



Projet RADEAU 2
RAPPORT FINAL

**Estimation de la recharge avec le modèle
d'infiltration HELP pour les régions de Laval et
des Laurentides**

Mélanie Raynald, René Lefebvre et Jean-Sébastien Gosselin

Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement

Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2019
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-917-3 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2019
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2019

Table des matières

1.	Introduction	1
1.1.	Description de la zone d'étude	1
1.2.	Description des travaux	1
2.	Données existantes disponibles	2
2.1.	Données météorologiques	2
2.1.1.	Températures et précipitations	2
2.1.2.	Radiation solaire	2
2.2.	Données géomatiques	2
2.2.1.	Modèle numérique d'élévation (MNE)	3
2.2.2.	Pente moyenne.....	4
2.2.3.	Couverture du sol	4
2.2.4.	Inventaire des cultures.....	4
2.2.5.	Pédologie.....	4
2.2.6.	Données des stations de jaugeage	5
2.3.	Données hydrogéologiques	6
2.3.1.	Données du SIH et du RSESQ.....	6
2.4.	Données quaternaires	6
3.	Préparation des données d'entrées pour HELP	6
3.1.	Fichiers des données de précipitations (.D4)	7
3.2.	Fichiers des données de températures (.D7)	7
3.3.	Fichiers de radiation solaire (.D13).....	7
3.4.	Fichiers des données liées aux caractéristiques des sédiments superficiels (.D10).....	7
3.4.1.	Indice de surface foliaire.....	8
3.4.2.	Numéro de courbe (<i>Curve Number</i>)	9
3.4.3.	Description des unités stratigraphiques.....	11
3.4.4.	Attribution des types de couches HELP	13
3.4.5.	Attribution des propriétés hydrauliques	15
3.4.6.	Distance aux drains	16
3.4.7.	Pente moyenne.....	16
3.4.8.	Numéro d'identification de l'unité stratigraphique	16
3.5.	Fichiers des données liées à la croissance des végétaux (.D11).....	16

3.5.1. Latitude, vent et humidité.....	16
3.5.2. Période de croissance des plantes.....	17
3.5.3. Profondeur racinaire	17
3.5.4. Nombre de couches.....	18
4. Préparation d'autres données nécessaires.....	18
4.1. Conditions de confinement	18
4.2. Débit total et débit de base	19
5. Procédure du calcul pour l'estimation de la recharge	20
5.1. Pré-traitement HELP	20
5.2. Exécution de HELP	20
5.3. Post-traitement HELP	21
5.3.1. Cellules EAU (Contexte 0).....	21
5.3.2. Cellules Normales (Contexte 1).....	22
5.3.3. Cellules en bordure des cellules EAU (Contextes 2 et 3).....	23
5.4. Production des résultats	23
5.5. Production des graphiques	24
6. Calage.....	24
6.1. Calage de l'évapotranspiration	25
6.2. Calage de la conductivité hydraulique des unités.....	25
7. Interprétation des résultats	29
7.1. Distribution spatiale des composantes du bilan hydrologique	29
7.2. Distribution temporelle des composantes du bilan hydrologique.....	30
8. Conclusions	34
9. Références.....	37

Liste des annexes

Annexe 1	Extraction des données stratigraphiques et piézométriques disponibles
Annexe 2	Développement du modèle hydrostratigraphique
Annexe 3	Méthodologie pour produire la carte piézométrique
Annexe 4	Exécution de HELP avec le module <i>pyhelp</i>
Annexe 5	Fichiers électroniques des données brutes, des fichiers de travail et des résultats des simulations HELP calées

Liste des figures

Figure 3.1	Modèle conceptuel.....	15
Figure 6.1	Graphiques de comparaison du débit total et du débit de base annuel des rivières pour les deux bassins versants calés. a) Bassin de calage de la rivière Du Chêne dans les Basses Terres du Saint-Laurent, b) Bassin de calage de la rivière du Nord dans les Laurentides.....	28
Figure 7.1	Graphiques des composantes du bilan calculées par HELP pour différentes périodes pour le bassin de calage de la rivière Du Chêne dans les Basses Terres; a) annuel, b) mensuel et c) moyen de 1965 à 2014..	32
Figure 7.2	Graphiques des composantes du bilan calculées par HELP pour différentes périodes pour toutes les cellules dans les Basses Terres; a) annuel, b) mensuel et c) moyen de 1965 à 2014	32
Figure 7.3	Graphiques des composantes du bilan calculées par HELP pour différentes périodes pour le bassin de calage de la rivière du Nord dans les Laurentides; a) annuel, b) mensuel et c) moyen de 1965 à 2014	33
Figure 7.4	Graphiques des composantes du bilan calculées par HELP pour différentes périodes pour toutes les cellules dans les Laurentides; a) annuel, b) mensuel et c) moyen de 1965 à 2014	33
Figure A4.1	Schéma des étapes gérées par <i>pyhelp</i>	A.20

Liste des tableaux

Tableau 2.1	Jeux de données pour la radiation solaire mesurée à l'aéroport international de Montréal (CWEEDS)	2
Tableau 2.2	Sources des données SIG	3
Tableau 2.3	Stations de jaugeage utilisées pour le calage (CEHQ, 2018).....	5
Tableau 3.1	Détermination de l'indice de surface foliaire (<i>LAI</i>) à partir du type de couverture de sol. Modifié de Huchet (2018).....	8
Tableau 3.2	Attribution du numéro de courbe pour des conditions hydrologiques moyennes en fonction de l'utilisation du sol, de la pente et de la classe hydrologique. Modifié de Monfet (1979) par Croteau (2006)	9
Tableau 3.3	Utilisation simplifiée du sol obtenue à partir du type de couverture de sol. Modifié de Huchet (2018).....	10
Tableau 3.4	Groupes hydrologiques associés à chaque texture USDA	11
Tableau 3.5	Propriétés physiques selon la texture de sol USDA (Schroeder et al., 1994).....	12
Tableau 3.6	Séquences géologiques et couches HELP attribuées	14
Tableau 3.7	Propriétés hydrauliques initiales des groupes de sédiments quaternaires	16
Tableau 3.8	Distance aux drains attribuée selon l'utilisation du sol simplifiée.....	16
Tableau 3.9	Définition de la profondeur racinaire selon le type de culture	18
Tableau 4.1	Critères des conditions de confinement pour les Basses Terres	19
Tableau 4.2	Critères des conditions de confinement pour les Laurentides	19
Tableau 5.1	Opération de post-traitement associé aux différents contextes des cellules	22

Tableau 5.2	Description des champs du shapefile <i>help_results_0424.shp</i>	23
Tableau 6.1	Exemple de synthèse des résultats obtenus pour les différentes simulations réalisées pour le bassin de la rivière Du Chêne à partir du cas de base	27
Tableau 7.1	Tendances temporelles des composantes du bilan hydrologique	30
Tableau A1.1	Table Roc – Description des champs	A.2
Tableau A1.2	Table Argile – Description des champs	A.3
Tableau A4.1	Description des champs du fichier input.csv	A.22
Tableau A4.2	Description des champs du fichier résultat de HELP <i>help_results_0424.shp</i>	A.24
Tableau A5.1	Contenu du dossier <i>DonneesBrutes</i>	A.26
Tableau A5.2	Contenu du dossier <i>FichiersTravail</i>	A.27
Tableau A5.3	Contenu du dossier <i>ResultatsHELP</i>	A.28

Liste des planches

Planche 1	Localisation
Planche 2	Topographie – Modèle numérique d'élévation
Planche 3	Pente moyenne
Planche 4	Couverture du sol
Planche 5	Inventaire des cultures, 2015
Planche 6	Drainage des sols
Planche 7	Précipitations moyennes annuelles de 1965 à 2014
Planche 8	Températures moyennes annuelles de 1965 à 2014
Planche 9	Indice de surface foliaire
Planche 10	Numéro de courbe
Planche 11	Utilisation du sol simplifiée pour déterminer le numéro de courbe
Planche 12	Pente moyenne pour déterminer le numéro de courbe
Planche 13	Groupes hydrologiques pour déterminer le numéro de courbe
Planche 14	Texture des sols
Planche 15	Épaisseur totale des sédiments – Obtenue par krigeage ordinaire
Planche 16	Élévation du toit du roc– Obtenue par calcul
Planche 17	Épaisseur de l'argile – Obtenue par krigeage ordinaire
Planche 18	Élévation du toit d'argile – Obtenue par krigeage ordinaire
Planche 19	Élévation de la base de l'argile – Obtenue par calcul
Planche 20	Épaisseur de sable superficiel – Obtenue par calcul
Planche 21	Épaisseur de till – Obtenue par calcul
Planche 22	Piézométrie de l'aquifère régional – Krigeage avec dérive externe (MNE)
Planche 23	Distance au drain
Planche 24	Profondeur racinaire
Planche 25	Conditions de confinement
Planche 26	Évapotranspiration réelle moyenne annuelle de 1965 à 2014 (HELP)
Planche 27	Ruissellement de surface moyen annuel de 1965 à 2014 (HELP)
Planche 28	Ruissellement hypodermique moyen annuel de 1965 à 2014 (HELP)
Planche 29	Percolation moyenne annuelle de 1965 à 2014 (HELP)
Planche 30	Recharge moyenne annuelle de 1965 à 2014 (HELP)

1. Introduction

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet RADEAU 2. Les travaux de RADEAU 2 nécessitent l'estimation de la recharge des nappes phréatiques pour les régions de Laval et des Laurentides puisque ces régions n'ont pas été couvertes par les projets PACES réalisés jusqu'à maintenant. L'estimation de la recharge a été faite à l'aide du modèle d'infiltration HELP (Schroeder, 1994) qui a été adapté à l'évaluation régionale de la recharge spatialement distribuée (Croteau et al., 2010) et utilisé par l'INRS dans le cadre des projets PACES en Montérégie Est (Carrier et al., 2013) et en Chaudière-Appalaches (Lefebvre et al., 2015). L'estimation de la recharge a été faite pour l'aquifère rocheux fracturé où puisent la grande majorité des puits d'approvisionnement de la région. Bien que des aquifères granulaires soient présents au-dessus du roc par endroits, ils ne sont pas continus à l'échelle régionale.

1.1. Description de la zone d'étude

La zone d'étude comprend les régions de Laval et des Laurentides. La [planche 1](#) présente la délimitation de la zone à l'étude. En l'absence de données pédologiques de l'IRDA au nord de Mont-Laurier, la zone d'étude a été délimitée à l'intérieur de la région des Laurentides.

La région de Laval est une île qui est bordée au sud par la rivière des Prairies et, au nord, par la rivière des Mille Îles (MAMOT, 2017). L'élévation naturelle du sol varie de 7 m (- 18 m si on considère les carrières) à 60 m avec une moyenne autour de 31 m au-dessus du niveau moyen des mers. Laval se trouve dans les Basses Terres du Saint-Laurent. La région des Laurentides recoupe deux régions physiographiques, les Basses Terres du Saint-Laurent, au sud, et le Bouclier canadien, au nord. La portion des Laurentides située dans les Basses Terres du Saint-Laurent se nomme les Basses-Laurentides. L'élévation du sol varie de 15 à 100 m au-dessus du niveau des mers pour cette région. Pour faciliter la lecture, la portion de la région administrative des Laurentides qui n'est pas dans les Basses Terres sera identifiée dans le présent rapport comme « Laurentides ». L'élévation des Laurentides varie d'environ 100 m à 850 m.

1.2. Description des travaux

Les travaux réalisés dans le cadre de cette étude comprennent la collecte des données existantes disponibles ([Section 2](#)), la préparation des données d'entrées à HELP dans le format requis ([Section 3](#)), le développement d'un modèle hydrostratigraphique 3D pour déterminer la séquence et les caractéristiques des sédiments présents dans le sous-sol pour chaque cellule à l'intérieur de laquelle la recharge est estimée ([Section 3.4.3.2](#)), la préparation des données nécessaires au calage de HELP ([Section 4](#)), la procédure suivie pour l'estimation de la recharge avec HELP ([Section 5](#)), le calage du modèle HELP pour assurer la représentativité des résultats ([Section 6](#)), l'interprétation des résultats ([Section 7](#)) et les conclusions ([Section 8](#)). De nombreuses cartes ont été produites tout au long des différents travaux et elles sont annexées au rapport sous forme de planches (voir la liste des planches). Les planches présentent l'ensemble de la zone d'étude à l'échelle 1/650 000 et un agrandissement pour la région de Laval à l'échelle 1/225 000.

2. Données existantes disponibles

Les sections suivantes présentent les données géoscientifiques existantes qui ont été recueillies en vue de la préparation des données d'entrée nécessaires au modèle d'infiltration HELP.

2.1. Données météorologiques

Les données météorologiques nécessaires au modèle HELP comprennent les données climatologiques (précipitation et température) et la radiation solaire à un pas de temps journalier.

2.1.1. Températures et précipitations

Les données journalières de températures et de précipitations sont tirées de la grille de températures et de précipitations journalière interpolée à une résolution de 0.1 degré (~10 km) produite par Info-Climat (MDDELCC, 2018). Cette grille donne les informations climatologiques journalières de 1961 à 2017. Pour les fins de la présente étude, les données météo ont été utilisées pour la période de 1965 à 2014.

2.1.2. Radiation solaire

Les données de radiations solaires ont été obtenues de CWEEDS (2016) pour la station de l'*Aéroport International de Montréal*. Seule cette station a été retenue puisqu'il s'agit de la seule station qui prend une mesure de la radiation solaire. Les autres stations dans le secteur donnent une estimation. Deux jeux de données ont dû être utilisés pour couvrir la période de simulation de 1965 à 2014. Le tableau 2.1 présente les informations pour les deux jeux de données ainsi que la période pour laquelle chaque jeu de données a été utilisé. Les données de la série 7025251 de 1998 à 2014 ont été utilisées en priorité. Les données de 1965 à 1998 ont ensuite été obtenues de la série 7025250.

Tableau 2.1 Jeux de données pour la radiation solaire mesurée à l'aéroport international de Montréal (CWEEDS)

Numéro de la station pour la radiation	Années couvertes par les données	Années pour lesquelles le jeu de données a été utilisé
7025251	1998-2014	1998-2014
7025250	1953-2005	1953-1998

2.2. Données géomatiques

Les données géomatiques qui ont été nécessaires aux présents travaux sont décrites et présentées dans les sections suivantes. Le tableau 2.2 présente la source de ces données. Certaines de ces données ont dû être adaptées pour satisfaire les besoins de l'étude. Ces manipulations sont décrites dans les sections suivantes.

Tableau 2.2 Sources des données SIG

Données	Source	Lien	Couches	Format
Modèle numérique d'élévation (MNE)	Ressources naturelles Canada, 2016 (GéoGratis)	http://cartes.canada.ca/czs/index-fr.html	<i>DEM.tif (JOB_ID-7576), DEM.tif (JOB_ID-7579)</i>	GeoTIF
Pente	Ressources naturelles Canada, 2016 (GéoGratis)	http://cartes.canada.ca/czs/index-fr.html	<i>SLOPE.tif</i>	GeoTIF
Couverture du sol	Ressources naturelles Canada, 2009 (GéoBase)	https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/97126362-5a85-4fe0-9dc2-915464cfdbb7	<i>CSC2000-V_031G_2_0 CSC2000-V_031H_2_0 CSC2000-V_031I_3_1 CSC2000-V_031J_3_0 CSC2000-V_031K_2_0 CSC2000-V_031N_3_0 CSC2000-V_031O_3_0</i>	SHP (polygone)
Inventaire des cultures	Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2015	https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/3688e7d9-7520-42bd-a3eb-8854b685fef3	<i>AAFC_CI_2015_QC.tif</i>	TIF
Pédologie	IRDA (2018)	Données obtenues directement de l'IRDA	Groupes hydrologiques : <i>Pedo_Laval_Laurentides_Hydro.shp</i> Cartes pédologiques à l'échelle 1/20 000 : 31G, 31H, 31I, 31J	SHP (point, ligne, polygone)
Période de croissance des végétaux	Atlas agroclimatique du Québec, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2016	https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/03807263-b1ad-44e9-b2a9-b574cd26e992	Date moyenne du début de la saison de croissance basée sur la période de 1979 à 2008) : <i>CLI_SC_MOY_DEBUT_79_08.gdb</i> Date moyenne de la fin de la saison de croissance basée sur la période de 1979 à 2008 : <i>CLI_SC_MOY_FIN_79_08.gdb</i>	GDB

2.2.1. Modèle numérique d'élévation (MNE)

L'élévation du sol est tirée du modèle numérique d'élévation du Canada (Ressources Naturelles Canada, 2016). L'élévation du sol est obtenue avec une précision verticale de 1 m. La [planche 2](#) présente le modèle numérique d'élévation.

2.2.2. Pente moyenne

La pente moyenne a été recalculée pour les cellules de 250 m par 250 m de la grille de données d'entrées de HELP. Elle est présentée à la [planche 3](#). La pente moyenne a été calculée à partir de la matrice SLOPE produite par Ressources Naturelles Canada (2016). La matrice SLOPE a une résolution de l'ordre de 20 m. La grille de la pente moyenne au 250 m a été réalisée en découpant la matrice SLOPEutm avec une matrice correspondant aux dimensions de la grille désirée (gd_lai) afin de s'assurer que les cellules soient centrées sur les points de la grille. La moyenne calculée correspond à la pente moyenne pour les cellules qui se trouvent à l'intérieur de la cellule de 250 m.

2.2.3. Couverture du sol

La couverture du sol est présentée à la [planche 4](#). La couche originale CIRCA 2000 (Ressources Naturelles Canada, 2015) a été téléchargée sur le site Canada Ouvert. La couche originale de couverture du sol a été comblée pour quelques cellules qui présentaient un type de couverture *Nuage* ou *Ombre*. Dans ce cas, la photo satellite a été utilisée pour déterminer le type de couverture à attribuer pour la cellule en tenant compte des types de couverture des cellules environnantes. Pour les besoins de l'étude, la couverture de sol a dû être transformée en matrice au 250 m. Les données de couverture du sol ont été extraites selon les étapes suivantes :

1. Création d'une grille fine avec des points aux 50 m (*Fishnet*),
2. Extraction des valeurs du champ TYPECOUV sur la grille fine pour chaque couche de couverture de sol (*Spatial Join*),
3. Transformation des points de la grille fine en matrice avec des cellules de 250 m de largeur. En utilisant l'option d'assignement de cellule à MOST_FREQUENT, la valeur attribuée à la cellule correspondra à la valeur la plus fréquente des points à l'intérieur de la cellule ou au FID le plus faible, s'il y a un nombre égal de points de différentes valeurs (*Point to raster*).

La matrice de couverture du sol obtenue est *CouvSol* et elle est disponible à l'[annexe 5](#).

2.2.4. Inventaire des cultures

La matrice d'inventaire des cultures est présentée à la [planche 5](#). Elle a été obtenue à partir de la grille géoréférencée (AAFC_CI_2015_QC.tif) produite par Agriculture et Agroalimentaire Canada (2015). La grille originale a d'abord été projetée en UTM pour les fins des calculs (AAFC_CI_2015_QCutm.tif). La valeur du type de culture a ensuite été extraite sur une grille de points au 50 m. Une nouvelle matrice du type de culture a été créée pour des cellules au 250 m en attribuant aux cellules la valeur du type de culture la plus fréquente (option MOST_FREQUENT). La matrice *Pente* a été utilisée comme référence géométrique pour s'assurer que les cellules créées soient centrées sur les points de la grille. La matrice de l'inventaire des cultures obtenue se nomme *TypeCult* et elle est disponible à l'[annexe 5](#).

2.2.5. Pédologie

Les données pédologiques ont été obtenues de l'IRDA sous forme de *shapefile* à l'échelle 1/20 000. Les données reçues comprenaient un *shapefile* pour chaque feuillet cartographique au 1/20 000. Les données ont été combinées à l'aide de l'outil *Merge* d'ArcGIS. Avant d'utiliser cet outil, il est important de s'assurer que les champs ont exactement les

mêmes noms. Dans les données transmises par l'IRDA, le nom des champs 5 et 6 changent selon le numéro du feuillet (ex. PEDO_31G09 et PEDO_31G_1). Dans un premier temps, les feuillets ont été regroupés par groupe de 4 (ex. 31G09101, 31G09102, 31G09201 et 31G09201). Les noms des champs 6 et 7 ont ensuite été uniformisés avant d'utiliser l'outil *Merge* pour finaliser l'unification de tous les polygones pour la zone d'étude. Les données brutes reçues se trouvent à l'[annexe 5](#) (*Pedo_Laval_Laurentides.zip*). L'outil *Dissolve* a ensuite été utilisé afin d'unifier les polygones d'un même type de sol à la limite entre deux feuillets. Le champ *appellation cartographique* (APP_CARTO) a été utilisé pour cette manipulation. Les données pédologiques ont été extraites pour chaque point de la grille en utilisant l'outil *Extract Value to Point* dans ArcMap. Le shapefile final se nomme *Pedo_proprietes0224.shp* et se trouve à l'[annexe 5](#). La [planche 6](#) présente la pédologie attribuée pour les cellules de 250 m.

2.2.6. Données des stations de jaugeage

Le [tableau 2.3](#) présente les informations des stations de jaugeage des deux bassins choisis pour le calage. Ces bassins ont été sélectionnés parce que leur physiographie et contexte géologique est typique respectivement des Basses Terres (bassin de la rivière Du Chêne) et des Laurentides (bassin de la rivière du Nord) et qu'ils ont une série de mesure suffisamment longue pour servir au calage de HELP. Les débits enregistrés à la station de jaugeage de la rivière du Nord sont continus de 1930 à 2018. Toutefois, pour le bassin de la rivière Du Chêne, les mesures de débits de trois stations de jaugeage ont dû être regroupées pour obtenir une meilleure couverture de la période d'étude. Puisque la position de la station a changé au cours des années, la superficie du bassin qui y est associé varie jusqu'à une différence de 19 km², ce qui représente une variation de 9,7% par rapport à la superficie du bassin utilisé. Pour les fins du calage, la superficie de 196 km² de la station 046709 a été utilisée puisque cette station couvre la plus grande période de mesure de débit.

La rivière Du Chêne est naturelle, mais la rivière du Nord est affectée mensuellement par des barrages en amont de la station de jaugeage, ce qui implique respectivement des interventions mensuelles sur la structure de retenue modifiant l'écoulement. Cette influence des barrages ne devrait pas influencer significativement le débit total dans une année hydrologique, mais cela pourrait affecter la séparation de l'hydrogramme et l'estimation du débit de base. Malgré cette difficulté, le bassin de la rivière du Nord représente la meilleure option pour le calage de HELP considérant la longue séquence de données disponibles et l'inclusion complète du bassin dans le contexte des Laurentides à l'intérieur de la région d'étude.

Tableau 2.3 Stations de jaugeage utilisées pour le calage (CEHQ, 2018)

Numéro de la station	Nom de la station	Superficie du bassin (km ²)	Périodes d'activité de la station
040110	Rivière du Nord	1163	14 juillet 1930 – 26 février 2018
046701	Rivière Du Chêne	200	21 avril 1971 – 30 septembre 1979
046708	Rivière Du Chêne	215	1 octobre 1979 – 21 juillet 1985
046709	Rivière Du Chêne	196	30 mars 2010 – 25 février 2018

2.3. Données hydrogéologiques

2.3.1. Données du SIH et du RSESQ

L'hydrostratigraphie représente la séquence de sédiments superficiels qui recouvrent le roc fracturé sous-jacent qui constitue l'aquifère régional. Les rapports de forage du SIH ainsi que du RSESQ ont permis d'obtenir les niveaux d'eau de même que la profondeur des matériaux recoupés lors des forages pour construire le modèle hydrostratigraphique pour la région des Laurentides. Les données ont été obtenues à l'automne 2017. Les données du SIH correspondent à l'extraction de la BD en date de juin 2017. L'[annexe 1](#) décrit le traitement qui a été réalisé pour l'extraction des données.

2.4. Données quaternaires

Le modèle géologique 3D des sédiments superficiels recouvrant le roc réalisé par Ross (2004) pour Laval et les Basses-Laurentides couvre presque la totalité de la zone d'étude qui se situe dans les Basses Terres à l'exception du secteur d'Oka. Ce modèle a été utilisé pour définir l'hydrostratigraphie dans le secteur sud de la région d'étude. Le modèle 3D a également été utilisé pour établir la séquence stratigraphique simplifiée pour l'ensemble du domaine à l'étude. L'unité de till simplifiée regroupe le till ainsi que les rares sédiments qui se trouvent sous le till en une seule unité. La séquence stratigraphique type établie pour l'ensemble de la région d'étude se résume aux unités suivantes du sommet à la base, soit : sable, argile, till et roc (Section 3.4.3.2).

3. Préparation des données d'entrées pour HELP

La région d'étude a été divisée en 186 170 cellules de 250 m par 250 m. Pour le calcul HELP, la région d'étude a été traitée séparément pour la portion de la zone d'étude située dans les Basses Terres du Saint-Laurent (Basses Terres) et le reste de la région des Laurentides (Laurentides).

Les données d'entrées préparées pour le logiciel HELP sont les suivantes (les symboles « .Dxx » entre parenthèses après les données indiquent l'extension du fichier d'entrée HELP contenant ce type de données) :

1. Données météorologiques
 - a. Précipitation (.D4)
 - b. Température (.D7)
 - c. Radiation solaire (.D13)
2. Données liées aux caractéristiques des sédiments superficiels (.D10)
 - a. Indice de surface foliaire
 - b. Numéro de courbe (*Curve Number*)
 - c. Description de chaque unité de sol et géologique
 - i. Type de la couche HELP
 - ii. Épaisseur de l'unité
 - iii. Porosité
 - iv. Capacité au champ
 - v. Point de flétrissement
 - vi. Conductivité hydraulique saturée

- vii. Distance de drainage
- viii. Pente
- ix. Numéro d'identification de l'unité stratigraphique

3. Données liées à la croissance des végétaux (.D11)

- a. Latitude
- b. Vent
- c. Humidité moyenne pour chaque trimestre
- d. Début de la période de croissance des plantes
- e. Fin de la période de croissance des plantes
- f. Profondeur racinaire
- g. Nombre de couches

Ces données ont été préparées pour chacune des cellules. Les données en caractères gras indiquent les fichiers d'entrées nécessaires à l'exécution de HELP. Les sections suivantes décrivent la source des données d'entrées et expliquent leur production.

3.1. Fichiers des données de précipitations (.D4)

Les précipitations sont extraites de la grille climatologique à l'aide du module *pyhelp* (Gosselin, 2018) tel qu'expliqué à l'annexe 4. Le module *pyhelp* permet également de formater les données météo dans le format requis pour HELP et crée un fichier de précipitations avec l'extension *.D4* pour chaque cellule. La [planche 7](#) présente les précipitations moyennes annuelles (MDDELCC, 2018).

3.2. Fichiers des données de températures (.D7)

Comme pour les précipitations, les températures sont extraites de la grille climatologique à l'aide du module *pyhelp* (Gosselin, 2018) tel qu'expliqué à l'annexe 4. Le module *pyhelp* permet également de formater les données de température dans le format requis pour HELP et crée un fichier avec l'extension *.D7* pour chaque cellule. La [planche 8](#) présente les températures moyennes annuelles (MDDELCC, 2018).

3.3. Fichiers de radiation solaire (.D13)

Le module *pyhelp* (Gosselin, 2018) permet aussi de transformer les données de radiation solaire obtenue du CWEEDS dans le format requis pour HELP et crée un fichier de radiation solaire avec l'extension *.D13* pour chaque cellule. La radiation solaire est la même pour toutes les cellules de la région d'étude.

3.4. Fichiers des données liées aux caractéristiques des sédiments superficiels (.D10)

Les données d'entrées liées aux caractéristiques des sédiments superficiels doivent être regroupées dans un fichier qui porte l'extension *.D10*. Pour produire ce fichier, les données sont d'abord compilées dans le fichier *input_sol.csv*. Le module *pyhelp* (Gosselin, 2018) permet ensuite de formater les données dans le format requis pour HELP et crée un fichier des données d'entrées des sédiments superficiels avec l'extension *.D10* pour chaque cellule. Les données d'entrées liées aux caractéristiques des sédiments superficiels comprennent l'indice de surface foliaire, le numéro de courbe, ainsi que la description de chaque unité qui sera traversée par l'eau dans la colonne stratigraphique pour atteindre

l'aquifère rocheux. Les sédiments superficiels comprennent d'abord une séquence de trois unités qui représentent la pédologie selon trois horizons de sol, sauf lorsque le roc est affleurant puisque dans ce cas il y a absence de sol. Les sédiments superficiels représentent la séquence des unités géologiques dans l'ordre suivant en partant de la surface jusqu'au roc, soit sable, argile et till.

3.4.1. Indice de surface foliaire

L'indice de surface foliaire (*Leaf Area Index, LAI*) a été obtenu à partir du type de couverture du sol. Ainsi, pour chaque type de couverture du sol un indice de surface foliaire minimum, maximum et moyen a été attribué selon des valeurs tirées de la littérature (Schroeder, 1994; Asner et al., 2003; Breuer et al., 2005; Croteau, 2006). L'indice de surface foliaire varie de 0 à 5. Le [tableau 3.1](#) présente les valeurs de l'indice de surface foliaire assignées à chaque type de couverture du sol. La colonne *Retenue*, présente les valeurs qui ont été choisies suite au calage des résultats de HELP avec les débits totaux des cours d'eau des bassins de calage. La différence entre le débit total d'un cours d'eau (par rapport à la surface de son bassin) et les précipitations totales représente l'évapotranspiration réelle (ETR). Puisque le LAI a un effet sur l'ETR, il a été possible de sélectionner les valeurs de *LAI* indiquées au [tableau 3.1](#) qui permettent le meilleur calage des débits totaux prédits par HELP (voir [section 6.1](#)). La [planche 9](#) montre la distribution spatiale de l'indice de surface foliaire.

Tableau 3.1 Détermination de l'indice de surface foliaire (*LAI*) à partir du type de couverture de sol. Modifié de Huchet (2018)

Code	Description du type de couverture du sol	Indice de surface foliaire (<i>LAI</i>)			
		Minimum	Moyen	Maximum	Retenu
TYPECOUV	nom_couv	LAI_min	LAI_moy	LAI_max	LAI_0225
20	Eau	0	0	0	0
33	Terrain découvert	0	1.7	2.2	0
34	Zones développées	0.2	0.9	1.6	0.2
51	Grands arbustes	0.4	2.1	4.5	1
52	Petits arbustes	0.4	2.1	4.5	0.4
81	Zone humide - boisée	2	3.5	5	2
82	Zone humide - arbusive	0.4	2.1	4.5	0.4
83	Zone humide - herbacée	1	2	3.1	1
100	Plantes herbacées	1	2	3.1	1
121	Cultures annuelles	0.2	3.6	5	0.2
122	Cultures pérennes et pâturages	5	5	5	5
211	Coniférien - dense	2.5	4.25	5	2.5
212	Coniférien - ouvert	1.5	3.25	5	1.5
213	Coniférien - clairsemé	1.5	2.25	4	1.5
221	Feuillu - dense	3.5	4.75	5	3.5
222	Feuillu - ouvert	2.5	3.75	5	2.5
231	Mixte - dense	3	4.5	5	3
232	Mixte - ouvert	2	3.5	5	2

3.4.2. Numéro de courbe (*Curve Number*)

Le numéro de courbe (*Curve Number*) permet de prédire le ruissellement (Monfet, 1979; Croteau, 2006). Pour obtenir le numéro de courbe il faut définir l'utilisation du sol simplifiée, la pente de la surface du sol ainsi que le groupe hydrologique ([section 3.4.2.3](#)) pour chaque cellule. Les sections qui suivent décrivent la production des données nécessaires à la détermination du numéro de courbe. Le [tableau 3.2](#) présente les valeurs du numéro de courbe associées aux différentes conditions hydrologiques. Une fois que les trois paramètres sont connus pour chaque cellule, le numéro de courbe peut être déterminé à l'aide du [tableau 3.2](#). Les sous-sections qui suivent décrivent sommairement la définition des différents paramètres qui ont permis de définir un numéro de courbe pour chaque cellule. Le fichier *Curve_Number.xlsx* de l'[annexe 5](#) comprend tous les tableaux produits pour calculer le numéro de courbe. La répartition spatiale du numéro de courbe est montrée à la [planche 10](#).

Tableau 3.2 Attribution du numéro de courbe pour des conditions hydrologiques moyennes en fonction de l'utilisation du sol, de la pente et de la classe hydrologique. Modifié de Monfet (1979) par Croteau (2006)

Utilisation simplifiée du sol	Pente	Numéro de courbe (<i>Curve Number</i>) selon le groupe hydrologique (Tableau 3.4)			
		A	B	C	D
Culture intensive	<3%	62	72	79	82
	3-8%	64	76	84	88
	>8%	70	80	87	90
Culture extensive	<3%	32	51	72	79
	3-8%	44	65	77	82
	>8%	59	74	83	87
Boisé	<3%	24	54	68	76
	3-8%	33	59	73	79
	>8%	44	66	78	83
Résidentielle commerciale dense	<3%	73	83	88	90
	3-8%	73	83	88	90
	>8%	73	83	88	90
Résidentielle commerciale peu dense	<3%	59	74	82	86
	3-8%	59	74	82	86
	>8%	59	74	82	86

3.4.2.1. Utilisation du sol simplifiée

L'utilisation du sol simplifiée est obtenue en reclassant les types de couverture de sol d'après le [tableau 3.3](#). La [planche 11](#) présente l'utilisation du sol simplifiée.

Tableau 3.3 Utilisation simplifiée du sol obtenue à partir du type de couverture de sol. Modifié de Huchet (2018)

nom_couv	TYPECOUV	Util_sol	UtilSolCode
Eau	20	Urbain dense	400
Terrain découvert	33	Urbain peu dense	500
Zones développées	34	Urbain dense	400
Grands arbustes	51	Boise	300
Petits arbustes	52	Boise	300
Zone humide - boisée	81	Boise	300
Zone humide - arbustives	82	Boise	300
Zone humide - herbacée	83	Boise	300
Plantes herbacées	100	Culture extensive	200
Cultures annuelles	121	Culture intensive	100
Cultures pérennes et pâturages	122	Culture extensive	200
Coniférien - dense	211	Boise	300
Coniférien - ouvert	212	Boise	300
Coniférien - clairsemé	213	Boise	300
Feuillu - dense	221	Boise	300
Feuillu - ouvert	222	Boise	300
Mixte - dense	231	Boise	300
Mixte - ouvert	232	Boise	300

3.4.2.2. Pente

La matrice des pentes moyennes a été reclassée selon les trois classes du [tableau 3.2](#) pour obtenir les pentes nécessaires au calcul du numéro de courbe. La [planche 12](#) présente la pente moyenne calculée selon le classement du [tableau 3.2](#) pour le calcul du numéro de courbe.

3.4.2.3. Groupe hydrologique

Le groupe hydrologique a été obtenu de plusieurs façons. D'abord, des groupes hydrologiques pour certains sols étaient déjà identifiés dans la base de données obtenue de l'IRDA. Pour les sols sans groupe hydrologique déjà identifié, le groupe hydrologique a été déterminé selon la texture du sol. La texture du sol est définie à la [section 3.4.3.1](#). Les textures de sol classées selon l'USDA déterminées pour chaque cellule ont permis d'associer une texture à un groupe hydrologique. Le [tableau 3.4](#) présente les groupes hydrologiques associés à chaque texture USDA. La [planche 13](#) présente le groupe hydrologique déterminé pour le calcul du numéro de courbe. Une valeur NaN (-9999) a été attribuée aux cellules avec la mention *eau* ou *non carto* dans le champ texture.

Tableau 3.4 Groupes hydrologiques associés à chaque texture USDA

Texture USDA	Groupe hydrologique	UtilSolCode
coarse sand	A	10
sand		
fine sand	B	20
loamy sand		
loamy fine sand		
sandy loam		
fine sandy loam		
loam		
silt loam	C	30
sandy clay loam		
clay loam		
silty clay loam		
sandy clay		
silty clay		
clay		
organique	D	40
eau	-9999	-9999
non carto		

3.4.3. Description des unités stratigraphiques

La description des unités stratigraphiques a été réalisée en deux parties. La stratigraphie de la zone d'étude située dans les Basses Terres du Saint-Laurent (incluant Laval) a été extraite du modèle quaternaire 3D produit par Ross (2004). La stratigraphie des Laurentides ainsi que du secteur d'Oka a été interpolée à partir des données de forages recueillies dans cette région. La description des unités stratigraphiques comprend deux étapes, soit la description des sols et la description des unités hydrostratigraphiques.

3.4.3.1. Données pour les horizons de sols

La cartographie des sols ainsi qu'une banque de données des sols (fichier *Banque_donnees_sols.xls*) ont été fournies par l'IRDA. Tel que décrit à la [section 2.2.5](#), la carte pédologique de l'IRDA a permis d'assigner un nom de sol complet à chaque cellule. Les noms de sols ont été utilisés pour déterminer une texture de sol afin de définir les propriétés physiques des sols nécessaires au calcul HELP, soit la porosité, la capacité au champ, le point de flétrissement et la conductivité hydraulique saturée. Pour l'estimation de la recharge avec HELP, le sol a été représenté par une séquence de trois horizons. Les propriétés de ces trois horizons sont les mêmes, il y a seulement le type de couche qui varie. L'attribution du type de couche est expliquée à la [section 3.4.4](#).

Certains sols cartographiés par l'IRDA ont fait l'objet de mesure en laboratoire sur des échantillons, ce qui a permis d'estimer les proportions moyennes de sable, de silt et d'argile pour en déduire une texture de sol. Ces opérations ont été réalisées dans le classeur *Banque_donnees_sols_INRS.xlsm*. Les sols ont été classés selon l'USDA à l'aide de la macro *texture* (Miller et Schaetzl, 2013). Lorsque les mesures des proportions n'étaient

pas disponibles pour un sol dans la BD de l'IRDA, le nom complet du sol a été utilisé pour en déduire une texture de sol d'après la classification de l'USDA (par exemple le nom complet *Allumette loam sableux très fin* devient *loam sableux très fin*). Dans le cas où le nom était par exemple *Allumette loam* à *loam limoneux*, seulement la première texture a été retenue, soit *loam*. La [planche 14](#) présente la texture des sols pour chaque cellule. Le [tableau 3.5](#) présente les propriétés physiques correspondant à chacune des seize textures de l'USDA (Schroeder et al., 1994).

Tableau 3.5 Propriétés physiques selon la texture de sol USDA (Schroeder et al., 1994)

Texture USDA	Porosité (Porosite)	Capacité au champ (CapChamp)	Point de flétrissement (PtFlet)	Conductivité hydraulique saturée (cm/s) (Ksat)
coarse sand	0.417	0.045	0.018	1.0×10^{-2}
sand	0.437	0.062	0.024	5.8×10^{-3}
fine sand	0.457	0.083	0.033	3.1×10^{-3}
loamy sand	0.437	0.105	0.047	1.7×10^{-3}
loamy fine sand	0.457	0.131	0.058	1.0×10^{-3}
sandy loam	0.453	0.19	0.085	7.2×10^{-4}
fine sandy loam	0.473	0.222	0.104	5.2×10^{-4}
loam	0.463	0.232	0.116	3.7×10^{-4}
silt loam	0.501	0.284	0.135	1.9×10^{-4}
sandy clay loam	0.398	0.244	0.136	1.2×10^{-4}
clay loam	0.464	0.31	0.187	6.4×10^{-5}
silty clay loam	0.471	0.342	0.21	4.2×10^{-5}
sandy clay	0.43	0.321	0.221	3.3×10^{-5}
silty clay	0.479	0.371	0.251	2.5×10^{-5}
clay	0.475	0.378	0.265	1.7×10^{-5}
gravel	0.397	0.032	0.013	3.0×10^{-1}
organique	0.85	0.49	0.20	2.7×10^{-5}
eau	-9999	-9999	-9999	-9999
non carto	-9999	-9999	-9999	-9999

3.4.3.2. Modèle hydrostratigraphique 3D

De la surface du sol jusqu'au roc, le profil type des sédiments superficiels recouvrant le roc dans la région des Basses Terres est sable, argile, till, fluvioglaciaire, quelques rares sédiments sous le till et roc (Ross, 2004). À un endroit donné, certains types de sédiments peuvent être absents et le roc peut même affleurer à la surface. Pour les fins de la présente étude, cette séquence a été simplifiée en regroupant les trois unités qui se trouvent sous l'argile en une seule unité de « till » (le till et les sédiments fluvioglaciaires sont tous

deux des « diamictons ¹»). Cette simplification permet également d'obtenir une unité de till généralement continue. La [figure 3.1](#) présente le schéma du modèle conceptuel hydrostratigraphique ainsi que le rôle joué par les différentes couches dans HELP.

Pour les Laurentides où il n'y avait pas de modèle géologique 3D disponible, la séquence type du modèle conceptuel établie à partir du modèle quaternaire de Ross (2004) est la même. Le modèle hydrostratigraphique développé pour la région d'étude a permis d'estimer l'épaisseur de chacune des unités géologiques. Les [planches 15 à 21](#) présentent l'épaisseur et l'élévation des différentes unités géologiques.

Les profondeurs des matériaux recoupés lors des forages ont d'abord permis de produire une interpolation de l'épaisseur totale des sédiments ([planche 15](#)) et d'en déduire l'élévation de la surface du roc ([planche 16](#)). Considérant la facilité à identifier l'unité d'argile, cette unité est la deuxième qui a été cartographiée. Les données de forage sur les intervalles constitués d'argile ont permis d'interpoler l'épaisseur de l'argile ([planche 17](#)) et l'élévation du toit de l'argile ([planche 18](#)) et d'en déduire l'élévation de la base de l'argile ([planche 19](#)) en faisant la soustraction de l'épaisseur à partir de l'élévation du toit de l'argile. Lorsque plusieurs couches d'argile étaient rencontrées dans un forage, elles ont été regroupées en une seule couche dont l'épaisseur correspond à la somme des épaisseurs des couches d'argile regroupées. L'élévation de la surface de l'unité de sable au-dessus de l'argile est simplement définie par l'élévation du sol, soit le MNE. La différence entre la surface du sol et l'élévation du toit de l'argile donne ainsi l'épaisseur de sable superficiel ([planche 20](#)). Tous les matériaux sous l'argile sont regroupés en une seule unité hydrostratigraphique qui est considérée être du till. L'épaisseur de till ([planche 21](#)) est calculée à partir de l'élévation de la base de l'unité d'argile moins l'élévation du toit du roc. Le détail de production des cartes d'interfaces et d'épaisseur des unités hydrostratigraphiques est décrit à l'[annexe 2](#).

