



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

**COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA
DOSSIER PUBLIC 8036**

**Travaux de caractérisation hydrogéologique dans la
plateforme sédimentaire du Saint-Laurent, région de Saint-
Édouard-de-Lotbinière, Québec**

**P. Ladevèze, C. Rivard, R. Lefebvre, D. Lavoie, M. Parent, X. Malet,
G. Bordeleau, J.-S. Gosselin**

2016

Canada



COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA DOSSIER PUBLIC 8036

Travaux de caractérisation hydrogéologique dans la plateforme sédimentaire du Saint-Laurent, région de Saint- Édouard-de-Lotbinière, Québec

**P. Ladevèze^{1,2}, C. Rivard¹, R. Lefebvre², D. Lavoie¹, M. Parent¹, X. Malet^{1,2},
G. Bordeleau¹, J.-S. Gosselin²**

¹ Commission géologique du Canada, Québec, Québec

² Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement, Québec, Québec

2016

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2016

Le contenu de cette publication ou de ce produit peut être reproduit en tout ou en partie, et par quelque moyen que ce soit, sous réserve que la reproduction soit effectuée uniquement à des fins personnelles ou publiques mais non commerciales, sans frais ni autre permission, à moins d'avis contraire.

On demande seulement :

- de faire preuve de diligence raisonnable en assurant l'exactitude du matériel reproduit;
- d'indiquer le titre complet du matériel reproduit et le nom de l'organisation qui en est l'auteur;
- d'indiquer que la reproduction est une copie d'un document officiel publié par Ressources naturelles Canada (RNCAN) et que la reproduction n'a pas été faite en association avec RNCAN ni avec l'appui de celui-ci.

La reproduction et la distribution à des fins commerciales sont interdites, sauf avec la permission écrite de RNCAN. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec RNCAN à rncan.copyrightdroitdauteur.rncan@canada.ca.

doi:10.4095/297891

On peut télécharger cette publication gratuitement à partir de GEOSCAN (<http://geoscan.rncan.gc.ca/>).

Notation bibliographique conseillée

Ladevèze, P., Rivard, C., Lefebvre, R., Lavoie, D., Parent, M., Malet, X., Bordeleau, G. et Gosselin, J.-S., 2016.

Travaux de caractérisation hydrogéologique dans la plateforme sédimentaire du Saint-Laurent, région de Saint-Édouard-de-Lotbinière, Québec; Commission géologique du Canada, Dossier public 8036, 112 p.

doi:10.4095/297891

Les publications de cette série ne sont pas révisées, elles sont publiées telles que soumises par l'auteur.

Résumé

Ce dossier public vise à décrire les travaux de caractérisation hydrogéologique qui ont été réalisés dans la région de Saint-Édouard-de-Lotbinière, dans le sud du Québec, dans le cadre d'un projet sur les impacts potentiels de l'exploration et de l'exploitation des gaz de shale sur les aquifères. La région d'étude couvre environ 500 km² dans la portion nord-est de la plateforme sédimentaire du Saint-Laurent, entre le fleuve Saint-Laurent et le piémont appalachien. Quinze puits d'observation ont été forés au roc lors du projet. La majorité des puits ont environ 50 mètres de profondeur (150 mètres pour le plus profond). L'épaisseur et les propriétés hydrauliques des dépôts quaternaires ont été investiguées au droit de chacun des forages. Suite à ces investigations, quatre hydrofaciès ont été définis pour représenter l'hétérogénéité des dépôts à l'échelle de la région d'étude. De plus, les variations piézométriques et barométriques ont été suivies sur l'ensemble des puits sur une période allant d'un à deux ans. Ceci a permis de caractériser le comportement de l'aquifère régional et de déterminer les conditions de confinement des nappes recoupées par les puits. Il a ainsi été démontré que le substrat rocheux de la région renferme des nappes généralement captives. Enfin, les conductivités hydrauliques du socle rocheux ont également été estimées grâce à des essais *in situ* de perméabilité à charge variable. Celles-ci s'étalent sur quatre ordres de grandeur et sont généralement plus faibles à proximité du piémont appalachien. Ces travaux contribuent à améliorer la connaissance des aquifères dans une région où les enjeux de quantité et de qualité de la ressource en eaux souterraines sont importants.

Table des matières

Résumé.....	i
1 Introduction.....	1
1.1 Contexte du projet et objectifs	1
1.2 Présentation de la zone d'étude	1
1.3 Géologie du secteur.....	2
2 Forage des puits d'observation	6
2.1 Objectifs	6
2.2 Méthodologie	6
2.3 Répartition des puits sur le territoire.....	9
2.4 Rapports de forages	11
2.5 Inspection vidéo – Aspect des parois et correction du scellement de certains puits	12
3 Suivi piézométrique	14
3.1 Niveaux d'eau et barométrie.....	14
3.2 Données climatiques	17
3.3 Comparaison des variations piézométriques dans les puits	18
3.4 Carte piézométrique	21
3.5 Synthèse	24
4 Propriétés hydrauliques des dépôts quaternaires	25
4.1 Classification des dépôts quaternaires en hydrofaciès	25
4.2 Conductivités hydrauliques des hydrofaciès	31
4.3 Synthèse	35
5 Confinement de l'aquifère rocheux	36
5.1 Analyse basée sur le niveau de la nappe.....	36
5.2 Analyse des caractéristiques des dépôts meubles	36
5.3 Analyse à partir des hydrogrammes de puits	37
5.4 Analyse des conditions de confinement à l'aide des réponses barométriques.....	39
5.5 Synthèse et discussion	45
6 Propriétés hydrauliques du roc	47
6.1 Méthodologie de terrain	47
6.2 Solutions analytiques utilisées pour l'interprétation.....	50
6.3 Résultats obtenus et discussion	51
6.4 Validation des valeurs de K.....	55
6.5 Recommandations pour d'autres travaux dans un contexte de roc de très faible K.....	56
7 Conclusion	59
Remerciements	60
Bibliographie.....	61
Annexes.....	65

Liste des Tableaux

Tableau 1. Localisation et principales caractéristiques de construction des puits d'observation	10
Tableau 2. Définition des hydrofaciès et des conductivités hydrauliques (K) apparentes selon les sources de données utilisées.....	26
Tableau 3. Calcul du coefficient d'uniformité des échantillons de dépôts meubles collectés le long des forages F2, F3 et F4 (données issues d'une lecture graphique de la figure 24) ...	30
Tableau 4. Détail du calcul de la conductivité hydraulique à partir des mesures prélevées avec un perméamètre de Guelph	32
Tableau 5. Valeurs du paramètre α utilisées pour le calcul de la conductivité hydraulique de chacun des hydrofaciès à l'aide du perméamètre de Guelph.	33
Tableau 6. Valeurs de conductivité hydraulique (K) moyennes calculées pour chaque site et valeurs moyennes par hydrofaciès (HF).....	33
Tableau 7. Épaisseurs cumulées des hydrofaciès (HF) utilisées pour la définition du degré de confinement.....	37
Tableau 8. Épaisseurs cumulées de chacun des hydrofaciès dans les puits et conditions de confinement correspondantes.....	37
Tableau 9. Allure des variations piézométriques – définition du degré de confinement.....	38
Tableau 10. Allure des variations piézométriques des puits et conditions de confinement correspondantes	38
Tableau 11. Modèle théorique de fonction de réponse barométrique correspondant à chacun des puits - conditions de confinement correspondantes	44
Tableau 12. Récapitulatif des résultats obtenus avec les quatre méthodes et choix finaux pour le type de nappe recoupée par les différents puits	46
Tableau 13. Principales hypothèses et conditions d'application des solutions utilisées.....	51
Tableau 14. Valeurs numériques de conductivité hydraulique mesurées sur chacun des puits	52

Liste des Figures

Figure 1. Topographie de la région de Saint-Édouard	3
Figure 2. Les dépôts quaternaires de la région de Saint-Édouard.....	4
Figure 3. Géologie du roc de la région de Saint-Édouard.....	5
Figure 4. Forage carotté (au diamant) : puits F4 (a.) et F7 (b.).....	7
Figure 5. Échantillons de sédiments.....	7
Figure 6. Différents types d'échantillonnage lors des forages carottés.....	8
Figure 7. Forage des puits par la méthode destructive (puits F5).....	9
Figure 8. Exemple du rapport de forage du puits F2.....	11
Figure 9. Puits F5 et F6 au nord : le rabattement de la nappe avec pompage a permis d'observer des venues d'eau dans les 15 premiers mètres	12
Figure 10. Puits F13, au sud de la région, à sec : les fractures en surface sont non productrices ..	12
Figure 11. Élargissement observé à la base du casing d'un des forages.....	13
Figure 12. Mauvais ancrage du tubage.....	13
Figure 13. Configuration typique des instruments installés dans les puits d'observation pour le suivi du niveau d'eau.....	14
Figure 14. Comparaison des fluctuations piézométriques.	16
Figure 15. Exemple de l'hydrogramme de puits du puits d'observation F1	17
Figure 16. Moyennes mensuelles des températures et des précipitations mesurées à la station météorologique de Fortierville entre novembre 2013 et novembre 2015	17
Figure 17. Variations piézométriques sur une année.....	19
Figure 18. Hydrogramme du puits F3.....	20
Figure 19. Hydrogramme du puits F7.....	20
Figure 20. Variogrammes expérimentaux et théoriques générés pour deux directions : dans le sens de l'écoulement (a.) et perpendiculaire à l'écoulement (b.)	22
Figure 21. Piézométrie dans le roc.....	23

Figure 22. Colonnes hydro-stratigraphiques simplifiées des forages du projet présentant la répartition des HF.....	27
Figure 23. Cartographie des hydrofaciès	28
Figure 24. Compilation des courbes granulométriques des échantillons collectés dans les puits d'observation F2, F3 et F4	29
Figure 25. Perméamètres de Guelph installés sur le terrain	32
Figure 26. Conductivités hydrauliques (K) moyennes, minimales et maximales de chacun des quatre hydrofaciès (HF)	34
Figure 27. Exemples théoriques de réponses barométriques typiques pour des cas idéalisés dans des aquifères libres, captifs et avec stockage dans le puits	41
Figure 28. Exemples représentatifs des courbes de fonction de réponse barométrique pour chacun des puits classés par type modèle théorique de réponse barométrique	42
Figure 29. Matériel utilisé pour réaliser les essais par la méthode pneumatiques	48
Figure 30. Exemples d'enregistrements acquis par le capteur de pression lors de deux essais réalisés à la suite sur un puits du projet.....	48
Figure 31. Conductivités hydrauliques (K) estimées avec deux solutions analytiques.....	52
Figure 32. Compilation des moyennes géométriques, ainsi que des valeurs minimales et maximales de K selon la localisation des puits dans les grands domaines structuraux de la région d'étude.	53
Figure 33. Distribution spatiale des valeurs de K	54
Figure 34. Comparaison des résultats d'essais de perméabilité in situ obtenus avec les trois méthodes de terrain utilisées pour les solutions de Bouwer & Rice (1976) et solution KGS (1994).	56
Figure 35. Dispositif de terrain pour un essai de perméabilité pneumatique avec un diamètre de puits réduit.....	58
Figure 36. Dispositif de terrain pour le «shut-in test»	58

Liste des Annexes

Annexe 1. Aspect général des carottes prélevées dans chacun des puits du projet.....	65
Annexe 2. Rapports de forage.....	67
Annexe 3. Comparaison des variations de températures et précipitations avec les variations piézométriques pour chacun des puits du projet	88
Annexe 4. Courbes de variation de charge normalisée des essais de perméabilité in situ réalisés sur les puits forés lors du projet	102

1 Introduction

1.1 Contexte du projet et objectifs

Les résultats de travaux de terrain présentés dans le présent dossier public ont été menés dans le cadre d'un projet portant sur l'évaluation des impacts environnementaux potentiels liés au développement des gaz de shale sur les aquifères de la région de Saint-Édouard-de-Lotbinière (nom usuel : Saint-Édouard), dans le sud du Québec. Ce projet est réalisé par la Commission géologique du Canada, dans le cadre du programme Géoscience environnementale du Secteur des Sciences de la Terre de Ressources naturelles Canada.

L'objectif du projet est d'étudier les liens géologiques et hydrogéologiques potentiels entre le Shale d'Utica (situé entre environ 1000 et 2500 m de profondeur) qui a été la cible de travaux d'exploration gazière de 2006 à 2010 et les aquifères superficiels (eau douce allant jusqu'à environ 100-150 m de profondeur). Il a été choisi d'étudier les Basses-terres du St-Laurent et la région de Saint-Édouard pour plusieurs raisons. La première étant que le secteur renferme des ressources gazières potentielles encore non exploitées et correspond donc à un terrain « vierge » quant à la fracturation hydraulique. En effet, dans l'ensemble des Basses-terres du Saint-Laurent, seulement 28 puits d'exploration ont été forés pour évaluer le potentiel gazier non conventionnel du Shale d'Utica. Deux puits ont été forés à Saint-Édouard par la compagnie *Talisman Energy* (A267 et A275). Le puits A275 est un puits horizontal et a fait l'objet de fracturation hydraulique en 2010. La deuxième raison est que les aquifères de la région de Saint-Édouard, et de façon plus générale, des Basses-terres du Saint-Laurent, sont largement utilisés pour l'alimentation en eau potable. La protection des ressources en eau souterraine est donc un enjeu majeur sur ce territoire.

Dans le cadre du projet, 15 puits d'observation terminés dans les aquifères superficiels rocheux ont été forés. Les travaux de caractérisation hydrogéologique menés à l'intérieur ou au droit de ces puits (mesure des propriétés hydrauliques des dépôts quaternaires et du roc, suivi piézométrique et barométrique et identification des conditions de confinement des aquifères) sont documentés dans le présent dossier public. Le territoire étudié ainsi que la localisation des puits sont présentés aux figures 1, 2 et 3.

1.2 Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude se situe en bordure du fleuve Saint-Laurent, à environ 50 km au sud-ouest de la ville de Québec (figure 1). Elle constitue un territoire d'environ 500 km², délimité au nord par le fleuve Saint-Laurent. La zone d'étude est située dans les limites administratives des municipalités de Leclercville, Lotbinière, Saint-Édouard-de-Lotbinière et Sainte-Croix. Le relief est peu marqué dans la région, les altitudes les plus élevées concernent la portion sud-est du territoire (autour de 160 m d'altitude), les altitudes diminuent ensuite progressivement vers le nord-ouest, en se rapprochant du fleuve Saint-Laurent (figure 1). La majeure partie du territoire d'étude se situe dans les Basses-terres du Saint-Laurent. Il est bordé au sud-est par la bordure occidentale des Appalaches (piémont appalachien). Les deux puits gaziers A267 et A275 se situent au sud-est de la zone d'étude, en bordure du domaine appalachien.

Le secteur est principalement occupé par des terres agricoles. Dans ces zones, les dépôts meubles renferment des ressources en eaux souterraines en quantité et qualité très variables. Ainsi, l'aquifère rocheux est celui le plus exploité par les puits résidentiels, malgré que celui-ci soit généralement peu perméable. Toutefois, la plupart des puits des municipalités du secteur sont installés dans les unités de sable et gravier les plus productives du secteur.

1.3 Géologie du secteur

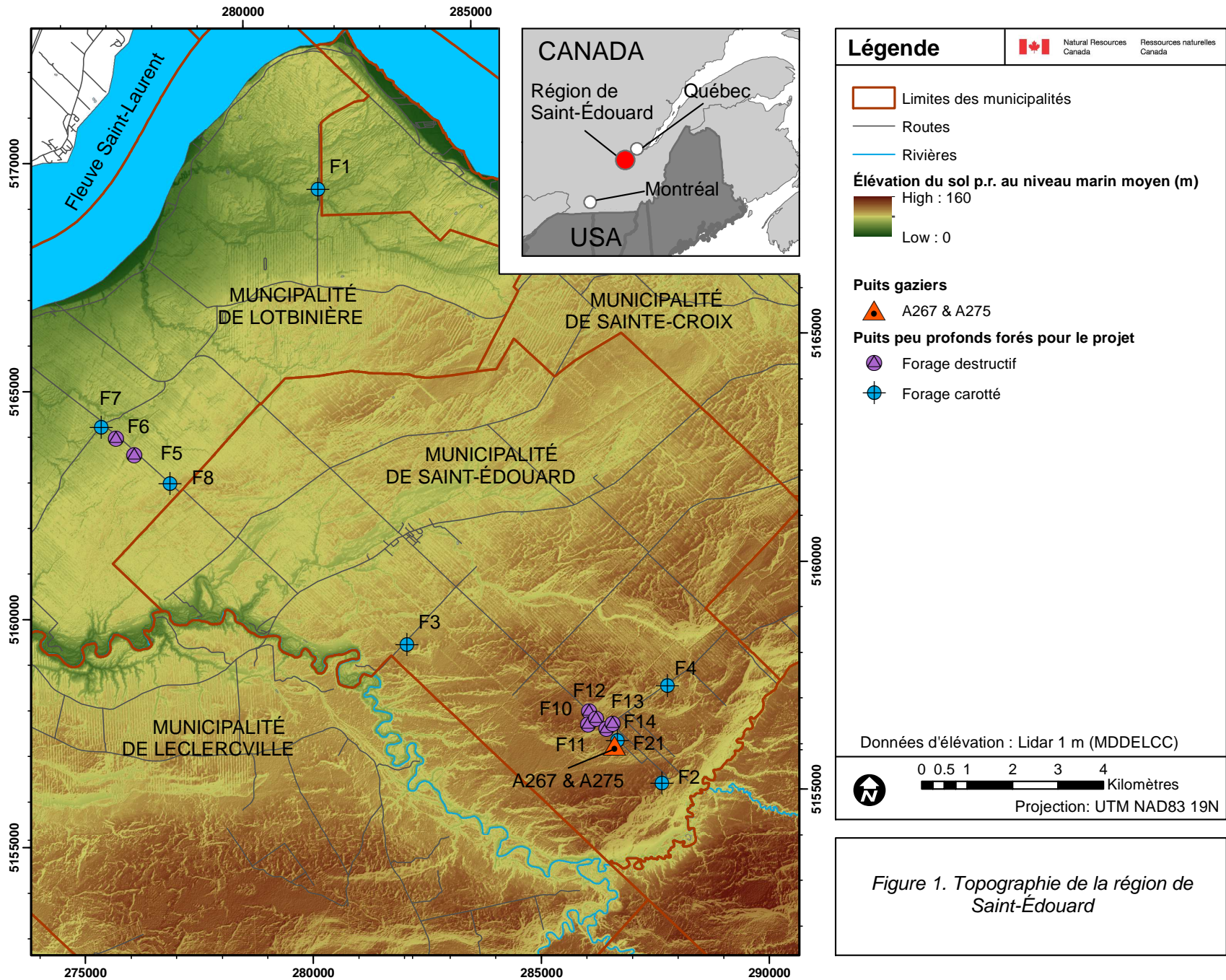
1.3.1 Les dépôts quaternaires

Les dépôts quaternaires du secteur présentent une importante hétérogénéité lithologique et spatiale. Ils témoignent de l'histoire géologique quaternaire complexe de la région de Saint-Édouard. Le secteur a en effet subi plusieurs épisodes glaciaires, dont le dernier entre 80 000 et 10 000 ans BP (Wisconsinien), ainsi qu'un épisode marin majeur qui s'est déroulé entre 13 000 ans BP et 11 100 ans BP (Occhietti et Richard, 2003) (Mer de Champlain).

Les sédiments déposés au Quaternaire sont principalement des sédiments marins et glaciomarins associés à l'épisode de la Mer de Champlain (Lefebvre et al., 2015). Les épandages glaciaires sont nombreux au sud-est de Sainte-Croix (figure 2 : till à matrices très variées : sableuses, silteuses et argileuses). Des dépôts alluviaux et fluvioglaciaires plus grossiers (sables et graviers), se sont aussi localement déposés dans le secteur. Une cartographie des dépôts quaternaires dans le secteur à l'étude est présentée en figure 2 d'après les travaux de Légaré-Couture et al. (2016, en prep.).

1.3.2 Le socle rocheux

La région est divisée en trois grands domaines tectono-stratigraphiques (figure 3). Au nord-ouest, les Basses-terres du Saint-Laurent appartiennent aux domaines autochtone et parautochtone de la plateforme sédimentaire du Saint-Laurent (sensu St-Julien et Hubert, 1975) et sont constituées de roches de l'Ordovicien Supérieur (Lavoie, 2008). Au sud-est, le piémont appalachien est situé dans le domaine allochtone externe de la Zone de Humber (St-Julien et Hubert, 1975, Williams, 1979), cette zone renferme des roches sédimentaires et volcaniques du Cambrien à l'Ordovicien Supérieur (Lavoie, 2008). Dans le domaine autochtone, les roches se sont déposées dans un contexte tectono-stratigraphique de bassin d'avant pays (Lavoie, 2008). Elles ont subi des déformations compressives de faible intensité (synclinal de Chambly-Fortierville et anticlinal de Leclercville). Une faille normale affecte également les successions du secteur (Faille de la rivière Jacques-Cartier) (figure 3). Les principales lithologies sont des shales gris/noirs et des siltstones de la Formation de Nicolet (Groupe de Lorraine) et les shales noirs calcaires de la Formation de Lotbinière (Groupe de Sainte-Rosalie) (Globensky, 1987). Dans les domaines parautochtone et allochtone, les épisodes de déformations ont été plus intenses. Ceci se traduit par la présence de failles de chevauchement et de rétrochevauchement associées aux épisodes orogéniques ayant affecté la région (St-Julien et al., 1983). Les unités stratigraphiques du domaine parautochtone sont les mêmes que celles du domaine autochtone, la distinction entre les deux domaines étant le degré de déformation plus important dans le parautochtone (Comeau et al., 2004). Les principales lithologies du domaine allochtone sont des shales noirs avec des interlits de calcaire argileux, de dolomite et de siltstones, le tout fortement tectonisé (Clark et Globensky, 1973, Clark et Globensky, 1976).



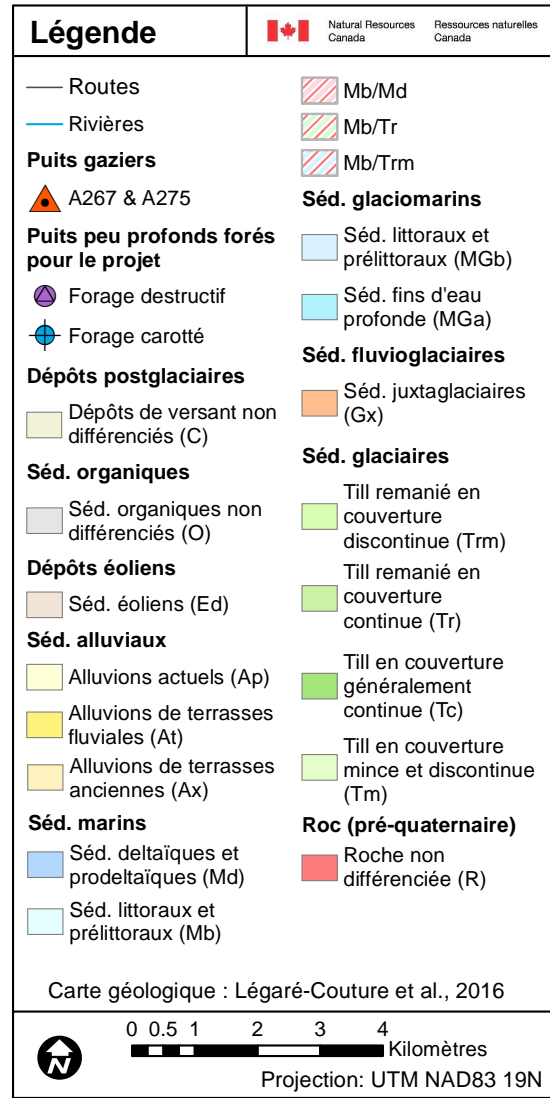
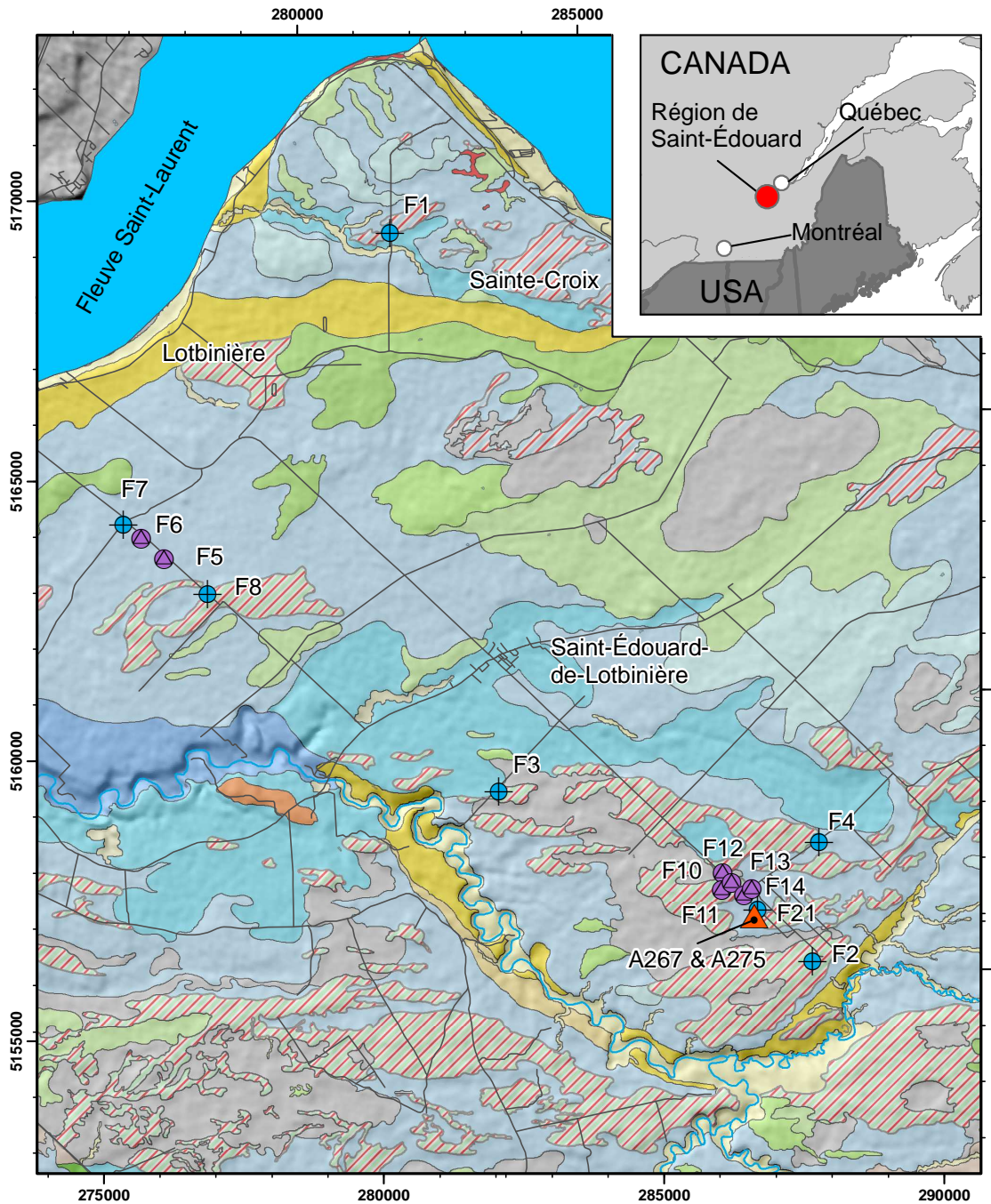
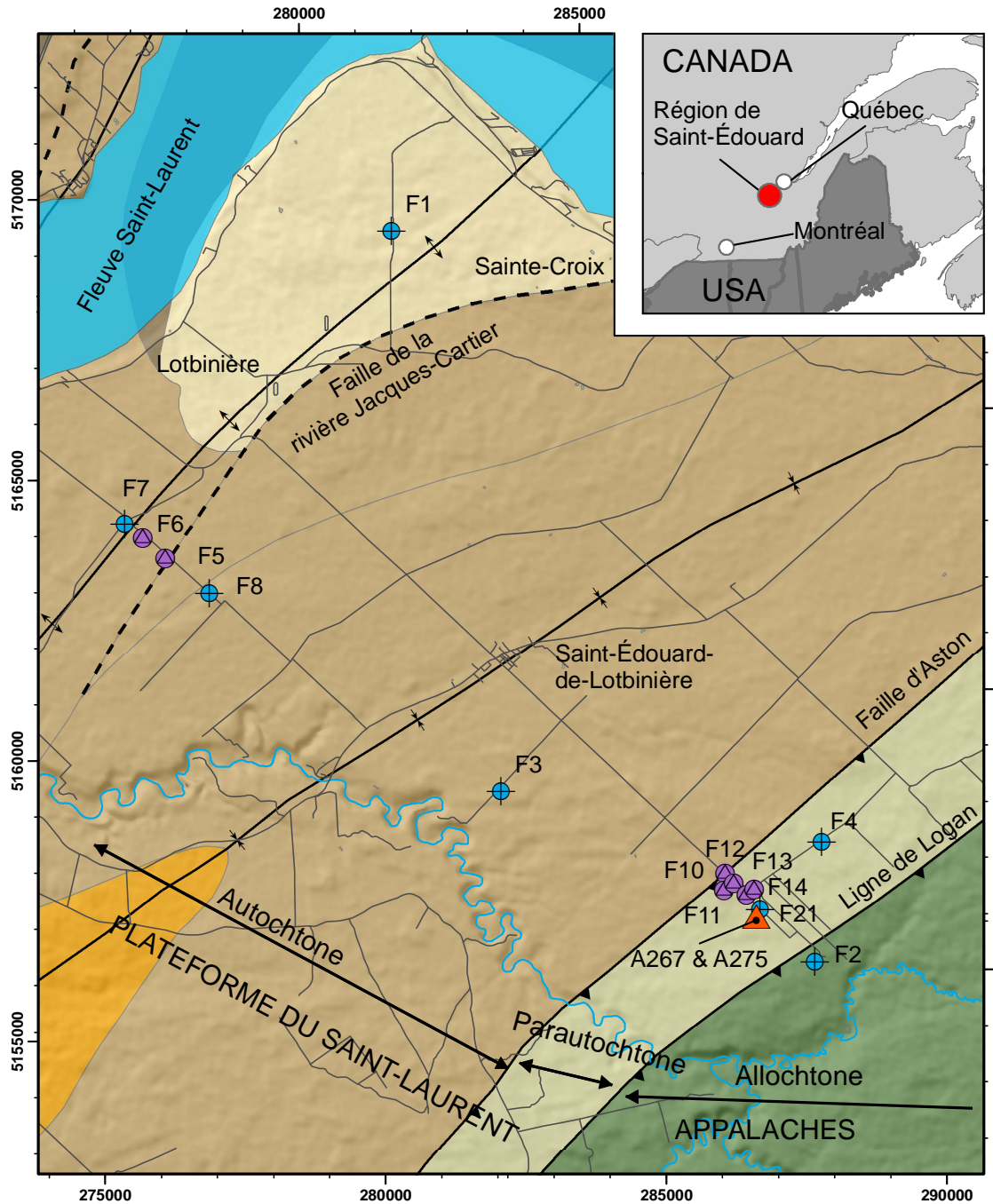


Figure 2. Les dépôts quaternaires de la région de Saint-Édouard




















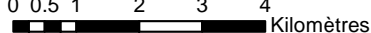
Légende		 Natural Resources Canada / Ressources naturelles Canada
	Routes	
	Rivières	
Puits gaziers		
	A267 & A275	
Puits peu profonds forés pour le projet		
	Forage destructif	
	Forage carotté	
Domaine autochtone		
Ordovicien supérieur		
	Gp. de Lorraine (Fm. de Pontgravé)	
	Gp. de Lorraine (Fm. de Nicolet)	
	Gp. de Ste.-Rosalie (Fm. de Lotbinière)	
	Shale d'Utica	
Domaine parautochtone		
Ordovicien supérieur		
	Gp. de Ste.-Rosalie (Fm. de LesFonds)	
Domaine allochtone		
	Fm. de Bourret	
	Anticlinal de Leclercville	
	Synclinal de Chambly-Fortierville	
	Faille normale	
	Faille de chevauchement	
Carte géologique : Thériault & Beauséjour, 2012		
		0 0.5 1 2 3 4 Kilomètres
Projection: UTM NAD83 19N		

Figure 3. Géologie du roc de la région de Saint-Édouard

2 Forage des puits d'observation

2.1 Objectifs

Un total de 15 forages a été réalisé durant les automnes 2013 et 2014. Ces forages ont tous été aménagés en puits d'observation. L'objectif de ces forages était d'acquérir des données sur les caractéristiques du roc et des fluides présents dans l'aquifère rocheux fracturé. Les travaux suivants ont été menés dans ces puits :

1. Caractérisation de la stratigraphie des dépôts meubles et du roc
2. Suivi temporel des variations piézométriques
3. Évaluation des propriétés hydrauliques du roc
4. Caractérisation des structures géologiques (fractures, failles) affectant le roc
5. Échantillonnage de roches et d'eau pour analyses géochimiques
6. Diagraphies géophysiques

Seuls les résultats associés aux trois premiers points (stratigraphie, suivi piézométrique et propriétés hydrauliques) font l'objet de ce rapport. Des travaux supplémentaires concernant les points 1 et 2 seront abordés dans Ladevèze et al. (2016a, en prep.). Le quatrième point sera traité dans Ladevèze et al. (2016b, en prep.). Les quatrième et cinquième points sont les sujets des publications de Lavoie et al. (2016) pour la roche, ainsi que de Bordeleau et al. (2016a, en prep.), Bordeleau et al. (2016b, en prep.), Bordeleau et al. (2016c, en prep.) et de Rivard et al. (2016, en prep.) pour l'eau souterraine. Enfin, les diagraphies (point 6) ont fait l'objet du dossier public suivant : Crow et Ladevèze (2015).

2.2 Méthodologie

Les forages ont entre 30 et 147 m de profondeur, mais la majorité ont une profondeur de 50 m. Un puits a dû être foré plus profondément que prévu à cause de l'épaisse couche de dépôts quaternaires pour avoir au moins 20 m dans le roc sous ces dépôts (puits F4). Le forage F21, situé juste à côté des puits de *Talisman Energy*, a été foré jusqu'à une profondeur de 147 m afin de caractériser les zones un peu plus profondes, sous l'horizon foré pour les puits résidentiels. Deux méthodes de forage ont été utilisées : le forage « carotté » (au diamant, comme dans le cas du forage minier) et le forage destructif (similaire à ceux que font les puisatiers pour le forage des puits résidentiels).

2.2.1 Forage carotté

Une foreuse de type D60 (de la compagnie *Forages Comeau*) a été utilisée pour forer les puits d'observation F1, F2, F3, F4, F7, F8, F20 et F21 (figure 4) afin de récupérer les carottes de roche. Un carottier a été utilisé pour collecter les carottes de roche tout le long du trou de forage. Ces forages ont un diamètre de 96 mm (diamètre HQ, environ 3,8 po) et les carottes extraites font une longueur de 1,5 m (5 pieds) et ont un diamètre de 63 mm (2,5 po).



a.



b.

Figure 4. Forage carotté (au diamant) : puits F4 (a.) et F7 (b.)

Des échantillons dans les sédiments quaternaires ont également été prélevés à l'aide d'une cuillère fendue (figure 5, a.), de façon plus rapprochée au début du forage, puis plus espacée si l'épaisseur des dépôts était importante. Ceux-ci ont été conservés dans des sacs en plastique pour pouvoir les examiner à la loupe binoculaire par la suite et pour faire des analyses granulométriques (figure 5, b.). Ces analyses granulométriques ont été faites sur les dépôts quaternaires des forages F2, F3 et F4. Elles ont notamment contribué à confirmer le classement des dépôts en hydrofaciès (voir section 4.1). Les analyses ont été faites par tamisage pour la fraction grossière et par granulométrie laser pour la fraction fine (particules sous 0.125 mm de diamètre).



a.



b.

Figure 5. Échantillons de sédiments prélevés avec une cuillère fendue (a.) et emballés dans sacs plastique (b.)

Les carottes de roches ont été placées dans des boîtes de bois (figure 6, a.) et ont été entreposées à la carothèque du Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. Des échantillons de roche ont été prélevés généralement à tous les 10 à 15 m, selon trois techniques différentes, en fonction des analyses ciblées : dans des *isojars* pour les analyses de géochimie organique de la roche et des gaz présents *in situ* (figure 6, b.), dans des sachets de plastique sous

vide pour analyser l'eau interstitielle (figure 6, c.) et dans du papier aluminium désinfecté pour réaliser les analyses bactériennes (figure 6, d.). De plus, des analyses de chromatographie en phase gazeuse, de biomarqueurs et de *Rock-Eval 6* (*Vinci Technologies, France*) ont été faites sur des sections de carottes brutes. D'autres photos des carottes de roches prélevées dans les forages F1, F2, F3, F4, F7, F8, F20 et F21 sont présentées à l'annexe 1.

