicité pendant le 20^{ème} siècle, si bien que des inquiétudes concernant la durabilité de cette ressource sont apparues dès le milieu des années 1950. Cet aquifère correspond en réalité au Membre Virgelle de la Formation Milk River (appelé Formation Eagle au Montana) datant du Crétacé Supérieur. Pour évaluer les conditions nécessaires à un usage durable de l'aquifère, un portrait complet et unifié de l'aquifère est nécessaire à travers sa frontière internationale. Le cadre stratigraphique et la géométrie des unités géologiques des deux côtés de la frontière internationale ont été ainsi unifiés dans un modèle géologique 3D de 50 000 km². Le Membre Virgelle a une épaisseur allant de 0 à 60 mètres et sous-affleure près de la frontière et le long de deux branches de chaque côté de l'arche Sweetgrass. Il plonge depuis les zones de sous-affleurement en suivant une disposition semi-radiale. Les limites de l'aquifère ont été mieux définies selon les caractéristiques physiographiques, le champ de gaz contenu par le Membre Alderson (Alberta) et le champ de gaz près des Montagnes Bearpaw (Montana). Le Membre Alderson est séparé des autres membres de la formation Milk River par une disconformité régionale. Ce modèle géologique 3D unifié forme la base indispensable aux modèles conceptuel et numérique hydrogéologiques de l'aquifère Milk River.

Three-dimensional unified geological model of the Milk River Transboundary Aquifer (Alberta, Canada – Montana, USA)

Marie-Amélie Pétré^{1ab}, Alfonso Rivera^a, René Lefebvre^b

^aGeological Survey of Canada, Québec Division, Québec, QC, Canada

^bInstitut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement, Québec, QC, Canada

ABSTRACT

The Milk River Transboundary Aquifer (Canada/USA) has been intensively used over the twentieth century; concerns have risen about the durability of this resource since the mid-1950s. This aquifer corresponds to the middle Virgelle Member of the Upper Cretaceous Milk River Formation (called Eagle Formation in Montana). To assess the conditions needed for sustainable use of the aquifer, a comprehensive and unified portrait of the aquifer is needed across its international boundary. The stratigraphic framework and geometry of geological units on both sides of the international border were thus unified in a 50 000 km² 3D geological model. The Virgelle Member is 0 to 60 m thick and it subcrops near the border and along both sides of the Sweetgrass Arch. It dips away from the subcrop areas in a semi-radial pattern. The Medicine Hat gas field hosted by the Alderson Member (Alberta), which is separated from the other members by a regional unconformity, and the Tiger Ridge gas field near the Bears Paw Mountains (Montana) limit the extent of the aquifer. The unified 3D geological model forms the necessary basis for conceptual and numerical hydrogeological models of the Milk River Aquifer.

5.1 Introduction

The Milk River Aquifer straddles southern Alberta (Canada) and northern Montana (USA) in a water-short semi-arid region (Government of Alberta 2006). This confined sandstone aquifer corresponds more specifically to the Virgelle Member of the Milk River Formation (Eagle Formation in Montana). The extensive use of this resource over the 20th century has led to a

major drop in water levels locally, and concerns about the durability of the resources have been raised since the mid-1950s (Meyboom 1960; Borneuf 1976). More recently, AGRA Earth and Environmental (1998) published a depletion study of the aquifer and made recommendations for the conservation of this resource. A 5-year conservation program in southern Alberta followed this study; however the Milk River Aquifer is still exploited on both sides of the international border in the absence of an agreement between the USA and Canada on the use of this shared resource.

The Milk River Aquifer has been the object of many studies throughout the 20th century; however most of them were limited by the Canada/USA border (Meyboom 1960; Hendry et al. 1991; Alberta Innovates Technology Future 2010), thus preventing a full understanding of the aquifer dynamics. Since geological formations in Alberta and Montana are not defined or named the same way, several stratigraphic charts of the Milk River Formation subdivision have evolved considerably in each country, making transboundary studies challenging. An integrated portrait of the aquifer is, however, necessary to assess the conditions needed for its sustainable shared use.

The objective of this study is to overcome transboundary limitations by providing unified geological and conceptual hydrogeological models of the Milk River Aquifer. The term “unified” means that the study follows the natural limits of the aquifer, not interrupted by the international border. A consistent nomenclature is required to describe the stratigraphic and hydrostratigraphic units across the international boundary. A first component of the conceptual model is the 3D unified geological model of the aquifer presented in this paper (Fig. 5.1). For this purpose, geological data on both sides of the international border were gathered and assembled consistently in the light of the latest correlation and geological work (Payenberg 2002b; Payenberg et al. 2002; O’Connell 2014). The 3D geological model thus provides a common stratigraphic framework for hydrogeological applications, as done by Ross et al. (2005) and it represents a prerequisite for a representative transboundary hydrogeological numerical model, which in turn will lead to recommendations for the sound management of this shared resource.

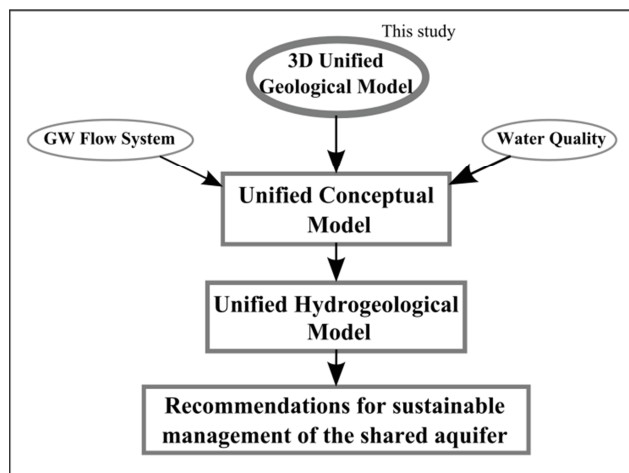


Figure 5.1 Successive stages of the Milk River transboundary aquifer study; this paper presents the initial step, the development of a 3D unified geological model.

5.2 Study area

The study area extends over about 50 000 km² in southern Alberta (Canada) and northern Montana (USA) (Fig. 5.2). The study area ranges from longitude -110.0° to -113.0° and from latitude 48.2° to 50.3°. The study area is bounded by the edge of the Disturbed Belt (indicated on Fig. 5.2), on the west, and reaches the Saskatchewan border and the Bears Paw Mountains, on the east. The Marias River has been chosen as the southern physiographic limit of the model. However, the Eagle Formation may extend further south in Montana. The southern limit is north of the Marias River in Montana. The northern limit is the southern edge of the Medicine Hat gas field in Alberta.

The main structural feature in the study area is the Sweetgrass Arch, composed of the Kevin-Sunburst Dome, the Bow Island Arch and the Sweetgrass Hills. The Sweetgrass Arch in Montana is composed of the Kevin-Sunburst Dome and the South Arch. The South Arch is outside the study area. The Sweetgrass Hills correspond to igneous intrusives located on the eastern flank of the Sweetgrass Arch. The Sweetgrass Hills are an ensemble of three buttes (2 100 m altitude) near the Canada/US border. The limits of the model are explained in the section “Geological and Hydrostratigraphic Settings”.

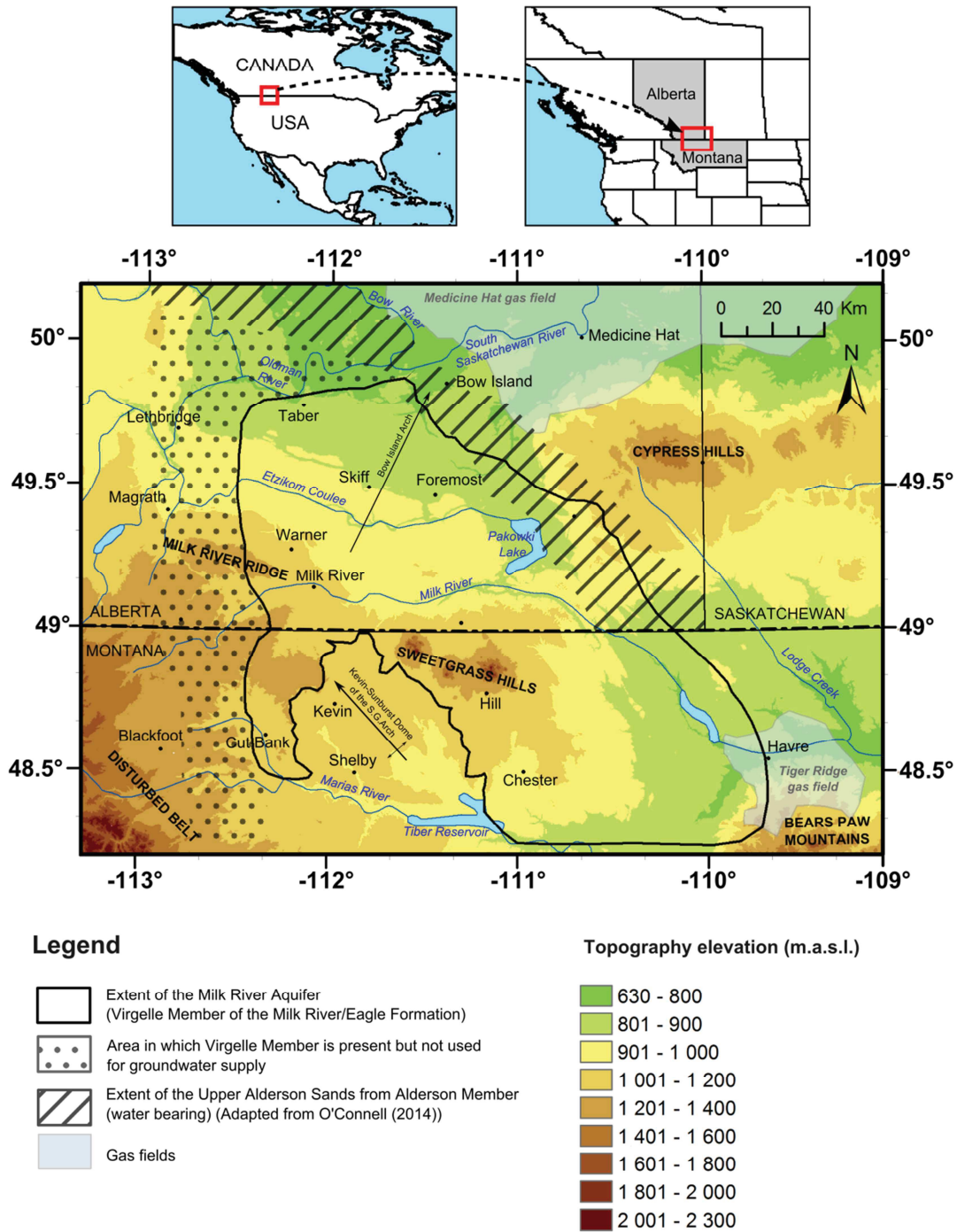


Figure 5.2 Study area and extent of the Milk River Aquifer. “S.G. Arch” stands for Sweet Grass Arch

5.3 Correlations

Prior to discussing the geological and hydrogeological contexts of the Milk River Aquifer, it is necessary to establish the correlations between geological units across the international boundary and define the nomenclature that will be used in the remainder of this paper. As the characterization of the Upper Cretaceous Milk River Formation (Eagle Formation in Montana) progressed, the stratigraphic nomenclature evolved significantly during the twentieth century (Fig. 5.3). The stratigraphic charts not only differ between southern Alberta and northern Montana but also within northern Montana (east and west of the Sweetgrass Arch). As early as 1917, Stebinger (1917b) described the differences between the geologic sections east and west of the 112th meridian in Montana.

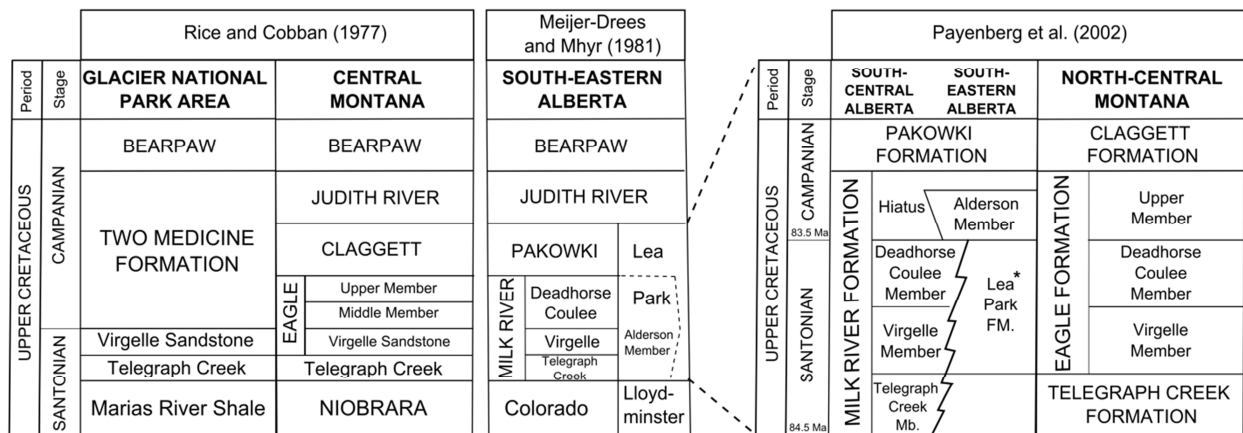


Figure 5.3 Comparative stratigraphic nomenclatures existing in the study area (modified from Rice and Cobban 1977; Meijer-Drees and Mhyr 1981 and Payenberg et al. 2002).* The Lea Park Formation may be drawn all the way through the Pakowki Formation, following Meijer-Drees and Mhyr (1981) and Dawson et al. (1994).

The Milk River Formation of southern Alberta was first identified by Dowling (1915, 1917) as the “Milk River Sandstone” in his study of the Southern Plains of Alberta. The Milk River Sandstone consisted then of two parts (lower and upper) bearing successive terminologies (Evans 1931; Russell and Landes 1940). A three-part subdivision of the Milk River Formation was introduced by Tovell (1956), including the Transition beds, Virgelle and Deadhorse Coulee (Tovell 1956, cited by Meijer-Drees and Mhyr 1981). In Montana, the upper and lower parts of the Milk River Sandstone were referred to as Upper Eagle and Virgelle by Williams and Dyer (1930). Meyboom

(1960) also equated the lower part of the Milk River Formation to the Virgelle Member of Eagle Sandstone in Montana.

In Montana, Stanton et al. (1905) first described the stratigraphy of Upper Cretaceous rocks in northern and central Montana and in Canada. They defined the Eagle Formation (named by Weed 1899 from Eagle Creek, a tributary of the Missouri River) as massive white sandstone overlain by softer beds consisting of alternating sandstone, shale, and many beds and seams of lignite. They also noticed that small black pebbles occurred at the top. Rice (1980) divided the Eagle Formation into three members: the basal Virgelle Member, and the unnamed middle and upper members. Stanton et al. (1905) established that the overlying Pakowki Shale in Alberta was identical to the Claggett Shale in Montana. They also showed that the Belly River Group that overlies the Pakowki Shale in Alberta was identical to the Judith River in Montana. Payenberg et al. (2002) confirmed that Claggett and Pakowki are of the same age. In the northeastern part of the study area, the stratigraphic equivalent of the Pakowki Formation is the Lea Park Formation (Williams and Dyer 1930).

Meijer-Drees and Mhyr (1981) proposed a stratigraphic nomenclature for southeastern Alberta. They defined the Milk River Formation as the stratigraphic equivalent of the Telegraph Creek Formation and Eagle Sandstone defined by Rice and Cobban (1977). They also defined the Deadhorse Coulee Member in Southeastern Alberta as occupying the same interval as the upper and middle members of the Eagle Sandstone. In the Sweetgrass Hills area, Tuck (1993) named the interval between Virgelle and Claggett the “upper part” of Eagle sandstone. This upper part consisted of interbedded shale, siltstone, sandstone, and coal, and bears close resemblance to the Deadhorse Coulee Member.

Until recently, a clear regional correlation of the Milk River Formation and the Eagle Formation was not possible, due to differences in lithology and time-range (Russell 1970) and the limited and remote exposure of the Eagle Formation within northern Montana (Payenberg et al. 2003). Russell (1970) revealed misunderstandings made in previous stratigraphic correlations. Thirty years after Russell’s (1970) attempt at correlating between the Milk River and Eagle Formations, Payenberg (2002b) and Payenberg et al. (2002) reevaluated the lithostratigraphic and chronostratigraphic relationships of Alberta and Montana Upper Cretaceous rocks. They used

recent advances in geochronology, magnetostratigraphy, and a paleontological database. The work of Payenberg et al. (2002) provided a clearer litho- and chrono-stratigraphic framework of the study area; it particularly showed that the Telegraph Creek, Virgelle, and Deadhorse Coulee Members are continuous and correlative across the international border (Payenberg 2002a), and also introduced the Alderson Member of the Lea Park Formation in the southern Alberta nomenclature (Fig. 5.3).

The proposed nomenclature in the present study (Fig. 5.4) is based on the previous works of Meijer-Drees and Mhyr (1981), Payenberg et al. (2002) and Rice and Cobban (1977). The study area is divided in four zones (Fig. 5.5a), each with a distinct succession of geological units. These zones are defined as follows:

Zone 1: South-western part of the study area in Alberta, southwest of the Virgelle depositional limit;

Zone 2: North-eastern part of the study area in Alberta, northeast of Virgelle depositional limit;

Zone 3: North-western Montana, west of the Sweetgrass Arch;

Zone 4: Northern Montana, east of the Sweetgrass Arch.

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
	Bearpaw Fm	Bearpaw Fm	Bearpaw Fm	Bearpaw Fm
	Belly River Group	Belly River Group	Two	Judith River Fm
	Pakowki Fm	Pakowki Fm	Medicine	Claggett Fm
Milk River Formation	Deadhorse Coulee Mbr	Lea Park Fm Alderson Member	Fm	Eagle Fm Deadhorse Coulee Mbr
	Virgelle Mbr		Virgelle Mbr	Virgelle Mbr
	Telegraph Creek Mbr		Telegraph Creek Mbr	Telegraph Creek Fm
	Colorado Group	Colorado Group	Colorado Group	Colorado Group

Figure 5.4 Proposed stratigraphic nomenclature in the present study and representation of the geological formations described in the 3D geological model (zones shown on Fig. 5a). Note that the Two Medicine Formation has been subdivided into three members (Judith River Formation, Claggett Formation and Deadhorse Coulee Member equivalents). The Bearpaw Formation box also includes the surficial sediments in the 3D model.

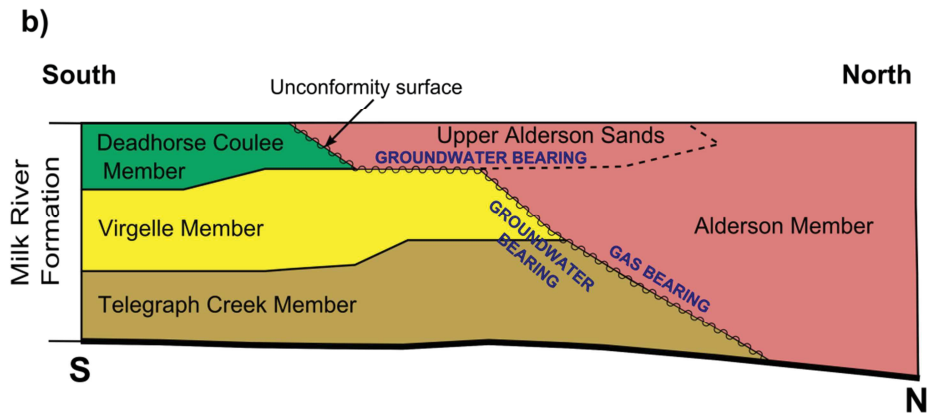
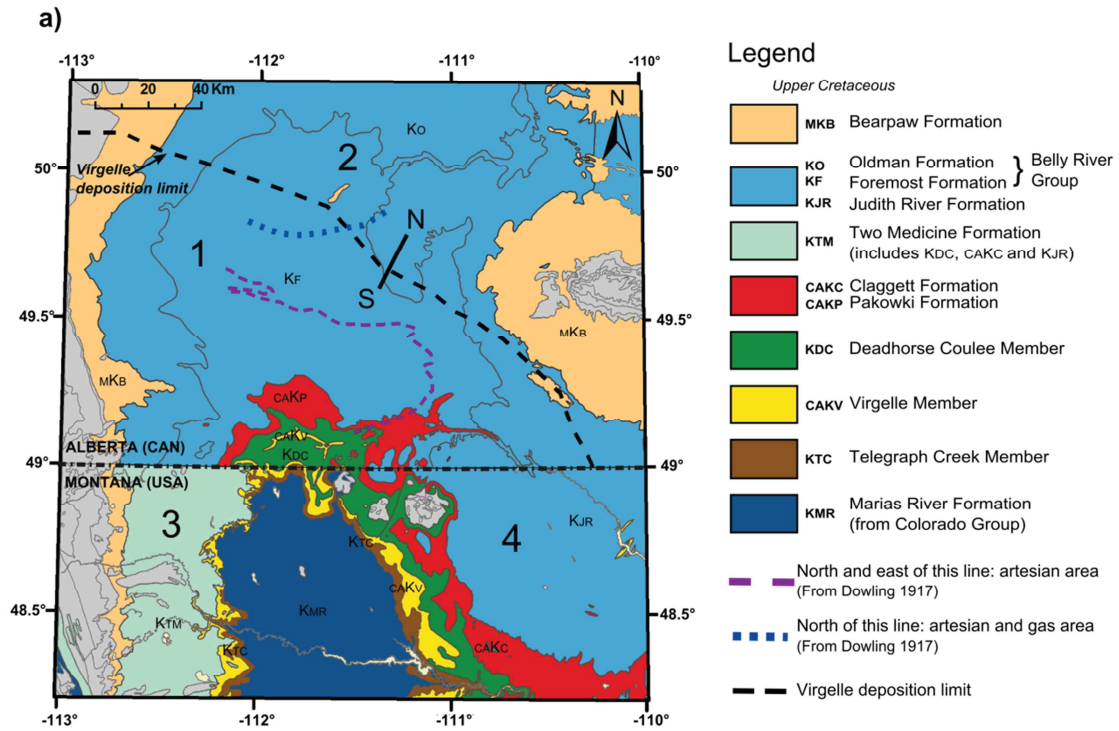


Figure 5.5 a) Bedrock geological map of the study area (Adapted from Okulitch et al. 1996). b) Cross-section (indicated by “S-N” in Fig. 5.5a) showing the unconfornity surface separating the Alderson Member from the three other members of the Milk River Formation. The encasing units are not represented on this cross section (Adapted from O’Connell 2014).

5.4 Geological and Hydrostratigraphic Settings

The geology of the study area can be described as a succession of marine and continental sediments that were deposited as the Upper Cretaceous Interior Sea level fluctuated (Russell 1970). The Upper Cretaceous strata are briefly described below and represented on the bedrock geological map in Fig. 5.5a. Their hydrostratigraphic role is indicated in Fig. 5.6 and briefly described in the present section.

Period	STRATIGRAPHY	HYDROSTRATIGRAPHY	
UPPER CRETACEOUS	Bearpaw Formation	Bearpaw Aquitard	
	Belly River Group	Dinosaur Park Formation	Belly River Aquifer
		Oldman Formation	
		Foremost Formation	
	Pakowki Formation	Pakowki Aquitard	
	Milk River Formation	Milk River Aquifer	
	Colorado Group	Colorado Aquitard	

Figure 5.6 Stratigraphy and hydrostratigraphy of the main geological units of the study area.

Colorado Group

The Colorado Group (middle Albian to Santonian) underlies the entire study area (Fig. 5.4). It was deposited during marine conditions in a moderate-depth sea environment. The Colorado Group consists mainly of dark grey to black bentonitic marine shale. It ranges in thickness from 500 to 600 m in southern Alberta and from 450 to 500 m in north central Montana (Hendry et al. 1991; Cobban et al. 1976). The upper boundary of the Colorado Group is commonly taken at the First White Speckled Shales (Meyboom 1960). The First White Speckled Shales are also recognized as a member of the Niobrara Formation by the Alberta Geological Survey (Alberta Geological Survey 2015). The Colorado Group is not exposed in southern Alberta (Dyer and Williams 1930) but it outcrops widely over 5 counties in northern Montana, from the Sweetgrass

Hills to Great Falls (Cobban et al. 1976). It constitutes a regional aquitard in the study area (Fig. 5.6) with a hydraulic conductivity ranging from 10^{-14} to 10^{-10} m/s (Hendry and Schwartz 1988). The Colorado Group is overlain by the Milk River Formation and thus the interface between these units constitutes the datum plane of the present regional study.

Milk River/Eagle Formation

The Milk River Formation (Eagle Sandstone in Montana) is a regressive clastic wedge deposited during the Late Cretaceous (Rice 1980; Payenberg et al. 2001). The Milk River Formation has been traditionally subdivided into three members: the basal Telegraph Creek Member, the middle Virgelle Member and the upper Deadhorse Coulee Member.

The Milk River Formation is 150 m thick in the southwest corner of the Canadian part of the study area and thins towards the northeast (O'Connell 2014). It subcrops in an area of 14 townships in southern Alberta near the border, in rings around the Sweetgrass Hills and along both sides of the Sweetgrass Arch. According to Russell (1970): "There is little difference between the western and eastern developments." The Milk River Formation dips gently to the north, east and west, from the subcrop areas following a radial or "fan-like" pattern (Meyboom 1960; Schwartz and Muehlenbachs 1979; Toth and Corbet 1986). The Milk River Formation is confined below and above by the low-permeability shales of the Colorado Group and Pakowki/Claggett Formations, respectively.

The Milk River Aquifer is within the Milk River Formation. The middle Virgelle Member is the most important aquifer within the formation. The Milk River Aquifer is a confined and inclined aquifer, which locally shows flowing artesian conditions. About 200 flowing artesian wells were inventoried in the 1960s in southern Alberta (Meyboom, 1960). In Montana, flowing artesian water occurs in much of the area of Cut Bank, Montana due to the westward dip of the formation (Zimmerman 1967). Tuck (1993) also highlighted some flowing artesian wells in the Sweetgrass Hills area. However, many wells have lost their artesian flow because of the intensive use of this resource. Nowadays, the flowing artesian areas are located in the vicinity of Pakowki Lake and north of the study area, which is still consistent with the flowing artesian limit drawn by Dowling (1917) (Fig. 5.5a).

Meyboom (1960) showed that the recharge areas of the aquifer were located mainly in the concentric outcrops around the Sweetgrass Hills and to a lesser extent at the subcrop area near the international border. The main discharge areas are located at the pumping or flowing wells of the study area, with small natural discharge (Meyboom 1960).

Groundwater flow in the Milk River Aquifer follows the regional dip of the Milk River/Eagle Formation. In Alberta the general flow is semi-radial from the topographic highs of the Sweetgrass Hills to the north, west and east (Hendry and Schwartz, 1988). In Montana, groundwater flows from the Sweetgrass Hills to the east and south-east and also from the subcrop areas west of the Sweetgrass arch to the west and south (Zimmerman 1967; Levings 1982). Therefore, there are two transboundary flow paths in the study area: 1) from the Sweetgrass Hills to the north, and 2) from north of the Cut Bank, Montana, area to the north (Zimmerman 1967; Tuck 1993).

In southern Alberta, the Alderson Member of Lea Park Formation (Meijer-Drees and Mhyr (1981) unconformably overlays the Milk River Formation in the north, northeast and east of the study area (Fig. 5.5b). The sandy shales of the Alderson Member are stratigraphically adjacent to the Milk River Formation and some authors (Hendry et al. 1991) described the relation between the units as a facies change. The Alderson Member has also been included in the Milk River Formation as a fourth member (Payenberg et al. 2002; O'Connell 2014). However, it is much younger than the other three members, is separated from them by a regional unconformity surface and is not present in Montana (Payenberg et al. 2003; O'Connell 2014). In the framework of the present study, the decision was made to include the Alderson Member as a member of the Lea Park Formation as also done by other authors (e.g. Meijer-Drees and Mhyr 1981). The Alderson Member is gas-bearing; it contains the Milk River gas field (or Medicine Hat gas field, Fig. 5.2), a natural limit of the 3D geological model. Another natural limit is imposed by the Tiger Ridge gas field in Montana, hosted by the Eagle Sandstone in the Bears Paw Mountains area (Fig. 5.2) (Gautier and Rice 1982), and constitutes another natural boundary for the present 3D geological model.

Telegraph Creek Member/Formation

The Telegraph Creek Member is a transitional unit between the shale of the Colorado Group and the massive sandstone of the Virgelle Member of the Milk River Formation. It is interpreted as deposits of an offshore to shore-face transition (Payenberg 2002a). The Telegraph Creek Member consists of thinly interbedded sandy shale, siltstone and fine-grained shaly sandstone. The Telegraph Creek is 36 to 52 m thick in the Cut Bank, Montana, area where it has formation status (Cobban 1950; Payenberg et al. 2001) and it is 30 to 52 m thick near the Sweetgrass Hills (Zimmerman 1967; Tuck 1993). The Telegraph Creek transition zone was originally included in the Virgelle Sandstone in north-central and northwestern Montana by Stebinger (1915, 1917a).

Virgelle Member

The Virgelle Member gradationally overlies the Telegraph Creek Member (Meijer-Drees and Mhyr 1981). It consists of grey to buff, thick bedded, fine to medium grained sandstone with thinly bedded siltstone (Tuck 1993). The Virgelle Member was deposited during a regression sequence and is interpreted as a shore-face to foreshore sandstone (Rice 1980). It is up to 69 m thick in southern Alberta and varies from 15 to 60 m thick on the west side of the Sweetgrass Arch (Lorenz 1981; O'Connell 2014). The Virgelle Member is not present in southwestern Saskatchewan or central Alberta because it is truncated by the regional unconformity surface separating the Milk River Formation and the Alderson Member. The Virgelle outcrops along the Milk River in southern Alberta over approximately 25 km in Township 1 and 2, Ranges 12 to 15 (Meyboom 1960). It also outcrops on both sides of the Sweetgrass Arch, in continuous and narrow belts (Fig. 5.5a).

The Virgelle Member massive sandstone is the most important aquifer part of the Milk River Formation and therefore constitutes the Milk River Aquifer. The hydraulic conductivity of the Virgelle sandstone in southern Alberta ranges from 10^{-8} to 10^{-6} m/s (Persram 1992 unpublished, cited by AGRA Earth and Environmental 1998). South-east of the town of Milk River, the hydraulic conductivity of the Virgelle is 1.8×10^{-7} m/s (Robertson 1988). The limits of the Milk River Aquifer are shown on Fig. 5.2. They correspond to the area in which the Virgelle Member exists and is exploited. However the 3D geological model extends farther west, to longitude -113°, where the Virgelle Member continues in the subsurface but is too deep (> 400 m) to be used for groundwater supply (Stantec 2002). In the framework of the present 3D geological model, the internal stratigraphy, lithofacies, and depositional environment of the Virgelle Member

are not further discussed. However, these aspects were studied by Rice (1976; 1980) in northern Montana and Meyer (1998) as well as Meyer and Krause (2006) in southern Alberta.

Deadhorse Coulee Member

The Deadhorse Coulee Member (DHC) represents the upper part of the Milk River Formation as named by Tovell (1956). It is a non-marine unit deposited in the coastal plain environments landward of the Virgelle shore-faces (O'Connell 2014). This well-defined unit consists predominantly of interbedded shale, siltstone and fine grained sandstone with coal seams (Payenberg 2002). The Deadhorse Coulee has a maximum thickness of 60 m in southern Alberta and thins northeastward to approximately 10 m east of the zero edge (from T1 R5 W4 to T13 R22 W4) (O'Connell 2014). In northern Montana, the Deadhorse Coulee equivalent is the unnamed middle member of Eagle Formation (Payenberg et al. 2001). The contact between Deadhorse Coulee and the overlying Pakowki /Claggett Formation is marked by a thin (but laterally continuous) bed of dark grey to black polished chert pebbles, which is interpreted as a transgressive lag overlying a regional unconformity surface (Russell 1970; (O'Connell 2014). The Deadhorse Coulee Member constitutes a low permeability unit that overlies the Virgelle Member (O'Connell 2014).

Alderson Member

The Alderson Member was originally considered the lower member of the Lea Park Formation and a stratigraphic equivalent to the Milk River Formation (Meijer-Drees and Mhyr 1981) (Fig. 5.3). It was entirely deposited in proximal to distal offshore marine environments (O'Connell 2014). In southern Alberta, the Alderson Member is present just northeast of the depositional limit of the Virgelle sandstone (Meijer-Drees and Mhyr 1981). The lithology of the Alderson Member consists of interbedded very fine-grained sand, silt and mud (O'Connell 2014). The sand content increases in the upper part (Meijer-Drees and Mhyr 1981). O'Connell (2014) includes the Alderson Member as the youngest member of the Milk River Formation which is 100 m thick in the northeast corner of the study area. The Alderson Member is younger than the Telegraph Creek, Virgelle and Deadhorse Coulee Members of the Milk River Formation and is separated from them by a regional unconformity representing a large time-gap (O'Connell 2014; Payenberg 2003). It therefore physically overlies and overlaps the erosional edges of the other

three members. The Alderson Member is about 85 m thick in southeastern Alberta (Meijer-Drees and Mhyr 1981).

The Alderson Member hosts the Medicine Hat gas field (Hamblin and Lee 1997; Fig. 5.2). However, the upper part of the Alderson Member contains two distinct large sand bodies which form a regional aquifer in southern Alberta. This unit is named the Upper Alderson Sands by O'Connell (2014). It covers an area of 74 townships and has a NW-SE trend (Fig. 5.2). The Upper Alderson Sands forms small lobate sand bodies. According to O'Connell (2014): "The Virgelle and Upper Alderson aquifers are separated from each other by muddy sediments of the Alderson and Deadhorse Coulee members, but they are locally in contact at the Virgelle erosional edge and water flow between the two aquifers is likely."

Pakowki Formation/ Claggett Shale

The Milk River Formation is overlain by a thick unit of marine shales, the Pakowki Formation (Claggett Shale equivalent in Montana). The Pakowki and Claggett Formations consist of thinly bedded, black marine shales, with few sandstone beds (Tovell 1956 cited by Payenberg et al. 2003). The Pakowki Formation is 98 m thick at Bow Island, 65 m at Lethbridge, Alberta, and up to 130 m in the Sweetgrass Hills area (Williams and Dyer 1930; Tuck 1993). A thin horizon of chert pebbles is present at the base of the unit. The formation was deposited during an extensive Late Cretaceous transgression episode; however the sea invasion did not reach the western part of the Sweetgrass Arch (Stebinger 1917b; Williams and Dyer 1930). Therefore, the tongue of marine shale progressively thins to zero westward. Where the Claggett/Pakowki Formations pinch out, the Milk River Formation is directly overlain by the Judith River Formation/Belly River Group. The top of the Pakowki Formation is equivalent to the top of the Lea Park Formation in central Alberta (Williams and Dyer 1930; Meijer-Drees and Mhyr 1981; Dawson et al. 1994). The Pakowki/Claggett Formation effectively constitutes a regional aquitard (Fig. 5.6); the hydraulic conductivity of the Pakowki/Claggett Formation is in the order of 10^{-11} m/s (Toth and Corbet 1986; Anna 2011).

Two Medicine Formation

The non-marine Two Medicine Formation of Late Cretaceous age outcrops in northwestern Montana. This unit consists of mudstones and sandstones and is about 600 m thick (Lorenz 1981). West of the Sweetgrass Arch, the Two Medicine Formation includes the equivalent upper

part of Eagle Formation (i.e. Deadhorse Coulee Member equivalent), the poorly recognizable Claggett Shale and the Judith River Formation (Pierce and Hunt 1937; Zimmerman 1967; Gill and Cobban 1973; Fig. 5.4). The Two Medicine Formation overlies the well-defined Virgelle Member. It is 152 m thick in the Cut Bank, Montana, area (Zimmerman 1967).

Belly River/Judith River

The Belly River Group (or equivalent Judith River Formation in Montana) outcrops in a large part of the study area (Fig. 5.5a). It represents the sequence of continental beds above the Pakowki Formation and below the Bearpaw Formation. The Belly River includes the Dinosaur Park Formation (upper part), the Oldman Formation (middle part) and Foremost Formation (lower part) (Eberth and Hamblin 1993; Hamblin 1997) . However, the upper part is only present in a limited part of the study area, covering of about 12 townships, near the Saskatchewan border (Hamblin 1997). Fig. 5.5a is adapted from the geological map from Okulitch (1996) in which the Dinosaur Park Formation is not represented.

The dark shale, sandstone and coal seams of the Foremost Formation are overlain by massive yellow and grey sandstone of the Oldman Formation and thick sandstones and siltstones of the Dinosaur Park Formation. The Belly River Group/Judith River Formation is 320 m thick at Lethbridge, and is less than 182 m in northern Montana (Williams and Dyer 1930; Pierce and Hunt 1937). The Belly River Group/Judith River Formation constitutes an aquifer with a hydraulic conductivity ranging from 9×10^{-8} m/s to 8.8×10^{-7} m/s (Anna 2011).

Bearpaw Formation

The Bearpaw Formation overlies the Belly River Group/Judith River Formation (or the Two Medicine Formation, west of the Sweetgrass Arch in Montana) and is made up of dark grey shale (Russell 1970). These marine strata were deposited during a subsequent Late Cretaceous transgression episode and are lithologically similar to the Pakowki Formation. In the western part of the study area, the Bearpaw Formation outcrops along a narrow north-south band, and around the Cypress Hills in south-eastern Alberta. The Bearpaw Formation is about 70 m thick in the north-western part of the study area and constitutes a regional aquitard (Tokarsky 1974) (Fig. 5.6).

5.5 Available data and Methods

Data collection

Geological data from five sources were gathered. In Alberta, the first source of geological data was from O'Connell (2014). Of the 2170 total borehole data, only the non-deviated wells were selected to develop the 3D geological model (2070 borehole data). These data from non-deviated wells contain the depth of the tops of the Alderson Member and the geological formations included in the Milk River Formation: Deadhorse Coulee Member, Virgelle Member and Telegraph Creek Member. The extent of the data is from 49° to 50.3° north latitude and from longitude -110° to -113°. Amongst the data provided by O'Connell (2014), there is an area of about 14 townships close to the border with no subsurface data for the Milk River Formation. This area is the structural crest of the Sweetgrass Arch, in which the Milk River Formation is too shallow to be covered by geophysical logs from hydrocarbon exploration boreholes.

The geological data of the units above the Milk River Formation were obtained from the Alberta Geological Survey/Alberta Energy Regulator. The elevations of the tops of Lea Park Formation (Milk River and Pakowki Formations equivalents) (unpublished data), Belly River Group (Glombick 2010) and the bedrock topography (Atkinson and Lyster 2010) in southern Alberta were added to the model.

In Montana, three sources of geological data were used: Feltis et al. (1981), described the elevation of the tops of each geological formation in north central Montana, from Jurassic to Quaternary. The geological formations in the Colorado Group to the Judith River Formation were selected. The 190 resulting wells range from 48.2° to 49° north latitude and from longitude -109.6° to -112.5°.

The second source of geological information consists of well logs of the area, provided by the Montana Geological Society (Montana Geological Society 2013). 103 scanned logs (mostly from the 1950's) located in Glacier, Toole, Liberty and Hill Counties were selected. They were digitized and converted into elevation format to be integrated to the data set. These logs contain the description of all the members that compose the Eagle Sandstone.

About 10 control wells with altitude of the top of Judith River Aquifer in northern Montana were retrieved from a map produced by Noble et al. (1982). This map was scanned, georeferenced and converted from feet into meters.

The top of the geological model is ground level, represented by a Digital Elevation Model (DEM) of the study area. The DEM in Alberta is from the National Topographic Data Base (NTDB) and the DEM of northern Montana is from USGS Earth Explorer. They are both at 1:50 000 scale (or 1 arc second).

The last source of data used in this study consisted of hydrogeological cross sections of the study area from Borneuf (1974), Tokarsky (1974) and a transboundary map of the bedrock geology from Okulitch et al. (1996).

These various geological data required several steps of conversion and transformation in order to use them consistently in the building of the 3D geological model.

5.6 Method: Data processing and unification of the geological data

The geological data collected for this regional and transboundary study presented various formats and several spatial and stratigraphic references. Data processing was needed to obtain a consistent file containing the coordinates of a well and the associated elevations of each geological formation.

The main steps of data processing were: the conversion from feet to meters and from spatial reference NAD 27 to NAD 83, the transition from Township/Range system to latitude/longitude coordinates and the transition from depth to elevation data (the reference is the mean sea level). Additionally, the two available DEM files were merged to obtain a unique DEM covering the study area.

The various sets of geological data on both sides of the border are now homogeneous (same format, same spatial reference and same units). The next stage was to unify these data, since the main goal of the 3D geological model is to represent the geology of the study area in a unified way. Thus the geological data corresponding to equivalent layers in Alberta and Montana needed to be merged. In particular, specific work on the equivalent members of the Milk River Formation was needed to represent the Milk River Aquifer (i.e. Virgelle Member) in its entirety.

The collected data did not always present the same degree of information everywhere in the study area. In order to assemble the data sets for each geological unit, some working hypotheses had to be made following the 4 zones of the study area (Fig. 5.5a and Fig. 5.6).

O'Connell (2014) described every member of the Milk River Formation in Alberta (i.e. Telegraph Creek, Virgelle and Deadhorse Coulee Members in zone 1 and the Alderson Member in zone 2). Feltis et al. (1981) only represented the "Eagle Sandstone" which is the Milk River Formation equivalent in northern Montana (zones 3 and 4). The constituting members of the Eagle Sandstone are not described individually. Considering these two sources of data, the degree of geological information on the Milk River Formation is higher in Alberta than in Montana. Yet, we want to represent the 3 members of the Milk River Formation in the entire study area. Consequently, the "Eagle Sandstone" layer from Feltis et al. (1981) was subdivided in 3 parts, using the detailed logs from the Montana Geological Society (2013). In zone 3, the constitutive members of the Two Medicine Formation were also described individually on the basis of the detailed logs from the Montana Geological Society (2013).

Some of the wells from Feltis et al. (1981) were also part of the set of scanned logs from the Montana Geological Society (2013). The comparison of these wells clearly showed that what Feltis et al. (1981) called "Eagle Sandstone" actually included Telegraph Creek and Virgelle Members west of the Sweetgrass Arch (zone 3). East of the Sweetgrass Arch (zone 4), the comparison of the logs shows that an upper part (30 to 35 m thick) overlying the Virgelle Member was also included in the "Eagle Sandstone" layer. This upper part would equate to the "middle member" of Eagle, as defined by Payenberg et al. (2002), i.e. the Deadhorse Coulee member equivalent in Alberta.

Based on these observations, it was assumed that east of the Sweetgrass Arch (zone 4), the top of the Eagle Sandstone described by Feltis et al. (1981) corresponds to the top of the Deadhorse Coulee Member whereas, west of the Sweetgrass Arch (zone 3), it corresponds to the top of the Virgelle Member.

West of the Sweetgrass Arch, the upper part of Eagle is included within the Two Medicine Formation and is not described. Therefore the question of how much of the lower part of the Two Medicine Formation is actually equivalent to the Deadhorse Coulee Member was raised. Reexamination of detailed boreholes from the Montana Geological Society (2013) west of the Sweetgrass Arch allowed the identification of the transgressive chert pebble lag surface, which represents the top of the Deadhorse Coulee. Too few descriptions delineated the chert pebbles marker bed, so eventually it was decided to designate the lower 75 m of the Two Medicine Formation as the Deadhorse Coulee equivalent. This value was based on the Lexicon definition of the Two Medicine Formation (WEBLEX Canada 2013), which mentions coarse sandstone beds in the lower 75 m interpreted to represent the fluvial channel sandstones of the Deadhorse

Coulee. Rice and Cobban (1977) supported this value, citing Cobban (1955): “the sandstone is mainly in the basal 76 m, which is more or less equivalent to the middle and upper members of the Eagle Sandstone”. A dummy data point set representing the top of the Deadhorse Coulee west of the Sweetgrass arch was therefore added. Close to the international border, the thickness of the Deadhorse Coulee Member was reduced at 60 m to be consistent with the data of O’Connell (2014) in southern Alberta.

The geological layers overlying the Eagle Sandstone in Montana (Claggett Shale and Judith River Formation) are only described east of the Sweetgrass Arch by Feltis et al. (1981) and the Montana Geological Society (2013). West of the Sweetgrass Arch, both of these geological layers are included in the Two Medicine Formation, which is not represented in the report of Feltis et al. (1981), but is well described within the logs from the Montana Geological Society (2013). The Two Medicine Formation is equivalent to the upper part of Eagle, Claggett Shale and Judith River Formation (Zimmerman 1967). Thus, the top of the Two Medicine Formation was identified as the top of the Judith River Formation in zone 3.