3.4.3.3. Piézométrie

La piézométrie sert à déterminer l'épaisseur de roc jusqu'à la nappe qui sera considérée dans le cas où le roc est affleurant. Puisqu'il y a absence de sol pour ces cellules, l'élévation de la piézométrie permet ainsi de déterminer l'épaisseur de roc qui doit être traversé par l'eau pour atteindre l'aquifère rocheux régional. La [planche 22](#) présente la piézométrie régionale de l'aquifère rocheux. La piézométrie a été déterminée séparément pour les Basses Terres et les Laurentides. La production de la carte piézométrique est décrite en détail à l'[annexe 3](#).

3.4.4. Attribution des types de couches HELP

Le modèle d'infiltration HELP nécessite la construction d'un modèle stratigraphique basé sur trois types de couches. Une couche de type 1 permet seulement l'infiltration, une couche de type 2 permet le drainage latéral et une couche de type 3 est une barrière hydraulique induisant le drainage latéral dans la couche sus-jacente qui doit être de type 2. Le [tableau 3.6](#) présente la fréquence d'occurrence des différentes possibilités de séquences géologiques rencontrées dans la région d'étude ainsi que les types de couches qui ont été attribués pour chacune d'entre elles.

¹ Tout sédiment meuble d'origine glaciaire, non trié ou mal trié, constitué de particules de granulométrie très variée (modifié de Termium Plus (Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, 2018))

Tableau 3.6 Séquences géologiques et couches HELP attribuées

#	Séquence géologique	Couches HELP attribuées	Pourcentage cellule	Nombre de cellule
1	Sol, Ti, Roc	1-2-3-2-3	36.4%	67719
2	Sol, Sa, Roc	1-2-3-2-3	34.2%	63707
3	Sol, Arg, Ti, Roc	1-1-2-3-2-3	14.4%	26775
4	Sol, Sa, Arg, Ti, Roc	1-2-3-2-3-2-3	10.3%	19167
5	Roc	1	2.2%	4016
6	Sol, Sa, Arg, Roc	1-2-3-2-3	2.1%	3818
7	Sol, Arg, Roc	1-1-2-3	0.5%	968

Note : lorsque le sol est présent, les trois couches HELP supérieures correspondent au sol

Abréviations :

Sol : Comprend trois horizons de sol, Sa : Sable, Arg : Argile et Ti : Till

Couches types :

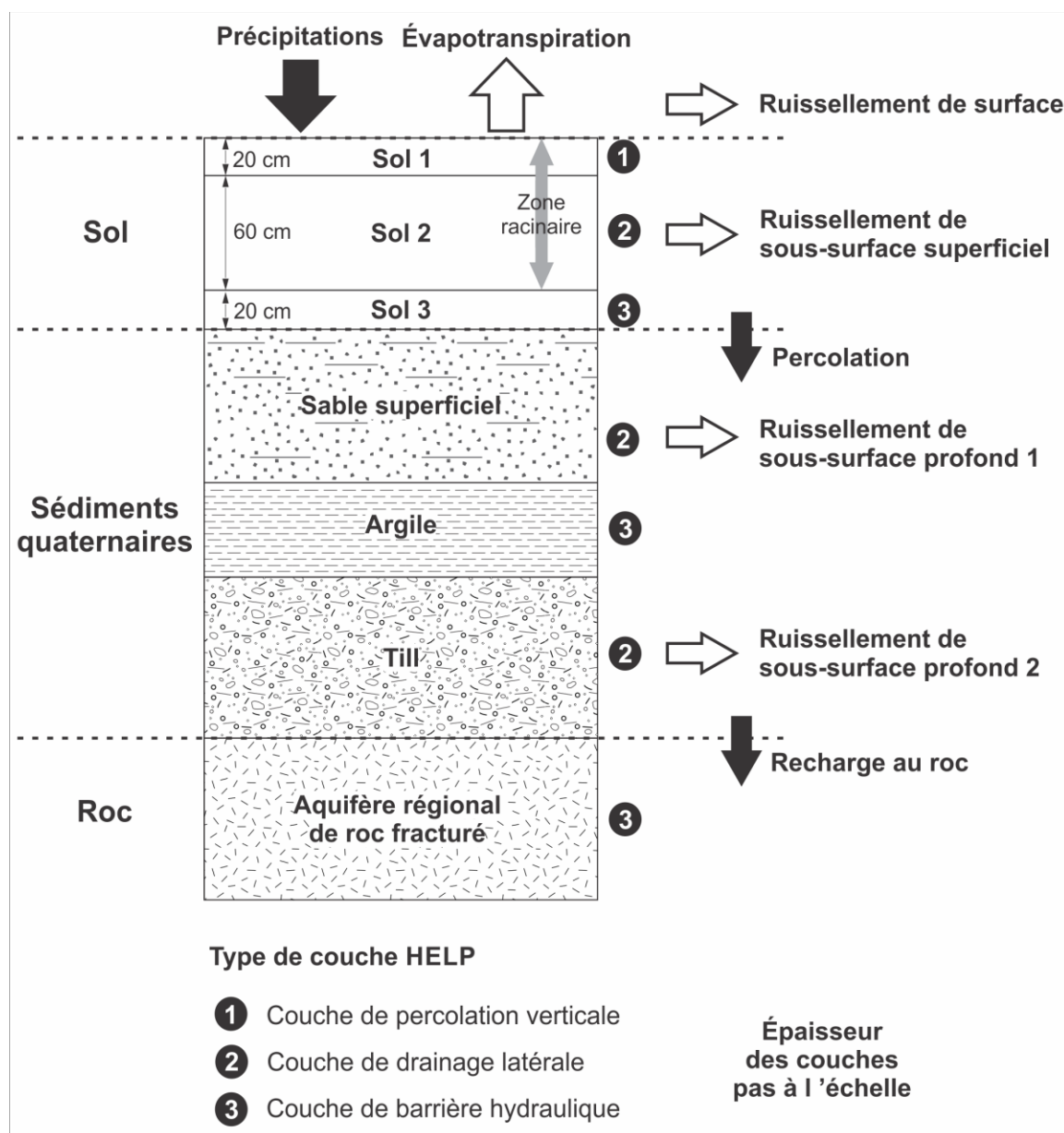
1 : Couche de percolation verticale, 2 : Couche de drainage latéral, 3 : Couche de barrière hydraulique

À l'exception des cellules pour lesquelles le roc est affleurant, une épaisseur d'un mètre de sédiments a été ajoutée à la stratigraphie. Ce mètre de sédiments comprend un mètre de sol qui est modélisé par une première série de trois couches de type 1-2-3 pour représenter les trois horizons pédologiques. L'épaisseur des horizons pédologiques est répartie de la façon suivante, soit 20 cm pour la couche 1, 60 cm pour la couche 2 et 20 cm pour la couche 3 (figure 3.1). Dans HELP, la couche de type 3 ne peut pas éliminer de l'eau par évapotranspiration. L'épaisseur du troisième horizon de sol a donc été réduite à 20 cm de façon à limiter le moins possible l'évapotranspiration dans le sol. Le modèle conceptuel adopté contraint donc la zone d'évapotranspiration à une profondeur maximale de 80 cm pour les endroits où il y a du sol. Les trois couches qui représentent le sol sont indiquées par Sol/ dans la séquence géologique. Dans le cas où le roc est affleurant, aucune couche de sol n'a été ajoutée et une couche de type 1 est assignée au roc. L'évapotranspiration n'est donc pas limitée en profondeur. De plus, dans ce cas, l'épaisseur de roc considéré est la portion du roc au-dessus de la surface de la nappe puisque la base de la séquence a été fixée à l'élévation de la piézométrie.

L'unité d'argile est représentée par une couche de type 3. Lorsque l'unité d'argile est l'unité géologique supérieure, la séquence de couche type pour les trois couches de sols est 1-1-2 afin d'attribuer la couche 3 à l'unité d'argile. On utilise également une couche de type 3 pour le roc pour permettre l'écoulement latéral dans la couche dépôt sus-jacente. Lorsque l'unité d'argile se trouve directement au-dessus du roc, le modèle est arrêté à l'unité d'argile avec une couche de type 3.

Les types de couches ont été attribués à chaque cellule à l'aide d'un script Matlab.

Figure 3.1 **Modèle conceptuel**



3.4.5. Attribution des propriétés hydrauliques

Les propriétés hydrauliques des unités de dépôts meubles ont été attribuées en se basant sur les valeurs retenues à la suite de l'estimation de la recharge réalisée pour le bassin de la rivière Châteauguay (Croteau et al., 2010). Les propriétés hydrauliques utilisées sont présentées au [tableau 3.7](#). Les valeurs de conductivité hydraulique ont été calées et les valeurs retenues sont indiquées en gras dans la dernière colonne du tableau.

Tableau 3.7 Propriétés hydrauliques initiales des groupes de sédiments quaternaires

Unités	Porosité (vol/vol)	Capacité au champ (vol/vol)	Point de flétrissement (vol/vol)	Conductivité hydraulique (cm/s) ¹	Conductivité hydraulique calée (cm/s)
Sable	0.4	0.05	0.02	1.0×10^{-2}	1.0×10^{-2}
Argile	0.45	0.42	0.33	9.8×10^{-8}	9.8×10^{-8}
Till (Basses Terres)	0.36	0.26	0.15	5.5×10^{-5}	5.5×10^{-5}
Till remanié (Laurentides)	0.36	0.26	0.15	5.5×10^{-5}	5.5×10^{-4}
Roc	0.05	0.04	0.01	2.2×10^{-4}	2.2×10^{-4}

¹ Valeur initiale de référence utilisée d'après Croteau (2010)

3.4.6. Distance aux drains

Le [tableau 3.8](#) montre la distance aux drains qui a été attribuée d'après l'utilisation du sol simplifiée tel que définie au [tableau 3.3](#). La [planche 23](#) montre la répartition spatiale de la distance aux drains.

Tableau 3.8 Distance aux drains attribuée selon l'utilisation du sol simplifiée

Utilisation simplifiée du sol	Distance aux drains (m)
Culture intensive	10
Culture extensive	20
Boisé	25
Résidentielle commerciale dense	5
Résidentielle commerciale peu dense	5

3.4.7. Pente moyenne

La pente moyenne pour les cellules de 250 m est présentée à la [planche 3](#). La production de cette matrice est décrite à la [section 2.2.2](#).

3.4.8. Numéro d'identification de l'unité stratigraphique

Le numéro d'identification de l'unité stratigraphique permet de procéder à la modification des propriétés physiques des unités stratigraphiques directement à partir du module *py-help*, sans avoir à modifier les valeurs dans le fichier *input.csv*. Ce paramètre n'est pas essentiel au calcul HELP, mais il permet d'accélérer l'étape du calage en facilitant la modification des propriétés physiques des sédiments superficiels des unités géologiques. Ainsi, il est possible de modifier les propriétés hydrauliques de toutes les couches correspondant à une unité stratigraphique donnée pour toutes les cellules.

3.5. Fichiers des données liées à la croissance des végétaux (.D11)

3.5.1. Latitude, vent et humidité

La valeur de la latitude est indiquée en degré et correspond à la latitude de la cellule. Les valeurs moyennes pour le vent et l'humidité sont obtenues des données des stations pour

le calcul des normales climatiques d'Environnement Canada (2018) pour la station *Mirabel INT'L A* (ID climatologique : 7035290) de 1981 à 2010. Les données pour le vent et l'humidité sont les mêmes pour toutes les cellules de la région d'étude. Les données pour l'humidité correspondent à l'humidité moyenne par trimestre, soit de janvier à mars, d'avril à juin, de juillet à septembre et d'octobre à décembre.

3.5.2. Période de croissance des plantes

Le début et la fin de la période de croissance des plantes sont extraits des jeux de données de l'atlas agroclimatique du Québec (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2016). Les matrices *CLI_SC_MOY_DEBUT_79_08.tif* et *CLI_SC_MOY_FIN_79_08.tif* donnent respectivement le début et la fin de la période de croissance des végétaux. Les valeurs de ces deux matrices ont simplement été extraites au droit de chaque cellule.

3.5.3. Profondeur racinaire

La profondeur racinaire (en cm) est obtenue à partir de l'inventaire des cultures pour l'année 2015 (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2015). La matrice originale *AAFC_CI_2015_QC.tif* a une résolution de 30 m par 30 m. Le type de culture le plus fréquent à l'intérieur de la cellule de 250 m par 250 m est attribué à la cellule tel que décrit à la [section 2.2.4](#). La matrice des types de culture créée est *type_cult0305*.

Pour chaque type de culture, une profondeur racinaire est attribuée selon le [tableau 3.9](#). Les valeurs des profondeurs racinaires ont été établies selon la littérature (Rushton, 2003). La combinaison de la grille des types de cultures (*gd_cultures0305.shp*) et du tableau suivant (table *TypeCult_profETP0327.csv*) permet d'obtenir la profondeur racinaire pour chaque cellule. Il faut joindre les champs *TYPECULT* et *Code TYPECULT*. Lors de l'exercice de calage de HELP, les premiers essais de calage ont démontré que les valeurs minimales de profondeurs racinaires donnaient des résultats plus représentatifs; ces valeurs ont donc été retenues. Les données de profondeurs des racines retenues sont présentées à la gauche du [tableau 3.9](#).

Dans le modèle conceptuel réalisé, le sol est représenté par trois couches HELP de type 1, 2 et 3. La couche HELP de type 3 ne permet pas l'évapotranspiration. Étant donné que les couches 1 et 2 ont une épaisseur totale de 80 cm, la profondeur maximale d'évapotranspiration possible est de 80 cm. Les profondeurs maximales pour les valeurs retenues au [tableau 3.9](#) sont donc limitées à 80 cm. En utilisant la valeur maximale pouvant être simulée par HELP, on facilite les manipulations en post-traitement, car la valeur pourra ainsi être modifiée automatiquement lors de l'étape du calage par le module *pyhelp*. La valeur minimale de profondeur racinaire a été fixée à 3 cm. Cette valeur correspond à la profondeur maximale d'évaporation typique pour un sol sans végétation. Les valeurs de profondeur racinaire calées pour les Basses Terres et les Laurentides sont indiquées au [tableau 3.9](#). La [planche 24](#) présente les valeurs de profondeur racinaire assignées à chaque cellule suite au calage.

Tableau 3.9 Définition de la profondeur racinaire selon le type de culture

Code TYPECULT	Nom_Culture	Profondeur racinaire (cm)					
		Valeurs initiales				Valeurs calées	
		min	moy	max	Retenue (cas de base)	Basses Terres (x 0.35) ¹	Laurentides (x 0.15) ¹
0	Non cartographié	10	10	10	10	3.5	1.5
20	Eau	10	10	10	10	3.5	1.5
30	Sols nus et terres stériles	10	15	20	10	3.5	1.5
34	Milieu urbain et bâti	20	20	20	20	7	3
50	Arbustaie	25	25	25	25	8.75	3.75
80	Terres humides	40	50	60	40	14	6
122	Pâturage et Cultures four- ragères	50	75	100	50	17.5	7.5
133	Orge	100	100	100	80	28	12
134	Autres céréales	100	100	100	80	28	12
136	Avoine	100	100	100	80	28	12
140	Blé	80	90	100	80	28	12
147	Maïs	80	90	100	80	28	12
153	Canola et Colza	100	100	100	80	28	12
158	Soya	60	80	100	60	21	9
175	Légumes	30	65	100	30	10.5	4.5
181	Petits fruits	60	80	100	60	21	9
210	Forêt de conifères	60	80	100	60	21	9
220	Forêt de feuillus	60	80	100	60	21	9
230	Forêt mixte	60	80	100	60	21	9

¹ La valeur de profondeur racinaire retenue pour le cas de base est multipliée par le facteur pour donner la valeur calée

3.5.4. Nombre de couches

Le nombre de couches correspond au nombre d'horizons de sol additionné au nombre d'unités géologiques de dépôts meubles et du roc, tel que documenté au [tableau 3.6](#). Le nombre de couches a été calculé pour chaque cellule à l'aide d'un script Matlab.

4. Préparation d'autres données nécessaires

4.1. Conditions de confinement

Les conditions de confinement ont été évaluées pour l'aquifère rocheux régional. Tout comme cela a été fait dans le cadre de projets PACES antérieurs dans d'autres régions (Carrier et al., 2013; Lefebvre et al., 2015), les conditions de confinement ont été évaluées sur la base de l'épaisseur de dépôts meubles peu perméables, tels que le till et l'argile, au-dessus de l'aquifère rocheux. Ces épaisseurs ont été évaluées à partir de l'élévation

pour les surfaces du toit de l'argile (*zta0311*), du toit du till (*zti0311*) et du toit du roc (*zRoc0215*). Ces surfaces correspondent aux champs du fichier *XYgrid_help0311.shp*. Ce fichier est joint à l'[annexe 5](#). Les opérations ont été réalisées à l'aide d'un script Python dans Ar2Gems. Les épaisseurs d'argile et de till ont d'abord été calculées à partir du toit des surfaces. Les conditions de confinement sont ensuite définies en utilisant des critères d'épaisseurs pour l'argile et le till. Le [tableau 4.1](#) présente les critères de confinement utilisés pour définir les conditions de confinement pour les Basses Terres. Le code de confinement représente un niveau de confinement de 1 à 5 qui va du plus faible au plus élevé. Le confinement 1 correspond à une condition libre et 5 à une condition captive, les codes intermédiaires, de 2, 3 et 4 sont associés à des types de confinement semi-captifs.

Des critères de confinement différents ont été appliqués pour les Laurentides, puisque le till des Basses Terres est plus argileux. Le till des Basses Terres contribue ainsi plus au confinement de l'aquifère rocheux que le till plus grossier des Laurentides. Le till des Laurentides étant plus perméable que le till des Basses Terres, il n'est pas considéré dans les critères d'attribution des conditions de confinement pour cette région. Le [tableau 4.2](#) présente les critères de confinement pour les Laurentides. La [planche 25](#) présente les conditions de confinement pour la région à l'étude.

Tableau 4.1 Critères des conditions de confinement pour les Basses Terres

Condition de confinement	Code de confinement	Critères utilisés
Libre	1	Épaisseur d'argile de moins de 0.5 m et épaisseur de till de moins de 3 m
Semi-captif	2	Épaisseur d'argile de 0.5 m et épaisseur de till de plus de 3 m
Semi-captif	3	Épaisseur d'argile de plus de 0.5 à 5 m et épaisseur de till de moins de 3 m
Semi-captif	4	Épaisseur d'argile de 0.5 à 5 m et épaisseur de till de plus de 3 m
Captif	5	Épaisseur d'argile de plus de 5 m

Tableau 4.2 Critères des conditions de confinement pour les Laurentides

Condition de confinement	Code de confinement	Critères utilisés
Libre	1	Épaisseur d'argile de moins de 0.5 m
Semi-captif	3	Épaisseur d'argile de 0.5 à 5 m
Captif	5	Épaisseur d'argile de plus de 5 m

4.2. Débit total et débit de base

Pour les deux bassins utilisés pour le calage de HELP, les données de débit mesurées aux stations de jaugeage ont permis de calculer le débit total ainsi que le débit de base

pour chacune des rivières sur une base annuelle. L'addition des débits journaliers mesurés à une station de jaugeage permet de calculer le débit total de la rivière pour le bassin. Le débit de base est estimé à l'aide du filtre de Chapman (1999). Le débit de base représente la portion de l'eau de la rivière qui provient des eaux souterraines, soit à partir de l'aquifère au roc ou des dépôts superficiels.

Le débit de base est obtenu à partir du débit de rivière obtenu pour chaque station de jaugeage. Le classeur Excel *DebitBase.xlsx* présente le calcul des débits de base pour les deux bassins utilisés pour le calage. Le débit de base a été calculé en utilisant le filtre de Chapman (Chapman, 1999) en utilisant une valeur de 0.925 pour la constante de récession. Cette valeur de récession a été utilisée dans d'autres travaux, notamment, Croteau (2006) et Huchet (2018). Le fichier Excel *DebitBase.xlsx* qui présente ces calculs ainsi que les graphiques des débits totaux et de base est joint à l'[annexe 5](#).

5. Procédure du calcul pour l'estimation de la recharge

5.1. Pré-traitement HELP

Un pré-traitement est fait à l'aide du module *pyhelp*. Le pré-traitement permet, pour chaque cellule, de produire les cinq fichiers d'entrées nécessaires au calcul HELP dans le format requis. Les fichiers sont créés à partir des données climatiques, des données de radiation solaire, des données en lien avec le sol et des données en lien avec la croissance des végétaux. Le pré-traitement HELP réalisé par le module *pyhelp* est expliqué plus en détail à l'[annexe 4](#).

5.2. Exécution de HELP

Le module *pyhelp* permet de lancer l'exécution de HELP pour calculer l'évapotranspiration, le ruissellement de surface, le ruissellement de sous-surface (superficiel et profond) et la recharge de l'aquifère rocheux sur une base mensuelle pour chacune des cellules pour lequel le contexte le permet. Le ruissellement de surface correspond au ruissellement sur la surface du sol. Le ruissellement de sous-surface superficiel correspond à l'écoulement latéral de l'eau dans le sol alors que le ruissellement de sous-surface profond correspond à l'écoulement latéral de l'eau dans les dépôts meubles. La percolation correspond à la quantité d'eau qui s'infiltre sous les horizons de sol, soit les précipitations moins l'évapotranspiration et moins le ruissellement de surface et de sous-surface superficiel. La recharge correspond à la quantité d'eau qui atteint l'aquifère rocheux.

Les calculs pour chaque cellule sont exécutés en parallèle et les résultats sont sauvegardés dans des fichiers textes temporaires. À noter que le format des fichiers de sortie original de HELP a été modifié directement dans le code source pour faciliter la lecture des résultats et réduire le temps de calcul. La description des résultats extraits de HELP et calculés par le module *pyhelp* est faite à la [section 5.4](#).

Pour définir des conditions de saturation initiales qui soient proches de celles du régime permanent dans les couches du modèle, HELP fait une simulation à l'aide des données météorologiques de la première année. Les saturations en eau obtenues à la fin de cette année de simulation servent à définir les conditions initiales de saturation en eau dans les couches du modèle avant de procéder à la simulation pour toute la période de données.

Les résultats de cette première année de simulation, qui servent à initialiser les conditions de saturation de HELP, ne sont pas inclus dans les fichiers de simulation produits par HELP.

5.3. Post-traitement HELP

Le post-traitement HELP est réalisé à l'aide du module *pyhelp* (Gosselin, 2018) et consiste 1) à récupérer et à formater les résultats des fichiers textes produits par HELP, 2) à calculer les composantes du bilan mensuel pour chaque cellule en tenant compte des différents contextes qui peuvent être attribués aux cellules et 3) à produire des graphiques de calage et des graphiques des différents bilans (mensuel, annuel et moyen) sur toute la période et la région d'étude. De plus, le module *pyhelp* inclut un outil permettant de produire un tableau des valeurs annuelles moyennes des composantes du bilan hydrique pour chacune des cellules de la grille sous la forme d'un fichier shapefile. Le fonctionnement du module est décrit à l'annexe 4.

Pour certaines cellules de la grille, le bilan hydrologique ne peut pas être calculé avec HELP et les calculs doivent être faits à l'aide de méthodes indépendantes. Pour les cellules situées en bordure de cours d'eau et en condition semi-captive à captive, la valeur de recharge calculée par HELP doit être fixée à 0 et attribuée plutôt au ruissellement de sous-surface.

Le [tableau 5.1](#) présente les opérations de post-traitement associées aux différents contextes des cellules. Le champ *Run* est utilisé pour sélectionner à l'intérieur de l'outil *pyhelp* les cellules pour lesquelles il est possible de calculer le bilan hydrologique avec HELP. Les sections qui suivent décrivent les calculs réalisés selon les différents contextes.

5.3.1. Cellules EAU (Contexte 0)

La région des Laurentides comporte plusieurs cours d'eau pour lesquels HELP ne fait pas le calcul de la recharge. Dans les autres projets qui ont utilisé HELP pour l'estimation de la recharge régionale, les cellules attribuées au cours d'eau n'ont pas été intégrées dans le calcul de la recharge; ils ont été considérés comme ayant une recharge nulle. Toutefois, dans le cas des Laurentides, l'importante quantité de cellules attribuées à des cours d'eau peut avoir un impact substantiel sur le bilan hydrologique. Afin de diminuer cet impact, une valeur de ruissellement a été estimée pour chaque cellule à partir de l'équation suivante :

$$\text{Ruissellement} = \text{Précipitation}_{\text{moy}} - \text{Évaporation}_{\text{moy des eaux}}$$

Les cellules EAU qui n'ont pas été calculées dans HELP se voient donc attribuer une valeur de ruissellement non nulle. Cette opération fait partie du post-traitement réalisé par le module *pyhelp*. Cette valeur de ruissellement correspond à la valeur moyenne des précipitations annuelles moins l'évaporation moyenne annuelle des eaux lacustres (Ministère des Pêches et de l'Environnement du Canada, 1975). D'après la carte de l'évaporation moyenne annuelle des eaux lacustres du Canada, la valeur moyenne pour la région d'étude est de l'ordre de 650 mm/an. Les valeurs de ruissellement calculées pour les cellules EAU varient de 258 à 484 mm/an.

5.3.2. Cellules Normales (Contexte 1)

Toutes les cellules qui sont calculées par HELP sans nécessiter de modification sont considérées comme étant *Normales*.

Tableau 5.1 Opération de post-traitement associé aux différents contextes des cellules

Contexte ¹	Champ de sélection <i>Run</i>	Traitement HELP	Opération Post-traitement HELP
0	0	<u>Cellule EAU</u> Cellule qui n'est pas calculée par HELP	Pour ces cellules, on attribue un ruissellement qui correspond à la précipitation moyenne annuelle moins l'évaporation moyenne annuelle de l'eau lacustre
1	1	<u>Cellule Normale</u> Cellule calculée par HELP	Le résultat de HELP n'est pas modifié pour ces cellules
2	1	<u>Cellule Bordure de cours d'eau</u> Cellule de recharge nulle , mais qui est quand même calculée par HELP. Cellule à l'intérieur d'un rayon de 250 m d'un cours d'eau important et en <u>condition semi-captive à captive</u> pour laquelle la recharge au roc calculée par HELP doit être ajoutée au ruissellement de sous-surface superficiel . Pour les contextes captifs où on a les séquences Sol, Arg, Ti, Roc ou Sol, Arg, Roc.	La valeur de la recharge au roc obtenue par HELP est ajoutée au ruissellement de sous-surface superficiel et la recharge au roc est mise à zéro.
3	1	<u>Cellule Bordure de cours d'eau</u> Cellule de recharge nulle , mais qui est quand même calculée par HELP. Cellule à l'intérieur d'un rayon de 250 m d'un cours d'eau important et en <u>condition semi-captive à captive</u> pour laquelle la recharge au roc calculée par HELP doit être ajoutée au ruissellement de sous-surface profond . Pour les contextes captifs où on a les séquences Sol, Sa, Arg, Ti, Roc ou Sol, Sa, Arg, Roc.	La valeur de la recharge au roc obtenue par HELP est ajoutée au ruissellement de sous-surface profond et la recharge au roc est mise à zéro.
4	4	Cellule qui ne peut pas être calculée par HELP car la pédologie est attribuée à <i>Urbain</i>	Ces cellules sont des NaN On ne peut pas attribuer de texture pédologique à ces cellules puisqu'elles se trouvent en zone urbaine

Contexte ¹	Champ de sélection <i>Run</i>	Traitement HELP	Opération Post-traitement HELP
5	5	Cellule qui ne peut pas être calculée par HELP car la pédologie est attribuée à <i>Non cartographiée</i>	Ces cellules sont des NaN On ne peut pas attribuer de texture pédologique à ces cellules puisqu'elles portent la mention: <i>non cartographié</i>

¹ Pour obtenir le contexte 2, les cellules sont sélectionnées dans ArcMap avec l'outil *Selection by location*.

5.3.3. Cellules en bordure des cellules EAU (Contextes 2 et 3)

Les cellules qui se situent à proximité des plans d'eau cartographiés à l'échelle 1/50 000 et qui sont en condition semi-captive ou captive sont considérées avoir une recharge nulle et contribuer directement au cours d'eau. Les cellules pour lesquelles on retrouve un cours d'eau à l'intérieur d'une distance de 250 m de son centre sont assignées comme une cellule de *Bordure de cours d'eau*. Puisqu'une valeur de recharge est calculée par HELP pour ce type de cellules, la recharge au roc est transformée en ruissellement de sous-surface superficiel ou profond, dépendamment de la séquence géologique attribuée aux cellules.

À noter qu'il n'est pas nécessaire de différencier le contexte 3 du contexte 2, car ils peuvent être traités simultanément dans le post-traitement effectué par *pyhelp*. Lors du post-traitement, la recharge calculée pour les cellules de type *Bordure de cours d'eau* est attribuée au ruissellement de sous-surface profond pour les cellules où on a les séquences Sol, Sa, Arg, Ti, Roc ou Sol, Sa, Arg, Roc et au ruissellement de sous-surface superficiel pour celles où on a les séquences Sol, Arg, Ti, Roc ou Sol, Arg, Roc (voir [tableau 5.1](#)).

5.4. Production des résultats

À partir des composantes du bilan calculées pour l'ensemble des cellules de la grille, le module *pyhelp* produit un shapefile pour la représentation cartographique des résultats de HELP. Les champs contenus dans le shapefile *resultat.shp* sont présentés et décrits au [tableau 5.2](#).

Le shapefile permet ensuite de produire des matrices présentant les résultats de chacun des champs. Le nom attribué à chaque matrice est indiqué dans le [tableau 5.2](#). Ces matrices ont permis de produire les cartes de résultats présentées aux [planches 26 à 30](#). Les résultats sont discutés à la [section 7](#).

Tableau 5.2 Description des champs du shapefile *help_results_0424.shp*

Nom du champ	Description du résultat de HELP pour toute la période de simulation et toute la région d'étude	Matrice résultante produite	N° de planche
cid	Identifiant de la cellule	-	-
rain	Précipitations moyennes annuelles utilisées pour le calcul HELP (input)	prec0424	7
evapo	Évapotranspiration moyenne annuelle	etp0424	26

Nom du champ	Description du résultat de HELP pour toute la période de simulation et toute la région d'étude	Matrice résultante produite	N° de planche
runoff	Ruissellement de surface moyen annuel <i>Correspond à l'écoulement latéral de l'eau souterraine sous la surface du sol (superficiel + profond).</i>	ruis0424	27
subrun1 et subrun2	Ruissellement hypodermique moyen annuel <i>Correspond au ruissellement de sous-surface, soit l'addition du ruissellement calculé pour toutes les couches de type 1 qui se trouvent sous les horizons de sol (Ruissellement sous-surface 1 + Ruissellement sous-surface 2).</i>	sub0424	28
percolatio	Percolation moyenne annuelle <i>Correspond à la quantité d'eau qui s'infiltre sous les horizons de sol, soit : Précipitations – (Évapotranspiration + Ruissellement de surface + Ruissellement de sous-surface superficiel)</i>	perco0424	29
recharge	Estimation de la recharge moyenne annuelle au roc	rech0424	30

5.5. Production des graphiques

Finalement, deux types de graphiques sont produits par le module *pyhelp*, des graphiques de calage ainsi que des graphiques des composantes du bilan. Les graphiques de calage comprennent un graphique qui compare les débits totaux annuels et de base mesurés dans le cours d'eau avec les valeurs calculées avec les résultats de HELP en fonction des années (voir les graphes de gauche de la [figure 6.1](#)).

Le débit total annuel est calculé en sommant la recharge avec le ruissellement de surface et sous-surface (superficiel et profond) alors que le débit de base est obtenu en sommant la recharge avec le ruissellement de sous-surface (superficiel et profond). La comparaison entre les débits annuels simulés avec HELP et les débits annuels mesurés permet de voir si HELP reproduit bien les variations du débit dans le temps. La modification des paramètres de calage est nécessaire pour obtenir le meilleur ajustement. Un graphique comparant les débits mesurés aux débits simulés est également produit pour visualiser la validité des résultats obtenus. La moyenne des erreurs et la moyenne des erreurs au carré y sont également affichées pour faciliter la comparaison entre les simulations données (voir graphes de droite de la [figure 6.1](#)).

6. Calage

Le calage a été réalisé pour deux bassins, le bassin de la rivière Du Chêne situé au sud dans les Basses Terres du Saint-Laurent et le bassin de la rivière du Nord dans les Laurentides. Les deux bassins de calage sont illustrés par un trait noir sur les planches. Au terme du calage, les paramètres retenus pour la rivière Du Chêne ont été appliqués à toutes les cellules situées dans les Basses Terres et les paramètres retenus pour la rivière du Nord ont été appliqués à toutes les cellules situées dans les Laurentides.

6.1. Calage de l'évapotranspiration

Dans un premier temps, les graphiques qui comparent le débit total du cours d'eau avec ceux calculés à partir des résultats de HELP sont utilisés pour ajuster les paramètres qui influencent l'estimation de l'évapotranspiration. L'ajustement a été réalisé en faisant varier la profondeur des racines, l'indice de surface foliaire, la période de croissance des végétaux ainsi que la température du gel. La croissance des végétaux a seulement été modifiée pour les cellules associées à un type de culture qui sont situées dans les Basses Terres, étant donné que l'agriculture y est très importante. La température de gel correspond dans HELP à la température critique de l'air à partir de laquelle le sol gèle ou dégèle. Ce paramètre est fixé dans HELP à une valeur constante de 0 °C. Toutefois, au Québec, le sol est isolé thermiquement de l'air durant la majeure partie de la période de gel par un épais couvert de neige. Dans ces conditions, la température critique de l'air à laquelle le sol commence à geler ou dégeler peut être considérée inférieure à 0 °C. C'est pourquoi la valeur de la température critique de gel du sol a été considérée ici comme un paramètre de calage, dont la valeur optimale a été établie à -3 °C pour les deux bassins, soit pour l'ensemble des cellules. Cela a eu pour conséquence de réduire la période de gel du sol dans le modèle. Puisque HELP ne permet presque aucune infiltration d'eau lorsque le sol est gelé, ceci a permis de réduire le ruissellement de surface et d'augmenter la recharge printanière, ce qui a eu pour effet d'améliorer le calage du modèle.

Le paramètre montrant le plus d'influence sur le calage de l'évapotranspiration est la profondeur racinaire. Une première étape de calage a été réalisée en multipliant les profondeurs racinaires nominales par un facteur de 0.6. Ce sont ces simulations qui ont servi de cas de base pour le calage de la conductivité hydraulique. Toutefois, une seconde étape de calage de l'évapotranspiration a permis d'améliorer l'ajustement de ce paramètre. Dans le cas du bassin de la rivière Du Chêne, la profondeur des racines a finalement été multipliée par un facteur de 0.35 pour obtenir le meilleur résultat de calage. Pour le bassin de la rivière du Nord, c'est un facteur de 0.15 qui a obtenu le meilleur calage. Les graphiques du débit en unité de surface en fonction des années de la [figure 6.1](#) illustrent bien cet ajustement. Ces diminutions considérables de la profondeur racinaire par rapport aux données de références sont possiblement associées à l'utilisation d'une valeur ponctuelle comme valeur moyenne pour une cellule de 250 m par 250 m. Ce résultat indique que la profondeur racinaire typique mesurée pour des végétaux à l'échelle locale ne peut probablement pas être utilisée directement à l'échelle régionale pour une cellule de 250 par 250 m sans faire un ajustement.

Au contraire, la variation de l'indice de surface foliaire n'a pas un effet significatif dans les deux bassins utilisés pour le calage.

6.2. Calage de la conductivité hydraulique des unités

Une fois l'évapotranspiration calée, la conductivité hydraulique pour chaque unité quaternaire a été ajustée séparément afin de vérifier les effets de cette variation sur le calcul de la recharge au roc par HELP. La conductivité hydraulique a été variée à partir de la valeur de base en la diminuant ($K_{sat}/100$, $K_{sat}/10$) et en l'augmentant ($K_{sat} \cdot 10$, $K_{sat} \cdot 100$) pour chaque unité séparément et en la diminuant ($K_{sat}/10$) et en l'augmentant ($K_{sat} \cdot 10$) pour

toutes les unités simultanément. Le champ *nseq* du fichier *input.csv* permet de sélectionner les cellules selon leur séquence stratigraphique afin de faciliter la modification de la conductivité hydraulique à l'aide du module *pyhelp*.

Le cas de base utilisé pour le calage de la conductivité hydraulique pour le bassin de la rivière Du Chêne (0416base) est celui pour lequel :

- la profondeur des racines est multipliée par 0.6;
- la période de croissance des végétaux est fixée du jour 120 au jour 240 pour les cellules en culture seulement (les autres cellules la période croissance est fixée selon la grille Agroclimat);
- la température du gel est fixée à -3 °C (plutôt que 0).

Le cas de base utilisé pour le calage de la conductivité hydraulique pour le bassin de la rivière du Nord (0416base) est celui pour lequel :

- la profondeur des racines est multipliée par 0.6;
- la température du gel est fixée à -3 °C (plutôt que 0).

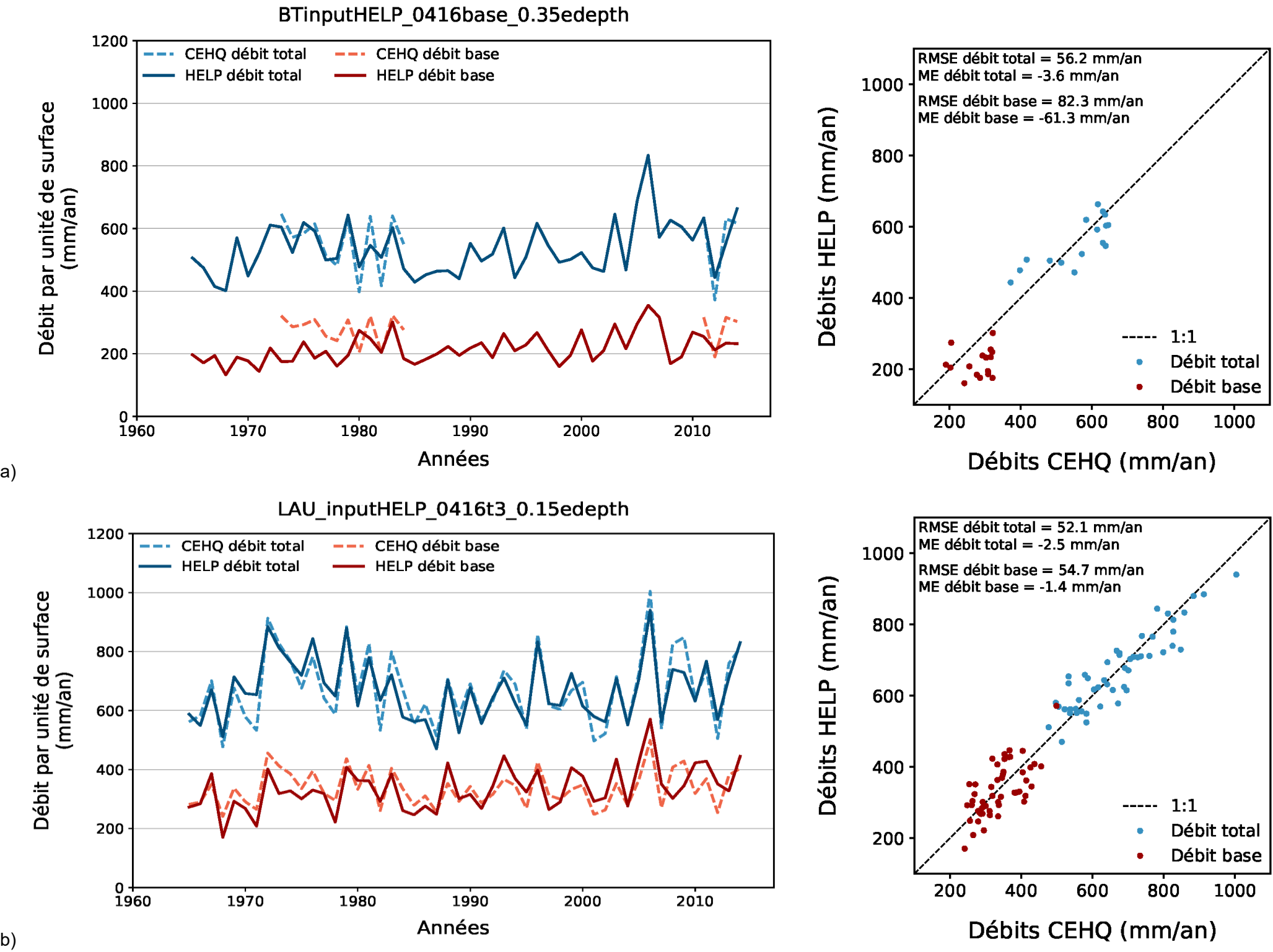
Le [tableau 6.1](#) présente un exemple de la synthèse des résultats obtenus pour les différentes simulations réalisées pour le bassin de la rivière Du Chêne. Les cases en rouges indiquent les valeurs qui sont moins bonnes que le cas de base et en vert les améliorations par rapport au cas de base. Ce graphique est présenté à titre informatif puisqu'un nouvel ajustement de l'évapotranspiration a été refait après le calage des conductivités. Dans un premier temps, la simulation *0416all3* a été retenue pour les Basses Terres. Finalement, à la suite du second ajustement de l'évapotranspiration, le résultat retenu pour le bassin de calage dans les Basses Terres est la solution pour laquelle la conductivité hydraulique correspond au cas de base. Pour les Laurentides, seule la conductivité hydraulique de l'unité de till est augmentée d'un facteur 10.

Les graphiques de la [figure 6.1](#) présentent la comparaison du débit total et du débit de base des rivières jaugées utilisées pour la solution retenue pour chaque bassin.