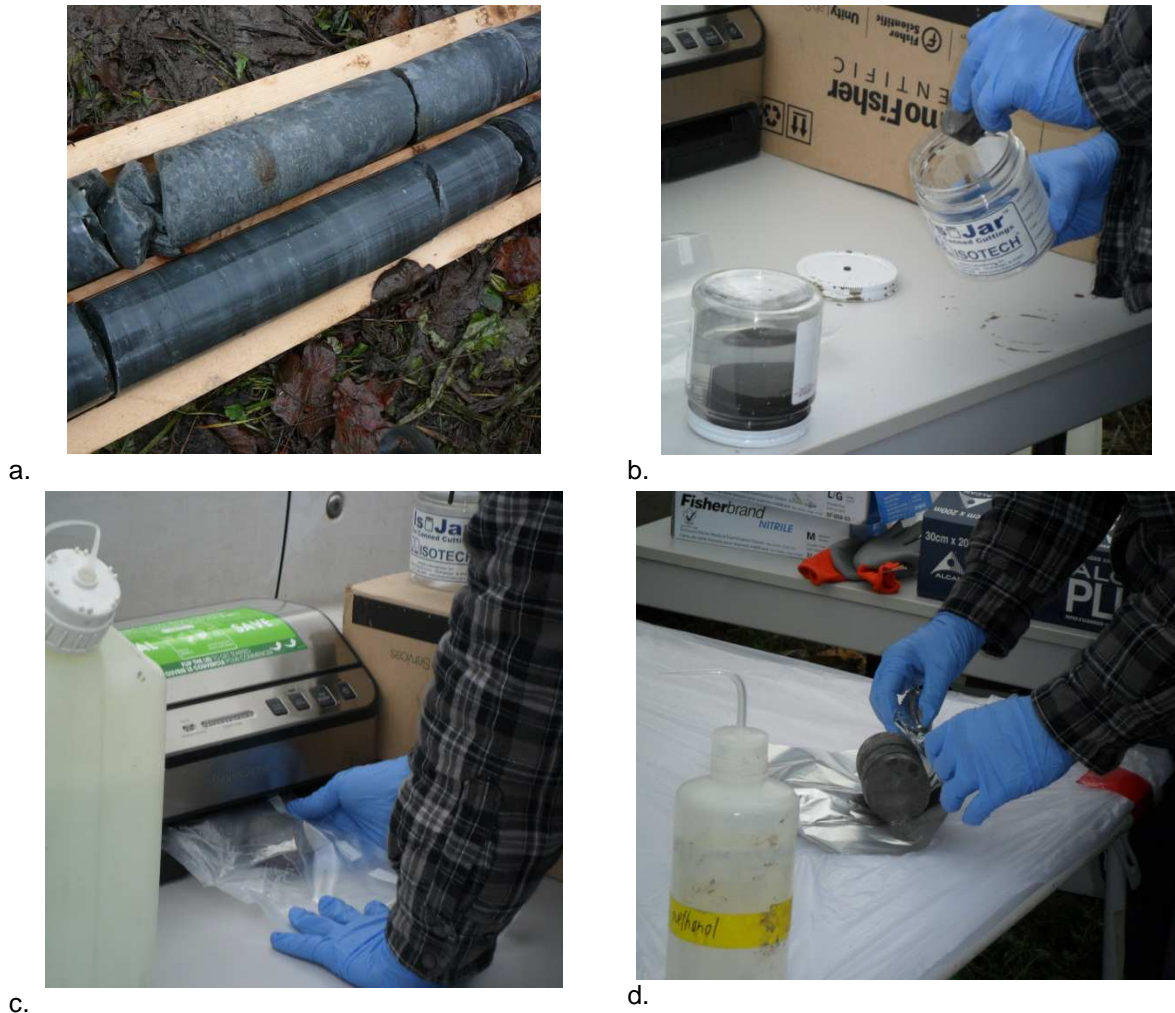


Figure 6. Différents types d'échantillonnage lors des forages carottés : carottes de roche (a.) mises dans des iso jars (b.), carottes de roche mises dans des sachets de plastique sous vide (c.), carottes de roche mises dans du papier aluminium (d.).

Les avantages de la méthode de forage carotté, outre le fait que le prélèvement de carottes de roches est possible, sont que les puits ont des parois lisses, moins sujettes aux éboulements. De plus, ces parois lisses permettent une meilleure observation des structures lors des diagrapies (sonde optique et acoustique, caméra vidéo). La foreuse utilisée ici (foreuse géotechnique) est également relativement peu encombrante, ce qui facilite l'accès aux sites. L'inconvénient est que le forage est nettement long et plus onéreux.

2.2.2 Forage destructif

Une foreuse Foremost DR-12W (Compagnie *Forage LBM inc.*), utilisant un marteau en fond de trou, a été utilisée pour forer les puits d'observation F5, F6, F10, F11, F12, F13 et F14 (figure 7). Ces forages ont un diamètre de 152 mm (6 po), comme en général les puits résidentiels. Lors des opérations de forage, l'utilisation d'un cyclone a permis une récupération efficace des retailles de forages (« cuttings ») afin d'identifier les lithologies traversées par le forage. Ces retailles ont également été récupérées dans des *isojars* en 2014.



Figure 7. Forage des puits par la méthode destructive (puits F5)

L'avantage majeur de l'utilisation de la méthode destructive est la rapidité d'exécution des travaux, ce qui limite également les frais engendrés par les opérations. Les inconvénients sont que les parois du puits sont plus rugueuses et propices aux éboulements dans le trou de forage (ce qui peut bloquer le puits à une certaine profondeur). Ce facteur limite également la qualité des diagraphies (surtout l'imagerie acoustique et optique des parois). Enfin, cette méthode implique une plus grosse logistique sur le terrain (deux camions), il est donc primordial d'avoir un accès facile et stable, peu importe la météo au site de forage, facteur souvent limitant pour le choix des sites.

2.3 Répartition des puits sur le territoire

Les puits ont été forés en deux phases. Dans la première phase, menée à l'automne 2013, l'objectif était de répartir quatre puits carottés sur l'ensemble de la zone d'étude afin d'obtenir des échantillons et des valeurs de paramètres hydrogéologiques dans les différentes unités géologiques. Dans la deuxième phase, réalisée à l'automne 2014, le but était principalement d'obtenir des informations à proximité des zones de failles cartographiées pour évaluer leur rôle dans les écoulements de l'eau souterraine, puisque les zones de failles peuvent représenter des chemins de migration potentiels depuis les unités profondes vers les aquifères. Sept puits destructifs et quatre puits carottés ont ainsi été forés.

Les localisations des deux types de puits sur le territoire sont présentées dans les figures 1, 2 et 3. Les coordonnées cartographiques et les principales caractéristiques des 15 forages réalisés pour le projet sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1. Localisation et principales caractéristiques de construction des puits d'observation

Localisation des puits (NAD83 UTM Zone19N)					Caractéristiques des puits (profondeurs par rapport à la surface du sol)					
Nom	X (m)	Y (m)	Z (m)	Municipalité	Méthode de forage	Diamètre du forage (mm) ¹	Profondeur de forage (m)	Profondeur du tubage (m)	Profondeur au roc (m)	Niveau d'eau statique (m) ²
F1	281 370	5 168 963	45.9	Lotbinière	Carotté	96	49.70	3.05	2.59	-0.02
F2	287 925	5 155 391	91.1	Saint-Édouard	Carotté	96	52.12	7.59	6.10	1.55
F3	282 584	5 158 820	74.1	Saint-Édouard	Carotté	96	49.99	20.30	20.12	0.79
F4	288 214	5 157 504	87.2	Saint-Édouard	Carotté	96	60.35	40.65	40.84	7.51
F5	276 903	5 163 441	50.2	Lotbinière	Destructif	152	51.82	12.19	9.75	1.26
F6	276 528	5 163 836	52.6	Lotbinière	Destructif	152	51.82	9.91	7.62	1.23
F7	276 263	5 164 099	49.3	Lotbinière	Carotté	96	51.51	13.54	11.43	3.74
F8	277 620	5 162 758	59.5	Lotbinière	Carotté	96	51.51	4.40	1.43	0.89
F10	286 450	5 157 073	90.5	Saint-Édouard	Destructif	152	30.48	16.98	15.85	-0.51
F11	286 396	5 156 776	93.9	Saint-Édouard	Destructif	152	54.86	4.78	4.57	1.73
F12	286 599	5 156 883	89.2	Saint-Édouard	Destructif	152	73.15	10.98	7.92	0.97
F13	286 807	5 156 653	89.0	Saint-Édouard	Destructif	152	60.96	4.72	1.83	0.84
F14	286 947	5 156 751	87.8	Saint-Édouard	Destructif	152	30.48	18.29	14.33	30.2 ³
F20	281 370	5 168 963	45.7	Lotbinière	Carotté	96	49.99	8.13	3.05	0.18
F21	287 026	5 156 377	88.7	Saint-Édouard	Carotté	96	152.10	21.00	3.66	4.77

¹ Conversion mm à po : 96 mm = 3.8 po ; 152 mm = 6 po

² Niveau d'eau par rapport à la surface du sol, axe positif vers le bas

³ Le niveau d'eau est resté proche de cette valeur pendant toute la durée du projet.

2.4 Rapports de forages

Les rapports de forage des puits d'observation forcés pour le projet sont présentés à l'annexe 2. Ces rapports ont été préparés avec le logiciel *Strater*[®]. Un exemple de ces rapports est présenté à la Figure 8. Ces rapports de forage récapitulent les informations suivantes :

- Les lithologies identifiées dans les dépôts meubles et le roc.
- Les profondeurs auxquelles ont été prélevés des échantillons de dépôts quaternaires (pour analyses granulométriques) et de roche.
- L'étendue des sections rocheuses investiguées par diagraphies. Le détail de ces diagraphies fait l'objet d'un autre dossier public (Crow et Ladevèze, 2015).
- Les principales caractéristiques de construction des puits.

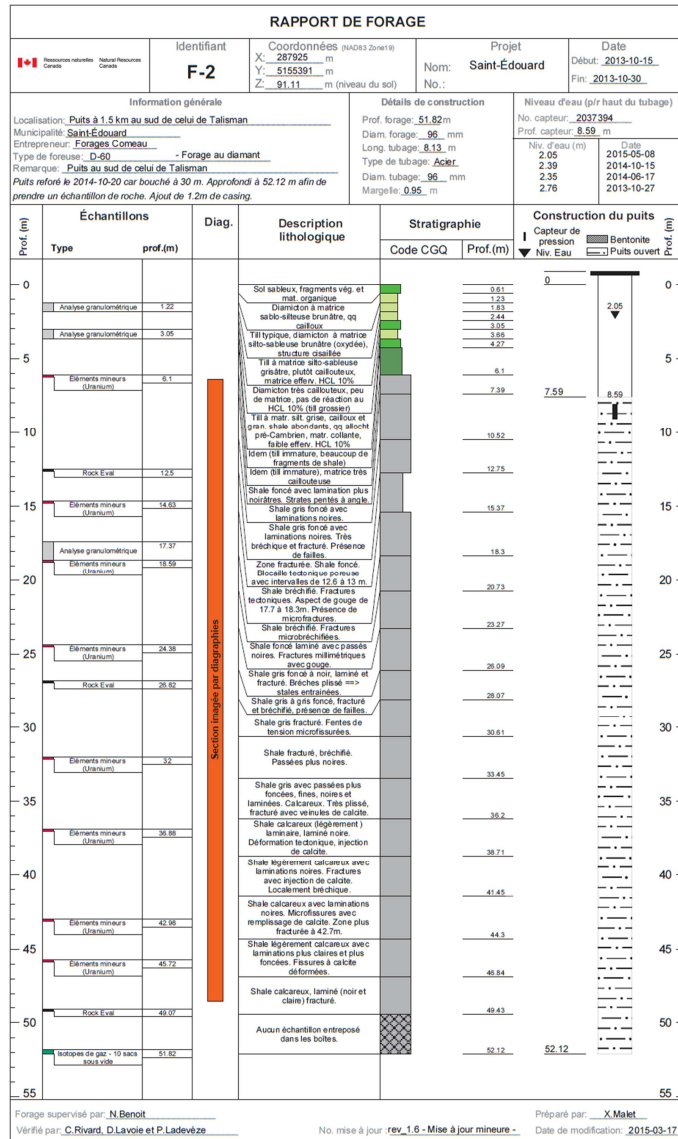
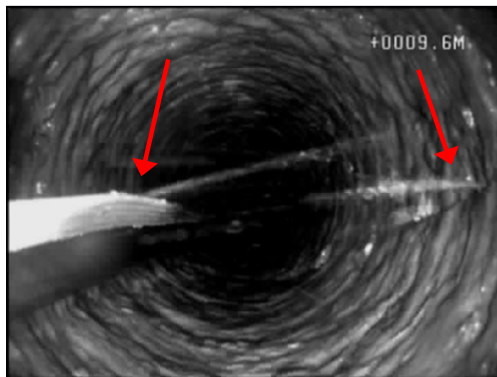


Figure 8. Exemple du rapport de forage du puits F2 (voir l'annexe 2 pour tous les rapports)

2.5 Inspection vidéo – Aspect des parois et correction du scellement de certains puits

Une inspection visuelle de plusieurs puits a été effectuée à l'aide d'une caméra vidéo à l'automne 2014, quelques jours après la fin des forages de la seconde phase (F5 et suivants) et environ un an après le forage des puits F1 à F4. L'inspection a permis d'observer certaines structures responsables de la perméabilité des puits. Dans les forages F5 et F6, le niveau d'eau était relativement près de la surface, mais l'eau était chargée de particules en suspension. Ainsi pour pouvoir observer les parois des forages, il a été nécessaire de pomper ces puits pour rabattre le niveau de l'eau (jusqu'à un rabattement de la nappe d'environ 20 m). Ce rabattement a permis d'observer des venues d'eau à divers endroits dans les 15 premiers mètres dans ces deux puits (figure 9). À l'inverse, dans les puits les plus au sud de la zone d'étude (F12, F13 et F14), le niveau d'eau n'était pas encore stabilisé et était très bas. Ceci a permis une visualisation des parois quasiment jusqu'au fond des puits, sans pompage de l'eau. La présence de fractures a également été observée, principalement en surface, soit dans les 20 premiers mètres. Cependant, ces discontinuités ne présentaient souvent aucun indice de circulation d'eau (venues d'eau ou simples suintements) (figure 10).



F6 : plusieurs venues d'eau significatives à 9.6 m

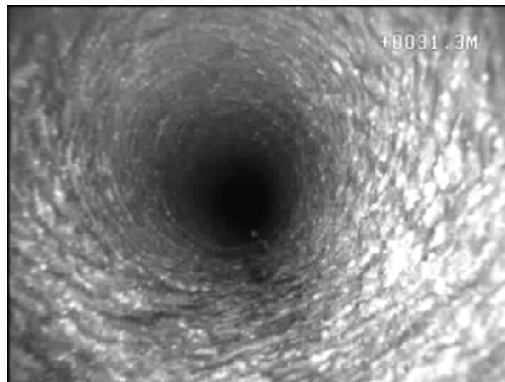


F5 : une venue d'eau significative à 14.4 m

Figure 9. Puits F5 et F6 au nord : le rabattement de la nappe avec pompage a permis d'observer des venues d'eau dans les 15 premiers mètres



F13 : une fracture sans écoulements à 6.7m



F13 : les parois sont relativement lisses à 31.3m

Figure 10. Puits F13, au sud de la région, à sec : les fractures en surface sont non productives

Cette inspection vidéo a également permis d'identifier certains mauvais scellements des tubages d'acier ancrés dans le roc. Le tubage n'étant que très peu enfoncé dans le roc, des dépôts quaternaires et la partie superficielle et fracturée du massif rocheux tombaient progressivement dans le trou de forage. Ceci a causé des élargissements du diamètre du trou de forage à la base du tubage (figure 11). La hauteur de la transition dépôts quaternaires / roc a été confirmée par les diagraphies (surtout à partir de la sonde à rayonnements gamma) (figure 12) (Crow et Ladevèze, 2015).

Ces défauts qui ont affecté certains puits au début des campagnes de forage en 2013, ont été corrigés par la suite (les tubages ont été enfoncés plus profondément dans le roc). Cette correction était importante afin d'éviter des « contaminations » croisées (mélanges d'eau) entre les eaux souterraines présentes dans le roc et dans les dépôts quaternaires lors de l'échantillonnage. Ceci met en exergue la nécessité de vérifier le scellement des forages lors d'une étude hydrogéologique pour être en mesure de bien comprendre l'écoulement dans la région.



Figure 11. Élargissement observé à la base du casing d'un des forages

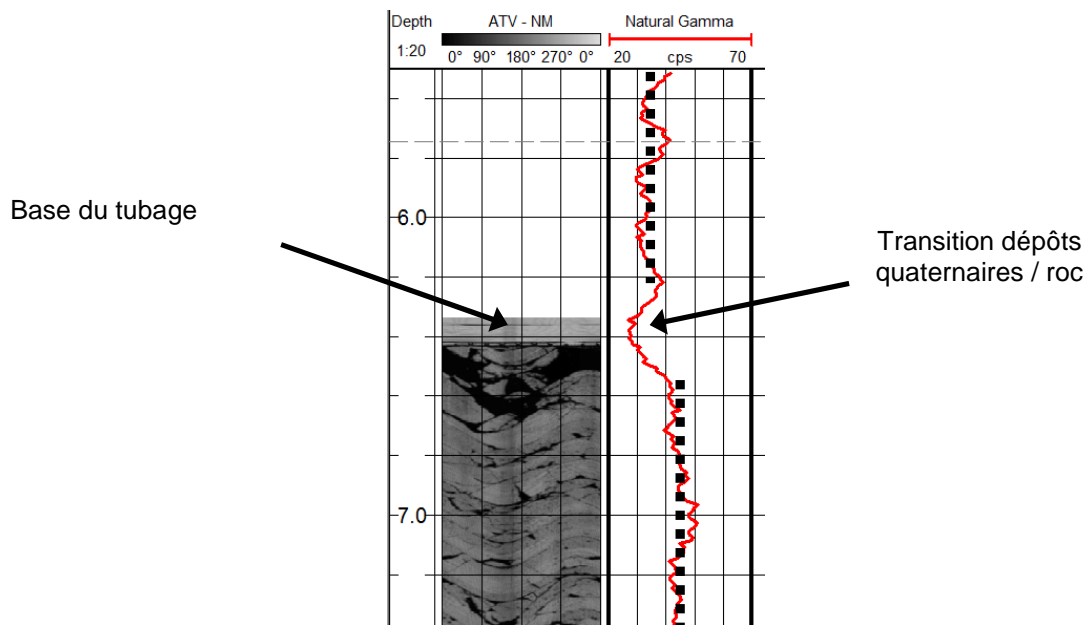


Figure 12. Mauvais ancrage du tubage : la transition entre les dépôts meubles et le roc est observée au même niveau que la base du tubage (puits F2)

3 Suivi piézométrique

3.1 Niveaux d'eau et barométrie

Des capteurs de niveaux d'eau non ventilés et des capteurs de pression barométrique équipés d'enregistreur de données automatiques et autonomes (*Solinst Levelogger Model 3001* et *Solinst Barologger Model 3001*) ont été installés dans les puits d'observation forés pour le projet. Les instruments ont été programmés pour prendre des mesures synchronisées aux 15 minutes. Des mesures manuelles du niveau d'eau dans les forages ont également été faites lors des différentes visites des sites pour valider les mesures automatiques et ajuster les niveaux d'eau par rapport à la surface du sol. La figure 13 montre une configuration typique de l'installation des instruments de mesure dans les puits.

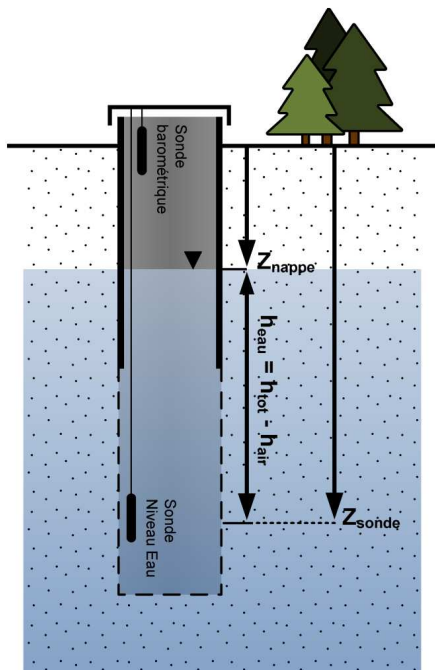


Figure 13. Configuration typique des instruments installés dans les puits d'observation pour le suivi du niveau d'eau. La hauteur de la colonne d'eau au-dessus de la sonde à niveau d'eau (h_{eau}) est calculée en soustrayant la pression atmosphérique mesurée par la sonde barométrique (h_{air}) de la pression totale (h_{tot}) mesurée par la sonde à niveau d'eau non ventilée. Le niveau de la nappe par rapport à la surface du sol (Z_{nappe}) est alors calculé en soustrayant h_{eau} à la profondeur d'installation de la sonde à niveau d'eau (Z_{sonde})

Les capteurs de pression permettant de mesurer les niveaux d'eau en continu ont été placés dans 13 des 15 puits forés. Ils enregistrent des données dans les puits F1 et F2 depuis novembre 2013, depuis mars 2014 pour F3 et F4, depuis novembre 2014 pour les puits F5, F6, F7, F8, F10 et F21 et depuis juin 2015 pour F11, F12 et F13. Seuls les puits F20 (qui est très proche de F1) et F14 (puits qui est resté à sec pendant le projet) n'ont pas de capteurs de pression.

Trois baromètres ont été répartis dans la zone d'étude : les deux premiers ont été installés en 2013 dans les puits F2 et F3, et le troisième dans F7 en novembre 2014. La comparaison des trois jeux de données a montré que les valeurs étaient pratiquement identiques. Les niveaux d'eau ont été compensés en utilisant les mesures de pression barométriques (voir figure 13 pour le détail des calculs). L'ensemble des données de variations barométriques et de niveaux d'eau corrigés est présenté à la figure 14. Il est à noter que le puits F3 est fortement influencé par le pompage d'un puits résidentiel et n'a donc pas été inclus dans cette figure.

Les courbes seront également disponibles sur le site RIES (Réseau d'Information sur les Eaux Souterraines)⁴.

Les données piézométriques ont aussi été importées dans le logiciel WHAT (*Well Hydrograph Analysis Toolbox*)⁵ (Gosselin et al., 2016). Outre la visualisation des hydrogrammes de puits, ce logiciel permet l'importation des données météorologiques (températures et précipitations) journalières compilées par Environnement Canada afin de les comparer aux variations piézométriques et de remplir les données manquantes en se servant des stations avoisinantes. Les hydrogrammes de puits générés avec le logiciel WHAT sont présentés à l'annexe 3. Un exemple d'hydrogramme, celui du puits F1, est présenté en figure 15.

⁴ <http://gin.gw-info.net>

⁵ <https://github.com/jnsebgosselin/WHAT>

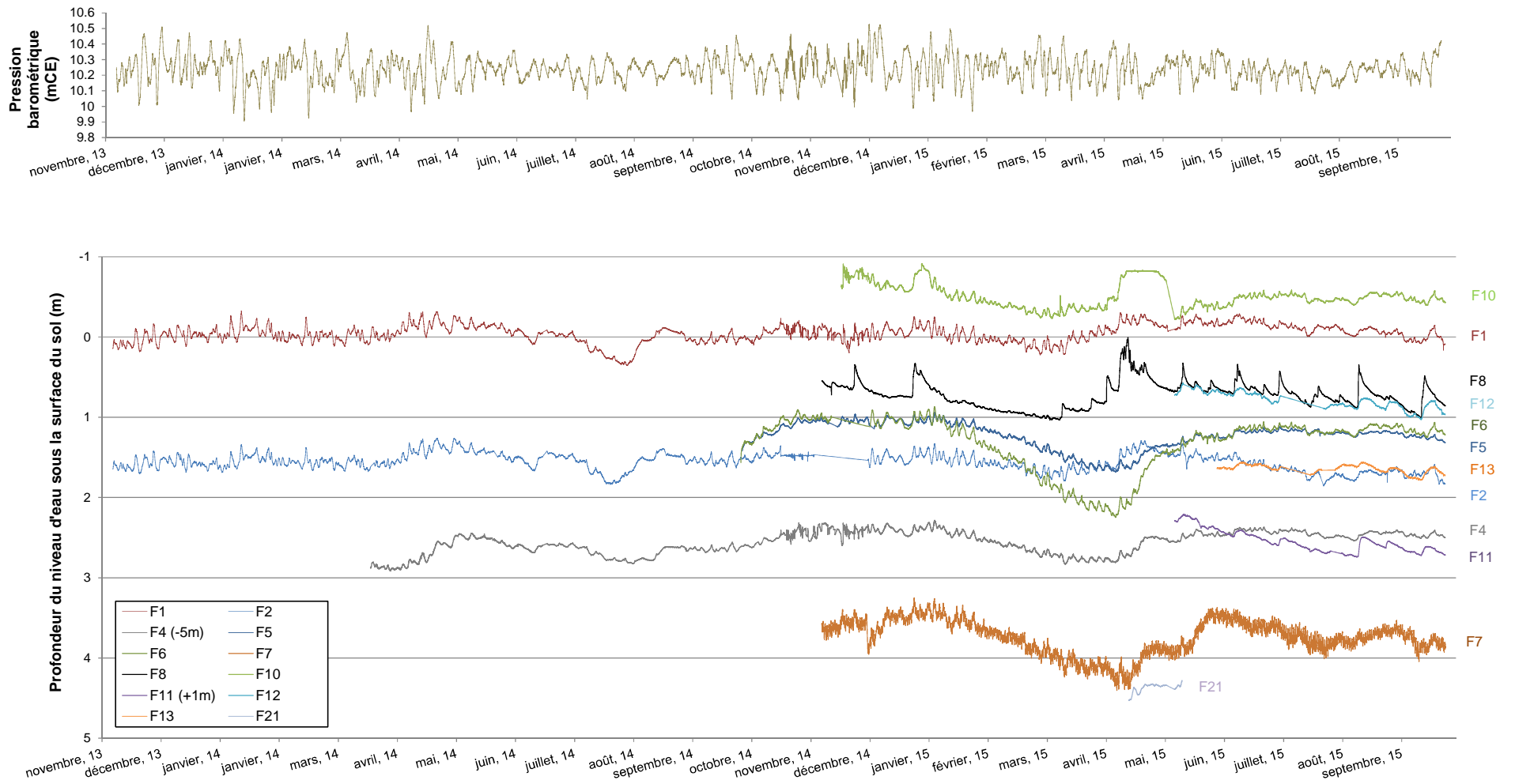


Figure 14. Comparaison des fluctuations piézométriques (données corrigées pour la pression barométrique) dans 12 puits de la région de St-Édouard. Les pressions barométriques sont illustrées dans le haut.

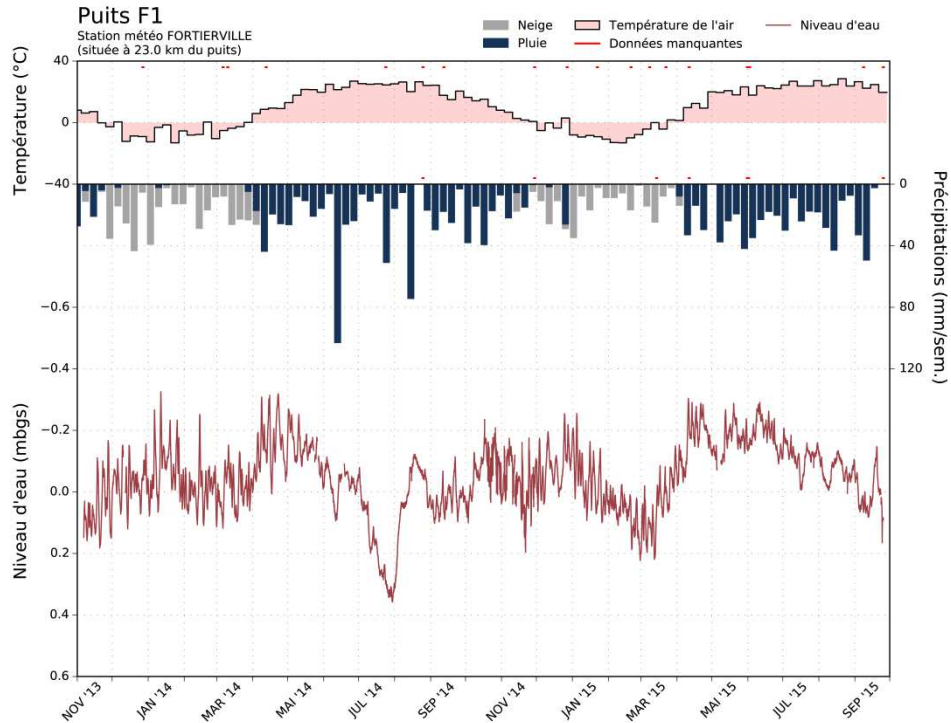


Figure 15. Exemple de l'hydrogramme de puits du puits d'observation F1 (figure produite avec le logiciel WHAT). Voir l'annexe 3 pour l'ensemble des puits.

3.2 Données climatiques

Les données de précipitations et de températures acquises par la station météorologique de Fortierville (quelques kilomètres au sud de la région d'étude) ont été compilées avec le logiciel WHAT. Une moyenne mensuelle de ces données sur la période d'acquisition des données piézométriques (novembre 2013 à novembre 2015) est présentée en figure 16.

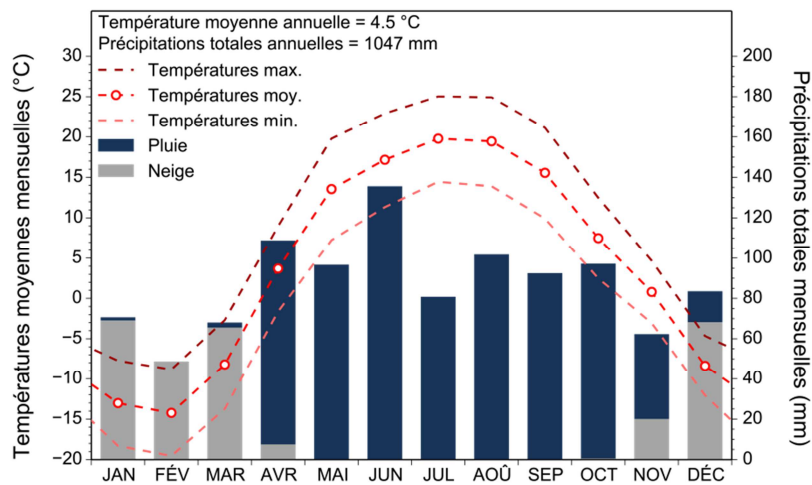


Figure 16. Moyennes mensuelles des températures et des précipitations mesurées à la station météorologique de Fortierville entre novembre 2013 et novembre 2015 (figure produite avec le logiciel WHAT).

3.3 Comparaison des variations piézométriques dans les puits

3.3.1 Tendances générales sur une année

Afin de comparer le comportement des puits entre eux, les variations piézométriques sur une période d'une année (1^{ier} octobre 2014 au 30 septembre 2015) sont présentées à la figure 17. Dans cette figure, les niveaux piézométriques ont été ajustés artificiellement à l'aide d'une simple translation verticale afin de faciliter la comparaison des courbes (les valeurs utilisées pour l'ajustement figurent dans la légende). Les données de niveau d'eau ont également été corrigées pour la pression barométrique.

Les courbes piézométriques des puits F1, F2, F4, F10, F11, F12, F13 et F21 évoluent dans le temps de façon assez similaire, même si ces derniers sont relativement éloignés les uns des autres (de 2.1 à 15.1 km) et répartis sur l'ensemble de la zone d'étude. Cela suggère un comportement relativement uniforme de l'aquifère rocheux. Les variations annuelles sont de faibles amplitudes (inférieures à un mètre) dans tous ces forages. Les courbes présentent par contre un aspect bruité à une échelle de temps plus faible (quelques heures-jours). Ceci est probablement dû à la réponse barométrique des puits, liée elle-même au confinement de l'aquifère considéré. Cet aspect est traité plus en détail à la section 5.

Les puits F5, F6 et F7, tous situés dans le nord-ouest de la région d'étude à moins de 1.5 km de distance l'un de l'autre, présentent également des variations qui sont assez proches de celles des puits décrits plus haut. La principale différence entre ces deux groupes de données est la présence de variations saisonnières beaucoup plus marquées dans les puits F5, F6 et F7. On observe une baisse du niveau d'eau pendant l'hiver (peu de recharge, car le sol est gelé) et une augmentation au printemps (recharge printanière liée à la fonte des neiges). Une baisse de la nappe durant l'été n'est généralement que peu ou pas présente dans ces puits. Elle est due au fait que lors de l'étude, les précipitations ont été relativement constantes pendant l'été (figure 16). Les variations saisonnières marquées sur ces trois puits sont probablement à mettre en lien avec le fait qu'ils sont beaucoup plus perméables que les autres (voir section 6). Ces trois puits ont en effet une proportion plus importante de lits de siltstone (plus fracturés et perméables) que dans les autres forages, qui contiennent principalement du shale noir ou gris.

Enfin, le puits F8 présente un comportement unique dans le jeu de données. Les variations piézométriques sont très sensibles aux précipitations. De plus, les variations saisonnières sont marquées, avec une diminution du niveau en hiver et de nombreux épisodes de recharge de la nappe au printemps. L'allure de cette courbe piézométrique suggère des conditions de nappe libre pour ce puits. Les carottes de ce puits ont effectivement montré que du siltstone était majoritairement présent jusqu'à 40 m de profondeur.



Figure 17. Variations piézométriques sur une année (1^{ier} octobre 2014 au 30 septembre 2015) (données corrigées pour la pression barométrique). Les courbes piézométriques ayant des comportements similaires ont été regroupées.

3.3.2 Puits influencés par du pompage (F3 et F7)

Deux puits du projet ont des niveaux d'eau influencés par des pompages. Dans le puits F3, des variations ponctuelles de plusieurs mètres sont enregistrées dues à la présence d'un puits d'approvisionnement localisé à moins de 10 m. Ce dernier ne devait servir que quelques semaines par année, car il est situé dans une érablière, mais il s'est avéré qu'il a été utilisé régulièrement dans l'année. Le puits privé de l'érablière a une profondeur de 73 m (alors que F3 a une profondeur de 50 m), mais il a clairement une influence sur le puits F3 (figure 18). Ces variations sont particulièrement importantes au printemps et durant l'hiver, rendant impossible une interprétation des données durant ces périodes.

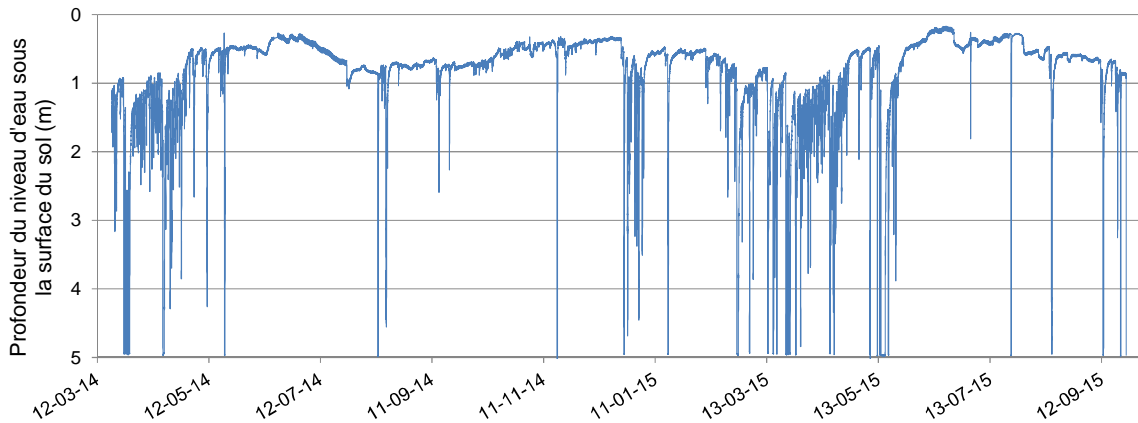


Figure 18. Hydrogramme du puits F3

Le puits F7 enregistre lui aussi des variations de niveau d'eau attribuables à un pompage résidentiel (figure 19), mais de façon beaucoup moins marquée. Contrairement à F3, F7 enregistre malgré tout les grandes tendances de variations piézométriques saisonnières. L'effet du pompage se traduit par des variations cycliques (environ 4 par jour) de faible amplitude (quelques centimètres).

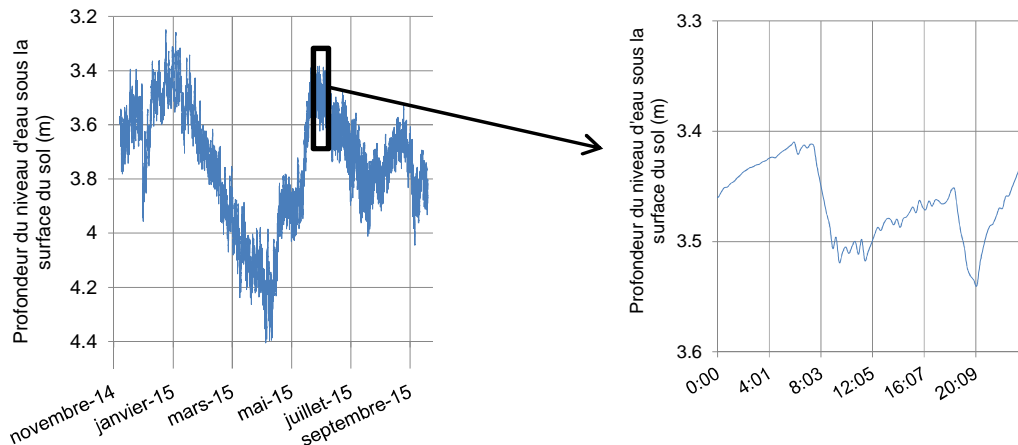


Figure 19. Hydrogramme du puits F7

3.4 Carte piézométrique

Une carte piézométrique a été générée à partir des données du SIH (Système d'informations hydrogéologiques du MDDELCC⁶) et de celles mesurées dans les puits d'observation et les puits résidentiels visités. En tout, 2389 points ont été utilisés pour produire la carte, mais ceux-ci couvrent une région plus grande que la zone à l'étude. Seuls les puits au roc ont été utilisés. Les niveaux d'eau sont en général assez proches de la surface, ayant une valeur médiane de 2,74 m. La carte a été obtenue avec les altitudes piézométriques (topographie moins profondeur de la nappe) par krigeage simple, avec un variogramme sphérique défini en utilisant la direction générale de l'écoulement (NW, soit 135°) et celle perpendiculaire. Un coefficient d'anisotropie de 2 a été utilisé pour représenter la différence de corrélation entre ces deux directions (portée plus longue dans le sens perpendiculaire à l'écoulement). Les graphiques de la figure 20 présentent les variogrammes expérimentaux et théoriques (sphériques) générés dans le sens ainsi que perpendiculairement à l'écoulement. La valeur choisie pour le plateau est de 875, car cette valeur est située à mi-chemin entre la variance des valeurs observées de niveaux piézométriques (1150) et celle du variogramme dans le sens perpendiculaire à l'écoulement (~600). D'autres variogrammes ont été produits pour des angles intermédiaires et avaient des variances grandissantes en allant vers 135 degrés. Les différentes variances obtenues en fonction de la direction représentée (variance non stationnaire) témoignent probablement de la présence de différents contextes hydrogéologiques dans la région. En effet, ce phénomène pourrait être dû à l'utilisation simultanée de données issues de deux contextes, soit du piémont appalachien et de la plateforme du St-Laurent. Pour n'utiliser qu'un variogramme lors de la génération de la carte piézométrique, le rayon de recherche des paires de points à utiliser a été fixé à 15 km afin de limiter l'impact de cette anisotropie.