The top of the Pakowki Formation was assimilated into the top of Lea Park Formation in Alberta (Williams and Dyer 1930; Meijer-Drees and Mhyr 1981; Dawson et al. 1994; Fig. 5.4). In northern Montana, the Claggett Shale is well described within the Montana Geological Society (2013) well logs and some of the wells of Feltis et al. (1981). However, there are no data describing the Claggett Shale west of Sweetgrass Arch since the marine invasion during which the Claggett/Pakowki was deposited did not extend far beyond the Arch. The Claggett Shale wedges out west of the Sweetgrass Arch, and where it pinches out, the Judith River (Belly River) strata rest on the Deadhorse Coulee Member equivalent.

It is assumed that the top of the Belly River Group in southern Alberta (i.e. top of Oldman Formation or Dinosaur Park Formation, where present) is the stratigraphic equivalent to the top of the Judith River Formation in Montana (Russell 1970). The constitutive layers of the Belly River in Alberta are not represented in the model since the contact between the Oldman and Foremost Formations is difficult to identify (Williams and Dyer 1930).

In Alberta, the top of the Colorado Group was considered to be the bottom of the Telegraph Creek Formation in zone 1, and the bottom of the Alderson Member in zone 2.

As mentioned previously, because of the lack of well logs in the southern Alberta outcrop area, the data in O’Connell (2014) was supplemented by creating a file describing the bedrock topography. The bedrock topography file was built by subtracting the thickness of surficial

sediments from the topography of the study area; it was then assumed that the top of the bedrock corresponds to the top of the Deadhorse Coulee Formation where Deadhorse Coulee outcrops. The same assumption was made for the Pakowki and Belly River outcrop areas, following the geological map of Okulitch et al. (1996). Some manual editing was required to represent these outcrop areas with more details. For that purpose, the bedrock geological map (Okulitch et al. 1996) was superimposed on the model as a reference.

The regional unconformity between the Milk River Formation and the Alderson Member is also represented in the 3D model. In the north, northeast and east of the study area, the Telegraph Creek, Virgelle and Deadhorse Coulee members are progressively overlapped by the Alderson Member. An overlapping area is represented, based on the isopach maps of O'Connell (2014). The two sand bodies which make up the upper part of the Alderson Member (Upper Alderson Sands, Fig. 5.2) are not represented separately but they are included in the Alderson Member.

Due to a lack of data, the geology of the igneous intrusives of the Sweet Grass Hills is not represented and is assimilated to the Colorado Group.

Finally, it was decided that the Bearpaw Formation and the surficial sediments would be grouped in one layer in the geological model, between the top of the Belly River/Judith River and the ground level. With the geological data on both sides of the border harmonized and the stratigraphy unified, the 3D geological model could be built.

5.7 Construction of the 3D unified geological model

The software chosen to build the 3D geological model is Leapfrog Hydro[®] (Leapfrog Hydro 2013). The approach to build the 3D geological model was to use location data (x, y, z) representing the top of the geological units. Contact surfaces were first created from these data. Then, volumes were obtained from the surfaces for which a chronology had been first determined. Leapfrog Hydro is a recent software and it was chosen mostly for its interoperability with FEFLOW (Finite Element subsurface Flow) (Diersch 2014). The 3D geological unified model will form the basis of a 3D numerical hydrogeological model of the Milk River Aquifer using FEFLOW.

An initial geological model was built as a reference and for the purpose of comparison before and after unification of the geological datasets from both sides of the international boundary. The reference model contains the data from O'Connell (2014) and Feltis et al. (1981) before the

harmonization of the geological units. A south-north transboundary cross-section A-A' from this reference model is shown in Fig. 5.7. This section shows that the level of information was higher in southern Alberta (where Telegraph Creek, Virgelle and Deadhorse Coulee Members were represented) than in northern Montana (where the Eagle Sandstone was solely represented). The two datasets are simply placed alongside in this reference model, so the geological layers are obviously abruptly separated at the international border. The same cross-section A-A' will be shown as unified in the Results section below (Fig. 5.9b).

Cross-section A-A' (before unification)

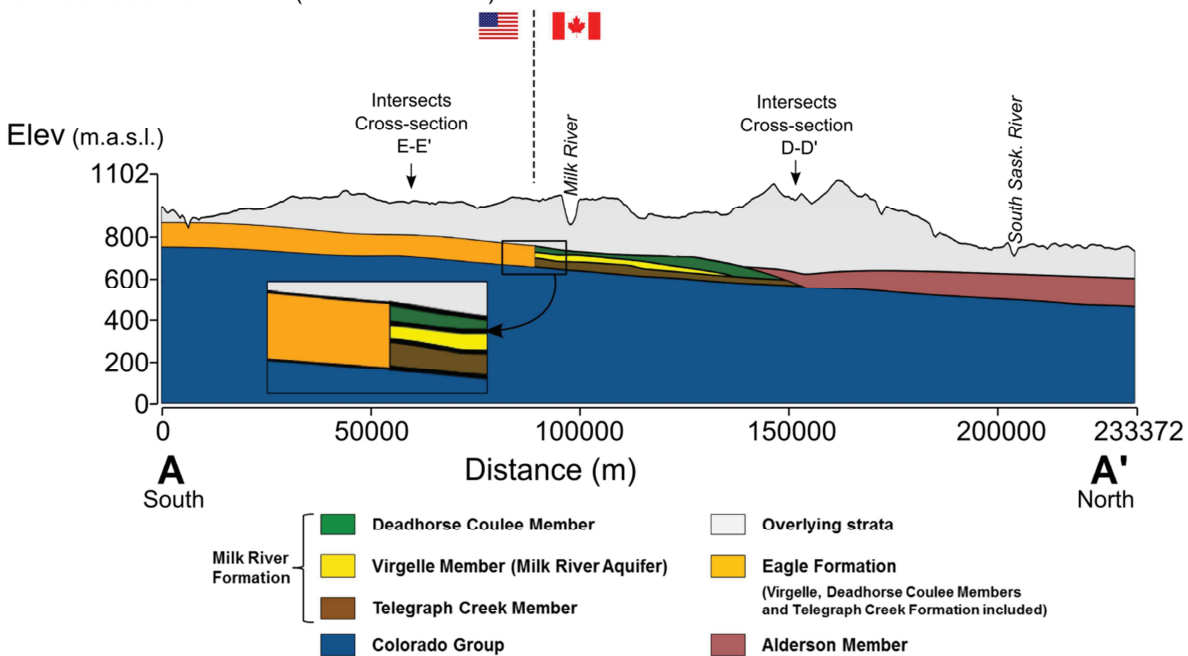


Figure 5.7 Transboundary cross-section (south-north) before the unification of the Milk River/Eagle Formation. The geological units above the Milk River/Eagle Formation are not represented in this section. The location of the cross-section is shown in Fig. 5.9a.

In a subsequent geological model, the integration of detailed logs from Montana Geological Society (2013) and the formulation of working hypothesis on the equivalent layers (described above) allowed the building of the unified 3D geological model of the study area and the separation of the Eagle Formation into three members. The datasets in the 4 zones of the study area (Fig. 5.5a; Fig. 5.6) were finally merged to represent each geological unit.

Furthermore, the model was adjusted with the help of cross-sections existing for the study area. About 15 cross-sections (Borneuf 1974; Tokarsky 1974) in Alberta were georeferenced and included in the geological model. The cross sections serve as a guide and allow adjustments of the geological surfaces by manual editing within Leapfrog Hydro® (Fig. 5.8)

The construction of a sloping surface was needed to represent the regional unconformity between the Milk River Formation and the Alderson Member. This surface was built by selecting points from the Alderson Member dataset, which make up a plateau overlapping Virgelle and Deadhorse Coulee Member.

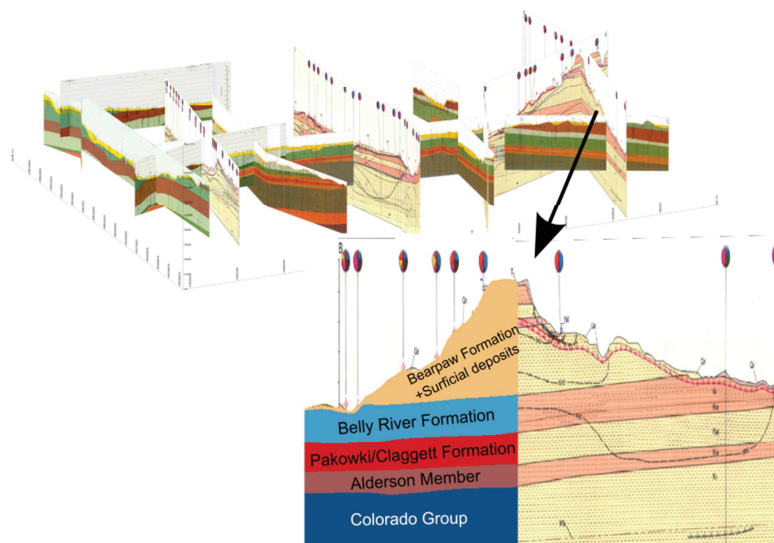
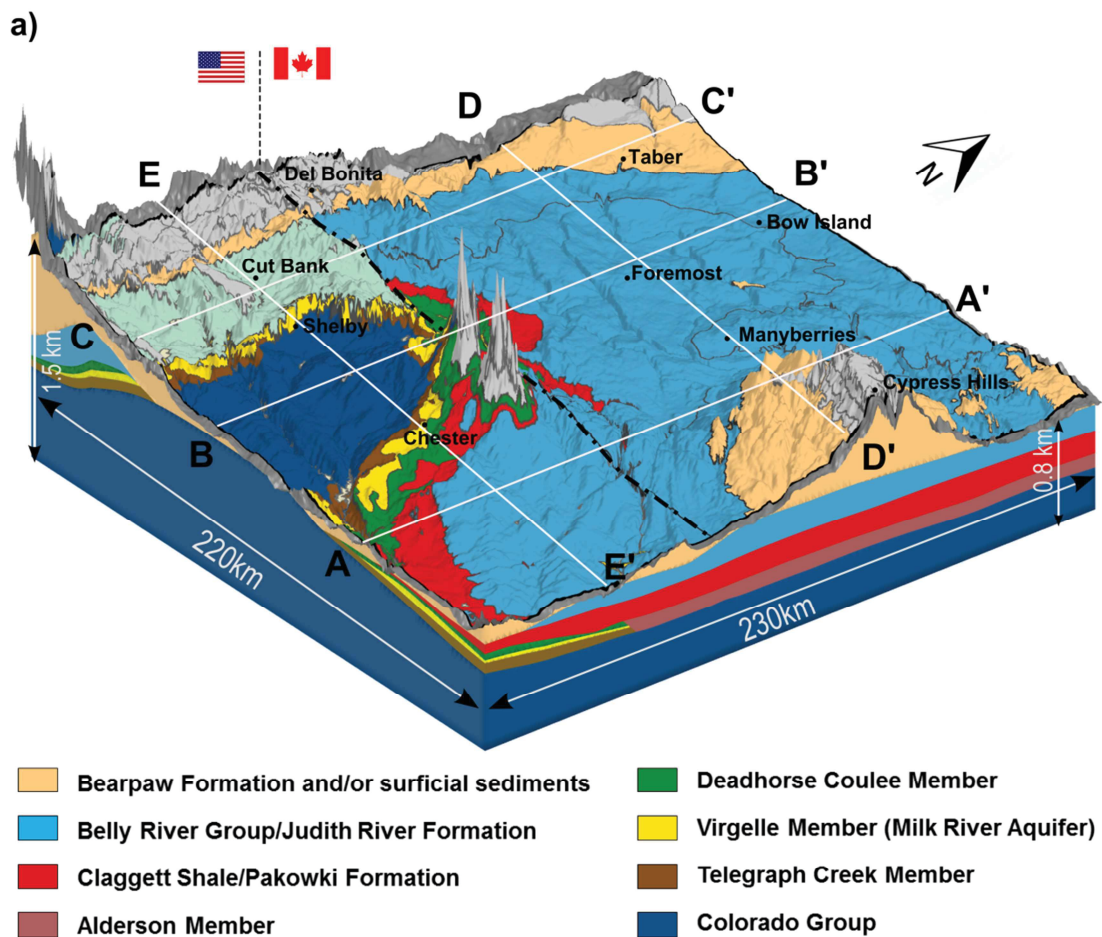


Figure 5.8. Examples of geo-referenced cross-sections included in the 3D geological model.

5.8 Results

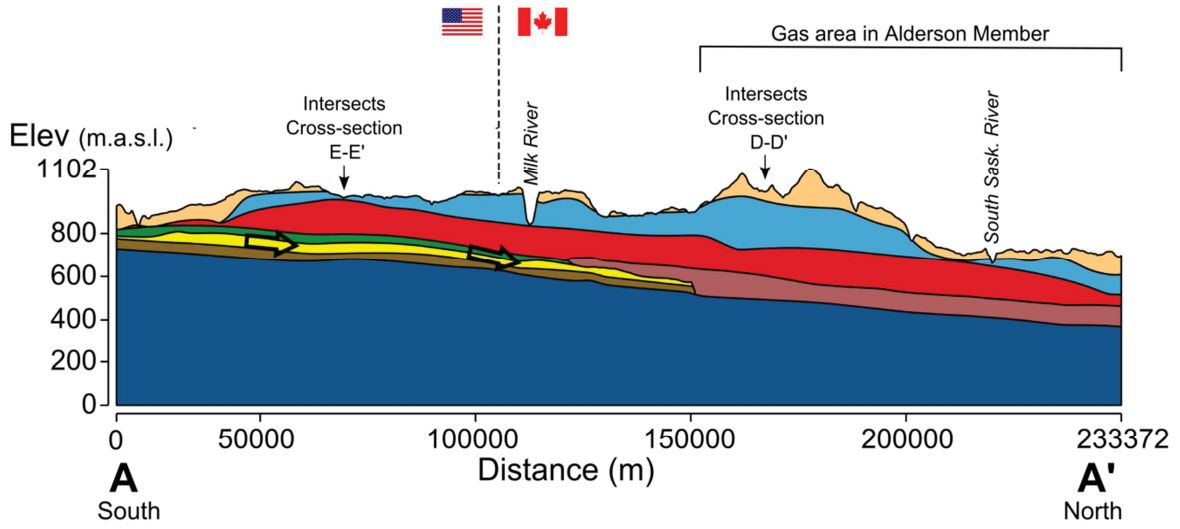
The unified 3D geological model covers 50 000 km². The geological units represented in the model are (in ascending order): Colorado Group, Telegraph Creek Member, Virgelle Member, Deadhorse Coulee Member, Alderson Member, Claggett Shale/Pakowki Formation, Belly River Group/Judith River Formation, Bearpaw Formation and surficial sediments (undivided) (Fig. 5.9). The locations of sections through the geological model are shown on Fig. 9a and these sections are illustrated in Fig. 5.9b. The general groundwater flow direction is indicated on the cross-sections, based on previous work (Meyboom 1960; Zimmerman 1967; Levings 1982; Tuck 1993; AGRA Earth and Environmental 1998). The area in which the Alderson Member is no longer

water-bearing but gas-bearing is indicated on the cross-sections A-A', B-B' and D-D'. The bedrock geological map is superimposed on the model (Fig. 5.9a). Note that the Two Medicine Formation is shown on the geological map; however the 3D model details all the constitutive members of this formation, especially as shown on cross-section E-E'.

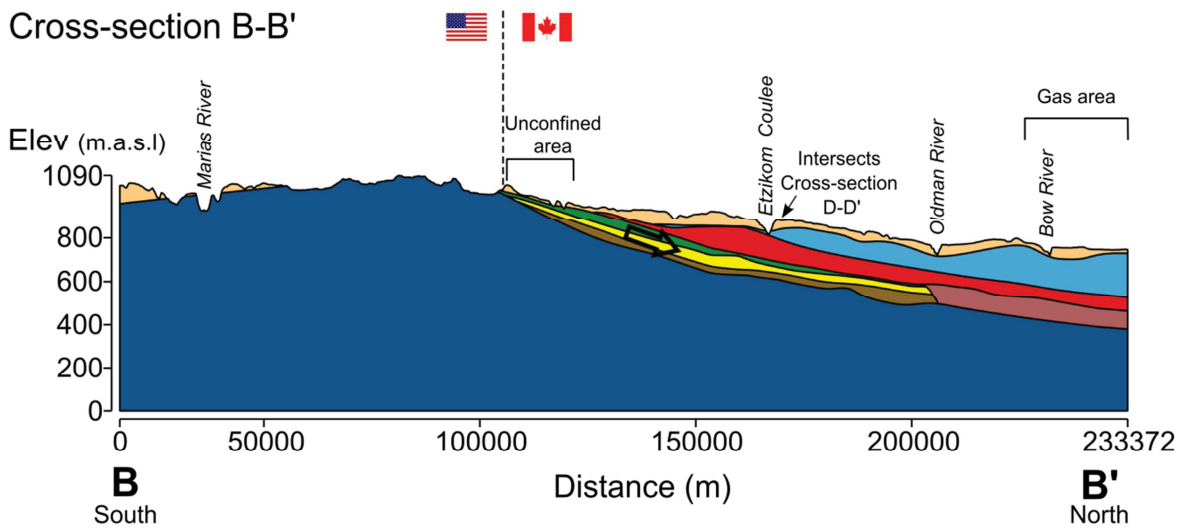


b)

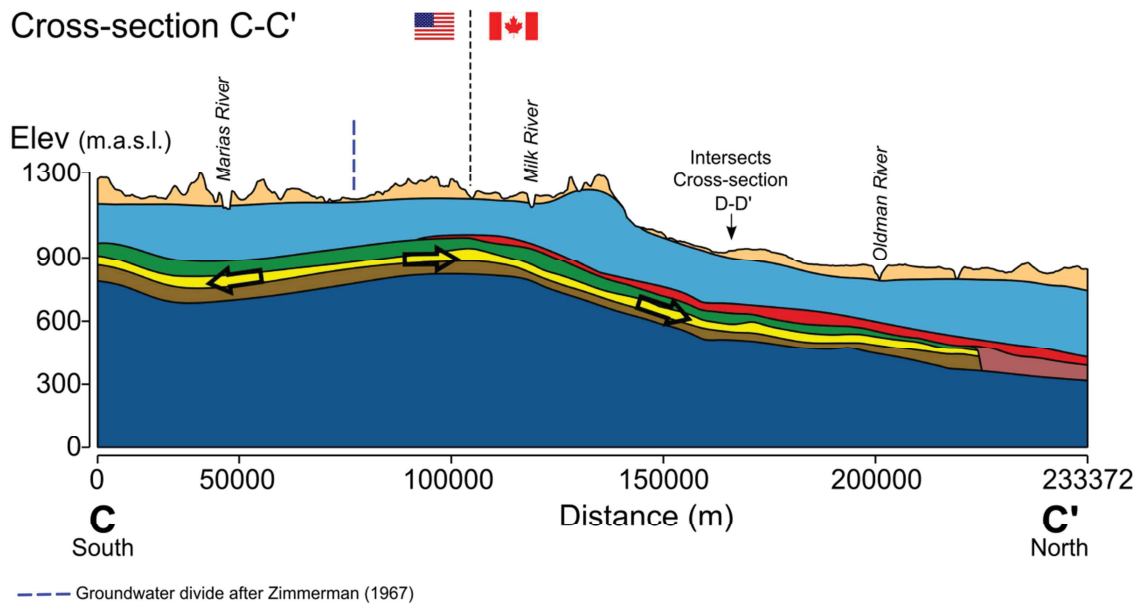
Cross-section A-A' (after unification)



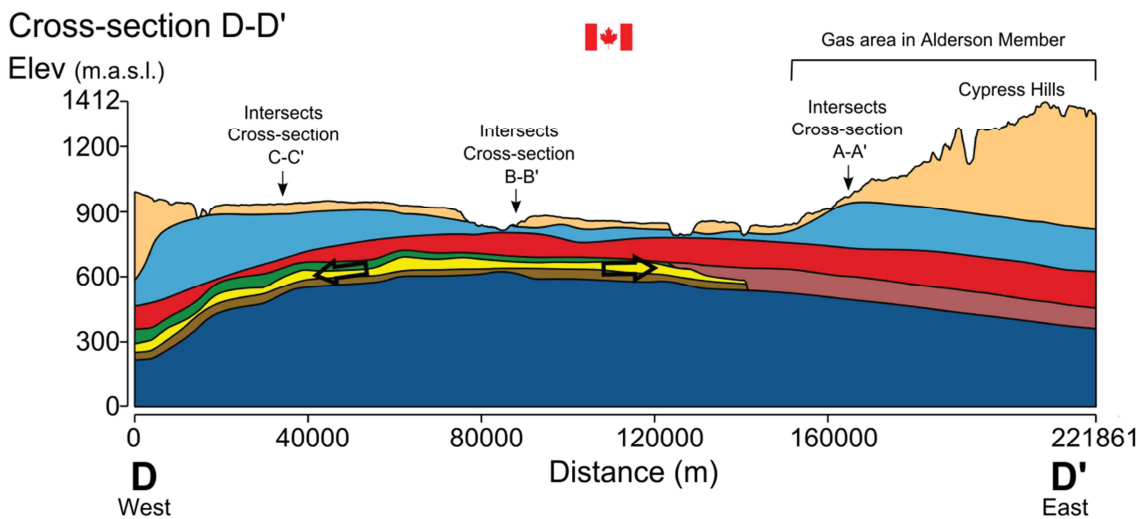
Cross-section B-B'



Cross-section C-C'



Cross-section D-D'



Cross-section E-E'

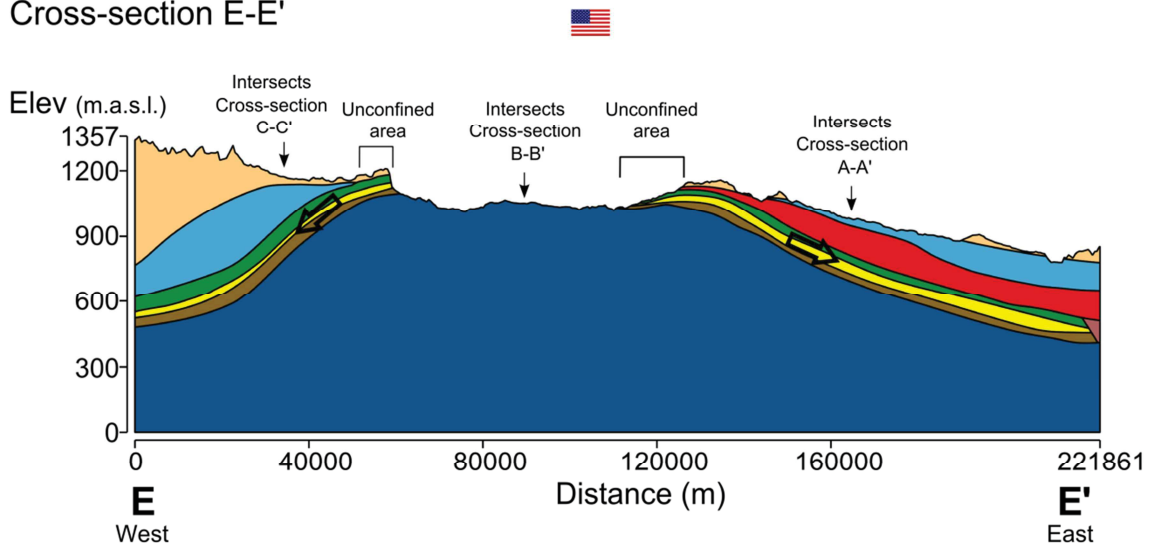


Figure 5.9 3D unified geological model of the Milk River Aquifer and other geological units. a) 3D unified block showing the locations of cross-sections. Vertical exaggeration factor is 50. Cross-sections A-A', B-B' and C-C' are transboundary, cross-section D-D' is located in southern Alberta and cross-section E-E' is located in northern Montana. b) Cross-sections through the 3D geological model. The black arrows represent the general groundwater flow directions. Legend for block diagram (Fig. 5.9a) and cross-sections (Fig. 5.9b).

Cross section A-A' shows that the Milk River Formation is represented on both sides of the border with the same degree of information in the unified model (Fig. 5.9b). The three members composing the Milk River Formation, especially the Milk River Aquifer (i.e. Virgelle Member), are continuously represented from southern Alberta to north-central Montana. In Montana, the Eagle Formation was divided in three members on the basis of detailed well logs and the working hypothesis described previously. The Milk River Formation dips continuously from northern Montana to southern Alberta. It does not subcrop in this section. The regional unconformity between the traditional 3 members of the Milk River Formation and the Alderson Member is represented as an area of overlap. Groundwater flow is directed to the north, from northern Montana to Alberta. The overlapping area of the Alderson Member corresponds to the Upper Alderson Sands. This part is still water-bearing. However, farther north, the Alderson Member is gas-bearing.

Cross-section B-B' (Fig. 5.9b) shows a steeper slope of the Milk River Formation from the international border to the north. The Colorado Group outcrops in northern Montana. A

subcrop/outcrop area of the Milk River Formation at the border indicates unconfined conditions of the aquifer corresponding to a recharge area.

West of the Sweetgrass Arch, cross-section C-C' (Fig. 5.9b) shows that the Claggett(Pakowki) Formation pinches out in northwestern Montana. In Alberta, the Milk River Formation is overlain by the Pakowki (Claggett) Formation and the thick Belly River Group (Judith River Formation), whereas in Montana the Judith River Formation directly overlies the Milk River Formation equivalents. The Milk River Aquifer is confined and the general groundwater flow is from south to north, except in the vicinity of Cut Bank (Fig. 5a) where it is directed to the south.

Cross-section D-D' (Fig. 5.9b) is located in Alberta; it shows the gentle antiformal geometry of the Milk River strata dipping eastward and westward as well as the overlap of the Alderson Member to the east. The Milk River Formation is overlain by 20 to 160 m of Pakowki(Claggett) Formation and 20 to 200 m of Belly River Group (Judith River Formation). Groundwater flows to the north (perpendicular to the cross-section plan), as well as to the east and west following the aquifer elevation.

Cross-section E-E' (Fig. 5.9b) is located in northern Montana in the vicinity of the Sweetgrass Arch axis. The large outcrop of the Colorado Group is represented. The Milk River Formation equivalents dip to the east and to the west on both sides of the Sweetgrass Arch. The Claggett (Pakowki) Formation is not present west of the Sweetgrass Arch, but it overlies the Eagle Formation in the east. There are two subcrop areas of the Milk River Formation equivalents which correspond to the east and west outcrop bands described above in the bedrock geological map (Fig. 5.5a) and the Geological Section. Therefore, the Milk River Aquifer is under unconfined conditions in these areas that represent recharge zones. Groundwater flow is directed to the south (perpendicular to the cross-section plan), as well as west and east from the subcrop areas.

The illustration of the 3D unified geological model is complemented by several elevation and isopach maps of some of the key geological units (Fig. 5.10).These maps are derived from the 3D geological model which comes from the various sources previously described in the "Data Collection" section. The elevation of the top of the Milk River Formation (including Telegraph Creek, Virgelle, Deadhorse Coulee and Alderson Members) is shown in Fig. 5.10a. The Milk River Formation dips to the north, east and west from the outcrop area near the international border following a semi-radial pattern. This pattern is continuous through the international border as the Milk River formation dips to the east, south-east and north from the Sweetgrass Hills and to the west, in the area west of the Sweetgrass Arch. The top of the Milk River Formation

reaches about 1100 m at the border and decreases to 500 m in the northern part of the study area, about 130 km north of the border. Therefore, the average slope is around 4.7 m/km. In Montana, the dip of the Milk River Formation equivalents is more pronounced; the top of the formation attains 1100 m around the Sweetgrass Hills and drops to 550 m in the eastern part of the study area, the average slope is therefore 9 m/km. West of the Sweetgrass Arch, the top of the Milk River Formation equivalents drops from 1150 m to 600 m in less than 50 km, so the mean slope is around 13 m/km. The thickness of the Milk River Formation ranges from 0 to 140 m in Alberta and from 0 to 200 m in Montana. In the subcrop areas, the formation is 0 to 60 m thick.

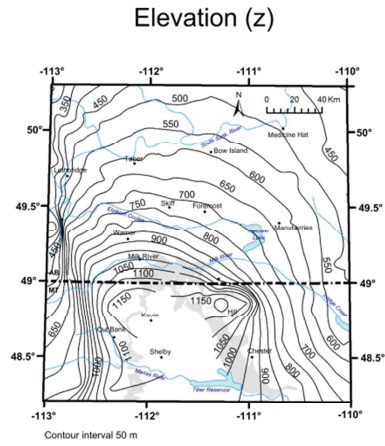
The elevation of the Virgelle Member top is shown in Fig. 5.10b. As the middle member of the Milk River Formation, it follows the same dipping configuration. The unit thickness ranges between 0 to 60 m in the study area. The Virgelle Member thins towards the deposition limit, which extends from the northwest corner of the study area to the east, near the international border. The extent of the Alderson and Virgelle Members (Fig. 5.10c) are mutually exclusive except for an overlapping area in the vicinity of the deposition limit of Virgelle where the Alderson Member is 0 to 15 m thick. The Alderson Member thickens to the north and east and reaches a thickness of 95 m in the northeast corner of the study area.

The Milk River Formation is confined by the overlying Pakowki/Claggett Formation which follows the general semi-radial dip of the Milk River Formation (Fig. 5.10d). The elevation of the top of the Pakowki/Claggett Formation is about 900 m north of the subcrop area of the Milk River Formation. It reaches an elevation of 550 m approximately 120 km farther north. The thickness of this unit ranges from 0 to 160 m; the unit thins from east to west.

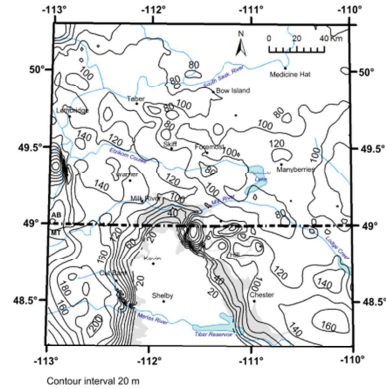
The Claggett Shale is not present west of the Sweetgrass arch; it might not be present in the south-west area close to the border in Alberta. Due to the lack of data in the area where Claggett wedges out, the contours are approximate.

Figure 5.10. Unified elevation contours of the top of several geological units (left) and isopach maps (right). The elevation reference is the mean sea level and the thickness is in meters. These maps are derived from the 3D geological model which comes from the various sources previously described in the “Data Collection” section. a) Elevation and thickness of the Milk River Formation (including Telegraph Creek, Virgelle, Deadhorse Coulee and Alderson Members). b) Elevation and thickness of the Virgelle Member. c) Elevation and thickness of the Alderson Member. d) Elevation and thickness of the Pakowki/Claggett Formation.

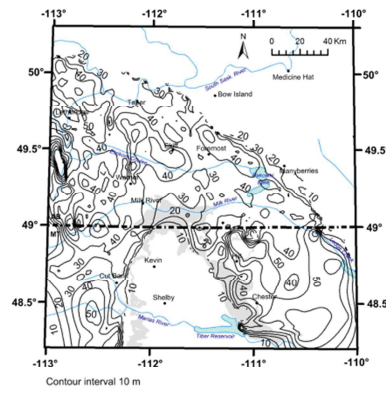
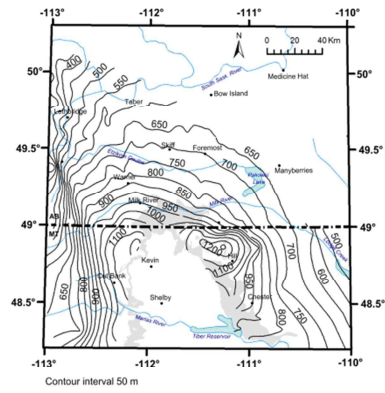
a) Milk River Formation and Montana equivalents



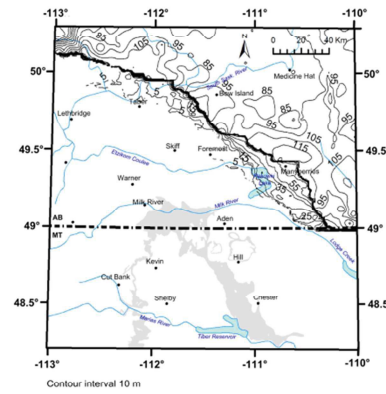
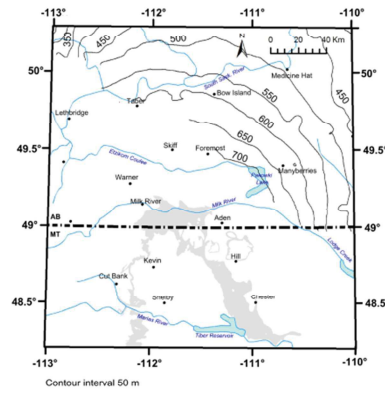
Thickness (e)



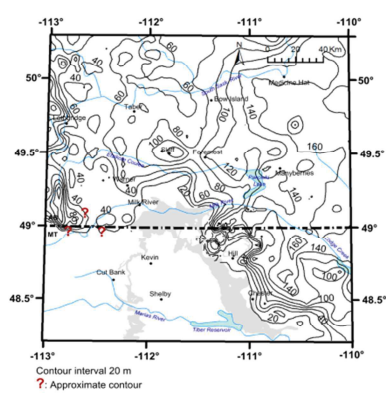
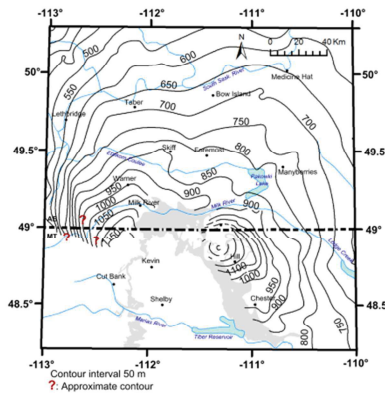
b) Virgelle Member



c) Alderson Member



d) Pakowki/Claggett Formation



5.9 Discussion

Changes and confirmations in the geological context

The cross-sections (Fig. 5.9) and the elevation and isopach maps (Fig. 5.10) corroborate previous studies of the Milk River Aquifer. In particular, the semi-radial pattern of the elevation of the Milk River Formation top shown in Fig. 5.10a is in agreement with Meyboom (1960) and others in southern Alberta. Besides, the unified 3D geological model completes this observation by showing that the semi-radial pattern continues into northern Montana.

The 3D geological model represents the subcrop areas of the Milk River Formation near the Sweetgrass Hills and near the international border, which are also traditionally well-documented. However, the model also indicates two additional subcrop areas on both sides of the Sweetgrass Arch in Montana.

This study represents the Alderson Member distinctly from the other three members of the Milk River Formation, separated by a regional unconformity. Previously, the interpreted gradual facies change of the Milk River Formation was only conceptually represented but it was not included in a 3D geological model.

Furthermore, the 3D unified geological model includes the area west of the Sweetgrass Arch in Montana (zone 3). This area was little documented in previous Milk River Aquifer studies. Yet, this is an important area since it hosts the southwestern part of the Milk River Aquifer. Thus, consideration of this zone allows a complete geological representation of the aquifer. The originality of the present work also lies in the representation of the three members of the Milk River Formation continuously across the international border (especially the middle Virgelle Member which is the Milk River Aquifer), as well as the overlying and underlying strata. The 3D geological model thus represents the natural limits of the Milk River Aquifer, not influenced by jurisdictional boundaries.

Hydrogeological implications of the geological model

The elevation contour maps and cross-sections provide a better appreciation of the confined conditions of the aquifer. The Milk River Formation dips to the north from the outcrop areas in the Sweetgrass Hills and near the border in southern Alberta (zones 1 and 2). It dips to the south and east in zone 3 and to the south and west in zone 4. The Milk River Aquifer is therefore confined throughout most of the study area by the overlying Pakowki/Claggett Formations. The recharge areas of the Milk River aquifer have been traditionally identified as the outcrop areas near the border in southern Alberta and around the Sweetgrass Hills in Montana. However, the Milk River Formation and most importantly the Virgelle Member, subcrop also along both sides of the Sweetgrass Arch in Montana (Fig. 5.4a; Fig. 5.9a), which could also represent recharge areas.

The Milk River Aquifer is limited to the north, north-east, and east by the erosional unconformity surface which is overlapped by its lateral equivalent the Alderson Member. Since Alderson Member is included in the Milk River Formation (O'Connell 2014; Payenberg et al. 2003) and its upper part (Upper Alderson Sand) is water-bearing, it has been included in the delineation of the Milk River Aquifer in Southern Alberta by Printz (2004). However, Printz (2004) did not mention the presence of the Alderson Member, unconformably incised into the older members of the Milk River Formation. O'Connell (2014) considered that the Milk River Aquifer consists of two regional sand units within the Milk River Formation: the Virgelle Sand and the Upper Alderson Sands. However, Alderson Member is much younger than the three other members of the Milk River Formation (Payenberg et al. 2002). In addition, unlike the Virgelle Member which is transboundary and continuous through the international border, the Alderson member is not present in Montana where its chronostratigraphic equivalent is located south of the study area (Payenberg et al. 2003). These differences lead us to consider the Alderson Member as distinct from the other members of the Milk River Formation. Thus, the present study limits the Milk River transboundary aquifer to the transboundary Virgelle Member only.

The Milk River Aquifer is limited by the Medicine Hat (Milk River) gas field hosted by the Alderson Member, north, north-east and east of the study area in Alberta. The Tiger Ridge gas field located near the city of Havre (near the Bears Paw Mountains in Montana) represents the south-eastern boundary of the aquifer. In Alberta, the Alderson Member represented in the 3D model, overlaps the lower members of the Milk River Formation. There is no equivalent relationship for the Eagle Formation which hosts the Bearpaw gas field in Montana. For the purpose of the 3D geological model, the Marias River is used as the southern limit of the Aquifer

in Montana. Although the Milk River/Eagle Formation extends farther south in Montana, the Marias River physiographic limit has been chosen with respect to the future hydrogeological model and considering the available data. The western limit of the aquifer corresponds to the westernmost area in which water wells have been completed in the Virgelle Member. However, the 3D geological model shows that Virgelle Member exists farther west around the longitude - 113° (Fig. 5.2). No water well is completed in this unit beyond the proposed limit because the aquifer is too deep (Stantec 2002). Thus, the western limit of the aquifer was based on the extent of Virgelle Member water wells.

This work provides a comprehensive geological framework supporting the development of a conceptual model of the Milk River Aquifer. However, other components of the conceptual model still need to be assessed (groundwater-surface water interaction, discharge areas, quantification of transboundary fluxes, geochemistry, etc). Further work will address these components through the development of a unified hydrogeological numerical model of the aquifer.

Model limitations

The amount of available data in Alberta is much higher than in Montana. In order to improve the quality of the 3D geological model, collecting more well log descriptions within northern Montana would be necessary. Regarding the overall resolution of the regional model, the density of geological data is less than 1 datum per km². According to the classification of geological models of Culshaw (2005), the geological model would thus be of the “Overview” type.

Simplifications were made concerning the Pakowki/Claggett volume in zone 4. Previous studies described that the transgressive strata did not reach the 112th meridian or wedges out in the vicinity of Cut Bank (Stebinger 1917a; Russell 1970). The volume was not represented west of the Sweetgrass Arch. A rough slimming of the volume was manually edited from the outcrop area of Pakowki in southern Alberta in zone 1 towards the south in zone 3, just north of the Virgelle outcrop. More geological data are needed in the northern part of zone 3 in order to represent the Pakowki equivalent and its disappearance in a more realistic way. Another simplification was made in considering that the interval between the top of the Belly River Group/Judith River Formation and land surface included the Bearpaw Formation (when present) and surficial sediments.

The effort for unification of the Milk River Formation across the international border implied identifying its 3 constitutive members in zones 3 and 4 in Montana, where these members had

not previously been defined. This could be done more easily in zone 4 than in zone 3 thanks to the correlation work of Payenberg et al. (2002). The Eagle Sandstone described by Feltis et al. (1981) included the basal Telegraph Creek, Virgelle Member and an upper part, just below the Claggett Shale, which was equated to the Deadhorse Coulee (or middle member of Eagle, following the nomenclature of Payenberg et al. 2002). The upper member of Eagle described in Choteau and Fergus Counties, Montana, does not exist in the study area, according to its depositional area map (Payenberg et al. 2003).

In zone 3, the absence of the Claggett/Pakowki Formation makes the unification work more complex. The Telegraph Creek and Virgelle Members were positively described in well logs. However, the overlying layers were included in the Two Medicine Formation. Given the lack of data in that zone, it was decided to consider the lower 75 m of the Two Medicine Formation as the Deadhorse Coulee equivalent in zone 3, following the description of the Lexicon (WEBLEX Canada 2013). However, isopach maps from O'Connell (2014) indicated that the thickness of the Deadhorse Coulee was about 60 m at the border. The thickness of the dummy Deadhorse Coulee in zone 3 was thus reduced to 60 m close to the border (about 10 km north of the border) to be consistent and continuous with O'Connell's data (2014). The default thickness of 75 m was applied in the remaining area of the geological model. This default value is approximate and might not reflect reality in all of zone 3. However this is considered as an acceptable hypothesis in this regional geological framework study.

The integration of georeferenced cross-sections in the geological model was valuable. It allows verification of how representative the collected geological data were, and the manual editing of geological surfaces based on georeferenced cross-sections compensates for the lack of data encountered in some places (Fig. 5.8). This technique was particularly useful for the Claggett/Pakowki and Belly River/Judith River surfaces. Cross-sections also show that the hypothesis of equating the tops of Belly River, Pakowki or Deadhorse Coulee to the bedrock topography, where these formations outcropped, was valid. However, there is no cross-section included in the model on the USA side. Cross-sections from the geological maps of the Sweetgrass Hills and Cutbank 30'x60' quadrangles (Lopez 2001; Berg 2002) did not show a sufficient vertical exaggeration. Thus, the quality of these cross-sections in northern Montana did not allow their use for the development of the 3D geological model.

The Upper Alderson Sands which form small lobate sand bodies was not represented in the model, due to the limitation of the modeling software. However, this unit will be represented in

the future hydrogeological FEFLOW model of the aquifer, with distinct hydrogeological properties from the Alderson Member.

Leapfrog Hydro[®] was chosen mostly for its interoperability with FEFLOW. When using data of various formats in Leapfrog Hydro[®], the geological model results in several geological models, each with a specific data format, that are assembled to make up the whole model. Yet, when exporting the model from Leapfrog Hydro[®] to FEFLOW, only one geological model can be selected for transfer into FEFLOW. This implies the use of data of the same format (locations file with X, Y, Z coordinates).

The area where the Alderson Member overlaps the lower members of the Milk River Formation was difficult to represent with Leapfrog Hydro because many operations and manual editing were necessary. Other software (such as Gocad) could have provided more flexibility for that particular task. The geological model is dynamic; new data or editing of surfaces could be added in an iterative model improvement process.

5.10 Conclusion and Perspectives

Geological data on both sides of the Canada/USA border were gathered and processed in order to build a unified three-dimensional geological model of the Milk River Aquifer.

The main contributions of this paper are:

- Our work allowed the unification of the stratigraphic framework of the Milk River Transboundary Aquifer on both sides of the Canada/USA border.
- There is a more rigorous delineation of the extent of the Milk River Transboundary Aquifer, and a better description of its characteristics (thickness, geometry) following its natural boundaries (not the jurisdictional boundaries).
- The 3D geological model provides a representation of the three members of the Milk River Formation (especially the Virgelle Member (Milk River Aquifer) and encasing units continuously through the border.
- The 3D geological model also provides a description of the geological boundaries of the Milk River Aquifer, imposed by the regional structure, the regional unconformity in southern Alberta, and the sealing effects of the adjacent gas fields.

-The 3D geological model also includes the representation of the gas-bearing Alderson Member and the regional unconformity surface which separates it from the lower members of the Milk River Formation.

-The implications of the geological model on the hydrogeological conditions of the aquifer have been highlighted. The hydrostratigraphic role (aquifer or aquitard) of each geological unit has been shown.

This 3D unified geological model is a major component of a unified conceptual hydrogeological model of the Milk River Aquifer. It will form the basis for the future development of a numerical model of the Milk River Aquifer. The next stage in this study will be to propose a unified hydrogeological conceptual model of the Milk River aquifer, including boundary conditions, groundwater flow systems, and groundwater quality. The final stage will be to transfer the geological model into FEFLOW that will be used to develop a numerical groundwater flow model. This transfer of the geological model will allow hydrogeological properties to be assigned to each geological layer.