Tableau 6.1 Exemple de synthèse des résultats obtenus pour les différentes simulations réalisées pour le bassin de la rivière Du Chêne à partir du cas de base

	Base	Argile				Roc			
Modification Ksat		10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ¹	10 ²	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ¹	10 ²
Nom résultat	0416base	0416a1	0416a2	0416a3	0416a4	0416r1	0416r2	0416r3	0416r4
precip	1019	1019	1019	1019	1019	1019	1019	1019	1019
runoff	303	310	309	283	280	309	306	303	303
evapo	519	521	521	516	516	519	519	518	518
perco	170	156	157	217	224	164	168	171	171
subrun	88	100	99	36	10	88	88	88	88
rechg	111	90	92	185	214	105	108	111	111
RMSE Q _{base}	95.68	103.13	102.37	77.94	78.12	99.87	97.77	95.49	95.44
RMSE Q _{total}	66.67	67.83	67.71	66.84	71.40	66.61	66.83	66.55	66.50
ME Q _{base}	-78.80	-88.02	-87.10	-54.24	-51.45	-84.20	-81.57	-78.57	-78.51
ME Q _{total}	-37.96	-40.18	-39.96	-33.16	-32.43	-37.96	-38.27	-37.74	-37.68
	Base	Sable				Till			
Modification Ksat		10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ¹	10 ²	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ¹	10 ²
Nom résultat	0416base	0416s1	0416s2	0416s3	0416s4	0416t1	0416t2	0416t3	0416t4
precip	1019	1019	1019	1019	1019	1019	1019	1019	1019
runoff	303	303	303	303	303	303	303	303	303
evapo	519	519	519	519	519	519	519	519	519
perco	170	170	170	170	170	170	170	170	170
subrun	88	59	79	90	91	87	88	88	88
rechg	111	115	114	109	108	98	106	111	111
RMSE Q _{base}	95.68	112.73	98.37	95.65	95.51	107.57	97.77	99.30	99.28
RMSE Q _{total}	66.67	83.31	70.47	66.17	66.04	75.32	68.35	69.14	69.14
ME Q _{base}	-78.80	-101.83	-83.74	-78.96	-78.91	-91.51	-82.06	-80.70	-80.68
ME Q _{total}	-37.96	-60.99	-42.90	-38.13	-38.07	-50.67	-41.22	-39.86	-39.84
	Base	Tout Quaternaire							
Modification Ksat		10 ⁻¹	10 ¹						
Nom résultat	0416base	0416all2	0416all3						
precip	1019	1019	1019						
runoff	303	312	283						
evapo	519	521	516						
perco	170	155	217						
subrun	88	91	45						
rechg	111	87	178						
RMSE Q _{base}	95.68	109.21	87.55						
RMSE Q _{total}	66.67	72.87	67.28						
ME Q _{base}	-78.80	-96.96	-57.38						
ME Q _{total}	-37.96	-47.37	-36.31						

Figure 6.1 Graphiques de comparaison du débit total et du débit de base annuel des rivières pour les deux bassins versants calés. a) Bassin de calage de la rivière Du Chêne dans les Basses Terres du Saint-Laurent, b) Bassin de calage de la rivière du Nord dans les Laurentides



7. Interprétation des résultats

7.1. Distribution spatiale des composantes du bilan hydrologique

Les [planches 7 et 26 à 29](#) présentent des cartes montrant la distribution spatiale des valeurs moyennes des composantes du bilan hydrologique entre 1965 et 2014 obtenues de la simulation HELP. Ces résultats reflètent l'effet combiné des variations dans la distribution spatiale des intrants (précipitations) et des conditions topographiques ([planches 2 et 3](#)), de surface ([planches 4, 5, 9, 10, 11 et 23](#)) et de sous-surface ([planches 6, 14 à 22, 24 et 25](#)).

La [planche 7](#) montre la distribution spatiale des précipitations annuelles moyennes dans la région d'étude. Il apparaît clairement que les hauts topographiques au sud-est des Laurentides ([planche 2](#)) correspondent au secteur où les précipitations sont plus abondantes. C'est dans ce secteur que se trouve le bassin de la rivière du Nord utilisé pour le calage de HELP dans les Laurentides. La partie nord-ouest des Laurentides ainsi que les Basses Terres ont des précipitations moins importantes.

La [planche 26](#) montre la distribution spatiale de l'évapotranspiration réelle (ETR). L'ETR est généralement moindre dans les Laurentides que dans les Basses Terres dû en grande partie aux températures supérieures dans les Basses Terres. Dans les Laurentides, l'ETR est généralement moindre le long des vallées où se trouvent les terres agricoles par rapport aux zones forestières les entourant ([planche 5](#)). Dans les Basses Terres, ce sont les secteurs plus urbanisés où l'ETR est moindre par rapport aux zones agricoles et forestières ([planche 5](#)).

Les [planches 27 et 28](#) montrent respectivement le ruissellement de surface et le ruissellement hypodermique total qui représente l'eau qui s'est infiltrée dans les sédiments, mais qui s'est écoulee horizontalement vers les cours d'eau sans atteindre l'aquifère rocheux. Dans les Laurentides, la distribution du ruissellement de surface ([planche 27](#)) est fortement contrôlée par l'intensité des précipitations ([planche 7](#)), possiblement parce que les conditions des sols et sédiments superficiels sont relativement uniformes. Toutefois, dans les Basses Terres, le ruissellement de surface semble plutôt contrôlé par le type de couverture du sol ([planche 4](#)). Quant au ruissellement hypodermique ([planche 28](#)), tant dans les Laurentides que dans les Basses Terres, les fortes valeurs sont localisées dans les vallées où se trouvent des accumulations épaisses de sédiments fins qui limitent l'infiltration d'eau jusqu'au roc et concentrent plutôt l'écoulement dans les sédiments superficiels.

Les [planches 29 et 30](#) montrent respectivement la percolation (infiltration d'eau sous la zone racinaire) et la recharge de l'aquifère rocheux fracturé. La [planche 29](#) montre que la percolation est relativement importante dans l'ensemble de la zone d'étude, malgré une forte hétérogénéité liée à la variabilité de plusieurs conditions locales. Toutefois, la recharge de l'aquifère rocheux est contrôlée par l'interception d'une partie de la percolation par le ruissellement hypodermique profond ([planche 28](#)). Ceci fait en sorte que la recharge au roc est beaucoup plus faible dans les vallées ([planche 30](#)) où l'on retrouve d'épais

sédiments fins, qu'ailleurs dans les Laurentides ou les Basses Terres. La proportion des secteurs où se trouvent d'épaisses accumulations de sédiments fins étant beaucoup plus importantes dans les Basses Terres que dans les Laurentides, la recharge dans les Basses Terres est globalement moindre que dans les Laurentides.

7.2. Distribution temporelle des composantes du bilan hydrologique

Pour le bassin de la rivière Du Chêne (figure 7.1) et l'ensemble des Basses Terres (figure 7.2), des graphiques montrent la distribution des composantes du bilan hydrologique sur une base annuelle de 1965 à 2014 (figures 7.1a et 7.2a), les valeurs moyennes mensuelles des composantes du bilan hydrologique (figures 7.1b et 7.2b) ainsi que les moyennes annuelles des composantes du bilan hydrologique. Les figures 7.3 et 7.4 montrent la même information respectivement pour le bassin de la rivière du Nord et pour l'ensemble des Laurentides.

La variabilité interannuelle des composantes du bilan hydrologique est montrée par les graphiques des figures 7.1a, 7.2a, 7.3a et 7.4a. Les précipitations montrent une variabilité interannuelle assez importante allant d'environ 200 mm à 400 mm. C'est le ruissellement et dans une moindre mesure l'évapotranspiration qui réagissent le plus au changement d'intensité des précipitations d'une année à l'autre. Le ruissellement hypodermique montre un peu de variabilité dans les Basses Terres, mais très peu dans les Laurentides où il représente une faible composante du bilan hydrologique. Par contre, la recharge est plus variable d'une année à l'autre dans les Laurentides que dans les Basses Terres.

Pour la période considérée, les figures 7.2a et 7.4a ainsi que le tableau 7.1 montrent des tendances à l'augmentation en ce qui concerne les précipitations pour les Basses Terres et les Laurentides qui se traduisent aussi par une tendance à l'augmentation de la recharge. Il faut toutefois noter que l'augmentation des précipitations sur une période de 50 ans serait respectivement de l'ordre de 160 mm pour les Basses Terres et de 54 mm pour les Laurentides, alors que la variabilité interannuelle dépasse souvent 200 mm pour les précipitations. Les variations interannuelles de recharge sont moins importantes. Considérant ces fortes variations interannuelles, il est difficile d'évaluer les implications de l'évolution temporelle à la hausse des précipitations sur les ressources en eau souterraine.

Tableau 7.1 Tendances temporelles des composantes du bilan hydrologique

Composante	Pente	R ²	p	Écart-type	Pente	R ²	p	Écart-type
Zone	Basses Terres				Laurentides			
Précipitations	3.196	0.160	0.004	1.056	1.073	0.032	0.217	0.859
Recharge	0.891	0.302	0.000	0.196	1.561	0.248	0.000	0.392
Ruissellement	0.153	0.001	0.805	0.616	-1.194	0.090	0.034	0.547
Évapotranspiration	1.354	0.207	0.001	0.382	0.852	0.137	0.008	0.309
Ruissellement hypodermique	0.978	0.254	0.000	0.242	0.306	0.216	0.001	0.084

Note : la pente, le R² et l'écart-type réfèrent à la droite de la régression linéaire des composantes du bilan par rapport au temps, tandis que les valeurs de p correspondent à l'hypothèse nulle de pente zéro du test de Wald pour une distribution *t* du test statistique.

L'évolution sur une base mensuelle des composantes du bilan hydrologique à l'intérieur d'une année est montrée par les graphiques des [figures 7.1b, 7.2b, 7.3b et 7.4b](#). Les précipitations sont un peu moindres dans les mois d'hiver (décembre à avril) par rapport au reste de l'année. Le ruissellement de surface est maximum en relation avec la fonte printanière. Ce fort ruissellement s'étale de mars à avril dans les Basses Terres, mais il est plus tardif et concentré en avril dans les Laurentides. L'évapotranspiration est évidemment plus importante dans les mois les plus chauds et bien supérieure dans les Basses Terres par rapport aux Laurentides. Les résultats montrent une très forte percolation (infiltration totale) à l'automne et moindre au printemps alors que la recharge est relativement étalée dans l'année à cause de l'effet du ruissellement hypodermique. Ces résultats représentent toutefois l'intégration de très grands territoires où les conditions de recharge sont très variables. Nous n'avons pas vérifié les résultats de HELP dans des zones spécifiques de recharge où des puits d'observation sont disponibles, mais nous doutons que la recharge soit vraiment plus importante à l'automne que le printemps alors que les hydrogrammes de puits montrent généralement des niveaux plus importants au printemps par rapport au reste de l'année.

Les valeurs moyennes des composantes du bilan hydrologique pour la période de 1964 à 2014 sont montrées par les graphiques des [figures 7.1c, 7.2c, 7.3c et 7.4c](#). Malgré la variabilité spatiale, les précipitations moyennes sont en fait très similaires dans les Basses Terres (1021 mm/an) et les Laurentides (1021 mm/an). L'évapotranspiration est significativement plus importante dans les Basses Terres (478 mm/an) par rapport aux Laurentides (436 mm/an), tandis que le ruissellement est similaire (298 mm/an dans les Basses Terres par rapport à 282 mm/an dans les Laurentides). La recharge est plus importante dans les Laurentides (246 mm/an) que dans les Basses Terres (130 mm/an). Les différentes composantes du bilan sont très similaires dans les bassins utilisés pour le calage de HELP par rapport à l'ensemble du secteur qu'il représente, ce qui laisse présumer que les résultats sur l'ensemble du secteur sont aussi représentatifs.

Figure 7.1 Graphiques des composantes du bilan calculées par HELP pour différentes périodes pour le bassin de calage de la rivière Du Chêne dans les Basses Terres; a) annuel, b) mensuel et c) moyen de 1965 à 2014

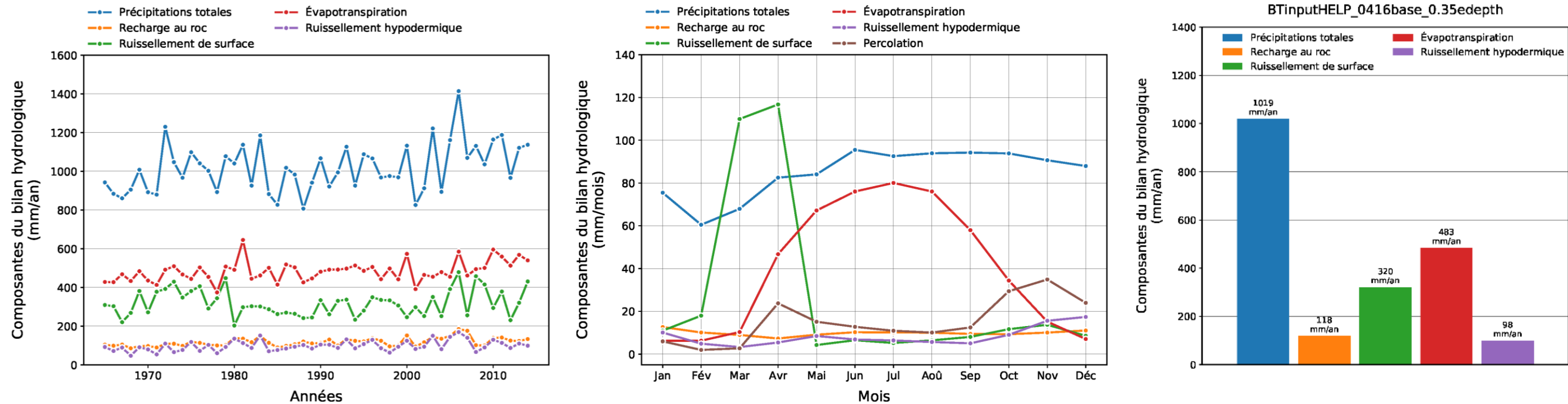


Figure 7.2 Graphiques des composantes du bilan calculées par HELP pour différentes périodes pour toutes les cellules dans les Basses Terres; a) annuel, b) mensuel et c) moyen de 1965 à 2014

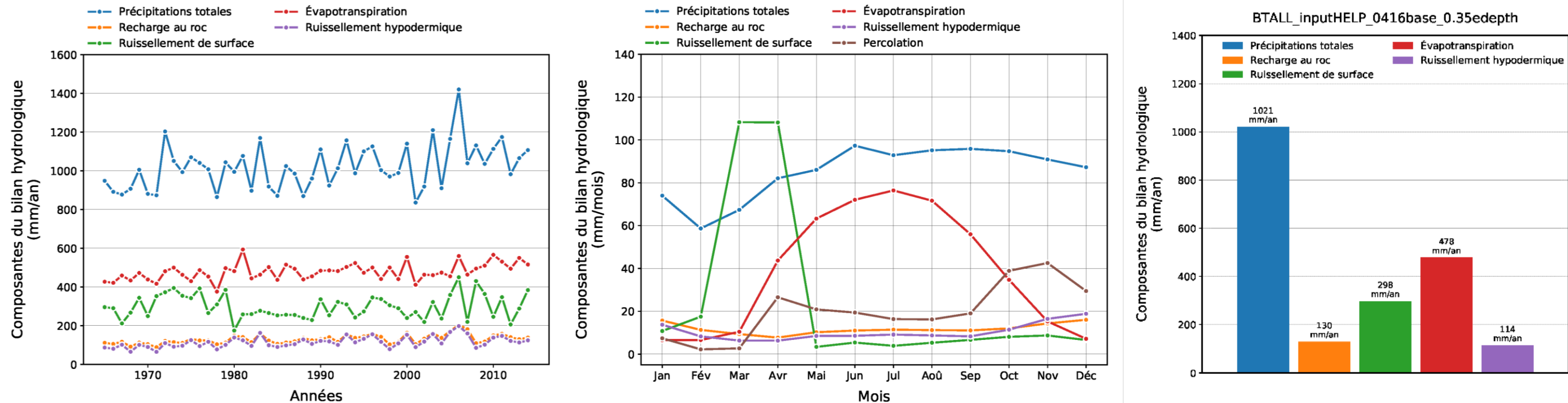


Figure 7.3 Graphiques des composantes du bilan calculées par HELP pour différentes périodes pour le bassin de calage de la rivière du Nord dans les Laurentides; a) annuel, b) mensuel et c) moyen de 1965 à 2014

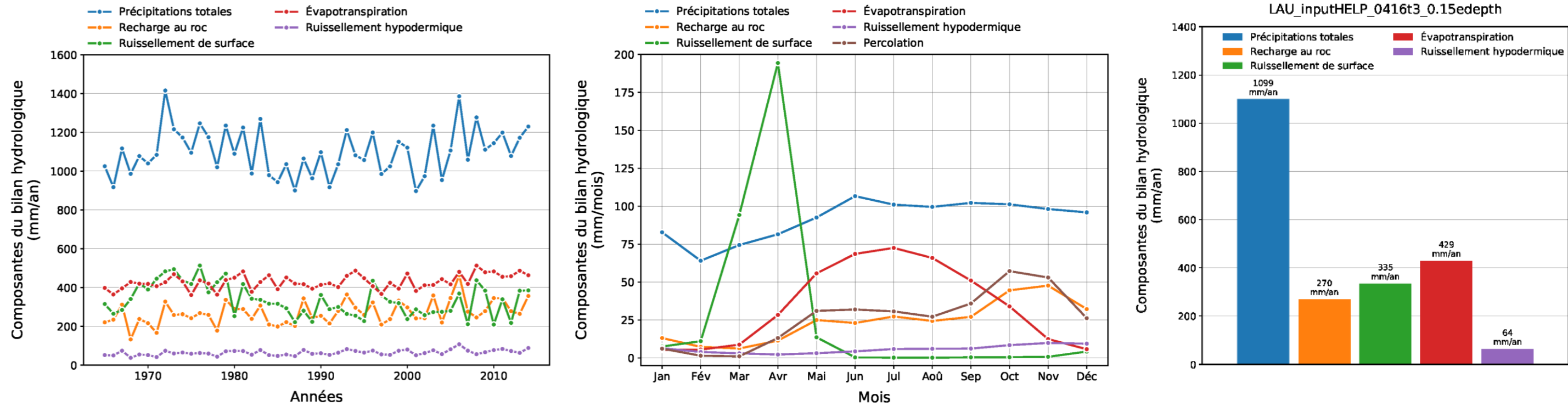
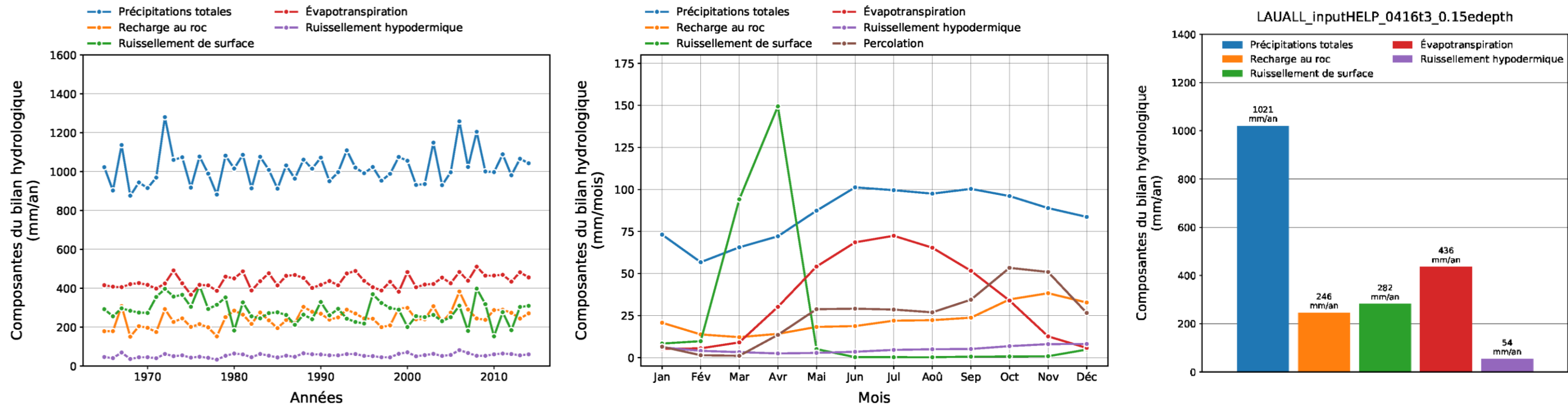


Figure 7.4 Graphiques des composantes du bilan calculées par HELP pour différentes périodes pour toutes les cellules dans les Laurentides; a) annuel, b) mensuel et c) moyen de 1965 à 2014



8. Conclusions

L'estimation de la recharge des Laurentides et de Laval a nécessité la compilation des données hydrogéologiques du secteur. Les données stratigraphiques extraites du SIH ont permis de produire le modèle hydrostratigraphique 3D régional dans les Laurentides, alors que le modèle géologique 3D de Ross (2004) couvre presque toutes les Basses Terres. Les données météorologiques, pédologiques, la couverture de sol ainsi que l'inventaire des cultures ont permis de calculer et déduire les paramètres nécessaires à l'estimation de la recharge, comme l'indice de surface foliaire, le numéro de courbe, la distance au drain, la profondeur racinaire et les conditions de confinement. Ailleurs dans la région, il y a une incertitude sur les profondeurs et la nature des dépôts due à la précision limitée des données du Système d'information hydrogéologique (SIH) du MDDELCC utilisée pour développer le modèle 3D. Des forages stratigraphiques fiables seraient ainsi requis pour faire la validation du modèle 3D. Une telle validation pourrait être en partie réalisée dans le cadre du projet PACES des Laurentides qui a été amorcé en 2018 par l'UQAM. Des forages stratigraphiques fiables pourraient vérifier si la simplification qui a été faite de ne définir qu'une seule unité d'argile est généralement représentative ou si un cadre stratigraphique plus complexe serait requis. De plus, dans le nord-ouest des Laurentides notre modèle stratigraphique représente de grandes étendues avec une séquence de matériaux composée de sol sur du sable superficiel reposant directement sur le roc. Les épaisseurs de sédiments impliquées qui sont souvent supérieures à 10 m font en sorte que ces sédiments ne devraient pas être du till, même s'il est probable qu'en fait il y ait une couche de till sous ces sables superficiels. Les descriptions des forages du SIH identifient très rarement du till qui est généralement décrit plutôt comme du sable ou du gravier. Ces sédiments superficiels épais pourraient être des alluvions ou des sédiments fluvioglaciaires, mais une nouvelle cartographie quaternaire fiable sera requise pour déterminer la nature de ces sédiments et définir la séquence de sédiments dans les accumulations épaisses de dépôts meubles. Tant que ces sédiments sont effectivement perméables et épais, la recharge estimée avec HELP devrait être représentative. Pour réaliser une évaluation plus complète de l'estimation de la recharge produite avec HELP, un autre bassin versant englobant le secteur avec de fortes épaisseurs de sable superficiel au nord-ouest de la zone d'étude pourrait être considéré. Les accumulations de sédiments superficiels au nord-ouest de la zone d'étude sont plus importantes que celles retrouvées dans le bassin utilisé pour caler les résultats de HELP dans les Laurentides, de sorte que l'évaluation de la recharge dans ce contexte avec de fortes épaisseurs de sédiments mériterait aussi d'être calée.

Le modèle HELP a permis d'estimer la recharge au roc pour les régions de Laval et des Laurentides. Le calcul de la recharge a été réalisé distinctement pour la portion de la zone d'étude qui se trouve dans les Basses Terres et dans les Laurentides. Le résultat de la simulation HELP a été calé à l'aide des données hydrométriques de rivières pour deux bassins versants. Dans les Laurentides, la conductivité hydraulique saturée du till a été augmentée d'un facteur de 10 par rapport à celle des Basses Terres, ce qui s'explique par la nature du till qui est plus grossier dans les Laurentides. Afin de caler l'évapotranspiration, un facteur a été multiplié à la profondeur racinaire et à l'indice de surface foliaire. Ce facteur est de 0.15 pour les Laurentides et de 0.35 pour les Basses Terres.

L'étape du calage a permis d'ajuster les paramètres suivants pour les deux secteurs :

Basses Terres :

- Période de croissance des plantes plus importante pour les cellules en culture
- Profondeur racinaire diminuée (multiplié par un facteur de 0.35)
- Maintien des conductivités hydrauliques des unités géologiques

Laurentides :

- Profondeur racinaire diminuée (multiplié par un facteur de 0.15)
- Augmentation de la conductivité hydraulique de l'unité de till d'un facteur de 10 par rapport à la conductivité du till des Basses Terres. Ce résultat est réaliste puisqu'on s'attend à ce que le till des Laurentides soit plus sableux que celui des Basses Terres, donc plus perméable.

La rivière Du Chêne est naturelle, mais la rivière du Nord est affectée mensuellement par des barrages en amont de la station de jaugeage. Cette influence des barrages ne devrait pas influencer significativement le débit total dans une année hydrologique, mais cela pourrait affecter la séparation de l'hydrogramme et l'estimation du débit de base. Malgré cette difficulté, le bassin de la rivière du Nord représente la meilleure option pour le calage de HELP considérant la longue séquence de données disponibles et l'inclusion complète du bassin dans le contexte des Laurentides à l'intérieur de la région d'étude.

La recharge moyenne au roc est estimée à 130 mm/an pour les Basses Terres et à 246 mm/an pour les Laurentides. Les précipitations moyennes sont assez similaires dans les Basses Terres (1021 mm/an) et les Laurentides (1021 mm/an). L'évapotranspiration est significativement plus importante dans les Basses Terres (478 mm/an) par rapport aux Laurentides (436 mm/an), tandis que le ruissellement est similaire dans les deux secteurs (298 mm/an dans les Basses Terres par rapport à 282 mm/an dans les Laurentides).

Les travaux réalisés ont certaines limitations. D'abord, il y a des limitations sur la définition du cadre stratigraphique (séquence de dépôts meubles sur le roc). La cartographie 3D des dépôts meubles n'a pas pu être validée en détail à l'échelle locale. Le modèle géologique 3D de Ross (2004) a profité de la disponibilité de forages stratigraphiques de grande qualité qui avaient été réalisés pour l'implantation de l'aéroport Mirabel ainsi que des travaux de la Commission géologique du Canada dans les Basses-Laurentides. Ailleurs dans la région, il y a une incertitude sur les profondeurs des dépôts dus à la précision limitée des données du Système d'information hydrogéologique (SIH) du MDDELCC utilisée pour développer le modèle 3D. Des forages stratigraphiques fiables seraient ainsi requis pour faire la validation du modèle 3D. Une telle validation pourrait être en partie réalisée dans le cadre du projet PACES des Laurentides qui a été amorcé en 2018 par l'UQAM. De plus, des forages stratigraphiques fiables pourraient vérifier si la simplification qui a été faite de ne définir qu'une seule unité d'argile est généralement représentative ou si un cadre stratigraphique plus complexe serait requis.

Il y a aussi des limitations sur les valeurs de recharge estimées par HELP. Ainsi, le calcul de la recharge a été calé pour bien représenter la recharge moyenne annuelle à l'échelle régionale. Le calage n'a pas été réalisé pour valider les valeurs calculées sur une base mensuelle. De plus, les valeurs estimées par HELP dans les zones de recharge n'ont pas été vérifiées par rapport aux hydrogrammes de puits disponibles dans la région du Réseau

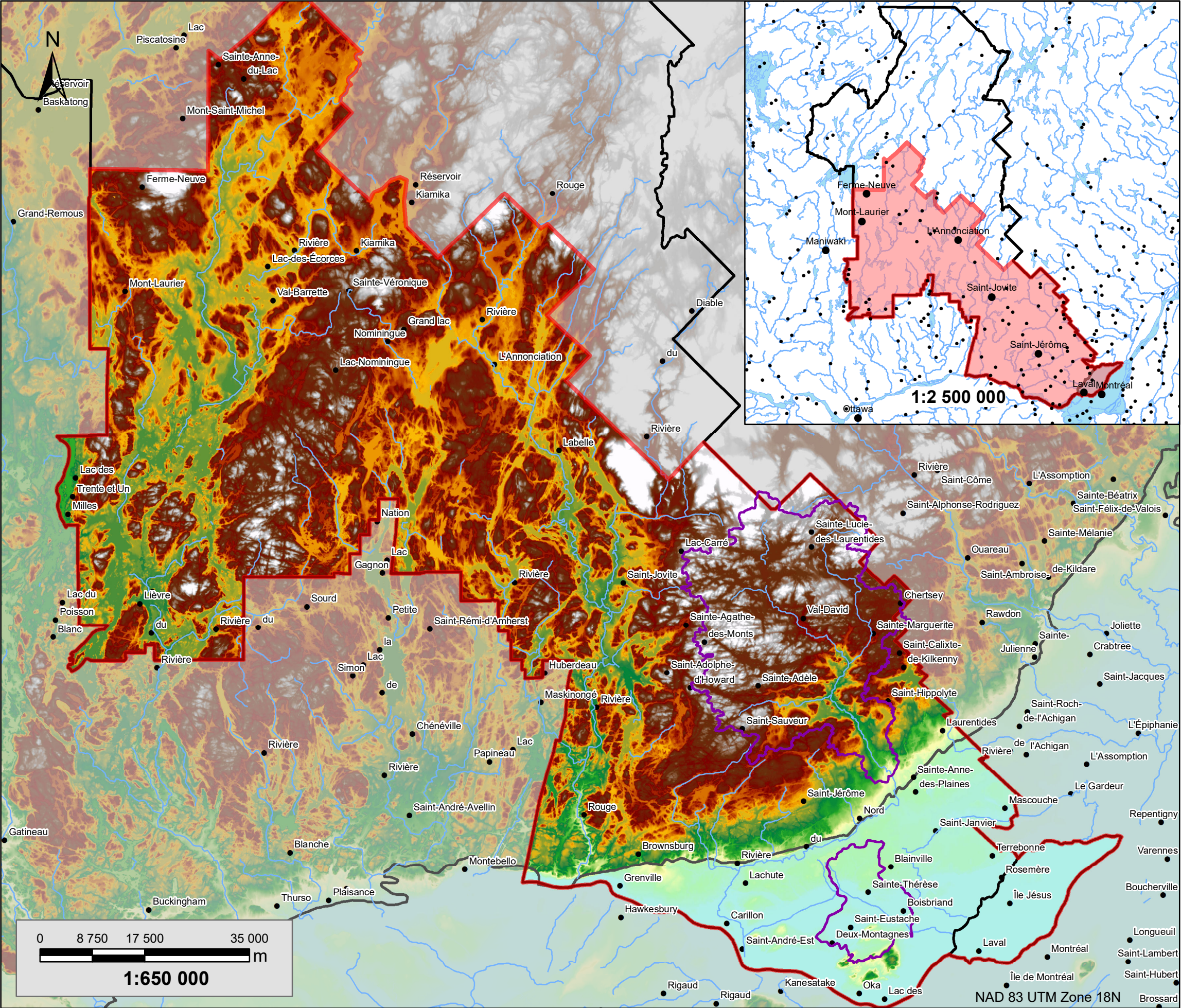
de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ). Une telle vérification permettrait à la fois de vérifier la valeur de recharge ainsi que sa distribution dans l'année.

9. Références

- Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2016. Atlas agroclimatique du Québec – Jeu de données GDB, <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/03807263-b1ad-44e9-b2a9-b574cd26e992> [accédé en mars 2018].
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC), 2016. Inventaire des cultures, 2015. <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/3688e7d9-7520-42bd-a3eb-8854b685fef3>, [accédé en mars 2018],
- AR2Tech. 2017. AR2GEMS – A modern geostatistical platform. <http://www.ar2tech.com/products#ar2gems> [accédé en mars 2017].
- Asner GP, Scurlock JM et A Hicke J (2003) Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology and Biogeography* 12(3):191-205.
- Breuer L, Eckhardt K et Frede HG (2003) Plant parameter values for models in temperate climates. *Ecological Modelling* 169(2-3):237-293.
- ESRI, 2017. About ArcGIS. <http://www.esri.com/arcgis/about-arcgis> [accédé en mars 2017].
- Carrier, M.-A., Lefebvre, R., Rivard, C., Parent, M., Ballard, J.-M., Benoit, N., Vigneault, H., Beaudry, C., Malet, X., Laurencelle, M., Gosselin, J.-S., Ladevèze, P., Thériault, R., Beaudin, I., Michaud, A., Pugin, A., Morin, R., Crow, H., Gloaguen, E., Bleser, J., Martin, A., Lavoie, D., 2013. Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada. Projet réalisé conjointement par l'INRS, la CGC, l'OBV Yamaska et l'IRDA dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines, Rapport final INRS R-1433, version finale soumise en juin 2013 au MDDEFP et aux partenaires régionaux, 283 p., annexes, incluant 29 cartes et base de données.
- Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), 2018. Données de stations de jaugeage. <https://www.cehq.gouv.qc.ca/suivihydro/ListeStation.asp?regionhydro=04&Tri=Non> [accédé en janvier 2018].
- Chapman, Tom. 1999. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrol. Process.* 13, 701-714 (1999).
- Comeau, G., Talbot Poulin, M.C., Tremblay, Y., Ayotte, S., Molson, J., Lemieux, J.M., Montcoudiol, N., Therrien, R., Fortier, R., Therrien, P., Fabien-Ouellet, G. (2013). Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines en Outaouais, Rapport final. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, juillet 2013, 148 pages, 24 annexes, 25 cartes.
- Croteau, A, 2006. *Détermination de la distribution spatiale et temporelle de la recharge à l'aquifère régional transfrontalier du bassin versant de la rivière Châteauguay, Québec et États-Unis*. Mémoire. Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Maîtrise en sciences de la terre, 345 p. <http://espace.inrs.ca/1464/>, [accédé en septembre 2017].

- Croteau, A., Nastev, M. et R. Lefebvre (2010). Groundwater Recharge Assessment in the Chateauguay River Watershed, *Canadian Water Resources Journal /Revue canadienne des ressources hydriques*, 35:4, 451-468, DOI: 10.4296/cwrj3504451.
- CWEEDS (Canadian Weather Energy and Engineering Datasets), 2016. Jeux de données de la radiation solaire, climate.weather.gc.ca/prods_servs/engineering_e.html, [accédé en janvier 2018].
- Environnement Canada, 2018. Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1981 à 2010. http://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/results_1981_2010_f.html?searchType=stnName&txtStationName=mirabel&searchMethod=contains&txtCentralLatMin=0&txtCentralLatSec=0&txtCentralLongMin=0&txtCentralLongSec=0&stnID=5616&dispBack=1 [accédé en janvier 2018].
- Gosselin J.S., 2018. Module *pyhelp*. <https://github.com/jnsebgosselin/pyhelp> [accédé en avril 2018].
- Huchet, F., 2018. Caractérisation hydrogéologique et modélisation du système d'écoulement au-dessus de champs gaziers, sous-bassin de Moncton, Sud du Nouveau-Brunswick. Mémoire. Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Maîtrise en sciences de la terre, 214 p. plus cartes et annexes.
- Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA), 2018, Couverture pédologique des feuillets 31 G, 31 H, 31 I, 31 J.
- Lefebvre, R., Ballard, J.-M., Carrier, M.-A., Vigneault, H., Beaudry, C., Berthot, L., Légaré-Couture, G., Parent, M., Laurencelle, M., Malet, X., Therrien, A., Michaud, A., Desjardins, J., Drouin, A., Cloutier, M.H., Grenier, J., Bourgault, M.-A., Larocque, M., Pellerin, S., Graveline, M.-H., Janos, D. et Molson, J., 2015. Portrait des ressources en eau souterraine en Chaudière-Appalaches, Québec, Canada. Projet réalisé conjointement par l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) et le Regroupement des organismes de bassins versants de la Chaudière-Appalaches (OBV-CA) dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES), Rapport final INRS R1580, soumis au MDDELCC en mars 2015, 246 p. et annexes.
- MAMOT (Ministère des Affaires municipales et Occupation du territoire), 2017. <https://www.mamrot.gouv.qc.ca/organisation-municipale/organisation-territoriale/regions-administratives/laVal/> [accédé en novembre 2017].
- MatWorks, 2017. Matlab R2015b. (Version 8.6) https://fr.mathworks.com/products/matlab.html?s_tid=hp_products_matlab [accédé en avril 2017].
- Miller, B. et R. Schaetzl, 2013. USDA Soil Texture Class Macro. Michigan State University, Department of Geography. <https://www.geographer-miller.com/usda-soil-texture-class-macro/> [accédé en août 2018].
- Ministère des Pêches et de l'Environnement du Canada, Service de l'environnement atmosphérique, 1975. Atlas hydrologique du Canada. http://ftp.geogratis.gc.ca/pub/nrcan_rncan/raster/atlas/fra/hydro_1978/water_quantity_temperature_winds/17_Evaporation_Annuelle_Moyenne_Eaux_Lacustres_1978_150.pdf [accédé en mars 2018].
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), 2018. *Données du Programme de surveillance du*

- climat*, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, Québec.
<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/climat/surveillance/produits.htm>
- Ressources Naturelles Canada (RNCa), 2015. Couverture du sol du Canada, circa 2000 (vectoriel) - Série GéoBase – ARCHIVÉ. <http://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/97126362-5a85-4fe0-9dc2-915464cfdbb7> [accédé en septembre 2017].
- Ressources Naturelles Canada (RNCa), 2016. Modèle numérique d'élévation du Canada, Édition 1.1. <http://cartes.canada.ca/czs/index-fr.html> [accédé en août 2017].
- Ross, M., 2004. Stratigraphie et architecture des formations quaternaires au nord-ouest de Montréal - applications en géologie régionale, Thèse de doctorat, INRS - Eau, Terre et Environnement, Université du Québec. 305 p.
- Rushton, K.R., 2003. Groundwater Hydrology: Conceptual and Computational Models. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, West Sussex, England, 433pp.
- Schroeder, P. R., Aziz, N.M, Lloyd, C.M., Zappi, P.A., 1994. *The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: Engineering Documentation for Version 3*. EPA/600/R-94/168b. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, D.C., 126 pp. <https://www.epa.gov/land-research/hydrologic-evaluation-landfill-performance-help-model>, [accédé en septembre 2017].
- Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, 2018. *TERMIUM Plus®*, la banque de données terminologiques et linguistiques du gouvernement du Canada. http://www.btb.termiumpius.gc.ca/tpv2alpha/alpha-fra.html?lang=fra&i=1&srchtxt=diamicton&index=alt&codom2nd_wet=1#resultrechs, [accédé en septembre 2018].