Pour la génération de la carte piézométrique, quelques points de contrôle manuels (27) ont été ajoutés le long de la côte au fleuve pour mieux définir cette zone car une falaise est présente et les puits disponibles ne sont pas situés assez proches du fleuve pour que les niveaux puissent être représentatifs à cet endroit.

La figure 21 montre que l'eau souterraine circule des Appalaches vers le fleuve St-Laurent, en accord avec la topographie.

⁶ <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/>

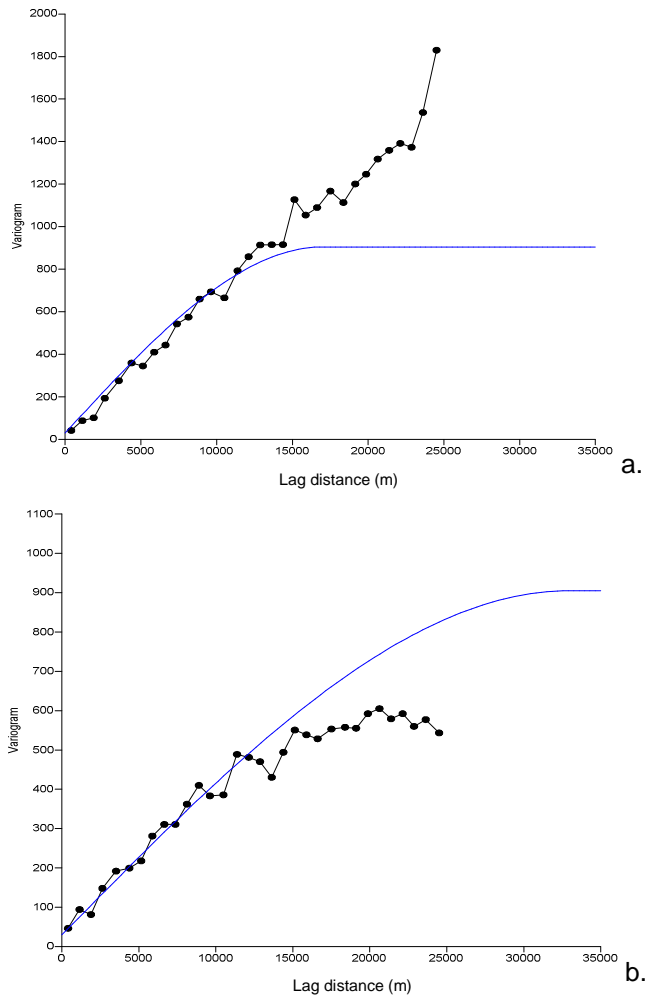
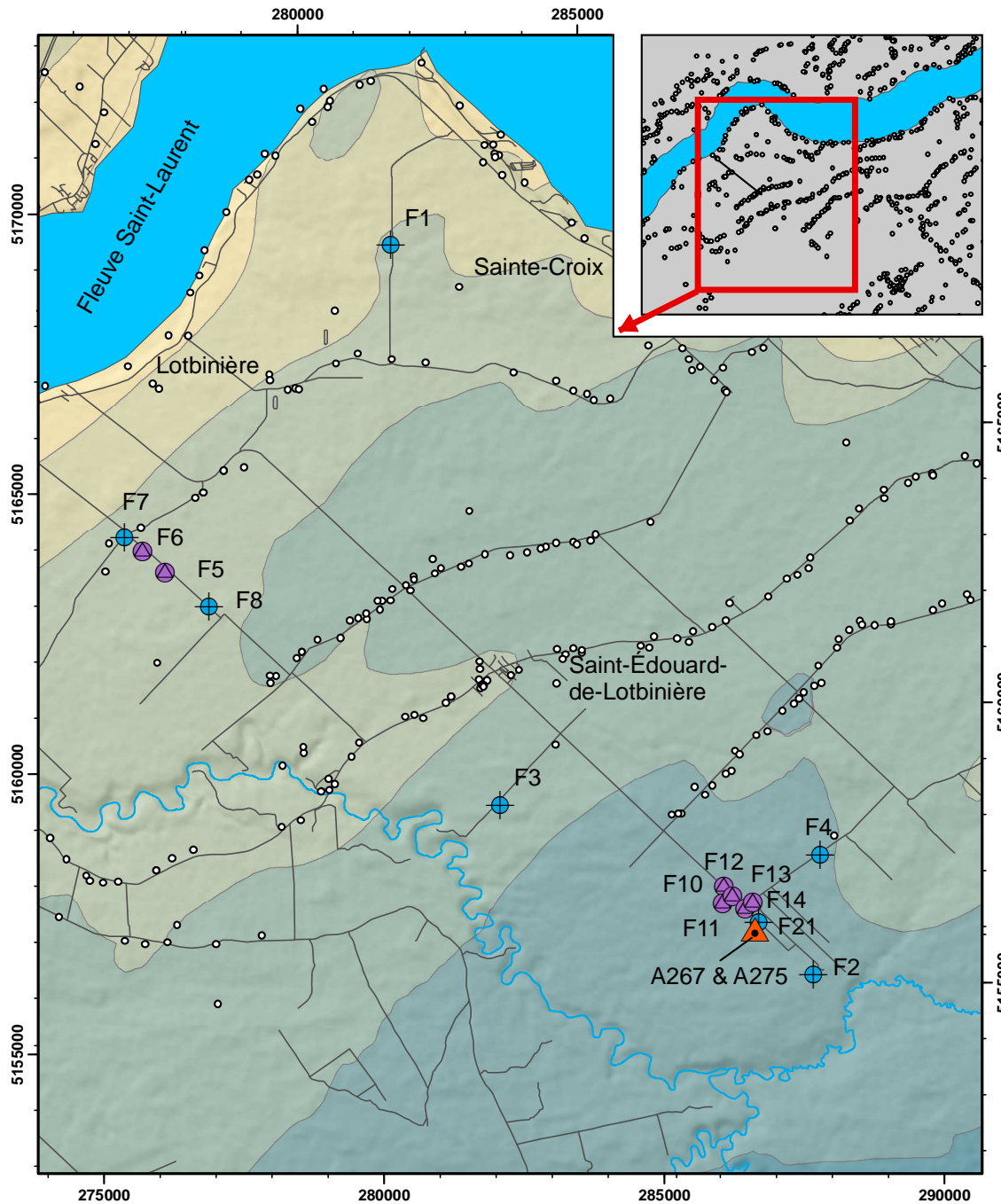


Figure 20. Variogrammes expérimentaux et théoriques générés pour deux directions : dans le sens de l'écoulement (a.) et perpendiculaire à l'écoulement (b.)



Légende		Natural Resources Canada / Ressources naturelles Canada
—	Routes	
—	Rivières	
Puits gaziers		
	A267 & A275	
Puits peu profonds forés pour le projet		
	Forage destructif	
	Forage carotté	
Autres puits peu profonds utilisés		
	Données du SIH (MDELC)	
Piezométrie du roc (mètres p.r. au niveau moyen de la mer)		
	0 - 20	
	20 - 40	
	40 - 60	
	60 - 80	
	80 - 100	
	100 - 120	
	0 0.5 1 2 3 4 Kilomètres	
Projection: UTM NAD83 19N		

Figure 21. Piézométrie dans le roc

3.5 Synthèse

Les points importants à retenir de la Section 3 concernant le suivi piézométrique sont les suivants :

- Les données piézométriques montrent que l'aquifère rocheux présente un comportement relativement uniforme à l'échelle de la zone d'étude, du piémont appalachien jusqu'au fleuve. Les variations piézométriques suivent globalement les mêmes tendances, mais des différences sont observées. Les puits ont été classés en trois groupes, en fonction des fluctuations enregistrées (figure 17).
- La réponse des puits aux variations saisonnières (ou aux événements pluvieux) semble principalement contrôlée par les variations lithologiques observées dans les forages. Les puits ayant de plus importantes proportions de lits de siltstone (plus fracturé et perméable) présentent des variations piézométriques de magnitudes plus importantes que les puits contenant majoritairement du shale. En effet, à cause de la conductivité hydraulique plus importante des formations géologiques, les niveaux piézométriques de ces puits répondent plus rapidement aux variations climatiques. On observe une diminution du niveau piézométrique en hiver, puisque le sol gelé empêche l'infiltration, ainsi qu'un fort épisode de recharge au printemps.
- De façon générale et à l'échelle de la région, les écoulements dans l'aquifère rocheux fracturé se font du sud-est (piémont appalachien) vers le nord-ouest (fleuve Saint-Laurent).
- Enfin, les données piézométriques apportent des informations quant au degré de confinement de l'aquifère au roc. Ce dernier point fera l'objet de la section 5.

4 Propriétés hydrauliques des dépôts quaternaires

4.1 Classification des dépôts quaternaires en hydrofaciès

4.1.1 Classification à partir d'échantillons de dépôts et de la carte géologique

Pour faciliter la compréhension de l'hydrogéologie du secteur de Saint-Édouard, les différentes lithologies quaternaires ont été regroupées par hydrofaciès (HF). Chaque HF regroupe des lithologies ayant des caractéristiques hydrauliques similaires. Cette classification s'est faite à partir des échantillons collectés lors des forages et à partir de la cartographie des dépôts meubles du secteur (Légaré-Couture et al., 2016, en prep.). La définition de ces hydrofaciès est utile à plusieurs égards. Elle permet de faciliter la caractérisation des conditions de confinement de l'aquifère rocheux (voir section 5). Elle peut également servir à améliorer la compréhension de l'hydraulique des dépôts du secteur à l'échelle régionale dans une région où l'hétérogénéité des dépôts est importante.

La classification se fait en attribuant une conductivité hydraulique (K) apparente (très faible/faible/moyenne/élevée) à chacune des unités géologiques en se basant sur leurs granulométries relatives. Le principe étant qu'un dépôt à granulométrie grossière (gravier) sera plus conducteur qu'un dépôt fin (argileux, silteux). Quatre classes d'HF ont ainsi été définies pour la zone d'étude. Ces derniers ont été nommés HF1, HF2, HF3 et HF4 dans l'ordre d'augmentation relative de leur K apparente. Cette valeur de K apparente sera quantifiée à la section 5. Enfin, cette classification basée sur les granulométries relatives sera ensuite vérifiée par les analyses granulométriques faites sur certains échantillons de dépôts des puits d'observation F2, F3 et F4 (section 4.1.2.).

Les K apparentes attribuées aux lithologies quaternaires identifiées dans le secteur de Saint-Édouard sont récapitulées dans le tableau 2.

Tableau 2. Définition des hydrofaciès et des conductivités hydrauliques (K) apparentes selon les sources de données utilisées.

Hydrofaciès (HF)	K « apparente » estimée selon les lithologies dominantes	Lithologies indiquées selon la source des données		
		Forages carottés F1, F2, F3 & F4	Les autres forages du projet	Carte des dépôts quaternaires
HF1	très faible	Silt, till/diamicton à matrice silteuse/argileuse	Till	O, MGa
HF2	faible	Till/diamicton à matrice sableuse dominante, sable fin, sol, remblai	Sable, silt, sol, remblai	Mb/Tr, Mb/Trm, Trm, Tr, Tc, Tm
HF3	moyenne	Sable moyen à grossier, gravier	Graviers	Ap, Mb, Mb/Md, MGb
HF4	élevée	-	-	Ed, At, Ax, Md, Gx

Note : Lithologies de la carte des dépôts quaternaires :

O: Séd. organiques non différenciés, **Ed**: Séd. Éoliens, **Ap**: Alluvions actuels, **At**: Alluvions de terrasses fluviales, **Ax**: Alluvions de terrasses anciennes, **Md**: Séd. deltaïques et prodeltaïques, **Mb**: Séd. littoraux et pré-littoraux, **Mb/Tr**, **Mb/Trm**, **MGb**: Séd. littoraux et pré-littoraux, **MGa**: Séd. fins d'eau profonde, **Gx**: Séd. juxtaglaciaires, **Trm**: Till remanié en couverture discontinue, **Tr**: Till remanié en couverture continue, **Tc**: Till en couverture généralement continue, **Tm**: Till en couverture mince et discontinue

Les trois classes HF1, HF2 et HF3 présentent des K apparentes de très faibles à moyennes. Ces trois HF relativement peu conducteurs sont ceux les plus communément retrouvés dans la région de Saint-Édouard. Il est à noter que tous ces HF ne sont pas nécessairement présents dans chacun des forages. La quatrième classe, HF4, regroupe les sables grossiers et graviers localement présents sur le territoire d'étude et qui constituent des aquifères très productifs utilisés par les municipalités du secteur pour l'alimentation en eau potable. Les lithologies de HF4 n'ont pas été recoupées par les forages du projet, elles ont uniquement été observées en surface lors des mesures de terrain au perméamètre de Guelph.

La distribution verticale des hydrofaciès dans les différents puits est présentée à la figure 22. Une cartographie des HF (basée sur la carte des dépôts quaternaires, les regroupements d'unités sont présentés dans le tableau 2) est présentée à la figure 23.

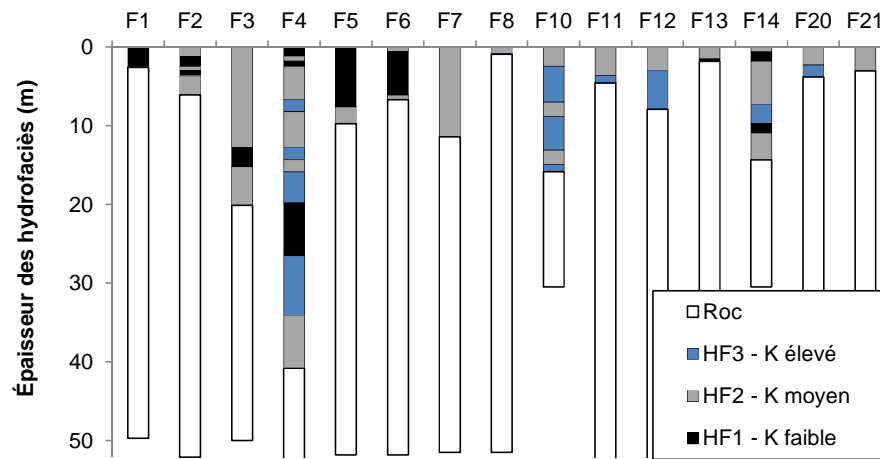


Figure 22. Colonnes hydro-stratigraphiques simplifiées des forages du projet présentant la répartition des HF

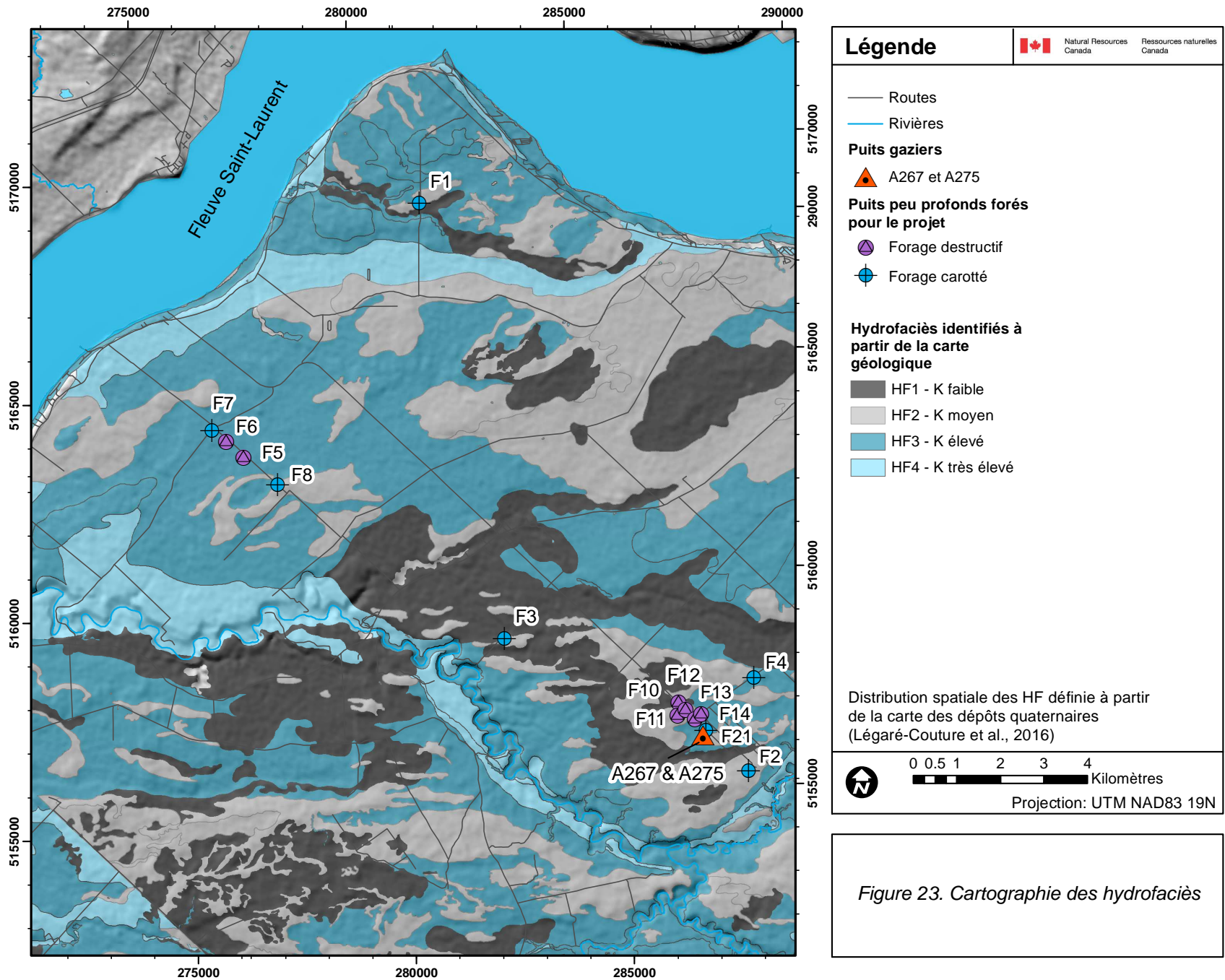


Figure 23. Cartographie des hydrofaciès

4.1.2 Vérification de la classification en HF par analyse granulométrique

Des échantillons avaient été collectés à plusieurs profondeurs lors des forages des puits d'observation F2, F3 et F4. Les HF le long des forages ayant été définis précédemment (figure 22), un HF a été attribué à chacun des échantillons. Ici, seuls les hydrofaciès HF1, HF2 et HF3 sont analysés puisqu'aucun forage n'avait traversé HF4.

Ainsi, en regroupant les courbes granulométriques de chacun des échantillons sur un même graphique (figure 24), la représentativité du classement basé sur les granulométries relatives des dépôts a été confirmée (ordre de classement basé sur la granulométrie la plus faible à la plus élevée : HF1 à HF3). Les granulométries les plus grossières (HF3) sont plus proches des sables très fins que des silts (cas des granulométries les plus fines : HF2 et surtout HF1). En effet, l'hydrofaciès HF3 est constitué à moitié (plus de 50%) de particules de diamètre supérieur à des silts moyens à grossiers. À l'inverse, l'hydrofaciès HF1 est lui constitué à moitié de particules de diamètres supérieurs aux silts fins à moyens.

En plus de confirmer le classement des HF selon leur granulométrie, les formes des courbes (allure de «S» peu incurvé) (figure 24), traduisent un étalement relativement important des granulométries de la majeure partie des échantillons. Le tout étant confirmé par des valeurs de coefficient d'uniformité ($C_u = d_{60}/d_{10}$) globalement supérieures à 5-6 (tableau 3). Les valeurs de C_u relativement élevées correspondent généralement à des matériaux de granulométrie plutôt étalée (Todd et Mays, 2005).

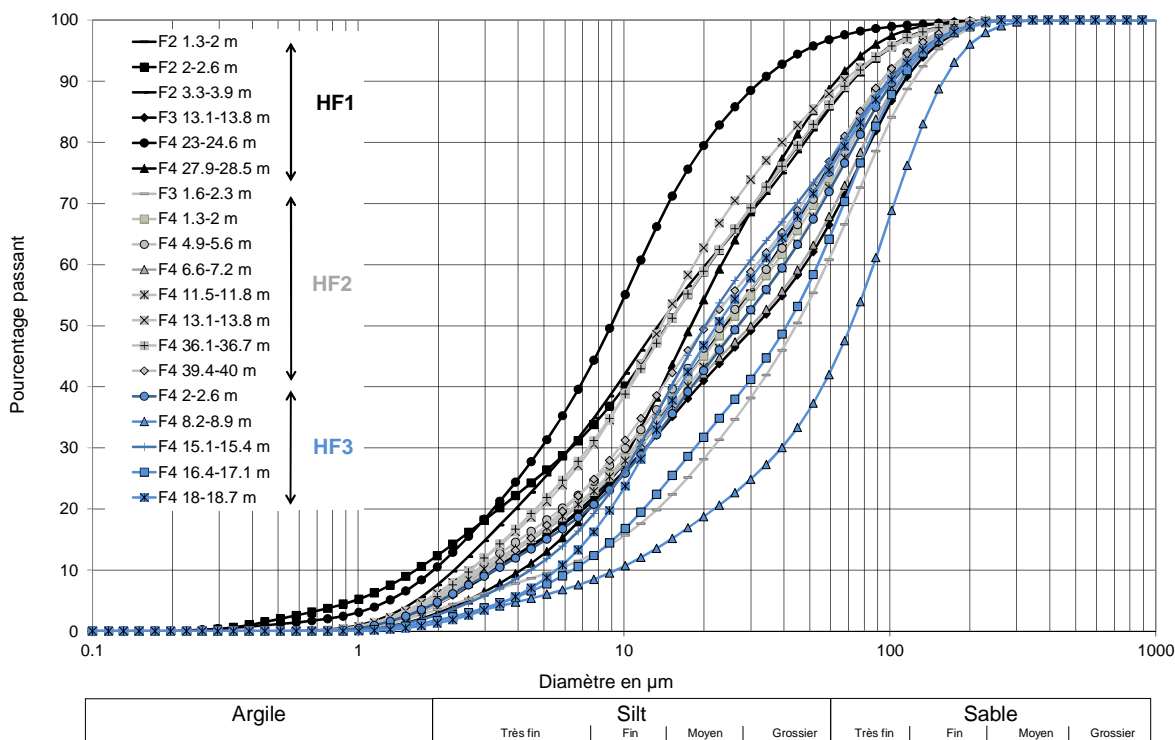


Figure 24. Compilation des courbes granulométriques des échantillons collectés dans les puits d'observation F2, F3 et F4. Les courbes sont classées par type d'HF.

Tableau 3. Calcul du coefficient d'uniformité des échantillons de dépôts meubles collectés le long des forages F2, F3 et F4 (données issues d'une lecture graphique de la figure 24)

Hydrofaciès	Échantillon	Diamètre d'ouverture du tamis (mm) selon le pourcentage passant (10 ou 60 %)		Coefficient d'uniformité (Cu=d60/d10)
		d10 (mm)	d60 (mm)	Cu _{échantillon}
HF1 - K faible	F2 1.3-2 m	3.0	34.3	11.5
	F2 2-2.6 m	1.5	19.9	13.2
	F2 3.3-3.9 m	2.3	19.9	8.8
	F3 13.1-13.8 m	3.0	44.9	15.1
	F4 23-24.6 m	1.7	10.1	5.8
	F4 27.9-28.5 m	3.9	22.8	5.8
	Moyenne :	2.6	25.3	10.0
HF2 - K moyen	F3 1.6-2.3 m	5.1	51.5	10.0
	F4 1.3-2 m	2.6	34.3	13.2
	F4 4.9-5.6 m	2.6	34.3	13.2
	F4 6.6-7.2 m	3.0	44.9	15.1
	F4 11.5-11.8 m	2.6	39.2	15.1
	F4 13.1-13.8 m	2.6	17.4	6.7
	F4 36.1-36.7 m	2.6	19.9	7.7
	F4 39.4-40 m	3.0	29.9	10.0
	Moyenne :	3.0	33.9	11.4
HF3 - K élevé	F4 2-2.6 m	3.0	39.2	13.2
	F4 8.2-8.9 m	8.8	77.3	8.8
	F4 15.1-15.4 m	3.9	26.1	6.7
	F4 16.4-17.1 m	5.9	51.5	8.8
	F4 18-18.7 m	5.1	29.9	5.8
	Moyenne :	5.3	44.8	8.7

4.1.3 Limites de la méthode

Il faut considérer que regrouper les lithologies en classes d'hydrofaciès nécessite une certaine simplification des données. Ceci insère *de facto* une imprécision dans les interprétations, puisque les données utilisées sont de plusieurs types (carottes ou déblais de forages), d'origine variée (forages réalisés dans le cadre du projet, rapports de consultants et observations faites sur affleurements) et que les lithologies ont parfois été identifiées par des personnes différentes. Malgré tout, face à l'hétérogénéité particulièrement importante des dépôts quaternaires dans le secteur de Saint-Édouard, ces simplifications sont nécessaires pour établir un portrait général de leurs propriétés et de mieux comprendre leur rôle sur les écoulements.

4.2 Conductivités hydrauliques des hydrofaciès

Les hydrofaciès (HF) ont été précédemment définis à partir des échantillons collectés lors des forages et à partir de la carte géologique. Les conductivités hydrauliques (K) des hydrofaciès HF1, HF2 et HF3 ont été estimées sur le terrain sur des sites représentatifs de chacun des HF.

4.2.1 Présentation de la méthode du perméamètre de Guelph

La méthode du perméamètre de Guelph consiste à mesurer un débit d'infiltration de l'eau dans un sol non saturé à partir d'un trou vertical cylindrique au fond duquel un niveau d'eau constant (charge constante) est maintenu par le principe de la bouteille de Mariotte. Ces mesures permettent d'obtenir une bonne estimation de la conductivité hydraulique saturée du sol (Elrick et al., 1989). Pour débiter l'essai, un trou est creusé à l'aide d'une tarière. Le sol doit être bien drainé pour effectuer la mesure afin de respecter les conditions d'applicabilité de la solution développée par Elrick et al. (1989). Ainsi, puisque le sol était bien souvent saturé sous des profondeurs supérieures à 80 cm dans la zone d'étude, c'est donc l'intervalle de profondeurs juste au dessus (compris entre 60 et 80 cm sous la surface du sol) qui a été investigué. L'infiltration de l'eau dans le sol forme graduellement un volume de sol saturé autour du trou dont la dimension et la forme dépend du type de sol. Après un certain temps, l'infiltration dans le sol atteint un état quasi stationnaire associé à un débit constant d'eau fourni par le perméamètre, ce qui permet de calculer, pour un diamètre de trou et une charge donnée, la conductivité hydraulique saturée du sol environnant. Les valeurs de K estimées seront plutôt représentatives de la composante verticale de K si le sol est bien homogène.

L'appareil est constitué de deux réservoirs d'eau : un gros et un petit. Les essais peuvent être effectués en utilisant le cylindre extérieur (réservoir plus gros) dans les sols présentant des K élevées et celui intérieur (petit réservoir avec des lectures plus précises) pour les sols de faibles K . C'est le petit cylindre qui a été utilisé à presque tous les sites dans notre région d'étude. Une charge de 10 cm a généralement été utilisée, cette valeur étant suffisante pour tester un volume de sol relativement peu perméable, tout en permettant de réaliser les essais sur une période raisonnable. Tout au long de l'essai, le débit d'infiltration est mesuré en prenant des lectures sur le cylindre (réservoir) et en notant le temps écoulé depuis le départ. Le détail des calculs pour l'estimation de la conductivité hydraulique est présenté au tableau 4. Deux photos des perméamètres de Guelph installés sur le terrain sont présentées à la figure 25.

Trois mesures ont été réalisées en moyenne à chaque site (au minimum deux). Trois mesures sont souvent nécessaires pour obtenir une valeur représentative du site, car il arrive régulièrement que des mesures soient biaisées par des hétérogénéités très locales (petites roches, fissures dans le trou de tarière...etc.).



Figure 25. Perméamètres de Guelph installés sur le terrain

Tableau 4. Détail du calcul de la conductivité hydraulique à partir des mesures prélevées avec un perméamètre de Guelph

Calcul de la conductivité hydraulique K du sol (Elrick et al., 1989)		
$K_f = \frac{CQ}{2\pi H^2 + \pi a^2 C + 2\pi \frac{H}{\alpha}}$	<p>Q : Débit de circulation du fluide H : Charge imposée (m) a : aire de la section de réservoir α : paramètre choisi par l'utilisateur selon la texture du sol C : « Facteur de forme » (voir dessous), fonction des paramètres a, H et α</p>	
Calcul du facteur de forme selon les valeurs choisies de α (à partir de Elrick et al. (1989), Zhang et al. (1998))		
Catégories de sols selon leur texture/structure	α (cm ⁻¹)	Facteur de forme
Graviers et sables grossiers, peut également inclure des sols très structurés contenant des fissures et/ou des macropores	0.36	
La plupart des sols structurés (des sols argileux aux loams), mais aussi les sols à matrice non structurée (exemple?) et les sables fins. Cette catégorie correspond à la plupart des sols agricoles.	0.12	$C1 = \left(\frac{H/a}{2.074 + 0.093(H/a)} \right)^{0.754}$
Sols à texture fine (argileuse ou silteuse) et non structurée, peu aussi inclure des sables fins.	0.04	$C2 = \left(\frac{H/a}{1.992 + 0.091(H/a)} \right)^{0.683}$
Sols compacts, sans structure, matériaux argileux ou silteux tels que des couches isolantes d'argiles utilisées dans les décharges ou bien des sédiments lacustres et marins.	0.01	$C1 = \left(\frac{H/a}{2.081 + 0.121(H/a)} \right)^{0.672}$

4.2.2 Valeurs de conductivité hydraulique par hydrofaciès

Des mesures au perméamètre de Guelph ont été effectuées à 13 sites. Ces sites ont été choisis afin de représenter au mieux les diverses lithologies constituant les hydrofaciès. Comme précisé dans la méthode d'interprétation des données de perméamètre de Guelph (Elrick et al., 1989, Zhang et al., 1998), un paramètre α a été attribué à chacun de nos hydrofaciès. Ces valeurs sont fournies au tableau 5.

Tableau 5. Valeurs du paramètre α utilisées pour le calcul de la conductivité hydraulique de chacun des hydrofaciès à l'aide du perméamètre de Guelph.

Hydrofaciès	Paramètre α
HF1	0.04
HF2	0.12
HF3	0.36
HF4	

Les valeurs de conductivités hydrauliques (K) calculées à partir de l'équation présentée dans le tableau 4 et des valeurs du paramètre α fournies au tableau 5 sont présentées dans le tableau 6. Les valeurs moyennes obtenues à partir des 2 à 4 essais effectués à chaque site sont d'abord citées (K_{site} moyen). Ensuite, une valeur moyenne pour chaque HF est présentée (K_{HF} moyenne). Les valeurs minimales, moyennes et maximales pour chacun des hydrofaciès sont également récapitulées à la figure 26.

Tableau 6. Valeurs de conductivité hydraulique (K) moyennes calculées pour chaque site et valeurs moyennes par hydrofaciès (HF).

Site de mesure	Hydro-faciès	Lithologies	α	K_{site} moyenne (m/s)	K_{HF} moyenne (m)
S06	HF1	Till remanié à matrice silteuse	0.04	1.3×10^{-7}	3.3×10^{-8}
S11		Silt légèrement sableux		3.6×10^{-8}	
S12		Silt sableux laminé		7.6×10^{-9}	
S03	HF2	Sable bien trié avec granules schisteuses	0.12	2.2×10^{-7}	3.1×10^{-7}
S04		sable silteux gleyifié		3.3×10^{-7}	
S05		Sable fin silteux uniforme		1.4×10^{-6}	
S07		Sable silteux avec gravillons de schiste altéré		5.1×10^{-8}	
S08		Silt grossier		1.3×10^{-6}	
S10		Till à matrice sablo-silteuse		1.6×10^{-8}	
S13		Sable silteux		2.7×10^{-6}	
S01		HF3		Sable	
S09	Sable légèrement silteux		6.4×10^{-6}		
S02	HF4	Sable grossier, nombreux gravillons de schiste en se rapprochant du roc		8.7×10^{-5}	

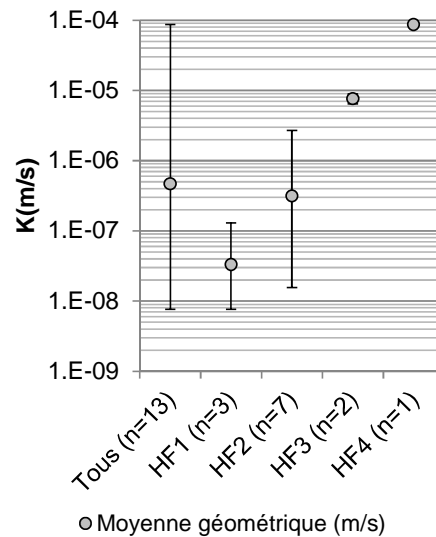


Figure 26. Conductivités hydrauliques (K) moyennes, minimales et maximales de chacun des quatre hydrofaciès (HF)

Comme un seul site de mesure a été testé pour HF4, les valeurs de conductivités hydrauliques de HF4 ont été comparées avec des données d'essais de pompage réalisés dans la région d'étude. En effet, les unités pro-glaciaires de HF4 constituent des aquifères productifs et ils sont largement utilisés pour l'alimentation en eau potable des municipalités dans le secteur d'étude, plusieurs essais de pompage ont donc été réalisés dans ces unités. Les études hydrogéologiques menées par des firmes de génie-conseil pour le compte des municipalités de Lotbinière et Saint-Édouard ont été consultées (Arrakis, 2004, Laforest Nova Aqua, 2005, Arrakis, 2012). Ces documents présentent des résultats d'essais hydrauliques réalisés dans des puits complétés dans des unités de sables grossiers et graviers. Ces unités présentent des conductivités hydrauliques (K) de l'ordre de 1×10^{-4} m/s qui sont du même ordre de grandeur que celle mesurée avec le perméamètre de Guelph dans HF4.

Il faut tout de même noter que des mesures plus nombreuses au perméamètre de Guelph auraient permis de préciser ce portrait. Il peut en effet y avoir un certain « effet pépite » dû au faible nombre de sites testé et du faible nombre de mesures faites sur chaque site. La variabilité des valeurs de K pouvant être grande au sein d'un même HF (du fait d'hétérogénéités très locales : petites roches, fissures dans le trou de tarière, etc.), les mesures effectuées ne sont peut-être pas parfaitement représentatives de la K moyenne de l'HF considéré. Enfin, des estimations de K à une échelle plus grande que celle d'un échantillon de sol (par essais de pompage par exemple), auraient aussi affiné l'estimation des K de nos HF. Les résultats doivent donc être utilisés en tenant compte de ces incertitudes sur notre estimation.

4.3 Synthèse

Les points importants de la Section 4 en lien avec l'estimation de la conductivité hydraulique (K) des dépôts quaternaires sont les suivants :

- Du fait de la grande hétérogénéité des dépôts du secteur de Saint-Édouard, quatre hydrofaciès (HF1, HF2, HF3 et HF4) ont été définis. Ce classement a été fait à partir d'échantillons de dépôts quaternaires et de la carte géologique du secteur. Les diverses lithologies ont été regroupées au sein de ces HF selon leurs granulométries relatives. Ainsi, HF1 regroupe les dépôts de granulométrie les plus faibles et donc de K apparente plutôt très faible. À l'inverse, HF4 regroupe des dépôts grossiers de K apparent plutôt élevée. Ce classement a également été confirmé par analyses granulométriques.
- Les K ont été évaluées à l'aide de perméamètres de Guelph. Les valeurs de K s'étalent sur quatre ordres de grandeur (10^{-8} à 10^{-4} m/s). La majorité des puits forés présentaient une épaisseur significative d'hydrofaciès HF1 et HF2 peu perméables (K de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-7} m/s). L'hydrofaciès HF3, plus perméable est présent notamment dans les puits F4, F10 et F12. L'hydrofaciès HF4, représente les unités de sable moyen à grossier et de gravier, localement retrouvées à l'échelle du secteur d'étude. Ce dernier hydrofaciès a la plus grande conductivité hydraulique (autour de 10^{-4} / 10^{-5} m/s), il n'a pas été recoupé par les puits du projet.