5.11 Acknowledgments

This work was funded by the Groundwater Geoscience Program of the Geological Survey of Canada within *MiRTAP* (Milk River Transboundary Aquifer Project). Authors are thankful to the USGS office in Helena (Montana, USA) for the digitization of the USGS Feltis et al. (1981) report. We especially thank Joanna Thamke and the team of four who digitized and reviewed the Feltis et al. report so skillfully. We thank Luke Buckley from the Montana Bureau of Mines and Geology for converting the township/range location of the Feltis et al. report into latitude/longitude coordinates. Thanks are due to Dan Palombi from the Groundwater Section and the bedrock geologists of the Alberta Geological Survey (Alberta Energy Regulator) in Edmonton for providing access to their geological data through a data-sharing agreement with the Geological Survey of Canada. We also acknowledge Tony Hamblin (GSC-Calgary Division) for his help and useful discussion. This is an Earth Sciences Sector contribution number 20130500.

5.12 References

- AGRA Earth and Environmental 1998. Evaluation of depletion of the Milk River aquifer. AGRA Earth & Environmental, Edmonton
- Alberta Geological Survey (2015) Alberta Table of Formations; Alberta Energy Regulator. Available at: <http://ags.aer.ca/table-of-formation> [Accessed January 1, 2017]
- Alberta Innovates Technology Future 2010. Milk River Aquifer Hydrogeology Report. Internal Report for the Geological Survey of Canada, Quebec Division
- Anna, L.O. 2011. Effects of groundwater flow on the distribution of biogenic gas in parts of the northern Great Plains of Canada and United States. USGS Scientific Investigations Report: 2010-5251, 24p
- Atkinson, N., and Lyster, S. 2010. Bedrock Topography of Alberta, Canada. Energy Resources Conservation Board, ERCB/AGS Map, 550
- Berg, R.B. 2002. Geologic map of the Cut Bank 30' x 60' quadrangle. Montana Bureau of Mines and Geology: Open-File Report 454, 10 p., 1 sheet
- Borneuf, D.M. 1974. Hydrogeological map Foremost, Alberta: NTS mapsheets 72E, Alberta Research Council, Edmonton, Alberta
- Borneuf, D.M. 1976. Hydrogeology of the Foremost Area. Alberta, Alberta Research Council, Edmonton, Alberta
- Cobban, W.A. 1950. Telegraph Creek Formation of Sweetgrass Arch, North-Central Montana: GEOLOGICAL NOTES. AAPG Bulletin **34**:1899–1900
- Cobban ,W.A. 1955. Cretaceous rocks of northwestern Montana, in Billings Geol. Soc. Guidebook 6th Ann. Field Conf., Sweetgrass Arch-Disturbed Belt, Montana, p. 107-119
- Cobban, W.A., Erdmann, C.E., Lemke, R.W., and Maughan, E.K. 1976. Type sections and stratigraphy of the Blackleaf and Marias River Formations (Cretaceous) of the Sweetgrass Arch, Montana. USGS Professional Paper 974: 36–60
- Culshaw, M.G. 2005. From concept towards reality: developing the attributed 3D geological model of the shallow subsurface. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology **38**:231–284. doi: 10.1144/1470-9236/04-072

Diersch, H.-J.G. 2014. FEFLOW: finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media. Springer, 996 p

Dawson, F.M., Evans, C.G., Marsh, R., and Richardson, R. 1994. Uppermost cretaceous and tertiary strata of the western Canada sedimentary basin; in Geological Atlas of the Western Canada Sedimentary Basin, G.D. Mossop and I. Shetsen (comp.), Canadian Society of Petroleum Geologists and Alberta Research Council

Dowling, D.B. 1915. Water supply, southeastern Alberta. Summary Report 1915; Geological Survey of Canada, Summary Report (1915), 1916; p. 102-110

Dowling, D.B. 1917. Southern plains of Alberta. Geological Survey of Canada, "A" Series Map 187A, 1917; 1 sheet, doi:10.4095/106740

Dyer, W.S. and Williams, M.Y. 1930. Geology of southern Alberta and southwestern Saskatchewan. Memoir 163, Geological Survey of Canada

Eberth, D.A., and Hamblin, A.P. 1993. Tectonic, stratigraphic, and sedimentologic significance of a regional discontinuity in the upper Judith River Group (Belly River wedge) of southern Alberta, Saskatchewan, and northern Montana. *Can J Earth Sci* **30**:174–200. doi: 10.1139/e93-016

Evans, C. S. 1931. Milk River area and the Red Coulee Oil Field, Alberta. Geological Survey of Canada, Summary Report (1930), p. 1–30

Feltis, R.D., Lewis, B.D., Frasure, R.L., Rioux, R.P., Jauhola, C.A., and Hotchkiss, W.R. 1981. Selected geologic data from the Northern Great Plains area of Montana. USGS Open-File Report 81-415

Gautier, D., and Rice, D. 1982. Conventional and Low-Permeability Reservoirs of Shallow Gas in the Northern Great Plains. *Journal of Petroleum Technology*. doi: 10.2118/9846-PA

Gill, J.R., and Cobban, W.A. 1973. Stratigraphy and geologic history of the Montana group and equivalent rocks, Montana, Wyoming, and North and South Dakota. USGS Professional Paper 776, 25p

Glombick, P.M. 2010. Top of the Belly River Group in the Alberta Plains: Subsurface Stratigraphic Picks and Modelled Surface. Open file Report 2010-10. Energy Resources Conservation Board, ERCB/AGS

Government of Alberta, 2006. Water conservation and allocation guideline for oil field injection. Alberta Environment and Protection, Edmonton, Alberta. 64pp.

<http://aep.alberta.ca/water/education-guidelines/documents/Water-OilfieldInjectionGuideline-2006.pdf>

Hamblin, A.P. 1997. Regional Distribution and Dispersal of the Dinosaur Park Formation, Belly River Group, Surface and Subsurface of Southern Alberta. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* **45**:377–399

Hamblin, A.P., and Lee P.J. 1997. Uppermost Cretaceous, post-Colorado Group gas resources of the Western Canada Sedimentary Basin, Interior Plains. Geological Survey of Canada. Bulletin 518.

Hendry, M.J., and Schwartz, F.W. 1988. An alternative view on the origin of chemical and isotopic patterns in groundwater from the Milk River Aquifer, Canada. *Water Resour Res* **24**:1747–1763. doi: 10.1029/WR024i010p01747

Hendry J., Schwartz, F.W., and Robertson, C. 1991. Hydrogeology and hydrochemistry of the Milk River aquifer system, Alberta, Canada: a review. *Applied Geochemistry* **6**:369–380. doi: 10.1016/0883-2927(91)90037-P

LEAPFROG Hydro[®] (2013) ARANZ Geo, <http://www.leapfrog3d.com>

Levings, G.W. 1982. Potentiometric-surface map of water in the Eagle Sandstone and equivalent units in the Northern Great Plains area of Montana. USGS Open-File Report 82-565

Lopez, D.A. 2001. Geologic map of the Sweet Grass Hills 30' x 60' quadrangle, north-central Montana, Montana Bureau of Mines and Geology Open-File Report 443, 4 p., 1 sheet, 1:100 000.

Lorenz, J.C. 1981. Sedimentary and Tectonic History of the Two Medicine Formation, Late Cretaceous (Campanian), Northwestern Montana. Princeton University

Meijer-Drees, N.C., and Mhyr, D.W. 1981. The Upper Cretaceous Milk River and Lea Park Formations in Southeastern Alberta. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* **29**:42–74

Meyboom, P. 1960. Geology and groundwater resources of the Milk River sandstone in southern Alberta. Research Council of Alberta

Meyer, R. 1998. Sedimentology, petrology and permeability characterization of the Upper Cretaceous Virgelle Member, Milk River Formation, Writing-on-Stone Provincial Park, Alberta, Canada. University of Calgary

Meyer, R., and Krause, F.F. 2006. Permeability anisotropy and heterogeneity of a sandstone reservoir analogue: An estuarine to shoreface depositional system in the Virgelle Member, Milk River Formation, Writing-on-Stone Provincial Park, southern Alberta. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* **54**:301–318

Montana Geological Society 2013. Northwest Geologic Service Sample Logs. Northern Rockies Geological Data Center

Noble, R., Bergantino, R., Patton, T.W., Sholes, B.C., Daniel, F. and Scofield, J. 1982. Altitude in Feet on Top of the Judith River Aquifer, *in* Occurrence and characteristics of ground water in Montana. Volume 1. The Great Plains Region

O'Connell, S., 2014. The Milk River Transboundary Aquifer in Southern Alberta; Geological Survey of Canada, Open File 7751, 1 .zip file. doi:10.4095/295603

Okulitch, A.V., Lopez, D.A., and Jerzykiewicz, T. 1996. Bedrock geology, Lethbridge, Alberta-Saskatchewan-Montana, Geological Survey of Canada, National Earth Science Series, Geological Atlas no. NM-12-G, doi:10.4095/208987

Payenberg, T.H.D. 2002a. Integration of the Alderson Member in southwestern Saskatchewan into a litho- and chronostratigraphic framework for the Milk River/Eagle coastline in southern Alberta and north-central Montana. *In*: Summary of Investigations 2002, Volume 1, Saskatchewan Geological Survey, Sask. Energy Mines, Misc. Rep. 2002-4.1

Payenberg, T.H.D. 2002b. Litho-, Chrono- and Allostratigraphy of the Santonian to Campanian Milk River and Eagle Formations in Southern Alberta and North-central Montana : Implications for Differential Subsidence in the Western Interior Foreland Basin. Thesis (Ph.D.) University of Toronto

Payenberg, T.H.D., Miall, A.D., and Braman, D.R. 2001. Sequence stratigraphy of the Milk River Formation in southern Alberta and Eagle Formation in northern Montana. Rock the foundation Convention. Canadian Society of Petroleum Geologists

Payenberg, T.H.D., Braman, D.R., Davis, D.W., and Miall, A.D. 2002. Litho-and chronostratigraphic relationships of the Santonian-Campanian Milk River Formation in southern Alberta and Eagle Formation in Montana utilising stratigraphy, U-Pb geochronology, and palynology. *Canadian Journal of Earth Sciences* **39**:1553–1577

Payenberg, T.H.D., Braman, D.R., and Miall, A.D. 2003. Depositional environments and stratigraphic architecture of the Late Cretaceous Milk River and Eagle formations, southern

Alberta and north-central Montana: relationships to shallow biogenic gas. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* **51**:155–176

Pierce, W.G., and Hunt, C.B. 1937. Contributions to economic geology (short papers and preliminary reports), 1934-36. Geology and mineral resources of north-central Chouteau, western Hill, and eastern Liberty counties, Montana. United States Geological Survey

Printz, J. 2004. Milk River Aquifer Reclamation & Conservation Program 1999-2004 Summary Report

Rice, D.D. 1976. Depositional environments of the Eagle Sandstone, north-central Montana-- an aid for hydrocarbon exploration (modified from a talk presented to the Rocky Mountain Section AAPG-SEPM Meeting, Billings, Montana, March 30, 1976. United States Geological Survey

Rice, D.D. 1980. Coastal and deltaic sedimentation of Upper Cretaceous Eagle Sandstone; relation to shallow gas accumulations, North-central Montana. *AAPG Bulletin* **64**:316–338

Rice, D.D., and Cobban, W.A. 1977. Cretaceous stratigraphy of the Glacier National Park area, northwestern Montana. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* **25**:828–841

Robertson, C. 1988. Potential impact of subsurface irrigation return flow on a portion of the Milk River and Milk River Aquifer in southern Alberta . University of Alberta Dept of Geology

Ross, M., Parent, M., and Lefebvre, R. 2005. 3D geologic framework models for regional hydrogeology and land-use management: a case study from a Quaternary basin of southwestern Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal* **13**:690–707. doi: 10.1007/s10040-004-0365-x

Russell, L.S., and Landes, R.W. 1940. Geology of the southern Alberta Plains, Memoir 221, Geological Survey of Canada, 219 p

Russell, L.S. 1970. Correlation of the Upper Cretaceous Montana Group between southern Alberta and Montana. *Canadian Journal of Earth Sciences* **7**:1099

Schwartz, F.W., and Muehlenbachs, K. 1979. Isotope and ion geochemistry of groundwaters in the Milk River Aquifer, Alberta. *Water Resources Research* **15**:259–268. doi: 10.1029/WR015i002p00259

Stantec 2002. Regional groundwater assessment of potable groundwater in county of Warner No5, Alberta. County of Warner No5

- Stanton, T.W., Hatcher, J.B., and Knowlton, F.H. 1905. Geology and paleontology of the Judith River beds. United States Geological Survey
- Stebinger, E. 1915. The Montana Group of northwestern Montana. Shorter contributions to general geology, 1914. USGS Professional Paper 90-G
- Stebinger, E. 1917a. Contributions to economic geology, 1916, Part II, Mineral fuels-- Anticlines in the Blackfeet Indian Reservation, Montana. USGS Bulletin 641-J
- Stebinger, E. 1917b. Contributions to economic geology, 1916, Part II, Mineral fuels. Possibilities of oil and gas in north-central Montana. USGS Bulletin 641-C
- Tokarsky, O. 1974. Hydrogeology of the Lethbridge-Fernie area, Alberta. Alberta Research
- Toth, J., and Corbet, T. 1986. Post-Paleocene evolution of regional groundwater flow-systems and their relation to petroleum accumulations, Taber area, southern Alberta, Canada. Bulletin of Canadian Petroleum Geology **34**:339–363
- Tovell, W.M. 1956. Some Aspects of the Geology of the Milk River and Pakowki Formations (Southern Alberta). Thesis, University of Toronto
- Tuck, L.K. 1993. Reconnaissance of geology and water resources along the north flank of the Sweet Grass Hills, north-central Montana. USGS Water-Resources Investigations Report: 93-4026
- Weed, W.H. 1899. Fort Benton folio, Montana. Report GF-55. USGS Folios of the Geologic Atlas: 55.
- WEBLEX Canada 2013. Natural Resources Canada. Government of Canada. <http://weblex.nrcan.gc.ca>.
- Williams, M.Y., and Dyer, W.S. 1930. Geology of southern Alberta and southwestern Saskatchewan. Memoir 163, Geological Survey of Canada
- Zimmerman, E. 1967. Water resources of the Cut Bank area, Glacier and Toole Counties, Montana. Montana Bureau of Mines and Geology, Bulletin 60

CHAPITRE 6 A UNIFIED HYDROGEOLOGICAL MODEL OF THE MILK RIVER TRANSBOUNDARY AQUIFER, TRAVERSING ALBERTA (CANADA) AND MONTANA (USA)

Marie-Amélie Pétré^{a, b}, Alfonso Rivera^a, René Lefebvre^b, M. Jim Hendry^c, Attila J.B. Fohnagy^d

^a Geological Survey of Canada, Québec Division, 490 rue de la Couronne, Québec, G1K 9A9, QC, Canada

^b INRS Centre Eau Terre Environnement, 490 rue de la Couronne, Québec, G1K 9A9, QC, Canada

^c University of Saskatchewan, Department of Geological Sciences, Geology Building, 114 Science Place, S7N 5E2, Saskatoon, SK, Canada

^d Montana Department of Natural Resources and Conservation, Water Management Bureau, 1424 9th Avenue, Helena, MT 59620, USA

Hydrogeology Journal (2016) Vol 24 (7), p 1847–1871. doi:10.1007/s10040-016-1433-8. Soumis le 21 décembre 2015. Accepté le 26 février 2016 avec révisions mineures. Accepté définitivement le 25 mai 2016. Publié le 29 juin 2016. Suites aux commentaires des examinateurs de la thèse, certaines modifications ont été faites à la version de l'article présentée dans la thèse par rapport à la version publiée.

Contribution de l'étudiante et des co-auteurs :

Marie-Amélie Pétré a rédigé l'article et réalisé les figures. Elle a effectué les travaux présentés dans l'article et a mené la première campagne de terrain en Alberta. Elle a organisé et coordonné les deux autres campagnes de terrain réalisés par les partenaires du projet. **Alfonso Rivera** et **René Lefebvre** ont supervisé l'ensemble des travaux présentés dans l'article et ont contribué à l'article via leurs révisions et commentaires. **Jim Hendry** a contribué à améliorer l'article à travers sa révision détaillée et ses nombreuses suggestions. **Attila Fohnagy** a révisé l'article et a complété le sondage sur l'utilisation de l'eau souterraine au Montana.

Au-delà des co-auteurs, les partenaires de l'USGS (Helena, Montana) ont réalisé les travaux de terrain au Montana et un consultant de l'Alberta (Ryan Davison) a mené une campagne de terrain complémentaire en Alberta.

Version française du titre et du résumé

Un modèle conceptuel hydrogéologique unifié de l'aquifère transfrontalier Milk River, traversant l'Alberta (Canada) et le Montana (USA)

Résumé

Un modèle conceptuel de l'aquifère transfrontalier Milk River (MRA), traversant la frontière Canada-États-Unis d'Amérique, a été développé à partir d'une revue de littérature, de travaux de terrain ciblés et d'un modèle géologique tri-dimensionnel. Le MRA correspond au membre Virgelle de la Formation Milk River (Formation Eagle au Montana, États-Unis) et il constitue une importante ressource en eau souterraine sur une région étendue (25,000 km²). Le membre Virgelle affleure près de la frontière internationale et le long de l'arche Sweet Grass au Montana. La limite du MRA en aval hydraulique correspond à la discordance séparant le membre Virgelle des argiles sableuses gazifières du membre Alderson. Le MRA est confiné entre les aquitards des formations supérieures Pakowki/Claggett et l'aquitard inférieur du Groupe Colorado. Le MRA contient des zones de plus grandes transmissivités correspondant à des chemins d'écoulements préférentiels, confirmés par des traceurs géochimiques naturels. Le tritium et le ¹⁴C délimitent des aires de recharge localisées le long des affleurements des deux côtés de la frontière internationale. Des diminutions importantes des gradients hydrauliques horizontaux indiquent que la Milk River intercepte une grande proportion des eaux souterraines s'écoulant vers le Nord à partir de la zone de recharge. En aval hydraulique de la Milk River, l'écoulement des eaux souterraine est lent, comme le montrent les temps de résidence à l'aide du ³⁶Cl excédant 1 Ma. Ces vitesses lentes impliquent que l'émergence des eaux souterraines en aval de la Milk River s'effectue par un drainage vertical au travers du Groupe Colorado et vers le haut le long des vallées enfouies qui agissent comme des drains et correspondent à des zones artésiennes. Lorsque le MRA est confiné, il contient une ressource en eau souterraine fossile qui n'est pas renouvelée significativement par une recharge moderne. L'exploitation des eaux souterraines excède ainsi de beaucoup la recharge, une situation qui requiert une gestion appropriée de l'épuisement des eaux souterraines du MRA.

A unified hydrogeological conceptual model of the Milk River transboundary aquifer, traversing Alberta (Canada) and Montana (USA)

Marie-Amélie Pétré^{a, b}, Alfonso Rivera^a, René Lefebvre^b, M. Jim Hendry^c, Attila J.B. Fohnagy^d

^a Geological Survey of Canada, Québec Division, 490 rue de la Couronne, Québec, G1K 9A9, QC, Canada

^b INRS Centre Eau Terre Environnement, 490 rue de la Couronne, Québec, G1K 9A9, QC, Canada

^c University of Saskatchewan, Department of Geological Sciences, Geology Building, 114 Science Place, S7N 5E2, Saskatoon, SK, Canada

^d Montana Department of Natural Resources and Conservation, Water Management Bureau, 1424 9th Avenue, Helena, MT 59620, USA

ABSTRACT

A conceptual model of the transboundary Milk River Aquifer (MRA), extending across the Canada-USA border, was developed based on literature, focused field work and a three-dimensional geological model. The MRA corresponds to the Virgelle Member of the Milk River Formation (Eagle Formation in Montana, USA) and it is an important groundwater resource over a large area (25,000 km²). The Virgelle outcrops near the international border and along the Sweet Grass Arch in Montana. The down-gradient limit of the MRA is the unconformity separating the Virgelle from the gas-bearing sandy shale of the Alderson Member. The MRA is confined above by the Pakowki/Claggett Formations aquitards and below by the Colorado Group aquitard. The MRA contains higher transmissivity areas resulting in preferential flowpaths, confirmed by natural geochemical tracers. Tritium and ¹⁴C delineate restricted recharge areas along the outcrops on both sides of the international border. Drastic decreases in horizontal hydraulic gradients indicate that the Milk River intercepts a large proportion of groundwater flowing to the north from the recharge area. Downgradient of the Milk River, groundwater movement is slow, as shown by ³⁶Cl residence times exceeding 1 Ma. These slow velocities imply that groundwater discharge downgradient of the Milk River is via vertical leakage through the Colorado Group and upward along buried valleys, which act as drains and correspond to artesian areas. When confined, the MRA contains a fossil groundwater resource, not significantly renewed by modern recharge. Groundwater exploitation thus far exceeds recharge, a situation requiring properly managed MRA groundwater depletion

Keywords: Transboundary aquifer, Conceptual model, Milk River aquifer, Canada, USA

6.1 Introduction

It is estimated that there are about 366 transboundary aquifers worldwide (IGRAC 2015). The sound management of these shared groundwater resources is an important issue, especially in arid and semi-arid climates. Management of this resource requires a detailed understanding of the aquifer dynamics along its natural hydrogeological boundaries. Quantification of groundwater fluxes in the aquifer can be determined using groundwater numerical models. The foundation of these numerical models is the hydrogeological conceptual model (Bredehoeft 2005). Kresik and Mikszewski (2012) define the hydrogeological conceptual model as “the description of various natural and anthropogenic factors that govern and contribute to the movement of groundwater in the subsurface”.

The objective of the present study was to develop a hydrogeological conceptual model of the transboundary Milk River Aquifer (MRA). The MRA spans parts of southern Alberta (Canada) and northern Montana (USA), in a semi-arid region considered water-short (Government of Alberta 2006). The hydrogeological transboundary extent of the MRA is about 25,000 km². The MRA consists of the Virgelle Member of the Upper Cretaceous Milk River Formation in Alberta, which corresponds to the Eagle Formation in Montana. This aquifer has been a primary resource for livestock watering, secondary oil recovery and domestic uses in the study area. It has been extensively used during the 20th century, locally causing a drop (up to 30 m) in water levels or a decrease in flow rate (AGRA Earth and Environmental 1998). Since the mid-1950s, concerns about the sustainability and the “mismanagement” of the resource have been raised, notably by Meyboom (1960) and Borneuf (1976). From 1999 to 2004, a MRA conservation program was established in southern Alberta. It followed the AGRA Earth and Environmental (1998) depletion study of the MRA. Groundwater from the MRA is still being actively used on both sides of the Canada - USA border, with no allocation sharing agreement. The MRA has been intensively studied over the last century, however most of these studies did not extend across the Canada - USA border (Meyboom 1960; Zimmerman 1967; Schwartz and Muehlenbachs 1979; Hendry et al. 1991; Alberta Innovates Technology Futures 2010), thus preventing an understanding of the full aquifer dynamics. A comprehensive representation of the aquifer is required to evaluate the conditions needed for its sound management on both sides of the border.

Prior to generating a conceptual model of the aquifer system, a common stratigraphic framework and a 3D unified geological model in which the hydrostratigraphic units are defined were required. These were generated by Pétré et al. (2015) (Fig. 6.1). In the current study, the

hydrogeological conceptual model of the aquifer system is developed within its complete natural extent (Fig. 6.1) by linking hydrogeological and geochemical data with the 3D unified geological model. This study is based on a thorough literature review and focused complementary field work, documented by Pétré and Rivera (2015). The comprehensive approach that is used in this study can be applied in other characterization and quantification studies of regional aquifers.

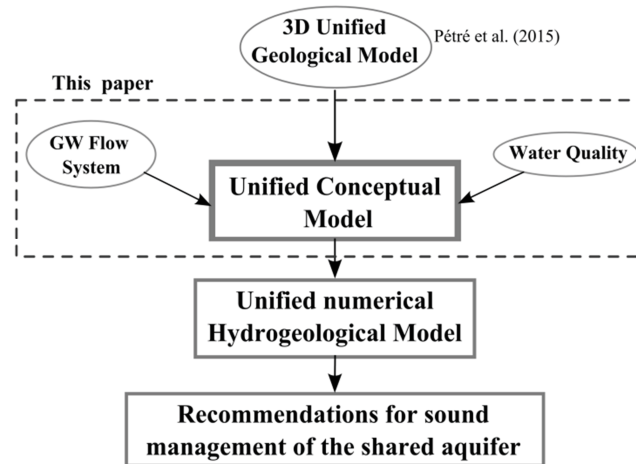


Figure 6.1 Successive stages of the MRA study. This paper addresses the second step – the development of a unified hydrogeological conceptual model of the aquifer system

6.2 Study area and Milk River Aquifer extent

The study area is located in the southwestern part of the Plains Hydrogeological Region (Grasby et al. 2014). It ranges from longitude -110.0° to -112.5° and from latitude 48.2° to 50.0°. The MRA spans southern Alberta and northern Montana, which has a semi-arid climate with mean annual precipitation between 250 and 450 mm/y and potential evapotranspiration (ET) ranging from 550 to 578 mm/y (Climate Canada 2015; NOAA 2015). The topography of the region is undulating to hummocky and the main topographic highs are the Sweet Grass Hills, the Cypress Hills, the Milk River Ridge and the Bears Paw Mountains (Fig. 6.2). The main geological feature in the study area is the Sweet Grass Arch, composed of the Kevin Sunburst Dome, the Sweet Grass Hills and the Bow Island Arch. The hydrography of the region includes the transboundary Milk River, Pakowki Lake and a number of intermittent channels (e.g., Etzikom, Chin and Forty Mile coulees). The coulees are meltwater channels formed by glacial erosion or by the continuing erosion of water and wind (Dormaar 2010; Atkinson et al. 2014). The Milk River originates in northwest Montana and flows northward into Alberta; it loops eastward through the town of Milk River and then returns southward to Montana. The Milk River flow is artificially

increased from about 1 to 16 m³/s during the irrigation season via the St. Mary Canal in Montana (MacCulloch and Wagner-Watchel 2010). In the Milk River watershed in Alberta, irrigation infrastructures are not significant (Milk River Watershed Council Canada 2013). Pakowki Lake located west of Manyberries, seasonally receives water from the Etzikom Coulee and is 1.2 m deep on average. The lake covers up to 123 km²; however, it was mostly dry during the 1980s and began to refill in the early 1990s (Sosiak and Branch 1997). In the Sweet Grass Hills area, the streams are mostly intermittent (Dormaar 2003). Streams flow from the north side of the Sweet Grass Hills into the Milk River, and from the south side into the Marias River.

Buried valleys (bedrock channels) are present across the study area (Fig. 6.2). These buried valleys are pre-glacial stream valleys buried by glacial drift (Cummings et al. 2012). The Medicine Hat, Skiff and Foremost buried valleys are up to 10 km wide and are incised up to 30 m into bedrock (Hendry and Buckland 1990; HCL consultants 2004), which is generally comprised of the Belly River Formation or Pakowki Formation in the study area. In Montana, well logs examination (GWIC Id 163464, 3502, 40420, 40433) and the geological map from Lopez (2002) suggest that the ancestral Missouri River buried valley in the Big Sandy Creek drainage is up to 5 km wide and is incised up to 75 m into bedrock.

Boundaries of the conceptual model of the MRA follow the natural hydrogeological extent of the MRA (Fig. 6.2). The hydrogeological limits of the MRA include the Virgelle Member (middle member of the Milk River Formation) and the groundwater-bearing Upper Alderson Sands, located along the depositional limit of the Virgelle Member (Pétre et al. 2015). The northern limit of the model corresponds to the southern edge of the Medicine Hat gas field in Alberta. The south-eastern limit is the Tiger Ridge gas field, located in the Bears Paw Mountains. These gas fields are natural limits of the MRA; more details can be found elsewhere (Rice and Claypool 1981; Berkenpas 1991; Anna 2011; Chen et al. 2015). For the purpose of this paper, the southern limit is constituted by the Marias River in Montana, although the MRA may extend beyond this limit.

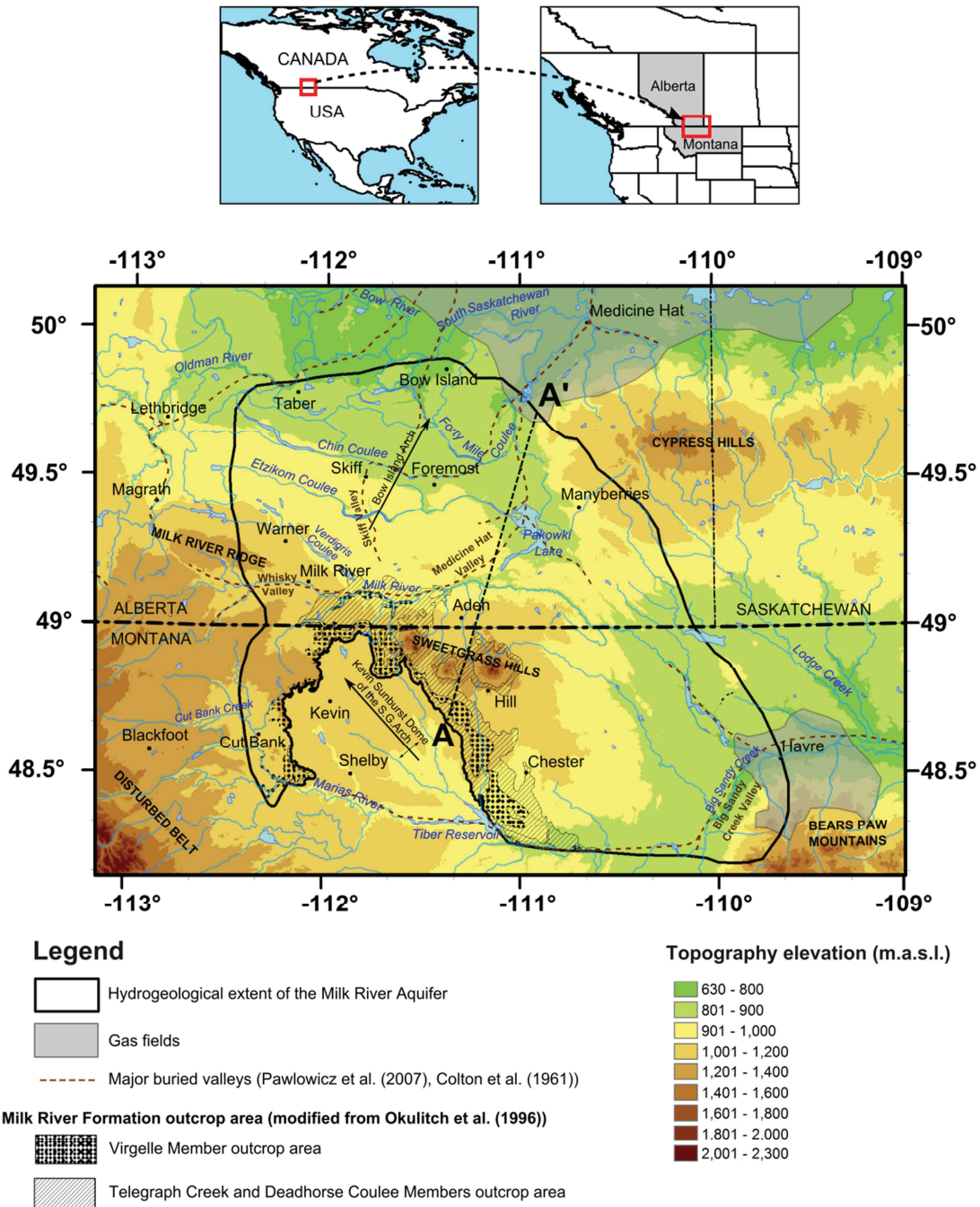


Figure 6.2 Study area, topography elevation and extent of the MRA. “S.G.Arch” stands for Sweet Grass Arch

6.3 Methods

Hydrogeological and geochemical data from various sources were compiled and underwent some processing to have a unified unit and coordinate system. New data were added from the three field studies carried out as part of the Geological Survey of Canada's MiRTAP (Milk River Transboundary Aquifer Project; Rivera 2011). The field campaigns took place in winter 2012 (Alberta), summer 2013 (Montana) and winter 2013 (Alberta). The objectives of these field studies were to: 1) measure static water levels from private wells completed in the MRA; 2) collect groundwater samples for isotopic analyses (^3H , ^{13}C , ^{14}C and ^{36}Cl); 3) measure the pressure of flowing artesian wells; and 4) conduct a survey with landowners and municipalities regarding current groundwater use.

Fifteen static water levels were measured over the study area. Four pressure measurements were obtained from flowing artesian wells in southern Alberta (Fig. 6.7). Twenty-three groundwater samples were collected and analysed for ^3H , ^{13}C and ^{14}C (12 in Alberta and 11 in Montana) by the University of Waterloo Environmental Isotopes Laboratory (EILAB, Waterloo, Ontario). ^{36}Cl analyses were performed on 20 groundwater samples (9 in Alberta and 11 in Montana). The ^{36}Cl samples from Alberta were analysed by the PRIME Lab (Purdue University, Indiana, USA) and those from Montana by the Center for AMS (Livermore, California, USA). Inorganic chemistry analyses were also done for the 11 Montana samples by the INRS lab (Québec, Canada). The groundwater samples are all representative of the MRA. The transboundary data from the MiRTAP project will be available before the end of 2016 through the Groundwater Information Network (GIN 2015) of NRCan and Montana's Ground Water Information Center database (GWIC 2015).

6.4 Groundwater use

The MRA has represented an important water resource for the region for about a century. That is still the case today, especially given the semi-arid climate of the study area and its relatively high threat to surface water availability (Environment and Climate Change Canada 2012). The development of the MRA started around 1915 in southern Alberta and increased over the 20th century. In southern Alberta, the number of wells increased from 409 in 1960 to 1,027 in the early 2000s (Meyboom 1960; Printz 2004). As a result, the total groundwater use almost doubled between 1960 and the early 1990s, from $1.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ (Meyboom 1960) to $2.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ (Persram, Alberta Environmental Protection, Hydrogeology Branch, unpublished report, 1992,

cited by AGRA Earth and Environmental (1998)) (Fig. 6.3). This rise is mostly due to the increase in the number of livestock. Since the mid-1990s groundwater use has declined. Recent reports have estimated a total consumption of $1.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$, which is close to the 1960 value (Stantec 2002; HCL consultants 2004; HCL consultants 2007). From Fig. 6.3, the cumulative use was estimated to $111.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ in southern Alberta, assuming that the evolution of the consumptive use is linear between 1915 and 2005, and remains constant between 2005 and 2015.

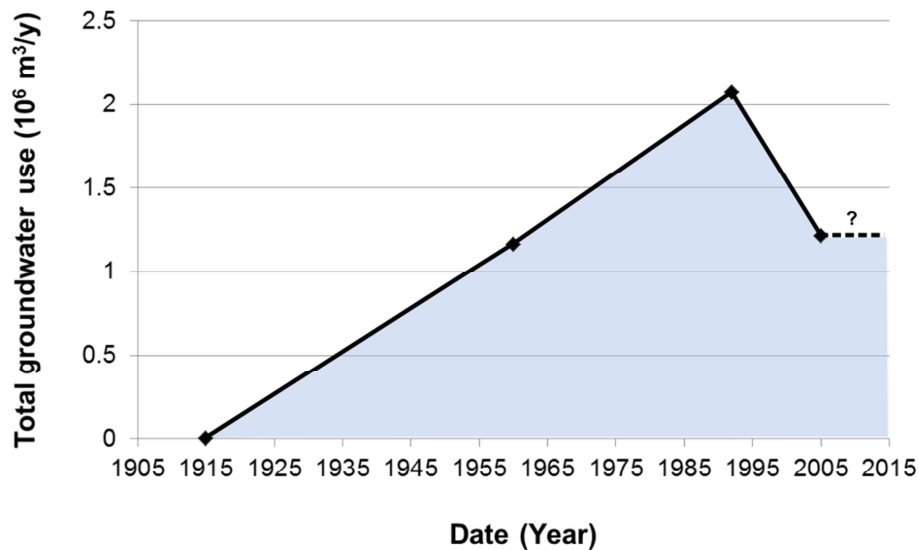


Figure 6.3 Total estimated groundwater use from the MRA in southern Alberta, Canada

Since the 1960s, many wells have lost their artesian flow condition because of the intensive use of the MRA. Water levels dropped mostly in the central part of the aquifer, where the largest users are present (Meyboom 1960; AGRA Earth and Environmental 1998). An observation well near Foremost, Alberta, which obtains its water from three municipal wells, shows a water level decrease of more than 45 m between 1957 and 2006 (Fig. 6.4). Such a continuous water level drawdown is usually considered as an adverse consequence of aquifer development (Custodio 2002). The other four MRA observation wells located in southern Alberta do not show as steep of a declining water level trend as in Foremost (Pétre and Rivera 2015). These observation wells may not be ideally located to reflect the general drop of the water level shown from the comparison of the 1960 and 1998 potentiometric surface maps (AGRA Earth and Environmental 1998).

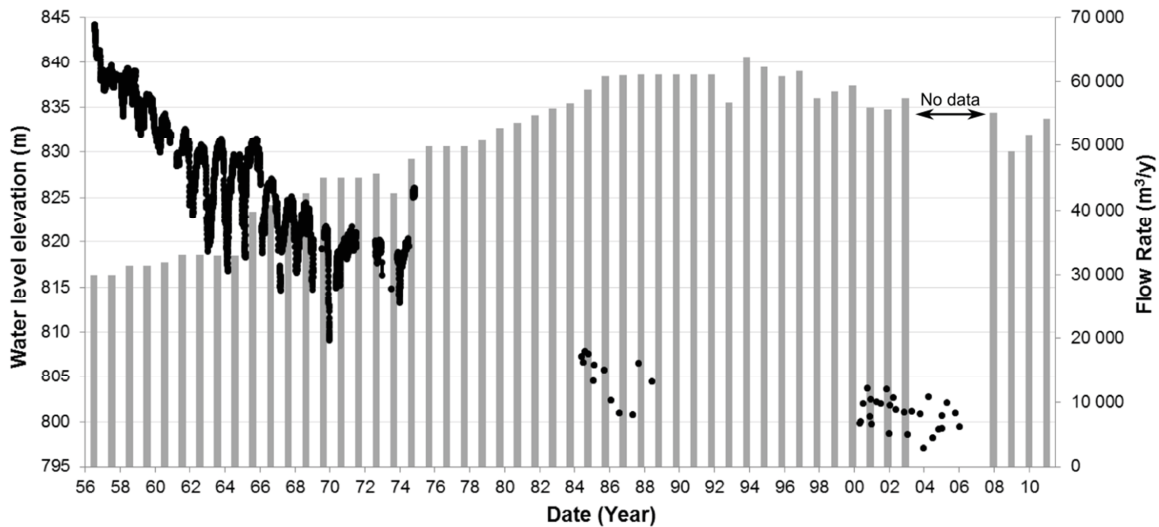


Figure 6.4 Water level of the Foremost observation well (AENV Id #221) (black dots) and annual groundwater diversion (gray bars) for the village of Foremost (HCL consultants 2004; Alberta Environment and Parks 2015)

Furthermore, many artesian wells in southern Alberta were allowed to flow freely at the surface for decades. This volume of unused water, also termed “water wastage” by Meyboom (1960) was $0.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$. Borneuf (1976) termed this a “mismanagement” of the resource. The amount of water wastage was decreased during the recent MRA Conservation Program (Printz 2004) during which 22 flowing wells were cemented, resulting in approximately $60,000 \text{ m}^3/\text{y}$ of water savings. The recent survey conducted with municipalities as part of the current study indicates a generally decreasing use, as a result of population decline in the study area and connection to the regional water pipeline. The complete results of the groundwater use survey conducted with municipalities are presented as electronic supplementary material (Appendix II).

In Montana, groundwater use data are limited due to the lack of statutory requirement for water right holders to measure their diverted volume. West of the Sweet Grass Arch, in the Cut Bank area, groundwater from the Virgelle Member and the Two Medicine Formation are the main sources of fresh water for domestic, stock and industrial use (Zimmerman 1967). The recent survey indicates that rural residents from several municipalities as well as oil refineries still depend on groundwater supplies.

The total groundwater in the Cut Bank area was estimated by Zimmerman (1967) to be about $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$. In the Sweet Grass Hills area Tuck (1993) estimates that the Virgelle discharge from wells reached a value of $0.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$. About 70 % of this flow rate was used for secondary oil recovery and about 21 % correspond to the freely flowing wells (wastage). Secondary oil

recovery is still occurring in the Sweet Grass Hills area but water use records for supply wells from the MRA are lacking. In the vicinity of the gas fields both in Alberta and Montana, the production of water related to gas extraction could influence fluid volumes within the MRA (Berkenpas (1991); MBOGC (2015)). Further studies are required to determine precisely the extracted volumes and their effect on the groundwater resource. Monitoring wells in the outcrop/subcrop area of the MRA in Montana as well as the study from Zimmerman (1967) show that water levels are stable during their period of record (Pétre and Rivera 2015). Therefore, concerns about depletion of the MRA are mostly present on the Alberta side of the study area. Some additional work would be required to better define the possible range of exploitation values including sorting and analysing of the public water well databases in Alberta and Montana.

6.5 Hydrogeological setting

6.5.1 Hydrostratigraphy

A geological cross-section through the aquifer system is presented in Figure 6.5 (location shown on Fig. 6.2). Colorado Group underlies the geological units in the study area. It is a 500-m thick regional aquitard and contains several thin sandstone beds, the most significant being the Bow Island Sandstone. The Bow Island Sandstone is about 25 m thick and is separated from the overlying Milk River Formation by approximately 400 m of shale (Swanick 1982; Phillips et al. 1986; Hendry and Schwartz 1988).

The Milk River Formation is about 100 m thick on average and is subdivided into three members. The basal Telegraph Creek Member is a transitional unit between the Colorado Group and the sandstone of the middle member Virgelle. The Virgelle Member constitutes the MRA. The upper member of the Milk River Formation is the low-permeability Deadhorse Coulee Member.

The Milk River Formation outcrops or subcrops following continuous and narrow belts on both sides of the Sweet Grass Arch, but also around the Sweet Grass Hills and in southern Alberta near the international border (Fig. 6.2). The Virgelle Member outcrop is well recognizable west of the Sweet Grass Arch, as it shows many high escarpments (Collier 1930; Zimmerman 1967).

The Milk River Formation is overlain by the Pakowki Formation (Claggett Formation in Montana), which is a 130 m thick aquitard. The Pakowki/Claggett aquitard thins towards the west and

north-west in Alberta (Pétre et al. 2015). The Belly River Group (Judith River Formation in Montana) overlies the Pakowki/Claggett Formation (Fig. 6.5). A detailed description of the stratigraphy and hydrostratigraphy of these Upper Cretaceous units in the study area is provided in Pétre et al. (2015).

The study area is covered by glacial drift, except on the topographic highs (such as the Cypress Hills and the Sweet Grass Hills) and in the coulees (Williams and Dyer 1930; Colton et al. 1961; Fullerton and Colton 1986; Robertson 1988). As the glacial drift consists mainly of low-permeability till, the surficial deposits in the study area generally do not constitute productive aquifers (Borneuf 1976; Robertson 1988). However, the buried valleys can form very productive aquifers in southern Alberta (Farvolden et al. 1963). Although the content of the buried valley is generally heterogeneous, making their aquifer potential difficult to predict, the fill material of the buried valleys in the study area is predominantly sand and gravel (HCL consultants 2004; Cummings et al. 2012). The Whisky Valley Aquifer (west of the Town of Milk River) lies in the bottom of the Whisky buried valley. This sand and gravel aquifer is connected to the MRA locally (Golder Associates 2004).