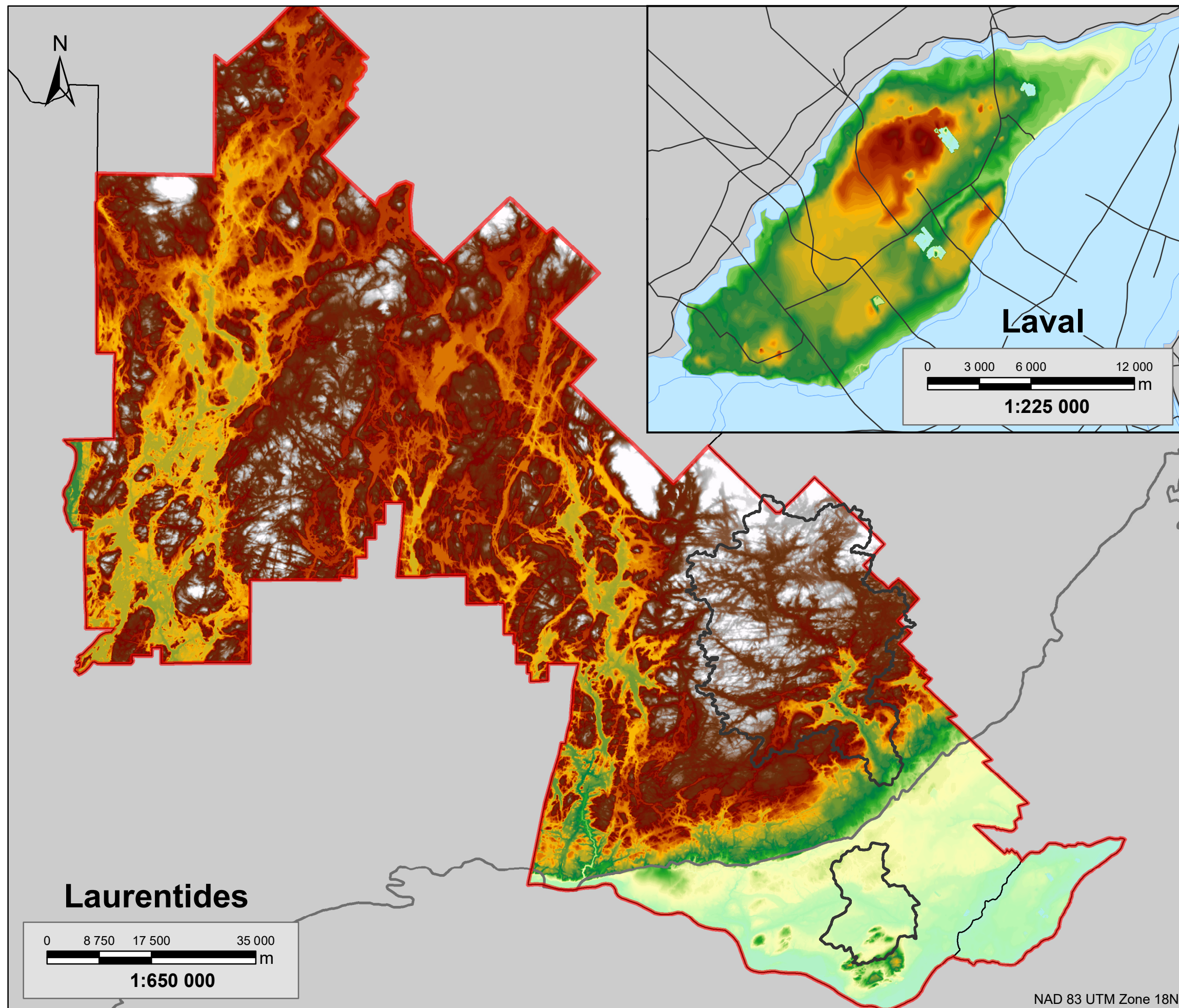
Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 1
Localisation

- Municipalités
 - Rivières
 - Zone cartographiée
 - Bassins de calage
 - Laval et Laurentides
 - Basses Terres du Saint-Laurent
- Élévation du sol par rapport au
niveau moyen des mers (m)**
- Max : 525
— Min : 50



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 2
Topographie
Modèle numérique d'élévation

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent

**Élévation du sol par rapport au
niveau moyen des mers (m)**

Laurentides

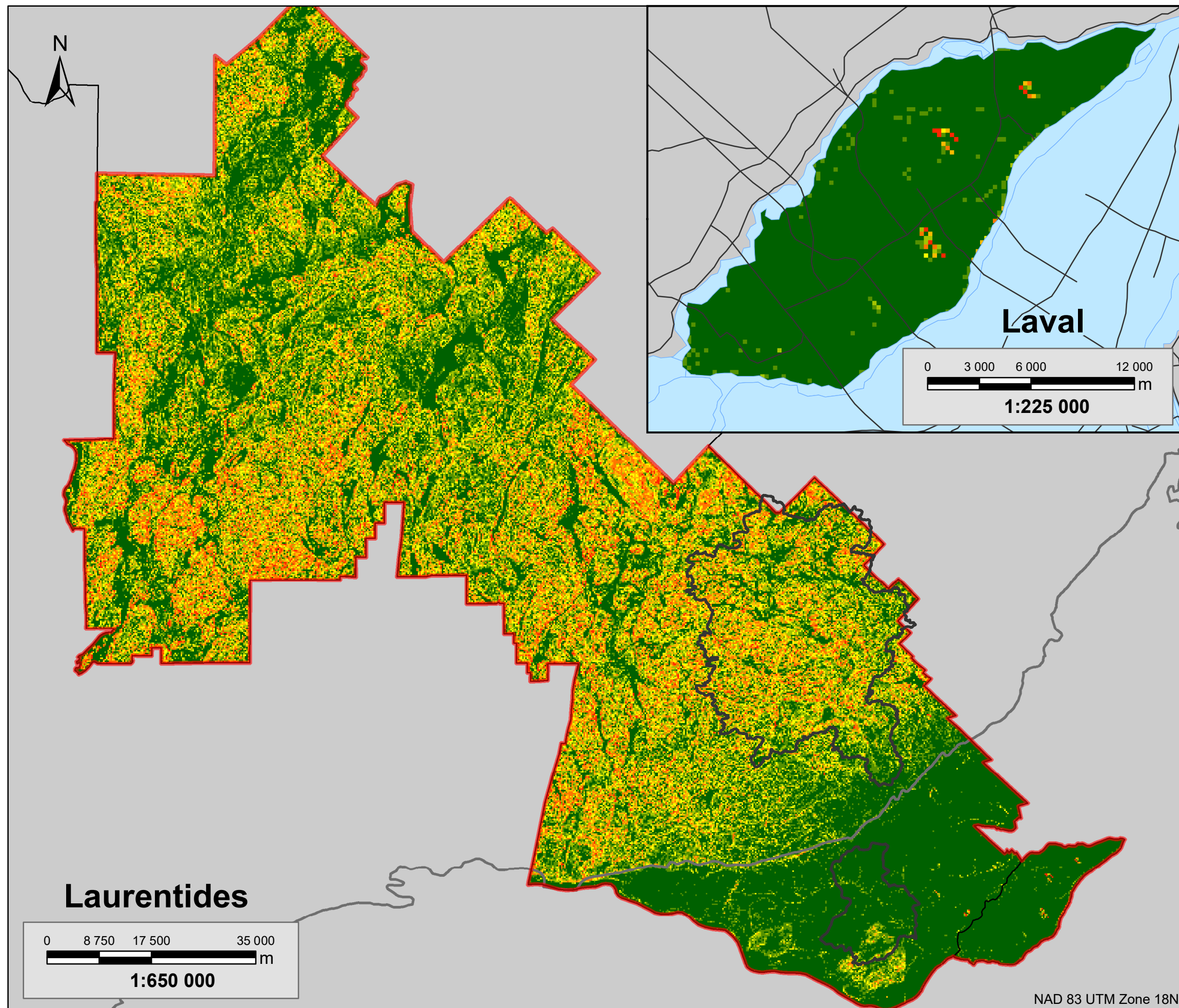
Max : 525

Min : 0

Laval

Max : 100

Min : 0



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

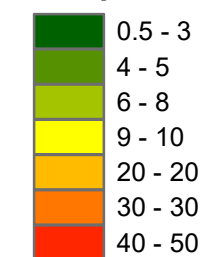
Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

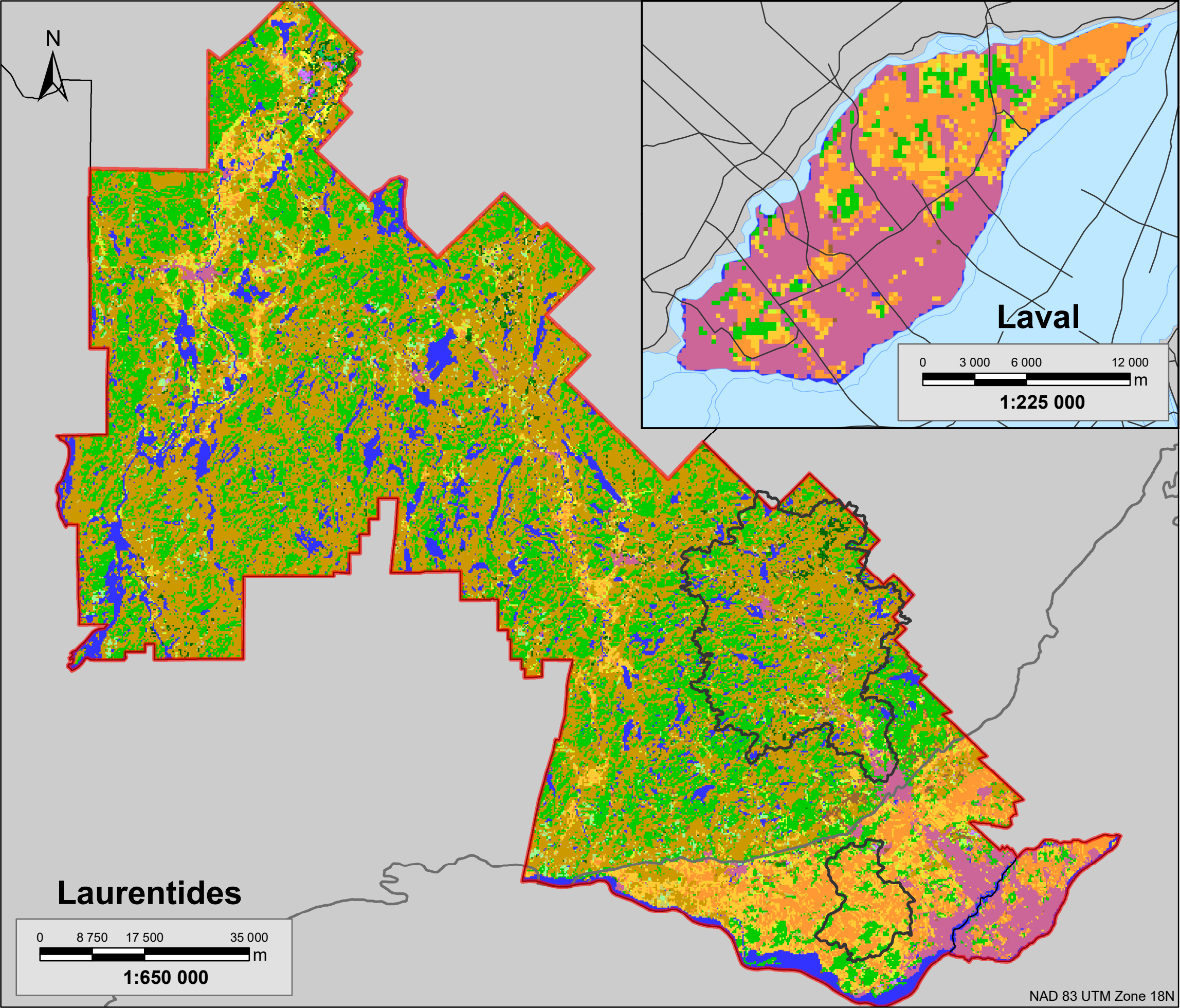
Planche 3
Pente moyenne

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent

**Pente moyenne calculée pour
chaque cellule de 250 m (%)**



*La pente moyenne, en fond de carte, a été calculée à
partir de la matrice SLOPE produite par Ressources
Naturelles Canada (2016) qui a une résolution de
l'ordre de 20 m..*



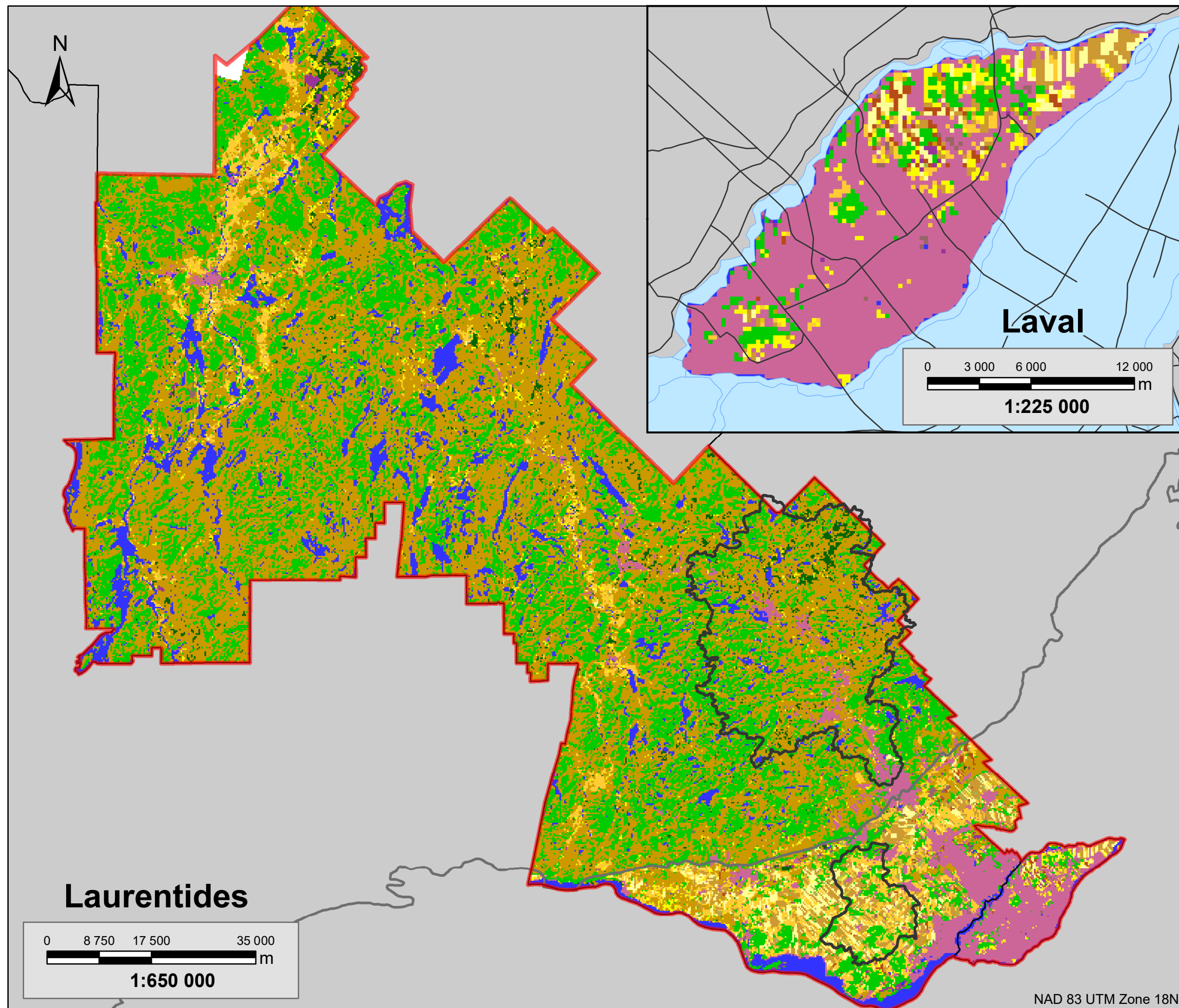
Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 4
Couverture du sol

- Routes principales
□ Bassins de calage
□ Zone cartographiée
□ Basses Terres du Saint-Laurent
- Type de couverture**
- 20 - Eau
 - 33 - Terrain découvert
 - 34 - Zones développées
 - 51 - Grands arbustes
 - 52 - Petits arbustes
 - 81 - Zone humide - boisée
 - 82 - Zone humide - arbusive
 - 83 - Zone humide - herbacée
 - 100 - Plantes herbacées
 - 121 - Cultures annuelles
 - 122 - Cultures pérennes et pâturages
 - 211 - Coniférien - dense
 - 212 - Coniférien - ouvert
 - 213 - Coniférien - clairsemé
 - 221 - Feuillu - dense
 - 222 - Feuillu - ouvert
 - 231 - Mixte - dense
 - 232 - Mixte - ouvert



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

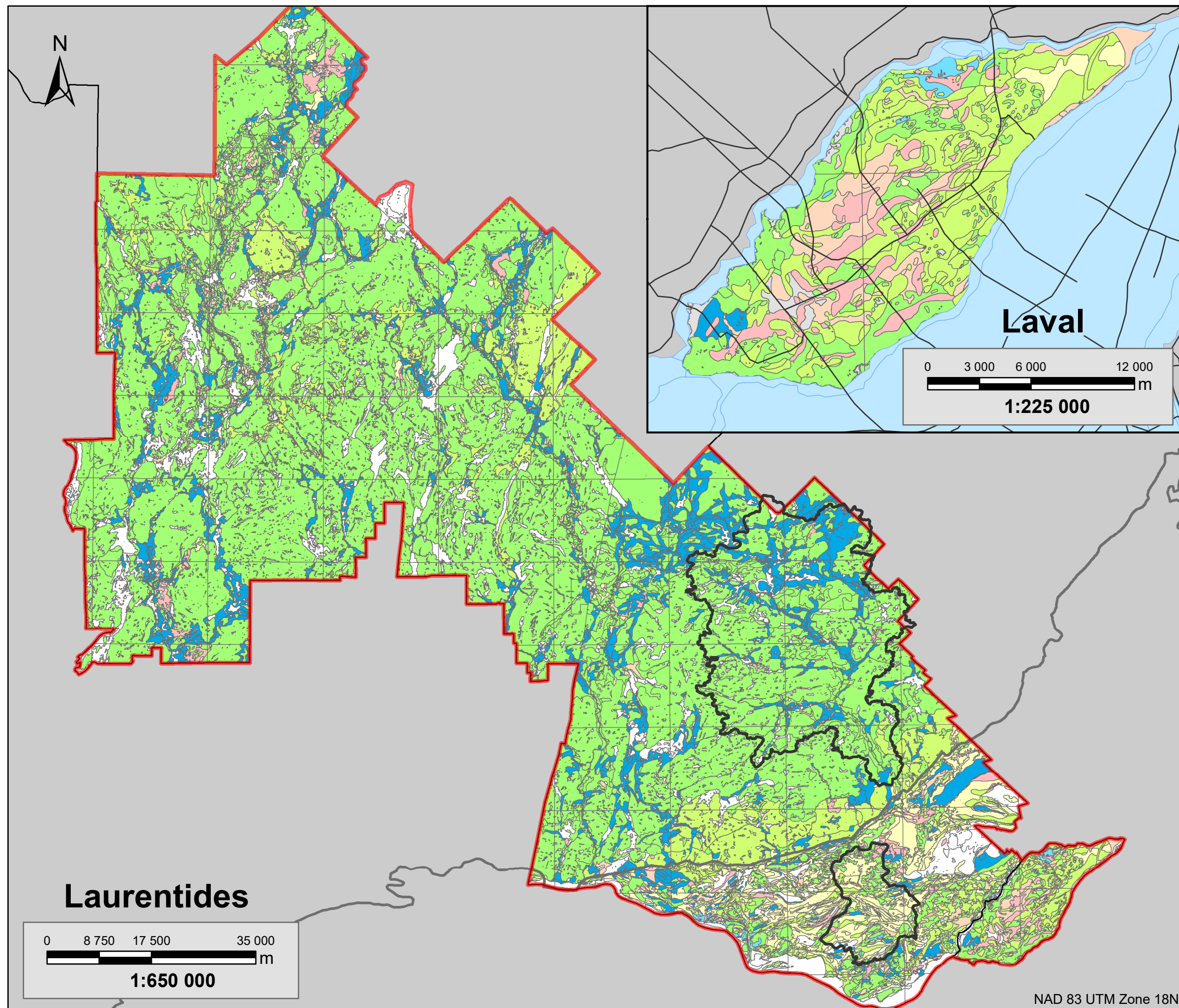
INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 5
Inventaire des cultures, 2015

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent

Inventaire des cultures, 2015

- Eau
- Sols nus et terres stériles
- Milieu urbain et bâti
- Arbustaie
- Terres humides
- Pâturage et Cultures fourragères
- Orge
- Autres céréales
- Avoine
- Blé
- Maïs
- Canola et Colza
- Soya
- Légumes
- Petits fruits
- Forêt de conifères
- Forêt de feuillus
- Forêt mixte



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

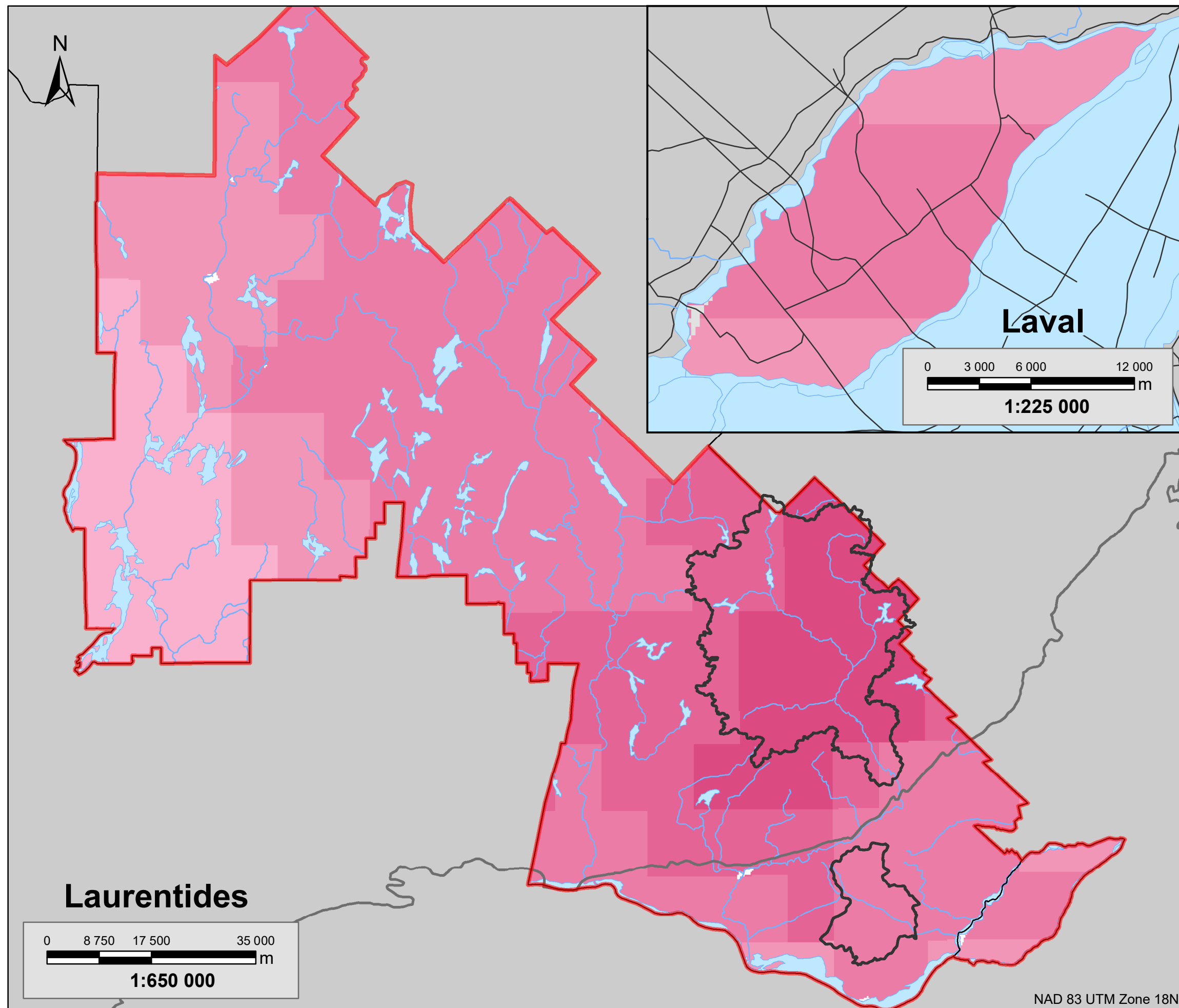
Planche 6
Drainage des sols

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent

Drainage

- Très rapidement drainé
- Rapidement drainé
- Bien drainé
- Modérément bien drainé
- Imparfaitement drainé
- Mal drainé
- Très mal drainé
- Ne s'applique pas

*La carte de drainage des sols présente les polygones
établies par l'IRDA (2018).*

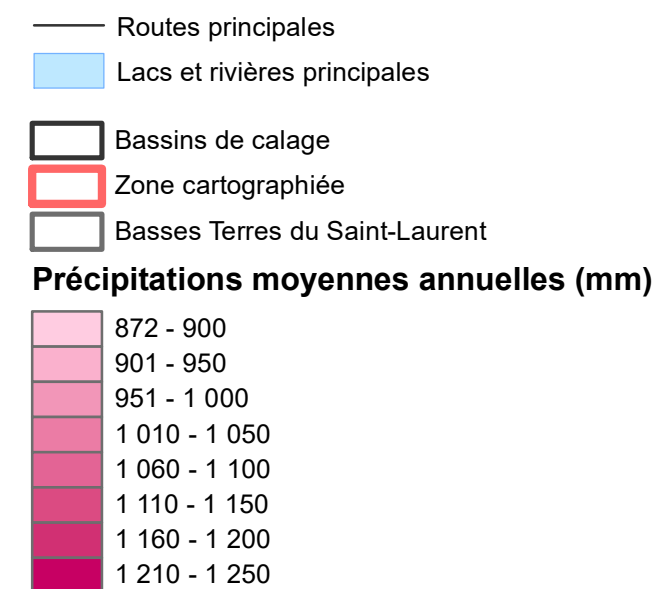


Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

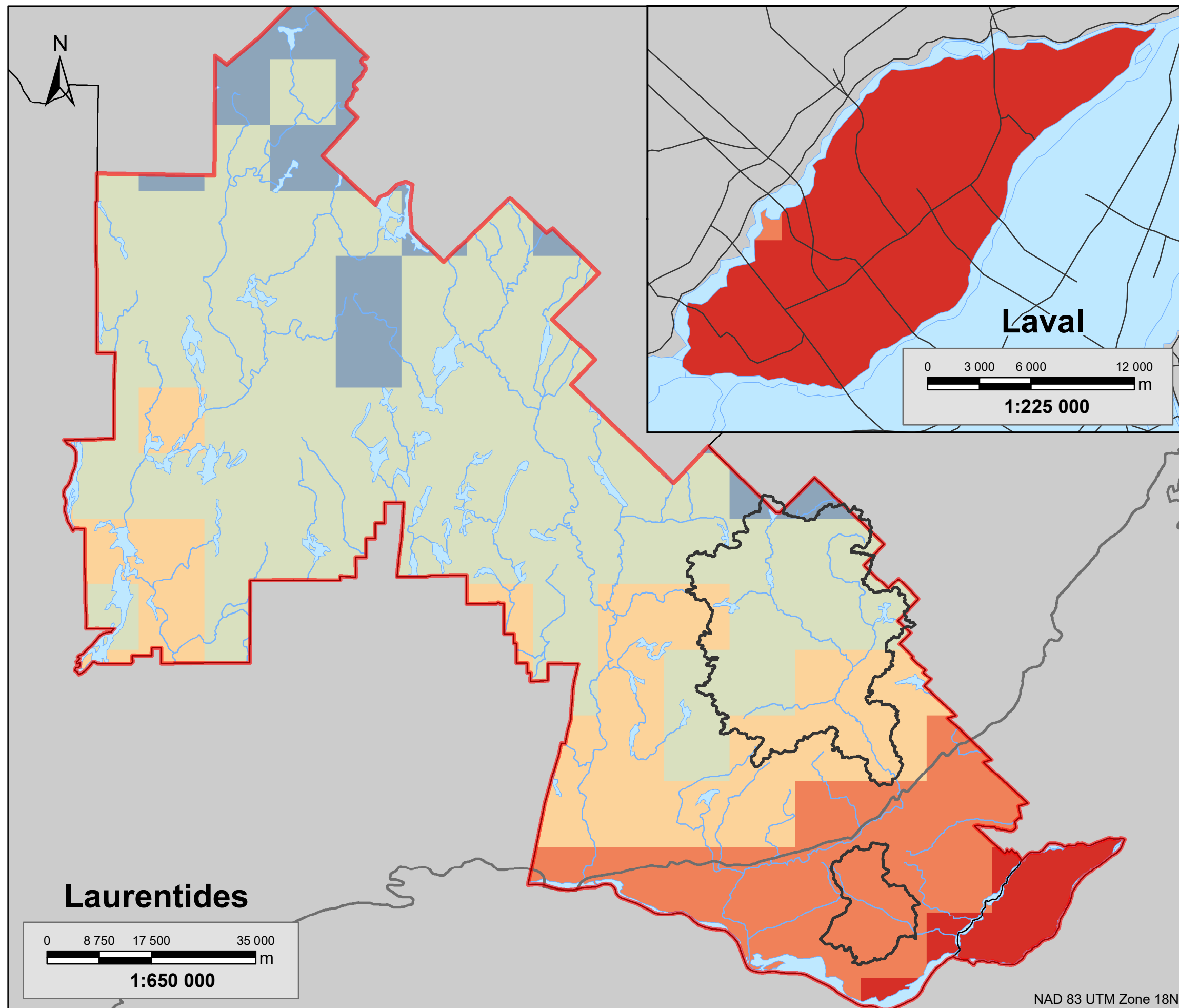
Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 7
Précipitations moyennes annuelles
de 1965 à 2014



*Les précipitations moyennes annuelles sont calculées
à partir de la grille météorologique du service Info-Climat
(MDDELCC, 2018).*

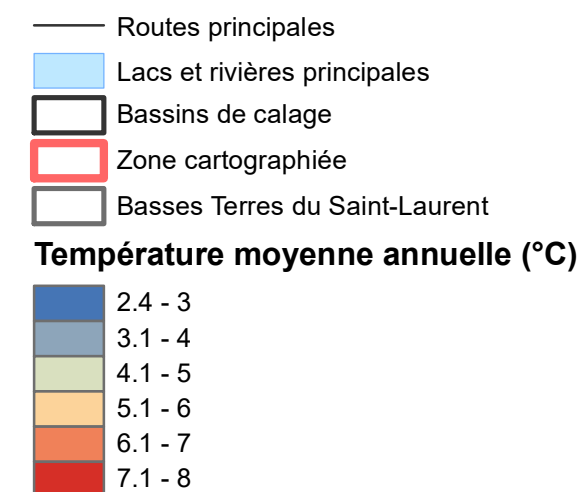


Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

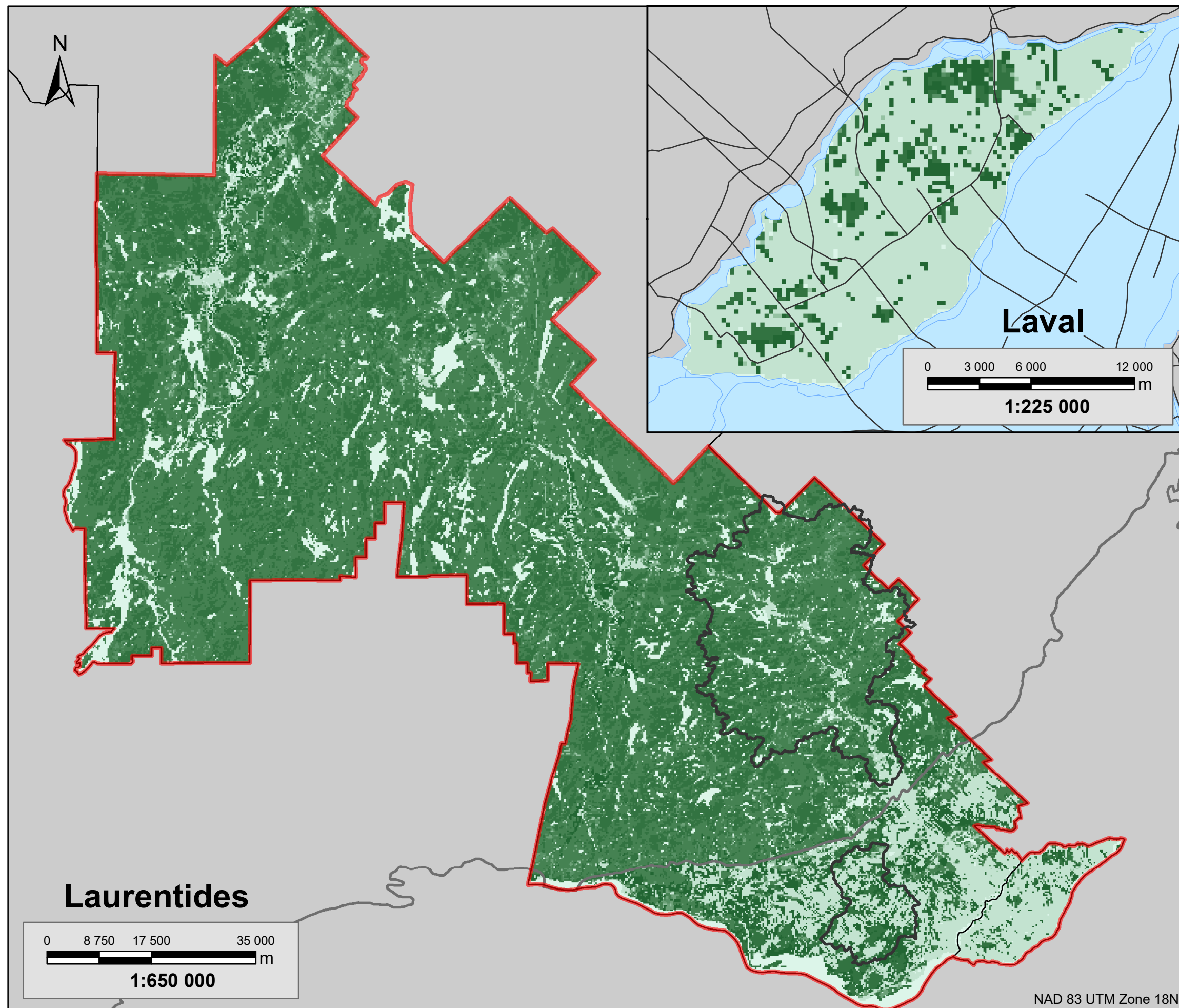
Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 8
Température moyenne annuelle
de 1965 à 2014



*La température moyenne annuelle est calculée
à partir de la grille météorologique du service Info-Climat
(MDDELCC, 2018).*



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

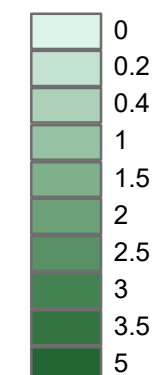
Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

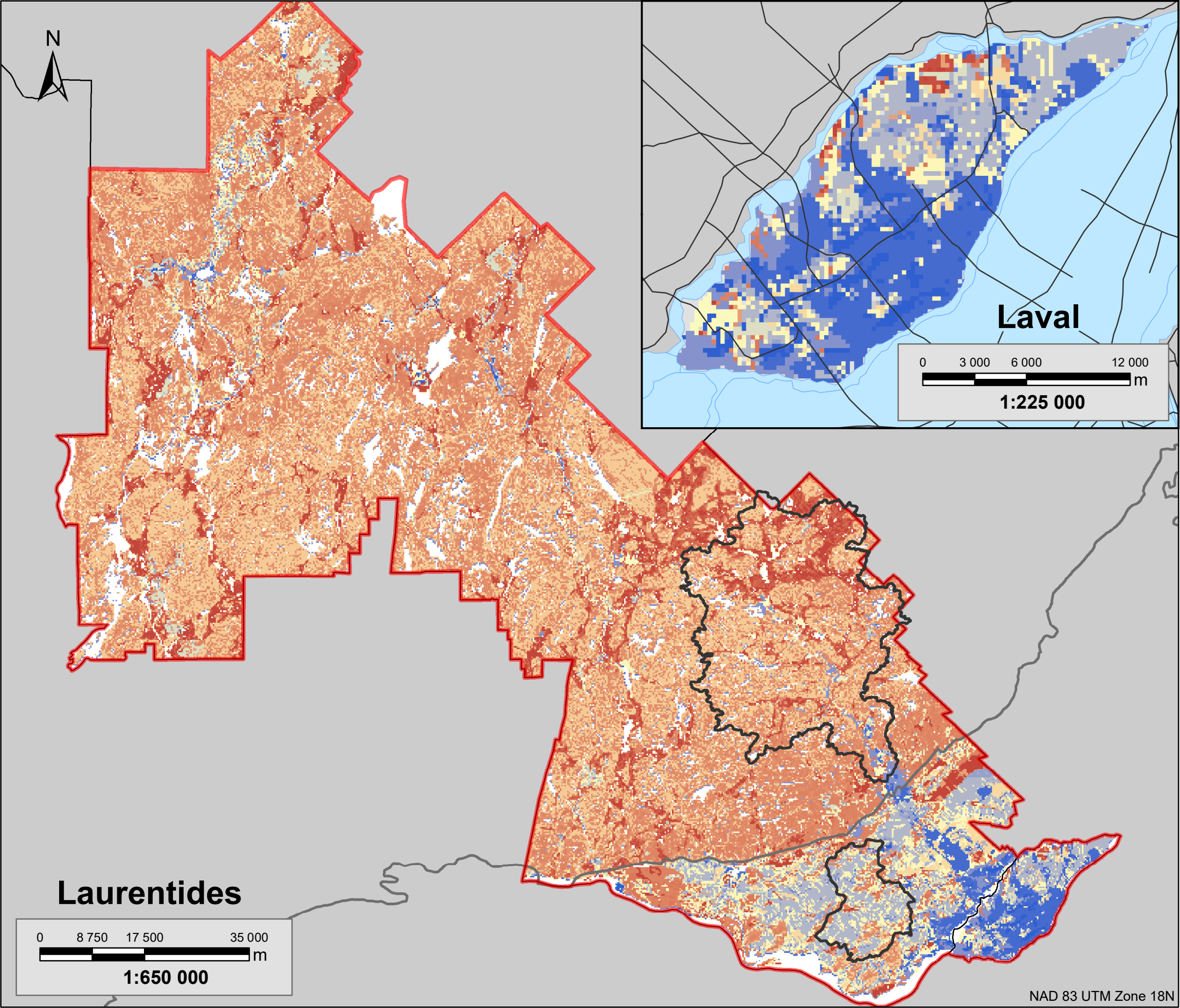
Planche 9
Indice de surface foliaire

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent

Indice de surface foliaire



L'indice de surface foliaire (Leaf Area Index, LAI) a été obtenu à partir du type de couverture du sol (planche 4) (section 3.4.1).



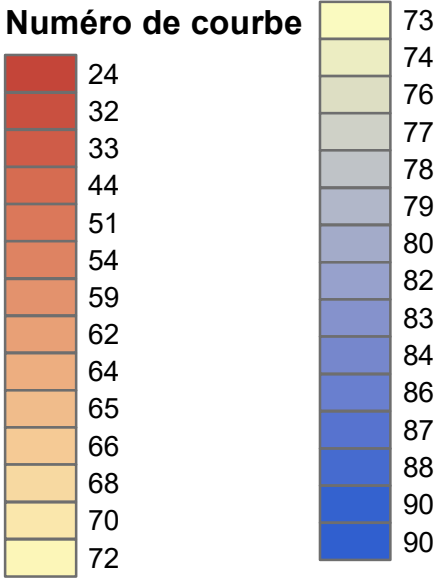
Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

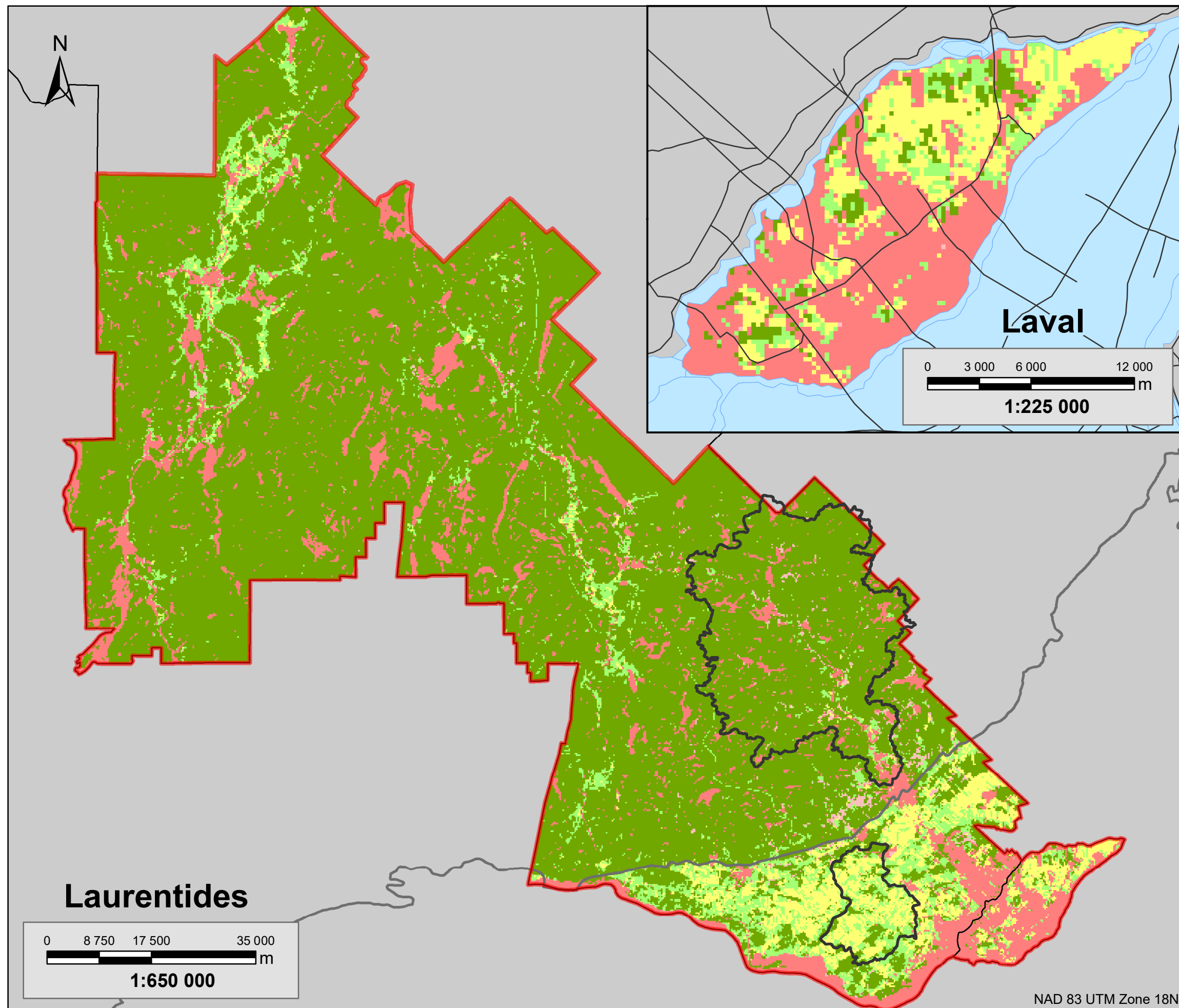
INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 10
Numéro de courbe

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent



Le numéro de courbe a été défini pour chaque cellule en tenant compte de l'utilisation du sol simplifiée (planche 11), de la pente de la surface du sol (planche 12) ainsi que du groupe hydrologique (planche 13).