5 Confinement de l'aquifère rocheux

Le degré de confinement d'un puits est fonction des caractéristiques et de l'épaisseur des couches géologiques sus-jacentes à l'aquifère considéré. Ces dernières ont en effet des conséquences sur les conditions de circulations d'eau (recharge) et d'air (fluctuations barométriques) entre la surface du sol et la surface piézométrique. Ainsi, une nappe libre fait référence à une nappe dont la surface piézométrique est à la pression atmosphérique. Une nappe dite captive est confinée sous une couche imperméable et à des pressions supérieures à celles de l'atmosphère (Todd et Mays, 2005). Cependant, dans bien des cas, des conditions intermédiaires sont rencontrées, la nappe est alors considérée comme semi-captive.

La connaissance du confinement est primordiale pour comprendre le comportement hydrogéologique d'un aquifère, entre autres, pour la protection des puits face à d'éventuelles pollutions de surface et pour l'identification des zones de recharge. Enfin, elle est aussi nécessaire lors du calcul des propriétés hydrauliques du roc à partir d'essais hydrauliques (voir section 6). Les solutions analytiques utilisées pour ce calcul sont en effet développées en tenant compte du degré de confinement du roc.

Le degré de confinement de chacun des puits au roc a été évalué dans cette étude selon quatre méthodes : 1/ l'observation sur le terrain du niveau de la nappe 2/ l'analyse des caractéristiques des dépôts quaternaires (conductivités hydrauliques et épaisseurs des unités), 3/ l'analyse de l'allure des courbes piézométriques, ainsi que 4/ les réponses barométriques des puits.

5.1 Analyse basée sur le niveau de la nappe

La façon la plus simple de déterminer le degré de confinement d'un aquifère est de comparer le niveau dans le puits par rapport à la surface du sol. Si le puits est artésien, c'est-à-dire que l'eau jaillit du forage, la nappe dans laquelle le puits est installé est captive. Il est alors évident que la surface piézométrique est au-dessus du toit de l'aquifère, condition indispensable pour que l'aquifère soit considéré comme captif (Fetter, 2001). Un niveau d'eau au-dessus de la surface du sol a été mesuré au forage F10, qui est donc captif selon cette analyse.

Dans les cas où le niveau d'eau est inférieur à la surface du sol, il est difficile de clairement identifier le confinement. En effet, même si la surface piézométrique est plus haute que le toit du roc, un doute subsiste quant à la présence de cheminements qui mettraient en connexion les aquifères rocheux et quaternaires (via une connexion des dépôts quaternaires par le roc superficiel fracturé ou par l'intermédiaire de défauts de scellement de puits). Ainsi, pour tous les forages, excepté F10, il est impossible de conclure quant au confinement avec cette méthode.

5.2 Analyse des caractéristiques des dépôts meubles

Le principe est qu'un hydrofaciès de dépôts quaternaire plutôt imperméable aura tendance à confiner l'aquifère rocheux sous-jacent. Les épaisseurs des hydrofaciès identifiés précédemment ont été utilisées pour distinguer les trois degrés de confinement et ainsi, les différents types d'aquifère : captif, semi-captif et libre. Les critères d'épaisseurs sont présentés au tableau 7. Les seuils d'épaisseurs des hydrofaciès ont été définis de sorte que les conditions de confinement traduisent bien le fait que, dans quasiment tous les forages, les hydrofaciès dominants sont ceux de faible et moyenne conductivité hydraulique. Les résultats de l'analyse sont présentés au tableau 8.

Tableau 7. Épaisseurs cumulées des hydrofaciès (HF) utilisées pour la définition du degré de confinement

Conditions de confinement de la nappe	Conditions d'épaisseurs des hydrofaciès
Captive	HF1 > 2m
Semi-captive	HF1 < 2m et HF1+HF2 > 3m
Libre	HF1 < 2m et HF1+HF2 < 3m

Tableau 8. Épaisseurs cumulées de chacun des hydrofaciès dans les puits et conditions de confinement correspondantes

	Épaisseur totale des dépôts meubles (m)	Épaisseur des Hydrofaciès HF			Conditions de confinement de la nappe
		HF1 - K faible	HF2 - K moyenne	HF3 - K élevée	
F1	2.593	2.441	0.152	0	Captive
F2	6.11	1.83	4.28	0	Semi-captive
F3	20.12	2.44	17.68	0	Captive
F4	40.84	8.54	14.32	17.98	Captive
F5	9.75	7.62	2.13	0	Captive
F6	6.71	5.49	1.22	0	Captive
F7	11.43	0	11.43	0	Semi-captive
F8	0.91	0.06	0.85	0	Libre
F10	15.85	0	6.1	9.75	Semi-captive
F11	4.57	0	3.66	0.91	Semi-captive
F12	7.92	4.87	3.05	0	Captive
F13	1.83	0.31	1.52	0	Libre
F14	14.33	2.44	9.46	2.43	Captive
F20	3.81	0	2.29	1.52	Libre
F21	3.05	0	3.05	0	Semi-captive

5.3 Analyse à partir des hydrogrammes de puits

L'allure des courbes piézométriques renseigne également sur les conditions de confinement. En effet, des variations d'amplitudes importantes et qui présentent une grande sensibilité aux précipitations et des tendances saisonnières témoignent d'un caractère plutôt libre de l'aquifère. En effet, dans le cas des nappes libres, le temps de circulation de l'eau depuis la surface du sol vers la nappe (lors d'un épisode de recharge) est plutôt rapide (jours à semaines). À l'inverse, un puits dans une nappe captive présentera des variations piézométriques de faibles amplitudes, peu sensibles aux précipitations, mais avec une allure plutôt bruitée due à la transmission rapide des variations barométriques à travers la couche imperméable « confinante » vers l'aquifère captif. Cet aspect bruité se manifeste sous forme de fluctuations apériodiques de faibles amplitudes (de l'ordre de quelques cm) et des fréquences inférieures à 0.8 cycles/jour (Hussein et al., 2013).

La méthodologie de classement des types d'aquifères sur les critères d'allure des hydrogrammes de puits est présentée au tableau 9 et les résultats obtenus sont récapitulés au tableau 10.

Tableau 9. Allure des variations piézométriques – définition du degré de confinement

Amplitude annuelle max. des variations piézo > 1m ?	Variations saisonnières marquées ?	Corrélation significative variations piézo. / précipitations	Aspect lisse des variations piézo. ?	Conditions de confinement de la nappe
« Oui » aux 4 critères				Libre
Situation intermédiaire avec des réponses « oui » + « non », le puits est alors classé en semi-captif. Une place est laissée au jugement professionnel pour attribuer ce type d'aquifère.				Semi-captive
« Non » aux 4 critères				Captive

Tableau 10. Allure des variations piézométriques des puits et conditions de confinement correspondantes

Puits	Amplitude annuelle max. des variations piézo > 1m ?	Variations saisonnières marquées ?	Corrélation significative variations piézo. / précipitations	Aspect lisse des variations piézo. ?	Conditions de confinement de la nappe
F1	non (0.68)	non	non	non	Captive
F2	non (0.6)	non	non	non	Captive
F3	-	non	-	influence d'un pompage	-
F4	non (0.63)	non	non	non	Captive
F5	non (0.75)	oui	non	non	Semi-captive
F6	oui (1.38)	oui	non	non	Semi-captive
F7	oui (1.16)	oui	non	influence d'un pompage	Semi-captive
F8	oui (1.03)	oui	oui	oui	Libre
F10	non (0.7)	non	non	non	Captive
F11	non (0.53)	non	non	non	Captive
F12	non (0.45)	non	non	non	Captive
F13	non (0.23)	non	non	non	Captive
F14	-	-	-	-	-
F20	-	-	-	-	-
F21	-	-	-	-	-

5.4 Analyse des conditions de confinement à l'aide des réponses barométriques

5.4.1 Théorie

Les variations de la pression atmosphérique (ΔB) produisent des fluctuations proportionnelles et opposées du niveau d'eau observé dans les puits (ΔW) (Freeze et Cherry, 1979). Ainsi, il est nécessaire de retirer ces effets barométriques des données du niveau d'eau pour connaître le niveau piézométrique « réel » de l'aquifère. La relation entre les variations de niveau d'eau causées par les fluctuations de la pression atmosphérique peut être exprimée par l'équation suivante:

$$\Delta W(t) = -a \times \Delta B(t)$$

où a est une constante correspondant au coefficient d'efficacité barométrique de l'aquifère, ΔB est la variation de la pression atmosphérique au temps t et ΔW est la variation correspondante du niveau de l'eau dans le puits.

Ces effets barométriques sont souvent considérés comme du « bruit » lorsqu'on s'intéresse uniquement aux niveaux piézométriques dans l'aquifère. Toutefois, ce « bruit » contient de nombreuses informations, notamment sur les propriétés mécaniques des aquifères, le niveau de confinement de la nappe ainsi que sur les propriétés hydrauliques et géométriques du puits (Van Der Kamp et Gale, 1983, Toll et Rasmussen, 2007, Butler et al., 2011). Ici on s'intéresse surtout aux informations relatives au degré de confinement de la nappe.

Les notions présentées précédemment supposent que la réponse barométrique d'un puits aux fluctuations de la pression atmosphérique est instantanée et statique dans le temps. En réalité, l'effet des variations barométriques sur le niveau d'eau peut comporter une forte composante transitoire qui est mesurable sur une période de quelques heures à jours. La fonction de réponse barométrique (*Barometric response function - BRF*) est une relation mathématique permettant d'exprimer le comportement dans le temps du niveau d'eau dans le puits par rapport à une variation barométrique donnée (Furbish, 1991, Rasmussen et Crawford, 1997, Toll et Rasmussen, 2007). Cette fonction est obtenue par déconvolution entre les séries de données de niveaux d'eau et de pressions barométriques (Rojstaczer, 1988, Rojstaczer et Riley, 1990, Furbish, 1991). La relation entre les variations de niveau d'eau causées par les fluctuations de la pression atmosphérique s'exprime alors ainsi:

$$\Delta W(t) = - \sum_{i=0}^m a_i \times \Delta B(t - i)$$

où a_i est le coefficient d'efficacité barométrique du puits au lag i et m est le lag maximal pour lequel l'effet des variations barométriques sur le niveau d'eau est mesurable. Ainsi, la variation du niveau de l'eau ΔW au temps t correspond à l'effet cumulatif des variations barométriques antérieures entre un lag de temps maximal m et le moment présent t . Dans le cas où m est 0, l'équation précédente correspond alors à la définition conventionnelle de la réponse barométrique présentée précédemment avec un coefficient d'efficacité barométrique statique. Les valeurs des coefficients a_i de la BRF peuvent être calculées à l'aide d'une régression linéaire.

Enfin, la valeur de la BRF est calculée pour chaque lag j , entre 0 et m , à partir des coefficients a_i calculés précédemment avec l'équation suivante :

$$A_j = \sum_{i=0}^j a_i$$

où A_j est la valeur de la BRF au lag j .

Le calcul de la BRF peut se faire à l'aide de logiciels, tel que le logiciel KGS_BRF développé par le Kansas Geological Survey (Bohling et al., 2011). Pour ce calcul, plusieurs délais de temps (*lags*) maximums (m) doivent être testés. Le délai qui sera choisi pour interpréter le comportement du puits est celui qui permet à la fonction de réponse barométrique de se stabiliser, ou du moins de se rapprocher d'une pente nulle.

La réponse barométrique d'un puits sera différente selon que le puits est libre, captif ou semi-captif et peut ainsi être utilisée pour identifier les conditions de confinement de l'aquifère dans lequel les puits sont installés (Rasmussen et Crawford, 1997, Butler et al., 2011). Concrètement, une BRF est calculée pour chaque puits et la courbe obtenue est comparée aux courbes théoriques des différents modèles de confinement de puits (figure 27).

Dans le modèle théorique d'un aquifère captif, l'effet d'une variation barométrique sur les variations piézométriques est quasi immédiat. Cela s'explique par le fait que les variations de la pression atmosphérique sont transmises mécaniquement de la surface à l'aquifère de façon presque instantanée par la couche confinante. Dans des modèles théoriques idéalisés, tel qu'initialement décrit par Jacob (1940), ceci se traduit par une fonction de réponse barométrique constante dans le temps (voir figure 27). Dans les aquifères libres, la fonction de réponse barométrique a plutôt une allure décroissante qui varie entre les valeurs 1 et 0. Celle-ci s'explique par le délai lié à la transmission de la variation barométrique à travers la zone vadose vers la nappe de l'aquifère libre (Spane, 2002).

Généralement, des effets de stockage dans le puits entrent également en jeu et entraînent un délai dans la réponse barométrique observée, ce qui a un impact sur l'allure de la BRF. Ce délai est lié aux propriétés de l'aquifère et aux caractéristiques de construction du puits (par exemple, au volume du puits et à la transmissivité hydraulique de l'aquifère). Typiquement, ce comportement se traduit par un accroissement de la fonction de réponse barométrique (figure 27).

Bien souvent, les réponses observées avec les données de terrain ne correspondent pas parfaitement à ces modèles. Les courbes sont donc plutôt des combinaisons des courbes théoriques présentées à la figure 27.

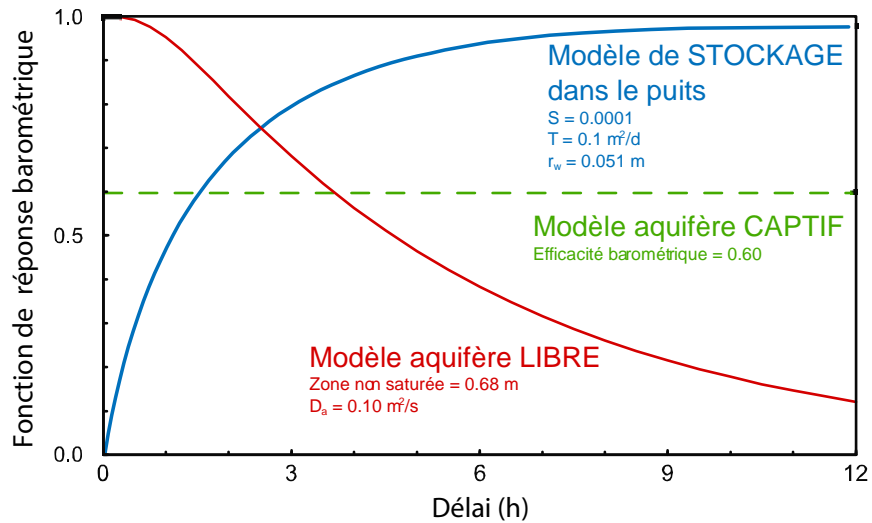


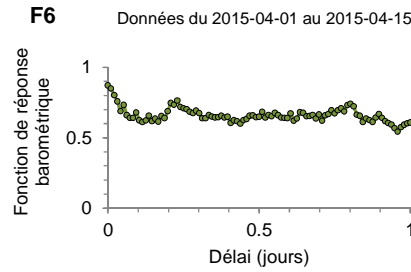
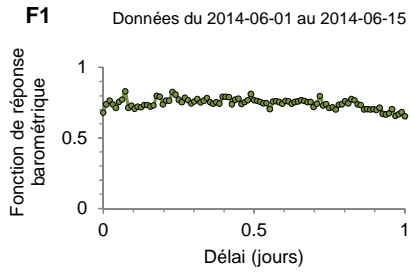
Figure 27. Exemples théoriques de réponses barométriques typiques pour des cas idéalisés dans des aquifères libres, captifs et avec stockage dans le puits (adapté de Rasmussen et Crawford (1997) & Spaine (2002))

5.4.2 Application aux données de Saint-Édouard

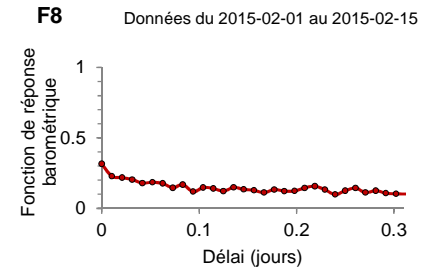
Les variations piézométriques et barométriques ont été suivies en continu dans les puits du projet. Les deux types de mesure ont été faites à intervalles relativement rapprochés (aux 15 min).

Différents délais (jusqu'à 3 jours) ont été testés pour avoir un bon aperçu du comportement des puits. Ces analyses ont été faites à l'aide d'échantillons de données d'une durée totale d'environ quinze jours. Plusieurs périodes de temps ont été testées pour chaque puits afin de s'assurer de la cohérence des résultats. Les fonctions de réponse barométrique de chacun des puits ont été calculées à l'aide du logiciel KGS_BRF. Les courbes utilisées pour la comparaison avec les modèles théoriques de la figure 27 sont présentées dans les graphiques de la figure 28.

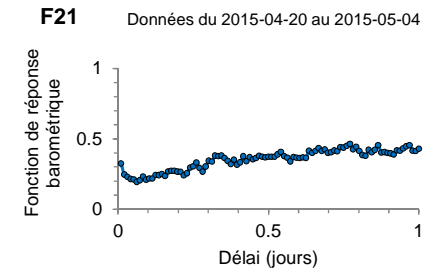
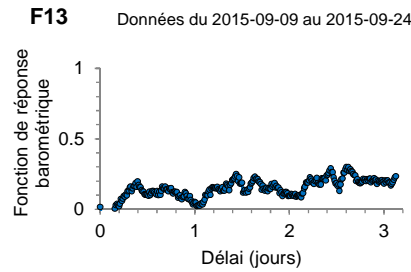
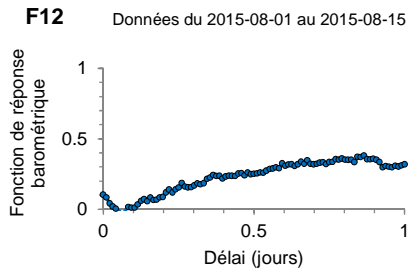
Puits en nappe captive :



Puits en nappe libre :



Puits avec effets de stockage dominants :



Puits en nappe captive avec effet de stockage dans le puits :

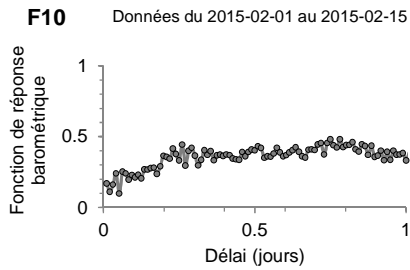
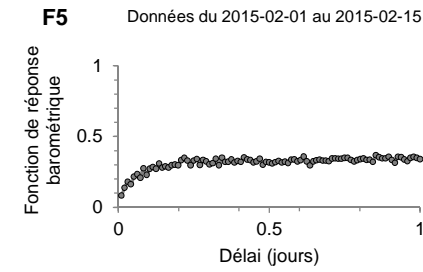
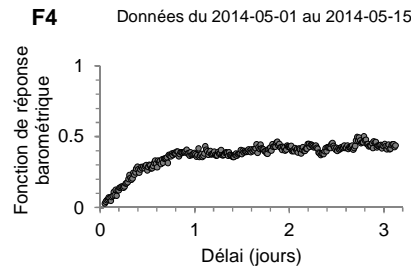
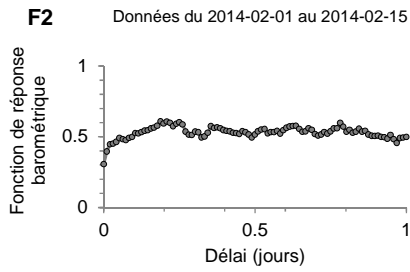


Figure 28. Exemples représentatifs des courbes de fonction de réponse barométrique pour chacun des puits classés par type modèle théorique de réponse barométrique

Les puits **F1 et F6** ont un comportement similaire. Les variations de la fonction de réponse barométrique sont relativement faibles et reflètent donc plutôt des **conditions captives**. Ce comportement correspond bien à la géologie observée dans les journaux de forages des puits F1 et F6. L'aquifère rocheux peu fracturé est ici recouvert par des dépôts meubles de faibles conductivités hydrauliques (appartenant uniquement à l'hydrofaciès HF1 de faible conductivité hydraulique). D'autre part, il faut noter que de façon générale en nappe captive, une partie importante de la charge est supportée par la matrice de l'aquifère (rocheuse dans notre cas). Ceci est particulièrement bien représenté dans la réponse barométrique de F1, qui oscille autour des valeurs relativement élevées de 0.6 et 0.8. Ceci traduit des conditions de faible perméabilité matricielle (concordant avec les lithologies du roc en présence). Enfin, pour les puits F1 et F6, les variations à plus long terme (délai entre 1 et 3 jours) présentent une très légère tendance à la diminution. Ceci peut peut-être s'expliquer par de légers flux verticaux via des cheminements préférentiels entre la surface et l'aquifère rocheux.

Le puits **F8** présente un comportement de **nappe libre**. Cependant, comme la réponse barométrique décroît rapidement avec l'augmentation du délai de temps, la zone non saturée ne semble pas entraîner un retard important dans la transmission du signal barométrique. Ceci pourrait s'expliquer par une zone non saturée peu épaisse (niveau piézométrique à 1,4 m au droit de F8). Il est aussi possible que des cheminements préférentiels (à travers la zone non saturée ou à travers le ciment du forage) existent et favoriseraient une transmission rapide du signal à travers la zone non saturée.

L'analyse des hydrogrammes des puits **F3, F7, F11, F14 et F20** n'a pas pu être réalisée à cause de la faible qualité des données (influence d'un pompage pour F3 et F7) et du manque de données (puits F11, F14 et F20).

Les puits **F12, F13 et F21** ont une fonction de réponse barométrique qui présente des effets de **stockage** significatifs qui empêchent la caractérisation du degré de confinement de l'aquifère à partir du calcul de la *BRF*. Pour tous les autres puits, la pente de la courbe est positive pour un délai entre 0 et 0.2-1 jour, indiquant des effets significatifs de stockage dans le puits, pour ensuite rester globalement nulle. Pour les délais supérieurs à 0,5 jour, des conditions de nappe captive sont observées. Ce comportement (**effet de stockage suivi par des conditions de nappe captive**) a été observé dans les puits **F2, F4, F5 et F10**. La présence de ces effets de stockage pourrait être due aux caractéristiques de construction des puits, particulièrement aux longueurs de tubage relativement importantes (F12 : 11 m, F21 : 21 m, F4 : 41 m, F5 : 12 m, F10 : 17m).

L'ensemble de ces résultats est résumé dans le tableau 11.

Tableau 11. Modèle théorique de fonction de réponse barométrique correspondant à chacun des puits - conditions de confinement correspondantes

Puits	Modèle théorique correspondant	Remarques	Conditions de confinement de la nappe
F1	Captive		Captive
F2	Captive + Stockage		Captive
F3		Analyse impossible, puits sous l'influence d'un pompage	-
F4	Captive+ Stockage		Captive
F5	Captive + Stockage		Captive
F6	Captif		Captive
F7		Analyse impossible, puits sous l'influence d'un pompage	-
F8	Libre		Libre
F10	Captive + Stockage		Captive
F11		Quantité de données insuffisantes	-
F12	Stockage	Puits non stabilisé: influence des parois ?	-
F13	Stockage	Puits non stabilisé: influence des parois ?	-
F14		Quantité de données insuffisantes	-
F20		Quantité de données insuffisantes	-
F21	Stockage	Puits non stabilisé : remontée du niveau d'eau suite à un pompage	-

5.5 Synthèse et discussion

Quatre méthodes distinctes (1 : Observation du niveau de la nappe sur le terrain, 2 : Caractéristiques des dépôts quaternaires, 3 : Fluctuations piézométriques, 4 : Fonction de réponse barométrique) ont été utilisées pour caractériser le niveau de confinement des puits. Le tableau 12 présente une synthèse des résultats obtenus avec ces techniques. Par comparaison des résultats obtenus, un type d'aquifère a été attribué à chacun des puits en se basant simplement sur la tendance dominante (sur trois résultats de confinement, les deux résultats identiques sont considérés comme les plus représentatifs). Quand seulement deux méthodes ont pu être appliquées sur les données et que les résultats fournissaient des estimations différentes (semi-captive et libre ou captive et libre), le résultat intermédiaire « semi-captive » a été choisi.

Les méthodes utilisées donnent globalement des résultats cohérents pour chacun des puits, à savoir un comportement majoritairement semi-captif à captif de l'aquifère au roc. Deux puits ont été identifiés comme installés dans des nappes libres. Le premier, F8, présente des dépôts quaternaires plutôt perméables (HF2) de très faible épaisseur, ce qui explique fort probablement ce comportement. Par contre, un doute subsiste quant au comportement de F20 qui semble libre selon la méthode des dépôts quaternaires. Cependant, du fait d'un manque de données piézométriques pour ce puits, les autres analyses n'ont pas pu être menées. En plus de ce manque de données, le forage F1 qui est situé à quelques mètres de F20 présente lui, à la lumière des analyses de fluctuations piézométriques et de fonction de réponse barométrique, un comportement plutôt captif, bien que sa couverture quaternaire soit très comparable à celle de F1. Le confinement identifié pour F20 à partir de nos données n'est donc probablement pas représentatif des conditions réelles. Ainsi, lorsque seule l'analyse à partir de dépôts quaternaires permettait de conclure quant au confinement des puits, surtout lorsque ces dépôts sont de faible épaisseur, un degré de confiance faible a été attribué à nos estimations (cas des puits F14, F20 et F21) (tableau 12). L'exemple des puits F1 et F20 met bien en avant le fait que les résultats obtenus avec les quatre méthodes ne se valent pas tous. Ainsi, comme proposée dans ce document, l'utilisation de plusieurs méthodes conjointement permet de confirmer les résultats de ces méthodes qualitatives entre eux et d'augmenter le niveau de confiance des interprétations réalisées. Les sources d'erreurs liées aux données initiales peuvent être importantes (mauvaise connaissance des lithologies des dépôts quaternaires et de leurs épaisseurs, relevés piézométriques de mauvaise qualité ou qui incluent trop peu de données, etc.). Il est donc risqué de se contenter d'une seule approche pour caractériser le degré de confinement.

À l'échelle de la zone d'étude, les dépôts meubles, malgré leur hétérogénéité (voir la cartographie en figure 2), constituent une couverture du roc relativement imperméable. Elle serait donc responsable, du moins en grande partie, au caractère majoritairement captif de l'aquifère au roc. Cependant, le roc de la région étant très peu fracturé dans certains puits (Crow et Ladevèze, 2015), il contribue lui aussi, et de façon significative, au confinement de la nappe qu'il contient.

Tableau 12. Récapitulatif des résultats obtenus avec les quatre méthodes et choix finaux pour le type de nappe recoupée par les différents puits

Puits	Estimation du confinement de la nappe basée sur :				Synthèse : Conditions de confinement de la nappe	Degré de confiance
	une observation du niveau de la nappe sur le terrain	les caractéristiques des dépôts meubles	les caractéristiques des courbes piézométriques	les réponses barométriques		
F1	-	Captive	Captive	Captive	Captive	Élevé
F2	-	Semi-captive	Captive	Captive	Captive	
F3	-	Captive	-	-	Captive	
F4	-	Captive	Captive	Captive	Captive	
F5	-	Captive	Semi-captive	Captive	Captive	
F6	-	Captive	Semi-captive	Captive	Captive	
F7	-	Semi-captive	Semi-captive	-	Semi-captive	
F8	-	Libre	Libre	Libre	Libre	
F10	Captive	Semi-captive	Captive	Captive	Captive	
F11	-	Semi-captive	Captive	-	Semi-captive	
F12	-	Captive	Captive	-	Captive	
F13	-	Libre	Captive	-	Semi-captive	
F14	-	Captive	-	-	Captive	
F20	-	Libre	-	-	Libre	Faible
F21	-	Semi-captive	-	-	Semi-captive	

6 Propriétés hydrauliques du roc

Des essais *in situ* de perméabilité à charge variable (mieux connus sous leur nom anglais « *slug tests* ») ont été réalisés dans les puits forés dans le cadre du projet. L'objectif de ces tests est d'estimer la conductivité hydraulique K du massif rocheux. Ce paramètre permet de quantifier le potentiel qu'a la roche à conduire les écoulements. Une valeur de ce paramètre est estimée par puits. La valeur de K est donc un bon indicateur de la capacité du puits à produire de l'eau.

6.1 Méthodologie de terrain

Ces méthodes consistent à appliquer une variation de charge hydraulique initiale (H_0) de façon « instantanée » dans le puits. Ceci peut être réalisé aussi bien en augmentant le niveau d'eau dans le puits qu'en le diminuant de façon très rapide. Ceci induit respectivement une descente ou une remontée du niveau d'eau, jusqu'au retour de la nappe à son niveau initial. Les mesures de ces variations seront utilisées pour le calcul de la conductivité hydraulique (K). La magnitude de H_0 doit également être mesurée et servira également pour le calcul de K . Ainsi, tout au long des essais, les variations piézométriques sont mesurées à l'aide d'un capteur de pression, dont la fréquence de mesures est ajustée en fonction de la vitesse des variations piézométriques. Dans notre cas, des mesures ont été prises avec un capteur de pression de la marque *Solinst Leveloger Model 3001* avec un pas de temps de 1 seconde.

Étant donné que les puits se sont avérés avoir des propriétés hydrauliques très variables selon les secteurs, il a été nécessaire de faire appel à plusieurs méthodes pour couvrir ces larges plages de K . Trois méthodes ont été utilisées : la méthode d'initiation de test pneumatique (« méthode pneumatique »), la méthode avec pompage rapide d'un volume d'eau connu et la méthode d'initiation de test mécanique (« méthode mécanique »).

La plupart des essais ont été faits avec la méthode pneumatique. Cette méthode est en effet facile et rapide à appliquer sur le terrain. De plus, les résultats obtenus avec cette technique sont généralement de très bonne qualité. Les puits les moins perméables ont été testés en pompant rapidement un volume restreint d'eau et en suivant la remontée du niveau d'eau. Certains puits ont été testés avec une troisième méthode (la méthode mécanique) afin de comparer les résultats obtenus avec ceux des deux dernières méthodes. Cependant, les résultats obtenus avec la méthode mécanique étaient de faible qualité, il a donc été choisi de ne pas tester tous les puits avec cette méthode.

6.1.1 Méthode d'initiation de test pneumatique (« méthode pneumatique »)

Le principe de cette méthode est d'injecter de l'air dans le puits à l'aide d'un compresseur afin de faire diminuer le niveau d'eau. Une fois le puits mis sous pression et le niveau d'eau stabilisé, l'air sous pression est instantanément relâché via une valve. Ce retour à la pression atmosphérique dans le puits déclenche la remontée du niveau d'eau, relativement rapidement au départ, puis plus lentement par la suite, jusqu'à son niveau initial. Le matériel utilisé ainsi que deux des courbes acquises pendant les essais sont présentés aux figures 29 et 30.

La méthode a été appliquée sur des puits de 100 et 150 mm (4 et 6 po) de diamètre. Les variations de niveau d'eau produites suite à la mise sous pression du puits vont de quelques dizaines de centimètres à 2 ou 3 m. Au moins trois essais par puits ont été réalisés avec au moins deux dont le rabattement varie au maximum d'un facteur de 2, afin de se conformer aux recommandations de Butler (1997). Les niveaux d'eau avant et après le test ont aussi été mesurés manuellement afin de

vérifier que ces derniers étaient bien les mêmes. Des niveaux différents peuvent indiquer un mauvais développement de puits.



Figure 29. Matériel utilisé pour réaliser les essais par la méthode pneumatiques

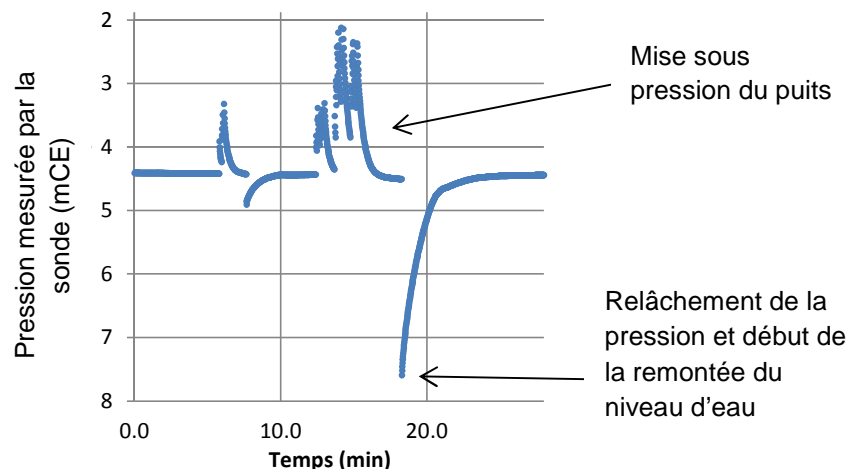


Figure 30. Exemples d'enregistrements acquis par le capteur de pression lors de deux essais réalisés à la suite sur un puits du projet.

6.1.2 Méthode avec pompage rapide d'un volume d'eau connu

Cette méthode a été préférée à la méthode pneumatique pour les puits ayant les K les plus faibles (F13 et F21). Dans ces cas spécifiques et avec la méthode pneumatique, il est difficile de produire un rabattement dans un délai de temps raisonnable.

Ainsi, afin de réduire le temps pour initier le rabattement, un essai de perméabilité *in situ* « modifié » a été effectué à l'aide d'un pompage. Une pompe *Grundfos Redi-Flo2* a été utilisée. Un volume d'eau a été rapidement pompé du puits pour produire un rabattement. Ensuite, la pompe a été rapidement retirée du puits. Le roc traversé par le puits étant de très faible conductivité hydraulique, la variation de niveau d'eau peut être considérée comme « instantanée » puisque l'aquifère est lent à réagir face à cette variation et que l'eau retirée provient essentiellement de l'eau emmagasinée dans le tubage du puits.

De plus, avant l'insertion de la pompe dans le puits et immédiatement après le pompage (et le retrait de la pompe), le niveau d'eau est mesuré manuellement pour connaître la valeur de H_0 créée

par le pompage. Des variations initiales de niveau d'eau entre 1 et 3 m ont été générées par cette méthode.

La remontée du niveau d'eau est mesurée en continu et est utilisée pour calculer K . Il est à noter qu'une sonde barométrique doit être installée à proximité du forage pour collecter les données de pressions barométriques avec le même pas de temps. En effet, comme le suivi de la remontée du niveau d'eau se fait sur plusieurs heures, voire jours dans le cas des puits les moins perméables, il est nécessaire de compenser les variations des niveaux d'eau dans le puits avec les pressions barométriques pour ne traiter que le signal lié à l'essai de perméabilité.

Il est certain qu'en utilisant cette méthode une erreur supplémentaire est introduite dans l'estimation de K . Celle-ci peut être due à une mauvaise mesure de H_0 ou à un pompage qui n'aurait pas été effectué suffisamment rapidement. Dans ces deux cas, les conditions d'applicabilité d'un essai de perméabilité *in situ* ne sont pas respectées (réaliser la variation de charge hydraulique initiale de façon « instantanée » et connaître sa magnitude exacte, tel que décrit dans Butler (1997)). Avant d'utiliser la méthode avec pompage, il est donc nécessaire de tenter un essai de perméabilité avec la méthode pneumatique pour s'assurer que cette dernière n'est pas adaptée aux conditions de perméabilité du puits. Des méthodes alternatives pour des contextes de roc de très faible conductivité hydraulique existent et sont décrites dans la section 6.6. Celles-ci sont plus lourdes à appliquer sur le terrain et n'ont donc pas été mises en œuvre dans la présente étude, mais pourraient constituer une alternative intéressante dans un contexte d'étude similaire à celui de la région de Saint-Édouard.

6.1.3 Méthode d'initiation de test mécanique (« méthode mécanique »)

Ces essais de perméabilité ont été effectués à l'aide d'un tube de PVC de 50 mm (2 po) de diamètre et de 150 mm (6 pieds) de long rempli de sable. Cette sonde est descendue dans le puits pour faire brutalement augmenter le niveau d'eau dans le puits. La descente du niveau d'eau est ensuite suivie jusqu'au retour au niveau d'eau initial (avant insertion de la sonde). Enfin, la sonde est retirée brutalement de la colonne d'eau et c'est la remontée du niveau d'eau qui est mesurée. La descente et la remontée du niveau peuvent toutes les deux être utilisés pour calculer une valeur de conductivité hydraulique. Les variations de niveau d'eau engendrées vont de 20 à 35 cm dans des puits de 100 mm (4 po) de diamètre.

Cette méthode a été testée sur les puits F1, F2, F3, F4, F11 et F12. Cependant, les résultats obtenus avec la méthode pneumatique étaient de meilleure qualité, la méthode d'immersion de sonde n'a donc pas été choisie pour tester les autres puits (il est plus facile de produire une variation de charge hydraulique initiale de façon « instantanée » avec la méthode pneumatique qu'avec la méthode d'immersion de sonde). De plus, la méthode avec pompage est préférée pour les puits les moins perméables. La méthode par immersion de sonde aurait pu être utilisée pour ces puits de très faibles K , le tout en suivant les variations de niveau d'eau sur des périodes de temps longs. Cependant, compte de tenu du fait que nos puits les moins perméables étaient de gros diamètre (152 mm, 6 po), pour faire varier significativement le niveau d'eau, il aurait alors fallu utiliser une sonde de grande taille. Cette solution n'a pas été retenue compte tenu des contraintes logistiques liées à l'utilisation de ce genre de matériel.

Ainsi, les quelques résultats obtenus par la méthode mécanique ont donc plutôt été utilisés à titre comparatif. Ceci a permis de confirmer les résultats obtenus avec la méthode pneumatique et avec la méthode par pompage.

6.2 Solutions analytiques utilisées pour l'interprétation

Pour l'interprétation de chacun des essais de perméabilité *in situ*, plusieurs modèles analytiques ont été utilisés. Ainsi, l'estimation des propriétés hydrauliques a été faite à partir de deux méthodes différentes pour s'affranchir de certaines erreurs dues aux hypothèses simplificatrices liées au développement de ces modèles analytiques. Le logiciel AQTESOLV Pro 4.0 (Duffield, 2007) a été utilisé pour l'interprétation.