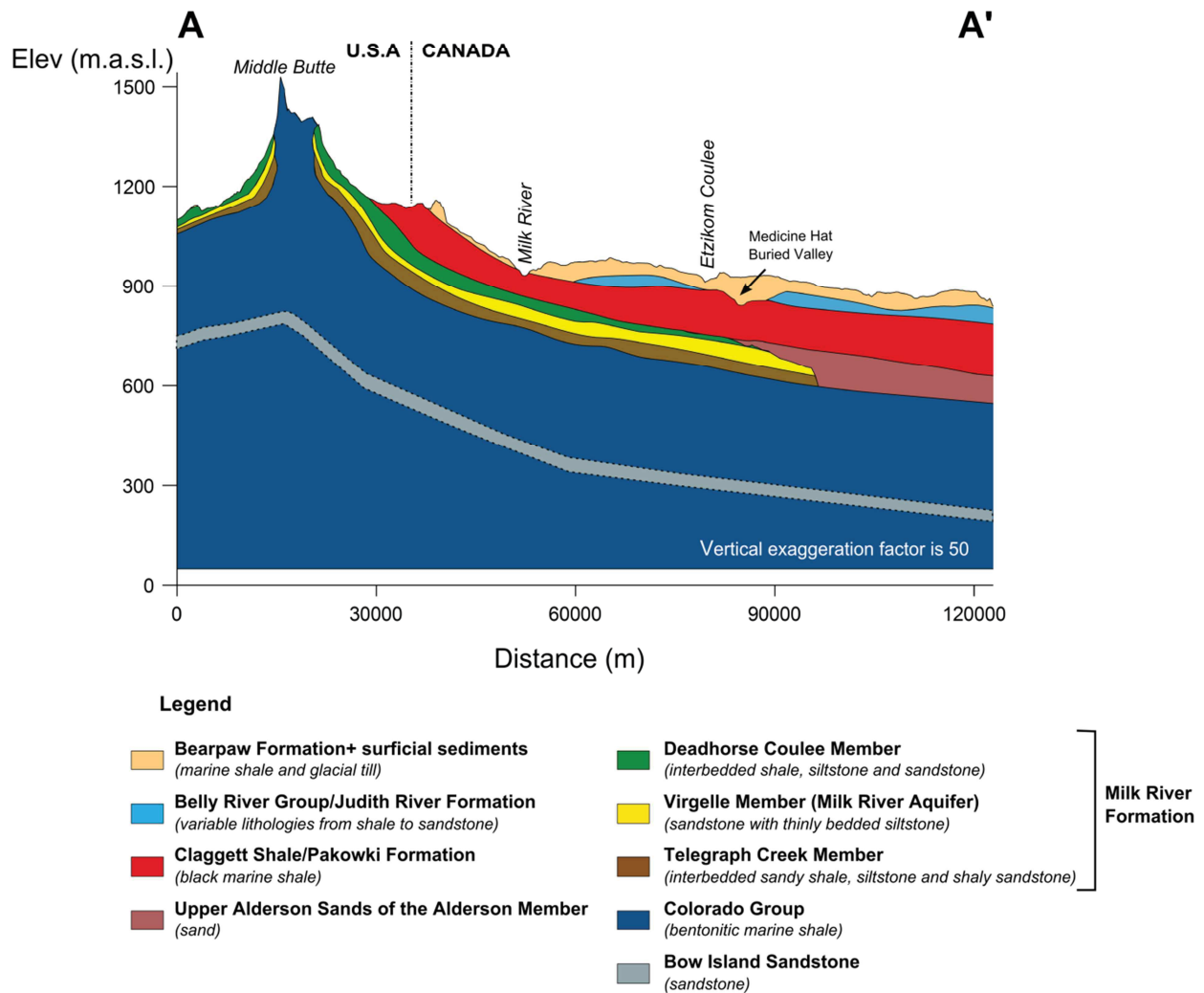


Figure 6.5 Geological cross-section of the Milk River Formation and overlying and underlying geologic units. The location of the cross section is shown on Fig. 6.2. The geology of the igneous intrusives of the Sweet Grass Hills (including Middle Butte) is not represented and is assimilated to the Colorado Group.

6.5.2 Transmissivity of the aquifer

The transmissivity (T) of an aquifer is generally obtained from aquifer tests. It is a fundamental parameter in the characterization of a groundwater resource as well as an important control on groundwater flow. The first transboundary map of the T (in m^2/s) of the MRA was produced by compiling 133 T data points compiled from Meyboom (1960); Persram (Alberta Environmental Protection, Hydrogeology Branch, unpublished report, 1992, cited by AGRA Earth and Environmental (1998)); AGRA Earth and Environmental (1998); Zimmerman (1967); Tuck (1993); Levings (1981); Norbeck (2006) and Water Right Solutions Inc. (Cool Spring Colony -

Application for Beneficial Water Use Hydrogeologic Assessment, submitted for Water Right Permit # 40G 30045714. 5 p, unpublished report, 2009). The T data and the spatial distribution of the log T values (interpolated by Empirical Bayesian Kriging in ArcGIS) are shown in Fig. 6.6. The highest T values are present around the Sweet Grass Hills and in the south-western part of the aquifer in Montana. Transmissivity values range from 1×10^{-4} and 3×10^{-2} m^2/s , west of the Sweet Grass Arch (Zimmerman 1967; Norbeck 2006) and from 2×10^{-4} to 4×10^{-3} m^2/s in the Sweet Grass Hills area (Tuck 1993), whereas in southern Alberta, T ranges from 1×10^{-6} to 5×10^{-4} m^2/s (Meyboom 1960; Persram (Alberta Environmental Protection, Hydrogeology Branch, unpublished report, 1992, cited by AGRA Earth and Environmental (1998)); AGRA Earth and Environmental (1998). Faulting and fracturing (secondary porosity) around the igneous intrusion of the Sweet Grass Hills have increased the T of the Virgelle Member locally (Tuck 1993). In the south-west corner of the study area, Zimmerman (1967) indicates that the structural deformations may have greatly affected the T of the Virgelle Member, which transmits water mainly through fractured sandstone.

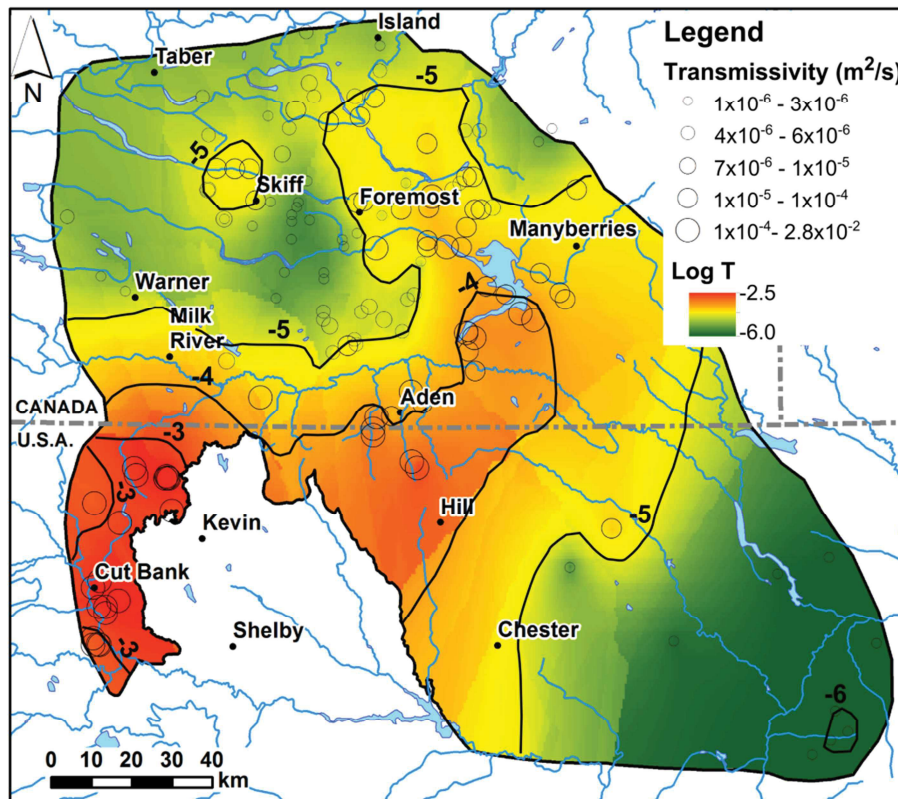


Figure 6.6 Transboundary map of transmissivity T (kriged from available data points shown on the map) in the MRA.

In the south-eastern part of the study area in Montana, east of Chester, the T is low (1×10^{-6} m²/s). In southern Alberta, a high T zone extends from the USA border, around Aden, to Lake Pakowki and then north near Foremost. An area of low T is located in the central part of the study area, between the towns of Foremost and Skiff. West of this low T area, the T values increase over a limited extent but do not attain values as high as in the east. Fig. 6.6 shows a central low-transmissivity area, surrounded by two corridors of higher transmissivity as previously evoked by AGRA Earth and Environmental (1998). The transmissivity data are available in Appendix IX.

6.5.3 Potentiometric map, groundwater flow paths and artesian conditions

Groundwater flow directions in the MRA, recharge and discharge areas can be inferred from the potentiometric surface of the aquifer. Parts of the potentiometric surface of the MRA were mapped by Meyboom (1960); Borneuf (1974); Toth and Corbet (1986) and AGRA Earth and Environmental (1998) in southern Alberta and by Zimmerman (1967); Levings (1982a), and Tuck (1993) in northern Montana.

Based on these historical potentiometric maps, groundwater flow directions were shown on two-dimensional vertical cross-sections by Pétré et al. (2015). Previous potentiometric maps are all limited by the international border, preventing a complete representation of potentiometric conditions in the aquifer, especially close to the international border.

The first transboundary potentiometric map of the MRA (Fig. 6.7) was compiled from historical maps from Zimmerman (1967), AGRA Earth and Environmental (1998), Tuck (1993) and Levings (1982a). Four pressure versus elevation profiles provided by Berkenpas (1991) were converted to equivalent hydraulic heads and were also used to complete the potentiometric map at the northern and eastern limits of the MRA in Alberta. Efforts were made to harmonize the various datasets, especially at the USA-Canada border, to properly represent the transboundary groundwater flow characteristics of the aquifer. A dataset of 40 recent water level measurements (2006-2014) collected during the MiRTAP field work (2012-2013), or obtained from public databases (GWIC (2015); Alberta Environment and Parks (2015)) and the Agriculture and Agri-Food Canada, Prairie Farm Rehabilitation Administration monitoring project (PFRA, unpublished report 2014) was used to validate the transboundary map and confirm the inferred regional groundwater flow patterns (Appendix VI).

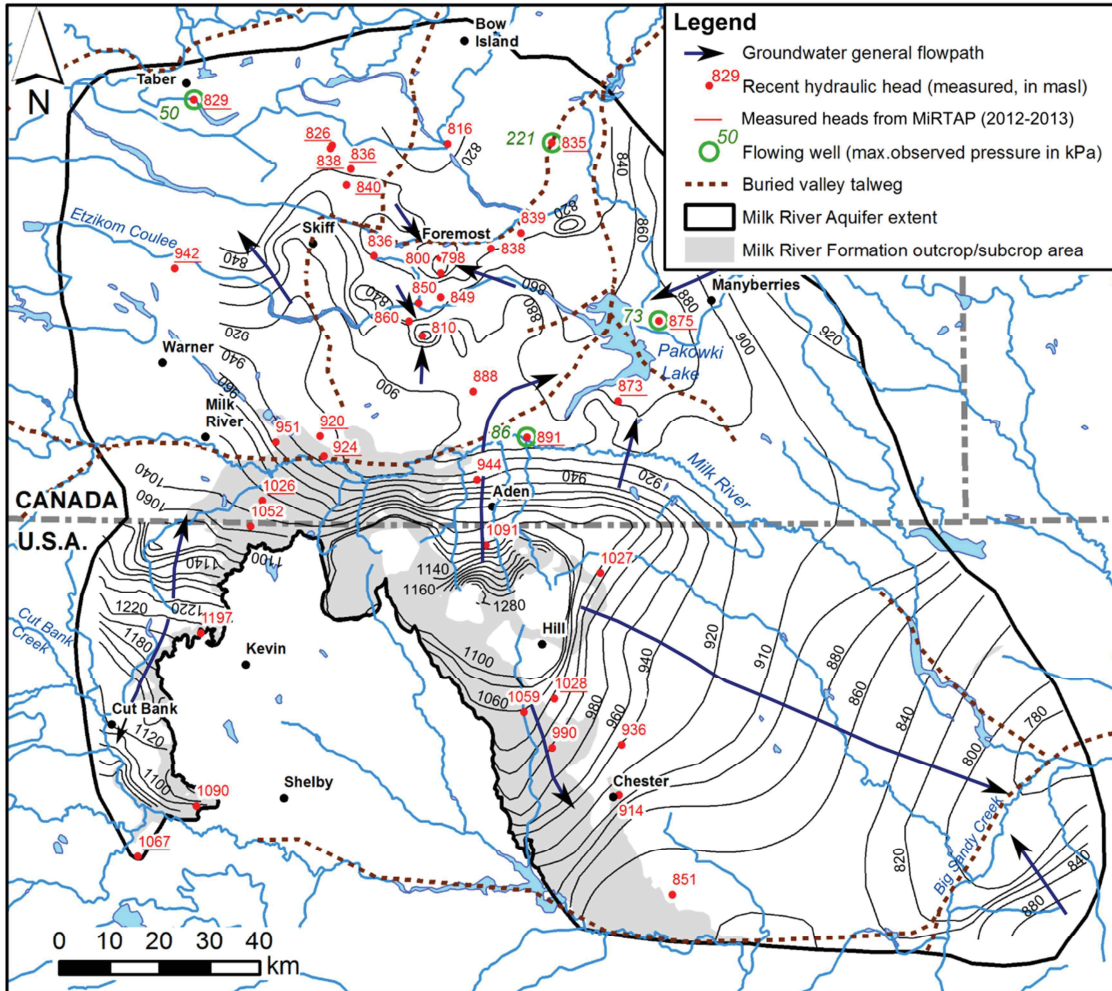


Figure 6.7 Transboundary potentiometric surface map of the MRA. Contour intervals are 20 m

The highest piezometric heads were measured in the Sweet Grass Hills and in an area north of Cut Bank. These correspond to the recharge areas where the MRA outcrops or subcrops. High piezometric heads were also measured in the area east of Manyberries and in the south-east corner of the study area, indicating a component of groundwater flow laterally from other geological units. This water originates in the Cypress Hills (Toth and Corbet 1986) and the Bears Paw Mountains (Levings 1982a). Piezometric lows are located in the Pakowki Lake area and in the northern part of the study area in Alberta and along Cut Bank Creek and Big Sandy Creek in Montana. Data suggest that these piezometric lows correlate with the talweg of the buried valleys in the study area. The buried valleys may influence outflow of groundwater out of the MRA, as suggested by Borneuf (1976), in southern Alberta. Groundwater flow also converges locally in heavily pumped areas, including the village of Foremost and the Starbrite Colony (15 km south of Foremost, Alberta). The pressure-elevation graphs from Berkenpas (1991) indicate

the presence of a region with very low groundwater flow (hydrostatic conditions) south-east of the Lake Pakowki (along isoline 910 m on Fig. 6.7).

The MRA is a confined aquifer radially dipping from the outcrop areas which presents flowing artesian conditions in some places. Nearly all the wells in southern Alberta were flowing in the pre-exploitation system (Borneuf 1976; Phillips et al. 1986; Hendry et al. 1991). Currently, flowing artesian areas are located in the northern part of the study area and near Lake Pakowki. These locations are still consistent with the flowing artesian limit first observed by Dowling (1917). Depression of the potentiometric surface in the vicinity of the Etzikom or Chin Coulees are attributed to a number of free-flowing wells that lowered the static water levels (Meyboom 1960; Tokarsky 1974). Recently, four new pressure measurements were obtained on flowing artesian wells in Alberta in 2013 (Fig. 6.7). These pressures range from 50 to 221 kPa (5 to 22 m of water) and provide an indication of present-day artesian conditions that still prevail in the MRA.

Although the transboundary potentiometric map of the aquifer is based on four maps representative of various dates and scales, 40 recent data points are consistent with the previous contours maps (except in the areas of heavy pumping where an update of the contours was required). Besides, the hydraulic heads derived from the regional pressure gradients in the northern and eastern limit of the aquifer in Alberta (Berkenpas 1991) are also consistent with the observed hydraulic heads. The potentiometric map is consequently considered as representative at the regional scale.

6.5.4 Transboundary groundwater fluxes

Groundwater flow diverges from the Sweet Grass Hills to the north, east and southeast whereas, west of the Sweet Grass Arch, groundwater flows southwest and north from a groundwater divide located north of Cut Bank (Fig 6.7). Based on these observations two updated transboundary groundwater flow paths were defined: (i) an eastern flow path from the Sweet Grass Hills to the north and (ii) a western flow path from the northern part of Cut Bank to the north.

Estimates of transboundary groundwater fluxes were made using the potentiometric and T maps in Darcy-based calculation. The fluxes (Q_{east} and Q_{west} for the eastern and western fluxes, respectively) were calculated using Darcy's law expressed as: $Q = T_{\text{mean}} \times i_{\text{mean}} \times L$ where Q is

groundwater flow (m^3/y), T_{mean} is the arithmetic mean transmissivity near the international border (m^2/s), i_{mean} is the mean horizontal hydraulic gradient (m/m), and L is the length of cross-sectional area through which groundwater flows (m).

Table 6-1 Estimates of the two transboundary groundwater fluxes across the international border from Montana to Alberta

	T_{mean} (m^2/s)	i_{mean} (m/m)	L (m)	Q (m^3/s)	Q (m^3/y)
Eastern flux	1.4×10^{-4}	1.13×10^{-2}	78,500	0.12	3.9×10^6
Western flux	5.3×10^{-4}	7.3×10^{-3}	41,500	0.16	5.1×10^6
Total	-	-	120,000	0.28	9.0×10^6

The value of the total flux ($9.0 \times 10^6 m^3/y$) in Table 6.1 should be considered as a maximum. The total flux is probably overestimated because the high transmissivity values in northern Montana correspond to the most productive areas characterized by fault and fractures.

6.5.5 Recharge areas

Recharge to the MRA is dominated by infiltration of precipitation in the outcrop and subcrop areas. As most of the study area is covered by glacial drift, recharge waters first enter the unsaturated tills before reaching the Virgelle Member. Robertson (1988) observed that where the low-permeability Deadhorse Coulee Member overlies the Virgelle Member, recharge to the MRA lags and a perched water table can be present.

Limited quantitative information exists concerning the recharge rate of the MRA. An estimate of the effective recharge rate was obtained by assuming the groundwater flux observed at the international border (about $9.0 \times 10^6 m^3/y$) is solely due to the portion of potential recharge that actually reaches the aquifer. By dividing this total flux by the area of the MRA outcrop/subcrop that contributes to the transboundary flux ($9.28 \times 10^8 m^2$), an effective recharge rate of 9.6 mm/y was calculated. This value is lower than the potential recharge of about 50 mm/y obtained by using the Soil Moisture Balance method (Rushton et al. 2006, Appendix X). The difference between these two values can be explained with further investigation of the role of the perched water table and the hypodermic groundwater flow.

Knowing the mean annual precipitation in the outcrop/subcrop area near the border is about 400 mm/y (Climate Canada 2015), the effective recharge represents only 2.4 % of total precipitation. In the Prairies of North America, recharge rates range between 2 and 9 % of annual precipitation (Rehm et al. 1982). Using a numerical model, Robertson (1988) obtained smaller values of recharge at the local scale in the subcrop area of < 1 % of total annual precipitation, which were explained by the strong evapotranspiration caused by Chinook (warm dry strong winds). The percentage obtained in the current study is thus close to that of Robertson (1988) and in the lower range of Rehm et al. (1982)

Groundwater inflow in the MRA also occurs through subsurface vertical inflow from other geological units in the topographic highs of the study area, as shown in the potentiometric map. As the aquifer is deep (>400 m) in these areas, this type of inflow would occur at a large time scale and would be less immediate than recharge from precipitation. The flow rates related to these inflows are difficult to estimate and could be better quantified with the use of a numerical model.

6.5.6 Discharge areas

In southern Alberta, the natural discharge of the MRA has been identified to occur in springs and seeps located on the southern bank of the Milk River and its tributaries (e.g., Verdigris Coulee, Red Creek) whereas in northern Montana discharge occurs in the Sweet Grass Hills area, along Cut Bank Creek and the Virgelle escarpment (Tuck 1993; Meyboom 1960; Zimmerman 1967; Milk River Watershed Council Canada 2008). Indeed, as shown in Fig. 6.7, the slope of the potentiometric surface is steeper on the southern side when compared to the northern side of the Milk River. This strongly suggests that the Milk River intercepts a substantial volume of the northerly flowing groundwater in the MRA. To assess the magnitude of this water loss, the mean groundwater flux down-gradient from the Milk River was estimated to about $0.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ (using the same calculation used to estimate the transboundary flux) with a mean T of $5.1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ and a mean hydraulic gradient of 0.2 %. Comparing this flux value to the mean groundwater flux up-gradient of the Milk River ($9.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$) suggests that 96 % of the incoming groundwater flux is intercepted by the Milk River and its tributaries after it crosses the international border. The intercepting role of the Milk River is consistent with Berkenpas (1991). In the south-eastern part of the study area near the border (region A or “no-flow area” from Berkenpas (1991)), the estimate of the elevation of the water yields a similar elevation as that of the Milk River. This suggests that the greater heads up-gradient of the Milk River are not transmitted beyond the

river and that the river intercepts the groundwater flow. In Montana, the natural discharge from springs and seeps in the Sweet Grass Hills area was previously estimated at about $0.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ (Tuck 1993). These springs are probably rejected recharge which occurs along the island mountain ranges throughout Montana and are not considered part of the regional groundwater flow system. Rejected recharge occurs at the toe of the mountain recharge areas as a result of dramatically reduced transmissivity of the aquifer away from recharge areas (Huntoon 1985).

6.5.7 Cross formational flow

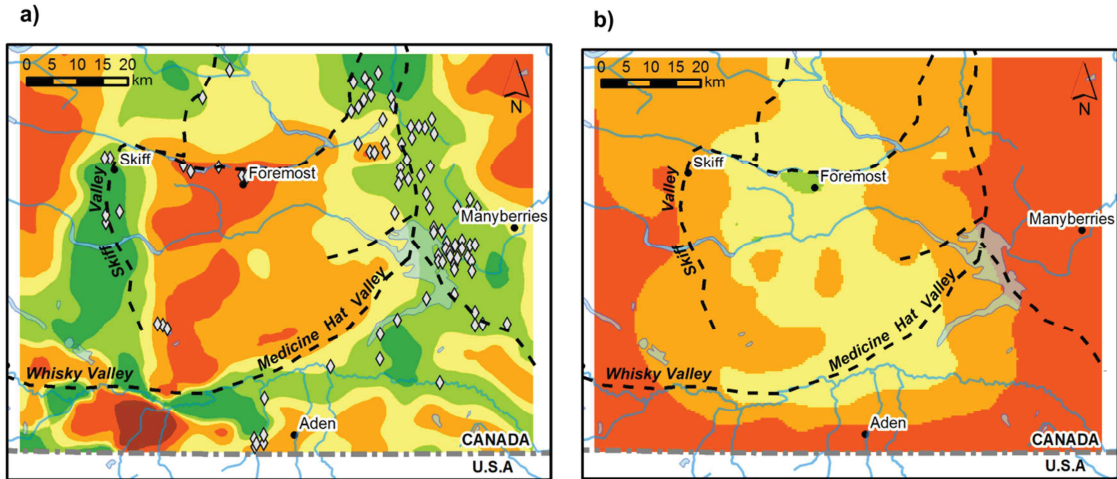
As no other natural surface outlets have been identified, vertical leakage (or cross-formational flow) from the aquifer through the overlying and underlying geological units must be considered the dominant cause of natural discharge. To estimate the driving forces in place for cross-formational groundwater flow, the vertical hydraulic gradients between the MRA and the overlying and underlying units were calculated and represented spatially in southern Alberta where adequate data were available (Fig. 6.8). In Montana, cross-formational flow is not considered a major issue near the regional recharge area where infiltration enters the MRA but could be in the south-eastern part of the MRA where there is a lack of data to allow an estimation of the magnitude of this process. Hydraulic heads in the MRA were obtained from AGRA Earth and Environmental (1998), the surficial aquifer heads are from Swanick (1982) and the Bow Island Sandstone heads are from Lies and Letourneau (1995). The average thickness of the Colorado Group between the MRA and the Bow Island Sandstone was assumed to be 400 m based on data from Swanick (1982) and Phillips et al. (1986) whereas the thickness distribution between the MRA and base of the surficial sediments was obtained from the 3D geological model of Pétré et al. (2015). In these calculations, a negative vertical gradient indicates a potential for upward flow whereas a positive gradient indicates a potential for downward flow. Plots of calculated vertical gradients are presented in Figure 6.8. The vertical hydraulic gradients between surficial sediments and the MRA are negative in the vicinity of the Medicine Hat, Skiff and Whisky buried valleys, which indicates an upward flow component from the MRA towards the surficial sediments (discharge conditions). The upward flow component is also confirmed by the presence of many flowing artesian wells in the areas with more negative vertical gradients (Fig. 6.8a). In the remaining areas, including the central part of the study area and the topographic highs, the vertical hydraulic gradients are positive, indicating a downward flow component from surficial sediments to the MRA. In the central part of the study area this downward flow is attributed to depressed water levels in the MRA resulting from high pumping

rates for long periods, whereas near the USA border it is related to recharge conditions. As depicted in the schematic diagram of Fig. 6.8c, the high topographic area of the Cypress Hills is also presumed to be a regional recharge area for surficial sediments whose large hydraulic heads induce downward flow through the aquitard overlying the MRA thus explaining the high potentiometric heads observed east of Manyberries (Fig. 6.7). This cross-formational flow process was also inferred by Toth and Corbet (1986).

By comparing the hydraulic heads in the surficial aquifer, the MRA and the Bow Island sandstone on a cross-section, Phillips et al. (1986) concluded that the water leaves the aquifer via vertical leakage. From Fig. 6.8a, it appears that cross-formational flow focused on the buried valley talwegs that have eroded the upper bedrock (Belly River/Judith River and Pakowki/Claggett Formations), thus reducing the vertical distance between the MRA and permeable surficial sediments. Besides, the Pakowki/Claggett Aquitard overlying the MRA thins from about 130-100 m in the west and central parts of the study area to 40-60 m west of Skiff. This could also facilitate vertical leakage.

Fig. 6.8a supports the interpretation of Toth and Corbet (1986) who state that the topographic highs in the study areas constitute areas of recharge to the MRA. Toth and Corbet (1986) had also drawn a potentiometric map of the MRA that took into account the presence of buried valleys that were inferred to be zones of flow convergence in the MRA due to the preferential cross-formational upward flow from the MRA where buried valleys are located.

The vertical hydraulic gradient between the MRA and the Bow Island sandstone is positive in southern Alberta (Fig. 6.8b). This indicates a downward flow component from the aquifer to the Colorado Group throughout southern Alberta. However, the vertical gradient is very small, approximately zero in the Foremost area and is attributed to a depression in the hydraulic head from extensive historical pumping. This downward flow is consistent with the suggestion from Toth and Corbet (1986) and Hendry and Schwartz (1988) that the Colorado Group is a potential sink for water from the MRA. This mechanism could result from the elastic rebound of the shales in the Colorado Group after the 700 m erosion of the land surface during the Pliocene and Pleistocene (Toth and Corbet 1986). Fig. 6.8c summarizes the implications of the mapped vertical hydraulic gradients on cross-formational flow to and from the MRA using a schematic cross-section of the aquifer system.



Legend

- Bedrock valley talweg
- ◇ Flowing wells (AGRA 1998)

Vertical hydraulic gradient



c)

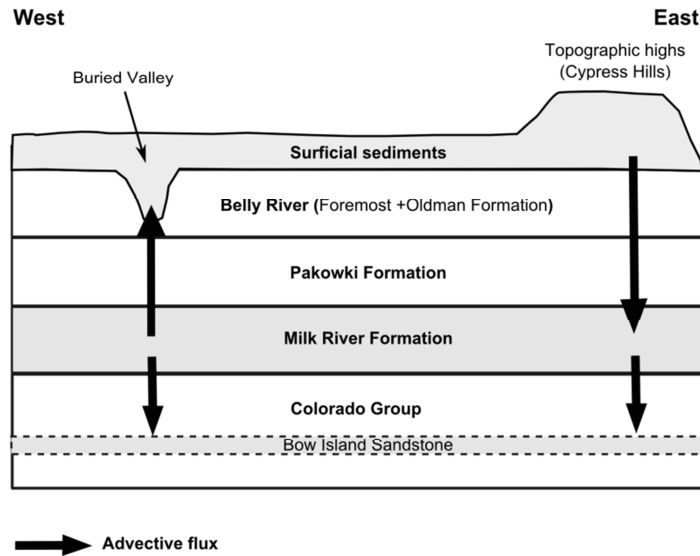


Figure 6.8 Vertical hydraulic gradients in southern Alberta between a overlying surficial sediments and the MRA and b the MRA and the underlying Bow Island Sandstone. Negatives values reflect upward flow. c Vertical flow tendencies schematically represented in the diagram (not to scale)

The same calculations were not applied in Montana due to a lack of data. However, east of the Sweet Grass Arch, in the vicinity of Big Sandy Creek, the heads in the Judith River Formation (equivalent of Belly River Formation) (Levings 1982b) are lower than those in the Milk River Formation (Eagle Formation) (Levings 1982a). These data indicate an upward cross-formational flow component from the aquifer to the surficial sediments in this area. Although the fluxes related to this upward flow could not be quantified, they are inferred to be small because the MRA is deep in this part of the system.

6.6 Hydrogeochemical conditions

The groundwater geochemistry of the MRA provides key indications that can be used for the development of the aquifer system conceptual model. Geochemical patterns of chemical components and isotopes provide indications on how the aquifer system functions and the geochemical and flow processes that may take place.

6.6.1 Water types and major ions

Groundwater chemical analyses for the MRA were obtained from various sources in Alberta and Montana, including Wozniak et al. (2011); GWIC (2015); Tuck (1993); PFRA (unpublished report, 2006) and Milk River Watershed Council Canada (2011). In addition, chemical analyses of samples from the MiRTAP field work in Montana (in 2013) were included. Only water analyses with a charge balance error less than +/- 10 % were used. This resulted in a dataset of 151 samples (Appendix V). Major cations and anions were used to determine the groundwater type. The proportions of major ions are presented on a Piper diagram (Piper 1944) (Fig. 6.9a). Six water types were defined, and their spatial distribution presented in Fig. 6.9b

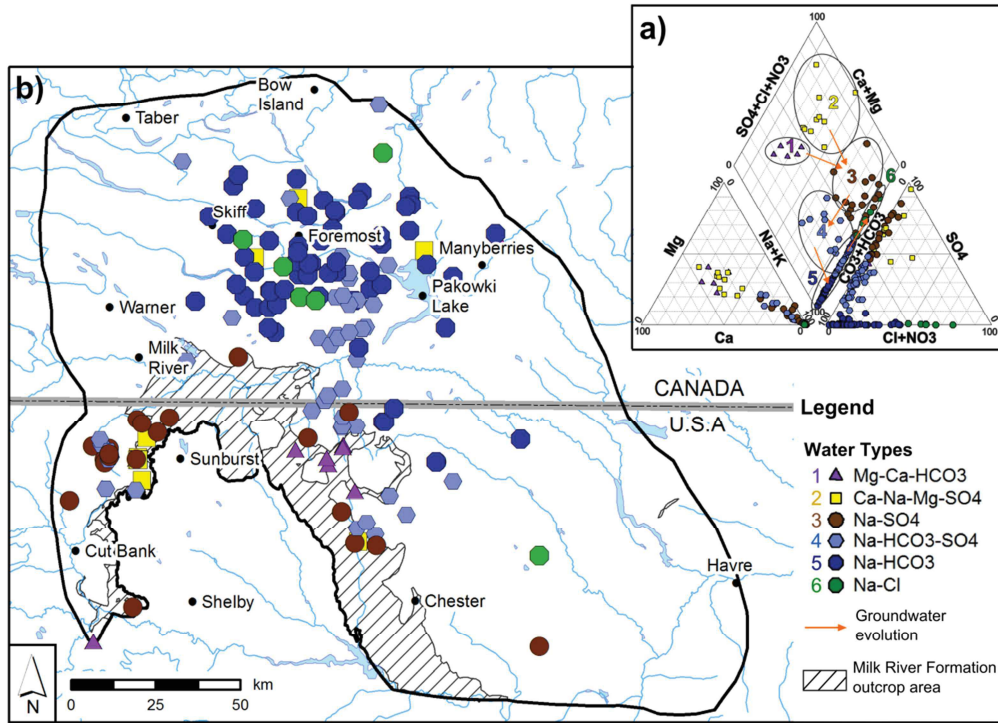


Figure 6.9 a) Piper diagram showing the six water types identified in the MRA b) Spatial distribution of groundwater types in the study area

Table 6.2 presents the location of water types in the MRA from the compiled water sampling dataset. Group 1 water also included some sulfates occurring as a minor ion. Sulfate-dominant type (Na-SO_4 , Mg-SO_4 and Ca-SO_4) are located mostly in northern Montana and southern Alberta, in the vicinity of the subcrop areas of the Milk River Formation. Sodium-chloride type is found in the less transmissive parts of the study area. In the south-eastern corner of the study area, recent data are scarce but Swenson (1957) indicates that sodium-chloride (Na-Cl) type is prevalent.

Table 6-2 Location of water types in the MRA

Group number	Water Type	Location of Positive Samples
1	Ca-Mg-HCO ₃	Sweet Grass Hills
2	Mixed cations-SO ₄	Outcrop area (Montana) and central part of the study area
3	Na-SO ₄	Outcrop area
4	Na-HCO ₃ -SO ₄	Downgradient of the outcrop area
5	Na-HCO ₃	Prevalent in Alberta and along the international border in Montana
6	Na-Cl	Less transmissive parts of the study area

Based on the general flowpaths defined in Fig. 6.7, the inferred evolution of the MRA waters is essentially from Groups 1 and 2 to Groups 3, 4, 5 and 6. Several processes have been proposed to explain the observed changes in water composition as the water flows down-gradient (Table 6.3).

Table 6-3 Proposed processes explaining the geochemical patterns in the MRA

Geochemical evolution	Proposed Process	References
Presence of SO_4^{2-} in outcrop area	Percolation of freshwater through the glacial till	Swanick(1982), Robertson (1988), Hendry and Schwartz (1990)
Decrease in SO_4^{2-} down-gradient	Sulfate reduction	Schwartz and Muelhenbachs (1979), Swanick (1982), Phillips et al. (1986), Drimmie et al. (1991)
	Geological control	Hendry and Schwartz (1990)
Increase in Na^+ and decrease in Ca^{2+} and Mg^{2+} down-gradient	Ion exchange	Schwartz and Muelhenbachs 1979, Swanick (1982), Phillips et al. (1986), Robertson (1988)
	Diffusion of Na from the confining shales	Hendry and Schwartz (1990)
Increase in HCO_3^- down-gradient	Calcite dissolution	Meyboom (1960), Swanick (1982)
	Production of CO_2 during methanogenesis	Phillips et al. (1986)
Cl^- spatial distribution	Megascopic dispersion with upward leakage of connate water	Schwartz and Muelhenbachs (1979)
	Limited recharge area (displacement of connate water by large scale mixing with recharge water)	Domenico and Robbins (1985)
	Membrane filtration	Phillips et al. (1986)
	Aquitard diffusion (diffusion of Cl^- into the aquifer from shale confining units)	Hendry and Schwartz (1988)
	Internal saline source (diffusion of saline water from the less-permeable members of the Milk River Formation)	Fabryka-Martin et al. (1991)

The spatial distribution of individual major ions (Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-}) in southern Alberta was described by Schwartz and Muehlenbachs (1979); Schwartz et al. (1981) and Hendry and Schwartz (1990). Transboundary maps for these ions are presented by Rivera et al. (Geological Survey of Canada, Quebec, Canada, unpublished report, 2016). With the exception of sulfate, the concentration of major ions increases progressively along the flowpaths from the recharge area. In this study, the chloride (Cl^-) concentrations are described in detail, as chloride is considered as a conservative tracer in the aquifer system.

Figure 6.10 shows the spatial distribution of Cl^- concentrations in the MRA. Cl^- concentrations increase from the recharge area to the north in Alberta and to the south-east and south-west in Montana. This increase follows the general groundwater flow paths. However, the Cl^- concentration pattern in southern Alberta is complex. Indeed, two protrusions of more dilute waters are present in southern Alberta (Fig. 6.10). The area of dilute water can be extended to the east in southern Alberta, near Lake Pakowki. These areas correspond to the most transmissive parts of the MRA (Fig. 6.6). This pattern is also shown in southern Alberta in the spatial distribution of other halogens and stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) (Hendry and Schwartz 1990; Fabryka-Martin et al. 1991). These data are not available for Montana.

Hendry and Schwartz (1988) used the Cl^- distribution in the MRA to determine the main groundwater flowpaths, assuming that the groundwater flow followed areas from low to higher Cl^- concentration. They considered that hydraulic heads were not appropriate for the delineation of the groundwater flow paths that have dominated over geological time as they represent modern conditions influenced by pumping activities (Fröhlich et al. 1991). Thus, eastern and western flowpaths were delineated, following the two protrusions of low Cl^- , on both sides of the low- T area (Fig. 6.10). Moreover, the transboundary map of Cl^- also shows that a flowpath directed towards Lake Pakowki should exist as well as another flowpath to the southeast in Montana. Preferential flowpaths inferred from low Cl^- concentrations are coherent with indications provided by the potentiometric map and also correspond to zones of higher transmissivity (Fig. 6.6). The configuration of Cl^- concentration in southern Alberta suggests that the dilute recharge waters displace connate waters along the most transmissive portions of the aquifer, instead of following a uniform recharge front (Fabryka-Martin et al. 1991). Evidence of this may be the high Cl^- waters found south of Foremost and east of Chester in Montana, which are less permeable zones (Figs. 6.10 and 6.6a).

Five processes have been proposed to explain the chloride concentration pattern observed in the MRA (Table 6.3): (1) megascopic dispersion with upward leakage of connate water (Schwartz and Muehlenbachs 1979); (2) displacement of connate water by large-scale mixing with recharge water (Domenico and Robbins 1985); (3) membrane filtration (Phillips et al. 1986); (4) diffusion of Cl^- into the aquifer from shale confining units (Hendry and Schwartz 1988) and (5) diffusion of saline water from the less-permeable members of the Milk River Formation (internal saline source) (Fabryka-Martin et al. 1991). Beside diffusion from an internal saline source, Fabryka-Martin et al. (1991) indicate that the first four mechanisms “cannot be ruled out altogether and are probably contributing to the groundwater geochemistry to some extent”.

The geochemical transboundary maps (Fig. 6.9b and 6.10) suggest that the evolution of water types in the MRA is similar in Alberta and Montana, although more evolved water types are present in Alberta. It can then be assumed that the geochemical water types in the MRA are continuous across the international border and that some of the proposed processes in southern Alberta (Table 6.3) might also be active in Montana. However, a full geochemical study including a complete dataset on both sides of the border would be necessary in order to determine which of the previously cited processes are truly controlling groundwater geochemistry.

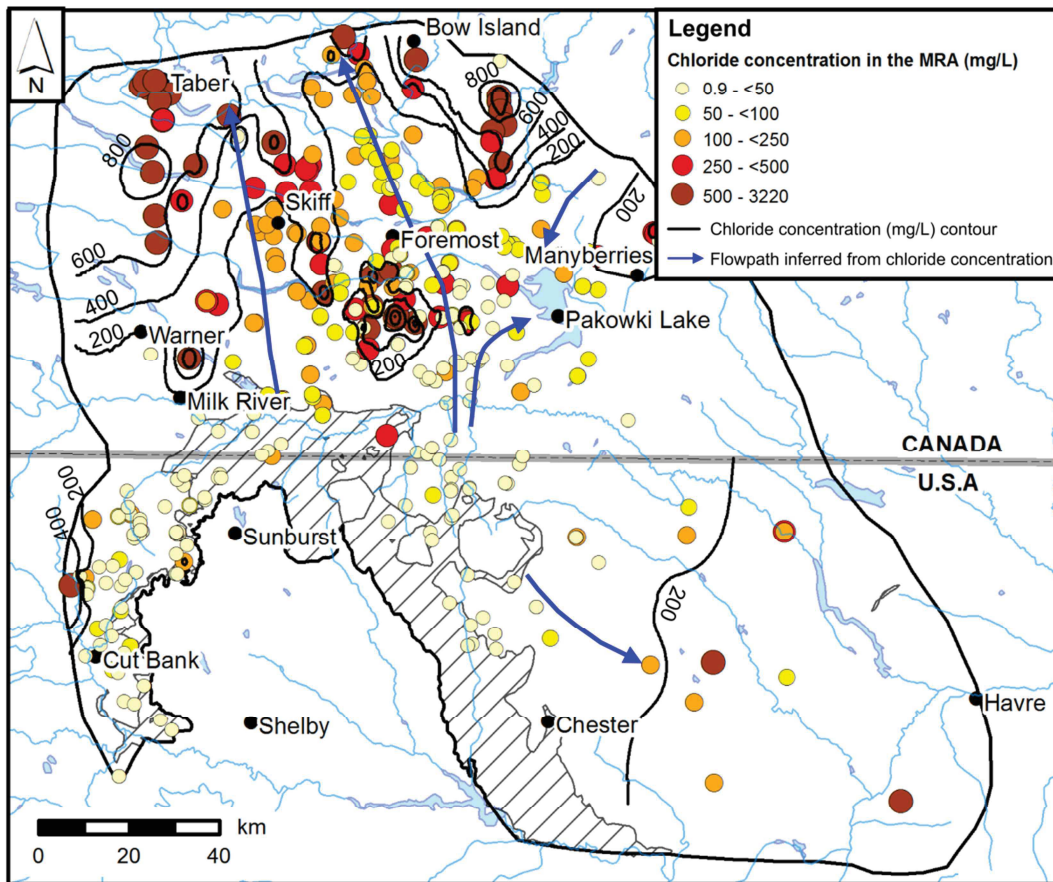


Figure 6.10 Cl concentrations in the MRA. Contour interval is 200 mg/L. Preferential flowpaths indicated by *blue arrows* are inferred from low Cl concentrations

6.6.2 Stable and Radiogenic Isotopes

To provide a unified portrait of the aquifer, recent isotopic analyses (^3H , ^{14}C , ^{13}C and ^{36}Cl) of samples from the MiRTAP field work were added to the historical dataset.

Radioactive isotopes such as ^3H , ^{14}C and ^{36}Cl are commonly used for groundwater dating (Kazemi et al. 2006). In the perspective of an effective management of groundwater resources, groundwater residence time is an important parameter, as old waters within an aquifer system generally indicate that the resource may not be being renewed.

In 1984, an International Atomic Energy Agency (IAEA) sponsored study was conducted on the MRA in Alberta to test methods for dating old groundwaters. A series of papers resulted from this study (Ivanovich et al. 1991) and a comprehensive review of these studies has been proposed by Fröhlich et al. (1991) and Fröhlich (2013). The MRA has been described as complex both in terms of groundwater origin and the evolution of its chemical and isotopic contents (Fröhlich et al. 1991).

Available isotopic data for ^3H , ^{14}C , ^{13}C and ^{36}Cl are shown on maps in Fig. 6.11. The recent MiRTAP data are mostly collected to fill in data gaps, especially in Montana and east of Lake Pakowki in Alberta.