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

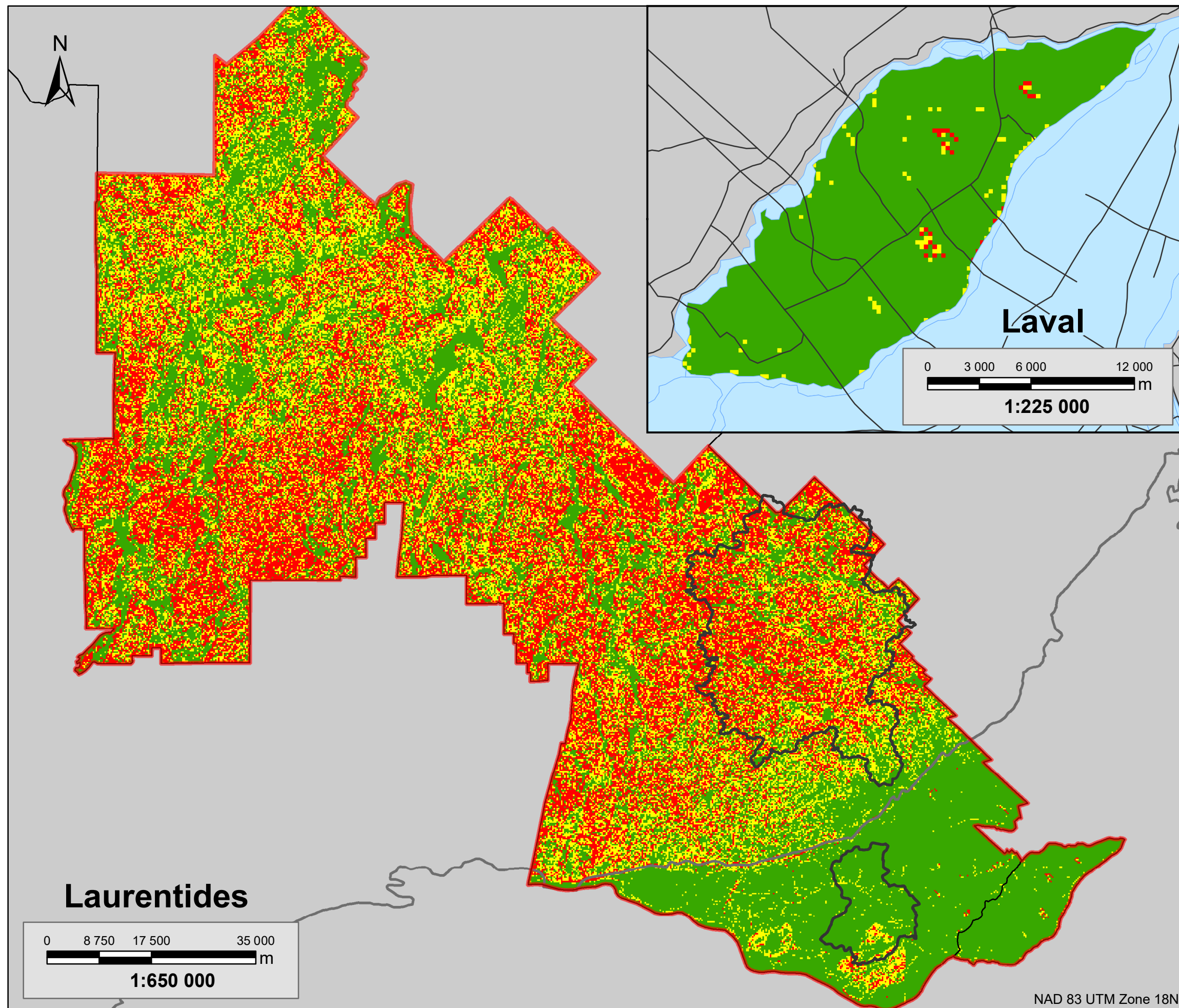
Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 11
Utilisation du sol simplifiée
pour déterminer le numéro de courbe

- Routes principales
 - Bassins de calage
 - Zone cartographiée
 - Basses Terres du Saint-Laurent
- Utilisation du sol simplifiée**
- Culture intensive
 - Culture extensive
 - Boisé
 - Résidentiel et commercial, dense
 - Résidentiel et commercial, peu dense

*L'utilisation du sol simplifiée est obtenue en reclassant
les types de couverture de sol de la planche 4
(section 3.4.2.1).*



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

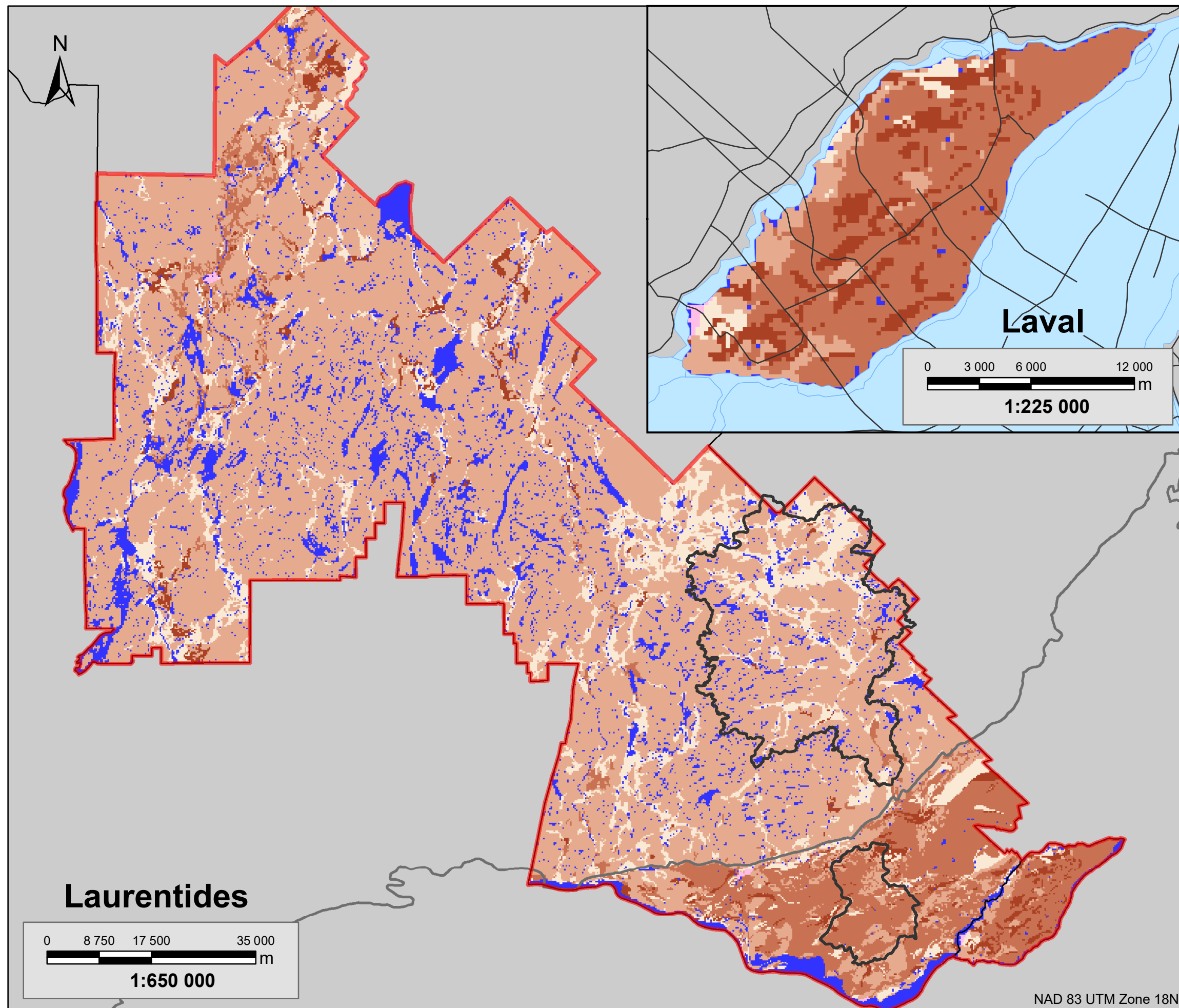
Planche 12
Pente moyenne
pour déterminer le numéro de courbe

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent

**Pente moyenne pour le calcul du
numéro de courbe (%)**

- <3%
- 3-8%
- >8%

*La pente moyenne de la planche 3 a été reclassée pour
obtenir la pente moyenne pour le calcul du numéro de
courbe.*



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

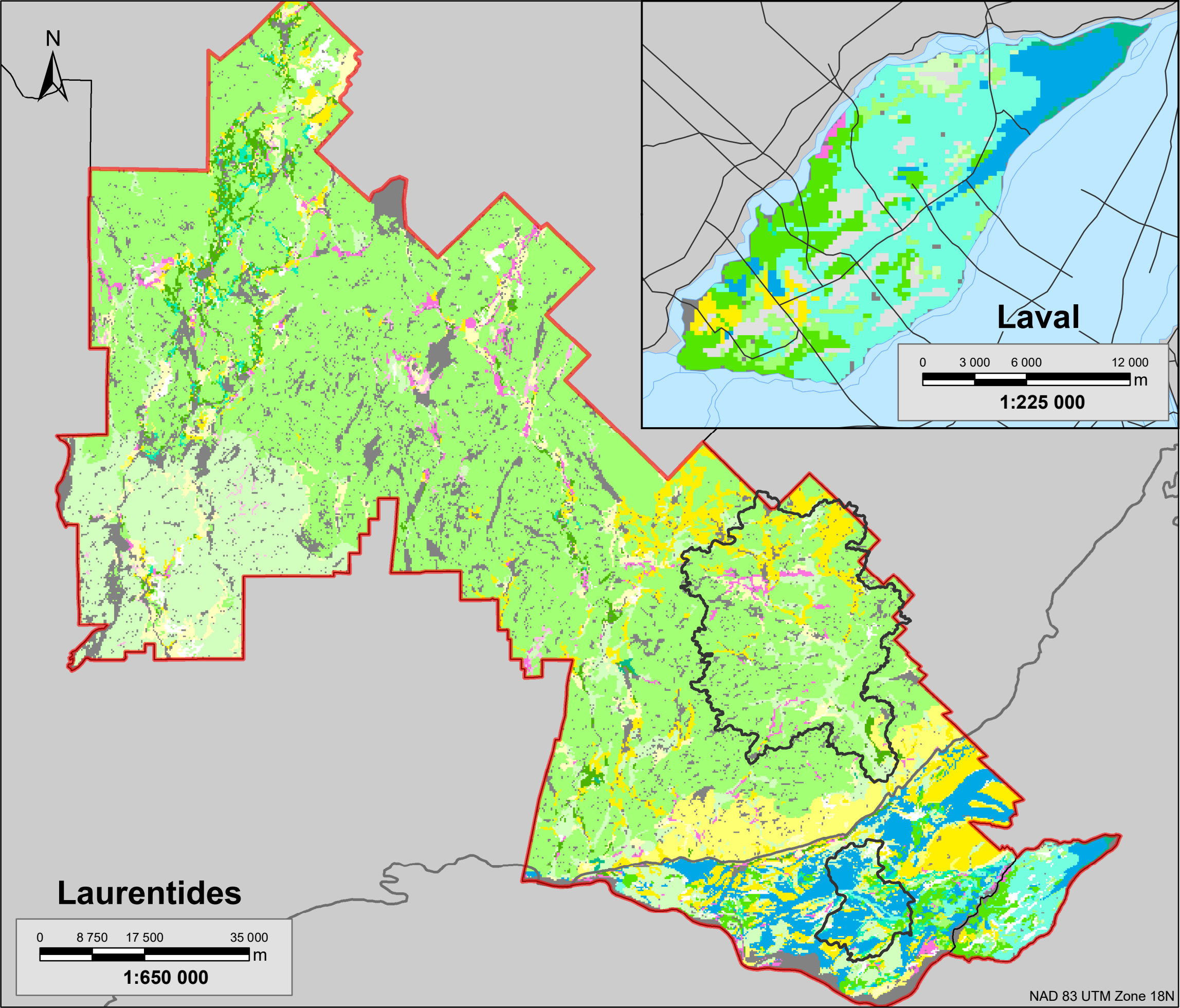
Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 13
Groupes hydrologiques
pour déterminer le numéro de courbe

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent
- Groupes hydrologiques**
- Eau
- Zone urbaine
- A
- B
- C
- D

*Le groupe hydrologique a été soit défini par l'IRDA ou
déterminé selon la texture du sol (section 3.4.2.3).*



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

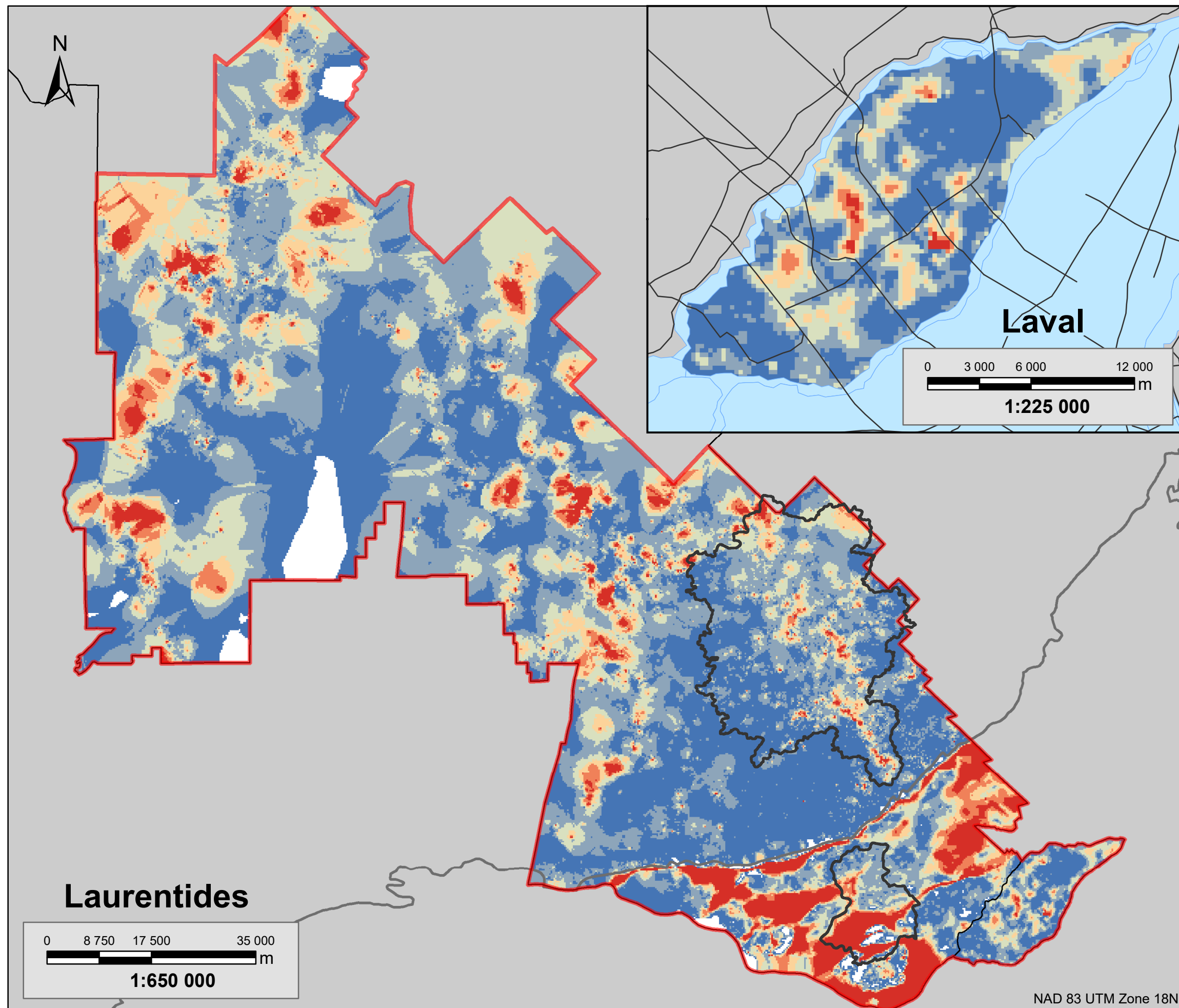
Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 14
Texture des sols

- Routes principales
□ Bassins de calage
□ Zone cartographiée
□ Basses Terres du Saint-Laurent
- Pédologie - Textures USDA**
- Non cartographié (Eau, Urbain)
 - Sable grossier
 - Sable
 - Sable fin
 - Sable loameux
 - Sable fin loameux
 - Loam sableux
 - Loam sableux fin
 - Loam
 - Loam limoneux
 - Loam sablo-argileux
 - Loam argileux
 - Loam limono-argileux
 - Argile limoneuse
 - Argile

*La carte des textures des sols a été obtenue à partir de
de l'IRDA et de la classification des sols de l'USDA
(section 3.4.3.1).*

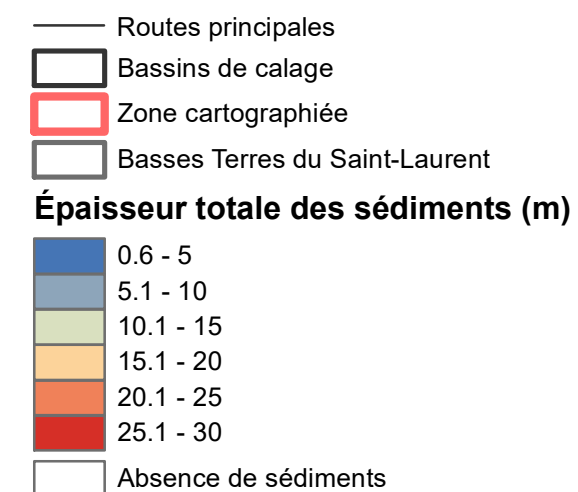


Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

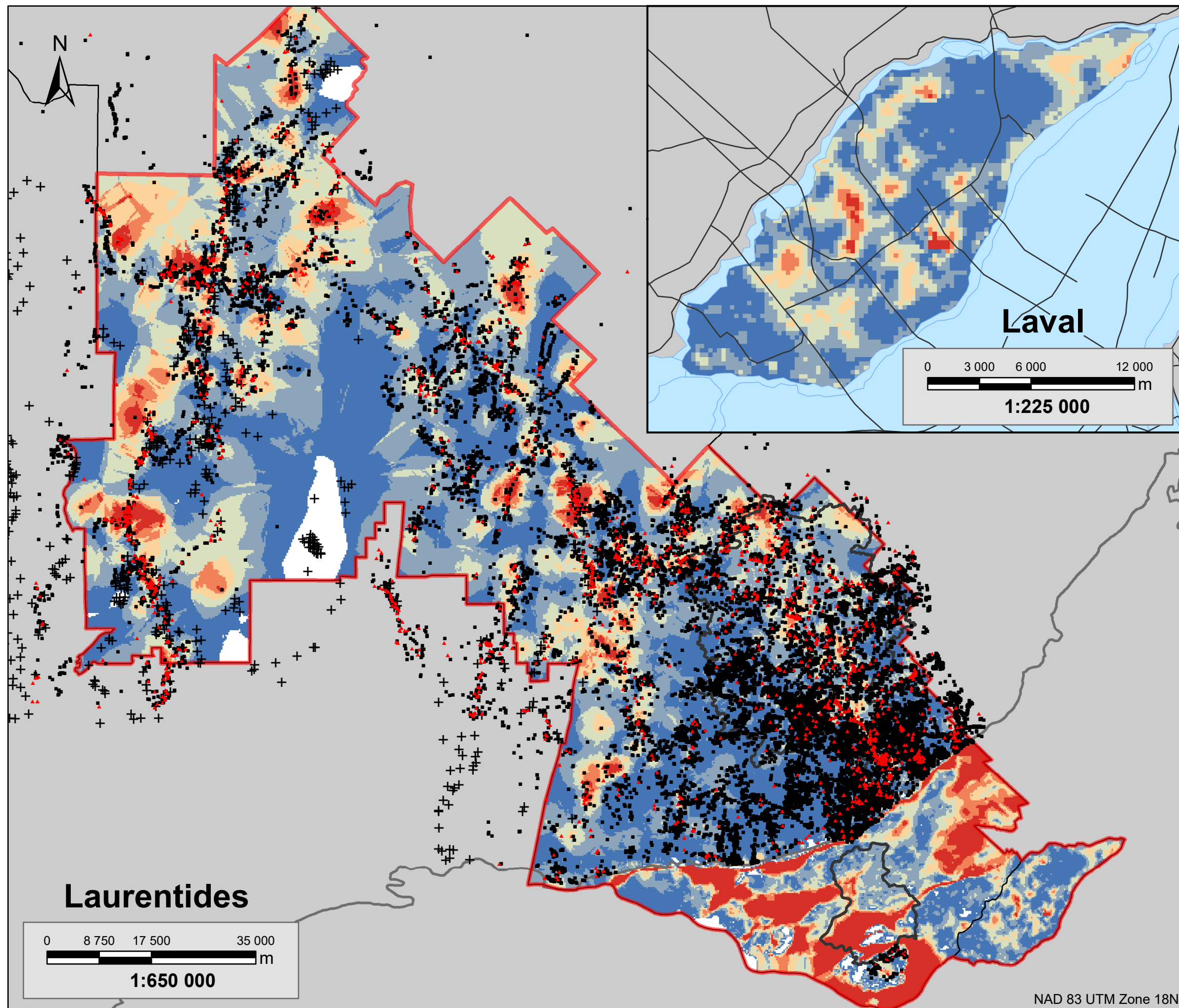
Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 15
Épaisseur totale des sédiments
Obtenue par krigeage ordinaire



L'épaisseur totale des sédiments a été obtenue par krigeage ordinaire pour les Laurentides et par extraction du modèle géologique 3D de Ross (2004) pour les Basses Terres.
Les épaisseurs sont représentées où il y a présence de sédiments.



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

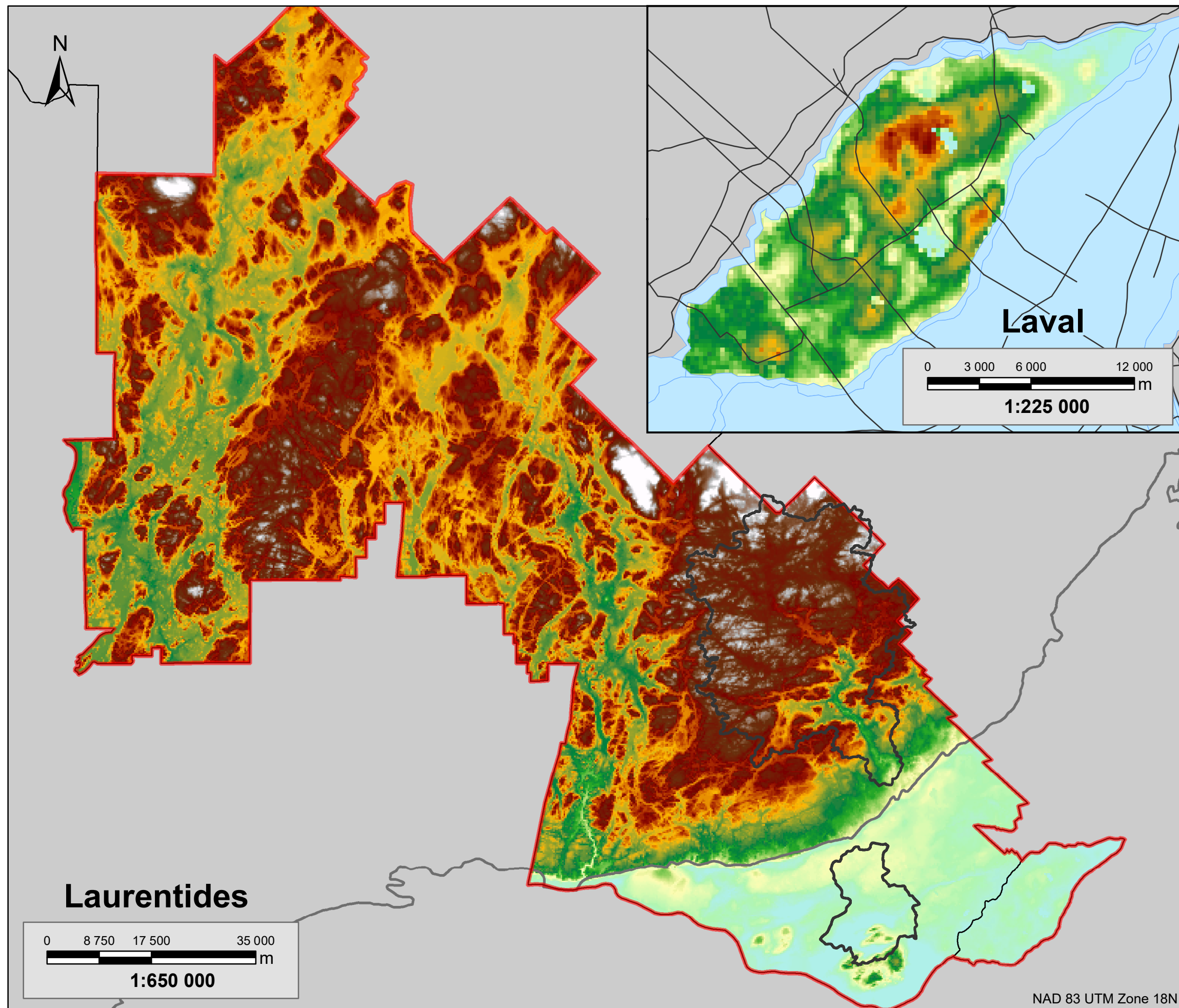
Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 15a
Épaisseur totale des sédiments
Obtenue par krigeage ordinaire

- Routes principales
 - Bassins de calage
 - Zone cartographiée
 - Basses Terres du Saint-Laurent
- Données utilisées pour le krigeage**
- ▲ Forage n'ayant pas atteint le roc (1926/28198)
 - Forage ayant atteint le roc (25677/28198)
 - + Affleurements rocheux IRDA (594/28198)
- Épaisseur totale des sédiments (m)**
- 0.6 - 5
 - 5.1 - 10
 - 10.1 - 15
 - 15.1 - 20
 - 20.1 - 25
 - 25.1 - 30
 - Absence de sédiments

L'épaisseur totale des sédiments a été obtenue par krigeage ordinaire pour les Laurentides et par extraction du modèle géologique 3D de Ross (2004) pour les Basses Terres.
Les épaisseurs sont représentées où il y a présence de sédiments.



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 16
Élévation du roc

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent

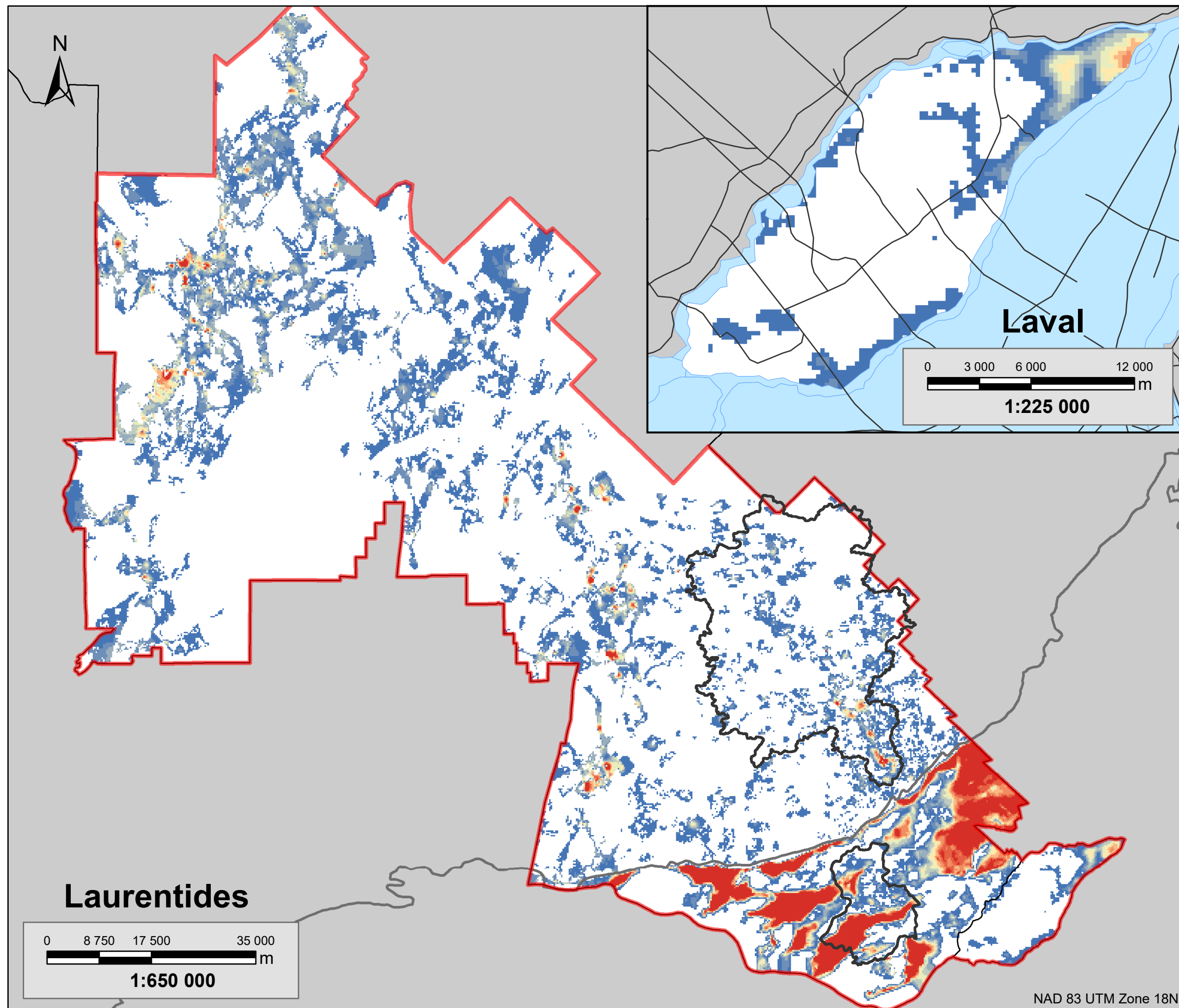
Laurentides

Max : 600
Min : 0

Laval

Max : 100
Min : 0

La carte a été obtenue de la soustraction de l'épaisseur de sédiments (Planche 15b) à l'élévation de la surface du sol (Planche 2). La surface a été corrigée pour s'assurer que le toit du roc n'est pas supérieur à l'élévation du sol.



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

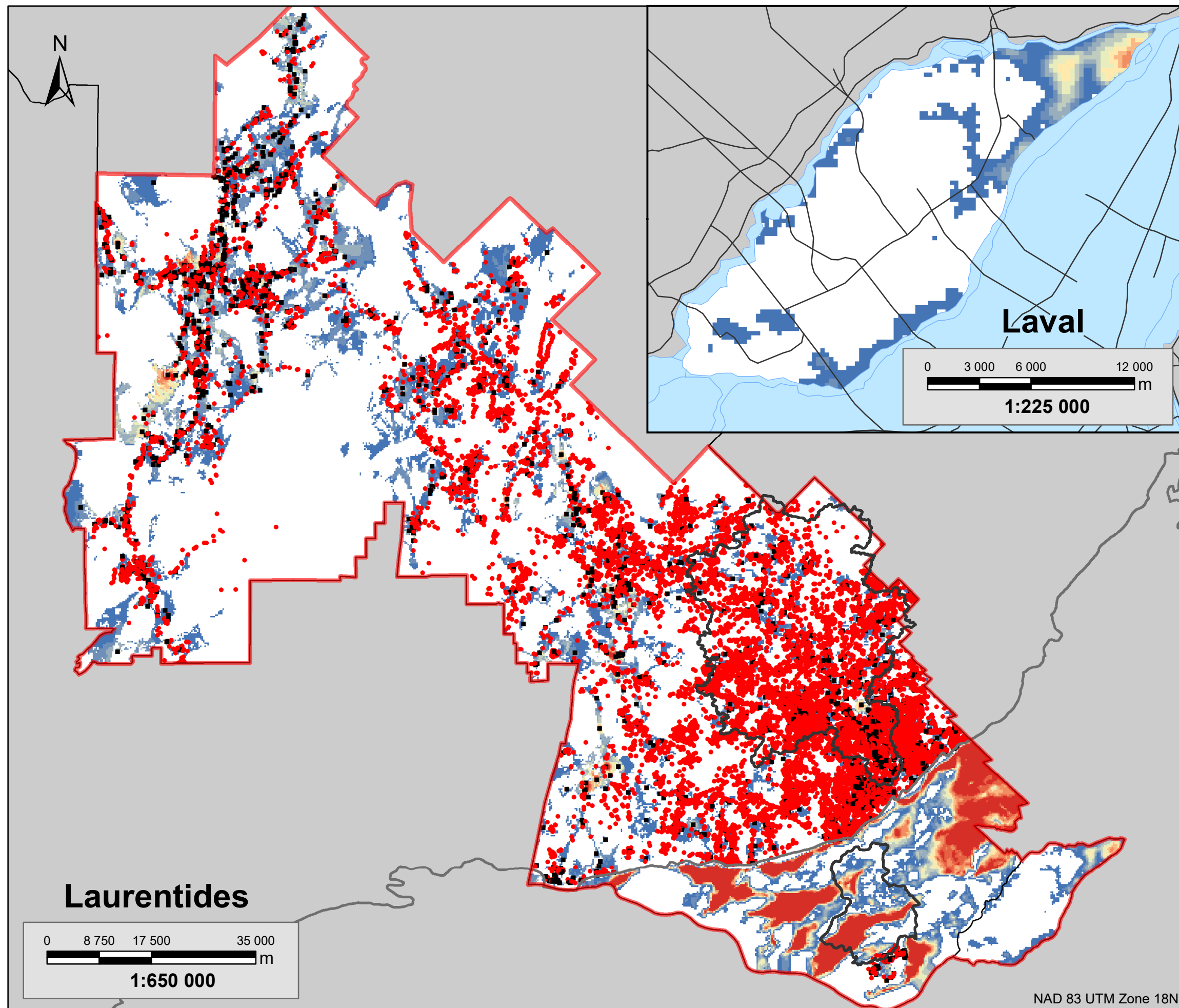
Planche 17
Épaisseur d'argile
Obtenue par krigeage ordinaire

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent

Épaisseur d'argile (m)

- 0.3 - 2
- 2.1 - 4
- 4.1 - 6
- 6.1 - 8
- 8.1 - 10
- 10.1 - 12
- 12.1 - 14
- 14.1 - 16
- 16.1 - 18
- 18.1 - 20
- Absence de l'unité d'argile

*L'épaisseur d'argile est obtenue par krigeage ordinaire
à partir des épaisseurs d'argile extraites du SIH.
Les épaisseurs sont représentées où l'unité d'argile est
présente.*



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 17a
Épaisseur d'argile
Obtenue par krigeage ordinaire

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent

Données utilisées - Secteur Laurentides

- Absence d'argile (23778/26660)
- Présence d'argile (2882/26660)

Données utilisées - Secteur Oka

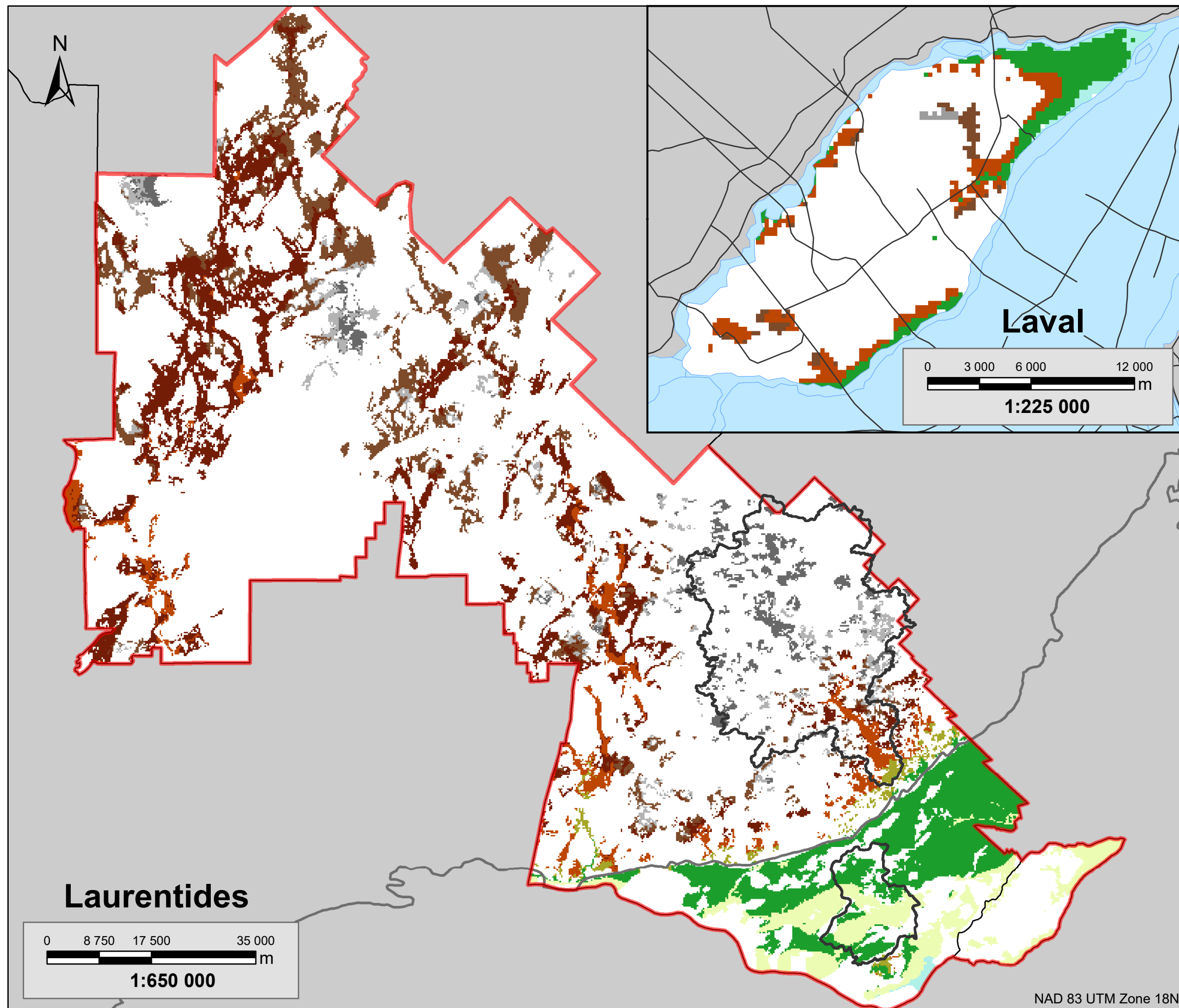
- Absence d'argile (107/162)
- Présence d'argile (55/162)

Épaisseur d'argile (m)

- 0.3 - 2
- 2.1 - 4
- 4.1 - 6
- 6.1 - 8
- 8.1 - 10
- 10.1 - 12
- 12.1 - 14
- 14.1 - 16
- 16.1 - 18
- 18.1 - 20

- Absence de l'unité d'argile

*L'épaisseur d'argile est obtenue par krigeage ordinaire
à partir des épaisseurs d'argile extraites du SIH.
Les épaisseurs sont représentées où l'unité d'argile est
présente.*



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 18
Élévation du toit de l'argile
Obtenue par krigeage ordinaire

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent

Élévation du toit de l'argile (m)

Laurentides

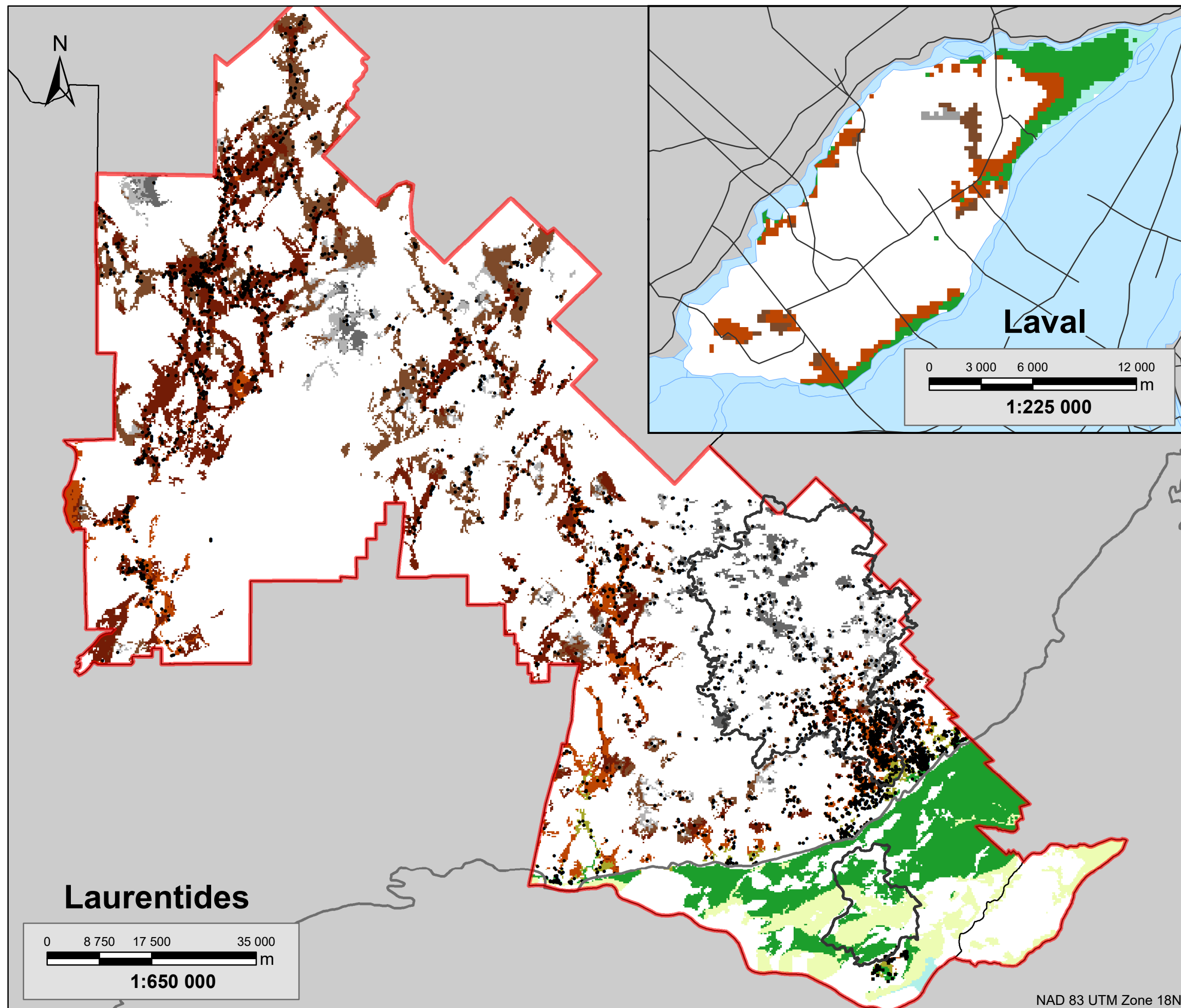
- 39 - 0
- 0.1 - 50
- 50.1 - 100
- 100.1 - 150
- 150.1 - 200
- 200.1 - 250
- 250.1 - 300
- 300.1 - 350
- 350.1 - 400

Laval

- 39 - 10
- 10.1 - 20
- 20.1 - 30
- 30.1 - 40
- 40.1 - 50

□ Absence de l'unité d'argile

*L'élévation du toit de l'argile est obtenue par krigeage ordinaire à partir des élévations d'argile dérivées des données du SIH.
Les élévations sont représentées où l'unité d'argile est présente.*



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 18a
Élévation du toit de l'argile
Obtenue par krigeage ordinaire

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent

Données utilisées pour le krigeage

Laval 2004 (8019/141912)

Mirabel 2004 (30254/141912)

- SIH-Basses Terres (65/141912)
- SIH-Laurentides (3576/141912)

Élévation du toit de l'argile (m)