Le modèle sans stockage de Bouwer et Rice (1976) a été utilisé en première approximation. Ce modèle est une extension du modèle de Hvorslev (1951), qui considère que l'aquifère est d'extension latérale infinie et que le puits le pénètre sur toute sa hauteur. Ces hypothèses sont peu réalistes dans la plupart des cas. Bouwer et Rice (1976) ont bonifié ce modèle avec des coefficients de forme couvrant un champ de géométries de puits plus variées. La pénétration partielle du puits dans l'aquifère est notamment prise en compte dans ce dernier modèle. Une analyse basée sur ce modèle nécessite un calage de la courbe des données expérimentales (variation de charge selon le temps), sur une droite théorique issue du modèle considéré (Hvorslev ou Bouwer & Rice). Quand les résultats expérimentaux ne suivent pas une droite (allure concave de la courbe de charge normalisée par H_0 selon temps), il faut alors négliger certaines portions de la courbe lors du calage. Les recommandations sont de caler la droite théorique sur les portions de courbes de charge normalisées de 0,25 à 0,15 et de 0,30 à 0,20 pour les approches de Hvorslev et Bouwer & Rice respectivement (Butler Jr, 1996). Ces recommandations permettent de minimiser l'effet du stockage sur l'estimation de K . Malgré ces limitations, les résultats issus de ce modèle constituent tout de même une bonne première estimation de K .

Le modèle du Kansas Geological Survey (KGS) (1994) (Hyder et al., 1994) a ensuite été utilisé pour estimer les valeurs de conductivité hydraulique. Ce modèle est une extension du modèle de Cooper, Bredehoeft et Papadopulos (CBP) (Cooper et al., 1967). Ce dernier permet de tenir compte d'une partie plus importante de la courbe expérimentale et de prendre en compte les effets de stockage (emménagement spécifique). Il est ainsi possible par exemple avec cette méthode de modéliser l'effet des parois de puits sur le déroulement du test. Par contre, afin d'estimer correctement l'emménagement spécifique, il est plutôt recommandé d'utiliser un puits d'observation à proximité du puits testé (Butler et al., 1996). De plus, le modèle du KGS tient compte, contrairement au modèle de CPB, de la pénétration partielle de l'aquifère par le puits. La solution du KGS 1994 est actuellement considérée, par certains auteurs, comme la méthode la plus complète pour une bonne analyse de données des essais de perméabilité (Neville, 2011). Ce modèle n'est en effet pas développé sur la base d'hypothèses de géométries ou de conditions hydrauliques trop simplifiées.

Les conditions d'applications et les hypothèses principales liées à chacune des méthodes sont récapitulées au tableau 13.

Tableau 13. Principales hypothèses et conditions d'application des solutions utilisées

Solution	Type de nappe	Hypothèses principales
Bouwer & Rice, 1976	Captive et libre	Pas de stockage (formation incompressible), pénétration partielle du puits dans l'aquifère
KGS, 1994	Captive et libre	Pénétration partielle du puits dans l'aquifère, emmagasinement dans l'aquifère
Toutes ces solutions (hypothèses communes)		<ul style="list-style-type: none"> - aquifère d'extension latérale infinie - aquifère homogène, isotrope et d'épaisseur uniforme - régime d'écoulement transitoire - écoulement est horizontal jusqu'au puits - variation initiale de niveau d'eau produite de façon instantanée

6.3 Résultats obtenus et discussion

Pour chaque puits, les valeurs de K obtenues avec les deux méthodes d'interprétation des essais sont présentées à la figure 31. Les valeurs numériques sont également disponibles au tableau 14.

Les données sont aussi regroupées à la figure 32 selon la localisation des puits dans les trois grands domaines structuraux de la région. Une carte illustrant la répartition de ces valeurs de K est présentée en figure 33.

Sur certains puits, compte tenu de la faible conductivité hydraulique du roc, de nombreuses tentatives ont été nécessaires pour obtenir une mesure acceptable. De plus, les remontées prenaient parfois plusieurs heures. Ainsi, après plusieurs essais, une, deux ou trois mesures jugées représentatives pour ce contexte ont été conservées. Compte tenu des contraintes de temps, les essais n'ont pas toujours pu être répliqués jusqu'à ce que trois valeurs puissent être conservées à chaque site. Dans cette section de résultats, la valeur ou la moyenne des valeurs les plus représentatives sont présentées pour chaque puits.

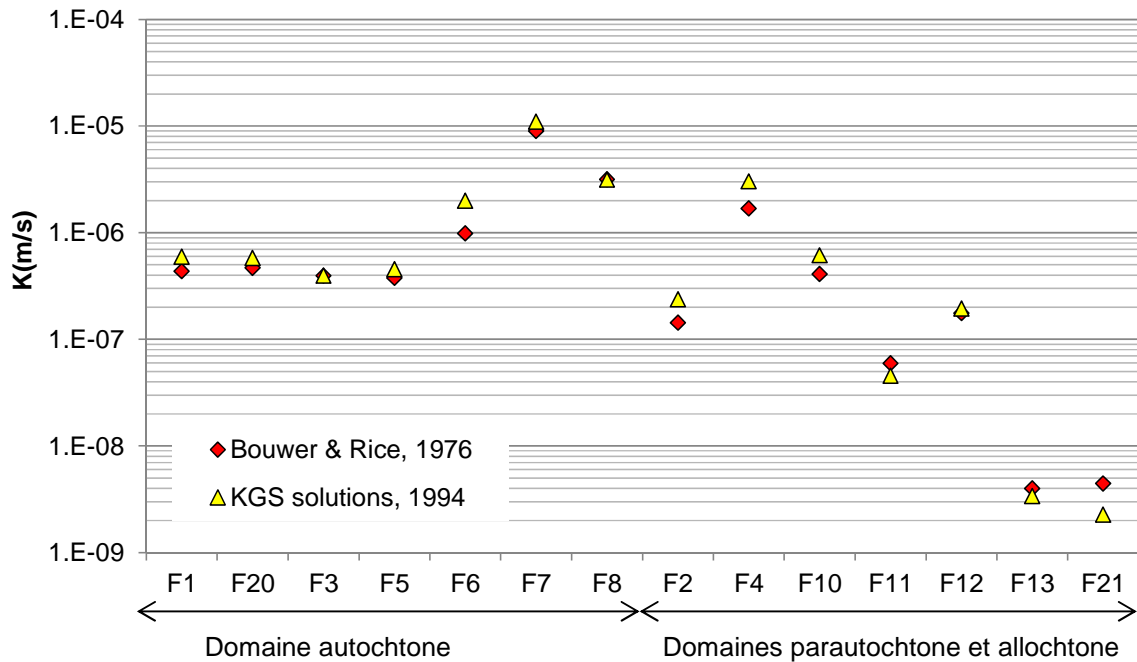


Figure 31. Conductivités hydrauliques (K) estimées avec deux solutions analytiques : Bouwer & Rice, 1976 et KGS Solutions, 1994.

Les données ont été acquises à l'aide d'essais de perméabilité *in situ* avec pompage pour les puits F13 et F21 et avec la méthode pneumatique pour les autres puits.

Tableau 14. Valeurs numériques de conductivité hydraulique mesurées sur chacun des puits

Puits	Méthode utilisée	Type de nappe	K (m/s)	
			Bouwer & Rice, 1976	KGS solutions, 1994
F1			4.35x10 ⁻⁷	5.93x10 ⁻⁷
F2			1.43x10 ⁻⁷	2.38x10 ⁻⁷
F3			3.93x10 ⁻⁷	3.97x10 ⁻⁷
F4		Captive	1.69x10 ⁻⁶	3.02x10 ⁻⁶
F5			3.78x10 ⁻⁷	4.55x10 ⁻⁷
F6	Méthode pneumatique		9.83x10 ⁻⁷	2.00x10 ⁻⁶
F7			8.96x10 ⁻⁶	1.10x10 ⁻⁵
F8		Libre	3.17x10 ⁻⁶	3.12x10 ⁻⁶
F10			4.09x10 ⁻⁷	6.15x10 ⁻⁷
F11			5.96x10 ⁻⁸	4.55x10 ⁻⁸
F12			1.76x10 ⁻⁷	1.94x10 ⁻⁷
F13	Méthode avec pompage	Captive	4.00x10 ⁻⁹	3.38x10 ⁻⁹
F20	Méthode pneumatique		4.66x10 ⁻⁷	5.78x10 ⁻⁷
F21	Méthode avec pompage		4.45x10 ⁻⁹	2.26x10 ⁻⁹

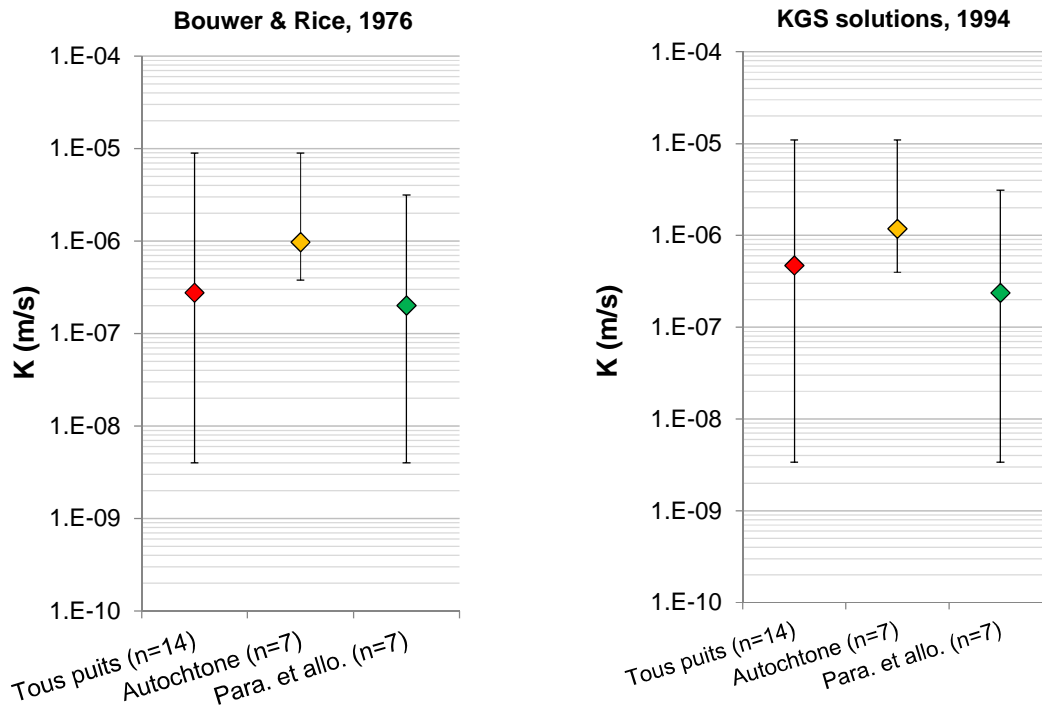
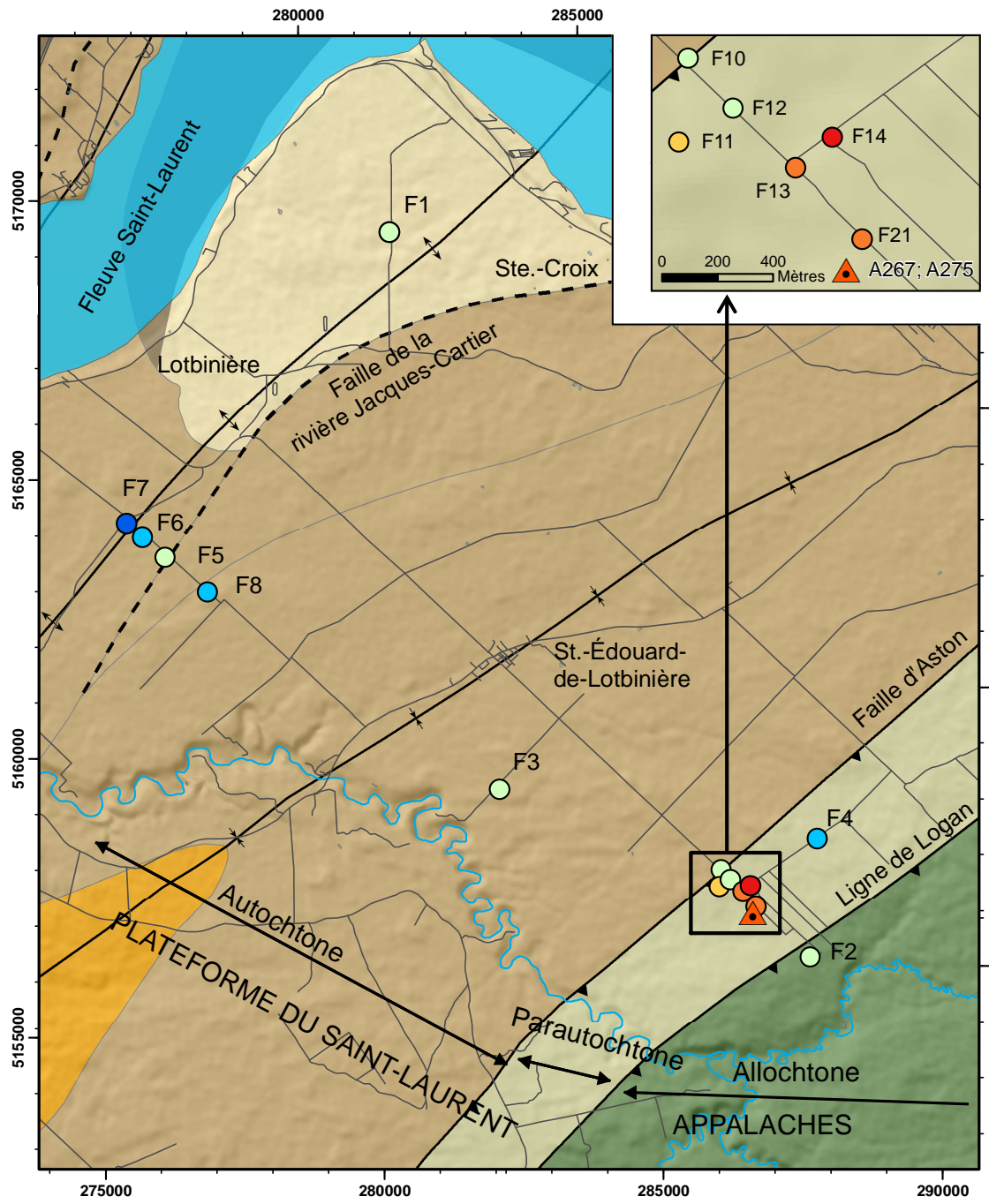


Figure 32. Compilation des moyennes géométriques, ainsi que des valeurs minimales et maximales de K selon la localisation des puits dans les grands domaines structuraux de la région d'étude.

Notes :

Para. : Parautochtone , allo. : allochtone

Domaine autochtone : puits F1, F3, F5, F6, F7, F8, F20 / Domaines parautochtone et allochtone : puits F2, F4, F10, F11, F12, F13, F21



Légende

Natural Resources Canada / Ressources naturelles Canada

K (essais de perm. in situ) (m/s)

- 10⁻⁷ (light green circle)
- 10⁻⁸ (yellow circle)
- 10⁻⁹ (orange circle)
- inférieur à 10⁻⁹ (red circle)
- 10⁻⁵ (dark blue circle)
- 10⁻⁶ (light blue circle)

▲ Puits gaziers A267 & A275

— Routes

— Rivières

↕ Anticlinal de Leclercville

↔ Synclinal de Chambly-Fortierville

- - - Faille normale

↙ Faille de chevauchement

Domaine autochtone

Ordovicien supérieur

- Gp. de Lorraine (Fm. de Pontgravé) (yellow)
- Gp. de Lorraine (Fm. de Nicolet) (tan)

Ordovicien moyen

- Gp. de Ste.-Rosalie (Fm. de Lotbinière) (light tan)
- Shale d'Utica (brown)

Domaine parautochtone

Ordovicien moyen

- Gp. de Ste.-Rosalie (Fm. de LesFonds) (light green)

Domaine allochtone

- Fm. de Bourret (dark green)

Carte géologique : Thériault & Beauséjour, 2012

0 0.5 1 2 3 4 Kilomètres

Projection: UTM NAD83 19N

Figure 33. Distribution spatiale des valeurs de K (obtenues avec la méthode du KGS, 1994).

Les conductivités hydrauliques (K) sont comprises entre 2.3×10^{-9} m/s et 1.1×10^{-5} m/s pour les puits de la région de Saint-Édouard. La moyenne géométrique est nettement plus élevée dans les puits du domaine autochtone (1.8×10^{-6} m/s) que dans ceux des deux autres domaines (2.3×10^{-7} m/s). De plus, dans les domaines parautochtone et allochtone, les valeurs de K sont plus étalées que dans le domaine autochtone (trois ordres de grandeur de K comparativement à un peu plus d'un pour le domaine autochtone).

Dans le domaine autochtone, des lits de siltstone (Formation de Nicolet) d'épaisseurs significatives (plusieurs mètres voire dizaines de mètres) sont présents et alternent avec les lits de shale. Ces intervalles de siltstone sont densément fracturés (Crow et Ladevèze, 2015, Ladevèze et al., 2016b) et permettent à ces puits de produire des quantités d'eau significativement plus importantes que les puits dont la lithologie dominante est le shale.

Dans le sud de la zone d'étude (domaines parautochtone et allochtone), seul le puits F4 a une valeur de K supérieure à 10^{-7} m/s. Cependant, ce comportement est probablement lié à un défaut de scellement du puits. En effet, les lithologies et la déformation des roches dans ce forage sont comparables aux puits avoisinants. La différence est qu'au niveau de F4, le roc est surmonté d'un épais aquifère sableux, la conductivité hydraulique du puits est probablement liée à cet aquifère sableux plutôt qu'aux caractéristiques du roc puisque la partie supérieure du puits est probablement partiellement ouverte sur cet aquifère. Tous les autres puits présentent des valeurs de K faibles voire très faibles (le puits F14 est notamment resté à sec pendant tout le projet et n'a donc même pas pu être testé). Les faibles conductivités hydrauliques des puits dans les domaines parautochtone et allochtone s'expliquent par le fait que nos forages recoupent quasiment exclusivement du shale peu perméable.

6.4 Validation des valeurs de K

Les résultats présentés à la figure 34 montrent que les valeurs de conductivité hydraulique obtenues selon les trois méthodes d'essais de perméabilité *in situ* sont globalement similaires pour une même solution analytique. Ceci confirme la représentativité des valeurs obtenues à partir de ces trois méthodes, qui sont simples et rapides à mettre en œuvre.

La méthode pneumatique a été choisie pour tester l'ensemble des puits, car elle permet un plus grand contrôle sur l'intensité du rabattement imposé dans le puits. Certains puits ont également un diamètre plus gros (150 mm, soit 6 po), rendant la méthode mécanique difficile à appliquer sur le terrain. Enfin, la méthode pneumatique a l'avantage non négligeable de permettre d'appliquer un « choc hydraulique » quasi instantané (comme requis dans les hypothèses de développement des solutions analytiques), ce qui n'est pas tout à fait le cas quand on utilise une sonde avec la méthode mécanique. En effet, la sonde n'est pas toujours insérée suffisamment rapidement dans la colonne d'eau, ce qui ajoute un bruit dans les données de niveau d'eau.

Enfin, les résultats ont montré que, globalement, les valeurs de K obtenues étaient similaires, quelle que soit la solution analytique utilisée pour l'interprétation. Les valeurs obtenues avec solution KGS (1994) sont toutefois considérées être les plus représentatives des conditions du milieu, car cette méthode est basée sur des hypothèses plus représentatives des conditions de terrain réelles.

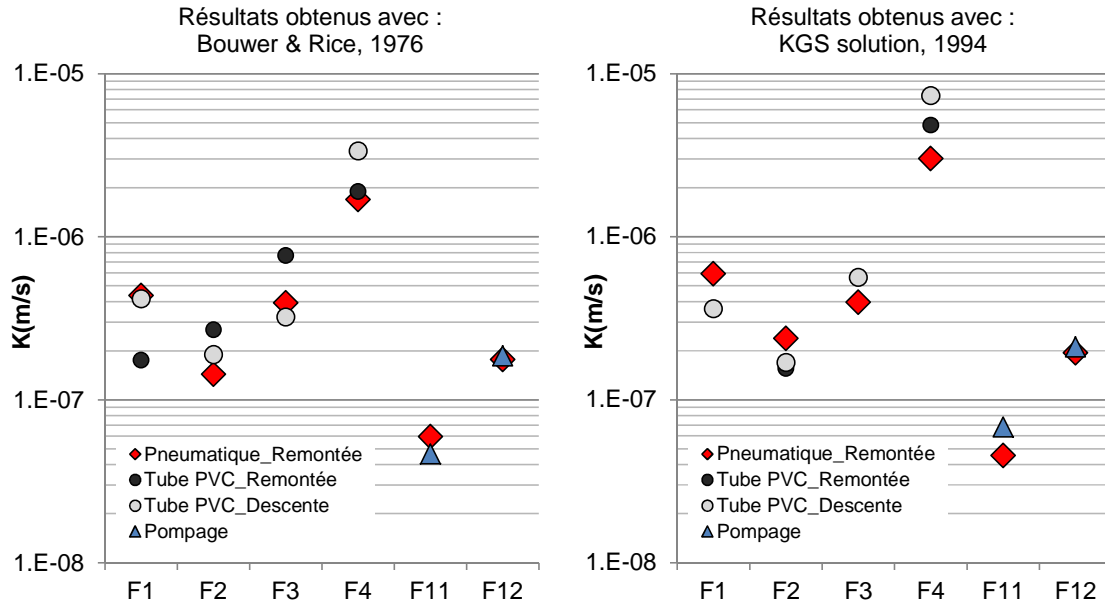


Figure 34. Comparaison des résultats d'essais de perméabilité in situ obtenus avec les trois méthodes de terrain utilisées pour les solutions de Bouwer & Rice (1976) et solution KGS (1994).

6.5 Recommandations pour d'autres travaux dans un contexte de roc de très faible K

Lors du projet, il a été nécessaire d'utiliser la méthode d'essai hydraulique « modifiée » à l'aide d'un pompage plutôt que la méthode pneumatique pour les puits de très faible conductivité hydraulique. Ceci était justifié par le fait qu'avec la méthode pneumatique, la remontée du niveau d'eau pouvait prendre un temps particulièrement long.

Cependant, la méthode « modifiée » à l'aide d'un pompage est moins précise que la méthode pneumatique. Ceci, principalement à cause des risques de mauvaises estimations de la variation initiale du niveau piézométrique et du bruit pouvant s'ajouter au signal de remontée du niveau d'eau. En effet, la remontée se faisant sur de longues durées (plusieurs jours), le signal peut être bruité par exemple par l'influence de la barométrie, par des variations piézométriques régionales ou par des épisodes de recharge, etc.

Deux autres techniques de mesure existent pour tester le roc de très faible K et pourraient être utilisées dans des conditions similaires à celles de la région de Saint-Édouard. Ces méthodes permettent une estimation plus fiable de K . La logistique de terrain est également plus lourde avec ces systèmes. Typiquement, ce genre de méthode peut être utilisé pour des valeurs de K inférieures à 10^{-8} m/s.

Plus de détails sur ces méthodes sont présentés notamment dans Butler (1997) et sont brièvement décrites dans les sous-sections suivantes.

6.5.1 Essais de perméabilité pneumatiques avec un petit diamètre de puits pour réduire le temps de l'essai

Cette méthode est similaire à celle de l'essai de perméabilité pneumatique à la différence qu'un obturateur gonflable (*packer*) est inséré dans le puits avec en son centre, un tubage de petit diamètre. Un test de remontée est effectué dans ce tubage, qui relie la surface à la section de puits sous l'obturateur. Le dispositif de terrain est présenté à la figure 35.

La réduction du diamètre effectif du forage par cette méthode permet de réduire le temps de remontée du niveau d'eau à la suite de la variation instantanée de charge hydraulique (dépressurisation du puits) (Cooper et al., 1967). À titre d'exemple, en utilisant un tubage de 50 mm (2 po) dans un puits dont le diamètre est de 152 mm (6 po), le temps de remontée est 9 fois moins long que si l'essai pneumatique avait été fait directement sur le tubage du puits.

6.5.2 Le « *shut-in test* » (ou *pulse-test*) pour réduire le temps de l'essai et tester des formations très peu perméables

Ce type d'essai est également réalisé avec un tubage de diamètre inférieur inséré dans le puits, mais cette fois deux obturateurs pneumatiques sont utilisés. De l'eau est injectée dans le tubage depuis la surface à l'aide d'une pompe jusqu'à ce qu'il soit rempli. Le dispositif de terrain est présenté à la figure 36. Deux sondes de pression sont utilisées. La première est disposée sous les deux obturateurs afin de suivre les variations de pression tout au long du test. La deuxième est insérée entre les deux obturateurs. Ceci permet d'avoir un niveau de pression de référence, notamment pour s'assurer qu'il n'y a pas de fuite de fluides entre les parois du tubage et l'obturateur lors de la mise sous-pression du puits lors du test.

Le tubage est ensuite pressurisé avec un volume supplémentaire d'eau à l'aide de la pompe. Pour réaliser le test, la pression est alors brusquement relâchée. C'est la décroissance de pression d'eau dans la colonne qui est suivie et qui sera utilisée pour l'interprétation du test, comme dans les autres essais de perméabilité. Cette méthode a été initialement décrite par (Bredehoeft et Papadopulos, 1980) et modifiée par (Neuzil, 1982). Cette méthode permet de réduire considérablement le temps d'essai par rapport aux essais de perméabilité *in situ* conventionnels, particulièrement dans les formations de conductivités hydrauliques très faibles. Il faut noter qu'ici, contrairement aux tests conventionnels, les variations de charges ne sont plus fonction des variations de niveau d'eau dans le puits, mais sont plutôt fonction de la compressibilité de l'eau ainsi que du matériel déployé pour l'essai (obturateurs, tubages, etc.. voir Neuzil, 1982 pour plus de détails). La compressibilité de l'eau est généralement négligée dans les méthodes conventionnelles.

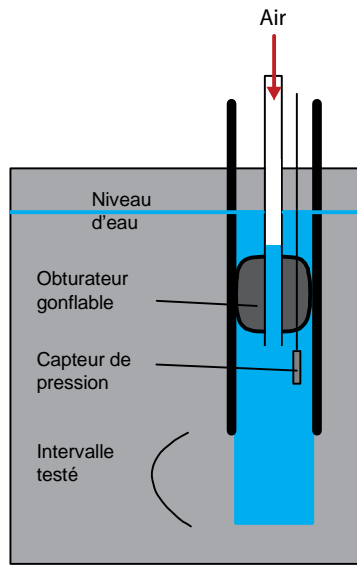


Figure 35. Dispositif de terrain pour un essai de perméabilité pneumatique avec un diamètre de puits réduit

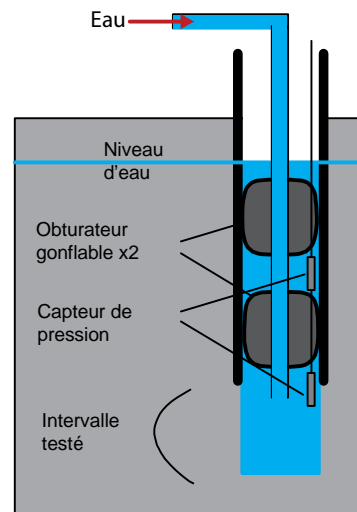


Figure 36. Dispositif de terrain pour le «shut-in test»

7 Conclusion

Dans le cadre du projet, quinze puits de surface ont été forés dans les dépôts quaternaires et le roc de la région de Saint-Édouard-de-Lotbinière. À la suite de ces forages, des travaux de caractérisation hydrogéologique ont été menés sur une période s'étalant de l'automne 2013 à l'automne 2015. Deux défis principaux ont dû être relevés lors des travaux. Le premier résidait dans le fait que les dépôts quaternaires sont très hétérogènes. Les implications sur la distribution spatiale de leurs conductivités hydrauliques et sur le confinement de l'aquifère au roc sous-jacent sont donc multiples. Le second défi a été de caractériser les propriétés hydrauliques du roc dans une région où ces dernières peuvent varier de plusieurs ordres de grandeur. Il a donc été nécessaire de recourir à différentes approches d'initiation de tests hydrauliques pour effectuer cette caractérisation.

Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- Les suivis piézométriques menés sur les puits du projet ont démontré que l'aquifère au roc présente un comportement relativement uniforme à l'échelle de la zone d'étude. L'écoulement régional se fait du piémont appalachien en direction du fleuve Saint-Laurent.
- Les dépôts quaternaires recouvrant le roc du territoire sont très hétérogènes. Afin de faciliter la compréhension de leurs caractéristiques hydrauliques, les lithologies ont été regroupées en quatre classes d'hydrofaciès. Les valeurs de conductivités hydrauliques de ces dépôts s'étalent sur quatre ordres de grandeur (10^{-8} à 10^{-4} m/s).
- L'étude des conditions de confinement de l'aquifère rocheux a révélé que la plupart des puits ont été forés dans des aquifères semi-captifs à captifs. Ce sont les dépôts quaternaires relativement peu perméables du secteur qui contribuent significativement au confinement de l'aquifère rocheux. Cependant, outre les dépôts quaternaires peu perméables, le roc peu fracturé contribuerait lui aussi au confinement de l'aquifère rocheux. La contribution du roc peu fracturé au confinement a pu être mise en évidence grâce à l'utilisation combinée de quatre méthodes de caractérisation du degré de confinement.
- Enfin, à partir d'essais *in situ* de perméabilité à charge variable, les propriétés hydrauliques du roc ont été caractérisées. La conductivité hydraulique s'étale sur environ quatre ordres de grandeur (10^{-9} à 10^{-5} m/s), les valeurs les plus faibles étant obtenues à proximité du piémont appalachien.

Ainsi, en plus d'apporter de nouveaux éléments de compréhension du fonctionnement des aquifères de la région de Saint-Édouard, l'ensemble des travaux proposés dans cette étude pourrait servir de base pour mener un autre projet dans des contextes géologiques et hydrogéologiques comparables.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les propriétaires de terrains de la région d'étude de nous avoir laissé y accéder pour forer un ou plusieurs puits et pour venir y faire des travaux par la suite.

Nous tenons également à souligner les contributions des municipalités du secteur qui nous ont notamment autorisées à utiliser les données des études hydrogéologiques réalisées pour leur compte sur le territoire.

Les auteurs voudraient également remercier D. Paradis (CGC) pour ses précieux conseils techniques et scientifiques, pour la révision de cette contribution et pour le prêt d'équipement pour la réalisation des essais hydrauliques. Nous remercions également S. Séjourné pour la relecture constructive de ce document.

Bibliographie

- Arrakis, 2004. Expertise hydrogéologique aux puits municipaux, Municipalité de Saint-Édouard. A302-01A.
- Arrakis, 2012. Construction d'un nouveau puits, Municipalité de Saint-Édouard. A302-06A.
- Bohling, G.C., Jin, W., Butler, J. J., 2011. Kansas Geological Survey Barometric Response Function Software User's Guide. In: Survey, K.G. (Ed.). The University of Kansas, Lawrence, KS.
- Bordeleau, G., Rivard, C, Lavoie, D., Lefebvre, R., Ahad, J., Mort, A., Xu, X., 2016a. A multi-isotope approach to determine the origin of gas in groundwater of the St-Edouard area, Quebec. In preparation.
- Bordeleau, G., Rivard, C., Lavoie, D., Lefebvre, R., Malet, X., 2016b. Geochemistry of groundwater in the St-Edouard area, Quebec, Canada, and its influence on the distribution of methane in the aquifers. In preparation.
- Bordeleau, G., Rivard, C., Lavoie, D., Lefebvre, R., Malet, X., Ladevèze, P., Mort, A., Ahad, J., 2016c. Geochemical characterization of shallow aquifers in the St-Edouard area, southern Quebec, Canada. In preparation.
- Bouwer, Herman, Rice, R. C., 1976. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, 12(3): 423-428 pages., doi: 10.1029/WR012i003p00423
- Bredehoeft, John D., Papadopoulos, Stavros S., 1980. A method for determining the hydraulic properties of tight formations. *Water Resources Research*, 16(1): 233-238 pages., doi: 10.1029/WR016i001p00233
- Butler, J. J., 1997. *The Design, Performance, and Analysis of Slug Tests*. Lewis publishers, Kansas Geological Survey, The University of Kansas.
- Butler, J. J., Jin, W., Mohammed, G. A., Reboulet, E. C., 2011. New Insights from Well Responses to Fluctuations in Barometric Pressure. *Ground Water*, 49(4): 525-533 pages., doi: 10.1111/j.1745-6584.2010.00768.x
- Butler, James J., McElwee, Carl D., Liu, Wenzhi, 1996. Improving the Quality of Parameter Estimates Obtained from Slug Tests. *Ground Water*, 34(3): 480-490 pages., doi: 10.1111/j.1745-6584.1996.tb02029.x
- Butler Jr, James J, 1996. Slug tests in site characterization: Some practical considerations. *Environmental Geosciences*, 3(3): 154-163
- Clark, T.H., Globensky, Y., 1973. Portneuf et parties de St-Raymond et de Lyster - Comtés de Portneuf et de Lotbinière. Ministère des Richesses Naturelles - Direction Générale des Mines.
- Clark, T.H., Globensky, Y., 1976. Région de Bécancour. Ministère des Richesses Naturelles - Direction Générale des Mines.
- Comeau, F. A., Kirkwood, D., Malo, M., Asselin, E., Bertrand, R., 2004. Taconian mélanges in the parautochthonous zone of the Quebec Appalachians revisited: implications for foreland basin and thrust belt evolution. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 41(12): 1473-1490 pages., doi: 10.1139/e04-083

- Cooper, Hilton H., Bredehoeft, John D., Papadopoulos, Istavros S., 1967. Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Resources Research*, 3(1): 263-269 pages., doi: 10.1029/WR003i001p00263
- Crow, H., Ladevèze, P., 2015. Downhole geophysical data collected in 11 boreholes near St.-Édouard-de-Lotbinière, Québec. Geological Survey of Canada, Open File 7768: 48 pages., doi: 10.4095/297047
- Duffield, G.M., 2007. AQTESOLV for Windows Version 4.5 User's Guide. HydroSOLVE, Inc., Reston, VA.:
- Elrick, D. E., Reynolds, W. D., Tan, K. A., 1989. Hydraulic Conductivity Measurements in the Unsaturated Zone Using Improved Well Analyses. *Ground Water Monitoring & Remediation*, 9(3): 184-193 pages., doi: 10.1111/j.1745-6592.1989.tb01162.x
- Fetter, C.W., 2001. *Applied Hydrogeology - Fourth Edition*. Prentice Hall, New Jersey.
- Freeze, R.A., Cherry, J. A., 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. (USA), 604 pp.
- Furbish, David Jon, 1991. The response of water level in a well to a time series of atmospheric loading under confined conditions. *Water Resources Research*, 27(4): 557-568 pages., doi: 10.1029/90wr02775
- Globensky, Y., 1987. *Géologie des Basses Terres du Saint-Laurent*. Direction Générale de l'Exploration Géologique et minérale du Québec - Gouvernement du Québec.
- Gosselin, J.-S., Rivard, C., Martel, R., 2016. User manual for WHAT (Well Hydrograph Analysis Toolbox).
- Hussein, Mahmoud E. A., Odling, Noelle E., Clark, Roger A., 2013. Borehole water level response to barometric pressure as an indicator of aquifer vulnerability. *Water Resources Research*, 49(10): 7102-7119 pages., doi: 10.1002/2013wr014134
- Hvorslev, M. J., 1951. Time lag and soil permeability in ground-water observations. US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, Bulletin 36: 55
- Hyder, Zafar, Butler, James J., McElwee, Carl D., Liu, Wenzhi, 1994. Slug tests in partially penetrating wells. *Water Resources Research*, 30(11): 2945-2957 pages., doi: 10.1029/94wr01670
- Jacob, C. E., 1940. On the flow of water in an elastic artesian aquifer. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 21(2): 574-586 pages., doi: 10.1029/TR021i002p00574
- Ladevèze, P., Rivard, C., Lefebvre, R., Gosselin, J.-S., 2016a. Identifying the aquifer type in low permeability fractured shale aquifers. In preparation.
- Ladevèze, P., Séjourné, S., Rivard, C., Lefebvre, R., Pinet, N., Lavoie, D., 2016b. Faults, fractures and fluid flow in the St Lawrence platform aquifer/caprock system. In preparation.
- Laforest Nova Aqua, 2005. Galerie de captage horizontal (Secteur Ouest), Municipalité de Lotbinière. 01 -5276.
- Lavoie, D., Pinet, N., Bordeleau, G., Ardakani, O. H., Ladevèze, P., Duchesne, M. J., Rivard, C., Mort, A., Brake, V., Sanei, H., Malet, X., 2016. The Upper Ordovician black shales of southern Quebec (Canada) and their significance for naturally occurring hydrocarbons in shallow groundwater. *International Journal of Coal Geology*, 158: 44-64 pages., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2016.02.008>