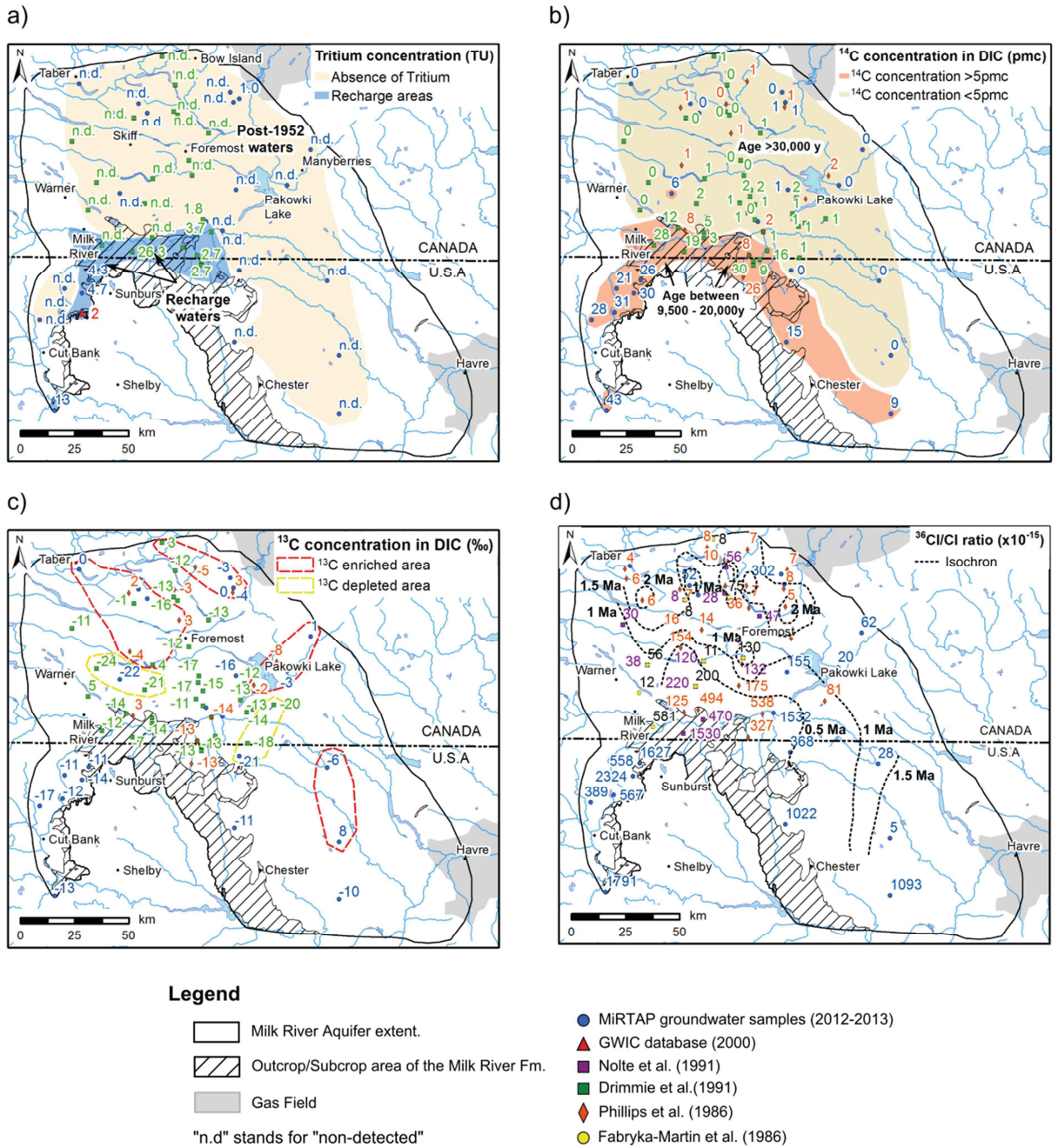


Figure 6.11 Isotopic maps of the MRA; a ^3H concentration (in tritium units, TU) b ^{14}C concentration in dissolved inorganic carbon (DIC, in percent modern carbon) c $\delta^{13}\text{C}$ concentration in dissolved inorganic carbon (‰) d $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ ratio ($\times 10^{-15}$) and mean age calculated from equation (1) (see Appendix; Bentley et al. (1986))

Fig. 6.11a illustrates the tritium values from three sources: the recent MiRTAP field work, the GWIC database (only one analysis available in 2000) and Drimmie et al. (1991). A qualitative interpretation of tritium data can be made as detectable concentrations of tritium (half-life of 12.3

years) indicate a component of modern recharge (Clark and Fritz 1997). In most sampling sites, tritium concentrations are below the detection limit (0.8 TU), which indicates post-1952 waters. Detectable tritium concentrations were measured in the outcrop areas of the Milk River Formation both in southern Alberta and northern Montana. The absence of tritium in the central part of the study area is consistent with Lehman et al. (1991) who tested ^{85}Kr (half-life of 10.6 years) on a water well located 20 km north of the Milk River, and observed that no young water component was present.

The ^{14}C (half-life of 5,730 years) data are presented in Fig. 6.11b. They are reported in dissolved inorganic carbon (DIC) as percent modern carbon (pmc) as defined by Stuiver and Polach (1977). Recent data collected through the MiRTAP project are consistent with the historical data. Most locations in Alberta have ^{14}C values ranging from below the detection limit to 2 pmc, indicating that the groundwater has very little to no ^{14}C . Therefore, the residence time of groundwater is greater than 30,000 years in the areas with a low ^{14}C value (Clark and Fritz 1997). Higher ^{14}C values were measured near the US-Canada border, in the outcrop area of the Milk River Formation, in the vicinity of the Sweet Grass Hills, and in the entire southwest corner of the study area. Estimated uncorrected ^{14}C groundwater age in this area varies from 9,500 to 20,000 years. This range is consistent with Wassenaar et al. (1991) who obtained ^{14}C ages of 6,300 y and 22,600 y for two wells south of the Milk River from dissolved organic carbon.

Figure 6.11c illustrates the spatial distribution of $\delta^{13}\text{C}$ values for the MRA as well as the zones where $\delta^{13}\text{C}$ is depleted or enriched. The recent results (MiRTAP samples) are consistent with historical data (Phillips et al. 1986; Drimmie et al. 1991). The red polygons indicate locations where $\delta^{13}\text{C}$ values are enriched and yellow ones where $\delta^{13}\text{C}$ values are depleted. In either case, there is no radiocarbon left at those locations. The enriched $\delta^{13}\text{C}$ values in the northern part of the study area may be due to calcite solution and methanogenic CO_2 (Phillips et al. 1986; Drimmie et al. 1991; Clark and Fritz 1997). The lowest $\delta^{13}\text{C}$ values indicate methane oxidation or organic carbon reduction (Drimmie et al. 1991; Clark and Fritz 1997).

As there is no ^{14}C signal beyond the Milk River, chlorine -36 (half-life 301,000 years) was chosen as a dating tool for the groundwater in the remaining part of the study area (Phillips et al. 1986; Fabryka-Martin et al. 1991; Nolte et al. 1991). Recent ^{36}Cl data obtained from the current study were added to the historical data. The spatial distribution of the $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ ratio in the study area shows that the ratios decrease with distance down the flow lines, as Cl concentration increases (Fig. 6.11d). In the northern part of the study area and south-east of the Sweet Grass Hills, the $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ ratio reaches a value of about 4 to 8×10^{-15} . This range corresponds to the secular

equilibrium value in sandstone (i.e. production rate equals the decay rate) (Bentley et al. 1986). The large area with secular equilibrium indicates that the chlorine at the distal end of the MRA is older than 2.5 Ma (Bentley et al. 1986). Isochrons based on $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ ratios were previously mapped by Phillips et al. (1986) in southern Alberta. To update and extend isochrons into Montana, ages have been calculated using the standard equation from Bentley et al. (1986), as previously done by Phillips et al. (1986) (see Appendix). It is noteworthy that different corrections to this standard equation can be used, depending on the process considered (aquitard diffusion, mineral dissolution) (Bentley et al. 1986).

Samples with measurable radiocarbon or tritium were rejected as they are too young to be dated by ^{36}Cl . The initial $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ ratio value has been updated from 500×10^{-15} (Phillips et al. 1986) to 1000×10^{-15} (Davis et al. 2000). The resulting isochrons range from 0.5 Ma up-gradient to 2 Ma down-gradient (Fig. 6.11d). This range of values should be considered as a time frame in the regional transboundary transport of solutes within the system. This extended map shows an increase in age eastward along the international border and south-east in Montana. The presence of very old waters in this area is consistent with the hydrodynamics of the MRA and the evolved geochemical water types that are observed.

Water ages derived from isotopic data are generally greater than those obtained from hydraulic data (Bethke and Johnson 2002). Schwartz and Muelhenbachs (1979) present a maximum age of the MRA waters of 300,000 years based solely on hydraulic arguments. Swanick (1982) obtained ages up to 500,000 years near Taber from a steady-state quasi three-dimensional model. Hendry and Schwartz (1988) used a hydrodynamic model to calculate ages of 250,000 and 500,000 years for the eastern and western flowpaths in southern Alberta (Fig. 6.10), respectively. Several factors explain the difference between the hydrodynamic age and the isotopic age. In a heterogeneous aquifer, the comparison between isotopic age and advective ages may not be relevant since there is a dispersion mechanism occurring within the aquifer. Besides, the glaciations during the Pleistocene may have limited the water movement in the MRA and this effect could be taken into account in the estimation of the water age (Bentley et al. 1986; Fabryka-Martin et al. 1991). Fröhlich et al. (1991) and Fabryka-Martin et al. (1991) suggested that groundwater ages obtained from hydrodynamic models should be envisaged as a lower limit of the average groundwater ages while those based on ^{36}Cl data should be envisaged as an upper limit.

6.7 Conceptual model

The hydrogeological and geochemical evidence presented in the previous sections allowed the development of a comprehensive conceptual model of the MRA following its natural boundaries.

On the basis of groundwater divides inferred from the potentiometric map (Fig. 6.7), the MRA can be divided into three natural sub-systems, in which groundwater flows in different directions, and discharges into three distinct locations (Fig. 6.12). Zones 1, 2 and 3 were delineated. Zone 1 corresponds to the area where groundwater flows from northern Montana to southern Alberta. A distinction is made between the portion located up-gradient (zone 1a) and down-gradient from the Milk River (zone 1b), which intercepts a large part of the transboundary flux coming from northern Montana. Zone 1b also includes the groundwater flow from the Cypress Hills. Zone 2 comprises the south-eastern part of the study area in Montana, in which groundwater flows from the Sweet Grass Hills and Bears Paw Mountains to the Big Sandy Creek area. Zone 3 is located in the south-western part of the study area.

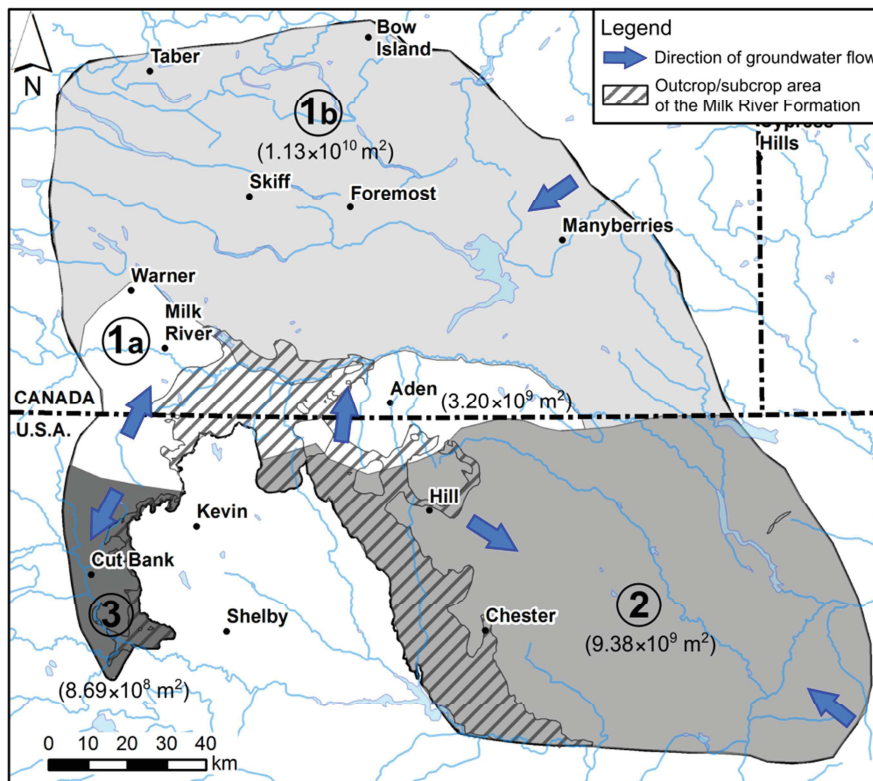


Figure 6.12. Delineation of three natural zones (zone 1a/b, zone 2, and zone 3) of the MRA and their surface areas

The MRA is under unconfined or semi-confined conditions in the outcrop and subcrop areas of the Virgelle Member as shown on the conceptual hydrogeological cross-section in Fig. 6.13. The level of confinement of the aquifer is due to changes in surface topography, especially due to the presence of coulee and river valleys and the presence of buried valleys eroding part of the aquitards above the MRA. The MRA presents flowing artesian conditions in the northern part of the study area. The study of the groundwater flow and the quantification of the fluxes up-gradient and down-gradient from the Milk River show the main discharge mechanism of the MRA in southern Alberta was from interception of flow by the Milk River. Several studies established that the Milk River acted as a point of discharge for the MRA rather than recharge (Meyboom 1960; Robertson 1988; Drimmie et al. 1991, Fröhlich 2013). However, previous estimates of the volume of the springs and seeps along the Milk River were about $5.8 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ (Meyboom 1960) or $9.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (Robertson 1988). These values are lower than the current estimate of about $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ because they were obtained considering that the discharge into the river only takes place along the 30 km outcrop of Virgelle Member, where it is incised by the Milk River (Fig. 6.2). The potentiometric map (Fig. 6.7) as well as the isotopic data (Fig. 6.11) rather indicate that the groundwater flow is intercepted along the entire length of the Milk River in Alberta and part of the Verdigris Coulee even if the hydraulic connection is indirect. This mechanism could be supported by the buried valley located underneath the present-day Milk River.

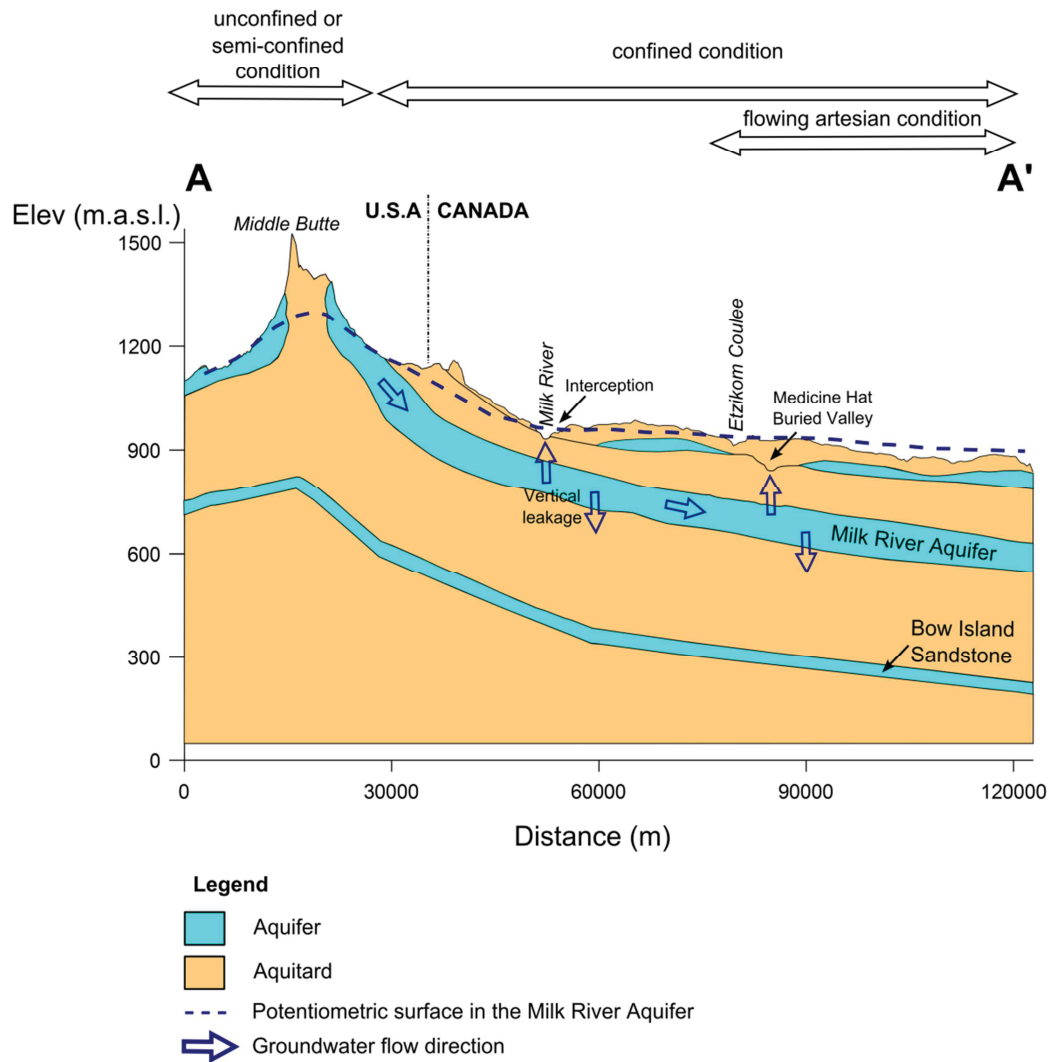


Figure 6.13 Hydrogeological cross-section of the MRA located along a flow line. Location of the cross-section is shown on Fig. 6.2

The conceptual geochemical cross-section (Fig. 6.14) was produced from Figs. 6.9b and 6.11 and illustrates the evolution of the groundwater from the MRA down-gradient.

Modern water (defined by high tritium concentrations) is found in the outcrop areas near the border but also west of the Sweet Grass Arch. This suggests that the entire outcrop belt around the Sweet Grass Arch could act as a recharge area of the MRA. Furthermore, hydrographs of three monitoring wells of the MRA located in the outcrop branches in Montana (GWIC Id 88838, 45363 and 90371) show that water level fluctuations follow the meteorological changes, thus supporting the assumption that they are located in the recharge area. This assumption differs

from previous work where the emphasis was generally placed on the Sweet Grass Hills as the main recharge area (Meyboom 1960; Domenico and Robbins 1985).

There is no ^{14}C in the waters of the MRA beyond the Milk River. This suggests that a major part of the groundwater flow is intercepted by the Milk River. Therefore, the remaining flux and the hydraulic gradient are low beyond the river, resulting in low groundwater velocity and high groundwater residence time as indicated by isotopic tracers. In Montana, the disappearance of ^{14}C is simply due to the decay along the flowpath. Southwest of the Sweet Grass Arch in Montana, the decrease in ^{14}C values is less pronounced. This observation is consistent with the low chlorine concentration, the high transmissivity and the prevalence of little-evolved water types containing sulfates defining this area. These characteristics indicate that the groundwater flow is active in this part of the study area.

North of the Milk River and in the south-eastern part of the study area, old to very old waters (up to 2 Ma) are found, as shown by ^{36}Cl data. The groundwater flow is low and water types are more evolved. Berkenpas (1991) provided hydrogeological evidence south-east of the Lake Pakowki and south of Manyberries, indicating that a region with a no flow or very low groundwater flow (hydrostatic conditions) existed in the area. The evolved water type (Na-HCO_3) and the old water residence time in this area are consistent with this statement.

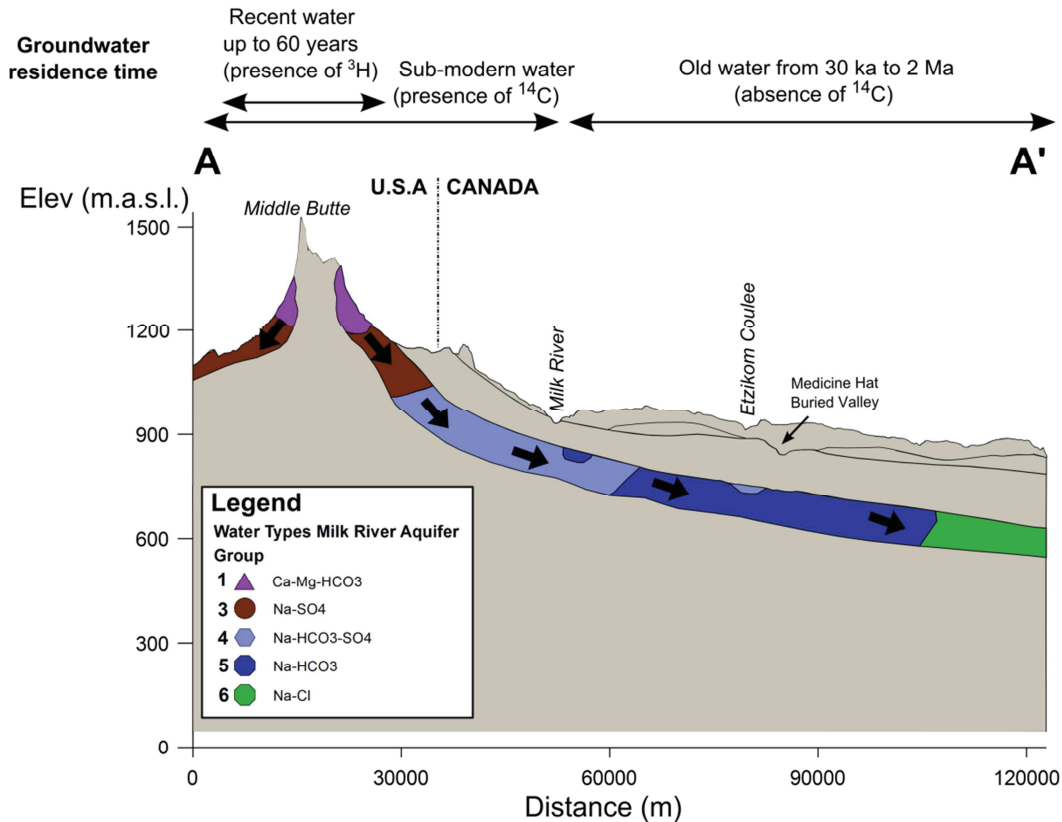


Figure 6.14 Geochemical conceptual model of the MRA represented by a schematic cross-section from the Sweet Grass Hills (Montana, USA) to the north-eastern limit of the MRA in Alberta, Canada. Water types are described accordingly with the spatial distribution on Fig 6.9b. Flow directions within the MRA are represented by *black arrows*. The groundwater residence time is indicated based on the isotopic data (ka is thousand year and Ma is million year)

Fig. 6.15 presents a plan view of the conceptual model of the MRA in which the areas of active recharge, active flow, low flow and discharge are delineated within the natural extent of the MRA. The area of active recharge corresponds to the presence of tritium in the MRA waters and is limited to the outcrop/subcrop areas of the MRA. Some groundwater may come from the topographic highs (Cypress Hills, Bears Paw Mountains). The area of active flow corresponds to the presence of ^{14}C and is located beyond the recharge area and up-gradient of the Milk River. The area of low flow is present in the major part of the study area and is defined by the absence of ^{14}C and old waters presenting evolved water types. Except for the Milk River, there is no natural direct discharge zone, but discharge or outflow may occur through vertical leakage along the buried valleys and through the underlying aquitards of the Colorado Group as shown by the vertical hydraulic gradient (Fig. 6.8). The vertical leakage could also be enhanced in the north-

western part of the study area, due to the gradual thinning of the Pakowki Formation (Swanick 1982; Pétré et al. 2015). In Montana, the potentiometric map indicates that the same mechanism is likely to occur as an upward flow from the Eagle Formation towards the Claggett and Judith River formations and into the surficial sediments of the Big Sandy Creek area. Besides, the presence of the Bears Paw Mountains in the south-east corner of the study area would prevent the groundwater flow to progress any further east and therefore incites the vertical leakage.

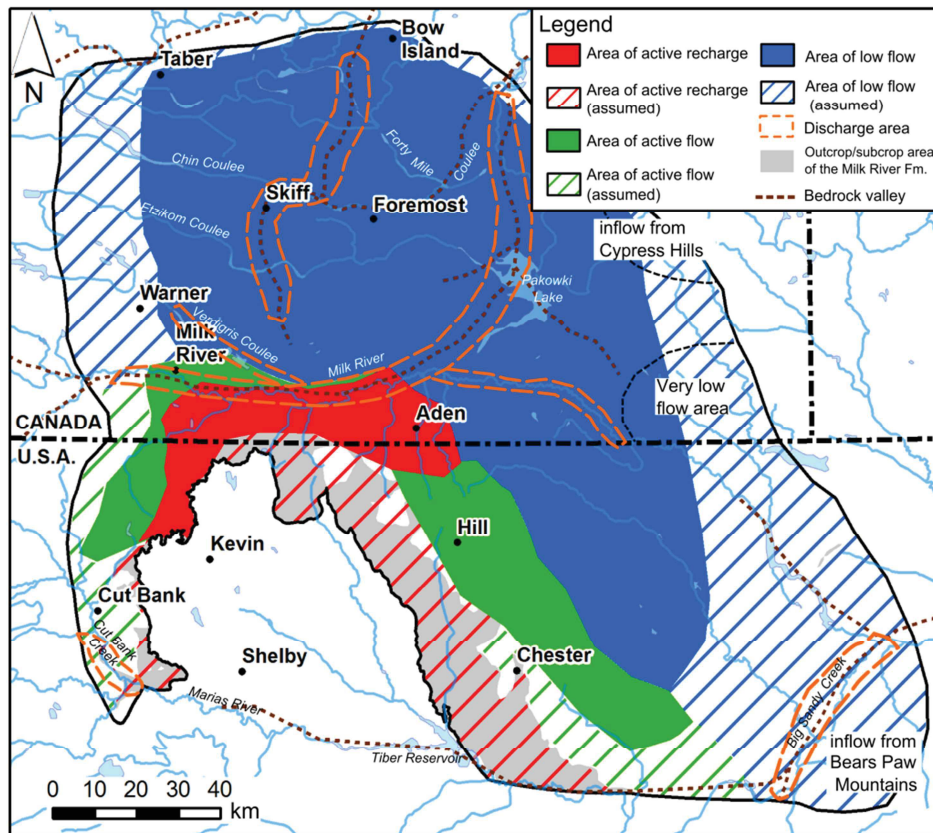


Figure 6.15 Plan view of the conceptual model of the MRA

6.8 Groundwater budget

Once the flow system and the relationship between the hydrostratigraphic units are well defined according to hydrogeological and geochemical data, the last step in building the conceptual model is the preparation of a water budget. As the concerns regarding the aquifer depletion are mostly present in southern Alberta, a detailed groundwater budget in zone 1 (Fig. 6.12) is proposed (Fig. 6.16).

The water balance equation states that under steady condition: outflow – inflow = change in storage (Anderson and Woessner 1992). The source of water to the aquifer system corresponds to the groundwater recharge from precipitation. Outflows include the part of the flow intercepted by the Milk River, the vertical leakage through overlying and underlying aquitards, pumping wells and flowing wells. The components of the groundwater budget have been estimated on a cross-section representing the annual water budget in zone 1 (Fig. 6.16a). A distinction is made between zone 1a and zone 1b since the remaining flow out of zone 1a (part of flow which is not intercepted by the Milk River) constitutes the inflow of zone 1b. For consistency, components are expressed as a water thickness equivalent uniformly distributed on the total surface of the considered area (i.e. $1.45 \times 10^{10} \text{ m}^2$). The values of the components are given in the 'Hydrogeological Setting' section. The vertical leakage fluxes directed upward and downward have been estimated from the vertical hydraulic gradient (Fig. 6.8). The magnitude of the vertical leakage through the aquitards and along the bedrock valleys depends on the vertical hydraulic conductivity of the units surrounding the MRA. These parameters are not well known over the regional study area, hence the large range of values. The amount of groundwater stored in the MRA was obtained by the product of the volume between the top of the aquifer and the potentiometric surface by the storage coefficient (3×10^{-4} ; Meyboom (1960)). This calculation has only been made where the potentiometric surface was defined in zone 1b (a surface of $7.43 \times 10^9 \text{ m}^2$). The mean distance between the potentiometric surface and the top of the MRA is about 171 m. The total amount of water stored in the MRA is about $380 \times 10^6 \text{ m}^3$. Fig. 6.16b shows a comparison between the different parameters, and the effective recharge in zone 1a is taken as a reference. As shown on Fig. 6.16a, most of the recharge is intercepted by the Milk River. The remaining flux transmitted beyond the Milk River is only about $0.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ (0.03 mm/y), i.e. up to ten times smaller than the sum of the outflows in zone 1b ($3.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ or 0.24 mm/y using maximum values). The human stress on the aquifer resource (through pumping and flowing wells) is the main outflow contribution north of the Milk River. Indeed, the location of the main groundwater users in southern Alberta is precisely down-gradient the Milk River (zone 1b), explaining the water budget deficit in this area. It is clear that given the very low inflow in zone 1b, the groundwater extracted from the aquifer mostly comes from storage, indicating a depletion of the MRA following the definition from Konikow and Kendy (2005). The situation can also be described as groundwater mining since exploitation of groundwater far exceeds groundwater renewal (Custodio 2002). Moreover, previous studies (Meyboom 1960; AGRA Earth and Environmental 1998; HCL consultants 2004) even estimated that exploitable reserve of the MRA may last less than 200 years in southern Alberta. However, the full implications of

the potential duration of exploitation of the resource will not be discussed further as they merit to be explored with a numerical model which constitutes the next stage in the transboundary study of the MRA.

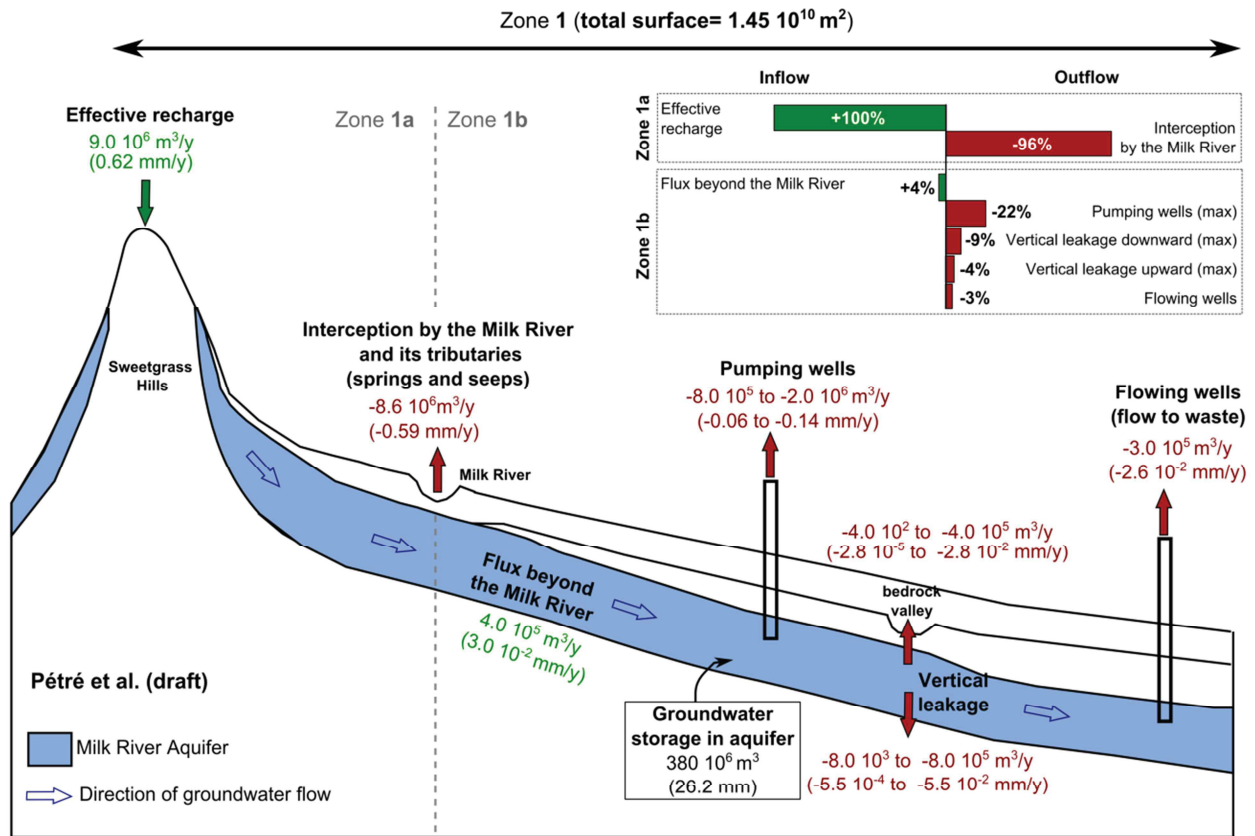


Figure 6.16 a Groundwater budget in zone 1 (see location on Fig. 6.2). The recharge located south of the Milk River (zone 1a) is mostly intercepted by the Milk River as the water flows down-gradient. The remaining flux beyond the Milk River corresponds to the inflow in zone 1b. b Comparison of the components of the budget which are in deficit in zone 1b. The reference of the scaling is taken from the recharge (100 %)

6.9 Conclusion

Hydrogeological and geochemical data on both sides of the Canada/USA border were gathered to produce the first transboundary conceptual model of the MRA. Compilation of historical studies and new field data contributed to expanding our understanding of the hydrogeology of the aquifer in northern Montana and southern Alberta. There is a clear delineation of the hydrogeological extent of the MRA and its three constituting sub-systems following the natural boundaries of the aquifer instead of the jurisdictional boundaries, as was done in previous studies. The eastern and western transboundary flowpaths from Montana into Alberta were identified and quantified. The fluxes from the Sweet Grass Hills and the Cut Bank area to the south in Montana were defined. The definition of the water types on both sides of the international border showed the continuity of the geochemical water types and the processes involved in the aquifer. The isotopic data (^3H , ^{14}C and ^{36}Cl) in Montana and Alberta showed that the entire outcrop belt around the Sweet Grass Arch corresponds to an area of recharge for the MRA. Changes in the lateral hydraulic gradient south and north of the Milk River suggest that the river intercepts a large component of the groundwater flowing north through the MRA. The study defined areas of active and low to very low groundwater flow. The discharge mechanism of the aquifer through the buried valleys both in Alberta and Montana was highlighted. The study also assessed historic and current groundwater uses in the MRA and proposed an aquifer-scale water budget. Overall, the MRA is not significantly renewed; with the exception of the recharge area it corresponds to a fossil resource. This conceptual model is a major component of the transboundary study of the MRA. Along with the previous unified geological model, it will form the basis for the future development of a numerical 3D groundwater flow model of the aquifer. The mathematical model will be used to test the conceptual model and to propose the best possible uses of this valuable resource that is shared by Canada and the United States of America. It is expected that the building of this conceptual model of the transboundary nature of the MRA will provide the knowledge and the tools as mechanisms for transboundary cooperation and shared management between the two countries.

6.10 Acknowledgments

We thank the Groundwater Geoscience Program of the Geological Survey of Canada for financial support of this work within MiRTAP (Milk River Transboundary Aquifer Project). We are grateful to Tim Romanow, Sandy Riemersma, Mary Lupwayi and John Ross from the Milk River Watershed Council Canada, as well as Daryl Jaques (Agriculture and Agri-Food Canada) and Clarisse Deschênes-Rancourt (INRS-ETE) for their support during the field work in Alberta. We are also thankful to Kyle Blasch, Jill Frankforter, Joanna Thamke and Lori Tuck from the USGS office in Helena, Montana, for their precious help during the Montana field campaign. We thank Ryan Davison (Davison Environmental Consulting) for the complementary field work in Alberta. Thanks are due to Dave Matz (County of Forty Mile, Alberta) for giving permission to use unpublished inorganic chemistry data originating from the 2006 Milk River Aquifer pump test program and the Groundwater Monitoring Project (joint project with Agriculture and Agrifood Canada/PFRA and Alberta Environment). Jeff Gutsell (Alberta Environment and Parks), Steve Grasby (GSC-Calgary), Tony Lemay and Dan Palombi (Alberta Energy Regulator, Edmonton) are also thanked for their constructive comments on an early version of this paper. This is Earth Sciences Sector contribution number 20150304.

6.11 Appendix

The following standard equation was used to obtain ages from $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ ratios (Bentley et al. 1986).

$$t = -\frac{1}{\lambda_{36}} \ln \frac{R - R_{se}}{R_0 - R_{se}} \quad (1)$$

Where t is time (s), λ_{36} is the ^{36}Cl decay constant ($2.3 \times 10^{-6} / \text{a}$), R is the measured $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ ratio, R_0 the initial $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ ratio and R_{se} is the secular equilibrium $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ ratio.

6.12 References

- AGRA Earth and Environmental (1998) Evaluation of depletion of the Milk River aquifer. AGRA Earth & Environmental, Edmonton
- Alberta Environment and Parks (2015) Groundwater Observation Well Network. <http://esrd.alberta.ca/water/programs-and-services/groundwater/groundwater-observation-well-network/default.aspx>. Accessed March 2015
- Alberta Innovates Technology Futures (2010) Milk River Aquifer Hydrogeology Report. Prepared for the Geological Survey of Canada, Quebec Division
- Anderson MP, Woessner WW (1992) Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. Gulf Professional Publishing
- Anna LO (2011) Effects of groundwater flow on the distribution of biogenic gas in parts of the northern Great Plains of Canada and United States. U.S. Geological Survey
- Atkinson N, Utting DJ, Pawley SM (2014) Glacial Landforms of Alberta, Canada. Map 604. Alberta Geological Survey.
- Bentley HW, Phillips FM, Davis SN (1986) Chlorine-36 in the terrestrial environment. *Handb Environ Isot Geochem* 2:427–480
- Berkenpas PG (1991) The Milk River Shallow Gas Pool: Role of the Updip Water Trap and Connate Water in Gas Production From the Pool. Society of Petroleum Engineers
- Bethke CM, Johnson TM (2002) Paradox of groundwater age: Correction. *Geology* 30:385–388
- Borneuf DM (1976) Hydrogeology of the Foremost Area. Alberta Research Council, Earth Sciences Report 1974-04
- Borneuf DM (1974) Hydrogeological map of the Foremost area, Alberta : NTS mapsheets 72E. Alberta Geological Survey, Map 110
- Bredehoeft J (2005) The conceptualization model problem—surprise. *Hydrogeol J* 13:37–46
- Chen Z, Shuai Y, Wang N (2015) A reassessment of gas resources in selected Upper Cretaceous biogenic gas accumulations in southeastern Alberta and southwestern Saskatchewan, Canada. *Bull Can Pet Geol* 63:5–19. doi: 10.2113/gscpgbull.63.1.5
- Clark ID, Fritz P (1997) *Environmental Isotopes in Hydrogeology*, 1 edition. CRC Press, Boca Raton, Florida

Climate Canada (2015) Canadian Climate Normals. 1981-2010 Climate Normals and Averages. http://climate.weather.gc.ca/climate_normals/index_e.html. Accessed 12 January 2015

Collier AJ (1930) Contributions to economic geology (short papers and preliminary reports), 1929, Part II, Mineral fuels. The Kevin-Sunburst oil field and other possibilities of oil and gas in the Sweetgrass arch, Montana. United States Geological Survey

Colton RB, Lemke RW, Lindvall RM (1961) Glacial map of Montana east of the Rocky Mountains. US Geological Survey. IMAP 327, Scale 1:500,000

Cummings DI, Russell HA, Sharpe DR, Fisher TG (2012) Buried-valley aquifers in the Canadian Prairies: geology, hydrogeology, and origin. *Can J Earth Sci* 49:987–1004

Custodio E (2002) Aquifer overexploitation: what does it mean? *Hydrogeol J* 10:254–277

Domenico PA, Robbins GA (1985) The displacement of connate water from aquifers. *Geol Soc Am Bull - GEOL SOC AMER BULL.* doi: 10.1130/0016-7606(1985)962.0.CO;2

Dormaar JF (2010) The Alberta Stretch of the Milk River and the Mystique of Its Surrounding Landscape. Lethbridge Historical Society

Dormaar JF (2003) Sweetgrass Hills: A Natural and Cultural History. Lethbridge Historical Society

Dowling DB (1917) Southern plains of Alberta. Geological Survey of Canada, “A” Series Map 187A, 1917; 1 sheet, doi:10.4095/106740

Drimmie RJ, Aravena R, Wassenaar LI, et al. (1991) Radiocarbon and stable isotopes in water and dissolved constituents, Milk River aquifer, Alberta, Canada. *Appl Geochem* 6:381–392. doi: 10.1016/0883-2927(91)90038-Q

Environment and Climate Change Canada (2012) Water Availability in Canada. <http://www.ec.gc.ca/indicateurs-indicators/default.asp?lang=en&n=1B1433B4-1>. Accessed 4 May 2015

Fabryka-Martin J, Whittemore DO, Davis SN, et al. (1991) Geochemistry of halogens in the Milk River aquifer, Alberta, Canada. *Appl Geochem* 6:447–464. doi: 10.1016/0883-2927(91)90044-P

Farvolden RN, Meneley WA, Lebreton EG, et al. (1963) Early contributions to the groundwater hydrology of Alberta. *Alberta Res. Counc Bull* 12:123

Fröhlich K (2013) Milk river aquifer, Alberta, Canada — A case study. In: Suckow, A, Aggarwal PK, Araguás LA (eds) Isotope methods for dating old groundwater. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, p 259–272

Fröhlich K, Ivanovich M, Hendry MJ, et al. (1991) Application of isotopic methods to dating of very old groundwaters: Milk River aquifer, Alberta, Canada. *Appl Geochem* 6:465–472. doi: 10.1016/0883-2927(91)90045-Q

Fullerton DS, Colton RB (1986) Stratigraphy and correlation of the glacial deposits on the Montana Plains. *Quat Sci Rev* 5:69–82. doi: 10.1016/0277-3791(86)90176-9

GIN (2015) Groundwater Information Network. Natural Resources Canada. <http://gin.gw-info.net>. Accessed 21 December 2015

Golder Associates L (2004) Development of a Management/Protection plan for the Whisky Valley Aquifer, County of Warner, Alberta. Report submitted to the Milk River West Water Users Co-op Ltd, Milk River, Alberta

Government of Alberta (2006) Water conservation and allocation guideline for oil field injection. Government of Alberta, Edmonton, AB. 64p

Grasby SE, Betcher R, Maathuis H, Wozniak P (2014) Plains Hydrogeological Region. In: *Groundwater Resources in Canada*, Fitzhenry & Whiteside Limited. A. Rivera, Canada, pp 358–413

GWIC (2015) Ground Water Information Center; Montana Bureau of Mines and Geology; Montana Tech of the University of Montana. <http://mbmgwic.mtech.edu/>. Accessed 21 December 2015

HCL consultants (2004) County of Forty Mile No. 8, Parts of the South Saskatchewan River and Missouri River Basins. Regional Groundwater Assessment, Tp 001 to 013, R 05 to 14, W4M

HCL consultants (2007) M.D. of Taber, Part of the South Saskatchewan River Basin. Regional Groundwater Assessment, Parts of Tp 007 to 015, R 12 to 20, W4M

Hendry J, Schwartz FW, Robertson C (1991) Hydrogeology and hydrochemistry of the Milk River aquifer system, Alberta, Canada: a review. *Appl Geochem* 6:369–380. doi: 10.1016/0883-2927(91)90037-P

Hendry MJ, Buckland GD (1990) Causes of Soil Salinization: 1. A Basin in Southern Alberta, Canada. *Ground Water* 28:385–393. doi: 10.1111/j.1745-6584.1990.tb02268.x

Hendry MJ, Schwartz FW (1990) The Chemical Evolution of Ground Water in the Milk River Aquifer, Canada. *Ground Water* 28:253–261. doi: 10.1111/j.1745-6584.1990.tb02253.x

Hendry MJ, Schwartz FW (1988) An alternative view on the origin of chemical and isotopic patterns in groundwater from the Milk River Aquifer, Canada. *Water Resour Res* 24:1747–1763. doi: 10.1029/WR024i010p01747

Huntoon PW (1985) Rejection of recharge water from Madison Aquifer along eastern perimeter of Bighorn Artesian Basin, Wyoming. *Groundwater* 23:345–353

IGRAC (2015) International Groundwater Resources Assessment Center. Tranboundary Aquifer of the World 2015. Special edition for the 7th World Water Forum 2015. <http://www.unigrac.org/downloads>

Ivanovich M, Fröhlich K, Hendry MJ (1991) Dating very old groundwater, Milk River aquifer, Alberta, Canada. *Appl Geochem* 6:367–475

Konikow LF, Kendy E (2005) Groundwater depletion: A global problem. *Hydrogeol J* 13:317–320

Kresik N, Mikszewski A (2012) *Hydrogeological Conceptual Site Models: Data Analysis and Visualization*. CRC Press

Levings GW (1981) Selected drill-stem-test data from the Northern Great Plains area of Montana. United States Geological Survey. Open-File Report 81-326, scale 1:1,000,000

Levings GW (1982a) Potentiometric-surface map of water in the Eagle Sandstone and equivalent units in the Northern Great Plains area of Montana. United States Geological Survey. Open-File Report 82-565, scale 1:1,000,000

Levings GW (1982b) Potentiometric-surface map of water in the Judith River Formation in the Northern Great Plains area of Montana. United States Geological Survey. Open-File Report 82-562, scale 1:1,000,000

Lies H, Letourneau J (1995) Numerical modelling of the hydrodynamically trapped milk river gas field, Western Canada. *J Can Pet Technol* 34(10)

Lopez DA (2002) Geologic map of the Lonesome Lake 30' x 60' quadrangle, north-central Montana. Montana Bureau of Mines and Geology. Open-File Report 446, scale 1:100,000

MBOGC (2015) Montana Board of Oil and Gas Conservation. Department of Natural Resources and Conservation. MBOGC's Online Oil and Gas Information System. <http://bogc.dnrc.mt.gov/WebApps/DataMiner/MontanaMap.aspx>. Accessed 18 December 2015

MacCulloch G, Wagner-Watchel J (2010) Milk River Main Channel. Channel losses and gains assessment, Field study 2007. Preliminary Report. Environment Canada, Meteorological Service of Canada. Water Survey Division, Calgary, Alberta

Meyboom P (1960) Geology and groundwater resources of the Milk River sandstone in southern Alberta. Research Council of Alberta

Milk River Watershed Council Canada (2008) Milk river state of the watershed report 2008, Milk River Watershed Council Canada, Milk River, Alberta, p 155

Milk River Watershed Council Canada (2011) Synoptic Groundwater Quality Survey – Data File. Milk River Watershed Council Canada, Milk River, Alberta. Excel Spreadsheet

Milk River Watershed Council Canada (2013) Milk River Transboundary State of the Watershed Report, 2nd Edition. Compiled by Palliser Environmental Services Ltd. and prepared for Milk River Watershed Council Canada (Alberta) in collaboration with the Milk River Watershed Alliance (Montana). Milk River, Alberta. 238 pp.