Laurentides

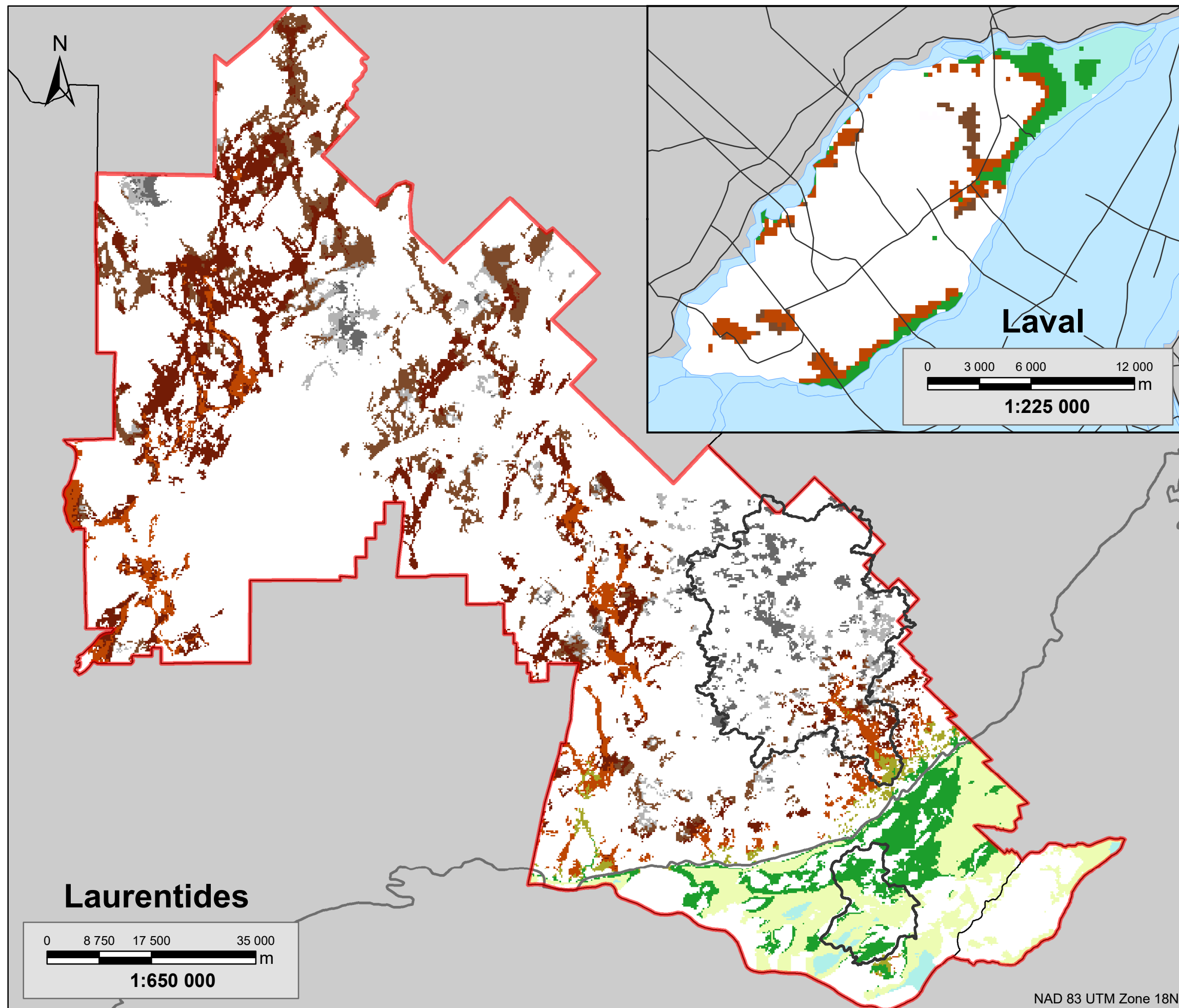
- 39 - 0
- 0.1 - 50
- 50.1 - 100
- 100.1 - 150
- 150.1 - 200
- 200.1 - 250
- 250.1 - 300
- 300.1 - 350
- 350.1 - 400

Laval

- 39 - 10
- 10.1 - 20
- 20.1 - 30
- 30.1 - 40
- 40.1 - 50

Absence de l'unité d'argile

*L'élévation du toit de l'argile est obtenue par krigeage ordinaire à partir des élévations d'argile dérivées des données du SIH.
Les élévations sont représentées où l'unité d'argile est présente.*



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 19
Élévation de la base de l'argile
Obtenue par calcul

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent

Élévation de la base de l'argile (m)

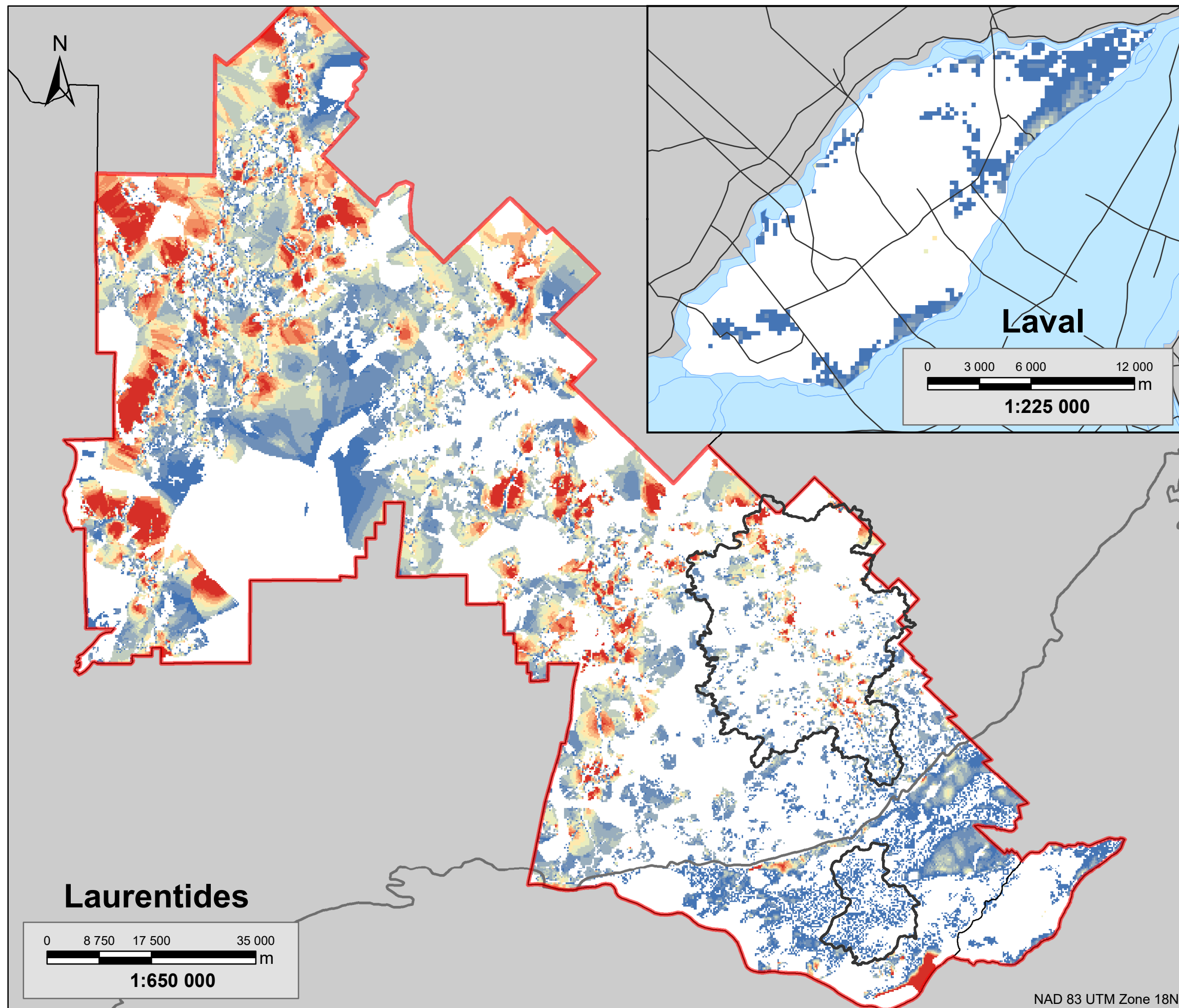
Laurentides

- 39 - 0
- 0.1 - 50
- 50.1 - 100
- 100.1 - 150
- 150.1 - 200
- 200.1 - 250
- 250.1 - 300
- 300.1 - 350
- 350.1 - 400

Laval

- 39 - 10
- 10.1 - 20
- 20.1 - 30
- 30.1 - 40
- 40.1 - 50
- Absence de l'unité d'argile

L'élévation de la base de l'argile a été obtenue de la soustraction de l'épaisseur d'argile (Planche 17) de l'élévation du toit de l'argile (Planche 18). Les élévations sont représentées où l'unité d'argile est présente.



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

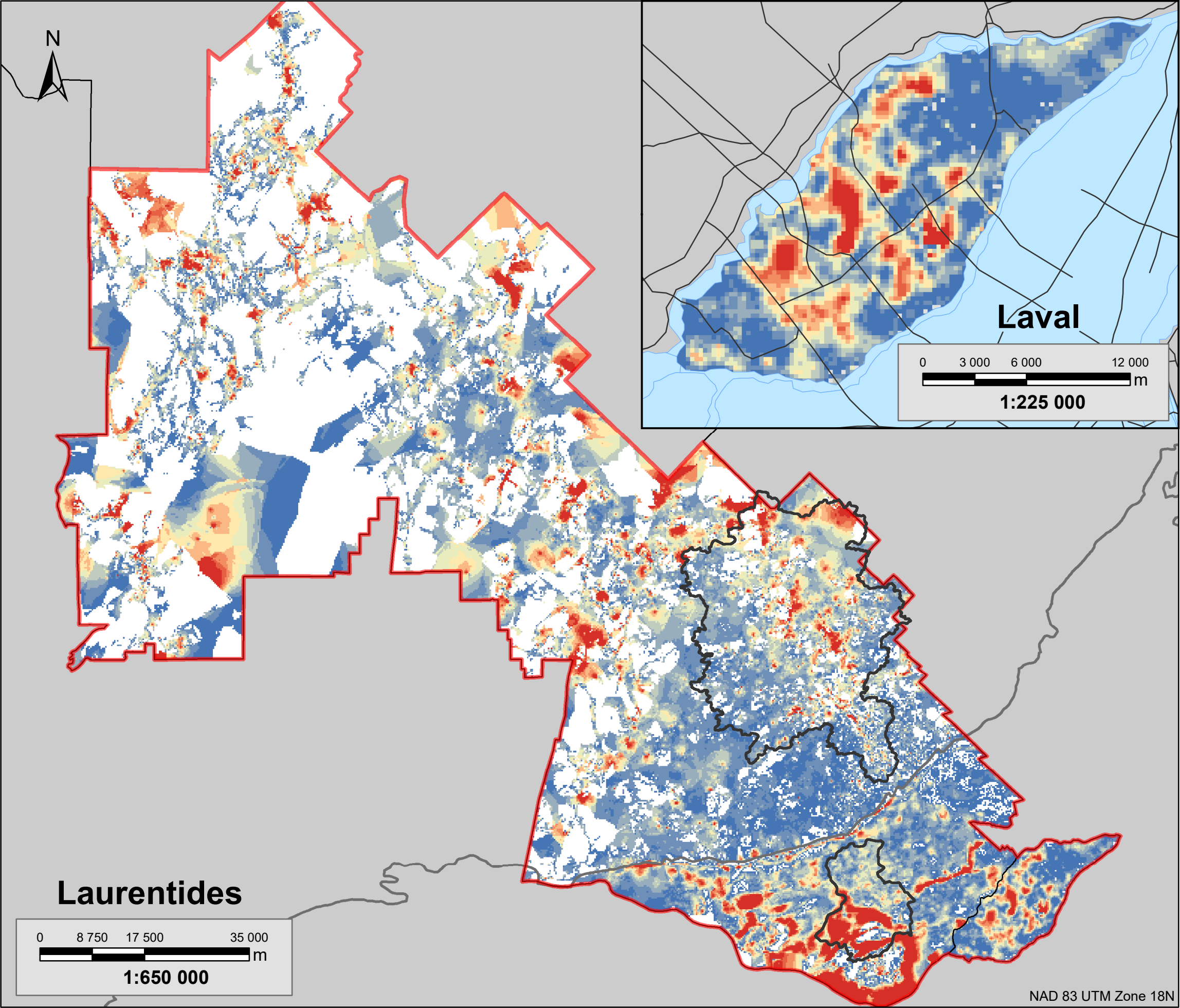
Planche 20
Épaisseur de sable superficiel
Obtenue par calcul

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent

Épaisseur de sable superficiel (m)

- 0.3 - 2
- 2.1 - 4
- 4.1 - 6
- 6.1 - 8
- 8.1 - 10
- 10.1 - 12
- 12.1 - 14
- 14.1 - 16
- 16.1 - 18
- 18.1 - 20
- Absence de sable superficiel

L'épaisseur de sable superficiel a été obtenue de la soustraction de l'élévation du toit de l'argile (Planche 18) de l'élévation de la surface du sol (Planche 2). Lorsque l'argile est en surface, l'épaisseur de sable superficiel est nulle. Les épaisseurs sont représentées où l'unité de sable est présente.

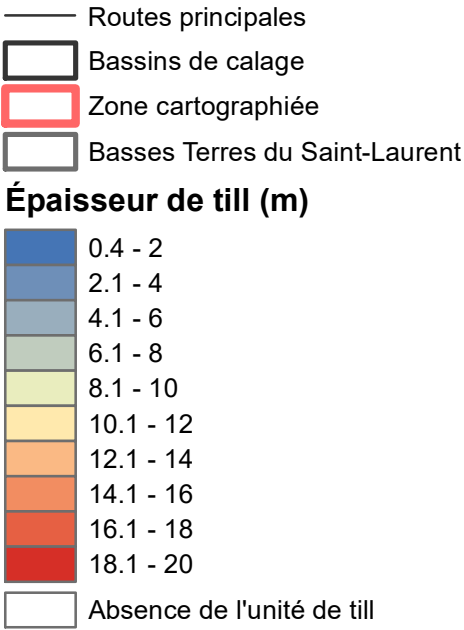


Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

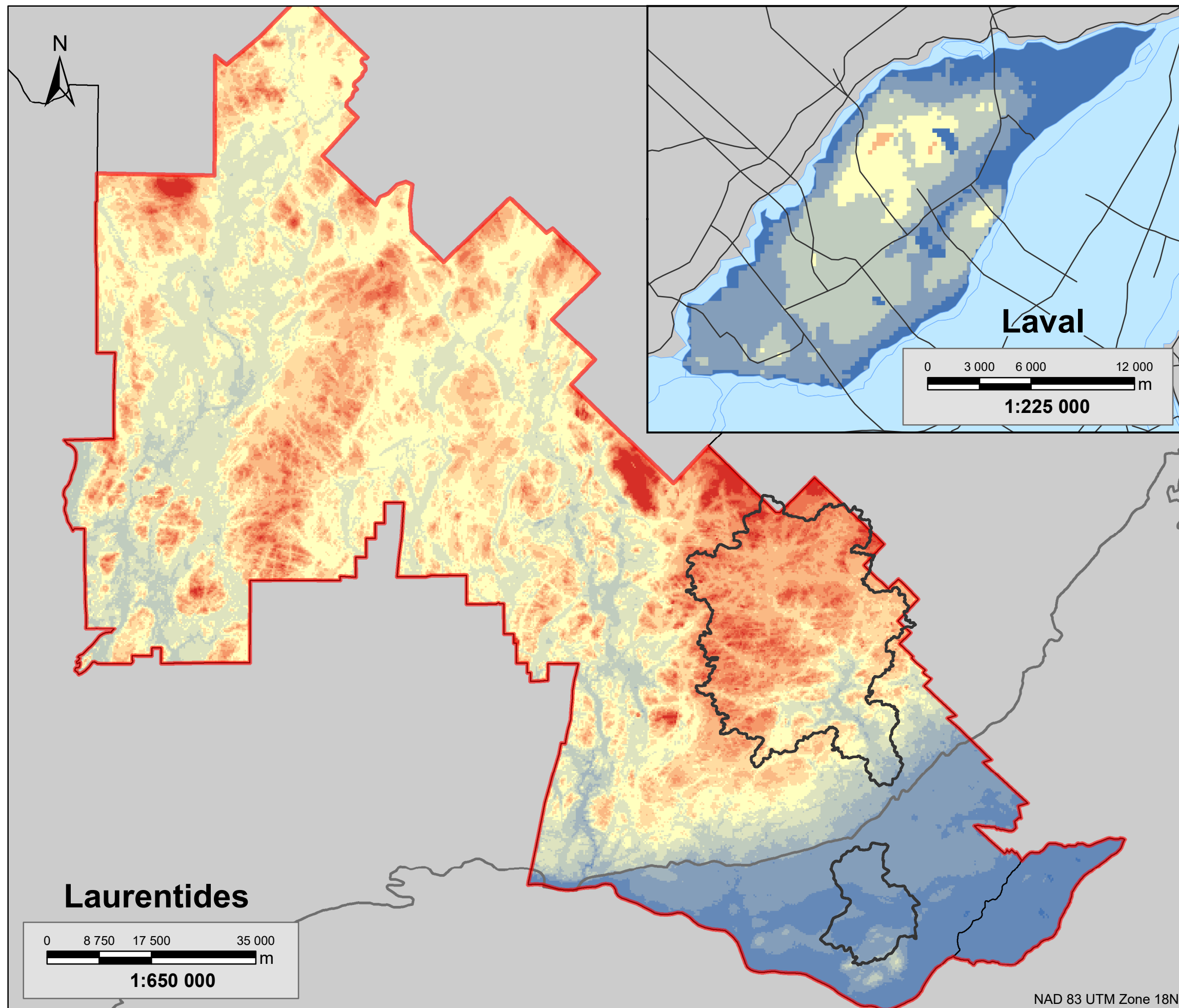
Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 21
Épaisseur de till
Obtenue par calcul



L'épaisseur de till a été obtenue de la soustraction de l'élévation du roc (Planche 16) de l'élévation de la base de l'argile (Planche 19). Les épaisseurs sont représentées où l'unité d'argile est présente.



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

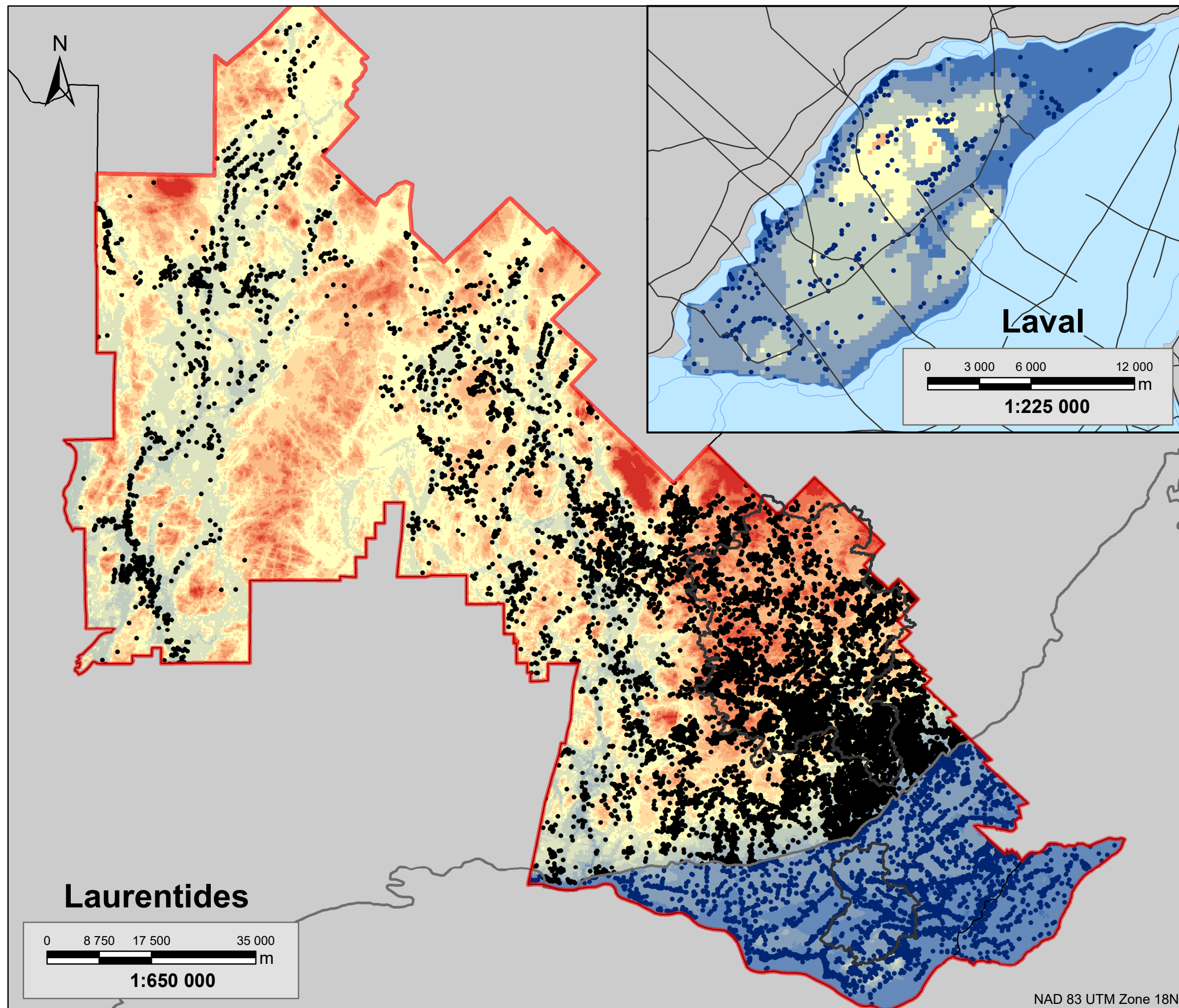
Planche 22
Piézométrie de l'aquifère régional
Krigeage avec dérive externe (MNE)

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent

Élévation piézométrique (m)

Laurentides	Laval
-878 - 0	-878 - 20
1 - 50	21 - 30
51 - 100	31 - 40
101 - 150	41 - 50
151 - 200	51 - 60
201 - 250	61 - 70
251 - 300	71 - 80
301 - 350	
351 - 400	
401 - 450	
451 - 500	
501 - 550	
551 - 700	

La piézométrie régionale a été obtenue par krigeage avec dérive externe sur la topographie (MNE) afin de mieux représenter les zones avec l'absence de données de forage. L'interpolation a été réalisée séparément pour la région des Laurentides et des Basses Terres du Saint-Laurent.



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 22a
Piézométrie de l'aquifère régional
Krigeage avec dérive externe (MNE)

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent

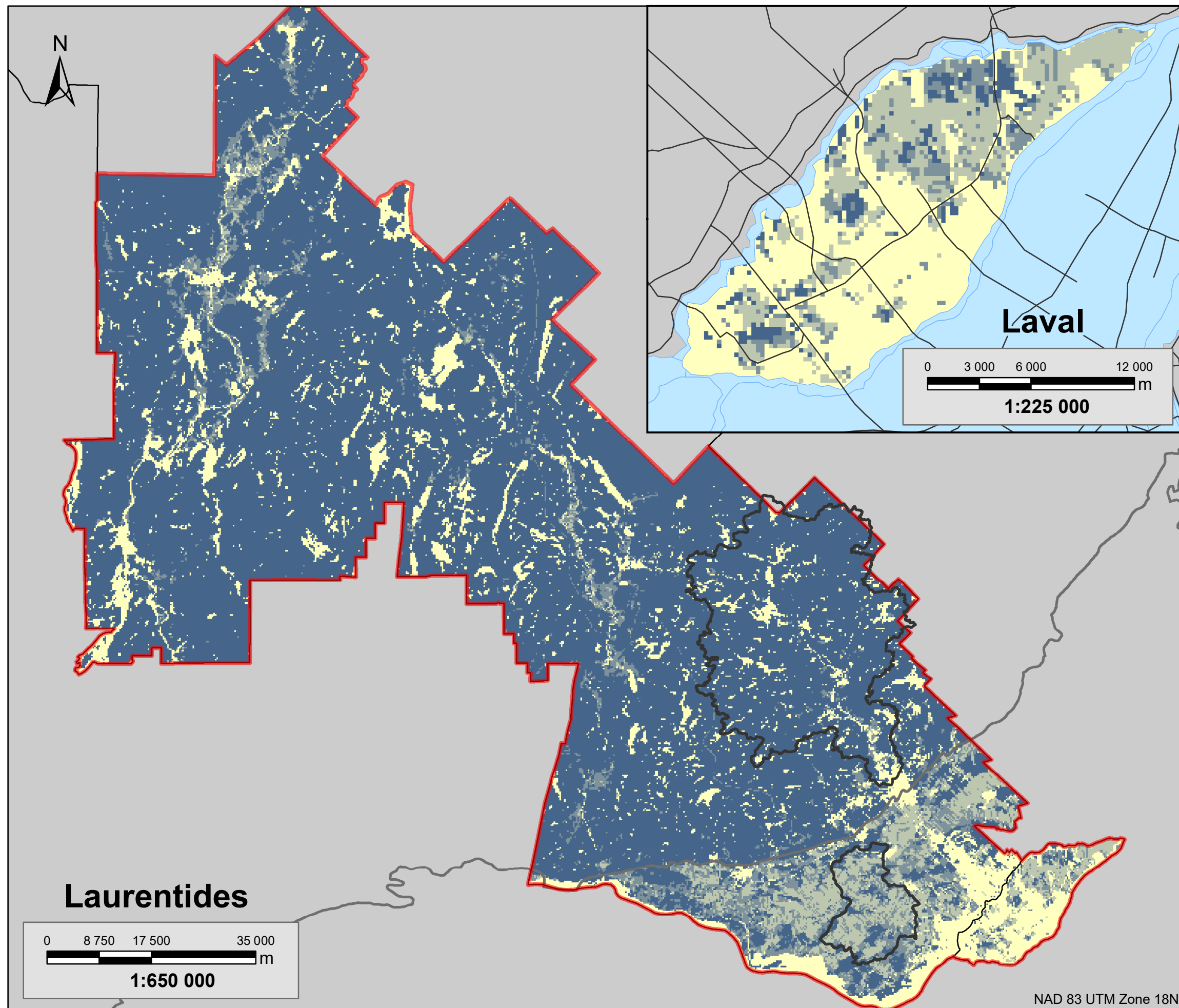
Données utilisées pour le krigeage

- Données niveau d'eau des Laurentides
- Données niveau d'eau des Basses Terres

Élévation piézométrique (m)

Laurentides	Laval
-878 - 0	-878 - 20
1 - 50	21 - 30
51 - 100	31 - 40
101 - 150	41 - 50
151 - 200	51 - 60
201 - 250	61 - 70
251 - 300	71 - 80
301 - 350	
351 - 400	
401 - 450	
451 - 500	
501 - 550	
551 - 700	

La piézométrie régionale a été obtenue par krigeage avec dérive externe sur la topographie (MNE) afin de mieux représenter les zones avec l'absence de données de forage. L'interpolation a été réalisée séparément pour la région des Laurentides et des Basses Terres du Saint-Laurent.



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

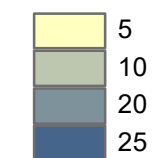
Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

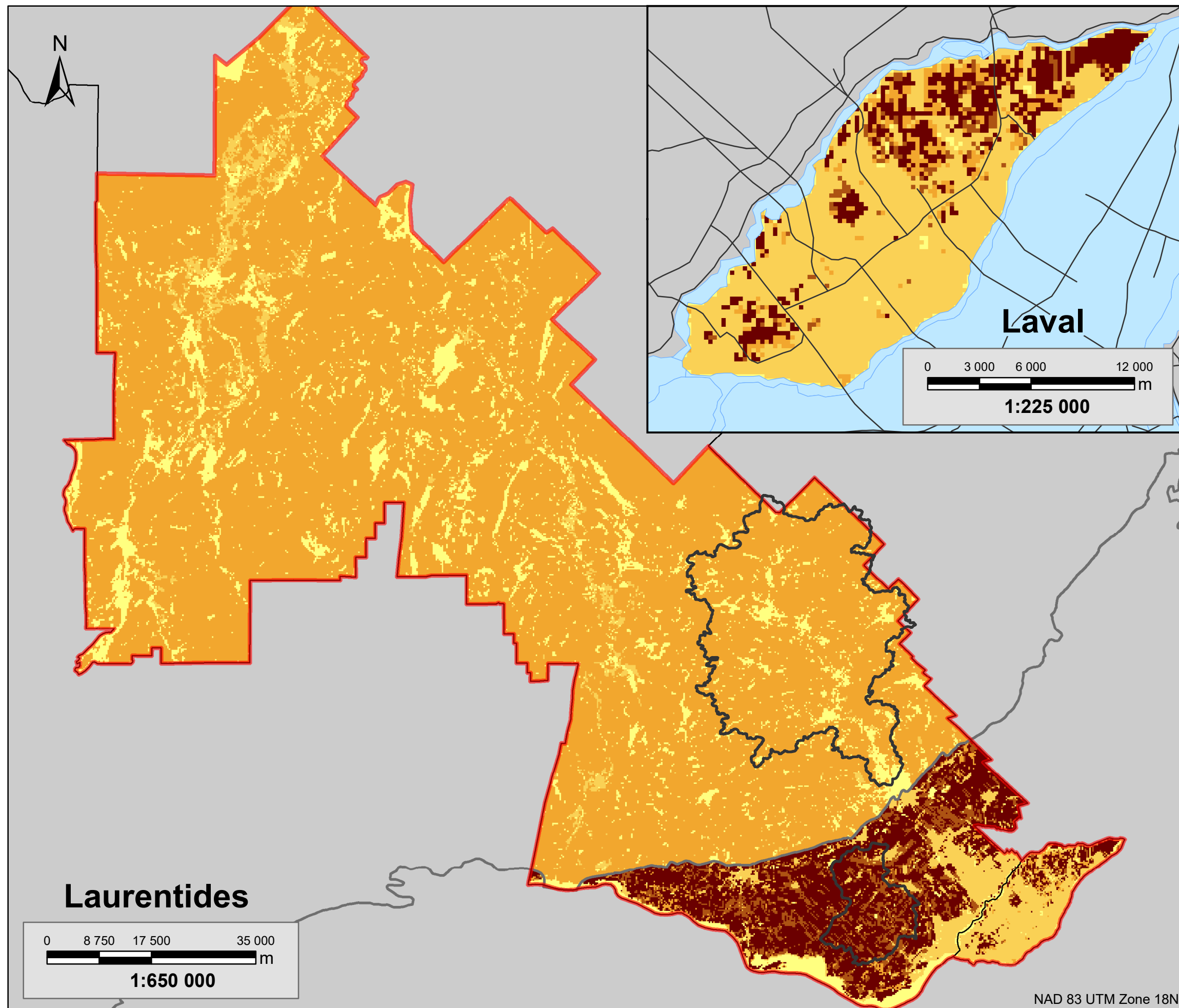
Planche 23
Distance aux drains

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent

Distance aux drains (m)



*La distance aux drains a été attribuée d'après
l'utilisation du sol simplifiée (planche 11) définie pour
le numéro de courbe (section 3.4.5).*



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

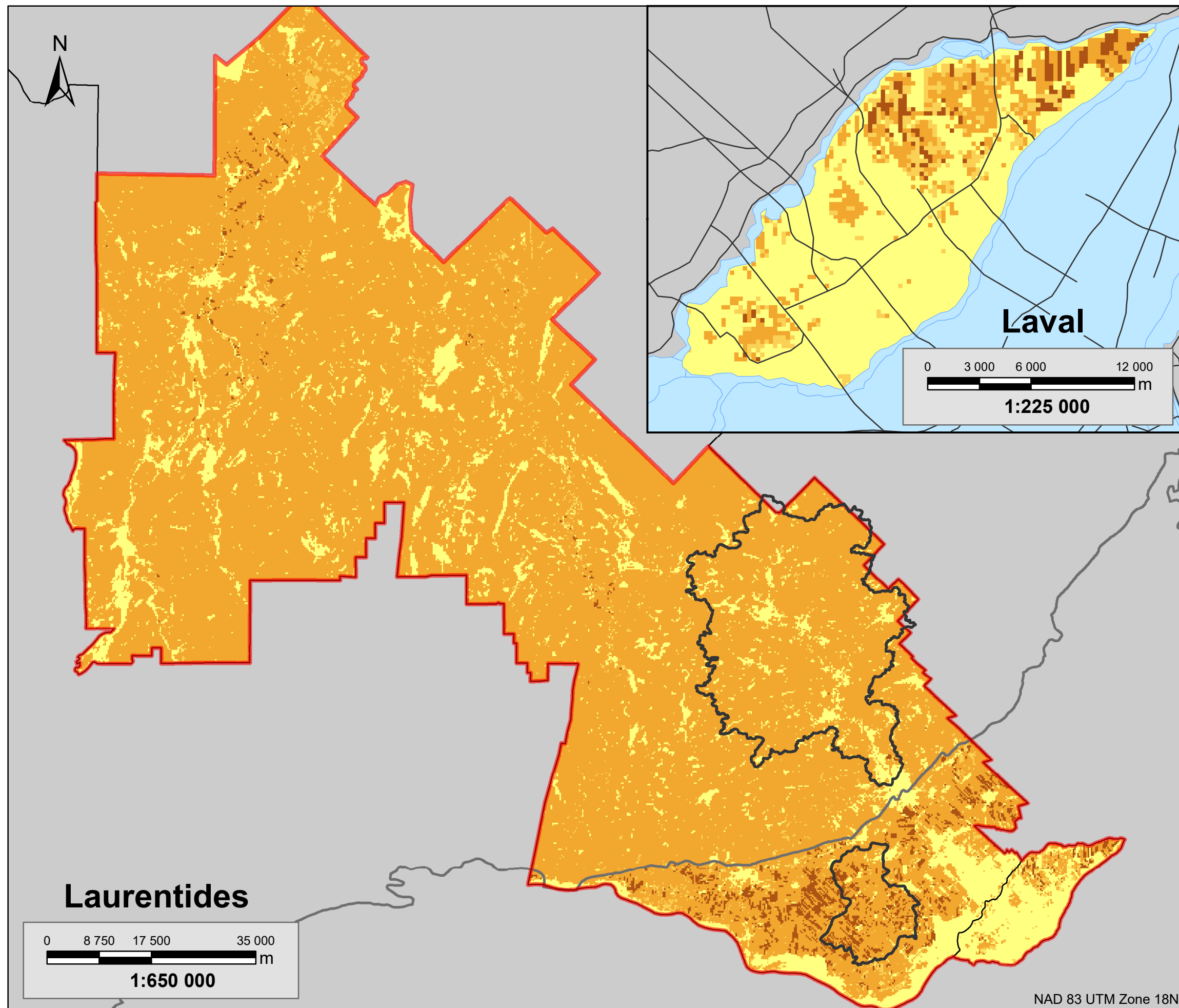
Planche 24
Profondeur racinaire
(Paramètre calé)

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent

Profondeur racinaire (cm)

- 3 - 5
- 5 - 7.5
- 7.5 - 15
- 15 - 20
- 20 - 28

La profondeur racinaire calée correspond à la valeur obtenue de l'inventaire des cultures pour l'année 2015 (AAC, 2015) (planche 24) multiplié par un facteur qui permet l'ajustement pour chaque secteur de la région d'étude. Le facteur est de 0,15 et 0,35 fois la profondeur racinaire respectivement pour les Laurentides et pour les Basses Terres (section 6.1).



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

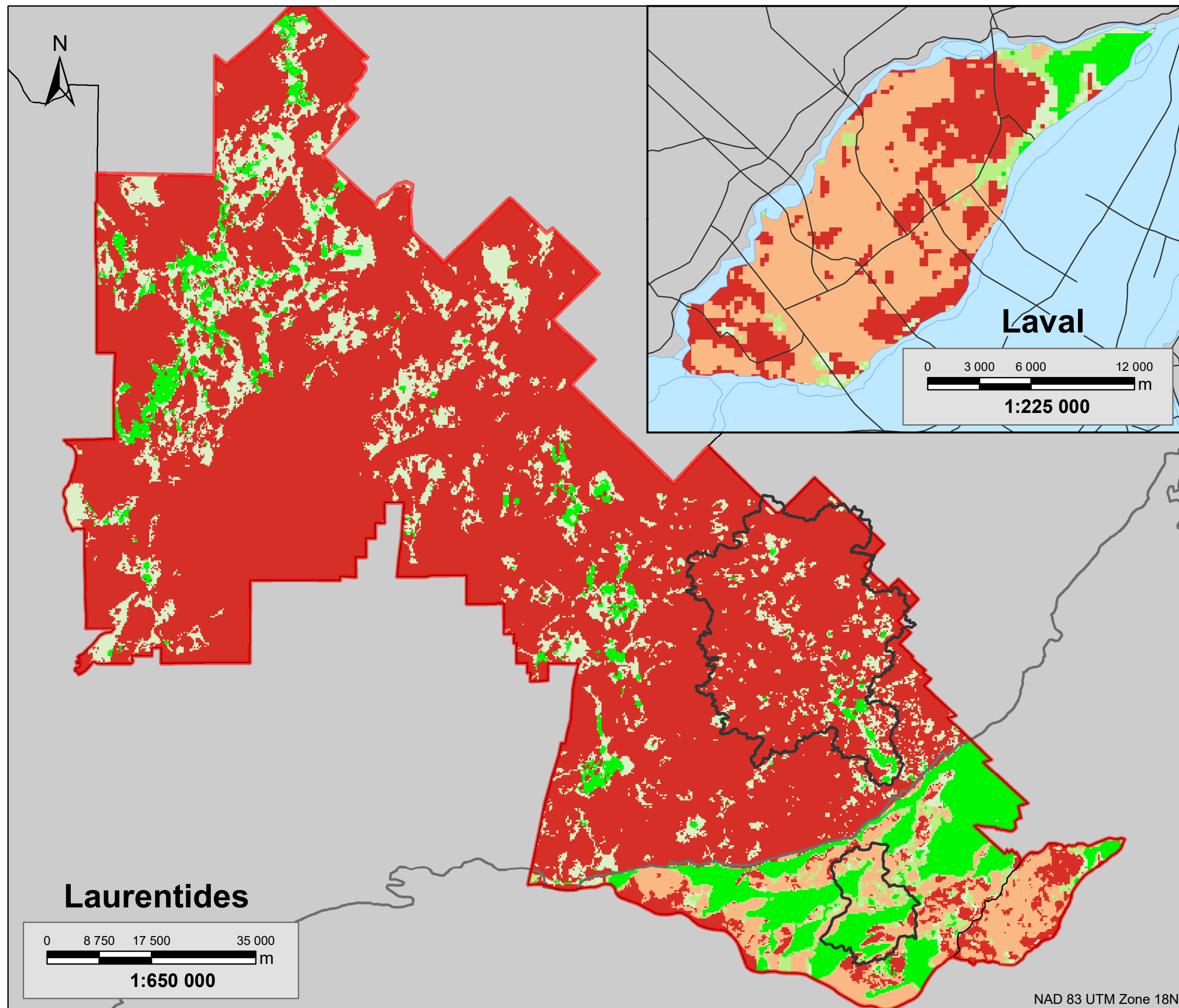
Planche 24a
Profondeur racinaire
(Valeurs avant calage)

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent

Profondeur racinaire (cm)

- 0 - 20
- 21 - 40
- 41 - 60
- 61 - 80

*La profondeur racinaire est obtenue à partir de
l'inventaire des cultures pour l'année 2015 (AAC, 2015)
(section 3.5.3). La profondeur racinaire est un
paramètre de calage. Cette carte présente la valeur
avant le calage.*



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 25
Conditions de confinement

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Laval et Laurentides
- Basses Terres du Saint-Laurent

Conditions de confinement

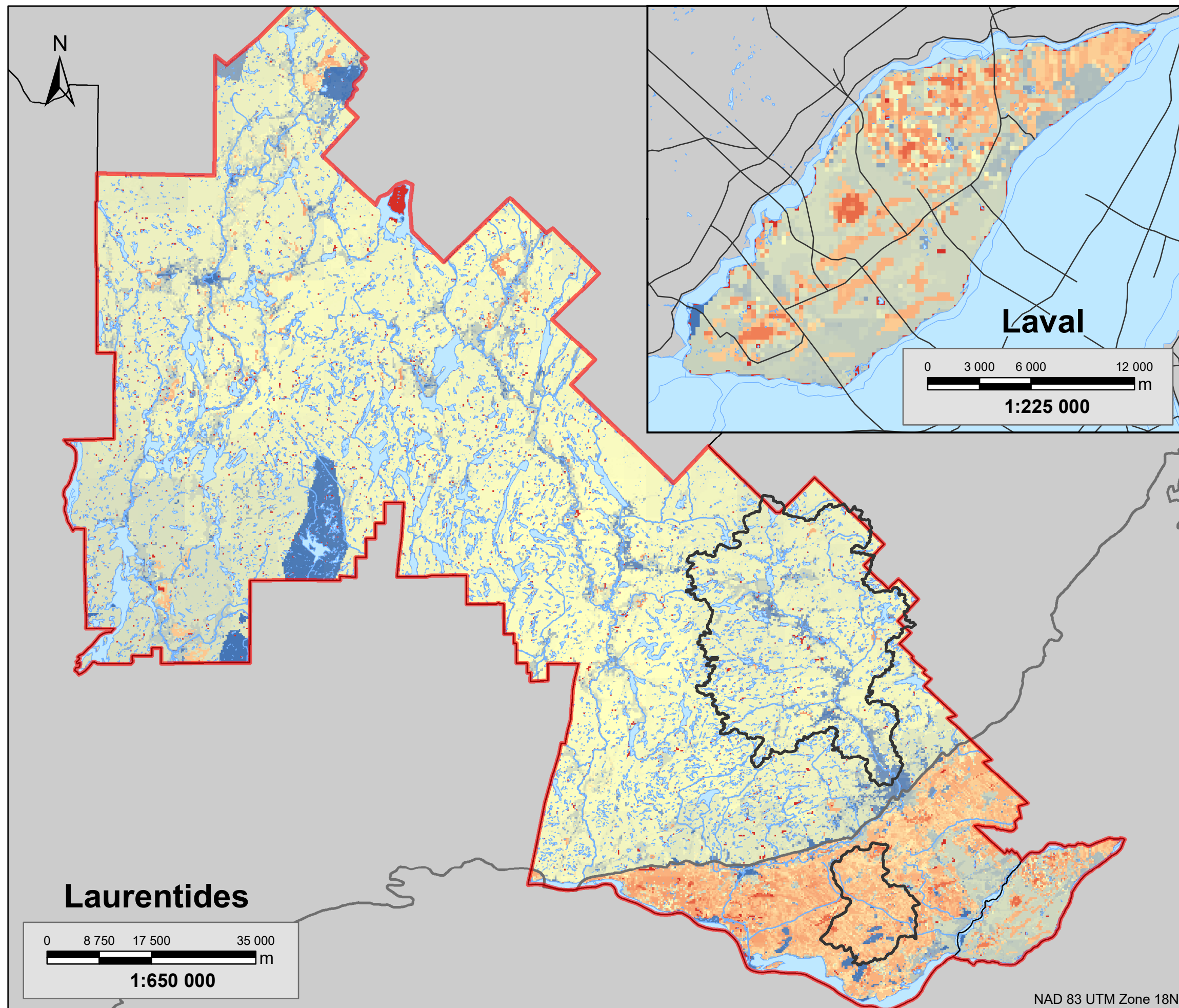
Laurentides

- 1 - Libre (Épaisseur d'argile de moins de 0,5 m)
- 3 - Semi-captif (Épaisseur d'argile de plus de 0,5 à 5 m)
- 5 - Captif (Épaisseur d'argile de plus de 5 m)

Basses Terres

- 1 - Libre (Épaisseur d'argile de moins de 0,5 m et épaisseur de till de moins de 3 m)
- 2 - Semi-captif (Épaisseur d'argile de moins de 0,5 m et épaisseur de till de plus de 3 m)
- 3 - Semi-captif (Épaisseur d'argile de plus de 0,5 à 5 m et épaisseur de till de moins de 3 m)
- 4 - Semi-captif (Épaisseur d'argile de 0,5 à 5 m et épaisseur de till de plus de 3 m)
- 5 - Captif (Épaisseur d'argile de plus de 5 m)

Les conditions de confinement ont été évaluées sur la base de l'épaisseur de dépôts meubles peu perméables, tel que le till et l'argile, au-dessus de l'aquifère rocheux (section 4.1).