- Lavoie, Denis, 2008. Chapter 3 Appalachian Foreland Basin of Canada. In: Andrew, D.M. (Ed.), *Sedimentary Basins of the World*. Elsevier, pp. 65-103.
- 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., Molson, J., 2015. Portrait des ressources en eau souterraine en Chaudière-Appalaches, Québec, Canada. Projet réalisé conjointement par l'INRS, l'IRDA et le OBV-CA dans le cadre du PACES(Rapport final INRS R-1580, soumis au MDDELCC en mars 2015): 300
- Légaré-Couture, G., Parent, M., Lefebvre, R. , 2016, en prep. Cartographie des formations superficielles de la région de Chaudière-Appalaches.:
- Neuzil, C. E., 1982. On conducting the modified 'Slug' test in tight formations. *Water Resources Research*, 18(2): 439-441 pages., doi: 10.1029/WR018i002p00439
- Neville, J.C., 2011. Critical Thinking in Aquifer Test Interpretation. In: Conference, S.c.-g. (Ed.).
- Occhietti, Serge, Richard, Pierre JH, 2003. Effet réservoir sur les âges ¹⁴C de la Mer de Champlain à la transition Pléistocène-Holocène: révision de la chronologie de la déglaciation au Québec méridional. *Géographie physique et Quaternaire*, 57(2-3): 115-138
- Rasmussen, Todd C., Crawford, Leslie A., 1997. Identifying and Removing Barometric Pressure Effects in Confined and Unconfined Aquifers. *Ground Water*, 35(3): 502-511 pages., doi: 10.1111/j.1745-6584.1997.tb00111.x
- Rivard, C., Bordeleau, G., Lefebvre, R., Lavoie, D., Malet, X. , 2016. Methane variations in groundwater. In preparation.
- Rojstaczer, Stuart, 1988. Determination of fluid flow properties from the response of water levels in wells to atmospheric loading. *Water Resour. Res*, 24(11): 1927-1938
- Rojstaczer, Stuart, Riley, Francis S., 1990. Response of the water level in a well to Earth tides and atmospheric loading under unconfined conditions. *Water Resources Research*, 26(8): 1803-1817 pages., doi: 10.1029/WR026i008p01803
- Spane, F. A., 2002. Considering barometric pressure in groundwater flow investigations. *Water Resources Research*, 38(6): 14-1-14-18 pages., doi: 10.1029/2001wr000701
- St-Julien, P., Hubert, C., 1975. Evolution of the Taconian orogen in the Quebec Appalachians. *American Journal of Science*, 275-A: 337-362
- St-Julien, Pierre, Slivitsky, Anne, Feininger, Tomas, 1983. A deep structural profile across the Appalachians of southern Quebec. *Geological Society of America Memoirs*, 158: 103-112 pages., doi: 10.1130/MEM158-p103
- Thériault, R., Beauséjour, S., 2012. Carte géologique du Québec, Edition 2012. Ressources Naturelles Québec, DV 2012-07:
- Todd, D. K., Mays, L. W., 2005. *Groundwater Hydrology Third Edition*. John Wiley & Sons, Inc.
- Toll, Nathaniel J., Rasmussen, Todd C., 2007. Removal of Barometric Pressure Effects and Earth Tides from Observed Water Levels. *Ground Water*, 45(1): 101-105 pages., doi: 10.1111/j.1745-6584.2006.00254.x

- Van Der Kamp, G., Gale, J. E., 1983. Theory of earth tide and barometric effects in porous formations with compressible grains. *Water Resources Research*, 19(2): 538-544 pages., doi: 10.1029/WR019i002p00538
- Williams, Harold, 1979. Appalachian Orogen in Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16(3): 792-807 pages., doi: 10.1139/e79-070
- Zhang, Zhuanfang F., Groenevelt, Pieter H., Parkin, Gary W., 1998. The well-shape factor for the measurement of soil hydraulic properties using the Guelph Permeameter. *Soil and Tillage Research*, 49(3): 219-221 pages., doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00174-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00174-3)

Annexes

Annexe 1. Aspect général des carottes prélevées dans chacun des puits du projet



Forage F1

Shales noirs, litage sub-horizontale



Forage F2

Shales noirs déformés



Forage F3

Shales noirs intercalés par des niveaux de siltstones. Litage sub-horizontale



Forage F4

Shales noirs déformés



Forage F7

Shales noirs, litage sub-horizontale



Forage F8

Shales noirs intercalés par des niveaux de siltstones. Litage sub-horizontale



Forage F21

Shales noirs déformés, niveaux bréchifiés, présence de calcite



Forage F21

Niveau bréchiforme à 45.7m (150pi)

Annexe 2. Rapports de forage

RAPPORT DE FORAGE

Ressources naturelles Canada	Identifiant F-1	Coordonnées (NAD83 Zone19) X: 281370 m Y: 5168963 m Z: 45.895 m (niveau du sol)	Projet Nom: Saint-Édouard No.:	Date Début: 2013-10-01 Fin: 2013-10-15
---------------------------------	---------------------------	--	---	--

Information générale Localisation: <u>Rang Chouayen</u> Municipalité: <u>Lotbinière</u> Entrepreneur: <u>Forages Comeau</u> Type de foreuse: <u>D-60</u> - Forage au diamant Remarque: <u>Juste devant l'entrée de la terre à bois.</u>	Détails de construction Prof. forage: <u>49.07</u> m Diam. forage: <u>96</u> mm Long. tubage: <u>3.05</u> m Type de tubage: <u>Acier</u> Diam. tubage: <u>96</u> mm Margelle: <u>0.9</u> m	Niveau d'eau (p/r haut du tubage) No. capteur: <u>2005985</u> Prof. capteur: <u>9</u> m <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Niv. d'eau (m)</td> <td style="width: 50%;">Date</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0.63</td> <td style="text-align: center;">2015-05-05</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0.77</td> <td style="text-align: center;">2014-06-17</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1.04</td> <td style="text-align: center;">2013-11-06</td> </tr> </table>	Niv. d'eau (m)	Date	0.63	2015-05-05	0.77	2014-06-17	1.04	2013-11-06
Niv. d'eau (m)	Date									
0.63	2015-05-05									
0.77	2014-06-17									
1.04	2013-11-06									

Prof. (m)	Échantillons		Diag.	Description lithologique	Stratigraphie		Construction du puits		Prof. (m)	
	Type	prof. (m)			Code CGQ	Prof. (m)	Capteur de pression	Niv. Eau		Bentonite
0			Section imagée par diagraphies		0.61		0	0.63	0	
	Analyse granulométrique	1.83			1.22					
					2.44		3.05			
					2.59					
5						6.12				5
	Éléments mineurs (Uranium)	5.49				9.02			9	
	Rock Eval	9.05				11.96				10
	Éléments mineurs (Uranium)	11.58				14.99				15
	Éléments mineurs (Uranium)	16.15				17.98				20
	Rock Eval	21.34				26.7				25
	Éléments mineurs (Uranium)	29.57				29.74				30
	Rock Eval	32				32.66				35
	Éléments mineurs (Uranium)	35.66				35.46				40
	Éléments mineurs (Uranium)	46.63				38.28				45
	Rock Eval	49.2				41.12				50
	Éléments mineurs (Uranium)	49.38				44.15				55
						46.96				50
						49.68		49.7		50

RAPPORT DE FORAGE

Ressources naturelles Canada	Identifiant F-2	Coordonnées (NAD83 Zone19) X: 287925 m Y: 5155391 m Z: 91.11 m (niveau du sol)	Projet Nom: Saint-Édouard No.:	Date Début: 2013-10-15 Fin: 2013-10-30
---------------------------------	-------------------------------	---	---	--

Information générale Localisation: Puits à 1.5 km au sud de celui de Talisman Municipalité: <u>Saint-Édouard</u> Entrepreneur: <u>Forages Comeau</u> Type de foreuse: <u>D-60</u> - Forage au diamant Remarque: <u>Puits au sud de celui de Talisman</u> Puits reforé le 2014-10-20 car bouché à 30 m. Approfondi à 52.12 m afin de prendre un échantillon de roche. Ajout de 1.2m de casing.	Détails de construction Prof. forage: <u>51.82</u> m Diam. forage: <u>96</u> mm Long. tubage: <u>8.13</u> m Type de tubage: <u>Acier</u> Diam. tubage: <u>96</u> mm Margelle: <u>0.95</u> m	Niveau d'eau (p/r haut du tubage) No. capteur: <u>2037394</u> Prof. capteur: <u>8.59</u> m <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr> <th>Niv. d'eau (m)</th> <th>Date</th> </tr> <tr> <td>2.05</td> <td>2015-05-08</td> </tr> <tr> <td>2.39</td> <td>2014-10-15</td> </tr> <tr> <td>2.35</td> <td>2014-06-17</td> </tr> <tr> <td>2.76</td> <td>2013-10-27</td> </tr> </table>	Niv. d'eau (m)	Date	2.05	2015-05-08	2.39	2014-10-15	2.35	2014-06-17	2.76	2013-10-27
Niv. d'eau (m)	Date											
2.05	2015-05-08											
2.39	2014-10-15											
2.35	2014-06-17											
2.76	2013-10-27											

Prof. (m)	Échantillons		Diag.	Description lithologique	Stratigraphie		Construction du puits		Prof. (m)	
	Type	prof. (m)			Code CGQ	Prof. (m)	Capteur de pression Niv. Eau	Bentonite Puits ouvert		
0			Section imagée par diagraphies	Sol sableux, fragments vég. et mat. organique		0.61			0	
	Analyse granulométrique	1.22		Diamicton à matrice sablo-silteuse brunâtre, qq cailloux		1.23				
				Till typique, diamicton à matrice silto-sableuse brunâtre (oxydée), structure cisailée		1.83				
	Analyse granulométrique	3.05		Till à matrice silto-sableuse grisâtre, plutôt caillouteux, matrice efferv. HCL 10%		2.44				
				Diamicton très caillouteux, peu de matrice, pas de réaction au HCL 10% (till grossier)		3.05				
	Éléments mineurs (Uranium)	6.1		Till à matr. silt. grise, cailloux et gran. shale abondants, qq allocht pré-Cambrien, matr. collante, faible efferv. HCL 10%		3.66				
				Idem (till immature, beaucoup de fragments de shale)		4.27				
				Idem (till immature), matrice très caillouteuse		6.1				
	Rock Eval	12.5		Shale foncé avec lamination plus noirâtres. Strates pentés à angle.		7.39			7.59	8.59
	Éléments mineurs (Uranium)	14.63		Shale gris foncé avec laminations noires.		10.52				
	Analyse granulométrique	17.37		Shale gris foncé avec laminations noires. Très bréchique et fracturé. Présence de failles.		12.75				
	Éléments mineurs (Uranium)	18.59		Zone fracturée. Shale foncé. Blocaille tectonique poreuse avec intervalles de 12.6 à 13 m.		15.37				
				Shale bréchifié. Fractures tectoniques. Aspect de gouge de 17.7 à 18.3m. Présence de microfractures.		18.3				
	Éléments mineurs (Uranium)	24.38		Shale bréchifié. Fractures microbréchifiées.		20.73				
	Rock Eval	26.82		Shale foncé laminé avec passés noirs. Fractures millimétriques avec gouge.		23.27				
				Shale gris foncé à noir, laminé et fracturé. Brèches plissé ==> stales entrainées.		26.09				
				Shale gris à gris foncé, fracturé et bréchifié, présence de failles.		28.07				
				Shale gris fracturé. Fentes de tension microfissurées.		30.61				
	Éléments mineurs (Uranium)	32		Shale fracturé, bréchifié. Passées plus noires.		33.45				
				Shale gris avec passées plus foncées, fines, noires et laminées. Calcareux. Très plissé, fracturé avec veinules de calcite.		36.2				
	Éléments mineurs (Uranium)	36.88		Shale calcareux (légèrement) laminaire, laminé noir. Déformation tectonique, injection de calcite.		38.71				
				Shale légèrement calcareux avec laminations noires. Fractures avec injection de calcite. Localement bréchique.		41.45				
	Éléments mineurs (Uranium)	42.98		Shale calcareux avec laminations noires. Microfissures avec remplissage de calcite. Zone plus fracturée à 42.7m.		44.3				
	Éléments mineurs (Uranium)	45.72		Shale légèrement calcareux avec laminations plus claires et plus foncées. Fissures à calcite déformées.		46.84				
	Rock Eval	49.07		Shale calcareux, laminé (noir et clair) fracturé.		49.43				
	Isotopes de gaz - 10 sacs sous vide	51.82	Aucun échantillon entreposé dans les boîtes.		52.12			52.12		

RAPPORT DE FORAGE

Ressources naturelles Canada	Identifiant F-3	Coordonnées (NAD83 Zone19) X: 282584 m Y: 5158820 m Z: 74.07 m (niveau du sol)	Projet Nom: Saint-Édouard No.:	Date Début: <u>2013-10-30</u> Fin: <u>2013-11-14</u>
---------------------------------	---------------------------	---	---	--

Information générale Localisation: <u>Rang St-José (érablière)</u> Municipalité: <u>Saint-Édouard</u> Entrepreneur: <u>Forages Comeau</u> Type de foreuse: <u>D-60</u> - Forage au diamant Remarque: <u>Rang St-José (érablière)</u>	Détails de construction Prof. forage: <u>49.99</u> m Diam. forage: <u>96</u> mm Long. tubage: <u>20.3</u> m Type de tubage: <u>Acier</u> Diam. tubage: <u>96</u> mm Margelle: <u>0.8</u> m	Niveau d'eau (p/r haut du tubage) No. capteur: <u>2026225</u> Prof. capteur: <u>5.65</u> m <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Niv. d'eau (m)</td> <td style="width: 50%;">Date</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3.7</td> <td style="text-align: center;">2015-05-08</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1.68</td> <td style="text-align: center;">2013-11-05</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1.15</td> <td style="text-align: center;">2014-06-16</td> </tr> </table>	Niv. d'eau (m)	Date	3.7	2015-05-08	1.68	2013-11-05	1.15	2014-06-16
Niv. d'eau (m)	Date									
3.7	2015-05-08									
1.68	2013-11-05									
1.15	2014-06-16									

Prof. (m)	Échantillons		Diag.	Description lithologique	Stratigraphie		Construction du puits		Prof. (m)
	Type	prof. (m)			Code CGQ	Prof. (m)	Capteur de pression Niv. Eau	Bentonite Puits ouvert	
0				Soil sableux, frag. vég. et mat. organique		1.52	0	0	
	Analyse granulométrique	1.52		Till typique, Diam. compact à matrice sabl. grise calc, cailloux striés et façonnés, très légère efferv. au HCL 10%		4.57	3.7	5.65	
5				Idem, cailloux pré-Cambrien		5.18			
				Blocs allochtones, surtout pré-Cambrien, un calcaire gris brun foncé		7.62			
10				Sable graveleux mal trié, gris, eff. HCL 10%		12.19			
	Analyse granulométrique	12.192		Sable graveleux mal trié, gris, matrice sable moyen-grossier		12.8			
15				Till gris à matr. silto-sabl., cailloux (fragments shale), faciès immature, ress. à celui F2		15.24			
				Diamicton très sableux, beaucoup de cailloux locaux (shale), pas de réaction au HCL 10%		19.2			
20				Diamicton gris en transition vers le roc, ou grès lithique gris foncé, contact till/roc.		20.12	20.3		
	Éléments mineurs (Uranium)	22.25		Shale gris avec lamination silteuse (5%) horizontale, légèrement calcareuse.		22.56			
	Rock Eval	23.77		Shale gris foncé avec lits mm noirs (2%). Quelques laminations à grès moyens (5%) millimétriques à sub centimétriques.		25.6			
25				Shale gris moyen à foncé avec laminations entrecroisées locales. Bioremaniement local (planolites).		28.65			
	Éléments mineurs (Uranium)	30.18		Shale gris avec passes millimétriques à centimétriques plus foncées. Petites laminations silteuses.		34.14			
	Éléments mineurs (Uranium)	31.7		Shale gris foncé avec passées centimétriques noires. Petites coulées de débris centimétriques.		37.01			
35				Shale gris plus ou moins foncé avec passes plus noirs.		39.62			
	Rock Eval	36.58		Shale gris à gris foncé avec passes noirâtres.		42.52			
40				Shale noirs / gris avec passés lenticulaires compactionnels plus pâles.		44.81			
	Éléments mineurs (Uranium)	38.4		Shale gris foncé à noirs, vaguement laminaire localement. Deux passés centimétriques à fragments remobilisés.		47.55			
45				Shale gris à gris foncé avec intervalles bien remaniés.		49.99	49.9		
	Éléments mineurs (Uranium)	47.55							
	Éléments mineurs (Uranium)	48.46							
	Éléments mineurs (Uranium)	48.77							
	Rock Eval	49.07							
50									
55									

Section imagée par diagraphies

RAPPORT DE FORAGE

Ressources naturelles Canada	Identifiant F-4	Coordonnées (NAD83 Zone19) X: 288214 m Y: 5157504 m Z: 87.24 m (niveau du sol)	Projet Nom: Saint-Édouard No.:	Date Début: 2013-11-14 Fin: 2013-11-29
---------------------------------	---------------------------	---	---	--

Information générale Localisation: À 1.7 km du croisement de la route Leclerc et du rang Lucieville Municipalité: <u>Saint-Édouard</u> Entrepreneur: <u>Forages Comeau</u> Type de foreuse: <u>D-60</u> - Forage au diamant Remarque: <u>Sur le terrain d'un particulier, en arrière du bâtiment</u>	Détails de construction Prof. forage: <u>59.74</u> m Diam. forage: <u>96</u> mm Long. tubage: <u>40.65</u> m Type de tubage: <u>Acier</u> Diam. tubage: <u>96</u> mm Margelle: <u>1.05</u> m	Niveau d'eau (p/r haut du tubage) No. capteur: <u>2026236</u> Prof. capteur: <u>13.09</u> m <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Niv. d'eau (m)</td> <td style="width: 50%;">Date</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">8.61</td> <td style="text-align: center;">2015-05-08</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">8.86</td> <td style="text-align: center;">2015-03-05</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">8.87</td> <td style="text-align: center;">2013-11-06</td> </tr> </table>	Niv. d'eau (m)	Date	8.61	2015-05-08	8.86	2015-03-05	8.87	2013-11-06
Niv. d'eau (m)	Date									
8.61	2015-05-08									
8.86	2015-03-05									
8.87	2013-11-06									

Prof. (m)	Échantillons		Diag.	Description lithologique	Stratigraphie		Construction du puits		Prof. (m)
	Type	prof. (m)			Code CGQ	Prof. (m)	Capteur de pression	Niv. Eau	
0				Diamicton mal trié à matrice silto-sableuse, bcp cailloux, gleyifié		1.22			0
	Analyse granulométrique	1.2192		Diamicton lâche à matrice sableuse, cailloux alloctones, till remanié?		1.83			
	Analyse granulométrique	1.8288		Till compact à matrice silto-sableuse, clastes de shale		2.44			
				Blocs gneiss et qq mottes de till à matrice sableuse, cailloux schisteux façonnés et striés		3.05			
5	Analyse granulométrique	4.572		Cailloux et till à matrice sableuse (idem)		4.57			
				Till compact à matrice sableuse grise, matrice fraîche (non oxydée), granules de shale		5.18			
	Analyse granulométrique	6.096		Sable fin silteux gris, très faible efferv. au HCL 10% (texture de plasticine), très humide		6.71			
	Analyse granulométrique	7.62		Sable moyen assez bien trié, petit claste de silt argileux d'origine incertaine		8.23			
10	Analyse granulométrique	10.668		Blocs trouvés entre 8.5 et 9 m de prof.: gneiss mafique à interm., gneiss rose, calcaire		9.75			
	Analyse granulométrique	12.192		Blocs trouvés entre 9 et 9.8 m de prof.: gneiss et calcaire		10.67			
	Analyse granulométrique	13.716		Diamicton lâche sablo-graveleux, avec intervalles à matrice silto-sableuse, efferv. au HCL 10%		10.97			
15	Analyse granulométrique	15.24		Sable silteux au sommet, ensuite silt sableux et interlits de silt argileux		12.8			
	Analyse granulométrique	16.764		Sable moyen à grossier, mal trié, gris-brun, peu efferv. HCL 10%		14.33			
20	Analyse granulométrique	19.812		Sable fin silteux, gris-brun, organique?		15.85			
	Analyse granulométrique	21.336		Sable gris-brun moyen, massif (non stratifié), un caillou précambrien de 2-3 cm		19.51			
				2 cailloux de quartzite récupérés à 19.6 m.		19.81			
				Silt argileux brun, laminé, org. ?		20.42			
				Silt à silt sableux brun-gris, plutôt massif, pas efferv. HCL 10%		22.86			
25	Analyse granulométrique	25.908		Sable moyen mal trié, gris foncé, organique, conditions réductrices (odeur H2S), un peu collant		26.52			
30	Analyse granulométrique	30.48		Sable très mal trié avec gravillons et granules de shale		31.09			
35	Analyse granulométrique	33.528		Diamicton (?) gris foncé, matrice plutôt sableuse, très peu de cailloux (essent. shale)		34.14			
40	Analyse granulométrique	36.576		Alternance shale (%) et siltstone (%), non calcaireux. Récupéré par les fissures à calcite.		40.84			40.65
	Éléments mineurs (Uranium)	42.67		Alternance shale (%) et siltstone (%), non calcaireux. Plus de microfissures.		43.28			
45	Rock Eval	44.45		Alternance shale (%) et siltstone (%) non calcaireux.		46.02			
	Éléments mineurs (Uranium)	45.42		Alternance shale (%) mm à cm et siltstone (%) mm à cm, non calcaireux. Petite fracture à calcite.		48.59			
	Éléments mineurs (Uranium)	47.85		Alternance shale (%) mm à cm et siltstone (%) mm à cm, non calcaireux à un peu calcaireux.		51.21			
50	Éléments mineurs (Uranium)	50.9				53.64			
	Éléments mineurs (Uranium)	53.34							
55									

Section imagée par diagraphies

RAPPORT DE FORAGE

Ressources naturelles Canada	Identifiant F-4	Coordonnées (NAD83 Zone19) X: 288214 m Y: 5157504 m Z: 87.24 m (niveau du sol)	Projet Nom: Saint-Édouard No.:	Date Début: 2013-11-14 Fin: 2013-11-29
---------------------------------	---------------------------	---	---	--

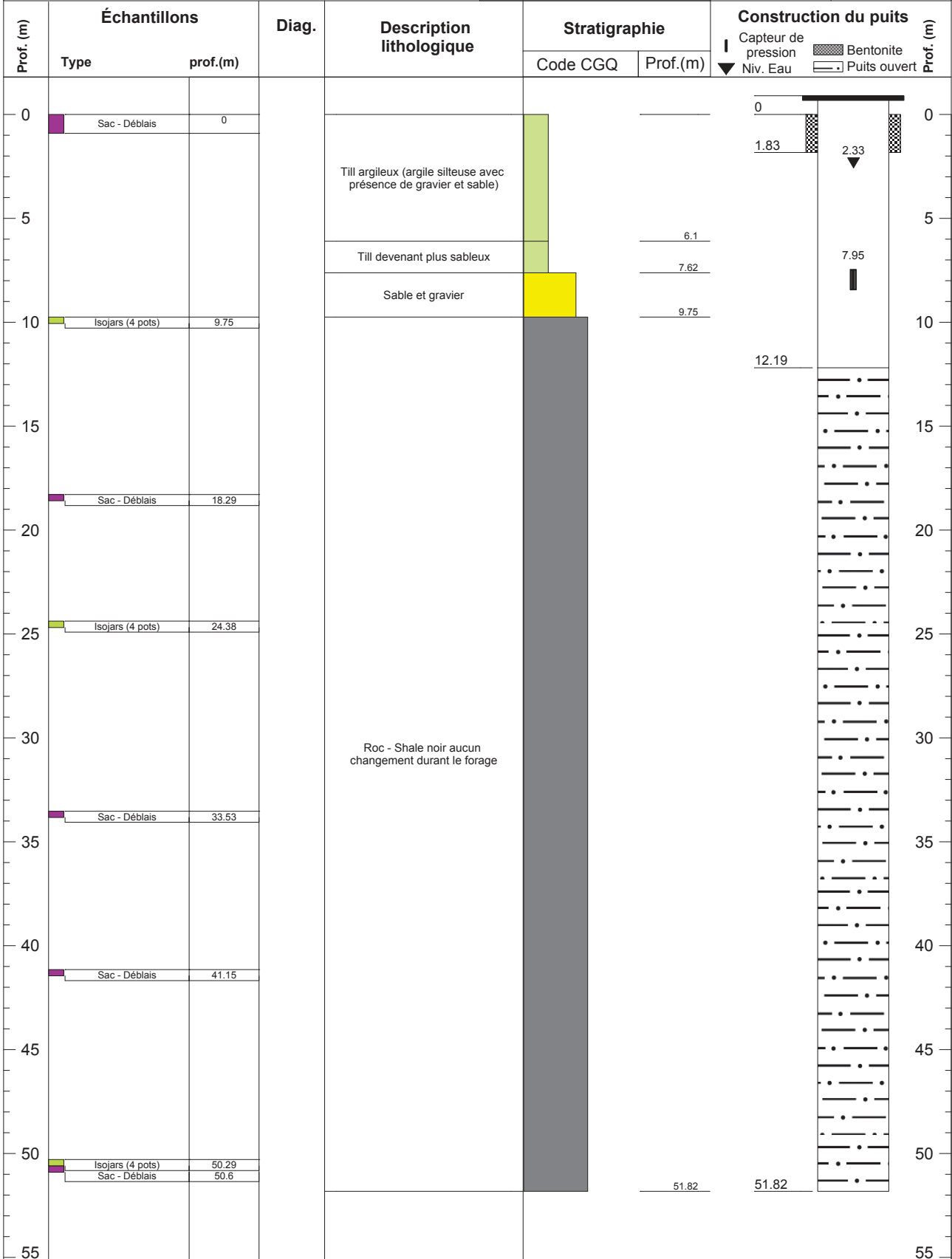
Information générale Localisation: À 1.7 km du croisement de la route Leclerc et du rang Lucieville Municipalité: <u>Saint-Édouard</u> Entrepreneur: <u>Forages Comeau</u> Type de foreuse: <u>D-60</u> - Forage au diamant Remarque: <u>Sur le terrain d'un particulier, en arrière du bâtiment</u>	Détails de construction Prof. forage: <u>59.74</u> m Diam. forage: <u>96</u> mm Long. tubage: <u>40.65</u> m Type de tubage: <u>Acier</u> Diam. tubage: <u>96</u> mm Margelle: <u>1.05</u> m	Niveau d'eau (p/r haut du tubage) No. capteur: <u>2026236</u> Prof. capteur: <u>13.09</u> m <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Niv. d'eau (m)</th> <th>Date</th> </tr> <tr> <td>8.61</td> <td>2015-05-08</td> </tr> <tr> <td>8.86</td> <td>2015-03-05</td> </tr> <tr> <td>8.87</td> <td>2013-11-06</td> </tr> </table>	Niv. d'eau (m)	Date	8.61	2015-05-08	8.86	2015-03-05	8.87	2013-11-06
Niv. d'eau (m)	Date									
8.61	2015-05-08									
8.86	2015-03-05									
8.87	2013-11-06									

Prof. (m)	Échantillons		Diag.	Description lithologique	Stratigraphie		Construction du puits		Prof. (m)	
	Type	prof. (m)			Code CGQ	Prof. (m)	Capteur de pression	Niv. Eau		Bentonite
60	Éléments mineurs (Uranium)	55.78		Alternance shale (%) mm à cm et siltstone (%) mm à cm, non calcaireux à un peu calcaireux. Alternance shale (%) mm à cm et siltstone (%) mm à cm, non calcaireux. Litage incliné. Alternance shale (%) et siltstone (%) calcaireux. Litage incliné, petites fractures avec déplacements mineurs.		56.39		60.35	60	
	Rock Eval	56.85				58.65				
	Éléments mineurs (Uranium)	58.22				60.35				
	Éléments mineurs (Uranium)	59.44								
	Éléments mineurs (Uranium)	60.35								
65									65	
70									70	
75									75	
80									80	
85									85	
90									90	
95									95	
100									100	
105									105	
110									110	

RAPPORT DE FORAGE

Ressources naturelles Canada	Identifiant F-5	Coordonnées (NAD83 Zone19) X: 276903 m Y: 5163441 m Z: 50.19 m (niveau du sol)	Projet Nom: Saint-Édouard No.:	Date Début: 2014-09-15 Fin: 2014-09-15
---------------------------------	---------------------------	---	---	--

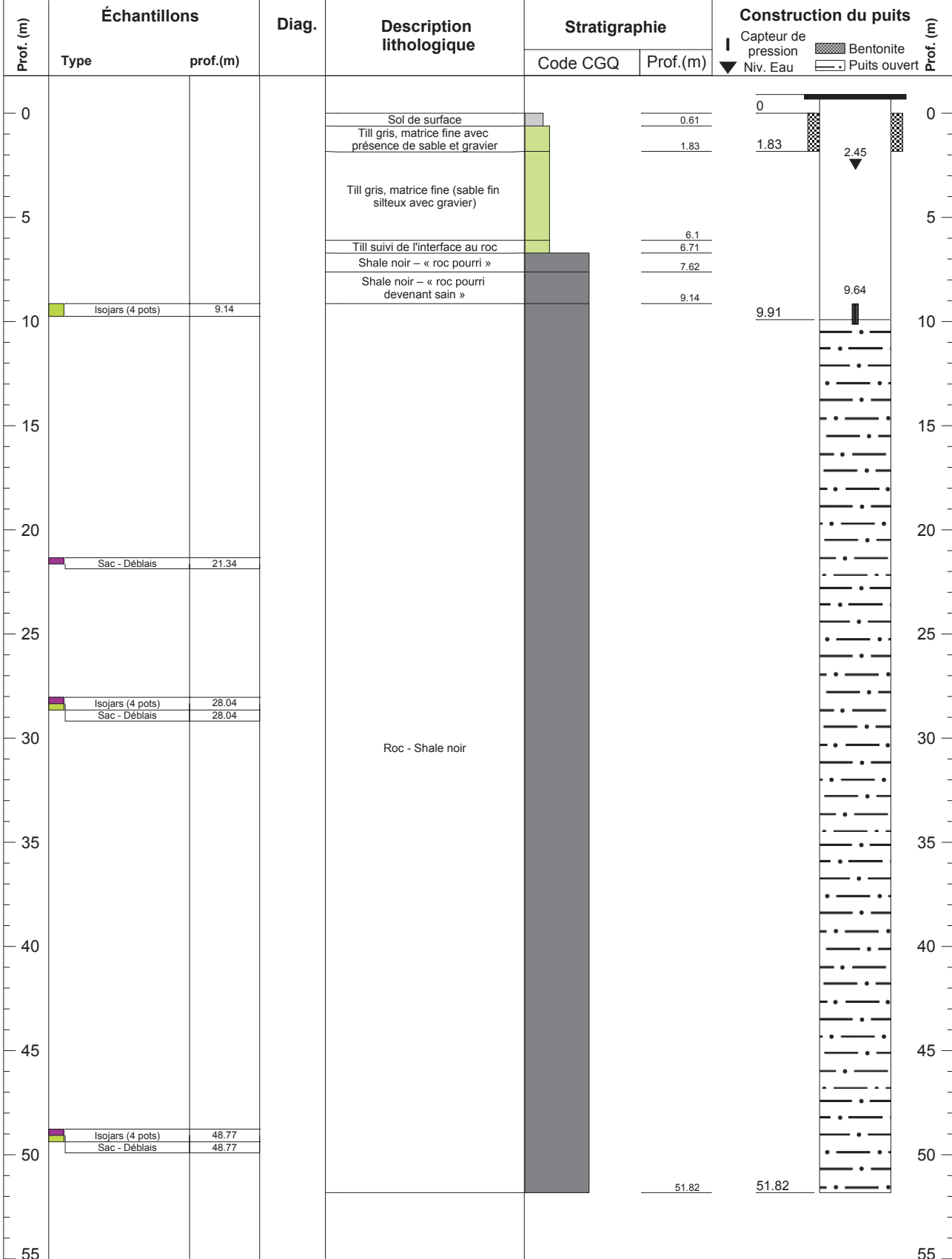
Information générale Localisation: À 1 km du croisement de la route St-Charles et rang St-François. Municipalité: Lotbinière Entrepreneur: Forage LBM Inc. Type de foreuse: Foremost DR-12W - Destructif Remarque: Puits sur le bord du chemin d'accès le long de la Route Bédard Localisation du site avec le propriétaire.	Détails de construction Prof. forage: 51.82m Diam. forage: 152.4 mm Long. tubage: 12.19 m Type de tubage: Acier Diam. tubage: 152.4 mm Margelle: 0.97 m	Niveau d'eau (p/r haut du tubage) No. capteur: 2037381 Prof. capteur: 7.95 m <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Niv. d'eau (m)</td> <td style="width: 50%;">Date</td> </tr> <tr> <td>2.33</td> <td>2015-05-08</td> </tr> <tr> <td>2.01</td> <td>2014-10-04</td> </tr> <tr> <td>2.46</td> <td>2014-09-17</td> </tr> </table>	Niv. d'eau (m)	Date	2.33	2015-05-08	2.01	2014-10-04	2.46	2014-09-17
Niv. d'eau (m)	Date									
2.33	2015-05-08									
2.01	2014-10-04									
2.46	2014-09-17									



RAPPORT DE FORAGE

Identifiant <h2 style="text-align: center;">F-6</h2>	Coordonnées (NAD83 Zone19) X: 276528 m Y: 5163836 m Z: 52.59 m (niveau du sol)	Projet Nom: Saint-Édouard No.:	Date Début: 2014-09-17 Fin: 2014-09-17
---	---	--------------------------------------	--

Information générale Localisation: À 400 m du croisement de la route St-Charles et rang St-François. Municipalité: Lotbinière Entrepreneur: Forage LBM Inc. Type de foreuse: Foremost DR-12W - Destructif Remarque: Puits proche d'une entrée de champ, le long de la Route Bédard. Peu d'eau lors du forage.	Détails de construction Prof. forage: 51.82m Diam. forage: 152.4 mm Long. tubage: 9.91 m Type de tubage: Acier Diam. tubage: 152.4 mm Margelle: 1.02 m	Niveau d'eau (p/r haut du tubage) No. capteur: 2037873 Prof. capteur: 9.64 m <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Niv. d'eau (m)</td> <td style="width: 50%;">Date</td> </tr> <tr> <td>2.45</td> <td>2015-05-08</td> </tr> <tr> <td>2.1</td> <td>2014-12-05</td> </tr> </table>	Niv. d'eau (m)	Date	2.45	2015-05-08	2.1	2014-12-05
Niv. d'eau (m)	Date							
2.45	2015-05-08							
2.1	2014-12-05							


 Forage supervisé par: X.Malet

 Préparé par: X.Malet

 Vérifié par: C.Rivard, D.Lavoie et P.Ladevèze

 No. mise à jour: rev_1.6 - Mise à jour mineure

 Date de modification: 2015-03-17

RAPPORT DE FORAGE

Ressources naturelles Canada	Identifiant F-7	Coordonnées (NAD83 Zone19) X: 276263 m Y: 5164099 m Z: 49.26 m (niveau du sol)	Projet Nom: Saint-Édouard No.:	Date Début: <u>2014-10-21</u> Fin: <u>2014-10-22</u>
---------------------------------	---------------------------	---	---	--

Information générale Localisation: <u>Au croisement de la route St-Charles et rang St-François.</u> Municipalité: <u>Lotbinière</u> Entrepreneur: <u>Forages Comeau</u> Type de foreuse: <u>D-60</u> - Forage au diamant Remarque: <u>Puits le plus au nord</u> Forage relativement perméable.	Détails de construction Prof. forage: <u>51.51</u> m Diam. forage: <u>96</u> mm Long. tubage: <u>13.54</u> m Type de tubage: <u>Acier</u> Diam. tubage: <u>96</u> mm Margelle: <u>0.82</u> m	Niveau d'eau (p/r haut du tubage) No. capteur: <u>2029499</u> Prof. capteur: <u>10.86</u> m <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Niv. d'eau (m)</td> <td style="width: 50%;">Date</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">4.76</td> <td style="text-align: center;">2015-05-08</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">4.48</td> <td style="text-align: center;">2014-12-05</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">4.42</td> <td style="text-align: center;">2014-10-28</td> </tr> </table>	Niv. d'eau (m)	Date	4.76	2015-05-08	4.48	2014-12-05	4.42	2014-10-28
Niv. d'eau (m)	Date									
4.76	2015-05-08									
4.48	2014-12-05									
4.42	2014-10-28									

Prof. (m)	Échantillons		Diag.	Description lithologique	Stratigraphie		Construction du puits		Prof. (m)
	Type	prof.(m)			Code CGQ	Prof.(m)	Capteur de pression	Niv. Eau	
0							0		0
	Sac - Déblais	1.83		Silt argileux avec présence de sable et gravier fin à moyen			1.22		
	Sac - Déblais	2.44							
5	Sac - Déblais	3.81							5
	Sac - Déblais	3.96							
	Sac - Déblais	4.57							
	Sac - Déblais	4.88							
	Sac - Déblais	5.33							
	Sac - Déblais	5.36		Sable fin silteux.	6				
	Sac - Déblais	5.49		Silt argileux avec présence de sable et gravier fin à moyen	6.1				
	Sac - Déblais	6.1			6.86				
	Sac - Déblais	6.89							
	Sac - Déblais	7.16		Sable fin silteux, argileux avec cailloux précambrien (Till)					
	Sac - Déblais	7.56							
10	Sac - Déblais	7.62		Blocs. Traversé en destructif afin de le passer	9.91				10
	Sac - Déblais	8.38		Début du roc désagrégé mélangé avec des dépôts meubles.	10.67				
	Sac - Déblais	8.91			11.43				
	Sac - Déblais	10.67							
	Éléments mineurs (Uranium)	12.5					13.54		
15	Isotopes de gaz - 10 sacs sous vide	14.94							15
	Isotopes de gaz - 10 sacs sous vide	15.24							
	Isotars (8 pots)	16.46							
	Bacterio								
20									20
	Éléments mineurs (Uranium)	21.64							
25									25
	Éléments mineurs (Uranium)	27.13							
30									30
	Isotopes de gaz - 10 sacs sous vide	30.18		Alternance de mudstone noir et mudstone/siltstone gris moyen millimétrique, légèrement calcaireux. Alternance noir (60%) gris (40%) avec quelques laminations entrecroisées de type ondulation.					
	Isotopes de gaz - 10 sacs sous vide	30.48							
	Isotars (8 pots)	31.7							
	Bacterio								
35									35
	Éléments mineurs (Uranium)	35.05							
40									40
	Éléments mineurs (Uranium)	43.28							
	Éléments mineurs (Uranium)	43.89							
45									45
	Éléments mineurs (Uranium)	46.02							
50									50
	Bacterio	48.46							
	Isotopes de gaz - 10 sacs sous vide	49.99							
	Isotopes de gaz - 10 sacs sous vide	50.29							
	Isotars (8 pots)								
	Éléments mineurs (Uranium)	51.51					51.51		51.51
55									55