NOAA (2015) National Oceanic and Atmospheric Administration. National Centers for Environmental Information. Data Tools: 1981-2010 Normals. <http://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/datatools/normals>. Accessed 12 January 2015

Nolte E, Krauthan P, Korschinek G, et al. (1991) Measurements and interpretations of ^{36}Cl in groundwater, Milk River aquifer, Alberta, Canada. *Appl Geochem* 6:435–445. doi: 10.1016/0883-2927(91)90043-O

Norbeck P M (2006) Sunburst water-supply renovation: April 2006 project report to the Montana Department of Natural Resources and Conservation. Open-File Report 548. Montana Bureau of Mines and Geology

Pétre M-A, Rivera A (2015) A synthesis of knowledge of the Milk River Transboundary Aquifer (Alberta, Canada - Montana, USA). Geological Survey of Canada, Open File 7654, 109p. doi:10.4095/295754

Pétre M-A, Rivera A, Lefebvre R (2015) Three-dimensional unified geological model of the Milk River Transboundary Aquifer (Alberta, Canada – Montana, USA). *Can J Earth Sci* 52:96–111. doi: 10.1139/cjes-2014-0079

Phillips FM, Bentley HW, Davis SN, et al. (1986) Chlorine 36 dating of very old groundwater: 2. Milk River Aquifer, Alberta, Canada. *Water Resour Res* 22:2003–2016. doi: 10.1029/WR022i013p02003

Piper AM (1944) A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Trans Am Geophys Union* 25:914–928

Printz J (2004) Milk River Aquifer Reclamation & Conservation Program 1999-2004 Summary Report

Rehm BW, Moran SR, Groenewold GH (1982) Natural groundwater recharge in an upland area of central North Dakota, USA. *J Hydrol* 59(3):293–314

Rice DD, Claypool GE (1981) Generation, accumulation, and resource potential of biogenic gas. *AAPG Bull*

Rivera A (2011) Groundwater Program Newsletter, vol. 5, no. 1. doi:10.4095/290226. http://ftp2.cits.rncan.gc.ca/pub/geott/ess_pubs/290/290226/gwprn_v5.1_e.pdf. Accessed 18 December 2015

Robertson C (1988) Potential impact of subsurface irrigation return flow on a portion of the Milk River and Milk River Aquifer in southern Alberta. University Of Alberta Dept Of Geology

Rushton KR, Eilers VHM, Carter RC (2006) Improved soil moisture balance methodology for recharge estimation. *Journal of Hydrology* 318:379–399. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.06.022

Schwartz FW, Muehlenbachs K (1979) Isotope and ion geochemistry of groundwaters in the Milk River Aquifer, Alberta. *Water Resour Res* 15:259–268. doi: 10.1029/WR015i002p00259

Schwartz FW, Muehlenbachs K, Chorley DW (1981) Flow-system controls of the chemical evolution of groundwater. *Dev Water Sci* 16:225–243

Sosiak AJ, Branch AWS (1997) Pakowki Lake Water Quality Study (1996). Water Sciences Branch, Water Management Division, Natural Resources Service

Stantec (2002) Regional groundwater assessment of potable groundwater in county of Warner No5, Alberta. County of Warner No5

Stuiver M, Polach HA (1977) Discussion; reporting of C-14 data. *Radiocarbon* 19:355–363

Swanick GB (1982) The hydrochemistry and age of the water in the Milk River aquifer, Alberta, Canada. Masters thesis. The University of Arizona

Swenson FA (1957) Geology and ground-water resources of the lower marias irrigation project. USGS Water Supply Paper, Montana, 1460-B

Tokarsky O (1974) Hydrogeology of the Lethbridge–Ferne area, Alberta. Alberta Geological Survey, Earth Sciences Report 1974-01

Toth J, Corbet T (1986) Post-Paleocene evolution of regional groundwater flow-systems and their relation to petroleum accumulations, Taber area, southern Alberta, Canada. *Bull Can Pet Geol* 34:339–363

Tuck LK (1993) Reconnaissance of geology and water resources along the north flank of the Sweet Grass Hills, north-central Montana. U.S. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 93-4026. 68 p

Wassenaar L, Aravena R, Hendry J, Fritz P (1991) Radiocarbon in dissolved organic carbon, a possible groundwater dating method: Case studies from western Canada. *Water Resour Res* 27:1975–1986

Williams MY, Dyer WS (1930) Geology of southern Alberta and southwestern Saskatchewan. Geological Survey of Canada. Memoir 163. doi:10.4095/100794

Wozniak PRJ, Grasby SE, Chen Z (2011) Preliminary analysis of the GIC Alberta groundwater data - a prospective data source for regional scale aquifer assessment. Geological Survey of Canada, Open File 5573, doi:10.4095/289059

Zimmerman E (1967) Water resources of the Cut Bank area, Glacier and Toole Counties, Montana. Montana Bureau of Mines and Geology. Bulletin 60. 37 p

CHAPITRE 7 STEADY-STATE REGIONAL GROUNDWATER FLOW MODEL OF THE MILK RIVER TRANSBOUNDARY AQUIFER (ALBERTA, CANADA- MONTANA, USA)

Marie-Amélie Pétré^{ab}, Alfonso Rivera^a, René Lefebvre^b

^aGeological Survey of Canada, Québec Division, Québec, QC, Canada

^bInstitut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement, Québec, QC, Canada

Article à soumettre. Revues considérées pour publication: Journal of Hydrology: Regional Studies, Hydrogeology Journal.

Contribution de l'étudiante et des co-auteurs :

Marie-Amélie Pétré a construit le modèle numérique d'écoulement 3D. Elle a également rédigé l'article et réalisé les figures.

Alfonso Rivera et **René Lefebvre** ont tous deux supervisé la construction du modèle et ont révisé et commenté l'article.

Version française du titre et du résumé :

Modèle d'écoulement régional en régime permanent de l'aquifère transfrontalier Milk River (Alberta, Canada- Montana, USA)

Résumé

Un modèle régional d'écoulement en régime permanent de l'aquifère transfrontalier Milk River (MRA) a été développé afin d'améliorer la compréhension du système d'écoulement régional et pour tester le modèle conceptuel de l'aquifère. Le modèle d'écoulement souterrain s'étend à travers le sud de l'Alberta (Canada) et le nord du Montana (USA) sur 26 300 km². Le MRA se trouve au sein de la Formation Milk River (Formation Eagle au Montana) et constitue une ressource en eau souterraine importante qui est exploitée depuis plus d'un siècle dans la zone d'étude. Le modèle tridimensionnel a été développé en appliquant un maillage en éléments finis sur le modèle géologique précédemment construit. Le calage du modèle s'est fait selon un ensemble de critères incluant les charges hydrauliques observées, les flux souterrains définis dans le modèle conceptuel et la description qualitative de la zone artésienne de puits jaillissants. Les résultats montrent que le modèle calé simule de manière satisfaisante la dynamique d'écoulement observée ainsi que les principales composantes du bilan en eau. L'analyse du patron d'écoulement de l'eau souterraine ainsi que l'utilisation du traçage de particules confirment que la Milk River intercepte une grande proportion de l'écoulement et que les autres mécanismes d'émergence consistent en des flux de drainance verticaux à travers les aquitards et sous les vallées enfouies. Là où le MRA est confiné, il contient principalement une ressource fossile qui n'est pas renouvelée significativement. Ce modèle numérique valide la plausibilité hydraulique du modèle conceptuel de l'aquifère et confirme que le MRA est une ressource internationale partagée. Cette situation justifie la mise en place d'un plan de gestion conjoint entre le Canada et les États-Unis, particulièrement dans la région comprise entre la zone de recharge au Montana et le sud de la Milk River en Alberta. Le modèle d'écoulement en régime permanent constitue une précieuse composante de l'étude transfrontalière du MRA qui pourra soutenir les décisions de gestion de son exploitation.

ABSTRACT

A steady-state regional groundwater flow model of the Milk River transboundary aquifer (MRA) was developed to improve the understanding of the regional groundwater flow system and to test the conceptual model of the aquifer. The groundwater flow model extends across southern Alberta (Canada) and northern Montana (USA) and is 26,300 km². The MRA lies within the Milk River Formation (Eagle Formation in Montana, USA) and is an important groundwater resource in the study area, which has been exploited for over a century. The three-dimensional model was developed by applying a finite element mesh on the geological model previously developed. The model was calibrated against a set of criteria including hydraulic head observations, groundwater fluxes defined in the conceptual model and qualitative information relative to the location of flowing artesian wells. Results show that the calibrated model satisfactorily simulates the observed flow dynamics as well as the main groundwater budget components. The analysis of simulated groundwater flow patterns and the use of particle tracking confirm that the Milk River intercepts a large proportion of the flow and that the other discharge mechanisms consist in cross-formational flow through the aquitards and along bedrock valleys. Where the MRA is confined, it mostly contains fossil groundwater and is not significantly renewed. The model also confirms that groundwater exploitation exceeds recharge that takes place in the area south of the Milk River. This numerical model validates the hydraulic plausibility in the adopted conceptual model of the aquifer and confirms that the MRA is an internationally shared resource. This situation would justify implementing a joint management of the aquifer between Canada and the USA; especially in the area comprised between the recharge area in Montana and the Canadian reach of the Milk River. This numerical model constitutes a valuable component of the transboundary study of the MRA, which can support management decisions concerning the MRA exploitation.

Keywords : Groundwater modeling, FEFLOW, Milk River Aquifer, Canada, USA

7.1 Introduction

The Milk River Aquifer (MRA) extends over southern Alberta (Canada) and northern Montana (USA), in a semi-arid region considered water-short (Government of Alberta 2006). This confined sandstone aquifer corresponds to the Virgelle Member of the Milk River Formation, which is also called Eagle Formation in Montana. The MRA has been extensively exploited over the 20th century for livestock watering, secondary oil recovery and domestic uses. The extensive use of the resource has resulted in a major drop (up to 30m) in water levels and the loss of the artesian flow condition of many originally flowing wells (AGRA Earth and Environmental Limited 1998). Historical estimations indicate that the total groundwater use in southern Alberta has almost doubled between 1960 and the early 1990s, from 1.2×10^6 to 2.0×10^6 m³/y (Meyboom 1960; Persram, unpublished report 1992 cited by AGRA Earth and Environmental Limited 1998). Our own unpublished estimates confirm these exploitation levels (Appendices VII and VIII). Thus, concerns about the sustainability and the mismanagement of this regional resource have been raised since the mid-1950s (Meyboom 1960; Borneuf 1976).

A depletion study of the aquifer (AGRA Earth and Environmental Limited 1998) led to a conservation program of the resource (from 1999 to 2004) in southern Alberta. During this program, 101 wells were cemented including 22 freely flowing wells, which resulted in a decrease of water wastage (Printz 2004). However, the MRA is still solicited on both sides of the international border, with no allocation sharing agreement between Canada and the USA. Despite the numerous studies carried out over the years on the MRA, these studies were limited by the international border, which prevents a full representation of the aquifer and its transboundary dynamics. It is fundamental to overcome transboundary limitations and provide a full representation of the MRA in order to assess the needed conditions for its sound management on both sides of the border.

The present study aims to develop a transboundary numerical groundwater flow model of the MRA. This numerical model is actually part of a larger three-stage study of the MRA including the previous development of two cross-border models (Fig. 7.1). The first stage of the study consisted in developing a 3D geological model of the MRA. The geological layers of the study area were represented continuously on both sides of the border, following a unified stratigraphic framework (Pétre et al. 2015). The second stage of the study involved the formulation of a hydrogeological conceptual model of the MRA. The conceptual model describes the functioning of the aquifer at the regional scale and includes several components such as groundwater flow

patterns, recharge and discharge areas, location of active and low-flow areas, groundwater types and a groundwater budget (Pétre et al. 2016).

The present numerical groundwater flow model quantitatively integrates all available information about the MRA and is considered as a tool to answer specific questions that have been raised during the development of the conceptual model. More specifically, in the present study, a steady-state groundwater flow model of the MRA is developed to refine the understanding of the regional groundwater flow system and to verify the plausibility of the previously adopted conceptual model. Furthermore, the numerical model is also used to assess and quantify the relative magnitude of the water budget components, especially in southern Alberta where concerns about the MRA depletion are the most present. Finally, a calibrated numerical model could also be used in the future as a quantitative tool to assess the impact of the historical exploitation of the MRA and support the shared management of groundwater contained in this transboundary aquifer.

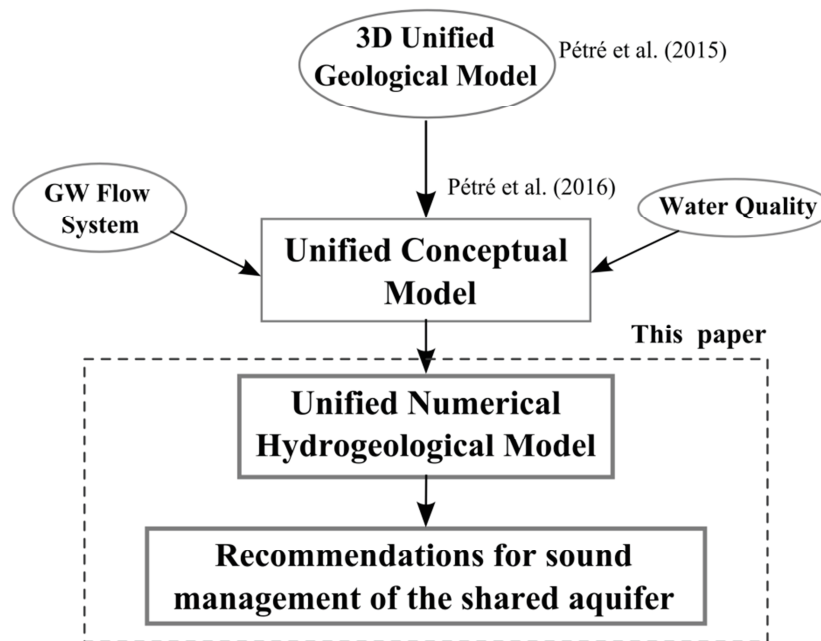


Figure 7.1 Successive stages of the MRA study. This paper addresses the third step- the development of the numerical groundwater flow model of the aquifer and its implications on the groundwater management

7.2 Study area and geology

The MRA is located in a semi-arid region, spanning southern Alberta and northern Montana. The mean annual precipitation is between 250 and 450 mm/y and the potential evapotranspiration ranges from 550 to 578 mm/y (Climate Canada 2015; NOAA 2015). The topographic highs in the region are the Sweet Grass Hills, the Cypress Hills, the Milk River Ridge and the Bears Paw Mountains. The Sweetgrass Hills are an ensemble of three buttes south of the international border. The hydrography of the region includes the transboundary Milk River, Pakowki Lake and several intermittent channels (e.g., Etzikom, Chin and Forty Mile coulees).

The stratigraphic sequence in the study area, from bottom to surface, is as follows: the 500-m thick regional aquitard of the Colorado Group underlies the study area. The shales of the Colorado Group contain several thin sandstone beds, the most significant being the 25-m thick Bow Island Sandstone. The Colorado Group is overlain by the Milk River Formation (called Eagle Formation in Montana) which is subdivided into three members: the basal Telegraph Creek Member, the middle Virgelle Member and the upper Deadhorse Coulee Member. The Virgelle member constitutes the MRA as it is the most important aquifer within the Milk River Formation. The Milk River Formation (about 100 m thick) subcrops or outcrops near the international border in Alberta, in rings around the Sweetgrass Hills and also following two branches on both sides of the Sweetgrass Arch. The Milk River Formation is overlain by the low-permeability shales of the Pakowki/Claggett Formation (about 130 m thick). The Belly River Group (Judith River Formation in Montana) overlies the Pakowki/Claggett aquitard and is also considered as an aquifer. With the exception of the topographic highs and the coulees, the study area is covered by glacial drift which consists mainly of low-permeability till.

Buried valleys (bedrock channels) are present across the study area (Fig. 7.2). These buried valleys are preglacial stream valleys buried by glacial drift (Cummings et al. 2012a). In southern Alberta, the Medicine Hat, Skiff and Foremost buried valleys are up to 10 km wide and are incised up to 30 m into bedrock (Hendry and Buckland 1990; HCL consultants 2004). They locally constitute productive aquifers where the fill material is predominantly sand and gravel (Farvolden et al. 1963; HCL consultants 2004; Cummings et al. 2012a).

The extent of the numerical model follows the hydrogeological limits of the MRA previously defined in Pétré et al. (2016) in the west, north and east (Fig. 7.2). In the south, the Marias River and Cut Bank Creek have been chosen as the physiographic limits of the model, although the MRA may extend farther south in Montana. In the south-east corner of the study area, the

numerical model is limited by the extent of the geological model (at longitude -110°), which is the basis of the numerical model.

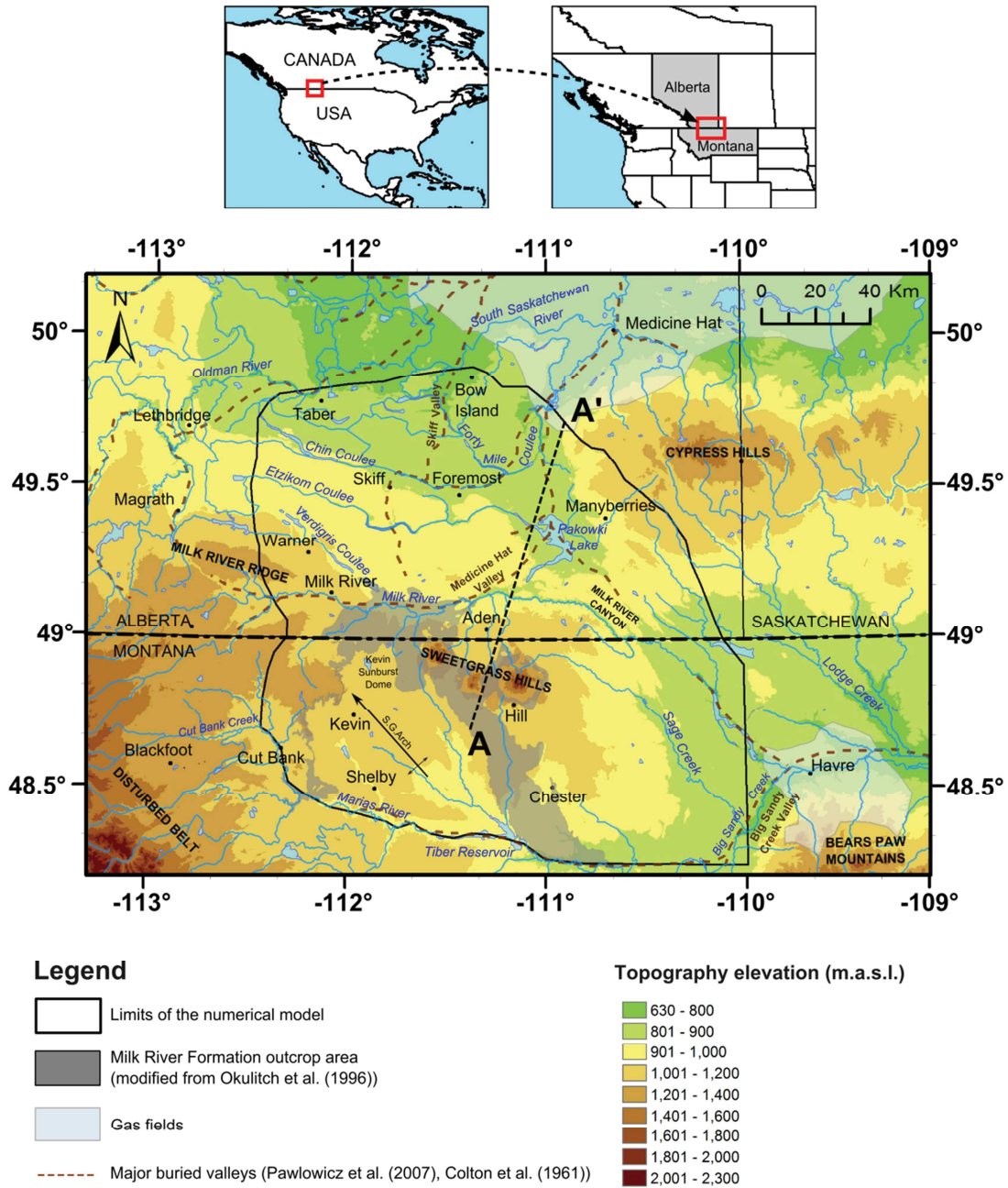


Figure 7.2 Study area and limits of the groundwater flow model

7.3 Conceptual hydrogeological model

Only a brief description of the conceptual model of the aquifer is presented here. Further details can be found in Pétré et al. (2016). The MRA is a typical confined aquifer, radially dipping from the outcrop/subcrop areas (Fig. 7.3). Recharge occurs mainly in the outcrop or subcrop areas of the Milk River Formation where unconfined conditions and modern groundwaters are present. Groundwater inflow into the MRA also occurs through subsurface vertical inflow from overlying geological units in the topographic highs of the study area. This particular component was added in the conceptual cross-section (Fig. 7.3) as the numerical model allows its quantification. Groundwater flow diverges from the Sweetgrass Hills to the north, east and southeast. West of the Sweet Grass Arch, groundwater flows south-west and north from a groundwater divide located north of Cut Bank. Two transboundary flowpaths were defined on the basis of potentiometric maps: (1) an eastern flowpath from the Sweet Grass Hills to the north and (2) a western flow path from the northern part of Cut Bank to the north.

The Milk River and part of the Verdigris Coulee intercept a large proportion of groundwater flowing to the north from the recharge areas. As no other natural surface discharge feature has been identified, vertical leakage through the confining units was considered as another important natural discharge mechanism. Cross formational flow is enhanced along the buried valleys talweg that act as drains. Indeed, the buried valleys have eroded the upper bedrock (Belly River /Judith River and Pakowki/Claggett formations), thus reducing the vertical distance between the MRA and surficial sediments. Under the confined conditions found north of the Milk River, the MRA contains a fossil groundwater resource, not significantly renewed by modern recharge.

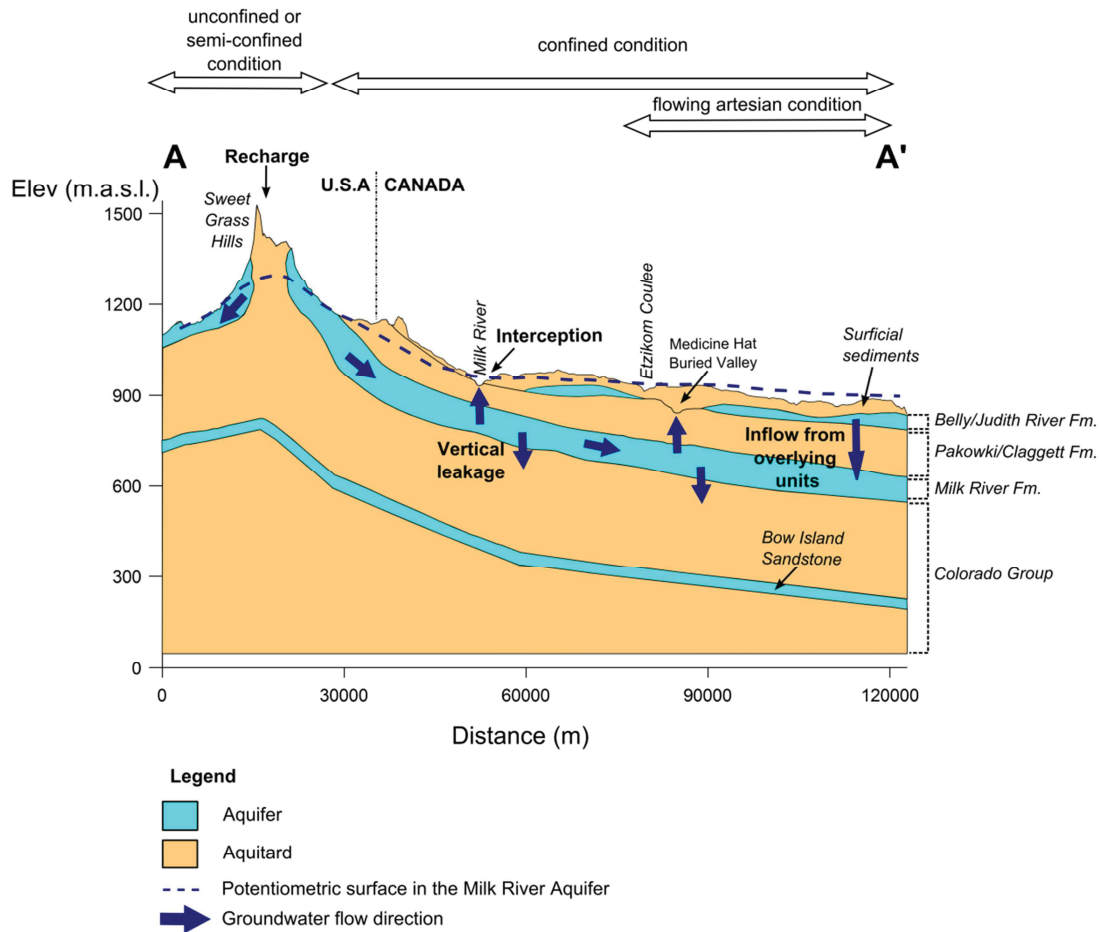


Figure 7.3 Conceptual model of the MRA. Location of the cross-section is shown on Fig. 7.2. (modified from Pétré et al. 2016)

7.4 Groundwater flow model

7.4.1 Conversion from the geological model to the numerical model

The basis of the numerical groundwater flow model of the aquifer system encompassing the MRA is the three-dimensional (3D) geological model that was previously developed with the software Leapfrog Hydro (Pétré et al. 2015). This geological modeling software can bridge the workflow between geological and numerical modeling. The 3D groundwater flow model of the MRA was developed using the finite element numerical simulator FEFLOW (Diersch 2014). FEFLOW was selected for its ability to simulate complex model geometry and to refine the mesh around specific features (observation point, river channel). Details on the governing equation for the flow problem and theoretical information on FEFLOW can be found in Diersch (2014). A 2D

areal finite element mesh was created in FEFLOW and was applied to the 3D geological model, resulting in a 3D numerical model with 15 layers. The geometry and thicknesses of the geological layers remain unchanged in the numerical model compared to the geological model.

7.4.2 Model design

The numerical model covers a surface of 26,300 km² and has a volume of 30,000 km³. The top of the groundwater flow model corresponds to ground level, represented by the Digital Elevation Model (DEM) of the study area (pixel size is 500 m). The geometry and thickness of each geological unit were assumed to be entirely known as the numerical model is based on the 3D geological model previously developed by Pétré et al. (2015). The domain is discretized into 329,825 triangular prismatic mesh elements and 165,587 nodes per slice. The total number of elements is 4.9 million and the total number of nodes is 2.6 million. The finite element mesh was locally refined along the Milk River where a steep horizontal hydraulic gradient was expected. The lateral sizes of the elements in the mesh vary from 100 m where the grid was refined, to 650 m in the remainder of the domain.

The model represents seven hydrostratigraphic units: surficial sediments, bedrock valleys, the Belly/Judith River Formation, the Pakowki/Claggett Formation, the Milk River Formation, the Colorado Group and the Bow Island Sandstone. As shown in Fig. 7.4 a single layer can represent different hydrostratigraphic units over the model domain, following the actual geometry of the units. Layers 1 to 10 represent the interval between the soil surface and the base of the Milk River Formation. Layers 11 and 15 correspond to the Colorado Group and layer 14 corresponds to the Bow Island sandstone with a 30 m thickness. The Bow island sandstone is located at about 400 m below the base of the Milk River Formation was not represented in the 3D geological model. It was added manually within FEFLOW.

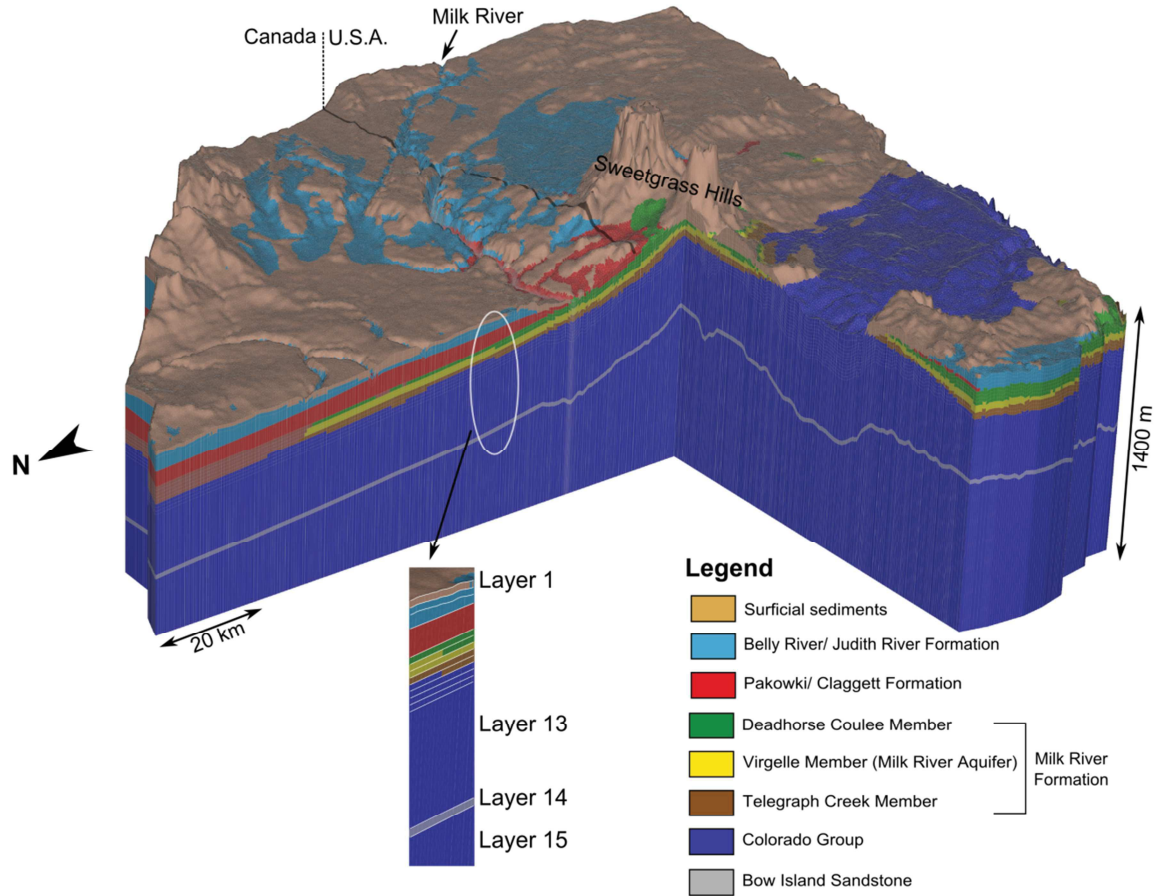


Figure 7.4 Three-dimensional numerical model with geological units. Vertical exaggeration factor is 30.

7.4.3 Boundary conditions and recharge

Boundary conditions in the model domain are summarized in Fig. 7.5d. On the first slice of the model, specified heads were assigned along the streams following the surface drainage of the model domain. Ground elevation was assigned to the nodes along the streams (Fig. 7.5a). Along the outcrop belt in Montana, nodes along the internal limit of the outcrop area were assigned a value of the topography elevation minus 3 m to represent the groundwater flux that might leave the system along the Virgelle escarpment.

The basal layer of the model was defined as a no flow boundary. Along the outer boundary of the domain in slice 14 (corresponding to the Bow Island Sandstone) a specified head boundary condition was set to 750 m, following the potentiometric map of the Bow Island Sandstone produced by Swanick (1982) in Alberta (Fig. 7.5b).

Recharge rate was set to 0 mm/y where the aquitards outcrops. In the outcrop/subcrop area which constitutes the recharge area of the MRA, the recharge rate was set to 10 mm/y, based on the previous estimates from the conceptual model. Elsewhere, the recharge rate was set to 1mm/y (Fig. 7.5c).

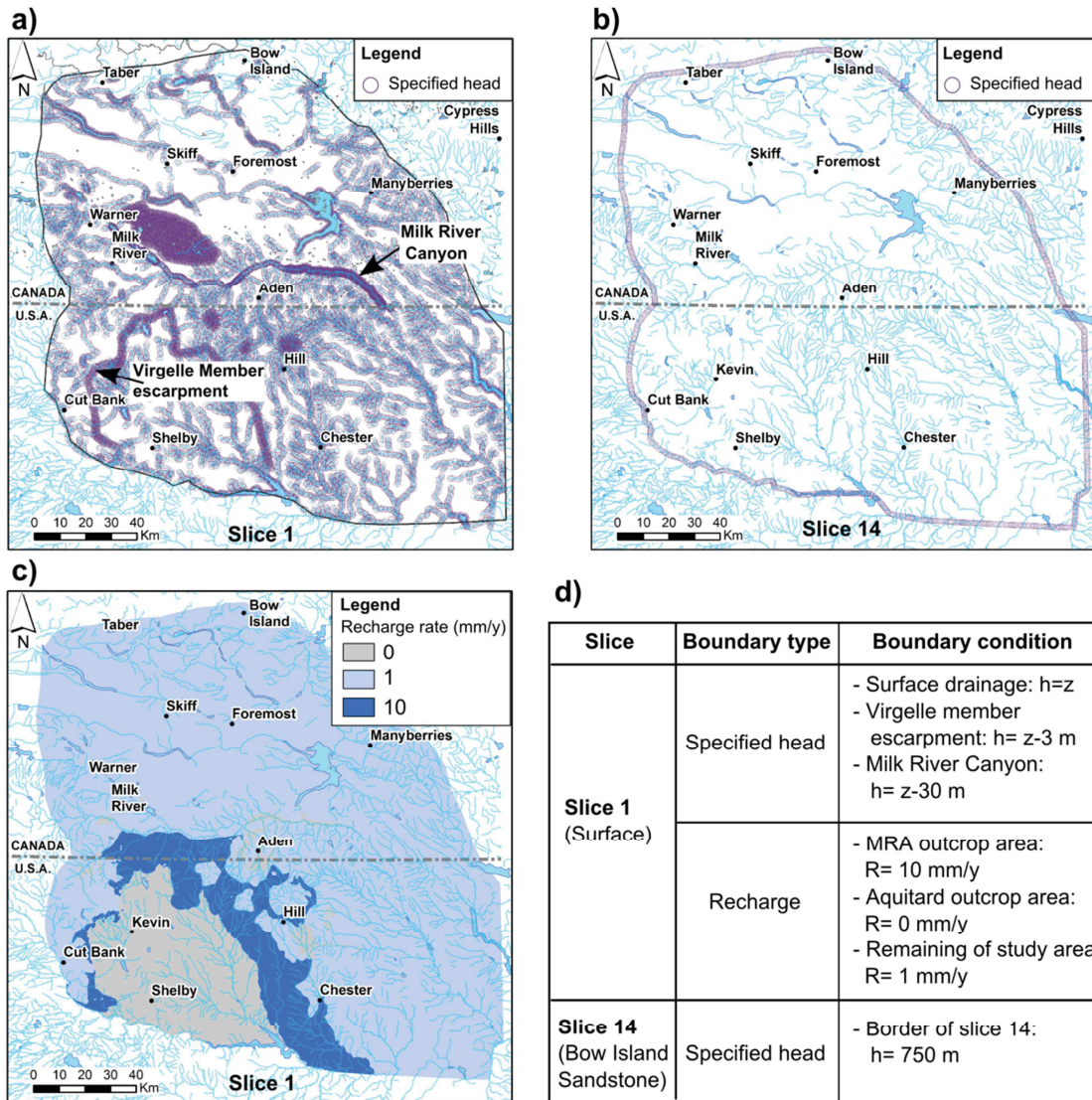


Figure 7.5 Boundary conditions in the model domain (h is hydraulic head and z is elevation relative to sea level)

7.4.4 Hydraulic conductivity of the hydrostratigraphic units.

The numerical model requires the assignment of a hydraulic conductivity (K) value to each hydrostratigraphic units. The K value of the MRA was calculated from the transmissivity map and the thickness map of the Milk River Formation derived from the geological model of the aquifer (Pétre et al. 2015, 2016). The K values assigned to the MRA range from 8.1×10^{-9} m/s to 9.4×10^{-4} m/s. The spatial distribution of K (Fig. 7.6) was applied to the elements selection corresponding to the Milk River Formation (including the Telegraph Creek, Virgelle, Deadhorse Coulee and Upper Alderson members).

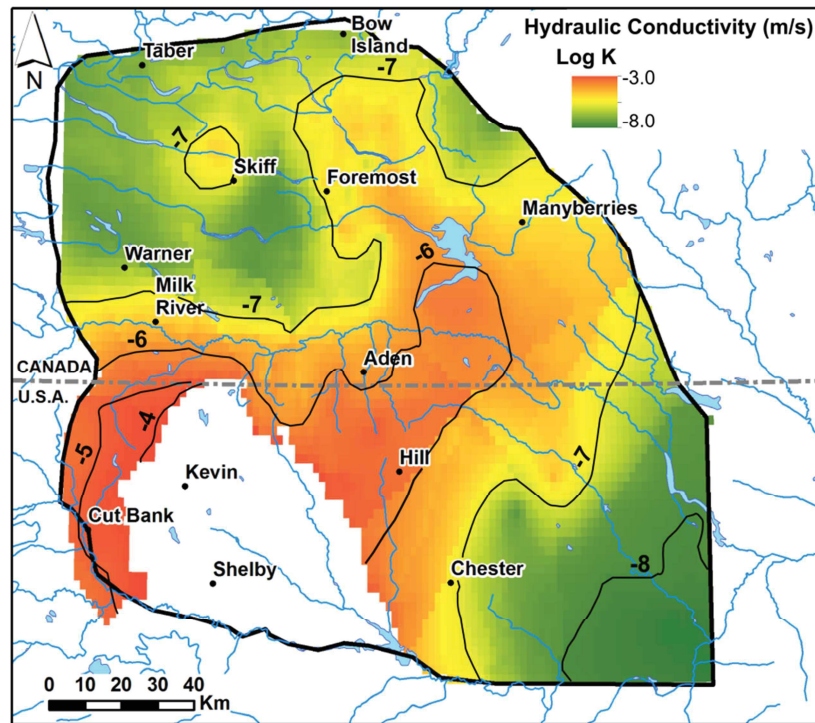


Figure 7.6 Hydraulic conductivity of the Milk River Aquifer (derived from Pétre et al. 2016)

The other hydrostratigraphic units of the model were assigned a uniform K value. The hydraulic conductivity of surficial sediments (till) was set at 7×10^{-8} m/s, based on measured values from Robertson (1988). The hydraulic conductivity of the Belly River/Judith River Formation ranges between 9.0×10^{-8} and 8.8×10^{-7} m/s (Anna 2011) and a mean value of 5×10^{-7} m/s was selected. The hydraulic conductivity of aquitards ranges from 10^{-9} to 10^{-12} m/s (Toth and Corbet 1986; Robertson 1988; Hendry and Buckland 1990). This value was adjusted during the calibration procedure. Bedrock valleys were represented by assigning a higher hydraulic conductivity than

the surrounding till on the first layer (about 20 m thick) of the model along the bedrock valley talweg and over a width of 5 km (HCL consultants 2004). Bedrock valleys generally contain permeable material with a K value ranging from 10^{-3} to 10^{-4} m/s (Cummings et al. 2012b). However, the first layer of the model also includes the cover of low-permeability till. Therefore, an effective hydraulic conductivity was chosen to represent all lithologies present in layer 1 and was adjusted during calibration.

The anisotropy ratio (k_x/k_z) was set at 10 for the MRA, the Colorado group and the Bow Island sandstone. Surficial sediments which consist mainly in low permeable till are considered isotropic (Robertson 1988; Hendry and Buckland 1990). The vertical hydraulic conductivity (k_z) of the Pakowki/Claggett Formation is assumed to be larger than that of the Colorado aquitard. This assumption is based on Swanick (1982) who stated that over the past millions years, the upper confining unit has been subjected to compaction and release from glaciers which may have caused fracturing. Concerning the anisotropy ratio of the Belly River/Judith River group, Hendry and Buckland (1990) used a value of 10^4 for the Foremost Formation (the least permeable member of the Belly River Formation). The anisotropy ratio was then adjusted during calibration from this reference value. The fill material of the bedrock valleys were also assumed isotropic.

The following parameters were adjusted during the calibration process: K value of the Pakowki/Claggett Formation and the bedrock valleys; K of the Milk River Formation in the south-east corner of the study area; and the vertical anisotropy of the Belly/Judith River Formation and Pakowki/Claggett Formation.

7.5 Calibration criteria

The calibration of the groundwater flow model was based on a set of criteria that are not restricted to observations, but also on the conceptual hydrogeological model. First, a satisfying match between the simulated and measured hydraulic heads is sought. Secondly, the direction and magnitude of groundwater fluxes, especially cross-formational fluxes, should be consistent with the conceptual model. Finally, the qualitative extent of the flowing artesian area in southern Alberta should be reproduced by the model. These three criteria are further described below.

7.5.1 Calibration target

There is very limited information related to the pre-development state of the aquifer. The steady-state calibration dataset consists in observation points (or calibration targets) produced from historic potentiometric surfaces of the MRA that are considered as representative of a steady-state condition not significantly affected by exploitation. Moreover, qualitative information (soft knowledge) describing the state of the aquifer at the beginning of the MRA development was used. In Montana, the available potentiometric surface is that from Pétré et al. (2016). This map is actually a composite map of historical potentiometric maps from Levings (1982) in south-east Montana; Tuck (1993) in the Sweet Grass Hills area and Zimmerman (1967) in south-west Montana. Although these maps have been drawn after years of groundwater exploitation, it was assumed that they represented a condition similar to predevelopment. Indeed, the south-west area in Montana appears to have stable groundwater levels based on monitoring wells completed in the MRA. Besides, this area is likely under the influence of active recharge due to its higher transmissivity and closer proximity to the outcrop of the aquifer where direct recharge can occur. In south-east Montana, the investigation carried out in the present study indicates that the magnitude of water use for oil and gas activity is low, excepting in the extreme south-east corner of the study area (Folnagy A.J.B., Montana Department of Natural Resource Conservation, personal communication). Eleven water level measurements from monitoring wells, mostly located in the outcrop area of the MRA in Montana, were added to the calibration dataset.

In Alberta, the same steady-state hypothesis was formulated in the area upgradient (south) of the Milk River, where it is assumed that the groundwater use is minor compared to what is found downgradient (north of the river). Furthermore, this area is receiving recharge from the outcrop and subcrop areas that has not been intercepted yet by the Milk River. The potentiometric maps used are from Meyboom (1960) and Toth and Corbet (1986), who reinterpreted Meyboom's data by better mimicking the topography and considering the potential effect of buried valleys. The simulated heads will be compared to both potentiometric interpretations. Such a calibration of the model to groundwater levels could not be done in the area north of the Milk River, which has been subjected to intensive exploitation and has insignificant renewal due to the interception of groundwater by the Milk River.

A dataset of observation points was defined by randomly selecting points from the interpolated potentiometric surfaces that were interpolated beforehand within the domain extension. As

shown in Fig. 7.7, 132 observation points were defined in northern Montana and 80 points in Alberta (south of the Milk River). They are defined at the centre of the Milk River Formation. Based on the quality of the observations and the global change in heads in the model domain, the maximum acceptable error was set at +/- 50 m.

7.5.2 Cross-formational flow

The discharge mechanism of the MRA through cross-formational flow has been highlighted in the conceptual model of the aquifer. These fluxes have been assessed in southern Alberta and their direction and magnitude are used here as a calibration criterion. More precisely, the upward flow component from the MRA to surficial sediments in the vicinity of the bedrock valleys was estimated to be between 4.0×10^2 to 4.0×10^5 m³/y. Another cross-formational flow directed downward from the MRA through the Colorado Group and to the Bow Island Sandstone was also defined and estimated to be between 8.0×10^3 to 8.0×10^5 m³/y. These fluxes were obtained from the vertical hydraulic gradient calculated between the MRA, the surficial sediments and the Bow Island Sandstone. The calculation is based on the potentiometric maps of these units (Swanick 1982; Lies and Letourneau 1995; AGRA Earth and Environmental Limited 1998; Pétré et al. 2016) and their thicknesses derived from the geological model. The groundwater flow model should reproduce these cross-formational fluxes in terms of direction and magnitude.