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

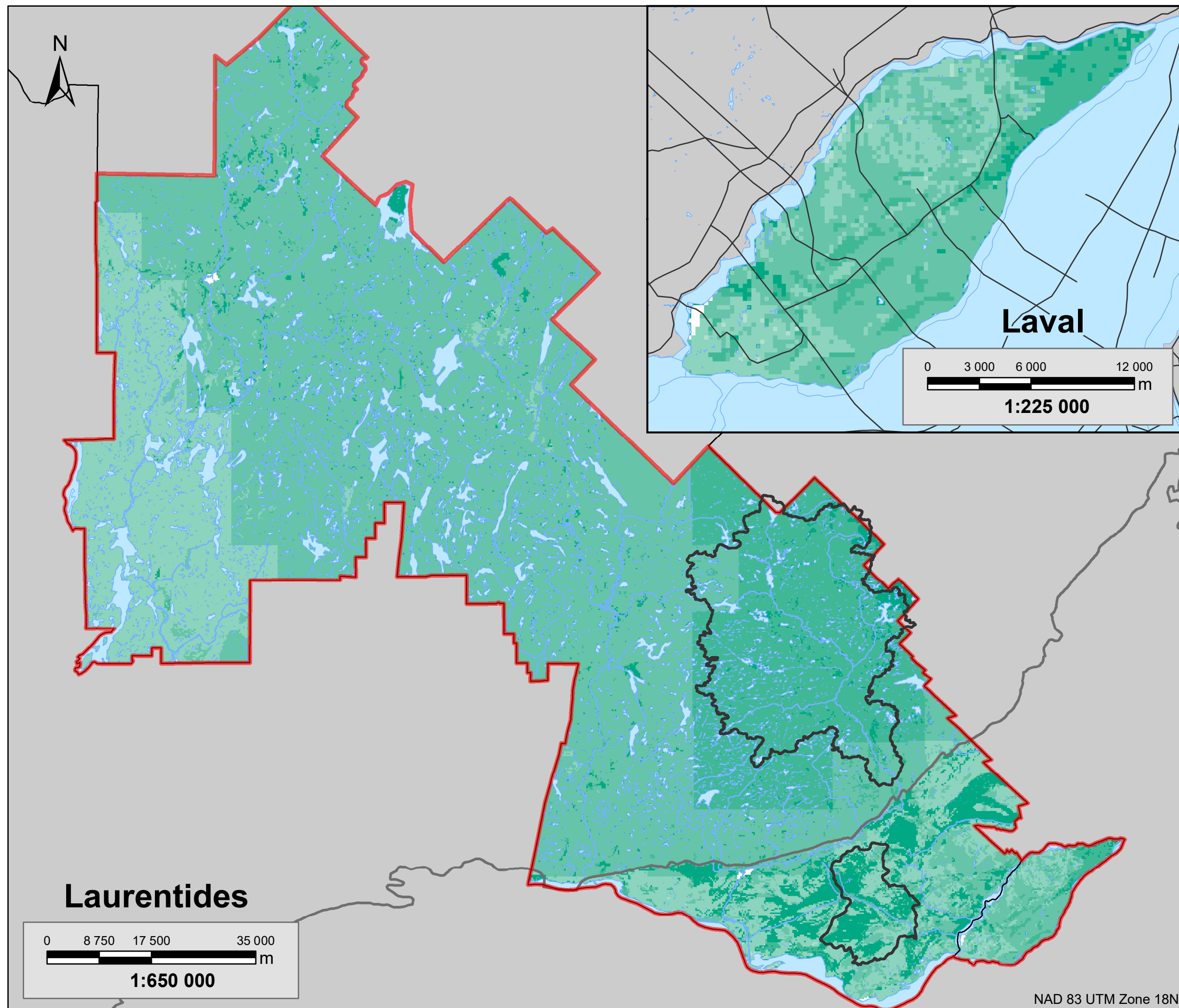
INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 26
Évapotranspiration réelle moyenne
annuelle de 1965 à 2014 (HELP)

- Routes principales
- Lacs et rivières
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent

Évapotranspiration moyenne annuelle
(mm/an)

Max : 660
Min : 0



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynault, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

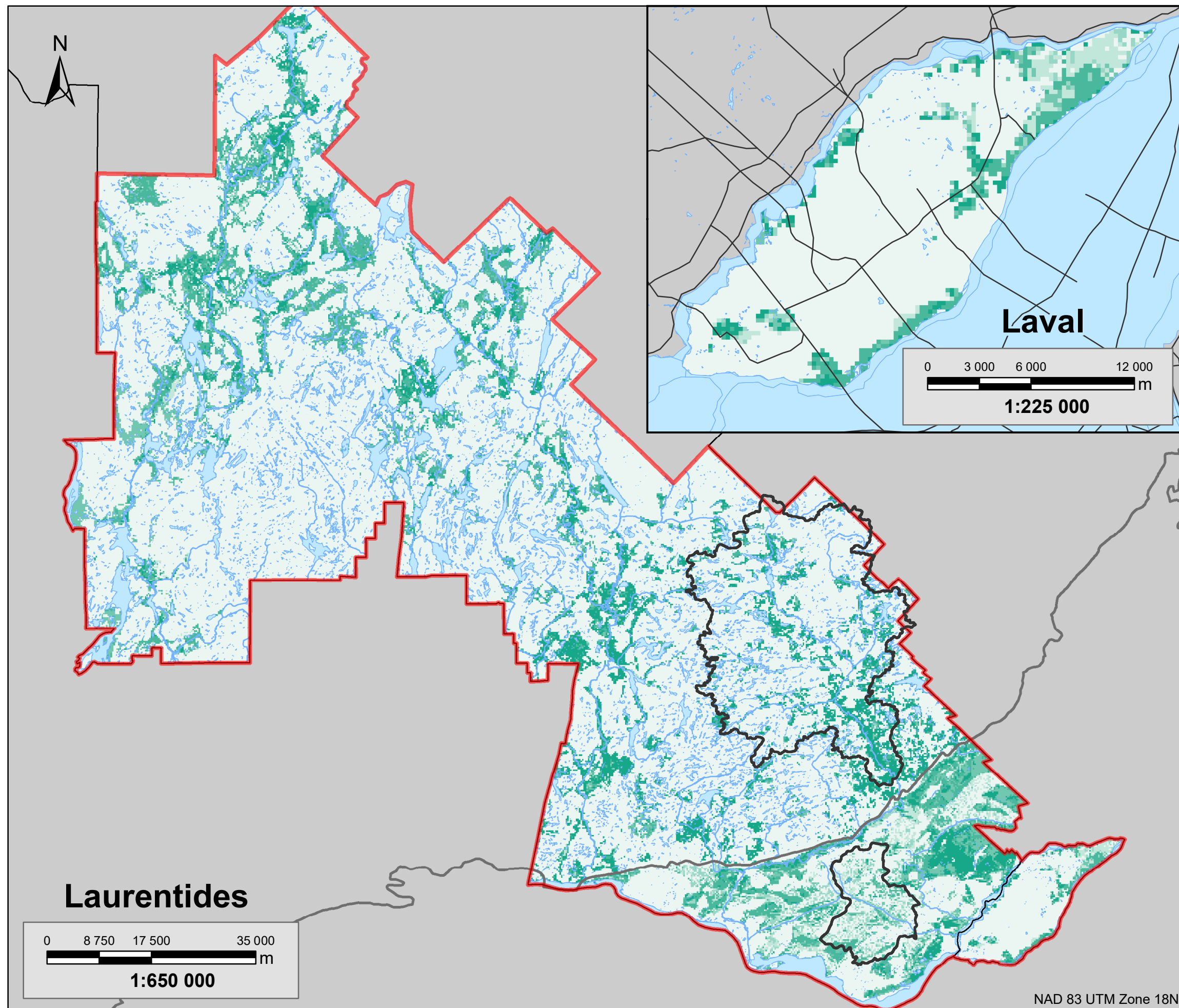
Planche 27
Ruissellement de surface moyen
annuel de 1965 à 2014 (HELP)

- Routes principales
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent

Ruissellement moyen annuel (mm/an)

- 0 - 100
- 100 - 150
- 150 - 200
- 200 - 250
- 250 - 300
- 300 - 350
- 350 - 400

*Résultats de la simulation HELP après calage.
Le ruissellement de surface correspond au
ruissellement de la couche de type 1 qui se trouve au
sommet de la colonne stratigraphique, soit la couche
de type 1 qui correspond au sol.*



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

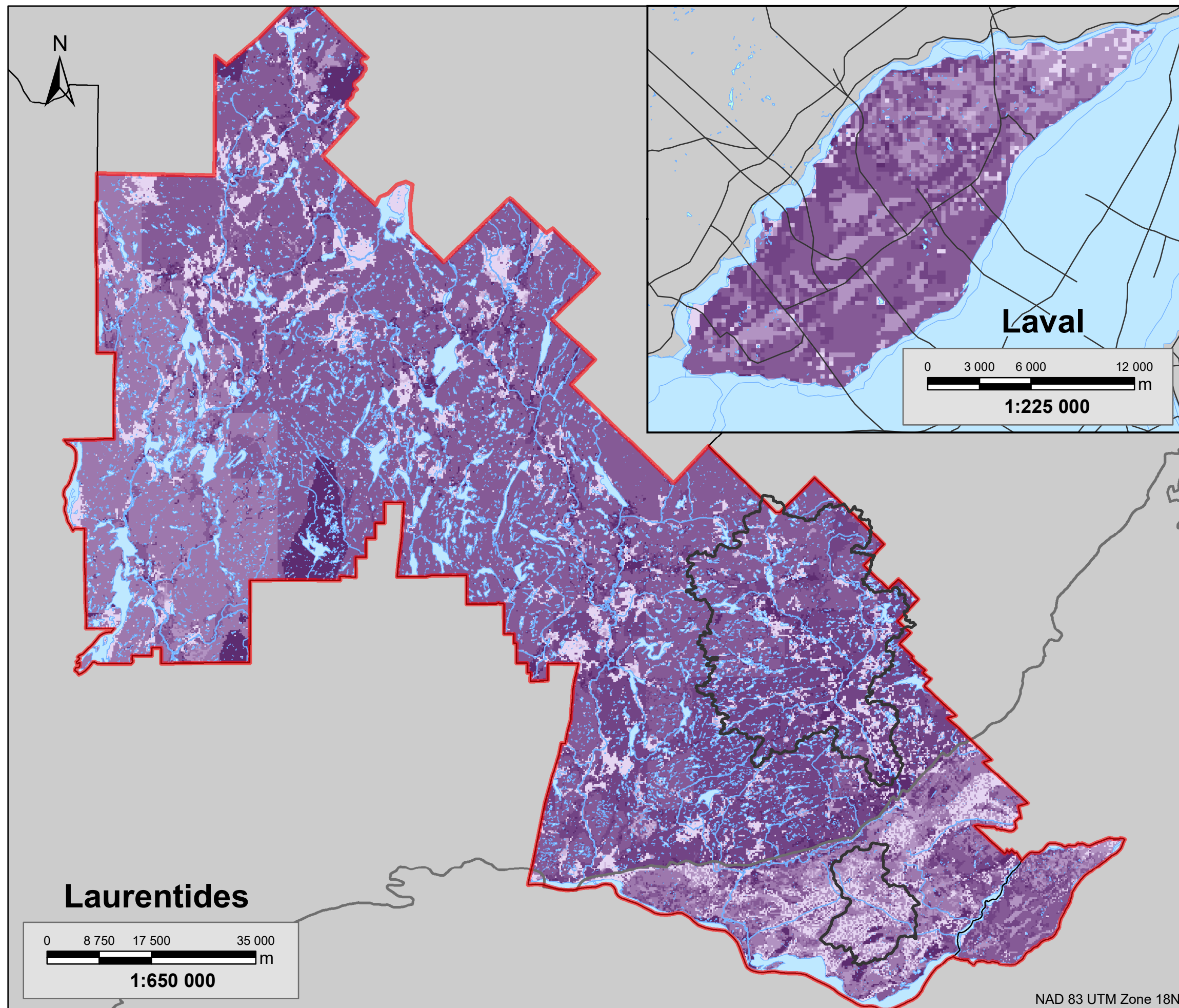
Planche 28
Ruissellement hypodermique moyen
annuel de 1965 à 2014 (HELP)

- Routes principales
- Lacs et rivières
- Bassins de calage
- Zone cartographiée
- Basses Terres du Saint-Laurent

Ruissellement hypodermique annuel
moyen (mm/an)

- 0 - 100
- 100 - 150
- 150 - 200
- 200 - 250
- 250 - 300
- 300 - 400

*Résultats de la simulation HELP après calage.
Le ruissellement hypodermique correspond au
ruissellement de sous-surface, soit l'addition du
ruissellement calculé pour toutes les couches de
type 1 qui se trouvent sous les horizons de sol
(Ruissellement sous-surface 1 + Ruissellement
sous-surface 2).*

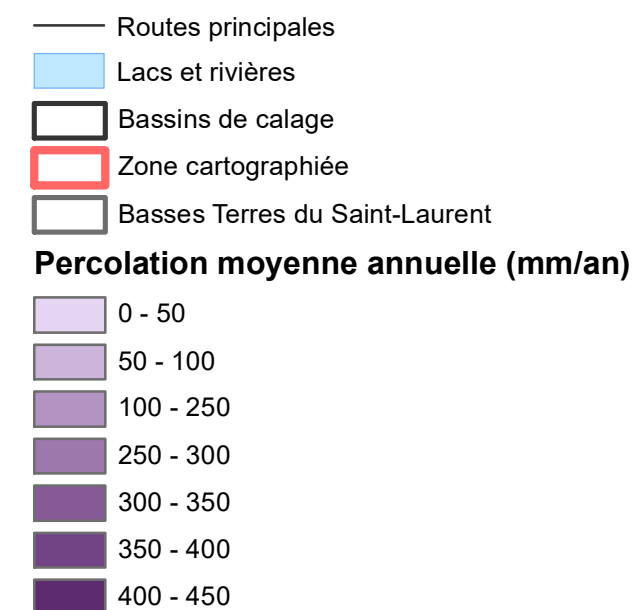


Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

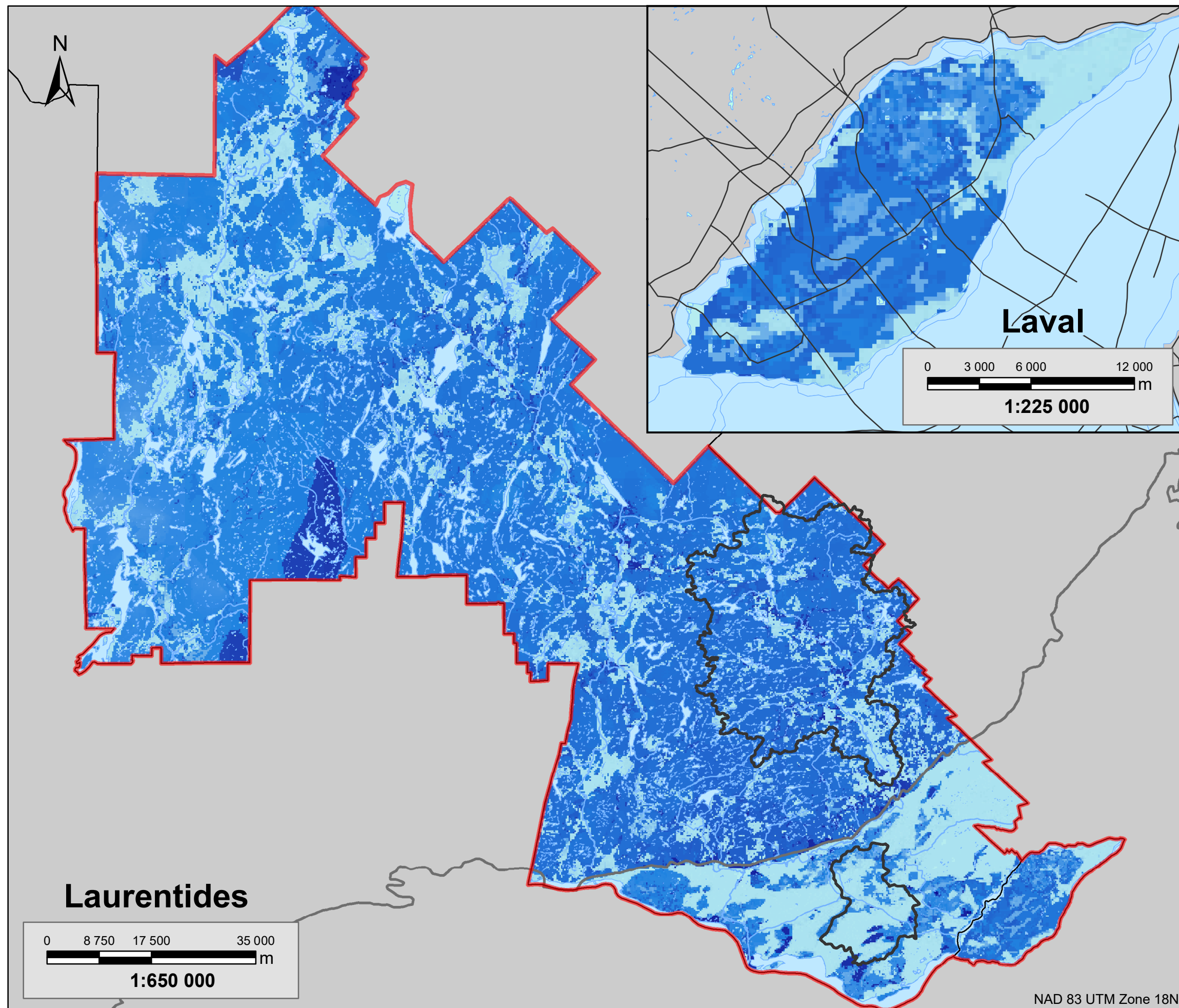
Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 29
Percolation moyenne annuelle
de 1965 à 2014 (HELP)



*Résultats de la simulation HELP après calage.
La percolation correspond à la quantité d'eau qui
s'infiltre sous les horizons de sol, soit les précipitations
moins l'évapotranspiration et le ruissellement de surface.*



Projet RADEAU 2
Estimation de la recharge avec le
modèle d'infiltration HELP pour les
régions de Laval et des Laurentides

Mélanie Raynald, René Lefebvre
et Jean-Sébastien Gosselin

INRS - Centre Eau Terre Environnement
Rapport de recherche R1799
Septembre 2018

Planche 30
Recharge moyenne annuelle
de 1965 à 2014 (HELP)

- Routes principales
 - Lacs et rivières
 - Bassins de calage
 - Zone cartographiée
 - Basses Terres du Saint-Laurent
- Recharge annuelle (mm/an)**
- Max : 600
- Min : 0

Annexe 1

Extraction des données stratigraphiques et piézométriques disponibles

Deux sources de données ont été utilisées pour obtenir des informations sur l'élévation des unités stratigraphiques, la base de données du SIH et les forages du réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ). La présente annexe décrit la procédure d'extraction des données réalisée. Ces données ont été principalement utilisées pour la région des Laurentides et le secteur d'Oka. La région des Basses Terres étant couverte par un modèle géologique 3D développé par Ross (2004).

Traitement des données du SIH

Les puits du SIH ont été sélectionnés pour la région à l'étude, c'est-à-dire pour les régions de Laval et des Laurentides et une zone qui déborde un peu de la limite (*SIH-Juin2017-zoneLL.shp*). Un joint a ensuite été réalisé entre la table des matériaux recoupés (*Materiaux_recoupes.dbf*) et les puits SIH de la zone d'étude. Seules les données qui trouvaient une correspondance dans la zone d'étude ont été retenues. Les données de cette table ont été sauvegardées en format DBF (*Materiaux_recoupesJOIN.dbf*).

Le DBF a été importé dans Matlab afin de redéfinir les classes de matériaux. Pour simplifier l'information, les types de matériaux ont été classés dans les catégories suivantes : argile, roc, sable, dépôts, terre, blocs, gravier, remblai, silt, eau, till. Un script MATLAB (*traitementSIH.mat*) a permis de reclasser les types de matériaux. Un premier classement a été réalisé en retenant seulement le premier mot du champ *TYPE_MATER*. Ensuite, lorsque la nature du roc était inscrite dans le champ *TYPE_MATER* (calcaire, conglomérat, granite, grès, ignée, marbre, quartzite, schiste, sédimentaire), le type de matériau a été attribué au roc.

Les puits portant la mention *Puits existant* dans le champ *TYPE_MATER*, n'ont pas été retenus puisque la stratigraphie n'était pas disponible pour ces puits. De plus, les puits portant la mention *Eau* dans le champ *TYPE_MATER* n'ont pas été retenus compte tenu de leur incertitude. Les forages des puits du RSESQ ont été ajoutés aux données du SIH. Le traitement des données du RSESQ a consisté essentiellement à reformater les données pour pouvoir les insérer dans les tables du SIH. Cette étape a été réalisée à l'aide d'un script Matlab.

Une fois les données du RSESQ intégrées, les doublons ont été éliminés. Un total de 2 989 doublons a été repéré dans les données du SIH. Les doublons représentent des forages qui ont les mêmes coordonnées en X et Y. Dans un premier temps, pour les fins de traitement, tous les forages identifiés comme doublons ont été extraits de la base de données. La table *doublons* représente les clés des forages qui ont été identifiés comme doublons. Un total de 34 963 forages a été retenu pour réaliser les surfaces.

Table Roc

Une table de profondeur au roc (*Table Roc*) a ensuite été créée à l'aide de Matlab. Les données de profondeur au roc ont été calculées en faisant la somme de l'épaisseur des matériaux surmontant le roc. Ces données sont inscrites dans le champ *epaisDepot*. Dans le cas où le forage n'atteint pas le roc, la valeur est enregistrée dans le champ *epaisDepotMin*. Le [tableau A1.1](#) présente la description des champs créés dans la table roc. Cette table a servi pour produire l'épaisseur des sédiments ainsi que pour l'élévation du roc.

Tableau A1.1 Table Roc – Description des champs

Nom du champ	Description de la donnée
epaisArgile	Somme de l'épaisseur de toutes les couches d'argile
epaisArgile1	Épaisseur de la première couche d'argile ou des couches d'argile consécutives
profToit	Profondeur du toit de la première couche d'argile
profToit2	Profondeur du toit de la 2 ^e couche d'argile

Table Argile

Une table d'argile a également été créée. Cette table a été créée afin d'extraire l'épaisseur d'argile et la profondeur du toit de l'unité d'argile pour en faire des surfaces. Lorsqu'un forage atteint le roc sans intercepter une couche d'argile, l'épaisseur d'argile est attribuée à zéro. Si le forage n'atteint pas le roc, l'épaisseur d'argile ne peut être calculée ou fixée à zéro. Une valeur de -9999 est inscrite. Dans tous les cas, les forages pour lesquels il y a plusieurs couches d'argiles ont été considérés comme une même couche. Dans le cas où les couches sont consécutives, la profondeur du toit correspond à la profondeur de la première couche. Dans le cas où il y a plusieurs couches consécutives, la profondeur du toit de la deuxième couche est également notée dans le champ *profToit2*. Ce champ permet de sélectionner les forages pour lesquels les couches d'argile ne sont pas consécutives (par exemple, argile, sable, argile) en sélectionnant les *profToit2* qui sont supérieures à -9999. Ce champ n'a toutefois pas été utilisé pour la présente étude. Le [tableau A1.2](#) décrit les champs de la table Argile extraite du SIH.

Les détails de la production des surfaces à partir de ces données sont expliqués à l'annexe 2. Les tables Roc et Argile sont jointes à la version électronique de l'annexe 1.

Tableau A1.2 Table Argile – Description des champs

Nom du champ	Description de la donnée
epaisArgile	Somme de l'épaisseur de toutes les couches d'argile
epaisArgile1	Épaisseur de la première couche d'argile ou des couches d'argile consécutives
pourcArgile	Pourcentage de l'épaisseur totale d'argile sur l'épaisseur totale de sédiments
pourcArgile1	Pourcentage de l'épaisseur de la première couche d'argile sur l'épaisseur totale de sédiments
profToit	Profondeur du toit de la première couche d'argile
profToit2	Profondeur du toit de la 2 ^e couche d'argile

Annexe 2

Développement du modèle hydrostratigraphique 3D

Cette annexe présente la méthodologie utilisée pour produire les surfaces des unités hydrostratigraphiques utilisées pour le modèle HELP. Les surfaces ont été produites principalement pour la portion de la zone d'étude qui se trouve dans les Laurentides et dans le secteur d'Oka. Un modèle quaternaire 3D (Ross, 2004) a été utilisé pour la stratigraphie des Basses Terres du Saint-Laurent. Toutefois, puisque ces modèles ne comprenaient pas le secteur d'Oka, les données du SIH ont été utilisées pour interpoler les surfaces des différentes unités dans ce secteur comme dans les Laurentides.

Il est important de souligner que la cartographie a été réalisée à l'échelle régionale dans le but d'estimer la recharge. Il est donc possible que la comparaison avec des données à l'échelle locale diffère. L'utilisation de ces surfaces doit être vérifiée avant utilisation.

Données utilisées

Toutes les données qui ont servi à la production finale des surfaces hydrostratigraphiques sont disponibles dans la version électronique de la présente annexe. Le répertoire principal se nomme *A2_SurfacesStrati* et il comprend un répertoire pour chaque unité hydrostratigraphique. Le dossier d'une unité hydrostratigraphique comprend les données nécessaires à la production de la surface de l'unité à l'aide du logiciel AR2GeMS (Ar2Tech, 2017). Le [tableau A2.1](#) présente le classement des données.

Tableau A2.1 Contenu de l'annexe électronique *A2_SurfacesStrati*

Nom du dossier	Description du contenu
BD0-EpaisseurSediments	Ensemble des données utilisées pour produire la surface du toit du roc et l'épaisseur totale de sédiments
BD1-Sable	Ensemble des données utilisées pour produire l'épaisseur de l'unité de sable superficiel (sa surface correspond à la topographie du sol)
BD2-Argile	Ensemble des données utilisées pour produire la surface du toit, la surface de la base et l'épaisseur de l'unité d'argile
BD3-Till	Ensemble des données utilisées pour produire la surface du toit et l'épaisseur de l'unité de till
BD4-Roc	Résultat de la surface du toit du roc et l'épaisseur totale des sédiments
grid_10m	Grille d'interpolation au 250 m (comprend les coordonnées x, y et l'élévation du modèle numérique d'élévation pour chaque point de la grille au 250 m)
Matrices_SurfacesStrati	Matrices (<i>Raster</i>) pour les couches finales de chaque surface

Le [tableau A2.2](#) présente le contenu et la description du répertoire de chaque unité hydrostratigraphique présentée au [tableau A2.1](#). Le [tableau A2.3](#) présente le contenu du répertoire *Matrices_SurfacesStrati* également présenté au [tableau A2.1](#). Ce répertoire comprend les matrices finales réalisées classées en deux sous-répertoires. Le répertoire *Format_Grille* comprend les matrices correspondant au format de la grille d'interpolation et le répertoire *Format_Zone* comprend les matrices découpées pour la zone d'étude. La lettre *m* est ajoutée au nom pour indiquer que ces matrices ont été masquées. L'utilisation des données à l'extérieur de la zone d'étude n'est pas recommandée puisque les données dans cette zone n'ont pas été validées.

Tableau A2.2 Contenu du répertoire de chaque unité hydrostratigraphique

Nom du dossier	Description du contenu
couchesSIG	Comprend le <i>shapefile</i> des données utilisées pour le krigeage
data	Données d'entrée pour le krigeage (le nom du fichier commence par : <i>data_</i>)
parametre	Paramètres utilisés pour le krigeage
resultat	Le résultat final et corrigé pour assurer la cohérence des surfaces d'unités entre elles et avec la topographie du sol
vario	Données d'entrées pour le variogramme (le nom du fichier termine par <i>vario</i>), le graphique ainsi que les paramètres du variogramme utilisé (modèle de variogramme et variogramme expérimental)

Tableau A2.3 Description des matrices finales du répertoire *Matrices_SurfacesStrati* / *Format_Zone* découpées pour la zone d'étude

Nom matrice finale	Description du contenu
edep0215m	Épaisseur totale des sédiments
zroc0215m	Élévation de la surface du toit du roc
ztarg0216m	Élévation de la surface du toit de l'unité d'argile
eparg0216m	Épaisseur de l'unité d'argile
zbarg0216m	Élévation de la surface de la base de l'unité d'argile
eptill0216m	Épaisseur de l'unité de till
epsab0216m	Épaisseur de l'unité de sable superficiel

Principales étapes de réalisation des surfaces

La réalisation des surfaces s'est faite en plusieurs étapes itératives. La présente section décrit sommairement la méthodologie des principales étapes qui ont été utilisées pour la production de chaque surface.

Production de la grille d'interpolation

La grille d'interpolation a été construite dans ArcGIS à l'aide de l'outil *Data Management Tools/Create Fishnet* de ArcToolbox. La grille est régulière avec des points espacés au 250 m. Le fichier *grid_250m.csv* (répertoire *grid_250m*) comprend les coordonnées x et y ainsi que l'élévation du niveau du sol du modèle numérique d'élévation a été extraite à l'aide d'ArcGIS (*Extract Multi Values to Points*) pour chacun des points de la grille au 250 m. Cette grille a été utilisée pour la création de toutes les surfaces.

Interpolation des données

L'interpolation a été réalisée pour le secteur des Laurentides et d'Oka. Dans tous les cas, l'interpolation a été réalisée par krigeage ordinaire à l'aide du logiciel AR2GeMS (Ar2Tech, 2017). Les variogrammes ont été réalisés à partir des données de forages validées extraites du SIH et du RSESQ. Pour certaines surfaces les données d'affleurements ont également été utilisées pour compléter l'information. Le calcul de l'interpolation est réalisé en ajoutant les données extraites du modèle quaternaire 3D aux données de forage de façon à obtenir des surfaces cohérentes avec le modèle 3D pour toute la région d'étude.

Une fois que l'interpolation d'une surface a été réalisée, le résultat a été filtré et ensuite des corrections ont été effectuées afin d'obtenir la surface finale. Ces étapes sont décrites brièvement ci-dessous. Les corrections sont expliquées dans les détails de production de chaque surface à la section suivante.

Filtres appliqués

Les surfaces interpolées ont été transformées en matrice (*Raster*) afin d'être filtrées à l'aide de l'outil *Filter* de ArcToolbox (*Spatial Analyst Tools/ Neighborhood/Filter*). Un filtre de lissage (passe-bas, *LOW*) a été appliqué afin de diminuer les grands contrastes de valeurs pour des points de la grille qui sont voisins. Cette matrice filtrée a été réimportée dans AR2GeMS pour procéder aux opérations sur les surfaces. Les corrections des surfaces et les opérations entre les surfaces ont été réalisées à partir des résultats filtrés.

Correction des surfaces

Les surfaces filtrées ont ensuite été corrigées afin de s'assurer que le résultat soit cohérent et représentatif de la réalité. Ces corrections ont été effectuées à l'aide de script Python. Par exemple, l'élévation du toit des unités a été corrigée pour qu'elle ne soit pas supérieure à la topographie. Ces corrections sont décrites en détail dans la section suivante.

Opération entre les surfaces

Les opérations entre les surfaces sont réalisées à partir des surfaces finales seulement. Ces opérations ont été effectuées par des scripts Python dans AR2GeMS ou à l'aide de l'outil *Calculatrice Raster* dans ArcGIS.

Séquence de production des surfaces finales

Afin de s'assurer de la concordance des surfaces, elles ont été réalisées dans l'ordre présenté au [tableau A2.4](#) ci-dessous. Les surfaces ont été produites en commençant par l'interpolation de l'épaisseur des sédiments. La surface du roc a été calculée à partir de l'interpolation de l'épaisseur totale des sédiments. Considérant l'argile comme étant un matériau facilement identifiable, il a été choisi de cartographier cette unité en premier.

L'interpolation des données de l'élévation du toit et de l'épaisseur d'argile a permis de calculer l'élévation de la base de l'argile. L'élévation et l'épaisseur du sable superficiel ainsi que l'épaisseur du till sous-jacent à l'argile ont ensuite été calculées. Le [tableau A2.4](#) présente l'opération réalisée pour l'obtention des surfaces ou de l'épaisseur des différentes unités ainsi que l'ordre de production. Le fichier utilisé pour le krigeage, le champ krigé pour produire la surface finale et le nom de la matrice finale y sont également indiqués. La matrice finale comprend la surface pour l'ensemble de la zone d'étude, soit la région des Laurentides ainsi que la région des Basses Terres.

Les sections qui suivent décrivent en détail la production des surfaces ou des épaisseurs pour chacune des unités dans l'ordre de leur réalisation.

Tableau A2.4 Ordre de production des matrices réalisées et opération de production pour la région des Laurentides

Ordre de production	Surface ou épaisseur	Opération	Data (fichier .csv)	Champ krigé	Nom matrice finale	N° planche
1	Épaisseur totale des sédiments	<u>Interpolation</u> par krigeage ordinaire	eDepot1017-Lt-1031	eDepotTot	edep0215m	15
2	Élévation du toit du roc	<u>Calcul</u> : Élévation de la topographie du Lidar moins épaisseur des sédiments	-	-	zroc0215m	16
3	Épaisseur d'argile rencontrée en forage	<u>Interpolation</u> par krigeage ordinaire	XYdataArgile-20180212sDB-Lt	epArg	eparg0216m	17
4	Élévation du toit d'argile	<u>Interpolation</u> par krigeage ordinaire	XYdataArgile-20180212sDB-Lt	zTArg	ztarg0216m	18
5	Élévation de la base de l'argile	<u>Calcul</u> : Élévation du toit de l'argile moins l'épaisseur de l'argile	-	-	zbarg0216m	19
6	Épaisseur de sable superficiel	<u>Calcul</u> : Élévation de la surface du sol (DEM) moins élévation du toit de l'argile	-	-	epsab0216m	20
7	Épaisseur de till (sous l'argile)	<u>Calcul</u> : Élévation de la base de l'argile moins élévation du toit du roc	-	-	eptill0216m	21

Production des cartes d'interfaces et d'épaisseur des unités stratigraphiques

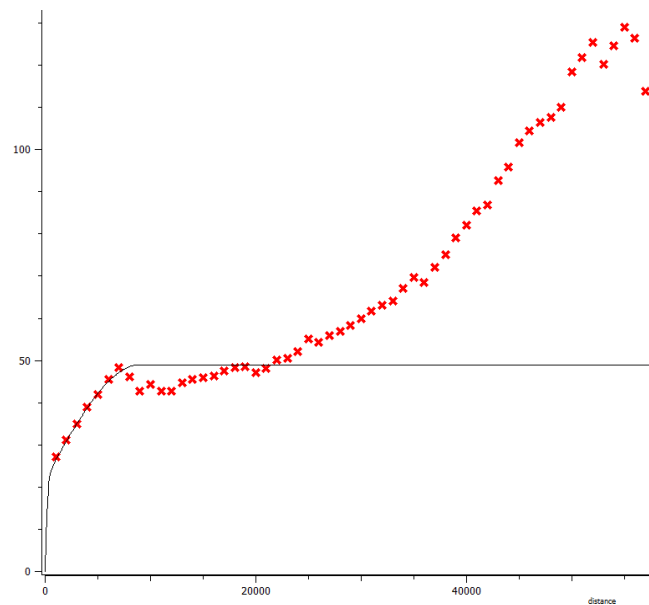
1- Épaisseur totale des sédiments (Planche 15)

Opération : Interpolation par krigeage ordinaire des données d'épaisseur totale des sédiments

L'épaisseur totale des sédiments dans la région des Laurentides a été obtenue par l'interpolation par krigeage ordinaire à partir de 28 297 données d'épaisseur de sédiments. Les données utilisées pour le krigeage sont montrées sur la [planche 15a](#) de l'annexe 2 et elles comprennent 25 677 forages ayant atteint le roc, 1 926 forages profonds n'ayant pas atteint le roc, mais indiquant une profondeur minimale du roc ainsi que 594 données d'affleurement extraites de la cartographie de l'IRDA. Les forages qui n'ont pas atteint le roc et qui sont peu profonds ont été éliminés afin d'éviter que l'élévation de l'épaisseur des sédiments ne soit sous-estimée. Des forages profonds qui n'ont pas atteint le roc ont été utilisés comme données de profondeur minimum au roc. Ces données sont identifiées par des triangles rouges sur les cartes comme *forage n'ayant pas atteint le roc*.

Le variogramme expérimental a été construit en utilisant seulement les données d'épaisseur des sédiments correspondant aux forages pour lesquelles le roc a été atteint. Le champ *eDepot* du fichier *eDepot20180215-Lt-vario.csv* présente les données utilisées pour le variogramme. Le graphique du variogramme expérimental est montré à la [figure A2.1](#) ci-dessous et les paramètres du modèle de variogramme sont indiqués au [tableau A2.5](#) présenté à la fin de l'annexe.

Le krigeage de l'épaisseur des sédiments pour les Laurentides a été réalisé sur le champ *eDepotTot* du fichier *eDepot1017-Lt-1031.csv*. Une fois l'interpolation effectuée, le résultat a été combiné aux épaisseurs du modèle des Basses Terres, filtré, puis des corrections ont été apportées pour s'assurer que le résultat soit représentatif de la réalité et qu'il respecte les contraintes du modèle numérique. L'épaisseur totale des sédiments a été corrigée pour s'assurer qu'il n'y a pas d'épaisseur négative. Cette surface est utilisée pour le calcul de l'élévation du toit du roc.

Figure A2.1 Variogramme pour les données d'épaisseur totale des sédiments

2- Carte d'élévation du toit du roc (Planche 16)

Opération : Élévation du sol (MNE) (Planche 2) moins Épaisseur totale des sédiments (Planche 15)

La carte d'élévation du toit du roc a été obtenue par une opération matricielle réalisée à l'aide de script Python dans AR2GeMS. L'épaisseur totale des sédiments a été soustraite de l'élévation du sol donné par le MNE. La surface de l'élévation du toit du roc a également été vérifiée afin de s'assurer qu'elle n'est pas supérieure à l'élévation du sol. Aucune correction n'a été requise pour cette surface étant donné que l'épaisseur totale des sédiments avait déjà été corrigée pour éliminer les épaisseurs négatives.

3- Épaisseur d'argile rencontrée en forage (Planche 17)

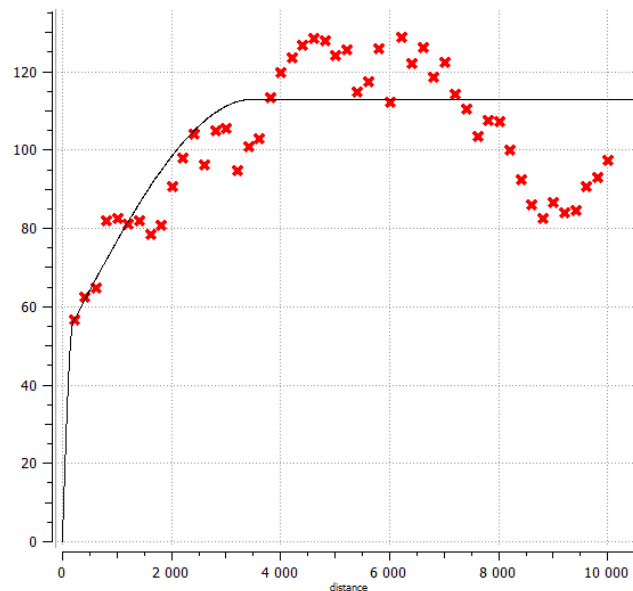
Opération : Interpolation par krigeage ordinaire des données d'épaisseur d'argile rencontrée en forage

Étant donné la facilité à identifier ce matériau lors d'un forage, l'unité d'argile a été la première à être cartographiée. En plus des Laurentides, l'estimation de l'épaisseur d'argile a également été réalisée pour la région d'Oka puisque cette région a été exclue du modèle 3D de Ross (2004). L'épaisseur de l'argile a été obtenue par krigeage ordinaire de 26 802 données d'épaisseur d'argile provenant du SIH, soit 26 660 données dans la région des Laurentides et de 162 données dans la région d'Oka. De ces données, 2 882 sont des forages qui ont complètement traversé l'unité d'argile et 23 778 indique l'absence d'argile jusqu'au roc. Les données utilisées pour le krigeage sont montrées sur la [planche 17a](#). Certains forages ont traversé plusieurs horizons d'argile. Pour les fins de la cartographie de l'épaisseur d'argile, l'épaisseur de ces horizons argileux a été additionnée et a été considérée comme une seule couche d'argile.

Le variogramme pour les données d'épaisseur d'argile a été construit en utilisant seulement les données de forage qui ont complètement traversé l'argile et qui ont atteint le roc. Le champ *epArg* du fichier *XYdataArgile-20180212sDB-Lt_VARIO.csv* présente les données d'épaisseur d'argile utilisées pour le variogramme. Le graphique de la [figure A3.2](#) présente le modèle de variogramme pour les données d'épaisseur d'argile. Les paramètres du modèle de variogramme sont présentés au [tableau A3.5](#) à la fin de la présente annexe.

Le résultat du krigeage a ensuite été filtré puis les épaisseurs négatives ont été corrigées pour être égales à zéro.