RAPPORT DE FORAGE

Ressources naturelles Canada	Identifiant F-8	Coordonnées (NAD83 Zone19) X: 277620 m Y: 5162758 m Z: 59.53 m (niveau du sol)	Projet Nom: Saint-Édouard No.:	Date Début: 2014-10-23 Fin: 2014-10-28
---------------------------------	---------------------------	---	--------------------------------------	--

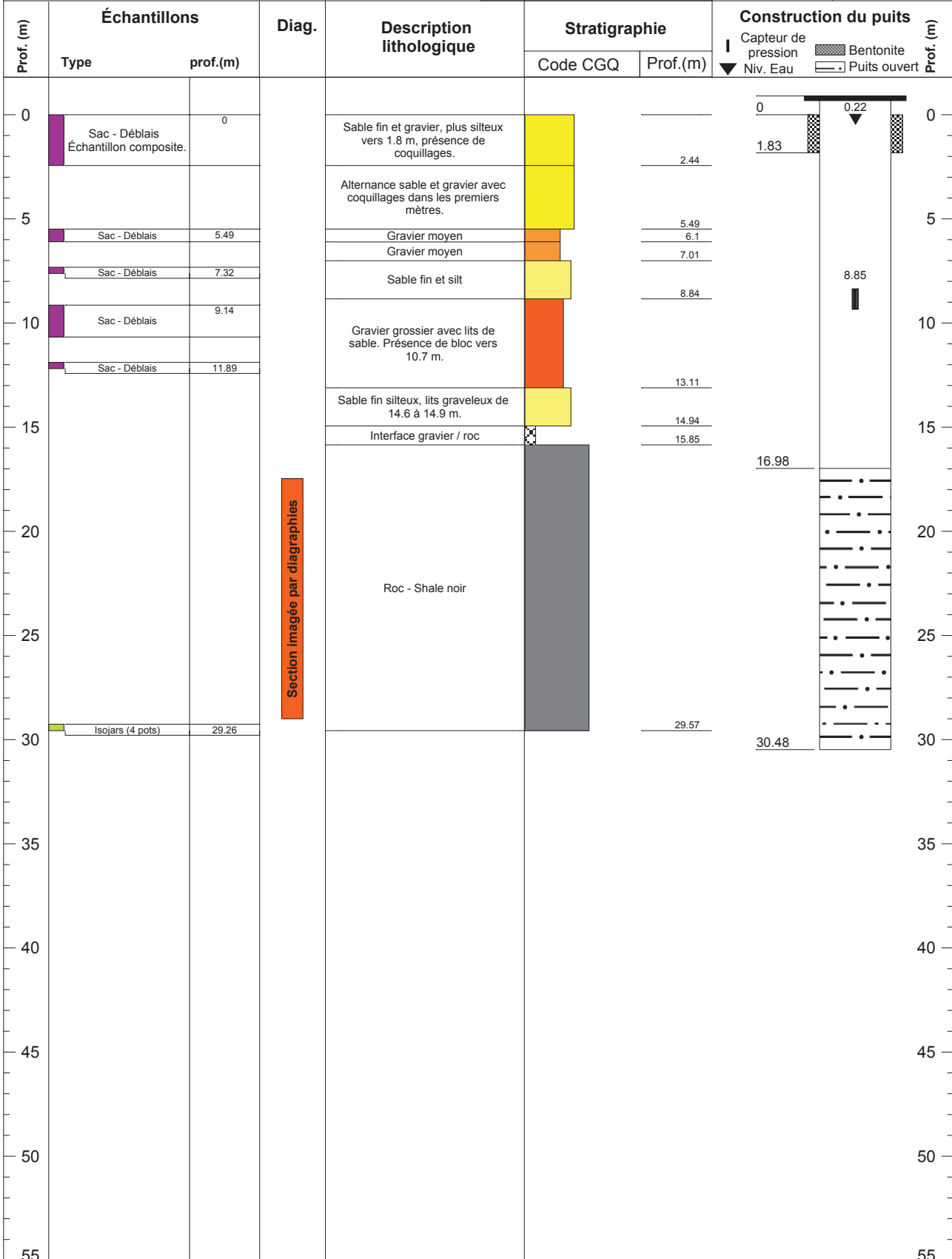
Information générale Localisation: À 300 m du croisement de la route St-Charles et du Ch Blanchette. Municipalité: Lotbinière Entrepreneur: Forages Comeau Type de foreuse: D-60 - Forage au diamant Remarque: Puits le plus au sud Forage relativement perméable. Eau salée. Présence de fossiles lors du forage.	Détails de construction Prof. forage: 51.51m Diam. forage: 96 mm Long. tubage: 4.4 m Type de tubage: Acier Diam. tubage: 96 mm Margelle: 0.72 m	Niveau d'eau (p/r haut du tubage) No. capteur: 2006182 Prof. capteur: 7.09 m <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Niv. d'eau (m)</td> <td style="width: 50%;">Date</td> </tr> <tr> <td>1.4</td> <td>2015-05-08</td> </tr> <tr> <td>1.43</td> <td>2014-10-28</td> </tr> <tr> <td>1.45</td> <td>2014-10-04</td> </tr> </table>	Niv. d'eau (m)	Date	1.4	2015-05-08	1.43	2014-10-28	1.45	2014-10-04
Niv. d'eau (m)	Date									
1.4	2015-05-08									
1.43	2014-10-28									
1.45	2014-10-04									

Prof. (m)	Échantillons		Diag.	Description lithologique	Stratigraphie		Construction du puits		Prof. (m)
	Type	prof. (m)			Code CGQ	Prof. (m)	Capteur de pression	Niv. Eau	
0	Sac - Déblais	0.82	Section imagée par diagraphies	Sol de surface Sable fin moyen peu compact et gravier Till très compact Roc peu désagrégé mais interlité avec des dépôts meubles	0.3 0.85 0.91 1.43	0	1.22	1.4	0
5	Isotopes de gaz - 10 sacs sous vide Isojars (8 pots)	4.27 4.57		4.4	7.09	5			
7	Éléments mineurs (Uranium) Bacterio	7.01 7.62		10					
15	Éléments mineurs (Uranium) Éléments mineurs (Uranium)	15.24 16.46		15					
20	Isotopes de gaz - 10 sacs sous vide Isojars (8 pots) Bacterio	19.51 19.81 22.56		20					
27	Éléments mineurs (Uranium)	27.13		25					
44	Éléments mineurs (Uranium) Bacterio	44.5 46.94		45					
49	Isotopes de gaz - 10 sacs sous vide Isojars (8 pots)	49.99 50.29		50					
51.51				51.51	55				

RAPPORT DE FORAGE

Ressources naturelles Canada	Identifiant F-10	Coordonnées (NAD83 Zone19) X: 286450 m Y: 5157073 m Z: 90.46 m (niveau du sol)	Projet Nom: Saint-Édouard No.:	Date Début: 2014-09-15 Fin: 2014-09-16
---------------------------------	----------------------------	---	---	--

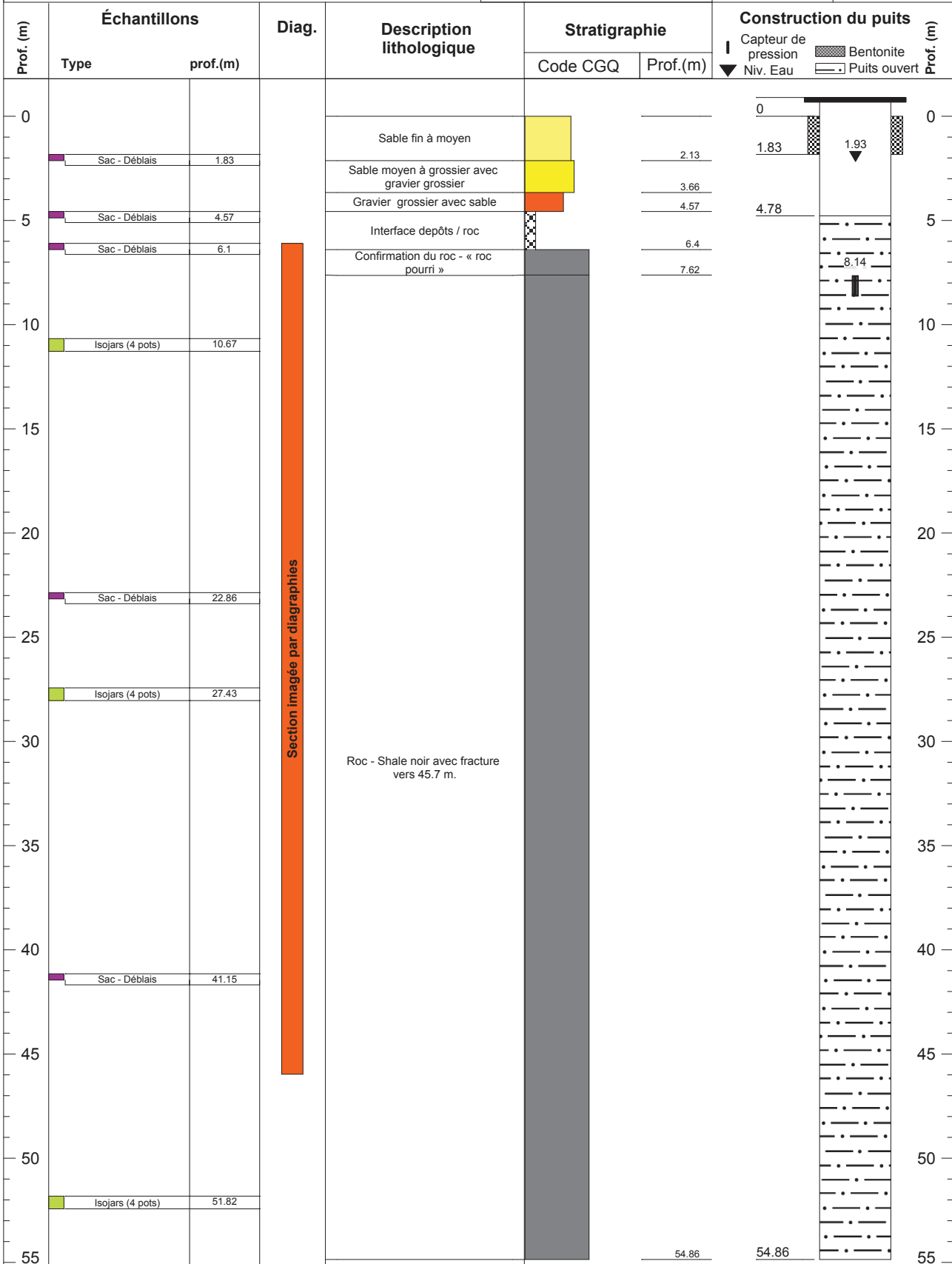
Information générale Localisation: <u>Bord du boisé, le long de la Route Leclerc.</u> Municipalité: <u>St-Edouard</u> Entrepreneur: <u>Forage LBM Inc.</u> Type de foreuse: <u>Foremost DR-12W - Destructif</u> Remarque: <u>Entre les boisés</u> <i>Coquillages visibles en surface dans les dépôts. Interface dépôts/roc peu évidente.</i>	Détails de construction Prof. forage: <u>30.48</u> m Diam. forage: <u>152.4</u> mm Long. tubage: <u>16.98</u> m Type de tubage: <u>Acier</u> Diam. tubage: <u>152.4</u> mm Margelle: <u>0.82</u> m	Niveau d'eau (p/r haut du tubage) No. capteur: <u>2005399</u> Prof. capteur: <u>8.85</u> m <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Niv. d'eau (m)</td> <td style="width: 50%;">Date</td> </tr> <tr> <td>0.22</td> <td>2015-05-08</td> </tr> <tr> <td>coulant</td> <td>2014-11-24</td> </tr> <tr> <td>8.73</td> <td>2014-10-15</td> </tr> <tr> <td>16.37</td> <td>2014-10-03</td> </tr> </table>	Niv. d'eau (m)	Date	0.22	2015-05-08	coulant	2014-11-24	8.73	2014-10-15	16.37	2014-10-03
Niv. d'eau (m)	Date											
0.22	2015-05-08											
coulant	2014-11-24											
8.73	2014-10-15											
16.37	2014-10-03											



RAPPORT DE FORAGE

Ressources naturelles Canada / Natural Resources Canada	Identifiant <h2 style="margin: 0;">F-11</h2>	Coordonnées (NAD83 Zone19) X: 286396 m Y: 5156776 m Z: 93.9 m (niveau du sol)	Projet Nom: Saint-Édouard No.:	Date Début: 2014-09-16 Fin: 2014-09-16
---	---	--	--------------------------------------	--

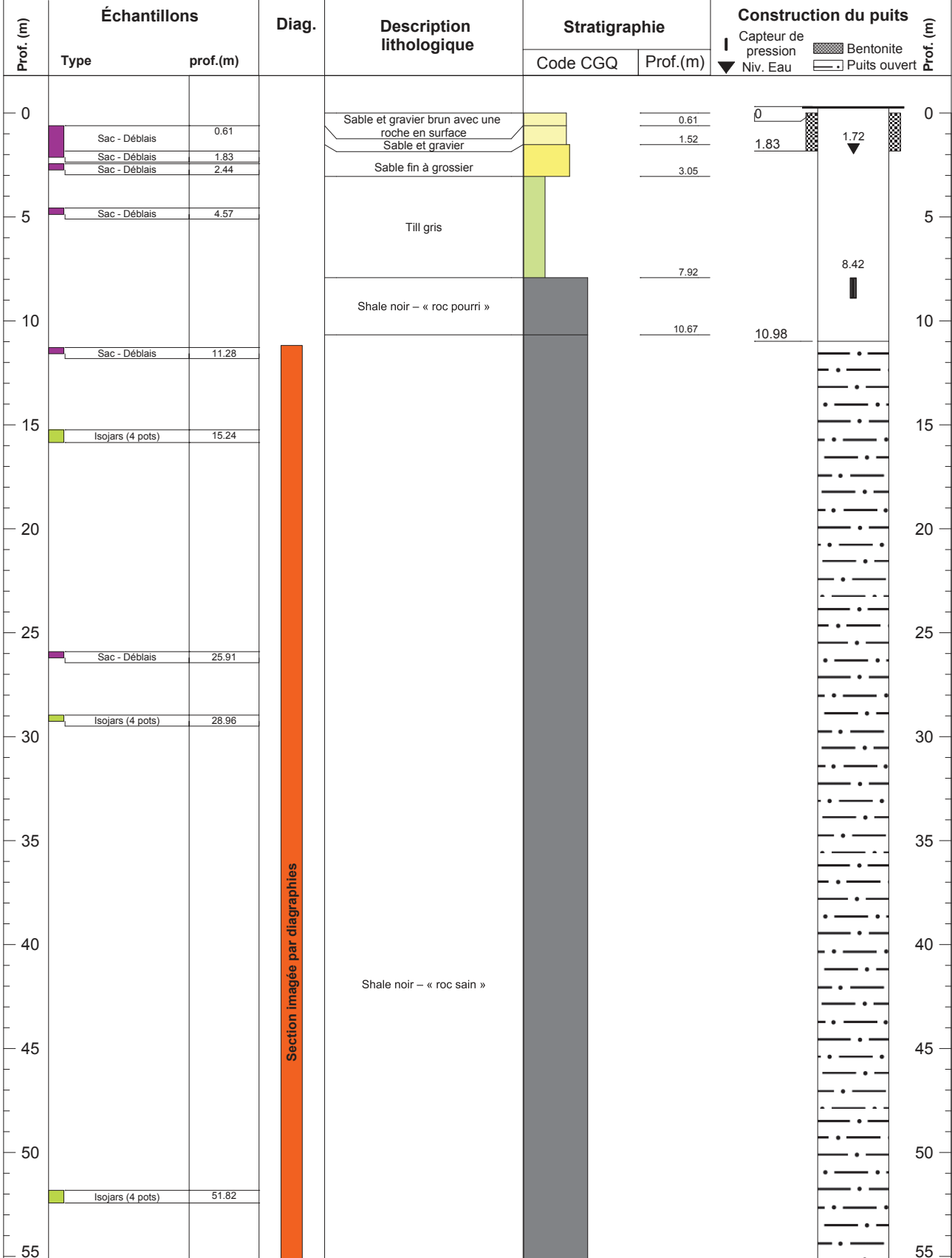
Information générale Localisation: <u>Érablière Alix René, le long de la Route Leclerc</u> Municipalité: <u>St-Edouard</u> Entrepreneur: <u>Forage LBM Inc.</u> Type de foreuse: <u>Foremost DR-12W - Destructif</u> Remarque: <u>Sur la gauche, en arrière du bâtiment principale</u>	Détails de construction Prof. forage: <u>54.86</u> m Diam. forage: <u>152.4</u> mm Long. tubage: <u>4.78</u> m Type de tubage: <u>Acier</u> Diam. tubage: <u>152.4</u> mm Margelle: <u>0.85</u> m	Niveau d'eau (p/r haut du tubage) No. capteur: <u>2022024</u> Prof. capteur: <u>8.14</u> m <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="width: 50%;">Niv. d'eau (m)</th> <th style="width: 50%;">Date</th> </tr> <tr> <td>1.93</td> <td>2015-05-08</td> </tr> <tr> <td>1.97</td> <td>2014-12-03</td> </tr> <tr> <td>2.64</td> <td>2014-10-03</td> </tr> <tr> <td>2.63</td> <td>2014-09-22</td> </tr> </table>	Niv. d'eau (m)	Date	1.93	2015-05-08	1.97	2014-12-03	2.64	2014-10-03	2.63	2014-09-22
Niv. d'eau (m)	Date											
1.93	2015-05-08											
1.97	2014-12-03											
2.64	2014-10-03											
2.63	2014-09-22											



RAPPORT DE FORAGE

Identifiant <h2 style="text-align: center;">F-12</h2>	Coordonnées (NAD83 Zone19) X: 286599 m Y: 5156883 m Z: 89.21 m (niveau du sol)	Projet Nom: Saint-Édouard No.:	Date Début: 2014-09-18 Fin: 2014-09-18
--	---	---	--

Information générale Localisation: <u>Boisé en arrière de F-10, le long de la Route Leclerc.</u> Municipalité: <u>St-Edouard</u> Entrepreneur: <u>Forage LBM Inc.</u> Type de foreuse: <u>Foremost DR-12W - Destructif</u> Remarque: <u>Sur le bord du chemin d'accès au boisé</u> <i>Difficile de voir l'interface dépôts/roc.</i> Lors du forage il y avait peu d'eau, c'est pourquoi il a été prolongé à 73 m.	Détails de construction Prof. forage: <u>73.15</u> m Diam. forage: <u>152.4</u> mm Long. tubage: <u>10.98</u> m Type de tubage: <u>Acier</u> Diam. tubage: <u>152.4</u> mm Margelle: <u>1.01</u> m	Niveau d'eau (p/r haut du tubage) No. capteur: <u>2022025</u> Prof. capteur: <u>8.42</u> m <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr> <th>Niv. d'eau (m)</th> <th>Date</th> </tr> <tr> <td>1.72</td> <td>2015-05-08</td> </tr> <tr> <td>1.7</td> <td>2014-12-01</td> </tr> <tr> <td>20.13</td> <td>2014-10-15</td> </tr> <tr> <td>61</td> <td>2014-09-27</td> </tr> </table>	Niv. d'eau (m)	Date	1.72	2015-05-08	1.7	2014-12-01	20.13	2014-10-15	61	2014-09-27
Niv. d'eau (m)	Date											
1.72	2015-05-08											
1.7	2014-12-01											
20.13	2014-10-15											
61	2014-09-27											



RAPPORT DE FORAGE

Ressources naturelles Canada / Natural Resources Canada	Identifiant <h2 style="margin: 0;">F-12</h2>	Coordonnées (NAD83 Zone19) X: <u>286599</u> m Y: <u>5156883</u> m Z: <u>89.21</u> m (niveau du sol)	Projet Nom: <u>Saint-Édouard</u> No.: _____	Date Début: <u>2014-09-18</u> Fin: <u>2014-09-18</u>
---	---	--	---	--

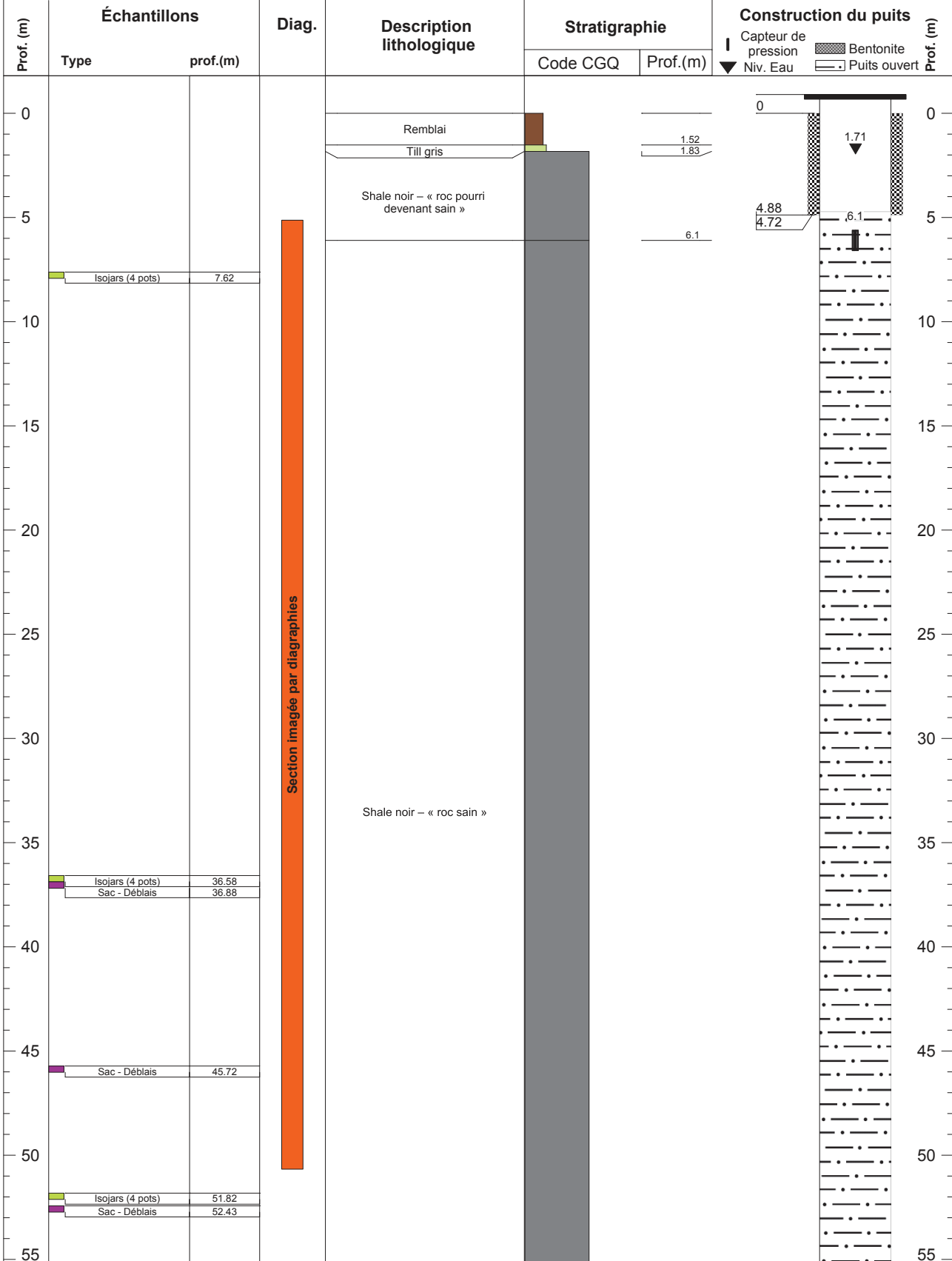
Information générale Localisation: <u>Boisé en arrière de F-10, le long de la Route Leclerc.</u> Municipalité: <u>St-Edouard</u> Entrepreneur: <u>Forage LBM Inc.</u> Type de foreuse: <u>Foremost DR-12W - Destructif</u> Remarque: <u>Sur le bord du chemin d'accès au boisé</u> <i>Difficile de voir l'interface dépôts/roc.</i> Lors du forage il y avait peu d'eau, c'est pourquoi il a été prolongé à 73 m.	Détails de construction Prof. forage: <u>73.15</u> m Diam. forage: <u>152.4</u> mm Long. tubage: <u>10.98</u> m Type de tubage: <u>Acier</u> Diam. tubage: <u>152.4</u> mm Margelle: <u>1.01</u> m	Niveau d'eau (p/r haut du tubage) No. capteur: <u>2022025</u> Prof. capteur: <u>8.42</u> m <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="width: 50%;">Niv. d'eau (m)</th> <th style="width: 50%;">Date</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1.72</td> <td style="text-align: center;">2015-05-08</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1.7</td> <td style="text-align: center;">2014-12-01</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">20.13</td> <td style="text-align: center;">2014-10-15</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">61</td> <td style="text-align: center;">2014-09-27</td> </tr> </table>	Niv. d'eau (m)	Date	1.72	2015-05-08	1.7	2014-12-01	20.13	2014-10-15	61	2014-09-27
Niv. d'eau (m)	Date											
1.72	2015-05-08											
1.7	2014-12-01											
20.13	2014-10-15											
61	2014-09-27											

Prof. (m)	Échantillons		Diag.	Description lithologique	Stratigraphie		Construction du puits		Prof. (m)
	Type	prof.(m)			Code CGQ	Prof.(m)	Capteur de pression	Niv. Eau	
60									60
65									65
70									70
73.15	Sac - Déblais	73.15				73.15	73.15		73.15
75									75
80									80
85									85
90									90
95									95
100									100
105									105
110									110

RAPPORT DE FORAGE

Identifiant <h2 style="text-align: center;">F-13</h2>	Coordonnées (NAD83 Zone19) X: 286807 m Y: 5156653 m Z: 89.06 m (niveau du sol)	Projet Nom: Saint-Édouard No.:	Date Début: 2014-09-19 Fin: 2014-09-19
--	---	--------------------------------------	--

Information générale Localisation: <u>Sur le bord du chemin d'accès du puits de Talisman</u> Municipalité: <u>St-Edouard</u> Entrepreneur: <u>Forage LBM Inc.</u> Type de foreuse: <u>Foremost DR-12W - Destructif</u> Remarque: <u>En avant des grosses roches</u> <i>Pas beaucoup d'eau dans le puits. Peu de venues d'eau dans le puits. Pour cette raison, il a été foré jusqu'à 60 m.</i>	Détails de construction Prof. forage: <u>60.96</u> m Diam. forage: <u>152.4</u> mm Long. tubage: <u>4.72</u> m Type de tubage: <u>Acier</u> Diam. tubage: <u>152.4</u> mm Margelle: <u>0.97</u> m	Niveau d'eau (p/r haut du tubage) No. capteur: <u>2022028</u> Prof. capteur: <u>6.1</u> m <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="width: 50%;">Niv. d'eau (m)</th> <th style="width: 50%;">Date</th> </tr> <tr> <td>1.71</td> <td>2015-05-08</td> </tr> <tr> <td>2.43</td> <td>2015-03-04</td> </tr> <tr> <td>4.12</td> <td>2014-12-01</td> </tr> <tr> <td>12.29</td> <td>2014-10-15</td> </tr> </table>	Niv. d'eau (m)	Date	1.71	2015-05-08	2.43	2015-03-04	4.12	2014-12-01	12.29	2014-10-15
Niv. d'eau (m)	Date											
1.71	2015-05-08											
2.43	2015-03-04											
4.12	2014-12-01											
12.29	2014-10-15											



RAPPORT DE FORAGE

	Identifiant F-13	Coordonnées (NAD83 Zone19) X: <u>286807</u> m Y: <u>5156653</u> m Z: <u>89.06</u> m (niveau du sol)	Projet Nom: <u>Saint-Édouard</u> No.: _____	Date Début: <u>2014-09-19</u> Fin: <u>2014-09-19</u>
--	--	---	--	---

Information générale Localisation: <u>Sur le bord du chemin d'accès du puits de Talisman</u> Municipalité: <u>St-Edouard</u> Entrepreneur: <u>Forage LBM Inc.</u> Type de foreuse: <u>Foremost DR-12W - Destructif</u> Remarque: <u>En avant des grosses roches</u> <i>Pas beaucoup d'eau dans le puits. Peu de venues d'eau dans le puits. Pour cette raison, il a été foré jusqu'à 60 m.</i>	Détails de construction Prof. forage: <u>60.96</u> m Diam. forage: <u>152.4</u> mm Long. tubage: <u>4.72</u> m Type de tubage: <u>Acier</u> Diam. tubage: <u>152.4</u> mm Margelle: <u>0.97</u> m	Niveau d'eau (p/r haut du tubage) No. capteur: <u>2022028</u> Prof. capteur: <u>6.1</u> m <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="width: 50%;">Niv. d'eau (m)</th> <th style="width: 50%;">Date</th> </tr> <tr> <td>1.71</td> <td>2015-05-08</td> </tr> <tr> <td>2.43</td> <td>2015-03-04</td> </tr> <tr> <td>4.12</td> <td>2014-12-01</td> </tr> <tr> <td>12.29</td> <td>2014-10-15</td> </tr> </table>	Niv. d'eau (m)	Date	1.71	2015-05-08	2.43	2015-03-04	4.12	2014-12-01	12.29	2014-10-15
Niv. d'eau (m)	Date											
1.71	2015-05-08											
2.43	2015-03-04											
4.12	2014-12-01											
12.29	2014-10-15											

Prof. (m)	Échantillons		Diag.	Description lithologique	Stratigraphie		Construction du puits		Prof. (m)
	Type	prof.(m)			Code CGQ	Prof.(m)	Capteur de pression	Niv. Eau	
60	Sac - Déblais	60.96				60.96	60.96		60
65									65
70									70
75									75
80									80
85									85
90									90
95									95
100									100
105									105
110									110

RAPPORT DE FORAGE

Ressources naturelles Canada	Identifiant F-14	Coordonnées (NAD83 Zone19) X: 286947 m Y: 5156751 m Z: 87.85 m (niveau du sol)	Projet Nom: Saint-Édouard No.:	Date Début: <u>2014-09-22</u> Fin: <u>2014-09-22</u>
---------------------------------	----------------------------	---	---	--

Information générale Localisation: <u>Bord du chemin d'accès au chalet, sur le Rang Lucieville</u> Municipalité: <u>St-Édouard</u> Entrepreneur: <u>Forage LBM Inc.</u> Type de foreuse: <u>Foremost DR-12W - Destructif</u> Remarque: <u>Sur le bord du boisé, en avant des piles de bois cordé</u> Très peu d'eau dans le forage. Il n'y a toujours pas d'eau dans le forage 4 mois après le forage.	Détails de construction Prof. forage: <u>30.48</u> m Diam. forage: <u>152.4</u> mm Long. tubage: <u>18.29</u> m Type de tubage: <u>Acier</u> Diam. tubage: <u>152.4</u> mm Margelle: <u>1.1</u> m	Niveau d'eau (p/r haut du tubage) No. capteur: _____ Prof. capteur: _____ m <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Niv. d'eau (m)</th> <th>Date</th> </tr> <tr> <td>30.8</td> <td>2014-11-20</td> </tr> <tr> <td>30.97</td> <td>2014-10-15</td> </tr> <tr> <td>31</td> <td>2014-09-27</td> </tr> <tr> <td>31</td> <td>2014-09-22</td> </tr> </table>	Niv. d'eau (m)	Date	30.8	2014-11-20	30.97	2014-10-15	31	2014-09-27	31	2014-09-22
Niv. d'eau (m)	Date											
30.8	2014-11-20											
30.97	2014-10-15											
31	2014-09-27											
31	2014-09-22											

Prof. (m)	Échantillons		Diag.	Description lithologique	Stratigraphie		Construction du puits		Prof. (m)
	Type	prof. (m)			Code CGQ	Prof. (m)	Capteur de pression	Niv. Eau	
0				Sol de surface		0.61			0
	Sac - Déblais	1.52		Till gris		1.83			1.83
				Sable fin gris. Échantillon composite		4.88			
5	Sac - Déblais	4.88		Sable et gravier avec interlits plus fin		7.32			
	Sac - Déblais	7.62		Gravier et sable avec petits cailloux sub-arrondis de différentes lithologies.		9.75			
10	Sac - Déblais	10.36		Till gris		10.97			
	Sac - Déblais	11.28		Sable et gravier grossier. Échantillonnage lavé afin de confirmer la présence de blocs (granitoïdes)		13.11			
	Sac - Déblais	14.33		Sable fin		14.33			
15	Isojars (4 pots)	15.24							
20									
25									
30	Isojars (4 pots)	27.43		Shale noir - « roc sain »		30.48			30.48
35									
40									
45									
50									
55									

 Forage supervisé par: X.Malet

 Préparé par: X.Malet

 Vérifié par: C.Rivard, D.Lavoie et P.Ladevèze

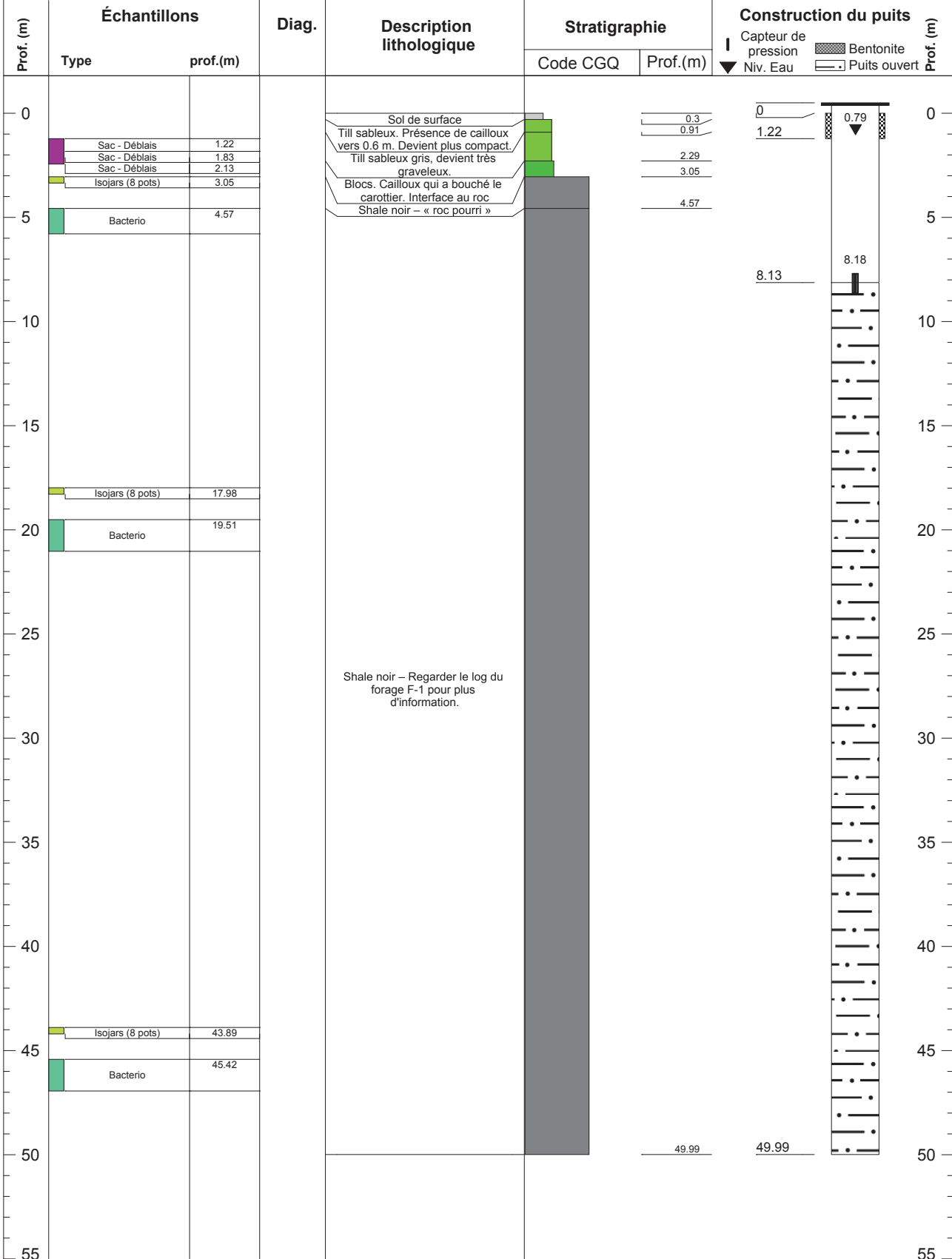
 No. mise à jour: rev_1.6 - Mise à jour mineure -