7.5.3 Qualitative information

Moreover, qualitative information provides an indication of the state of the pre-exploitation system. Previous studies indicate that nearly all the wells exploiting the MRA in southern Alberta were flowing in the pre-exploitation system (Borneuf 1976; Phillips et al. 1986; Hendry et al. 1991). Dowling (1917) defined the flowing artesian limit in southern Alberta (Fig. 7.7). The steady-state model should thus represent this flowing artesian area and be consistent with Dowling's (1917) delineation. Although the magnitude of artesian conditions was not quantified in the past, four recent pressure measurements in the flowing area are available (Pétré et al. 2016). It is assumed that under pre-development conditions, the hydraulic heads at these locations were greater than the present-day observations.

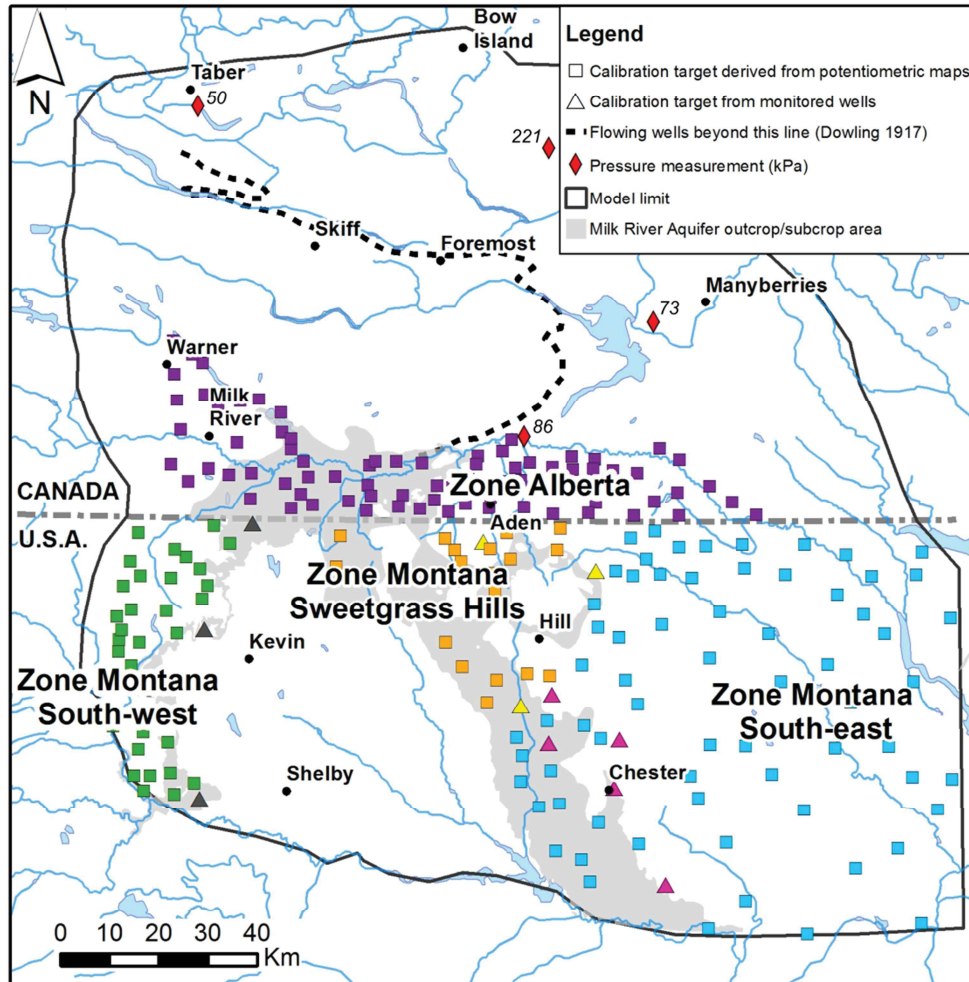


Figure 7.7 Location of the MRA water-level observation points in the model domain. A distinction is made between the observation points derived from historical potentiometric maps (*squares*) and those corresponding to monitoring wells (*triangles*).

7.6 Adjustments of boundary conditions and hydraulic parameters

During the calibration process, the following modifications were made to improve the match between observed and simulated hydraulic heads. The density of the surface drainage was first adjusted locally during the calibration process. It has been increased in a poorly drained area in the central part of southern Alberta and decreased north of the Etzikom coulee to better represent the observed spatial distribution of the flowing artesian area. These modifications imply that groundwater discharge to surface drainage from the MRA and through the overlying aquitard exerts an important control on hydraulic heads (and artesian conditions) in the MRA.

Such discharge, while being relatively diffuse, could still be largely controlled by the presence of surface drainage. Conversely, this could also mean that surface drainage partly reflects the discharge of groundwater originating from the MRA. This adjustment is in agreement with the observation from Meyboom (1960) who identified strong flowing wells along the main coulees.

In the Milk River canyon area, the value of the specified head boundary condition was adjusted as the resolution of the DEM representing the model surface elevation did not allow the proper representation of the 150-m deep and 1500 m-wide canyon (Beaty 1990). The specified head was thus set to 30 m below land surface to correctly represent the incision of the Milk River canyon and to increase its effect on groundwater interception, which led to a better representation of observed potentiometric conditions. This adjustment provided a better fit with the calibration target, suggesting that the Milk River Canyon is an important feature in the discharge mechanism of the MRA.

A few new hydraulic tests recently conducted in the south-eastern part of the study area in Montana indicate that the hydraulic conductivity of the Milk River/Eagle Formation is higher than that indicated by Fig. 7.6 (A. Fohnagy, Montana Department of Natural Resource Conservation, private communication). To take into account these new observations, the hydraulic conductivity of the MRA in the south-east corner of the study area was locally increased by a multiplication factor, adjusted during the calibration process. The numerical model should thus better represent the hydraulic conductivity of the MRA.

Miller and Norbeck (1996) give a hydraulic conductivity value for the Pakowki/Claggett aquitard in the East Butte area (the eastern Butte of the Sweetgrass Hills) that is much higher than the uniform value used for this geological unit. This higher value of $9 \times 10^{-8} \text{m/s}$ was assigned to the Pakowki/Claggett Formation in the East Butte area. It provided a better match of hydraulic heads in this area, suggesting that a zonation of the hydraulic conductivity of the Pakowki/Claggett aquitard is necessary. This modification indicates that this aquitard probably does not have spatially uniform hydraulic properties over the study area.

Table 7.1 summarizes the initial ranges of K values and vertical anisotropy for each hydrostratigraphic units and their final values that provided the best match between the numerical model and calibration criteria.

Table 7-1 Ranges of hydraulic conductivity and vertical anisotropy for each hydrostratigraphic units and their final (calibrated) values

Hydro-stratigraphic units	Horizontal hydraulic conductivity K_x (m/s)	Vertical anisotropy (K_x/K_z)	Sources	Final values	
				Horizontal hydraulic conductivity K_x (m/s)	Vertical anisotropy (K_x/K_z)
Surficial sediments (till)	7×10^{-8}	1	Robertson (1988); Hendry and Buckland (1990)	7×10^{-8}	1
Belly/Judith River Formation	9×10^{-8} - 8.8×10^{-7}	10 - 10^4	Hendry and Buckland (1990); Anna (2011)	5×10^{-7}	10^3
Pakowki/Claggett Formation	10^{-9} - 10^{-11}	5	(Swanick 1982; Hendry and Schwartz 1988)	1×10^{-9} 9×10^{-8} (East Butte area)	5
Milk River Formation	Spatial distribution from Fig.7.6	10	Pétre et al. (2016)	Spatial distribution in Fig. 7.6 (factor 50 in south-east Montana)	10
Colorado Group	10^{-9} - 10^{-12}	10	Toth and Corbet (1986); Robertson (1988); Hendry and Buckland (1990)	1×10^{-10}	10
Bow Island Sandstone	10^{-6} - 10^{-8}	10	Schwartz et al. (1981)	5×10^{-7}	10
Bedrock valleys	10^{-3} - 10^{-4}	1	Cummings et al. (2012b)	1×10^{-6}	1

7.7 Assessment of the calibration performance

The model calibration was carried out by trial-and-error with the objective of obtaining the best fit between simulated and observed heads at the 212 calibration targets as well as a proper representation of the artesian conditions in the MRA. The calibration performance has been

quantified by calculating the root mean square error (RMSE) and the correlation coefficient for each calibration zone (Table 7.2).

The combination of a small RMSE and high correlation coefficient indicates a satisfying calibration. In Montana, good calibration is achieved in the south-west where the lowest RMSE (22.9 m) and the highest correlation coefficient (0.89) are found. The other two calibration zones in the south-eastern part of the study area in Montana and in the Sweet Grass Hills area still show high correlation coefficients (0.87 and 0.80) but they have higher RMSE (52.4 and 42.3), which implies poorer calibration. In southern Alberta, south of the Milk River the best calibration is achieved following Toth and Corbet’s (1986) interpretation of the potentiometric surface, with a RMSE of 32.0 m and a satisfying correlation coefficient of 0.90. As their interpretation mimics the topography, this suggests that the topography exerts a major influence on the pattern of the potentiometric surface.

Table 7-2 Hydraulic head calibration performance of the groundwater flow model in the calibration zones

Calibration Zone	RMSE (m)	Correlation coefficient (r)
Montana, south-west	22.9	0.89
Montana, Sweet Grass Hills	42.3	0.80
Montana, south-east	52.4	0.87
Alberta, south of the Milk River (Toth and Corbet 1986)	32.0	0.90
Alberta, south of the Milk River (Meyboom 1960)	47.1	0.84

The scatter plot of simulated versus measured heads is shown in Fig. 7.8. The model tends to overestimate the simulated heads in the south-eastern part of the study area in Montana and in southern Alberta. In southern Alberta, the steady –state hypothesis appears to be incorrect based on a subsequent assessment of the groundwater extraction levels in the MRA (Appendix VII) which followed the development of the steady-state model. Results from the evaluation of groundwater use levels show that the area south of the Milk River in Alberta actually includes more water wells than expected. This area even contributed between 14% and 50% to the total MRA groundwater extraction over the 1908-2015 period. Thus, the measured heads are not representative of pre-development conditions in the MRA. It is therefore normal that the steady-state model simulate higher hydraulic heads than the observations. In the south-east area in Montana, the references are highly uncertain. Indeed, this area combines the highest uncertainty in the geological model (due to a lack of geological data) and the highest uncertainty

in the measured hydraulic heads which are derived from a potentiometric map at the regional scale (Levings 1981).

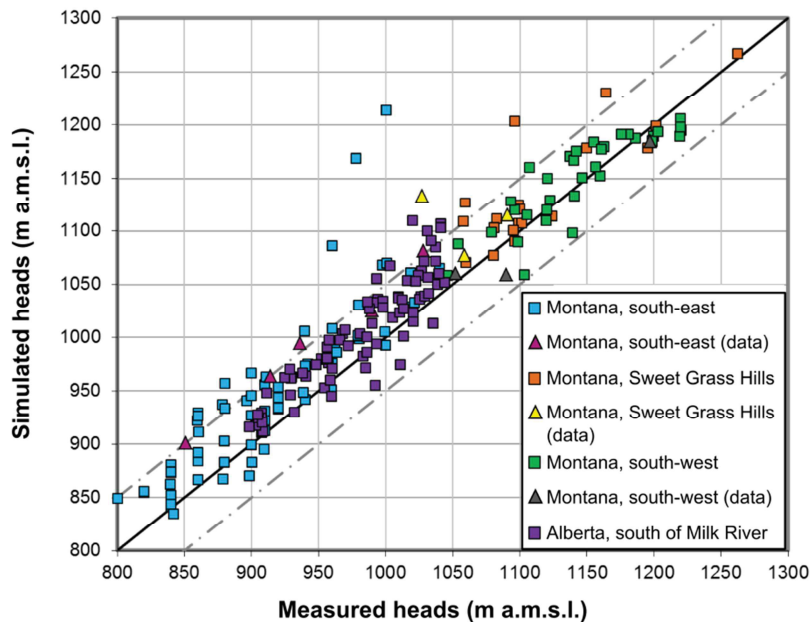


Figure 7.8 Plot of simulated versus measured heads in the Milk River aquifer, for the calibration zones. The calibration target interval ($\pm 50\text{m}$) is also shown (grey dashed lines). The calibration targets derived from monitoring wells are indicated as “data” in the legend. The measured heads in southern Alberta are from Toth and Corbet’s (1986) interpretation.

Calibration level map

To better visualize the spatial distribution of errors, the calibration level was calculated for each calibration target. The highest degree of calibration (level 1) indicates that the simulated heads fall within the calibration target ($\pm 50\text{ m}$). Levels 2 and 3 correspond respectively to simulated values that fall within two and three times the associated error of the calibration target (i.e ± 100 and 150 m) (Anderson and Woessner 1992). Table 7.3 shows the calibration levels in each calibration zone of the model. The south-west corner of the study area in Montana is the best calibrated zone (97.4 % of the observation points are in the calibration target), followed by the Sweetgrass Hills area. As expected, the calibration zone that has the lowest calibration level is the south-east Montana (75.0% of the observation points are in the calibration target). This area has the largest uncertainties associated with observation points. These observation points are derived from a potentiometric map drawn at the regional scale that includes only a few isolines in south-east Montana (Levings 1982). The uncertainty is then much higher in south-east Montana,

whereas observation points derived from small scale potentiometric maps such as Tuck (1993) in the Sweetgrass Hills area or Zimmerman (1967) in the south-west Montana are more accurate. In southern Alberta, the calibration targets derived from the potentiometric surface from Toth and Corbet (1986) show the highest calibration level (91.3% of the observation points are in the calibration target).

Table 7-3 Levels of calibration for the simulated heads in the Milk River Aquifer

Calibration zone	Total number of observation points	Calibration level					
		Level 1		Level 2		Level 3	
		Number of obs. points	%	Number of obs. points	%	Number of obs. points	%
Montana, south-west	38	37	97.4	1	2.6	0	0.0
Montana, south-east	72	54	75.0	16	22.2	2	2.8
Montana, Sweetgrass Hills area	22	17	77.3	5	22.7	0	0.0
Alberta, south of the Milk River (Toth and Corbet 1986)	80	73	91.3	7	8.8	0	0.0
Alberta, south of the Milk River (Meyboom 1960)	80	53	66.3	27	33.7	0	0.0

The spatial distribution of the calibration level for each observation point is shown in Fig. 7.9. The lowest calibration level (level 3) is found on the flanks of the eastern butte of the Sweetgrass Hills. The steep topography in this area explains the difficulty to obtain a reliable calibration. In the south-east area in Montana, the difficulty to obtain level 1 calibration can be explained by the uncertainties of the underlying geological model in this area. Indeed, the geological data are scarce in Montana and the resulting error in the geometry of the hydrostratigraphic units can lead to a decrease in the representative nature of the model and thus of its calibration performance.

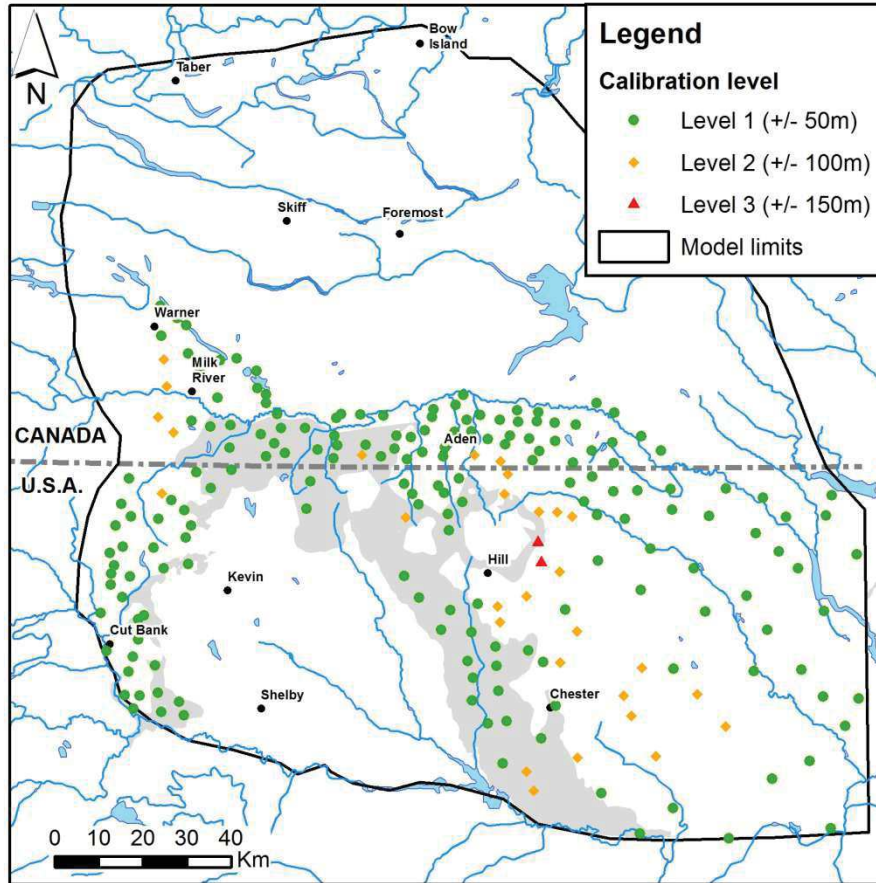


Figure 7.9 Spatial distribution of levels of hydraulic head calibration for the observation points in the MRA

The calibration performance was also qualitatively assessed with the comparison of contour maps between observed and simulated heads, as shown in Fig. 7.10. This map shows that the regional groundwater flow patterns are similar in northern Montana and south of the Milk River in southern Alberta. More specifically, the groundwater divide north of Cut Bank, Montana, is well reproduced by the model. The radial pattern from the Sweetgrass Hills area to the north, east and south-east is satisfactorily replicated. In Alberta, the observed contour map is from Toth and Corbet (1986), as their interpretation of the heads distribution is in closer agreement with simulated heads.

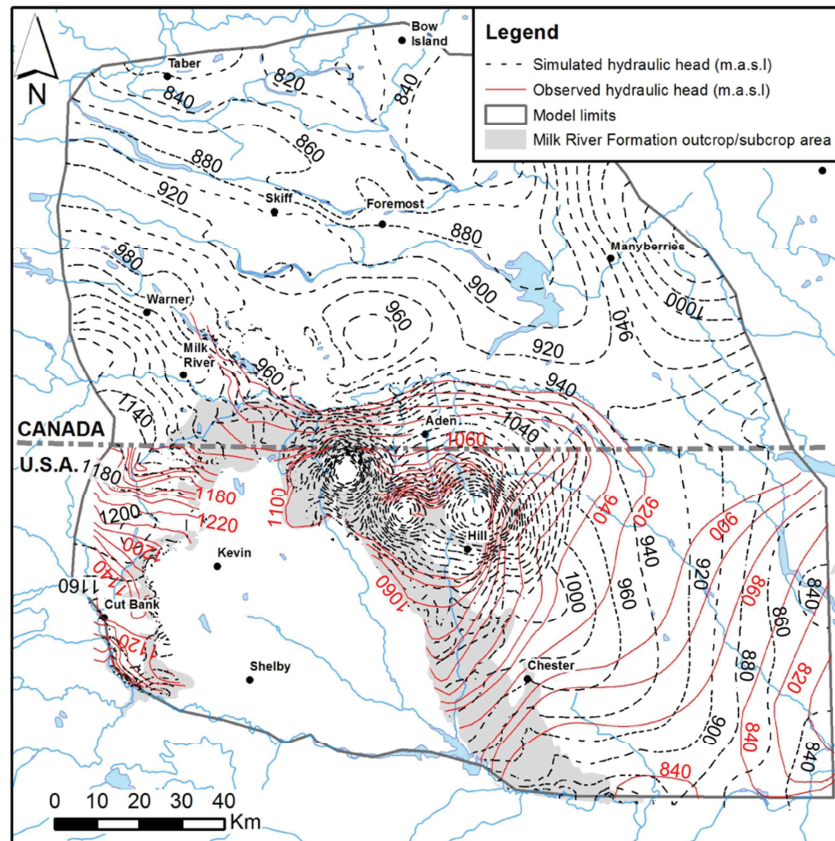


Figure 7.10 Comparison of observed and simulated potentiometric surfaces.

Simulated flowing artesian conditions in the MRA are mostly located in the northern part of the study area, along the Chin and Etzikom Coulees, in the vicinity of Lake Pakowki and following the Milk River reach in the north-eastern part of the study area in Montana (Fig. 7.11). In Alberta, these locations are consistent with the delineation of the artesian zone from Dowling (1917) and the observation of strongly flowing wells in the coulees (Meyboom 1960). More precisely, about 68% of the MRA nodes located in the flowing artesian area defined by Dowling (1917) are simulated as flowing nodes. At the four locations where recent pressure measurements were obtained, the magnitude of the simulated artesian conditions is higher than the measurements. This result was expected as pre-development artesian conditions must have had a greater intensity than the present-day conditions. The numerical model successfully represents the location and magnitude of the flowing artesian area in Alberta. In south-east Montana, the simulated artesian conditions is located along the southern reach of the Milk River and Sage Creek. The presence of artesian conditions at this location has not been documented in previous

studies. It is however plausible due to the combination of confined conditions in the MRA and lower elevations, where the river is more incised, that could result in strong artesian conditions, as observed in Alberta. Nevertheless, high magnitude in artesian conditions locally is most probably due to the low-permeability Pakowki Formation which outcrops along the Milk River due to uncertainties in the geological model in this area. Besides, the high uncertainty in the hydraulic conductivity of the MRA in this area can also explain these large values.

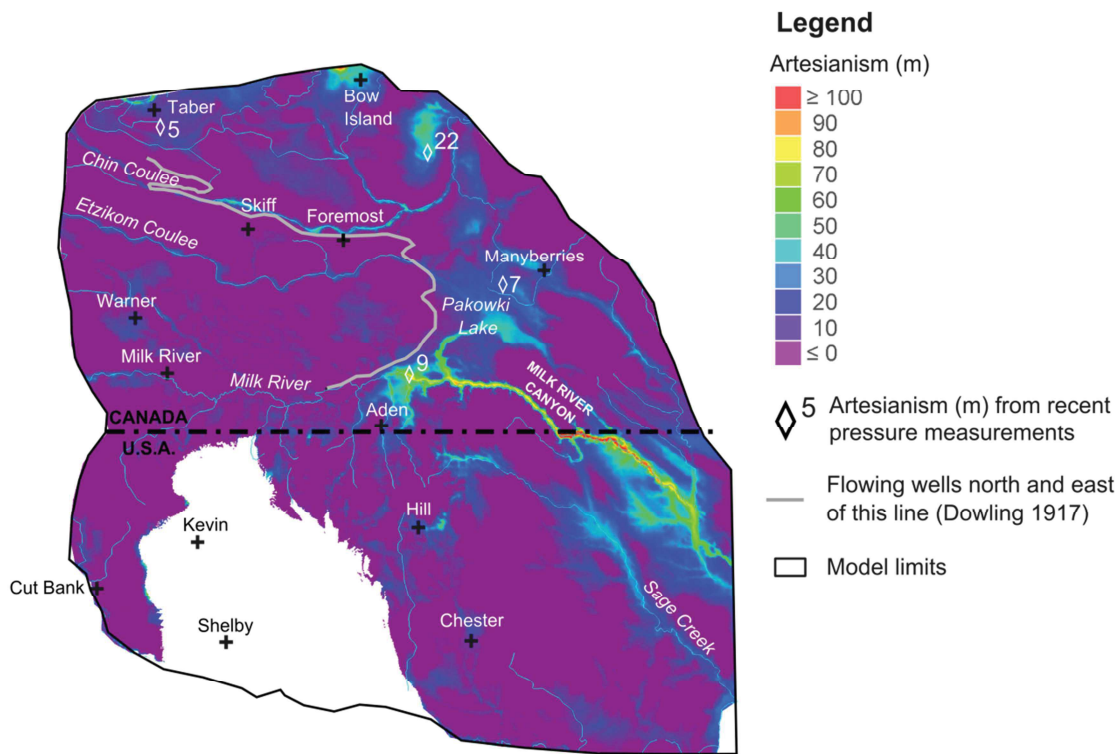


Figure 7.11 Artesian conditions in the Milk River Formation

7.8 Water balance

The entire model domain has a simulated annual groundwater flow of $243 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ and the global fluid-flow budget has a numerical imbalance of $44 \text{ m}^3/\text{y}$ (indicating good convergence of the model). For comparison purpose with the conceptual hydrogeological model, a subdomain water budget was performed in southern Alberta, in the area north of the Milk River and east of the town of Warner, where the majority of the water wells are present. The steady-state water balance components (Fig. 7.3) have been quantified and are summarized in Fig.7.12.

Quantification of transboundary fluxes (effective recharge): In the steady-state numerical model, the simulated transboundary flux is $7.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ ($4.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ from the eastern flux and $3.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ from the western flux). In the conceptual model, the transboundary flux was estimated at $9.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ (Pétre et al. 2016). The groundwater flux transmitted through the international border also corresponds to the effective recharge rate of the MRA by assuming that this flux is solely due to the portion of the potential recharge that actually reaches the aquifer. In the numerical model, an effective recharge rate of 10 mm/y was applied on the outcrop area of the MRA to produce the simulated transboundary flux.

Ground water flow interception by the Milk River: The simulated flux intercepted by the Milk River and its tributaries is about $6.53 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$. This value represents 93% of the incoming groundwater flux flowing from the south in the MRA. The numerical model thus represents the Milk River as the main discharge feature of the MRA in terms of magnitude. The simulated flux transmitted beyond the Milk River is $4.7 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{y}$.

Quantification of cross-formational flow (vertical leakage): In southern Alberta, north of the Milk River, the numerical model simulates a downward vertical flow of $3.8 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{y}$ (directed from the MRA to the Colorado Group) and an upward flow of $2.9 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{y}$ along the bedrock valleys (directed from the MRA to the Pakowki/Claggett Formation). This discharge mechanism of the MRA was proposed by Borneuf (1976) and Toth and Corbet (1986) but had not been previously quantified. Both cross-formational flow values are in the range of estimates from the conceptual model.

Groundwater inflow from the overlying units: The MRA receives a groundwater inflow of about $2.4 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{y}$ from overlying units, especially in the vicinity of the topographic highs (Cypress Hills). This result supports the statement from Toth and Corbet (1986) according to which the MRA receives groundwater inflow from topographic highs in the study area.

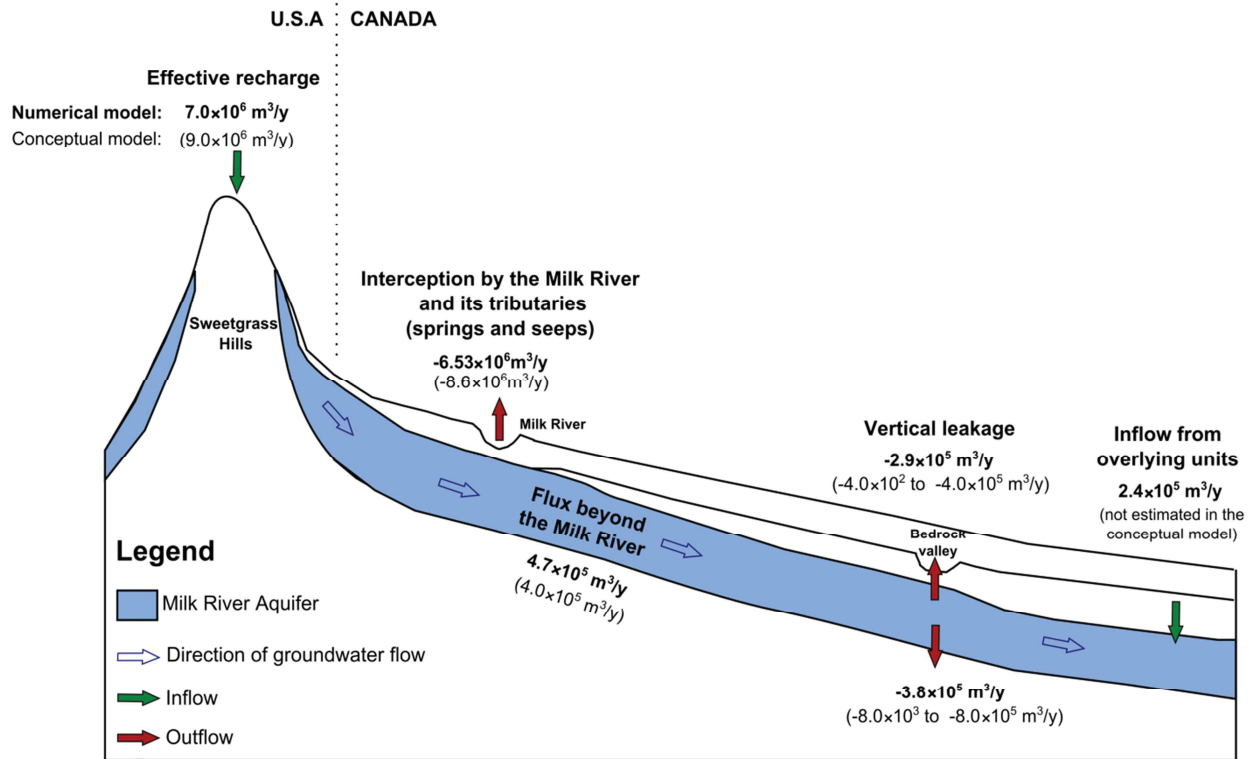


Figure 7.12 Comparison between the groundwater budget components from the conceptual model (Pétre et al. 2016) and the numerical model

As mentioned in the section 7.5 (Calibration criteria), the numerical groundwater flow model was calibrated in a way that the direction and magnitude of the groundwater budget components are in agreement with the conceptual model. Therefore, this comparison between the simulated and estimated values shows that the conceptual model is hydraulically plausible. The imbalance of 5.6% ($0.4 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{y}$) in the groundwater budget north of the Milk River is due to the relatively low level of discretization of the considered subdomain in the calculation of internal vertical fluxes.

7.9 Particle tracking

Particle tracking (PT), which represents advective transport was done to further investigate regional groundwater flow patterns. Values of effective porosity were assigned uniformly to each hydrostratigraphic units as this parameter is required to calculate the groundwater velocity. Effective porosity values were drawn from the literature and correspond to 0.5 for the shales of the Colorado and Pakowki/Claggett aquitards, 0.1 for the sandstone units of the MRA and Bow Island sandstone and 0.2 for the surficial sediments and the Belly River/Judith River Group

(Meyboom 1960; Domenico and Schwartz 1998). Backward PT was done in the Pakowki Lake area to identify its contributing area. In a backward particle tracking, the particles track in reverse the flow direction starting from the downgradient areas to the upgradient areas (Diersh 2014).

Flowpaths and residence times obtained from PT along cross-section AA' are shown in Fig. 7.13. Groundwater flow converges from the East Butte of the Sweet Grass Hills to the downgradient area of the Pakowki Lake in less than 60,000 years. Older flowpaths (>70,000 y) come from the topographic high of the Cypress Hills.

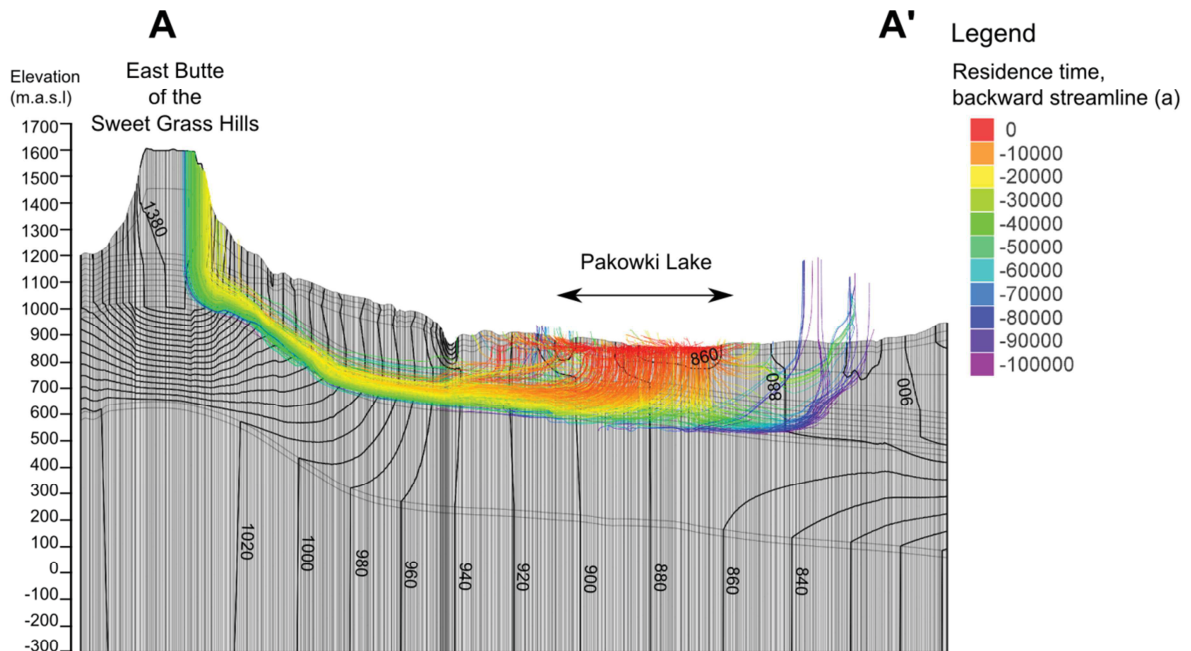


Figure 7.13. Backward particle tracking (travel time in years) from the Pakowki Lake area. The hydraulic heads contours (m.a.s.l.) are also shown. The location of the cross-section is shown in Fig. 7.2

A plan view (Fig. 7.14) shows that the contributing area to the Milk River is mostly located in northern Montana. Groundwater flow from the Sweet Grass Hills to the Milk River takes between 5,000 and 20,000 y. Another inflow with a longer travel time (up to 50,000 y) comes from the Milk River Ridge, west of Warner in Alberta. This value is consistent with isotopic data indicating that the area upgradient of the Milk River is in the dating range of ^{14}C (i.e. less than about 50,000 years) (Pétre et al. 2016).

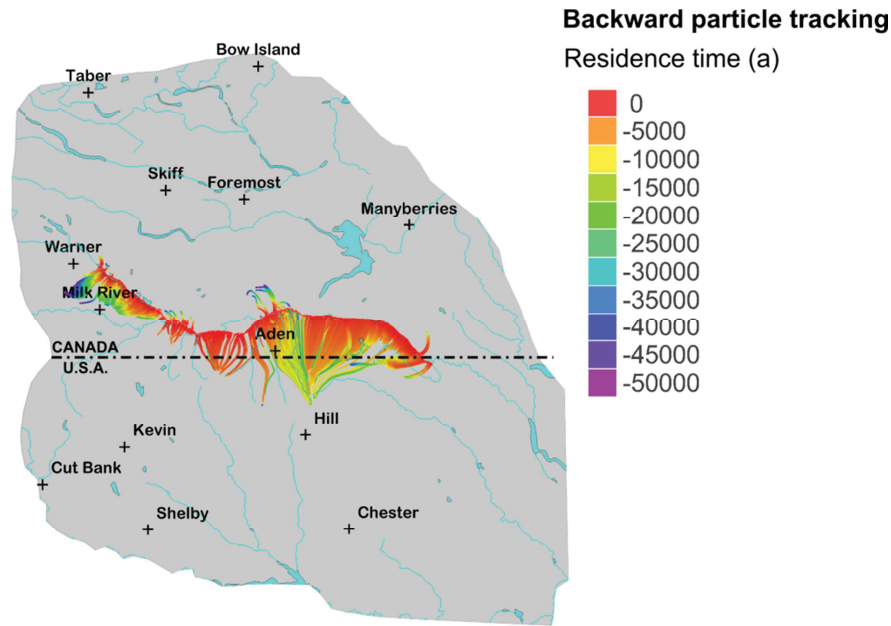


Figure 7.14 Backward particle tracking (residence time in years) from the nodes along the Milk River

Forward particle tracking was also applied to several particles within the MRA in the study area. Fig. 7.15 shows the paths of particles and their residence times. In Montana, residence time is especially small in the south-west corner of the study area, which is close to the recharge areas and where transmissivity is high. This is consistent with the presence of recent waters containing tritium in this area (Pétre et al. 2016). However, in the south-east part of the study area in Montana, groundwater flowpaths take from 100,000 to 200,000 y to reach the south-eastern limit of the model.

In southern Alberta, flowpaths directed to the north and passing through the central area of low hydraulic conductivity (between Skiff and Foremost) have older travel times (up to 1.4 Ma) than those which pass through the higher hydraulic conductivity areas (up to 750,000 y). Preferential flowpaths previously defined from chloride concentrations in the MRA can be thus recognised on both sides of the low hydraulic conductivity area (Hendry and Schwartz 1988; Pétre et al. 2016). Residence times simulated with the model are smaller than the groundwater ages time derived from the isotopic data (up to 2 Ma in the northern limit of the aquifer). However, they are larger than the previous estimates ranging from 250,000 to 500,000 y (Schwartz and Muehlenbachs 1979; Swanick 1982; Hendry and Schwartz 1988). It is normal that advective residence times are smaller than isotopic ages, as tracking does not account for dispersion and mixing of groundwater with older water from shale layers in the MRA or adjacent aquitards, which may be especially important after the onset of exploitation that may induce drainage from aquitards.

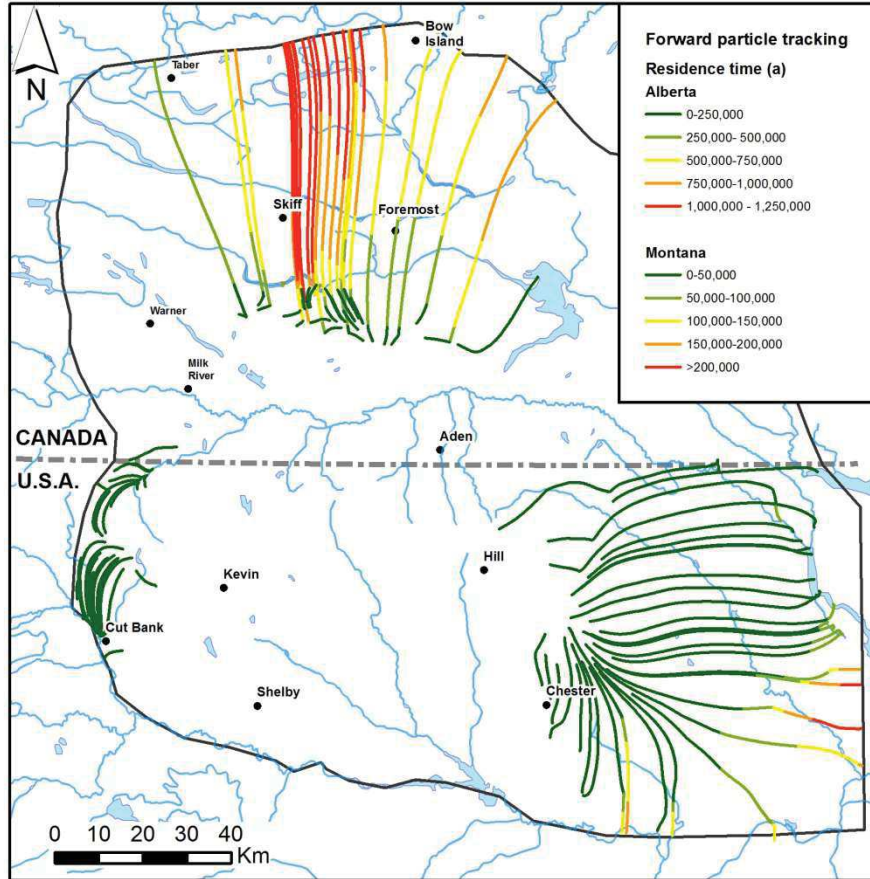


Figure 7.15 Forward particle tracking from nodes in the MRA

7.10 Parameter sensitivity analysis

A sensitivity analysis was carried out to test the effect of change in parameters in achieving the calibration result on the RMSE and on the number of calibration targets with a level 1. The sensitivity of the calibration is tested by changing several parameters (one at a time) from the reference case (the calibrated model). The RMSE and the percentage of level 1 calibration targets were calculated for each simulation. The magnitude of change in RMSE and level 1 calibration target is a measure of the sensitivity of the solution to that particular parameter.

Fig. 7.16 shows the effect of change in the recharge rate (a), the vertical anisotropy of the Belly River (b) and Pakowki formations (c), the hydraulic conductivity of the Pakowki Formation (d), the bedrock valleys (e) and the Milk River Formation in the south-east corner of the study area (f) on the RMSE and the number of level 1 calibration targets. Results are shown for the different

calibration zones to illustrate areas of the model domain that are most sensitive to variations of a specific parameter.

The calibration zones in south–west Montana and in the Sweet Grass Hills are the least sensitive to tested parameters, whereas the south-east Montana and the area south of the Milk River in Alberta are the most sensitive.

In the calibration process, a compromise was reached between the minimization of the RMSE and the maximisation of the number of flowing artesian nodes north of the study area. Therefore, the calibrated value does not always minimize the RMSE in the model but it rather reflects the adjustment between a satisfying representation of the artesian conditions and the minimisation of the RMSE. For example, a recharge rate increased by a factor of 2 or 4 will increase both the artesianism and the RMSE. Therefore, the number of level 1 calibration targets is lowered in all calibration zones except in south-west Montana. When the recharge rate is lowered by a factor 2 the RMSE slightly decreases whereas the decrease in artesianism is significant (more than 10%).

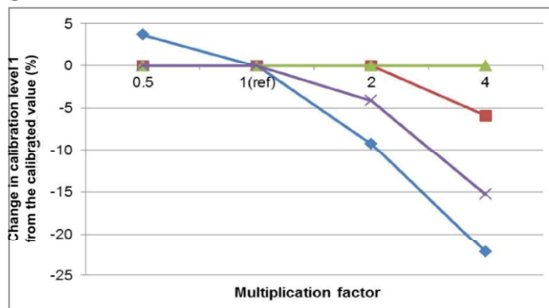
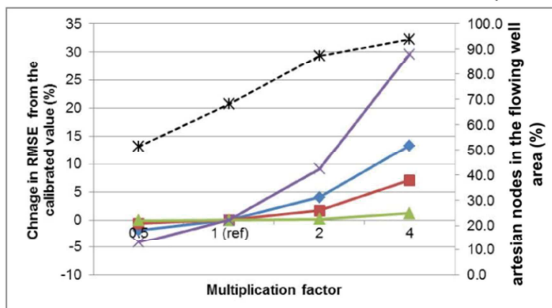
The same objective was followed when testing the vertical anisotropy of the Pakowki/Claggett and Belly/Judith River formations. The area south of the Milk River in Alberta and the area in south-east Montana are the most sensitive to the change in the vertical anisotropy.

The change in artesianism is especially significant (between 8 and 10%) when varying the hydraulic conductivity of the bedrock valleys and the vertical anisotropy of the Belly/Judith River Formation. When the hydraulic conductivity of the bedrock valleys is higher than the calibrated value, the flowing artesianism tends to disappear and the buried valleys do not function as drains anymore. The vertical flux between the buried valleys and the MRA is even reversed (directed downward from the buried valleys).

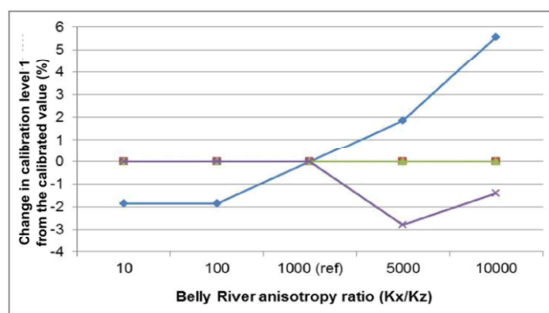
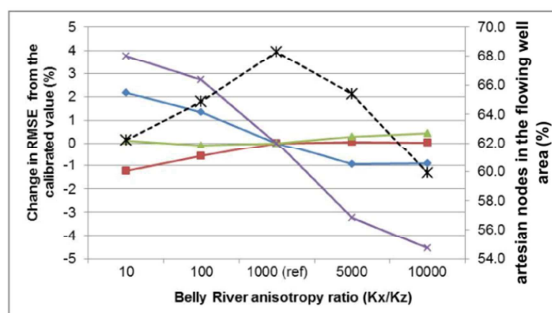
The performance of the model is sensitive to the change in the hydraulic conductivity of the Pakowki Formation in south-east Montana and southern Alberta only. This result was expected as the Pakowki Formation is little or not present at all in the other calibration areas of the model.