Figure A2.2 Variogramme pour les données d'épaisseur d'argile (EpArg_var1plot_Omni-directional.png)



4- Élévation du toit de l'argile ([Planche 18](#))

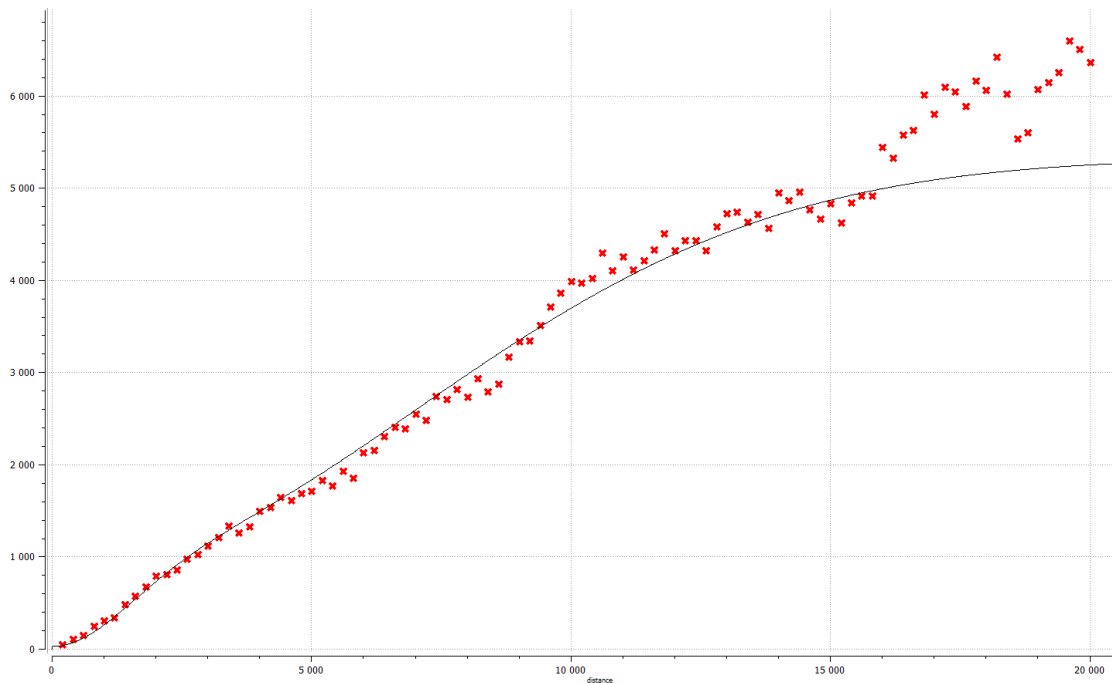
Opération : Interpolation par krigeage ordinaire des données d'élévations du toit de l'argile

L'interpolation de l'élévation du toit de l'argile a été obtenue par krigeage ordinaire de 3 641 données d'élévation provenant du SIH soit, 3 576 données pour la région des Laurentides et de 65 données pour le secteur d'Oka. La région des Basses Terres a été cartographiée à l'aide des modèles 3D réalisés pour le secteur de Laval (Ross, 2004) et pour la région de Mirabel (Ross, 2004). Les données utilisées pour le krigeage sont montrées sur la [planche 18a](#). Les données d'élévations krigées sont dans le champ *zToitArg* du fichier *DataArg-20180216.csv*.

Le variogramme a été réalisé sur toutes les données d'élévations qui ont atteint l'argile. Le champ *zToitArg* du fichier *XYdataArgile-20180212sDB-Lt_VARIO.csv* présente les données d'élévations du toit de l'argile utilisées pour le variogramme. Le graphique de la [figure A3.3](#) présente le variogramme. Les paramètres du modèle de variogramme sont inscrits au [tableau A3.5](#) présenté à la fin de l'annexe.

Le résultat du krigeage a été filtré puis corrigé pour s'assurer que l'élévation du toit de l'argile ne soit pas supérieure à la surface du sol et ne soit pas inférieure à l'élévation du roc.

Figure A2.3 Variogramme pour les données d'élévations du toit de l'argile (var_zTArg0212plot_Omni-directional.png)



5- Élévation de la base de l'argile (Planche 19)

Opération : Élévation du toit de l'argile (Planche 18) moins Épaisseur de l'argile (Planche 17)

La surface de l'élévation de la base de l'argile est dérivée de l'interpolation de l'épaisseur d'argile (planche 17) soustraite à l'interpolation de l'élévation de la surface du toit de l'argile (planche 18). L'élévation de la base de l'argile a été vérifiée pour ne pas être supérieure à la topographie et elle a été corrigée pour ne pas être inférieure à l'élévation du roc.

6- Épaisseur de sable superficiel (Planche 20)

Opération : Élévation de la surface du sol (MNE) (Planche 2) moins Élévation du toit de l'argile (Planche 18)

L'épaisseur de sable superficiel est dérivée de l'interpolation de l'élévation de la surface du toit de l'argile (planche 18) soustrait à l'élévation de la surface du sol (MNE) (planche 2).

7- Épaisseur de till (sous l'argile) (Planche 21)

Opération : Élévation de la base de l'argile ([Planche 21](#)) **moins** Élévation du toit du roc ([Planche 16](#))

L'épaisseur de till qui se retrouve sous l'argile est dérivée de l'élévation de la base de l'argile ([planche 19](#)) soustraite à l'élévation du toit du roc ([planche 16](#)).

Tableau A2.5 Paramètres pour les modèles de variogramme

Données krigées	Effet pépité	Structure	Type	Contribution	Portée		
					max	med	min
Épaisseur totale des sédiments	0	1	Sphérique	27	9000	9000	9000
		2	Exponentielle	22	500	500	500
Épaisseur d'argile rencontrée en forage	0	1	Sphérique	51	200	200	200
		2	Sphérique	62	3500	3500	3500
Élévation du toit d'argile	30	1	Gaussienne	4500	17200	17200	17200
		2	Gaussienne	800	3360	3360	3360

Annexe 3

Méthodologie pour produire la carte piézométrique

Cette annexe comprend la méthodologie pour produire la carte piézométrique ainsi que les cartes de profondeur de la nappe et de confinement qui en découlent.

Il est important de souligner que la piézométrie a été réalisée à l'échelle régionale dans le but d'estimer la recharge. Il est donc possible que la comparaison avec des données à l'échelle locale diffère. L'utilisation de ces surfaces doit être vérifiée avant utilisation.

Le [tableau A3.1](#) qui suit présente le contenu des répertoires de l'annexe électronique *A3_Piezometrie*.

Tableau A3.1 Contenu de l'annexe électronique *A3_Piezometrie*

Nom du fichier ou dossier	Description du contenu
KT_Piezo_BT	Répertoire des données d'entrées et de sorties pour l'interpolation par krigeage avec dérive externe sur la topographie pour la région des Basses Terres du Saint-Laurent (voir la section suivante pour la description des fichiers)
KT_Piezo_Lt	Répertoire des données d'entrées et de sorties pour l'interpolation par krigeage avec dérive externe sur la topographie pour la région des Laurentides (voir la section suivante pour la description des fichiers)
Piezo_finale	Répertoire contenant la matrice finale pour l'ensemble de la région d'étude

Compilation des données piézométriques

Les données utilisées pour réaliser la carte piézométrique sont essentiellement les niveaux d'eau inscrits dans la base de données du SIH ainsi que ceux des puits du réseau de suivi RSESQ. Les données ont été extraites à l'aide de MATLAB. Elles ont également été filtrées pour éliminer les doublons. Sur les 30 870 données, 1 995 doublons ont été rejetés. Sur les 28 875 données retenues, 23 068 se situent dans les Laurentides et 5 807 dans les Basses Terres du Saint-Laurent. La construction de la carte piézométrique a été réalisée en deux parties pour tenir compte des caractéristiques physiographiques différentes des deux régions représentées dans la zone d'étude, soit les Basses Terres du Saint-Laurent et les Laurentides.

La [planche 22a](#) présente la couverture spatiale des données piézométriques retenues sur l'ensemble du territoire à l'étude.

Points de contrôle aux cours d'eau

Pour les fins de la production de la carte piézométrique, il a été choisi de ne pas utiliser de point de contrôle aux cours d'eau. L'ajout de point de contrôle aux cours d'eau nécessite une étape de validation qui demande du temps et qui n'était pas justifiée dans le cadre du présent projet où une carte piézométrique régionale simplifiée était suffisante au besoin de l'étude. Les cours d'eau ont été considérés en utilisant un krigeage avec dérive externe sur la topographie, ce qui a également permis de mieux représenter le niveau de l'eau dans les secteurs où il n'y a pas de données, par exemple dans les Laurentides où il y a peu d'information dans les secteurs les plus élevés.

Quelques points de contrôle ont tout de même été imposés dans la région des Basses Terres, soit en bordure de la rivière des Prairies et au droit de certaines carrières afin de corriger certaines anomalies régionales. Pour ces corrections, dans le secteur de la pointe nord-est de Laval, le niveau de l'eau a été attribué à l'élévation de la rivière des Prairies.

Interpolation des données piézométriques

Pour tenir compte de la différence de morphologie du terrain entre les Basses Terres du Saint-Laurent qui couvre le sud de la région d'étude et les Laurentides qui s'étendent au nord, la carte piézométrique a été réalisée en deux parties. Une interpolation a été réalisée pour chacune de ces régions.

L'interpolation des données de niveau d'eau pour obtenir la piézométrie a été réalisée à l'aide du logiciel AR2GeMS (Ar2Tech, 2017). Les données de krigeage ont ensuite été filtrées à l'aide d'ArcGIS (ESRI, 2017). La grille de krigeage utilisée est de 250 m par 250 m. Les sections qui suivent décrivent les différentes étapes de production de la surface piézométrique pour chacune des deux régions. Le [tableau A3.2](#) suivant présente le contenu des répertoires qui contiennent les fichiers électroniques nécessaires à la réalisation de la piézométrie pour les deux régions de la zone d'étude, soit les Basses Terres du Saint-Laurent (*KT_Piezo_BT*) et les Laurentides (*KT_Piezo_Lt*).

Tableau A3.2 Contenu des fichiers électroniques des répertoires *KT-Piezo_BT* et *KT_Piezo_Lt*

Nom du dossier	Description du contenu
couchesSIG	Comprend la matrice pour la surface piézométrique ainsi que le <i>shapefile</i> des données utilisées pour le krigeage
data	Données d'entrée pour le krigeage
grid	Grille d'interpolation au 250 m basée sur le MNE
parametre	Paramètres utilisés pour le krigeage
resultat	Les données de sortie (résultat de l'interpolation) comprenant le résultat brut ainsi que le résultat filtré. Le résultat a été corrigé dans Arc Map afin d'atténuer les effets du krigeage en bordure de carrière et en bordure de la rivière des Prairies dans le secteur est de Laval.
vario	Le graphique ainsi que les paramètres du variogramme utilisé (modèle de variogramme et le variogramme expérimental)

Variogrammes

Les variogrammes omnidirectionnels sont présentés aux figures A3.1 et A3.2 ci-dessous. Ils ont été réalisés à l'aide du logiciel AR2GeMS (Ar2Tech, 2017). Pour les deux régions, l'ajustement est obtenu à l'aide d'une structure sphérique. Les paramètres du modèle de variogramme sont présentés dans le tableau A3.3 pour les Basses Terres du Saint-Laurent et dans le tableau A3.4 pour les Laurentides. Les figures A3.1 et A3.2 présentent les variogrammes pour chaque région.

Tableau A3.3 Paramètres du modèle du variogramme pour les Basses Terres du Saint-Laurent

Effet pépité	Angle	Structure 1				
		Type	Contribution	Portée		
				max	med	min
35	0	Sphérique	400	7200	7200	0

Figure A3.1 Variogramme omnidirectionnel pour la piézométrie des Basses Terres du Saint-Laurent

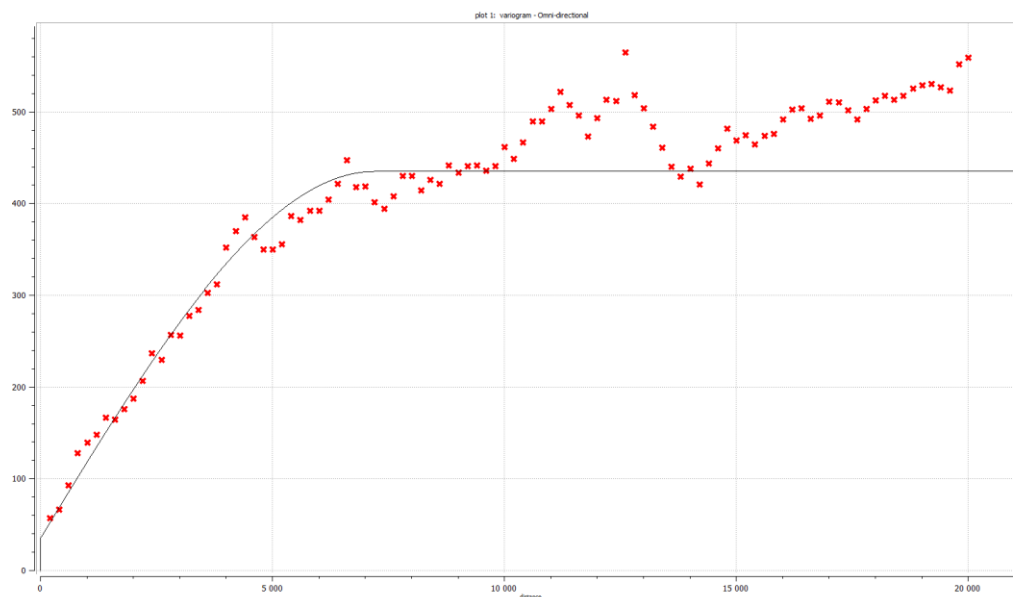
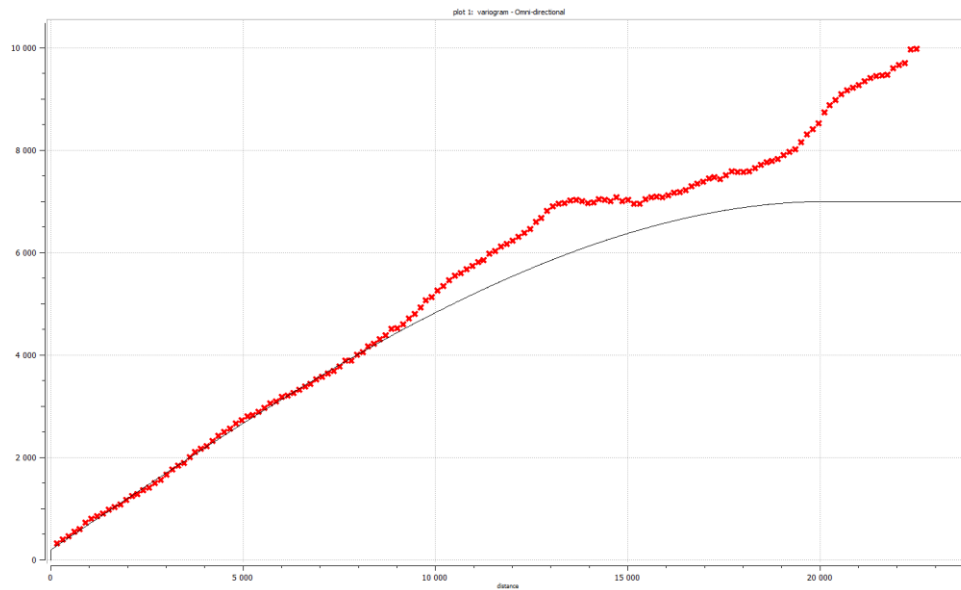


Tableau A3.3 Paramètres du modèle du variogramme pour les Laurentides

Effet pépité	Angle	Structure 1				
		Type	Contribution	Portée		
				max	med	min
200	0	Sphérique	6800	20250	20250	0

Figure A3.2 Variogramme omnidirectionnel pour la piézométrie des Laurentides

Interpolation

La carte piézométrique ([planche 22](#)) a été produite par krigeage avec dérive externe sur la topographie.

Pour la portion des Laurentides, le rayon de recherche est limité à 7 000 m puisque le modèle de variogramme ne représente pas bien les données au-delà de cette distance. Toutefois, les zones qui ne présentent pas de données ont été estimées en augmentant le rayon de recherche à 17 000 m. Étant donné l'utilisation de la dérive externe, les endroits avec peu de données sont plutôt influencés par la dérive, donc même s'il le rayon de recherche est supérieur à la zone valide du variogramme, l'estimation est tout de même considérée représentative pour les zones avec peu de données pour les fins des présents travaux.

La surface piézométrique a été réalisée à la suite de plusieurs itérations afin d'éliminer les données piézométriques profondes qui n'étaient pas représentatives de la surface libre. Dans un premier temps, les niveaux d'eau ayant une profondeur supérieure à 100 m ont été exclus. Dans un deuxième temps les niveaux d'eau supérieure à 60 m ont été exclus pour comparer les 2 résultats. Étant donné qu'il y a beaucoup de données contradictoires, seules les données de niveau d'eau inférieure à 60 m ont été retenues.

Les données de niveau d'eau retenues pour le krigeage sont présentées sur la [planche 22a](#). Le krigeage avec dérive externe sur la topographie a été réalisé pour les deux régions de la zone d'étude. Le krigeage a été réalisé sur le champ `zEau` du fichier `XYNivEau1018a.posBT0218.csv` pour les Basses Terres et du fichier `NivEau0109L_b.csv` pour les Laurentides.

La matrice piézométrique finale a été obtenue en combinant la piézométrie des Basses Terres et celles des Laurentides. Cette matrice a ensuite été corrigée pour éliminer l'incohérence de la valeur piézométrique dans certains secteurs ponctuels. Notamment, dans le secteur de certaines carrières et en bordure de la rivière des Prairies, principalement

dans le secteur nord-est de Laval. Le [tableau A3.4](#) résume les couches SIG finales qui ont été produites pour réaliser la carte piézométrique régionale de la région de Laval et des Laurentides.

Tableau A3.4 Couches SIG finales produites pour la piézométrie

Nom couche finale	Type de fichier	Description de la couche
XYNivEau1018aposBT0218.shp	shapefile	Données utilisées pour l'interpolation dans les Basses Terres
XYNivEau0109L_b.shp	shapefile	Données utilisées pour l'interpolation dans les Laurentides
pz0219	matrice	<u>Résultat de l'interpolation</u> par krigeage avec dérive externe sur la topographie (MNE). Le krigeage a été réalisé sur le champ <i>zEau</i> du fichier <i>XYNivEau1018aposBT0218.csv</i> pour les Basses Terres et du fichier <i>NivEau0109L_b.csv</i> pour les Laurentides.
pz0219cor	matrice	Matrice finale corrigée pour éliminer les valeurs piézométriques incohérentes dans certains secteurs dans les Basses Terres (carrières, bordure de la rivière des Prairies).

Annexe 4

Exécution de HELP avec le module *pyhelp*

*Cette annexe décrit la démarche pour procéder au lancement des simulations d'estimation de la recharge avec HELP en utilisant le module *pyhelp* qui a été spécialement développé à cet effet.*

Description du module *pyhelp*

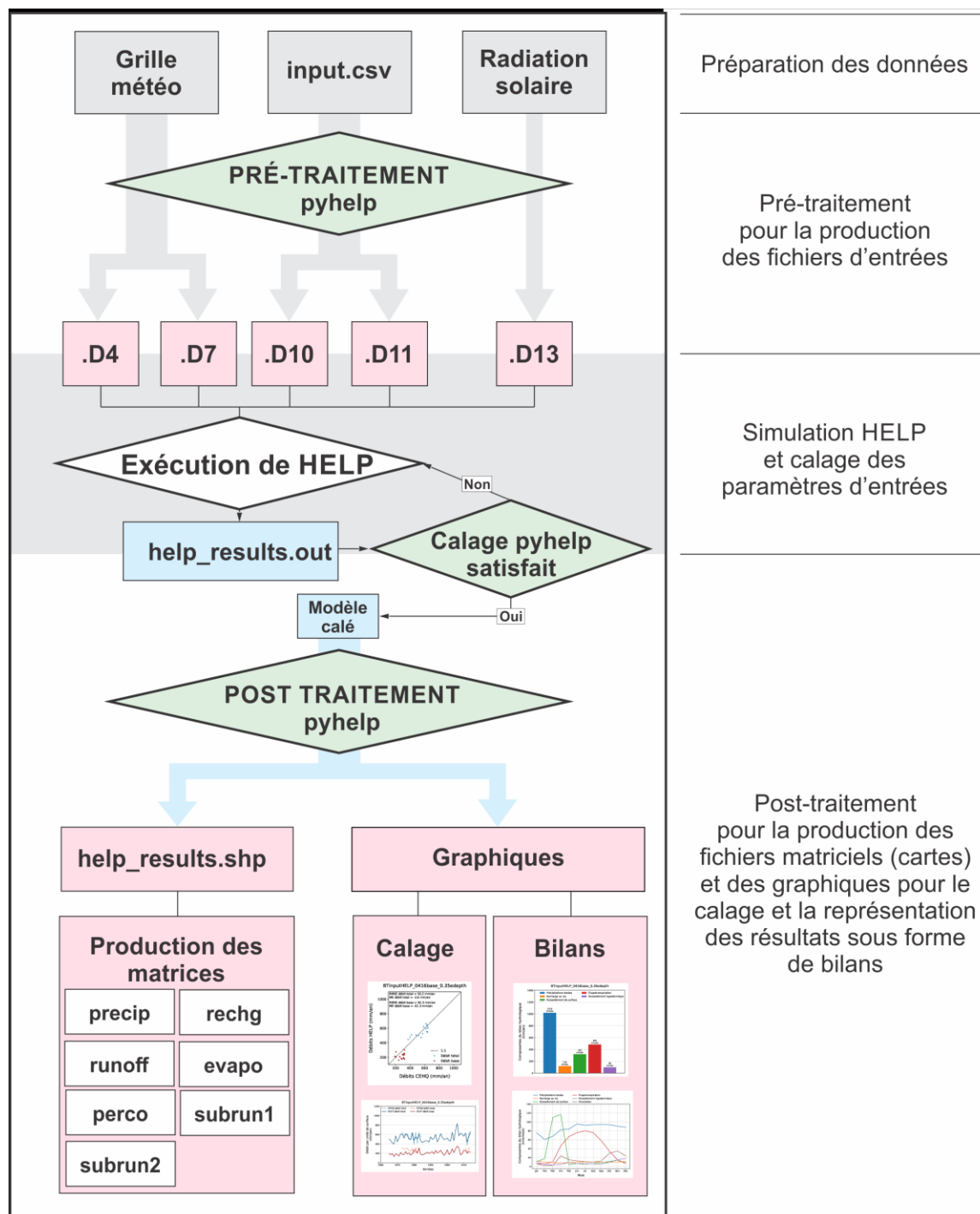
Des outils développés dans le cadre de la présente étude ont permis de lancer le programme HELP à partir d'un module Python, *pyhelp* (Gosselin, 2018) qui est disponible sur GitHub. Un exemple d'utilisation du module *pyhelp* à partir d'un script Python est présenté à la Figure A4.3. Le module *pyhelp* a été développé par Gosselin (2018) afin de faciliter l'exécution du programme HELP. Cet outil permet entre autres :

- D'extraire les données météorologiques journalières (température et précipitation) de la grille climatologique du Service Info-Climat et de convertir ces données en format HELP;
- De convertir les données de radiations solaires du CWEEDS en format HELP;
- De s'assurer que le format des données d'entrées soit compatible à HELP;
- De modifier la température de fonte de la neige utilisée par HELP;
- De modifier les paramètres de calage à l'intérieur d'un script Python, ce qui évite d'avoir à repasser les données dans d'autres logiciels lors de l'étape du calage et accélère ainsi le processus de calage;
- De manipuler les résultats des simulations HELP pour procéder au calcul des composantes du bilan (précipitations, recharge, évapotranspiration, ruissellement de surface, ruissellement hypodermique);
- De produire des graphiques présentant les résultats de calage et l'écart entre les débits mesurés et calculés;
- De produire des graphiques des composantes de bilan (annuel, mensuel et moyen pour toute la période simulée);
- De produire un shapefile des résultats calculés des composantes du bilan pour chaque cellule.

En somme, le module *pyhelp* permet de gérer le processus d'exécution de HELP de la production des fichiers d'entrées (.D4, .D7, .D10, .D11 et .D13) [pré-traitement] dans le format HELP jusqu'à la production d'un shapefile qui permet la production des matrices des résultats [post-traitement]. Le module *pyhelp* produit également les graphiques nécessaires à l'analyse et l'interprétation en post-traitement. La figure A4.1 illustre un schéma des étapes gérées par *pyhelp*.

Les instructions détaillées du fonctionnement détaillé de ce module sont décrites dans le manuel *pyhelp* (Gosselin, 2018) disponible sur GitHub.

Figure A4.1 Schéma des étapes gérées par pyhelp



PRÉ-TRAITEMENT – Production des fichiers d'entrées

Le pré-traitement comprend les manipulations qui permettent d'obtenir les fichiers d'entrées pour HELP. Cinq fichiers d'entrées sont nécessaires pour représenter chaque cellule. On les distingue en deux types, les fichiers météo et les fichiers de paramètres physiques.

Fichiers météo

L'application HELP utilise des fichiers d'entrées de données météorologiques avec un format particulier. Les fichiers de précipitations (.D4), de températures (.D7) et de radiation solaire (.D13) doivent être créés pour chaque cellule. Ces fichiers météo ont été générés à l'aide du module *pyhelp*. Ce module permet de formater dans le format HELP, les données journalières de températures et de précipitations à partir des données de la grille climatologique d'Info-Climat (MDDELCC, 2018). De plus, il permet également de produire les fichiers de radiation solaire provenant du CWEEDS (2018).

Fichier d'entrée des paramètres physiques pour chaque cellule

La principale tâche consiste à intégrer les paramètres physiques pour chaque cellule dans le format du fichier *input.csv*. Le fichier d'entrée *input.csv* comprend toutes les informations nécessaires au calcul HELP pour chaque cellule. Il comprend notamment le numéro de la cellule, les coordonnées X et Y, la vitesse du vent, l'humidité trimestrielle, le début et la fin de la période de croissance des végétaux, l'indice de surface foliaire, le numéro de courbe, la profondeur d'évapotranspiration, le nombre de couches, numéro de la séquence stratigraphique, les propriétés physiques des sols et des unités géologiques (capacité au champ, conductivité hydraulique saturée, point de flétrissement, pente, distance aux drains). De plus, des champs sont prévus dans le fichier *input.csv* afin de permettre la sélection de cellules, par exemple par bassin versant ou par régions. Ces sélections sont réalisées directement dans le code à l'aide du module *pyhelp*, ce qui facilite la manipulation des données et évite les erreurs de manipulation. Ces champs sont particulièrement utiles lors du calage pour faire les modifications nécessaires. **Le nom des champs doit être respecté.** Les noms des champs sont présentés à la figure A4.2 et le [tableau A4.2](#) présente une brève description du contenu du champ. Le module *pyhelp* produit les fichiers .D10 et .D11 pour chaque cellule à partir du fichier *input.csv*. Le script s'assure du type et ajuste les données du fichier *input.csv* dans le format utilisé par HELP. Par exemple la vitesse du vent doit être un entier pour que HELP reconnaisse la valeur. Cette étape permet d'éviter des erreurs liées à la mauvaise construction du fichier *input*.

Pour la présente étude, le fichier *input.csv* a été créé à l'aide d'un script MATLAB. Les fichiers *.dbf* produits à partir d'ARCGIS ont directement été importés avec MATLAB.

Figure A4.2 Nom des champs du fichier input.csv

cid	lay_type1	lay_type2	lay_type3	lay_type4	lay_type5	lay_type6	lay_type7	run
lat_dd	thick1	thick2	thick3	thick4	thick5	thick6	thick7	Bassin
lon_dd	poro1	poro2	poro3	poro4	poro5	poro6	poro7	Contexte
wind	fc1	fc2	fc3	fc4	fc5	fc6	fc7	BordEau
hum1	wp1	wp2	wp3	wp4	wp5	wp6	wp7	conbt0311
hum2	ksat1	ksat2	ksat3	ksat4	ksat5	ksat6	ksat7	conlt0311
hum3	dist_dr1	dist_dr2	dist_dr3	dist_dr4	dist_dr5	dist_dr6	dist_dr7	ContextBT
hum4	slope1	slope2	slope3	slope4	slope5	slope6	slope7	ContextLt
growth_start	← Champs pour les propriétés physiques (sols et unités géologiques) →							BT
growth_end								Urbain
nlayer								Culture
nseq								UtilSolCod
LAI								
EZD								
CN								

↑
Champs pour faire des sélections

Tableau A4.1 Description des champs du fichier input.csv

Nom du champ	Unité	Description du contenu du champ	Valeurs limites
cid		Numéro de la cellule	
lat_dd	degrés	Latitude de la cellule	
lon_dd	degrés	Longitude de la cellule	
wind	km/h	Vitesse normale du vent	
hum1		Humidité par saison (de janvier à mars)	
hum2		Humidité par saison (de avril à juin)	
hum3		Humidité par saison (de juillet à septembre)	
hum4		Humidité par saison (de octobre à novembre)	
growth_start	jour julien	Début de la saison de croissance des plantes	
growth_end	jour julien	Fin de la saison de croissance des plantes	
nlayer		Nombre de couches défini pour HELP	
nseq		Numéro de la séquence stratigraphique	
LAI		Indice de surface foliaire (Leaf area index)	0 à 5
EZD	cm	Profondeur racinaire	3 à 80
CN		Numéro de courbe (<i>Curve Number</i>)	
lay_type#		Type de couche HELP pour la couche #	1, 2 ou 3
thick#	cm	Épaisseur de la couche #	
poro#	vol/vol	Porosité de la couche #	
fc#	vol/vol	Capacité au champ (<i>Field Capacity</i>) de la couche #	
wp#	vol/vol	Point de flétrissement (<i>Wilting Point</i>) de la couche #	
ksat#	cm/s	Conductivité hydraulique saturée de la couche #	
dist_dr#	m	Distance aux drains	
slope#	%	Pente	0.5 à 49.9

↑
Reproduire ces lignes autant de fois qu'il y a de couches à décrire

Nom du champ	Unité	Description du contenu du champ	Valeurs limites
Champs permettant de faire des sélections pour le post-traitement de HELP			
run		Identifie les cellules qui seront calculées par HELP (0, 4, 5 : Cellule non calculée, 1 : Cellule calculée)	0,1, 4 ou 5
bassin		Identifie les cellules par bassins versants (1 : Rivière Du Chêne, 2 : Rivière du Nord)	1 ou 2
context		Identifie les cellules par contexte (0 : Cellule eau, 1 : Cellule normale, 2 : Cellule bord de cours d'eau avec ruissellement hypodermique superficiel, 3 : Cellule bord de cours d'eau avec ruissellement hypodermique profond, 4 : Cellule urbaine et 5 : Cellule non cartographiée)	0 à 5
bordeau		Identifie les cellules qui se trouvent en bordure d'un cours d'eau (1: Bord d'un cours d'eau, 0: Reste des cellules)	0 ou 1
conbt0311		Contexte Basses-Terres (voir tableau 4.1)	1 à 5
conlt0311		Contexte Laurentides (voir tableau 4.2)	1 à 3
ContextBT		Contexte Basses-Terres (voir tableau 4.1)	1 à 5
ContextLt		Contexte Laurentides (voir tableau 4.2)	1 à 3
BT		Identifie les cellules qui se trouvent dans les Basses-Terres (1: BT, 0: Reste des cellules)	0 ou 1
Urbain		Identifie les cellules en zone urbaine (1= Zone urbaine)	0 ou 1
Culture		Identifie les cellules en zone agricole (1= Culture)	0 ou 1
UtilSolCod		Utilisation simplifiée du sol	1 à 5

TRAITEMENT – Exécution de HELP

Le traitement correspond à l'exécution de HELP à partir de *pyhelp*. C'est lors de cette étape que les calculs sont exécutés pour chaque cellule. Les fichiers d'entrées de HELP, préalablement produit par le module *pyhelp*, sont utilisés pour lancer l'exécution de HELP pour chaque cellule de la grille en parallèle. Lors de l'exécution, HELP calcule le ruissellement (de surface et hypodermique), l'évapotranspiration, la percolation et la recharge pour chaque cellule. Ces résultats sont enregistrés par HELP dans des fichiers en format texte avec l'extension *.OUT*. Le code source de HELP a été modifié pour changer le format de sortie des résultats. Cette modification facilite la lecture des données et réduit considérablement le temps de calcul de *pyhelp*. Le module *pyhelp* produit une table des résultats en format *.shp*. Cette table permet de produire les matrices qui serviront à produire les cartes de résultats de la simulation HELP.

Le fichier de sortie final comprend également le résultat pour la région des Laurentides ainsi que celui des Basses Terres dans le même fichier. Cette manipulation est possible grâce au champ BT qui permet de sélectionner chacune des deux régions.

Une modification dans le code source de HELP a permis de modifier la température du gel au sol à partir d'une fonction. Ce paramètre peut ainsi facilement être modifié ce qui

permet maintenant le calage de ce paramètre. Le module *pyhelp* permet aussi d'accéder aux différents paramètres du fichier input.csv pour réaliser les modifications et ajustements qui facilitent le calage. Tel que mentionné à la section précédente, des champs permettent de faire des sélections sans avoir à manipuler à nouveau les données avec d'autres logiciels. Par exemple, la sélection à l'aide du champ *Bassin* permet de sélectionner un bassin de calage et ainsi procéder au calcul de la recharge seulement pour les cellules de ce bassin. Le [tableau A4.1](#) décrit en détail le contenu des champs utilisés pour réaliser les différentes sélections.

Tableau A4.2 Description des champs du fichier résultat de HELP *help_results_0424.shp*

Nom du champ	Unité	Description du contenu du champ
cid	-	Numéro de la cellule
precip	mm/an	Précipitations moyennes annuelles
rechg	mm/an	Recharge moyenne annuelle
runoff	mm/an	Ruissellement moyen annuel
evapo	mm/an	Évapotranspiration moyenne annuelle
perco	mm/an	Percolation moyenne annuelle
subrun1	mm/an	Ruissellement hypodermique moyen annuel
subrun2	mm/an	Ruissellement hypodermique profond moyen annuel

Figure A4.3 Module *pyhelp* pour le lancement de HELP

```

7  import os.path as osp
8  from pyhelp.managers import HELPManager
9
10 # %% Initialise the HELP input manager
11
12 workdir = "C:\\Users\\User\\pyhelp\\example"
13 path_to_grid = osp.join(workdir, "inputHELP_0416base.csv")
14
15 help_manager = HELPManager(workdir, year_range=(1965, 2014))
16 grid = help_manager.load_grid(path_to_grid)
17
18 # %% Prepare the input files
19
20 # cellnames = grid['cid'][grid['Bassin'] == 2].tolist()
21 cellnames = grid['cid'][grid['BT'] == 1].tolist()
22
23 # Prepare the weather input datafiles D4 and D7
24 path_netcdf_dir = "D:/MeteoGrilleDaily"
25 help_manager.generate_d4d7_from_MDELCC_grid(path_netcdf_dir, cellnames)
26
27 # Prepare solar radiation input datafile D13
28
29 fname_d13 = "MTLINTL.D13"
30 fpath_cweed2 = osp.join(workdir, "CWEEDS", "94792.WY2")
31 fpath_cweed3 = osp.join(
32     workdir, "CWEEDS", "CAN_QC_MONTREAL-INTL-A_7025251_CWEEDS2011_T_N.WY3")
33
34 help_manager.generate_d13_from_cweeds(
35     fname_d13, fpath_cweed2, fpath_cweed3, cellnames)
36
37 # Prepare evapotranspiration and soil and design input datafiles D11 and D10
38
39 help_manager.generate_d10d11_input_files(
40     cellnames, sf_edepth=0.35, sf_ulai=0.35)
41
42 # sf_edepth = scaling factor evaporation depth
43 # sf_ulai = scaling factor LAI
44
45 # %% Run HELP for all cellnames
46
47 path_hdf5 = osp.join(workdir, 'help_example.out')
48 help_manager.run_help_for(path_hdf5, cellnames, tfsoil=-3)
49
50 # %% Calculate surface water cells
51
52 evp_surf = 650
53 path_outfile = osp.join(workdir, 'surface_example.out')
54 help_manager.calc_surf_water_cells(
55     evp_surf, path_netcdf_dir, path_outfile, cellnames)
56

```

POST-TRAITEMENT – Production des graphiques des résultats

Le post-traitement comprend la transformation des résultats obtenus par HELP en outils d'analyse des résultats. Une fois que le résultat de HELP est obtenu, le module *pyhelp* permet de visualiser les résultats sous forme de graphique. Des graphiques de calage et des graphiques des composantes du bilan hydraulique sont produits. La [section 5.5](#) décrit les différents graphiques produits pour chaque résultat de simulation.

Annexe 5

Fichiers électroniques des données brutes, des fichiers de travail et des résultats des simulations HELP calées

Cette annexe comprend les fichiers électroniques des données brutes, des fichiers de travail ainsi que des résultats des simulations HELP qui accompagnent le présent rapport.

Données Brutes

Les données brutes correspondent aux données sources initiales tel que décrit au [tableau 2.2](#) du rapport. Le [tableau A5.1](#) présente le contenu du dossier *DonneesBrutes* en annexe électronique.

Tableau A5.1 Contenu du dossier *DonneesBrutes*

Dossier	Nom du fichier	Contenu
CouvertureSol	<i>CouvertureSol.gdb</i> (<i>CSC2000-V_031G_2_0</i> , <i>CSC2000-V_031H_2_0</i> , <i>CSC2000-V_031I_3_1</i> , <i>CSC2000-V_031J_3_0</i> , <i>CSC2000-V_031K_2_0</i> , <i>CSC2000-V_031N_3_0</i> , <i>CSC2000-V_031O_3_0</i>)	Géodatabase qui regroupe les couches de couverture du sol (RNCAN, 2009)
Cultures	<i>AAFC_CI_2015_QC.zip</i>	Inventaire des cultures (AAC, 2015)
Cultures	<i>AAFC_CI_2015_QCutm.tif</i>	Inventaire des cultures (AAC, 2015) projetée en UTM zone 18N
Cultures	<i>type_cult</i>	Inventaire des cultures (AAC, 2015) découpée pour la zone d'étude
Debit_St_Jaugeage	<i>040110_Q.txt</i> , <i>040406_Q.txt</i> , <i>046701_Q.txt</i> , <i>046709_Q.txt</i>	Fichier de débit des stations de jaugeage (CEHQ, 2018)
MNE	<i>DEM.tif (JOB_ID-7576)</i> , <i>DEM.tif (JOB_ID-7579)</i>	Modèle numérique d'élévation (MNE) [RNCAN, 2016]

Dossier	Nom du fichier	Contenu
Pedologie	<i>Pedo_Laval_Laurentides.zip</i>	Données pédologiques (IRDA, 2018) À obtenir de l'IRDA qui est propriétaire de ces données.
Pedologie	<i>Pedo_Hydro.zip</i>	Groupes hydrologiques (IRDA, 2018) À obtenir de l'IRDA qui est propriétaire de ces données.
Pedologie	<i>Banque_donnees_sols.xls</i>	Banque de données des sols (IRDA, 2018) À obtenir de l'IRDA qui est propriétaire de ces données.
Pente	<i>SLOPE.tif</i>	Pente (RNCAN, 2016)
Vegetaux	<i>CLI_SC_MOY_DEBUT_79_08.gdb</i> , <i>CLI_SC_MOY_FIN_79_08.gdb</i>	Matrice du début et de la fin de la période de croissance des végétaux (AAC, 2016)

Fichiers de travail

Les fichiers de travail comprennent tous les fichiers qui ont été utilisés et sont nécessaires à la production des fichiers d'entrées ou des données de calage. Par exemple, le fichier *Curve_Number.xlsx* comprend toutes les informations nécessaires pour reproduire le calcul du numéro de courbe. Le [tableau A5.2](#) présente le nom des fichiers et un résumé de son contenu.

Tableau A5.2 Contenu du dossier *FichiersTravail*

Nom du fichier	Contenu
<i>Banque_donnees_sols_INRS.xlsm</i>	Chiffrier contenant les feuilles de calculs qui ont servi à estimer les proportions moyennes de sable, de silt et d'argile pour en déduire une texture de sol.
<i>BassesTerres.shp</i>	Polygone de localisation des Basses Terres du Saint-Laurent
<i>BassinsCalage.shp</i>	Polygones qui délimitent les bassins de calage
<i>Curve_Number.xlsx</i>	Chiffrier des tableaux produits pour calculer le numéro de courbe (<i>Curve Number</i>)
<i>DebitBase.xlsx</i>	Calculs ainsi que les graphiques des débits totaux et de base
<i>input_sol0416base.csv</i>	Comprend toutes les données nécessaires au calcul HELP pour le cas de base. Les champs du fichier <i>input</i> donnent les valeurs des paramètres pour chaque cellule. Les champs du fichier <i>input</i> sont décrits à l' annexe 4 .

Nom du fichier	Contenu
<i>mask.shp</i>	Polygone qui sert à masquer les secteurs qui ne font pas partie de la zone cartographiée.
<i>mask_Laval.shp</i>	Polygone qui sert à masquer les secteurs qui ne font pas partie de la région de Laval.
<i>Pedo_proprietes0224.shp</i>	Les données pédologiques extraites pour chaque point de la grille et qui ont été associées aux textures USDA
<i>type_couv0224</i>	Matrice de la couverture de sol reclassée pour une cellule de 250 m par 250 m
<i>type_cult0305</i>	Matrice du type de culture reclassée pour une cellule de 250 m par 250 m
<i>XYgrid_help0311.shp</i>	Grille contenant les données des surfaces du modèle stratigraphique 3D et de la piézométrie sur la grille de 250 m par 250 m.
<i>zone_couv1.shp</i>	Polygone de la zone cartographiée
<i>ZoneEtude.shp</i>	Polygone de la zone d'étude qui couvre Laval et les Laurentides

Résultats HELP

Les résultats produits à la suite de la modélisation HELP sont regroupés dans le fichier *ResultatsHELP*. Le [tableau A5.3](#) présente le nom des fichiers et un résumé de leurs contenus.

Tableau A5.3 Contenu du dossier *ResultatsHELP*

Nom du fichier	Contenu
<i>help_output_0416.zip</i>	HELP produit 1 fichier texte par cellule; donc, environ 150 000 fichiers pour toute la région d'étude. <i>Pyhelp</i> fait la lecture de ces fichiers textes à mesure qu'ils sont produits par HELP, modifie le format des données et sauvegarde les données en format matriciel dans un fichier binaire. Cette archive comprend ainsi 4 fichiers binaires HDF5 qui contiennent tous les résultats mensuels pour chacune des cellules sous forme matricielle, ce qui permet de manipuler le tout très rapidement. · <i>help_BTALL_inputHELP_0416base_0.35edepth.out</i> (Résultats tirés des fichiers textes produits par HELP pour toutes les Basses Terres) · <i>surface_BTALL_inputHELP_0416base_0.35edepth.out</i> (Résultats calculés pour les cellules de type "Eau" pour toutes les Basses Terres) · <i>help_LAUALL_inputHELP_0416t3_0.15edepth.out</i> (Résultats tirés des fichiers textes produits par HELP pour toutes les Laurentides)

	· <i>surface_LAUALL_inputHELP_0416t3_0.15edepth.out</i> (Résultats calculés pour les cellules de type "Eau" pour toutes les Laurentides)
<i>help_output_figure_0424.zip</i>	Comprend les figures produites par <i>pyHelp</i> pour chaque simulation HELP
<i>help_results_0424.zip</i>	Comprend le shapefile de la grille des résultats dans deux systèmes de projection (lat-long et UTM zone 18N) ainsi les matrices des résultats. Les matrices des résultats sont produites à partir du shapefile. Les noms des champs du shapefile et des matrices finales sont présentés à l' annexe 4 (tableau A4.2) .