Changing the hydraulic conductivity of the Milk River Formation in the south-east corner of the study area in Montana only affects the performance of the model in that specific area.

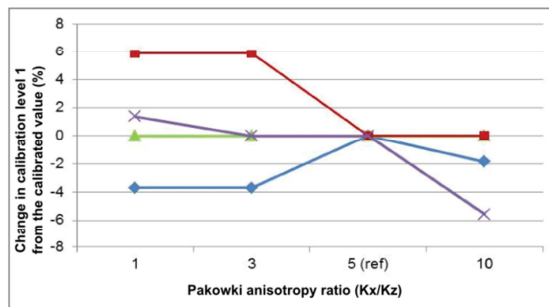
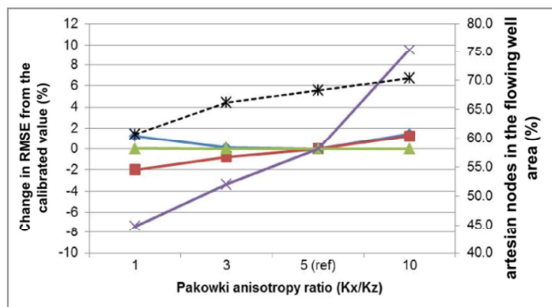
a) Recharge rate



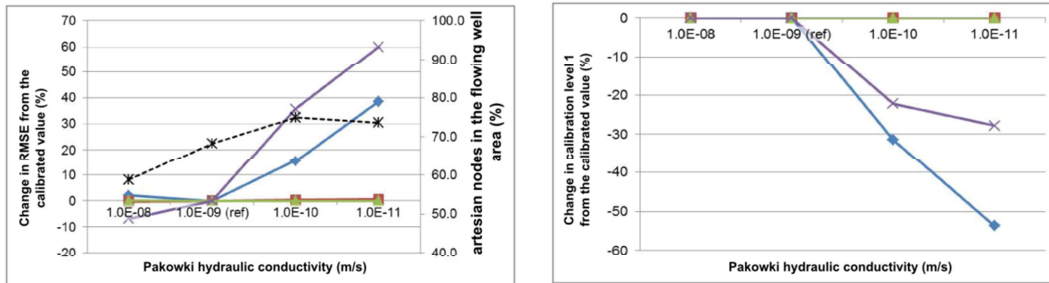
b) Vertical anisotropy of the Belly River Formation



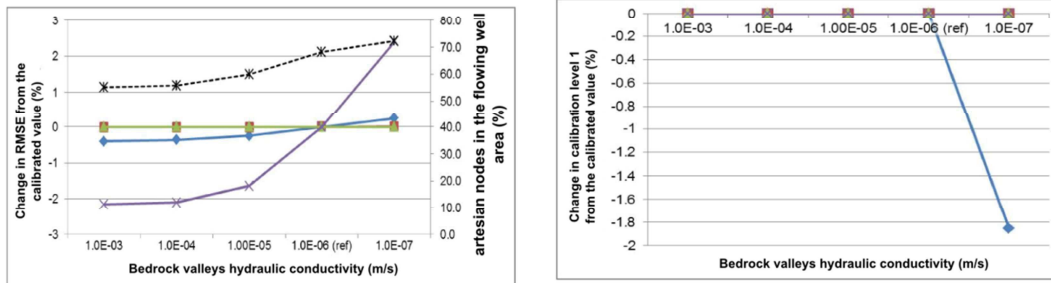
c) Vertical anisotropy of the Pakowki Formation



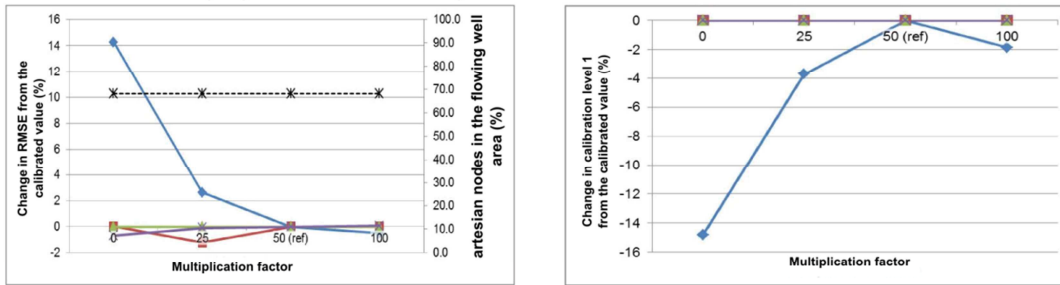
d) Hydraulic conductivity of the Pakowki Formation



e) Hydraulic conductivity of the Bedrock Valleys



f) Hydraulic conductivity of the MRA in South-east Montana



Legend

- ◆— South-east Montana
- Sweetgrass Hills Montana
- ▲— South-west Montana
- ×— Alberta (south of the Milk River)
- *-*- Artesianism

Figure 7.16 Plots showing the parameter sensitivity analysis of the RMSE and calibration level 1 (for each calibration zone) to the following parameters: a) Recharge rate b) Anisotropy ratio of the Belly River Formation c) Anisotropy ratio of the Pakowki Formation d) Hydraulic conductivity of the Pakowki Formation e) Hydraulic conductivity of the bedrock valleys f) Hydraulic conductivity of the MRA in the south-east corner of the study area

7.11 Model limitations

The numerical groundwater flow model developed in the present study is a simplification of the real aquifer system. The following limitations and sources of uncertainties should be taken into consideration when examining model results.

A first source of uncertainty lies in the underlying geological model, which constitutes the basis of the groundwater flow model. The error associated with the geometry, thickness and structure of the hydrostratigraphic units are reflected in the groundwater flow model. This is especially true in south-east Montana, where the geological data were sparse (Pétre et al. 2015), increasing the degree of uncertainty in the geometry of the geological units.

The limits of the geological model further constrain the groundwater flow model, as it does not extend in the Big Sandy Creek and Bear Paws Mountains areas in Montana due to a lack of geological data. Therefore, the hydraulic heads contours do not completely reflect the south-west/north-east orientation of the potentiometric low along the Big Sandy Creek, which was highlighted in the conceptual model. Collection of new data in this area would allow a better representation of the groundwater flow pattern in the south-east corner of the study area.

A simplification is made when assigning a uniform hydraulic conductivity to hydrostratigraphic units. A spatial distribution of hydraulic conductivity was applied to all three members of the Milk River Formation and the contrast between the hydraulic conductivity of the upper and lower members of the Milk River Formation was neglected.

The assumption that the potentiometric maps in Montana and south of the Milk River in Alberta are representative of a steady-state situation might not be correct everywhere and could explain the tendency towards overestimation of simulated heads south of the Milk River in Alberta and in the south-east Montana. The south-east area in Montana combines the highest error associated with the hydraulic conductivity of the MRA and a higher uncertainty concerning the geometry of the geological unit. Thus, this is the less reliable area in the model domain.

The combined error of the calibration targets includes the following components: uncertainty associated with the water level measurement in the case of the monitoring wells; uncertainty related to the use of potentiometric maps in defining the other calibration targets and the scale factor (local vs. regional scale of the historical potentiometric maps). These sources of error are reflected in the magnitude of the calibration target.

The non-uniqueness problem occurs when different sets of parameters give equally good models, in terms of matching the observations. The manual trial-and-error calibration done in the present study does not allow ruling out this issue. However, to address the non-uniqueness problem, the spatial distribution of hydraulic conductivity of the MRA was obtained from measured data and the hydraulic conductivity of the other hydrostratigraphic units was limited to a range considered close to reasonable values. To further address the non-uniqueness problem,

the same set of calibrated parameters should be applied to other conditions, such as the representation of induced stress caused by pumping. The regional groundwater flow model could then be improved by calibration under transient conditions.

7.12 Implications for groundwater management

The results of the steady-state model of groundwater flow in the MRA have some implications on management of the groundwater resource. As seen above, the numerical model shows that the conceptual model of the MRA is hydraulically plausible by successfully representing the location of the groundwater divide in Montana as well as the transboundary fluxes and the main components of the groundwater budget. Thus, the numerical model confirms that the MRA is an internationally shared groundwater resource, with two transboundary fluxes flowing from the recharge area in Montana to the north in Alberta.

It seems therefore appropriate to consider the implementation of a joint management of this shared resource between Canada and the USA. Both the numerical and conceptual models of the MRA allow the delineation of the proper management unit for such a transboundary management. The appropriate management unit would be comprised between the north of the groundwater divide in Montana and the south of the Canadian reach of the Milk River and Verdigris Coulee (also defined as “zone 1a” in Pétré et al. (2016)).

Furthermore, an effective groundwater management requires the knowledge of the spatial distribution of the actual groundwater use over time. Information about groundwater use is limited in the study area since the water right holders do not have the statutory requirement to measure their groundwater withdrawals. However, an assessment of the historical groundwater use levels in the MRA for the period 1908-2015 was performed in southern Alberta as part of the present study. The methodology and results of this assessment are described in Appendix VII and the corresponding data are available in Appendix VIII. The estimated groundwater extraction levels in the MRA is estimated to have increased from about $0.47 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ in 1920 to $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ in 1990 and then decreased to about $0.85 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ in 2015. These estimates are consistent with previous historical estimations from Meyboom (1960), Persram (1992) and HCI Consultants (2007).

The areas that contribute the most to the total groundwater extraction from the MRA are located south of the Milk River (west of Aden), in the central part of the study area (north of the Milk River) and in the north-eastern part of the study area (south-east of Bow Island). Interestingly,

the region located south of the Milk River experienced more groundwater withdrawals than previously thought. Indeed, previous studies generally described the area north of the Milk River as having the main groundwater users and where concerns related to the depletion of the MRA were reported (Meyboom 1960; AGRA Earth and Environmental Limited 1998). However, the present assessment showed that the area south of the Milk River has known significant groundwater withdrawals over the last century. As described in the “Water balance” section (7.8), due to the major interception of the incoming groundwater flow by the Milk River, the flux north of the Milk River is very low ($4.7 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{y}$). This groundwater flux represents the main external groundwater renewal mechanism of the MRA. Thus, the area north of the Milk River only receives a small portion of the main recharge flux from the MRA outcrop area whereas the area south of the Milk River benefits from the totality of the transboundary flux coming from the south.

The assessment of the groundwater extraction levels also shows that since the early 1920s, groundwater use in southern Alberta exceeds the magnitude of the groundwater inflow to the MRA north of the Milk River. This implies that the MRA water budget is in deficit in the area north of the Milk River due to the stress on the aquifer resource (e.g., pumping). As stated by Theis (1940) and more recently by Konikow and Leake (2014) some groundwater is always derived from storage during pumping but with increasing time the aquifer system tends to adjust to the groundwater withdrawals by increasing recharge and/or decreasing discharge. In the case of the MRA, vertical leakage from the confining units or a decrease in the interception of the Milk River could compensate for the effect of the intensive groundwater use in the MRA. The question is whether or not these processes could totally compensate withdrawals over the long term.

A dynamic groundwater flow budget in a transient model of the aquifer would be necessary to assess how much of the water is derived from storage in the aquifer or the confining units (Konikow and Neuzil 2007). The steady-state model as well as the groundwater use assessment developed in the present study could be used respectively as initial conditions and transient stress conditions for the development of such a transient model. Besides, the monitoring of groundwater quality evolution for the main pumping wells could help determine the temporal evolution of the origin of exploited groundwater from the MRA, as confining units contain groundwater with more dissolved solids than the MRA (Hendry and Schwartz 1988).

7.13 Conclusion

The first transboundary numerical groundwater flow model of the MRA was developed under steady-state conditions using the FEFLOW numerical simulator. This model is based on the previously developed geological model of the aquifer integrating all available hydrogeological data on both sides of the international border. Model calibration shows reasonable agreement between observed and simulated heads at observation points. The south-eastern area in Montana is however less reliable than the other calibration zones due to higher uncertainties in the observations and in the underlying geological model.

The regional groundwater flow model successfully reproduced the 3D groundwater flow pattern under pre-development conditions and represented the processes identified in the conceptual model. The two transboundary fluxes flowing from northern Montana to southern Alberta were properly represented and imply a low recharge rate in the subcrop area of the MRA. The Milk River and its tributaries intercept most of the recharge. The remaining inflow beyond the Milk River is therefore very small, confirming that the MRA is not significantly renewed. Particle tracking also confirms that groundwaters in the MRA are very old north of the Milk River.. The model also shows that the discharge mechanism of the MRA through aquitards and bedrock valleys is hydraulically plausible. Groundwater inflow reaching the MRA from the overlying units in the Cypress Hills area was also simulated and quantified. Therefore, the hydraulic plausibility of the hypotheses related to the functioning of the MRA is verified. Advective groundwater residence times obtained with the particle tracking are younger than isotopic ages both in Alberta and in the south-east part of the study area in Montana, which is expected as tracking does not represent dispersion or mixing. Tracking still confirms the active or inactive flow zones inferred by the conceptual model of the MRA. In the south-west corner of the study area in Montana shows young advective residence times confirming that this is an active flow area. Being a transboundary groundwater resource, an internationally shared management strategy of the MRA would be warranted; especially in the area comprised between the groundwater divide in Montana and the southern reach of the Milk River in Alberta. This numerical model constitutes a valuable component of the transboundary study of the MRA and it forms a prerequisite for further modelling efforts involving the representation of groundwater abstraction through pumping.

7.14 Acknowledgements

This work has been supported by the Groundwater Geoscience Program of the Geological Survey of Canada within the MiRTAP (Milk River Transboundary Aquifer Project). We are grateful to Nicolas Benoît and Daniel Paradis (Geological Survey of Canada) for their constructive discussions at early stages of the development of the numerical model.

7.15 References

- AGRA Earth and Environmental Limited (1998) Evaluation of depletion of the Milk River aquifer. AGRA Earth & Environmental, Edmonton
- Anderson MP, Woessner WW (1992) Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. Gulf Professional Publishing
- Anna LO (2011) Effects of groundwater flow on the distribution of biogenic gas in parts of the northern Great Plains of Canada and United States. U.S. Geological Survey
- Beaty CB (1990) Milk River in Southern Alberta: A Classic Underfit Stream. *Can Geogr Géographe Can* 34:171–174. doi: 10.1111/j.1541-0064.1990.tb01265.x
- Borneuf DM (1976) Hydrogeology of the Foremost Area. Alberta Research Council, Earth Sciences Report 1974-04
- Climate Canada (2015) Canadian Climate Normals. 1981-2010 Climate Normals and Averages. http://climate.weather.gc.ca/climate_normals/index_e.html
- Cummings DI, Russell HA, Sharpe DR, Fisher TG (2012a) Buried-valley aquifers in the Canadian Prairies: geology, hydrogeology, and origin. *Can J Earth Sci* 49:987–1004
- Cummings DI, Russell HAJ, Sharpe DR (2012b) Buried-valleys and till in the Canadian Prairies: geology, hydrogeology, and origin
- Diersch H-JG (2014) FEFLOW: finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media. Springer
- Domenico PA, Schwartz FW (1998) Physical and chemical hydrogeology. Wiley, New York
- Dowling DB (1917) View of model of the southern plains of Alberta, from southeast. Geological Survey of Canada, Multicoloured Geological Map 1647, 1917; 1 sheet, doi:10.4095/108095

Farvolden RN, Meneley WA, Lebreton EG, et al. (1963) Early contributions to the groundwater hydrology of Alberta. Alberta Res. Counc Bull 12:123

HCL consultants (2004) County of Forty Mile No. 8, Parts of the South Saskatchewan River and Missouri River Basins. Regional Groundwater Assessment, Tp 001 to 013, R 05 to 14, W4M

Hendry J, Schwartz FW, Robertson C (1991) Hydrogeology and hydrochemistry of the Milk River aquifer system, Alberta, Canada: a review. Appl Geochem 6:369–380. doi: 10.1016/0883-2927(91)90037-P

Hendry MJ, Buckland GD (1990) Causes of Soil Salinization: 1. A Basin in Southern Alberta, Canada. Ground Water 28:385–393. doi: 10.1111/j.1745-6584.1990.tb02268.x

Hendry MJ, Schwartz FW (1988) An alternative view on the origin of chemical and isotopic patterns in groundwater from the Milk River Aquifer, Canada. Water Resour Res 24:1747–1763. doi: 10.1029/WR024i010p01747

Konikow LF, Leake SA (2014) Depletion and Capture: Revisiting “The Source of Water Derived from Wells.” Groundwater 52:100–111. doi: 10.1111/gwat.12204

Konikow LF, Neuzil CE (2007) A method to estimate groundwater depletion from confining layers

Levings GW (1982) Potentiometric-surface map of water in the Eagle Sandstone and equivalent units in the Northern Great Plains area of Montana. United States Geological Survey

Lies H, Letourneau J (1995) Numerical Modelling of the Hydrodynamically Trapped Milk River Gas Field, Western Canada. Journal of Canadian Petroleum Technology. Vol. 34 Issue 10

Meyboom P (1960) Geology and groundwater resources of the Milk River sandstone in southern Alberta. Research Council of Alberta

Miller KJ, Norbeck P M (1996) Ground-water evaluation of the East Butte of the Sweet Grass Hills, North-Central Montana. Montana Bureau of Mines and Geology Open-File Report 351

NOAA (2015) National Centers for Environmental Information. Data Tools: 1981-2010 Normals. <http://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/datatools/normals>

Persram AS (1992) (draft report, unpublished): Hydrogeology of the Milk River Formation in Southern Alberta, Alberta Environmental Protection, Hydrogeology Branch, internal (draft) report

Pétre M-A, Rivera A, Lefebvre R (2015) Three-dimensional unified geological model of the Milk River Transboundary Aquifer (Alberta, Canada – Montana, USA). *Can J Earth Sci* 52:96–111. doi: 10.1139/cjes-2014-0079

Pétre M-A, Rivera A, Lefebvre R, et al. (2016) A unified hydrogeological conceptual model of the Milk River transboundary aquifer, traversing Alberta (Canada) and Montana (USA). *Hydrogeol J* 1–25. doi: 10.1007/s10040-016-1433-8

Phillips FM, Bentley HW, Davis SN, et al. (1986) Chlorine 36 dating of very old groundwater: 2. Milk River Aquifer, Alberta, Canada. *Water Resour Res* 22:2003–2016. doi: 10.1029/WR022i013p02003

Printz J (2004) Milk River Aquifer Reclamation & Conservation Program 1999-2004 Summary Report.

Robertson C (1988) Potential impact of subsurface irrigation return flow on a portion of the Milk River and Milk River Aquifer in southern Alberta. University Of Alberta Dept Of Geology

Schwartz FW, Muehlenbachs K (1979) Isotope and ion geochemistry of groundwaters in the Milk River Aquifer, Alberta. *Water Resour Res* 15:259–268. doi: 10.1029/WR015i002p00259

Schwartz FW, Muehlenbachs K, Chorley DW (1981) Flow-system controls of the chemical evolution of groundwater. *Dev Water Sci* 16:225–243

Swanick GB (1982) The hydrochemistry and age of the water in the Milk River aquifer, Alberta, Canada. Masters thesis. The University of Arizona

Theis CV (1940) The source of water derived from wells. *Civ Eng* 10:277–280

Toth J, Corbet T (1986) Post-Paleocene evolution of regional groundwater flow-systems and their relation to petroleum accumulations, Taber area, southern Alberta, Canada. *Bull Can Pet Geol* 34:339–363

Tuck LK (1993) Reconnaissance of geology and water resources along the north flank of the Sweet Grass Hills, north-central Montana. U.S. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 93-4026. 68 p

Zimmerman E (1967) Water resources of the Cut Bank area, Glacier and Toole Counties, Montana. Montana Bureau of Mines and Geology. Bulletin 60. 37 p

ANNEXES

ANNEXES

Le contenu des Annexes se trouve dans le dossier joint intitulé « Annexes_Pétre_Marie_Amelie.zip » à l'exception de l'annexe VII qui se trouve ci-dessous.

ANNEXE I- DÉPLIANT DE LA PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE TERRAIN

ANNEXE II- SONDAGE RÉALISÉ AUPRÈS DES MUNICIPALITÉS ET COMMUNAUTÉS DE LA RÉGION D'ÉTUDE SUR L'ACTUEL USAGE DE L'EAU SOUTERRAINE (CORRESPOND À *L'ELECTRONIC SUPPLEMENTARY MATERIAL* DU CHAPITRE 6)

ANNEXE III- MODÈLE GÉOLOGIQUE TRI-DIMENSIONNEL

ANNEXE IV- BASE DE DONNÉES GÉOCHIMIQUE

ANNEXE V- DONNÉES GÉOCHIMIQUES POUR LA DÉTERMINATION DES TYPES D'EAU SOUTERRAINE

ANNEXE VI- DONNÉES DE NIVEAUX D'EAU - POINTS DE CONTRÔLE

ANNEXE VII- ÉVALUATION PRÉLIMINAIRE DES NIVEAUX D'EXPLOITATION HISTORIQUES DES EAUX DE L'AQUIFÈRE MILK RIVER DANS LE SUD DE L'ALBERTA, CANADA

ANNEXE VIII- DONNÉES D'EXPLOITATION HISTORIQUE DES EAUX DE L'AQUIFÈRE MILK RIVER DANS LE SUD DE L'ALBERTA, CANADA

ANNEXE IX- DONNÉES DE TRANSMISSIVITÉ - POINTS DE CONTRÔLE

ANNEXE X- BILAN HYDROLOGIQUE MENSUEL EN ALBERTA, CANADA, ET AU MONTANA, ÉTATS-UNIS

ANNEXE VII. ÉVALUATION PRÉLIMINAIRE DES NIVEAUX D'EXPLOITATION HISTORIQUES DES EAUX DE L'AQUIFÈRE MILK RIVER DANS LE SUD DE L'ALBERTA, CANADA

Note : Cette annexe est rédigée en anglais dans la perspective d'intégration dans un futur article scientifique.

Titre en anglais: Groundwater use evaluation in southern Alberta

1. Introduction

The evaluation of groundwater use in the study area is a complex task especially due to the lack of data concerning the status and characteristics of the water wells and the diverted water volumes. Indeed, the well owners or water right holders do not have any statutory requirement to measure and declare their diverted volume. Yet, this information is crucial given the semi-arid context of the study area and considering the fossil groundwater resources of the Milk River Aquifer (MRA). The conceptual model as well as the steady-state groundwater flow model of the MRA pointed out the conditions of groundwater depletion in southern Alberta, north of the Milk River. An assessment of the historical exploitation levels in the MRA has been conducted on the Canadian side of the study area.

2. Groundwater use evaluation

Within this study, historical levels of groundwater resource exploitation were assessed using the Alberta Environment water well database. The water wells located within the limits of the MRA were selected. Their corresponding drilling reports generally contain the coordinates of the well, the completion date, the total depth of the well and the proposed use. Unfortunately, the information concerning the name of the geological formation in which the wells are completed is not available. In order to retrieve the water wells completed in the MRA, the geological surfaces from the geological model of the aquifer were used (Pétre et al. 2015). The wells whose total depth is located between the top and the bottom of the Milk River Formation were selected. This resulted in a set of 1655 unique wells.

Then, the wells were sorted by date of completion. When the date of completion of the well was missing from the water well report, the date on which the report was received by the authorities

was used instead; that was the case for 346 wells. There were 54 wells without any completion date or report date (representing about 3.4% of the MRA water wells). Most of these wells were identified as “federal well survey” or “well inventory” and have typically very few information. These 54 wells were discarded from the dataset. Besides, It was assumed that the 71 wells indicated as “observation well” or “monitoring well” do not contribute to the groundwater extraction and they were removed from the dataset as well. Additionally, 8 wells indicated as “other” or “standby” were discarded. The 1522 remaining water wells have a completion date ranging between 1908 and 2008.

The next stage consisted in assigning an extraction rate to each well, depending on their proposed use (Table1):

The extraction rates for wells with “domestic”, “domestic and stock” and “stock” use were set at 1250, 7500 and 6250 m³/y respectively as provided by the Alberta Water Act (2000). For the wells indicated as “industrial wells” (140 wells), “domestic and irrigation” (9 wells), “domestic and Industrial” (1 well) and “irrigation”, a rate of 7500 m³/y was set. For the wells with “unknown” use, a mean extraction value of 3750 m³/y was defined.

The dataset contains 24 municipal wells. For 10 out of the 24 municipal wells, it was possible to assign an extraction rate corresponding to their licence as indicated in AGRA Earth and Environmental (1998). However, 14 municipal wells were not part of the AGRA file and were assigned an extraction rate value of 7500 m³/y.

Table 1 Description of the proposed used of the 1,522 MRA water wells and their estimated extraction rate

Proposed Use	Extraction rate (m³/y)	Number of wells	Source
Domestic	1250	332	Alberta Water Act (2000)
Domestic and Stock	7500	592	Alberta Water Act (2000)
Stock	6250	210	Alberta Water Act (2000)
Industrial wells	7500	140	Estimated
Domestic and irrigation	7500	9	Estimated
Domestic and Industrial	7500	1	Estimated
Irrigation	7500	5	Estimated
Unknown use	3750	209	Estimated
Municipal wells	7500 or licence value when available	24	AGRA Earth and Environmental(1998)

Then, two questions arise: 1) for how long can the water wells be considered as active? 2) How can we estimate the portion of the allocation (extraction rate) that is actually used? To answer those questions, the historical estimations of groundwater use in 1960, 1998 and 2004-2007 were used as a reference (Meyboom 1960; Persram 1992; HCL consultants 2004; HCL consultants 2007). The combination that best matches the historical groundwater use was the wells having a 30-year life span with 50% of the water allocation (or licence in the case of municipal wells) actually used.

In anticipation of further developments of numerical models involving the representation of induced stress caused by pumping wells, six pumping areas have been defined over southern

Alberta. Those pumping areas can be easily represented in a transient groundwater flow model as diffusive sinks. The delineation of the pumping areas is based on the completion date of the wells and their density. However, in order to preserve the local effect of pumping caused by the main groundwater users, the eight (8) main municipal wells (out of 24) were extracted from the database. These particular wells could be represented individually as well boundary condition in a groundwater flow model. In the case of the municipal well in the Village of Foremost, actual groundwater use data are available and have been use instead of applying the 50% allocation assumption.(HCL consultants 2004; Pétré et al. 2016) Figure 1 shows the location of the MRA wells and the delineation of the pumping areas. Most of the wells are located in zone 1, 3, 4 and 6 whereas the density of wells is the lowest east and south-east of the Pakowki Lake (Zone 5) and north-west of Warner (Zone 2). The main municipal wells are almost all located in zone 6.

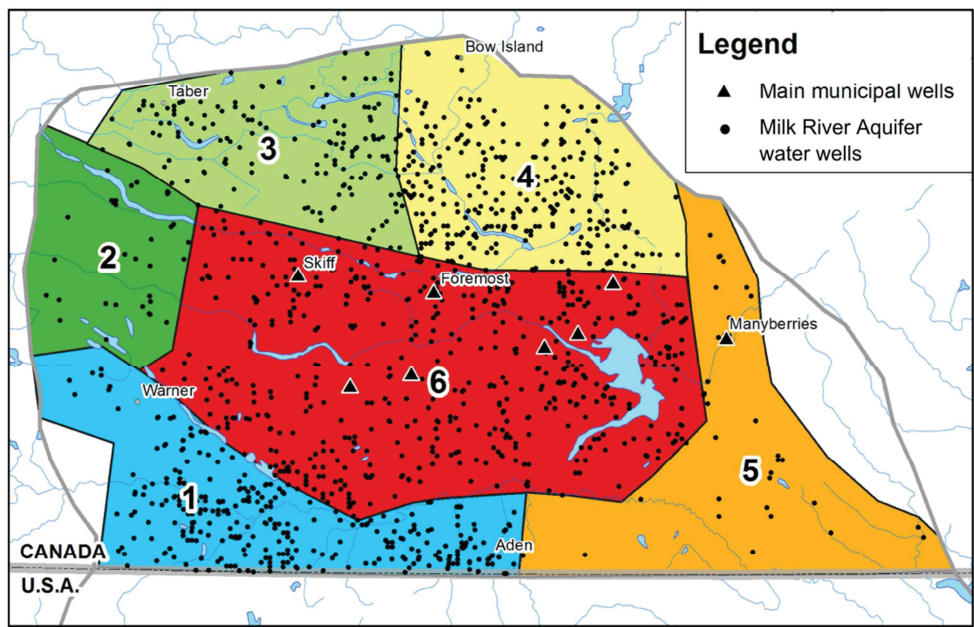


Figure 1 Delineation of the six pumping areas, along with the location of the water wells completed in the MRA and the 8 main municipal wells (largest groundwater licence)

The groundwater extraction in each pumping area was calculated annually from 1908 to 2008, using a well lifespan of 30 years and assuming that only 50% of the water allocation was actually use (Fig. 2). The groundwater extraction levels globally increased from 1908 to the early 1990s, then decrease at or below the 1960s' values. The proportion of groundwater use varies over time in the different zones. More specifically, zones 1, 4 and 6 contribute the most to the

total groundwater extraction. In the beginning of the exploitation, zone 1 contributed the most to the total groundwater extraction. Then, from the 1930s to the 1980s, zones 4 and 6 contributed the most to the development of the resource. Since 1994, the contribution of the pumping areas did not vary much and zones 1 and 6 represent the main areas for most of the groundwater exploitation in the MRA.

To simplify the assignment of the groundwater use levels over time in a potential transient model, the 1908-2008 timeframe was discretized into 9 periods with a constant stage value. A tenth period (2009-2015) was added, however it is not based on the data. Indeed, since the most recent completion date in the well records is 2008, an extrapolation of the 2000-2008 values was performed. It was assumed that the mean contribution of the pumping areas remains the same during the 2009-2015 periods. Figure 3 supports this assumption as the mean contribution of the pumping areas appears to be stabilized since 1995. The groundwater extraction levels during the most recent period (2008-2015) follow the downward trend and are therefore below the 1960s values.

Based on this analysis and assessment, the cumulative groundwater use over the 1908-2015 periods is estimated at $125 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$. This value is slightly higher than the previous estimation of $111 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ based on the historical estimations (Pétre et al. 2016).

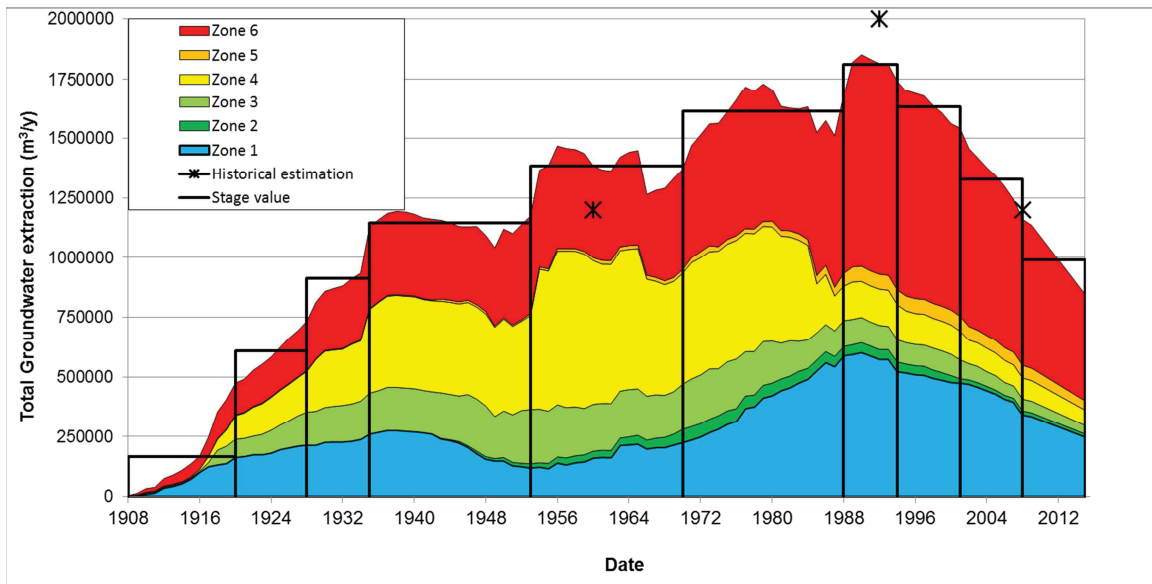


Figure 2 Groundwater extraction from the MRA following the 6 zones and the stage value applied for ten periods. Historical estimations are from Meyboom (1960); Persram (1992 unpublished report) and HCL consultants (2004 and 2007) are also shown

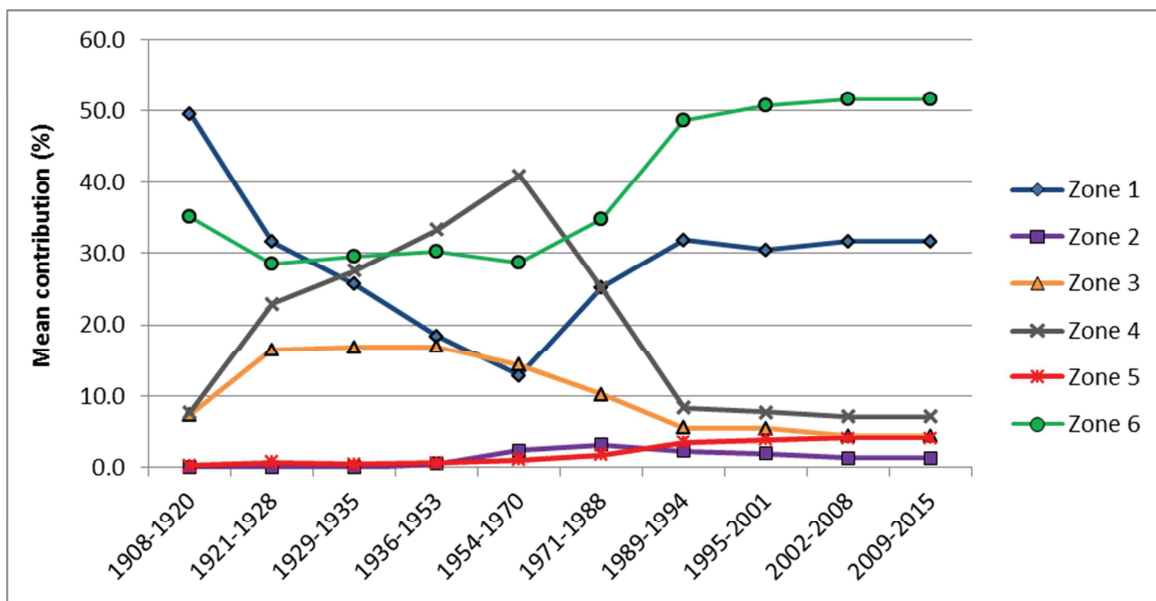


Figure 3 Mean contributions of the six pumping areas to the total groundwater extraction in the MRA

3. Limitations

The uncertainties of the groundwater use assessment are mostly related to the date of completion and the allocation rate of the water wells. For 22% of the MRA wells in the database, the date of completion was equated to the date the water well report was received by the government. These dates can greatly differ since the drilling report can be received years or even decades after completion of the well. Thus, this assumption may lead to errors in the active period of the wells. The allocation rate for the licensed and municipal wells can vary significantly. Therefore, the extraction rate value of 7500 m³/y may be either too high or too low, depending on the actual use. Besides, the assumption that 50% of the allocated rate is actually used can also lead to errors. However, both hypotheses were considered reasonable given the zoning approach that was taken. The use of pumping areas can contribute to smooth out differences. A more complex assessment involving the exploration of additional databases such as the licensed well database is required to refine the evaluation of the groundwater extraction levels in the MRA.

4. Conclusion

This assessment of the historical groundwater extraction levels of the MRA shows the evolution of the groundwater use over time and space in southern Alberta. The global groundwater use increased from 1908 and reached a maximum in the mid-1990s, and then it decreased at or below the 1960s levels. The definition of pumping zones shows that the areas which contribute the most to the groundwater development of the MRA are located south-west of the Milk River, in the central part of the study area and north-east of the village of Foremost. The main municipal users are mostly located in the central part of the study area. The estimation of the groundwater use over a period of 108 years in the six pumping areas, as well as the representation of the 8 main municipal users constitute a valuable input for a future transient groundwater flow model of the MRA.

5. References

AGRA Earth and Environmental Limited (1998) Evaluation of depletion of the Milk River aquifer (AGRA Earth & Environmental, Edmonton)

Alberta Water Act (2000) Revised Statutes of Alberta 2000 Chapter W-3, Province of Alberta. <http://www.qp.alberta.ca/documents/Acts/w03.pdf>. Accessed in September 2016

HCL consultants (2004) County of Forty Mile No. 8, Parts of the South Saskatchewan River and Missouri River Basins. Regional Groundwater Assessment, Tp 001 to 013, R 05 to 14, W4M

HCL consultants (2007) M.D. of Taber, Part of the South Saskatchewan River Basin. Regional Groundwater Assessment, Parts of Tp 007 to 015, R 12 to 20, W4M

Meyboom P (1960) Geology and groundwater resources of the Milk River sandstone in southern Alberta. Research Council of Alberta

Persram AS (1992) (draft report, unpublished) Hydrogeology of the Milk River Formation in Southern Alberta, Alberta Environmental Protection, Hydrogeology Branch, internal (draft) report

Pétre M-A, Rivera A, Lefebvre R (2015) Three-dimensional unified geological model of the Milk River Transboundary Aquifer (Alberta, Canada – Montana, USA). *Can J Earth Sci* 52:96–111. doi: 10.1139/cjes-2014-0079

Pétre M-A, Rivera A, Lefebvre R, et al. (2016) A unified hydrogeological conceptual model of the Milk River transboundary aquifer, traversing Alberta (Canada) and Montana (USA). *Hydrogeol J* 1–25. doi: 10.1007/s10040-016-1433-8

Résumé

Depuis le début du 20^{ème} siècle, les eaux souterraines de l'aquifère transfrontalier Milk River (MRA) ont constitué une importante ressource dans le sud de l'Alberta (Canada) et le nord du Montana (USA). L'utilisation intensive de cette ressource sous un climat semi-aride a provoqué une baisse importante des niveaux d'eau localement, si bien que des inquiétudes concernant la pérennité du MRA sont apparues dès les années 60. Les études précédentes du MRA étaient limitées par les frontières nationales, empêchant ainsi une compréhension complète de la dynamique de l'aquifère. L'objectif de cette thèse était de réaliser une étude transfrontalière du MRA afin de caractériser cette ressource régionale d'eau souterraine selon ses limites naturelles. À cette fin, trois modèles transfrontaliers ont été développés : un modèle géologique, un modèle conceptuel hydrogéologique et un modèle numérique d'écoulement souterrain. Des travaux de terrain de part et d'autre de la frontière Canada/USA et une revue de littérature exhaustive des études précédentes ont supporté la réalisation de ces modèles. De plus, une première évaluation des niveaux d'exploitation historiques du MRA a été réalisée en Alberta.

Le modèle géologique 3D (50 000 km²) représente le MRA (Membre Virgelle de la Formation Milk River/Eagle) et ses unités confinantes continûment à travers la frontière internationale. Le développement de ce modèle a requis une harmonisation des nombreuses nomenclatures stratigraphiques de la région et la délimitation transfrontalière du MRA.

Le modèle conceptuel hydrogéologique du MRA a montré deux flux d'écoulement souterrains transfrontaliers, dirigés du Montana vers l'Alberta. La Milk River intercepte la majeure partie du flux souterrain venant du sud, si bien que l'écoulement au nord de la rivière est très faible. Les analyses isotopiques confirment que les eaux du MRA sont principalement fossiles à l'exception de la zone de recharge située le long de la zone d'affleurement du MRA. Les zones du MRA avec une forte conductivité hydraulique et de faibles concentrations en chlorures correspondent à des voies d'écoulement préférentielles. L'émergence des eaux du MRA a lieu via la drainance à travers les unités confinantes notamment le long des vallées enfouies. Le modèle numérique (26 000 km²) d'écoulement souterrain du MRA en régime permanent est une transposition des modèles géologique et conceptuel. Il montre que le modèle conceptuel précédemment développé est hydrauliquement plausible. Le modèle d'écoulement donne une meilleure compréhension du système aquifère en représentant la dynamique de l'écoulement souterrain dans la situation pré-exploitation. Le traçage de particules indique des temps de résidence advectifs de près de 750 000 ans à la limite nord du MRA, ce qui est inférieur aux âges obtenus par les analyses isotopiques (2 Ma). La zone au sud de la Milk River bénéficie de la totalité du flux transfrontalier venant du Montana tandis que la zone au nord de la rivière ne reçoit qu'une partie du flux de recharge provenant du sud à cause de l'interception par la Milk River. Les bilans en eau des modèles conceptuels et numériques montrent tous les deux que l'extraction de l'eau souterraine dépasse de loin la recharge au nord de la Milk River. Un modèle d'écoulement transitoire serait requis pour définir le volume d'eau provenant de l'emmagasinement dans le MRA et préciser le rôle des aquitards durant le pompage. Par ailleurs, en tant que ressource internationale partagée, une gestion transfrontalière des eaux du MRA serait justifiée dans la région comprise entre la zone de recharge au Montana et le sud de la Milk River en Alberta. Ainsi, ces trois modèles transfrontaliers du MRA forment une base commune internationale de connaissances scientifiques à l'échelle de l'aquifère et pourraient supporter l'évaluation future du meilleur usage possible de cette ressource partagée et limitée. De futurs travaux peuvent inclure l'effet des champs de gaz localisés aux limites du MRA et les conditions paléo-hydrogéologiques liées à l'évolution géochimique de l'eau souterraine.

Mots Clés

Aquifère transfrontalier, modèle géologique, modèle conceptuel, modèle numérique

Abstract

Since the beginning of the 20th century, groundwater from the Milk River Aquifer (MRA) has been an important water resource in southern Alberta (Canada) and northern Montana (USA). The intensive use of this resource under a semi-arid climate has locally led to important drops in water levels, thus raising concerns on the MRA sustainability since the 1960s. Previous MRA studies were limited by the national boundaries, thus preventing a full understanding of the aquifer dynamics. The objective of this thesis was to carry out a transboundary study of the MRA to define this regional groundwater resource within its natural boundaries. For this purpose, three cross-border models were developed: a geological model, a conceptual hydrogeological model and a numerical groundwater flow model. These developments were supported by focused field work on both sides of the Canada/USA border and a comprehensive review of previous studies. Furthermore, a first assessment of the historical exploitation levels of the MRA was done for southern Alberta.

The 3D geological model (50,000 km²) continuously represents the MRA (Virgelle Member of the Milk River/Eagle Formation) and confining units through the international border. Development of this model required harmonization of various stratigraphic nomenclatures in the study area and the transboundary delineation of the MRA extent.

The hydrogeological conceptual model of the MRA indicated two transboundary groundwater fluxes from Montana to Alberta. The Milk River intercepts most of the groundwater flux incoming from the south, thus leading to limited groundwater flow north of the Milk River. Isotopic analyses confirm that the MRA contains mostly fossil groundwater, with the exception of the recharge area located along the outcrop area of the aquifer. Areas within the MRA with a high hydraulic conductivity and low chloride concentrations correspond to preferential groundwater flowpaths. Discharge from the aquifer occurs as vertical leakage through the overlying confining units, especially along bedrock valleys.

The numerical steady-state groundwater flow model of the aquifer system (26,000 km²) is a transposition of the geological and conceptual models, and it shows that the previously developed conceptual model is hydraulically plausible. The groundwater flow model provides a better understanding of the aquifer system by representing the dynamics of groundwater flow under pre-development conditions. Particle tracking indicates advective residence times of up to 750,000 years in the northern limit of the aquifer, which is lower than ages obtained from isotopic analyses (2 Ma).

The area south of the Milk River benefits from all of the transboundary groundwater flux from Montana whereas north of the Milk River, only a portion of the recharge flux coming from the south is transmitted due to the interception of the Milk River. Groundwater budgets from both the conceptual and numerical models show that groundwater extraction far exceeds recharge north of the Milk River. A transient model would be required to determine how much water is derived from storage in the MRA and to assess the role of the confining units during pumping. Furthermore, as an internationally shared resource, a transboundary management of the MRA would be appropriate, especially in the area comprised between the recharge area in Montana and the Canadian reach of the Milk River.

Together, these transboundary models of the MRA constitute a common international basis of scientific knowledge at the aquifer scale and could support further assessments of the best possible exploitation of the shared but limited resource. Future works could include the study of the effects of the gas fields located at the limits of the MRA as well as paleo-hydrogeological conditions relative to the geochemical evolution of groundwater.

Keywords

Transboundary aquifer, geological model, conceptual model, numerical model