 Date de modification: 2015-03-17

RAPPORT DE FORAGE

Ressources naturelles Canada	Identifiant F-20	Coordonnées (NAD83 Zone19) X: <u>281370</u> m Y: <u>5168963</u> m Z: <u>45.74</u> m (niveau du sol)	Projet Nom: <u>Saint-Édouard</u> No.: _____	Date Début: <u>2014-10-01</u> Fin: <u>2014-10-03</u>
---------------------------------	----------------------------	--	---	--

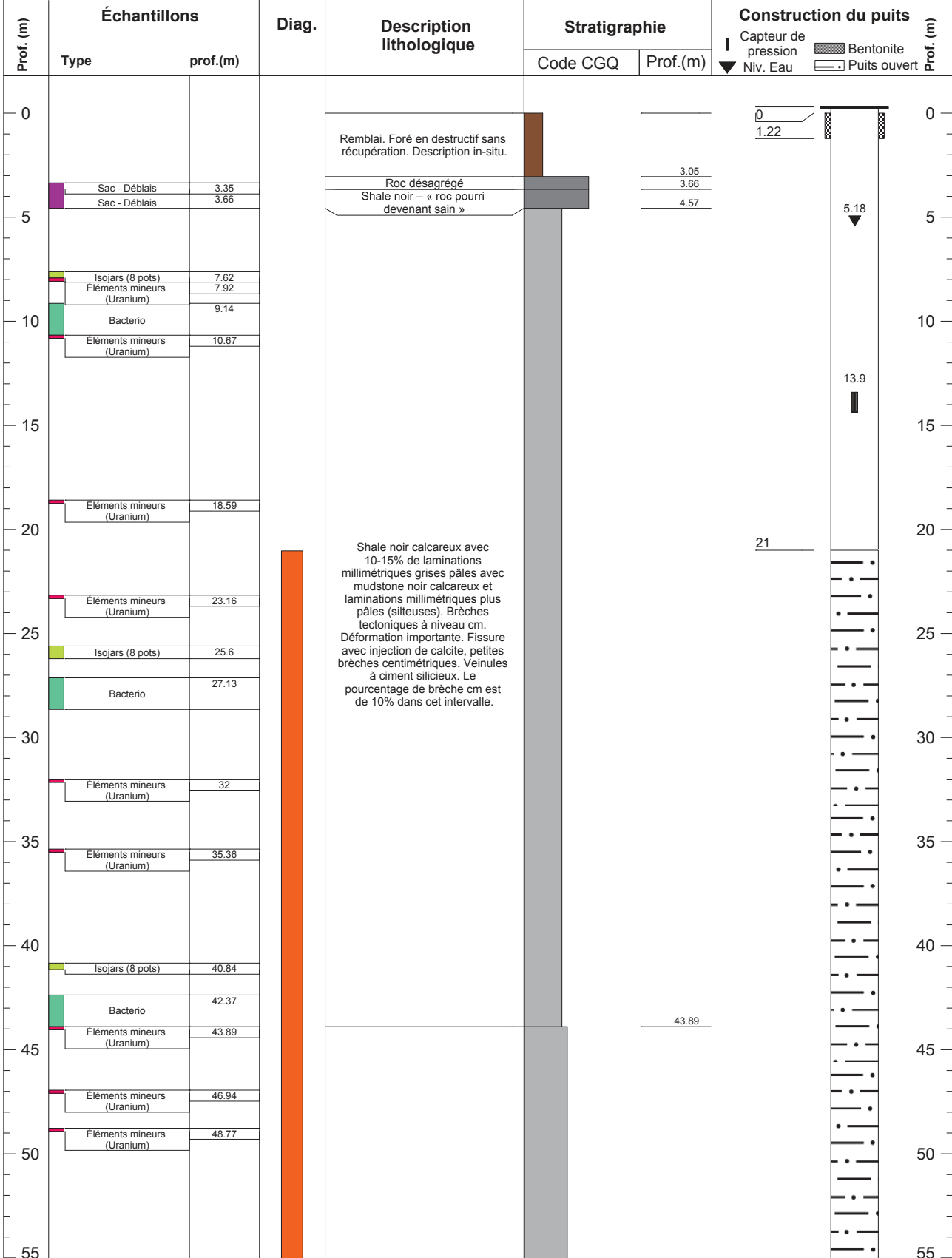
Information générale Localisation: <u>Rang Chouayen.</u> Municipalité: <u>Lotbinière</u> Entrepreneur: <u>Forages Comeau</u> Type de foreuse: <u>D-60</u> - Forage au diamant Remarque: <u>À 6.2 m du puits F-1 sur le bord du rang Chouayen</u> Peu d'eau lors du forage. À 6.2 m de F-1	Détails de construction Prof. forage: <u>49.99</u> m Diam. forage: <u>96</u> mm Long. tubage: <u>6.1</u> m Type de tubage: <u>Acier</u> Diam. tubage: <u>96</u> mm Margelle: <u>0.78</u> m	Niveau d'eau (p/r haut du tubage) No. capteur: <u>2022013</u> Prof. capteur: <u>8.18</u> m <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Niv. d'eau (m)</td> <td style="width: 50%;">Date</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0.79</td> <td style="text-align: center;">2015-05-08</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0.4</td> <td style="text-align: center;">2014-11-20</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0.73</td> <td style="text-align: center;">2014-10-23</td> </tr> </table>	Niv. d'eau (m)	Date	0.79	2015-05-08	0.4	2014-11-20	0.73	2014-10-23
Niv. d'eau (m)	Date									
0.79	2015-05-08									
0.4	2014-11-20									
0.73	2014-10-23									



RAPPORT DE FORAGE

Ressources naturelles Canada	Identifiant F-21	Coordonnées (NAD83 Zone19) X: <u>287026</u> m Y: <u>5156377</u> m Z: <u>88.69</u> m (niveau du sol)	Projet Nom: <u>Saint-Édouard</u> No.: _____	Date Début: <u>2014-10-06</u> Fin: <u>2014-10-16</u>
---------------------------------	----------------------------	--	---	--

Information générale Localisation: <u>À 350 m après la fin de la route Leclerc.</u> Municipalité: <u>St-Edouard</u> Entrepreneur: <u>Forages Comeau</u> Type de foreuse: <u>D-60</u> - Forage au diamant Remarque: <u>Dépassé l'entrée du puits de Talisman. Sur le bord du chemin.</u> <i>Roc proche de la surface. Roc très friable jusqu'à 19m. Bris du carrotier à 146 m.</i> Arrêt du forage.	Détails de construction Prof. forage: <u>152.1</u> m Diam. forage: <u>96</u> mm Long. tubage: <u>21</u> m Type de tubage: <u>Acier</u> Diam. tubage: <u>96</u> mm Margelle: <u>0.84</u> m	Niveau d'eau (p/r haut du tubage) No. capteur: <u>2026272</u> Prof. capteur: <u>13.9</u> m <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Niv. d'eau (m)</th> <th>Date</th> </tr> <tr> <td>5.18</td> <td>2015-05-08</td> </tr> <tr> <td>9.5</td> <td>2015-03-04</td> </tr> <tr> <td>14.5</td> <td>2015-02-04</td> </tr> <tr> <td>63.14</td> <td>2014-12-01</td> </tr> </table>	Niv. d'eau (m)	Date	5.18	2015-05-08	9.5	2015-03-04	14.5	2015-02-04	63.14	2014-12-01
Niv. d'eau (m)	Date											
5.18	2015-05-08											
9.5	2015-03-04											
14.5	2015-02-04											
63.14	2014-12-01											



RAPPORT DE FORAGE

	Identifiant <h2 style="margin: 0;">F-21</h2>	Coordonnées (NAD83 Zone19) X: <u>287026</u> m Y: <u>5156377</u> m Z: <u>88.69</u> m (niveau du sol)	Projet Nom: <u>Saint-Édouard</u> No.: _____	Date Début: <u>2014-10-06</u> Fin: <u>2014-10-16</u>
--	---	--	---	--

Information générale Localisation: <u>À 350 m après la fin de la route Leclerc.</u> Municipalité: <u>St-Edouard</u> Entrepreneur: <u>Forages Comeau</u> Type de foreuse: <u>D-60</u> - Forage au diamant Remarque: <u>Dépassé l'entrée du puits de Talisman. Sur le bord du chemin.</u> <i>Roc proche de la surface. Roc très friable jusqu'à 19m. Bris du carrotier à 146 m.</i> Arrêt du forage.	Détails de construction Prof. forage: <u>152.1</u> m Diam. forage: <u>96</u> mm Long. tubage: <u>21</u> m Type de tubage: <u>Acier</u> Diam. tubage: <u>96</u> mm Margelle: <u>0.84</u> m	Niveau d'eau (p/r haut du tubage) No. capteur: <u>2026272</u> Prof. capteur: <u>13.9</u> m <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr> <th>Niv. d'eau (m)</th> <th>Date</th> </tr> <tr> <td>5.18</td> <td>2015-05-08</td> </tr> <tr> <td>9.5</td> <td>2015-03-04</td> </tr> <tr> <td>14.5</td> <td>2015-02-04</td> </tr> <tr> <td>63.14</td> <td>2014-12-01</td> </tr> </table>	Niv. d'eau (m)	Date	5.18	2015-05-08	9.5	2015-03-04	14.5	2015-02-04	63.14	2014-12-01
Niv. d'eau (m)	Date											
5.18	2015-05-08											
9.5	2015-03-04											
14.5	2015-02-04											
63.14	2014-12-01											

Prof. (m)	Échantillons		Diag.	Description lithologique	Stratigraphie		Construction du puits	Prof. (m)			
	Type	prof. (m)			Code CGQ	Prof. (m)			Capteur de pression Niv. Eau	Bentonite Puits ouvert	
60	Éléments mineurs (Uranium)	55.78 56.08	Section imagée par diagraphies	Shale noir calcaireux avec 10-15% de laminations millimétriques grises pâles. Déformation importante. Fissure avec injection de calcite, petites brèches centimétriques. Veinules à ciment siliceux. Le pourcentage de brèche cm est de 10% dans cet intervalle.			▼	60			
	Isojars (8 pots)	57.61									
	Bacterio	57.61									
65	Éléments mineurs (Uranium)	63.7									65
70	Éléments mineurs (Uranium)	69.19									70
75	Éléments mineurs (Uranium)	74.07 74.37									75
	Isojars (8 pots)	74.37									
	Bacterio	75.9									
80											80
85	Éléments mineurs (Uranium)	83.82									85
90	Éléments mineurs (Uranium)	91.14									90
	Isojars (8 pots)	92.66									
	Bacterio	94.18									
95									97.23		95
100	Éléments mineurs (Uranium)	98.45					100				
105	Isojars (8 pots)	106.38					105				
	Bacterio	107.9									
110	Éléments mineurs (Uranium)	110.95					110				

RAPPORT DE FORAGE

Ressources naturelles Canada / Natural Resources Canada	Identifiant <h2 style="margin: 0;">F-21</h2>	Coordonnées (NAD83 Zone19) X: <u>287026</u> m Y: <u>5156377</u> m Z: <u>88.69</u> m (niveau du sol)	Projet Nom: <u>Saint-Édouard</u> No.: _____	Date Début: <u>2014-10-06</u> Fin: <u>2014-10-16</u>
---	---	--	---	--

Information générale Localisation: <u>À 350 m après la fin de la route Leclerc.</u> Municipalité: <u>St-Edouard</u> Entrepreneur: <u>Forages Comeau</u> Type de foreuse: <u>D-60</u> - Forage au diamant Remarque: <u>Dépassé l'entrée du puits de Talisman. Sur le bord du chemin.</u> <i>Roc proche de la surface. Roc très friable jusqu'à 19m. Bris du carrotier à 146 m.</i> Arrêt du forage.	Détails de construction Prof. forage: <u>152.1</u> m Diam. forage: <u>96</u> mm Long. tubage: <u>21</u> m Type de tubage: <u>Acier</u> Diam. tubage: <u>96</u> mm Margelle: <u>0.84</u> m	Niveau d'eau (p/r haut du tubage) No. capteur: <u>2026272</u> Prof. capteur: <u>13.9</u> m <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="width: 50%;">Niv. d'eau (m)</th> <th style="width: 50%;">Date</th> </tr> <tr> <td>5.18</td> <td>2015-05-08</td> </tr> <tr> <td>9.5</td> <td>2015-03-04</td> </tr> <tr> <td>14.5</td> <td>2015-02-04</td> </tr> <tr> <td>63.14</td> <td>2014-12-01</td> </tr> </table>	Niv. d'eau (m)	Date	5.18	2015-05-08	9.5	2015-03-04	14.5	2015-02-04	63.14	2014-12-01
Niv. d'eau (m)	Date											
5.18	2015-05-08											
9.5	2015-03-04											
14.5	2015-02-04											
63.14	2014-12-01											

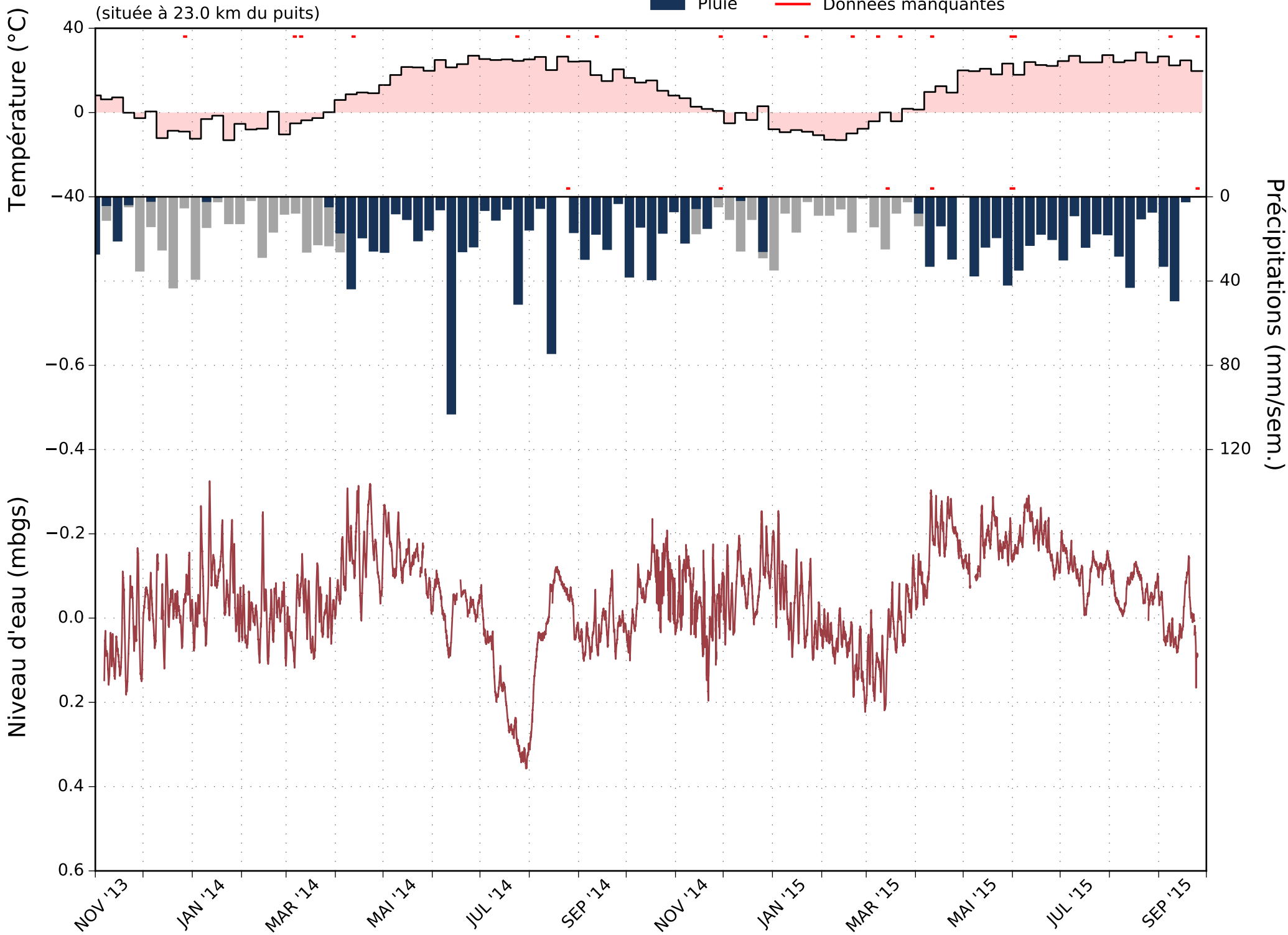
Prof. (m)	Échantillons		Diag.	Description lithologique	Stratigraphie		Construction du puits		Prof. (m)
	Type	prof.(m)			Code CGQ	Prof.(m)	Capteur de pression	Niv. Eau	
115				Shale noir plissé avec pourcentage variable de fines lamines millimétriques (5 à 25% sur intervalle métrique). Légèrement calcaireux. Plan lustré, mouvement. Fissures localement assez abondantes avec injection de calcite.			▼	●	115
120							▼	●	120
121.31	Isojars (8 pots)	121.31					▼	●	121.31
121.62	Éléments mineurs (Uranium)	121.62					▼	●	121.62
123.14	Bacterio	123.14					▼	●	123.14
125							▼	●	125
130							▼	●	130
129.84	Éléments mineurs (Uranium)	129.84					▼	●	129.84
135							▼	●	135
134.11	Éléments mineurs (Uranium)	134.11					▼	●	134.11
135.03	Isojars (8 pots)	135.03				▼	●	135.03	
135.03	Isotopes de gaz - 10 sacs sous vide	135.03				▼	●	135.03	
135.33	Bacterio	135.33				▼	●	135.33	
140						▼	●	140	
142.04	Éléments mineurs (Uranium)	142.04				▼	●	142.04	
145						▼	●	145	
146	Isotopes de gaz - 10 sacs sous vide	146				▼	●	146	
146	Éléments mineurs (Uranium)	146				▼	●	146	
150						▼	●	150	
152.1					152.1	▼	●	152.1	
155						▼	●	155	
160						▼	●	160	
165						▼	●	165	

Annexe 3. Comparaison des variations de températures et précipitations avec les variations piézométriques pour chacun des puits du projet

Puits F1

Station météo FORTIERVILLE
(située à 23.0 km du puits)

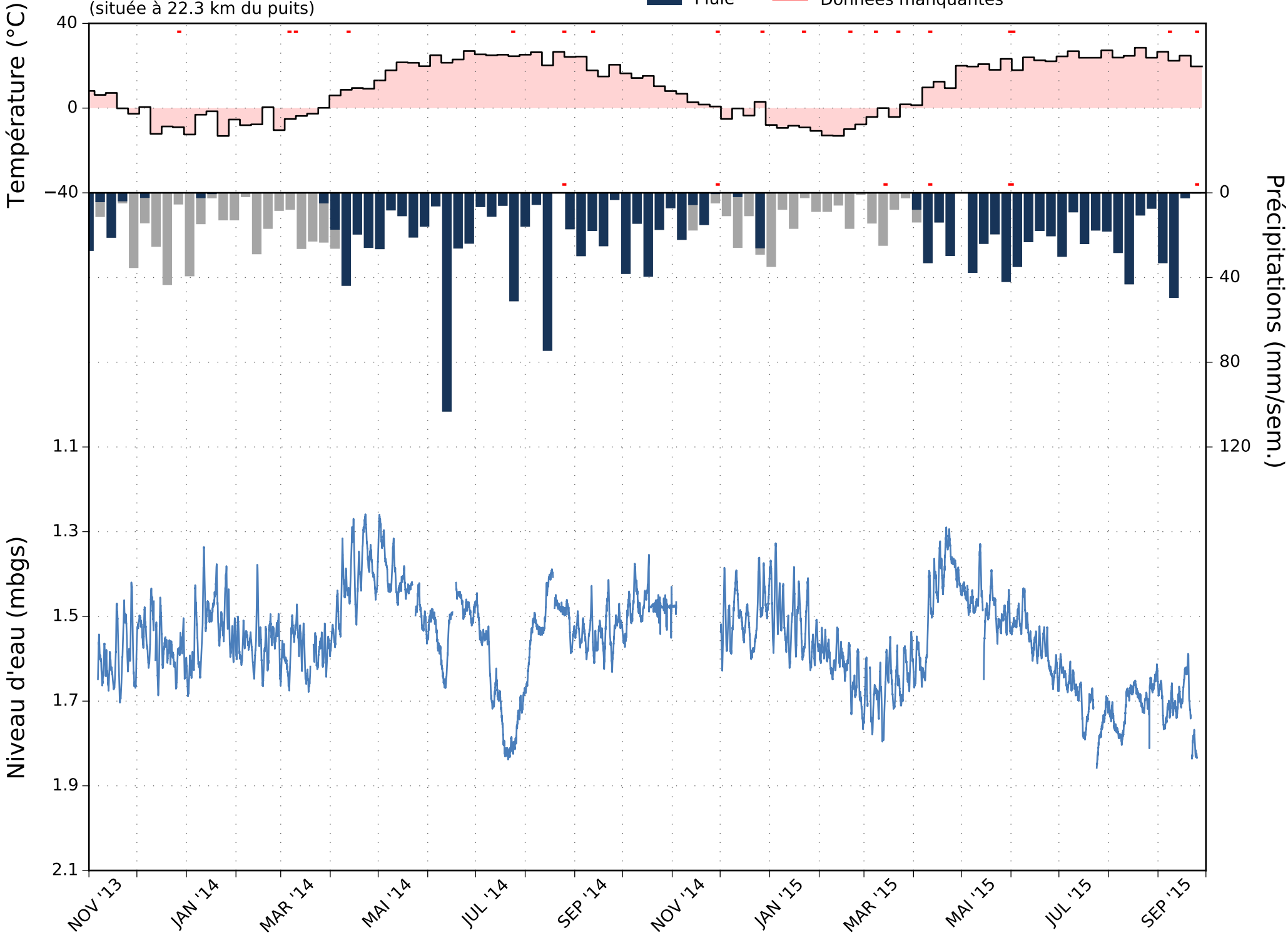
- Neige
- Température de l'air
- Niveau d'eau
- Pluie
- Données manquantes



Puits F2

Station météo FORTIERVILLE
(située à 22.3 km du puits)

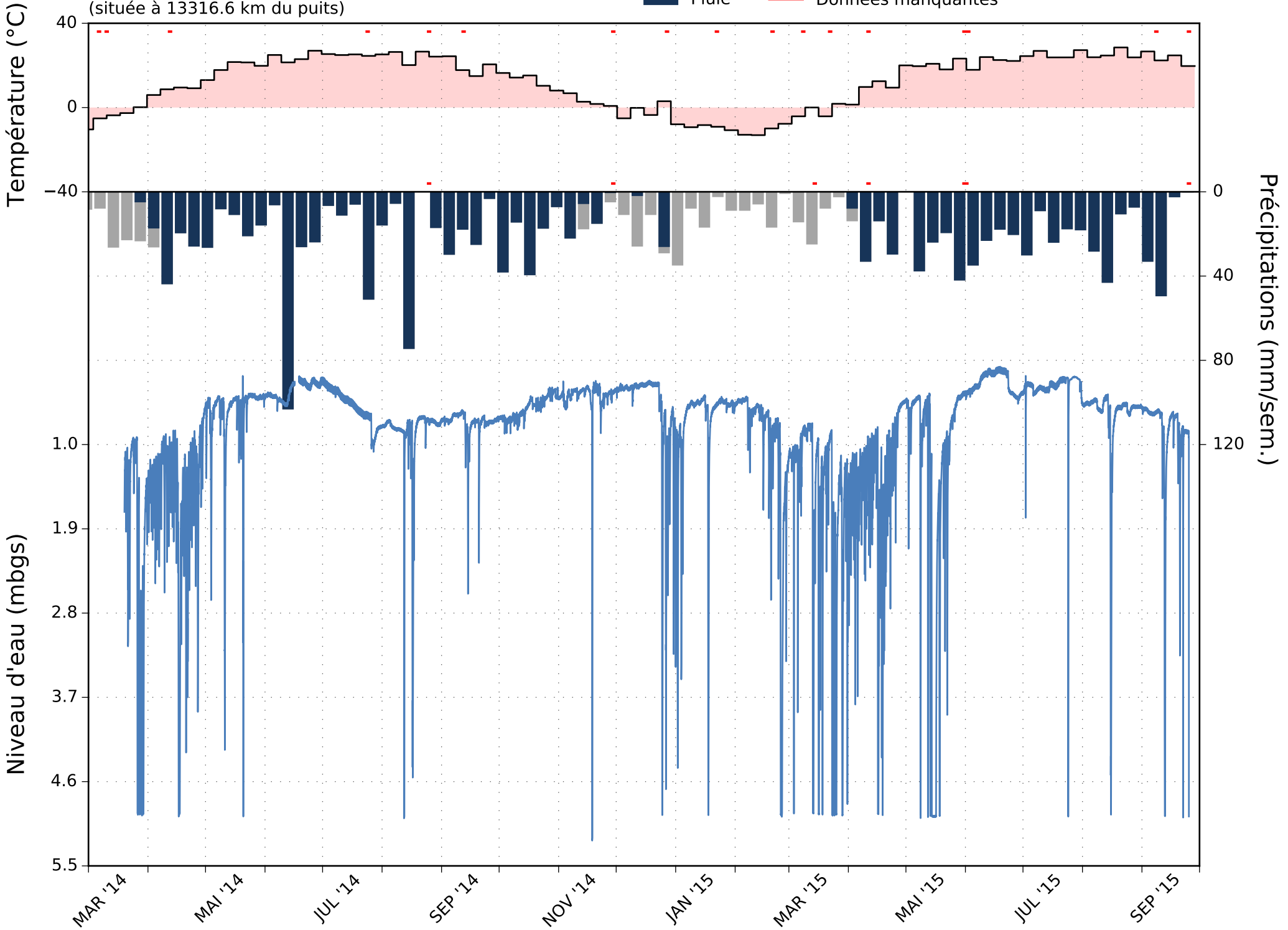
- Neige
- Température de l'air
- Niveau d'eau
- Pluie
- Données manquantes



Puits F3

Station météo FORTIERVILLE
(située à 13316.6 km du puits)

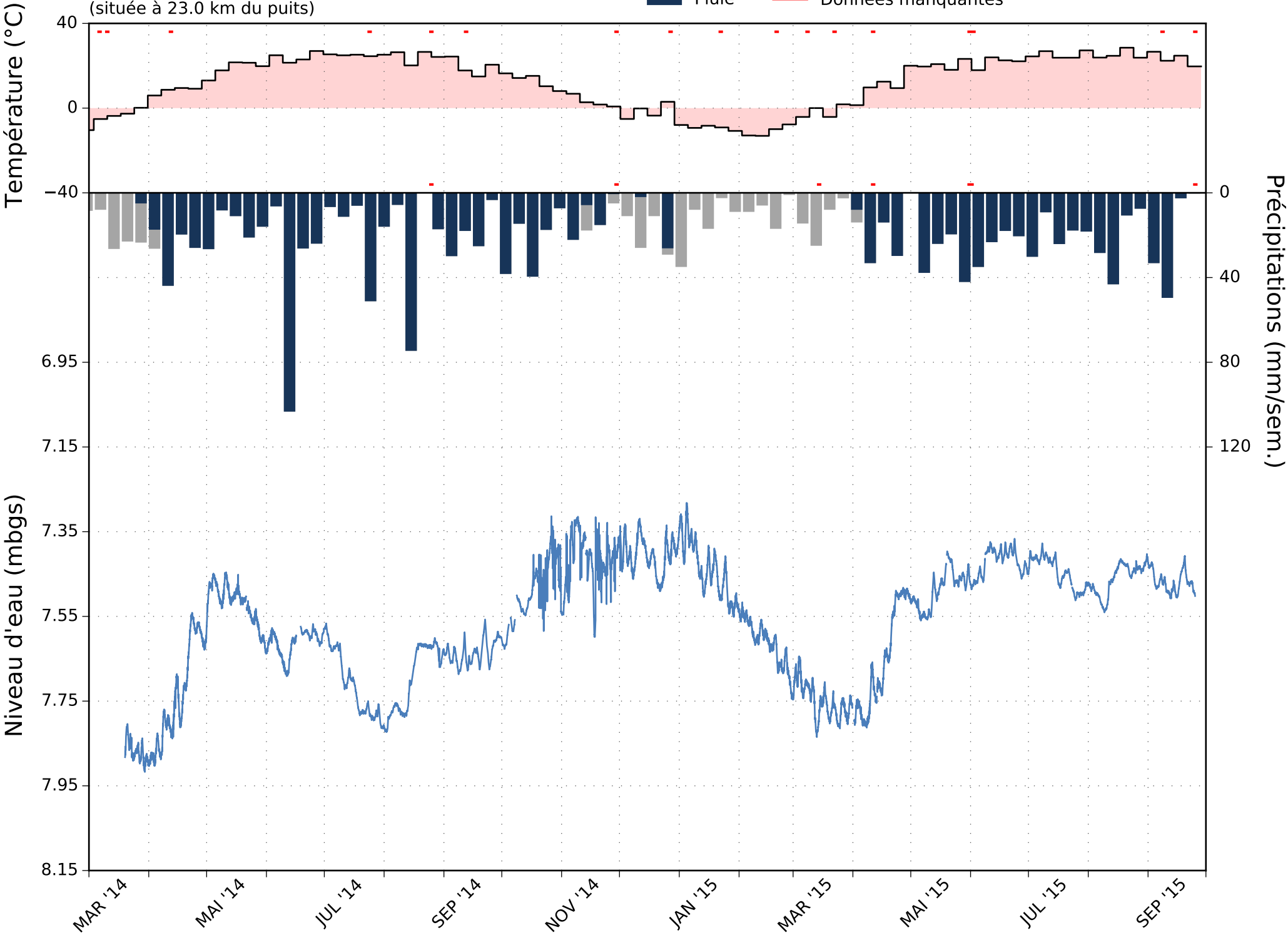
- Neige
- Température de l'air
- Niveau d'eau
- Pluie
- Données manquantes



Puits F4

Station météo FORTIERVILLE
(située à 23.0 km du puits)

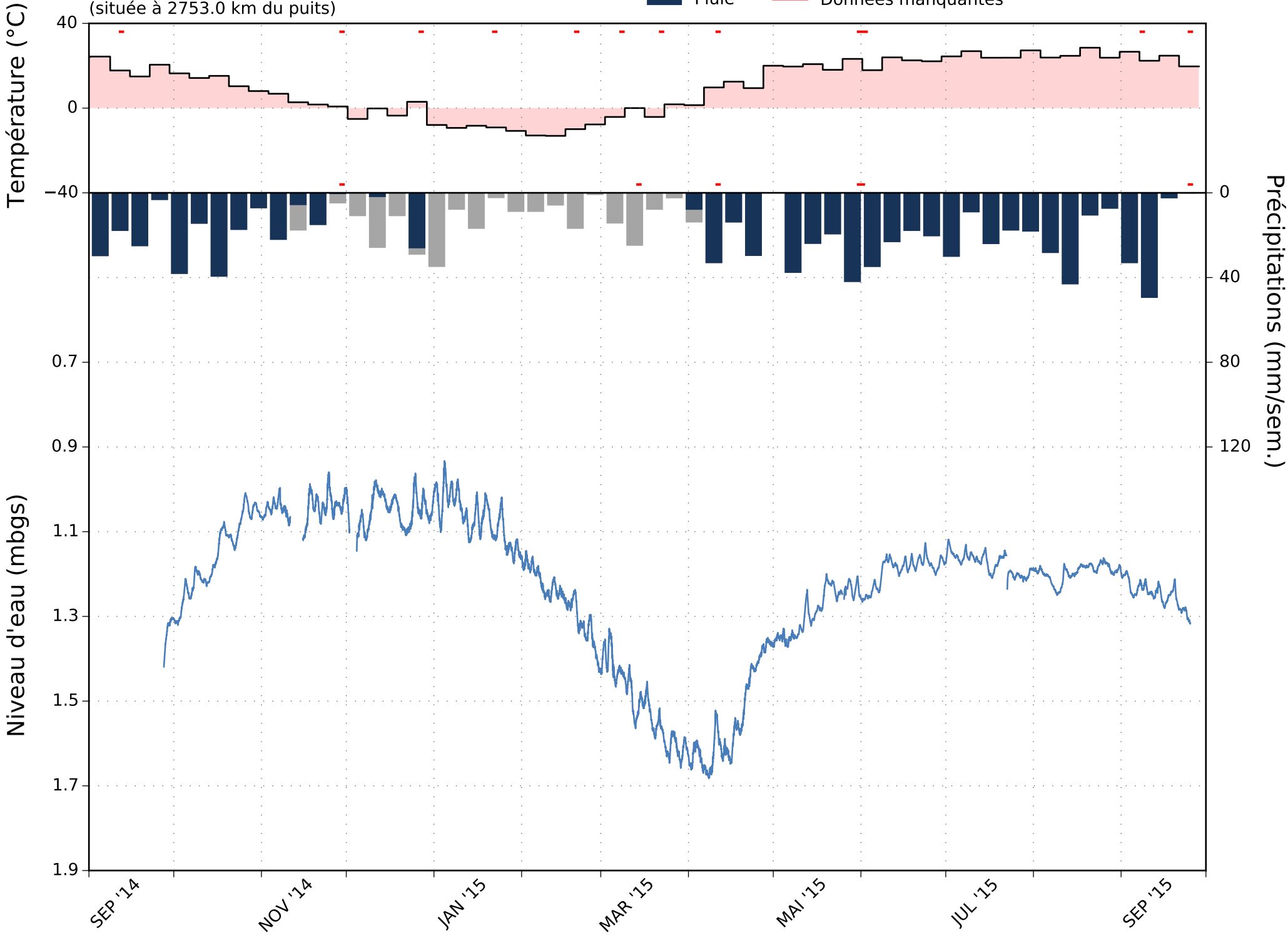
- Neige
- Température de l'air
- Niveau d'eau
- Pluie
- Données manquantes



Puits F5

Station météo FORTIERVILLE
(située à 2753.0 km du puits)

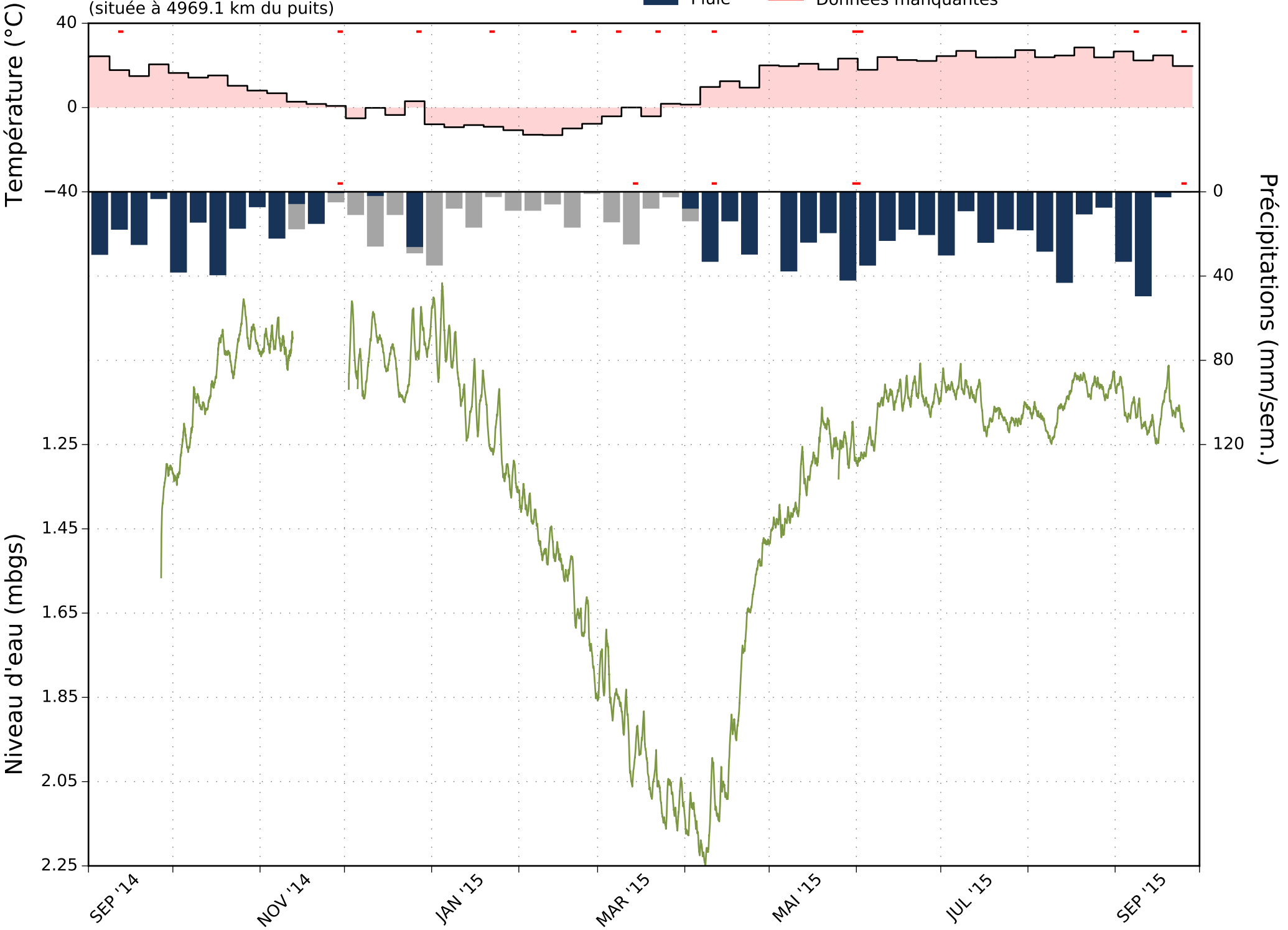
- Neige
- Température de l'air
- Niveau d'eau
- Pluie
- Données manquantes



Puits F6

Station météo FORTIERVILLE
(située à 4969.1 km du puits)

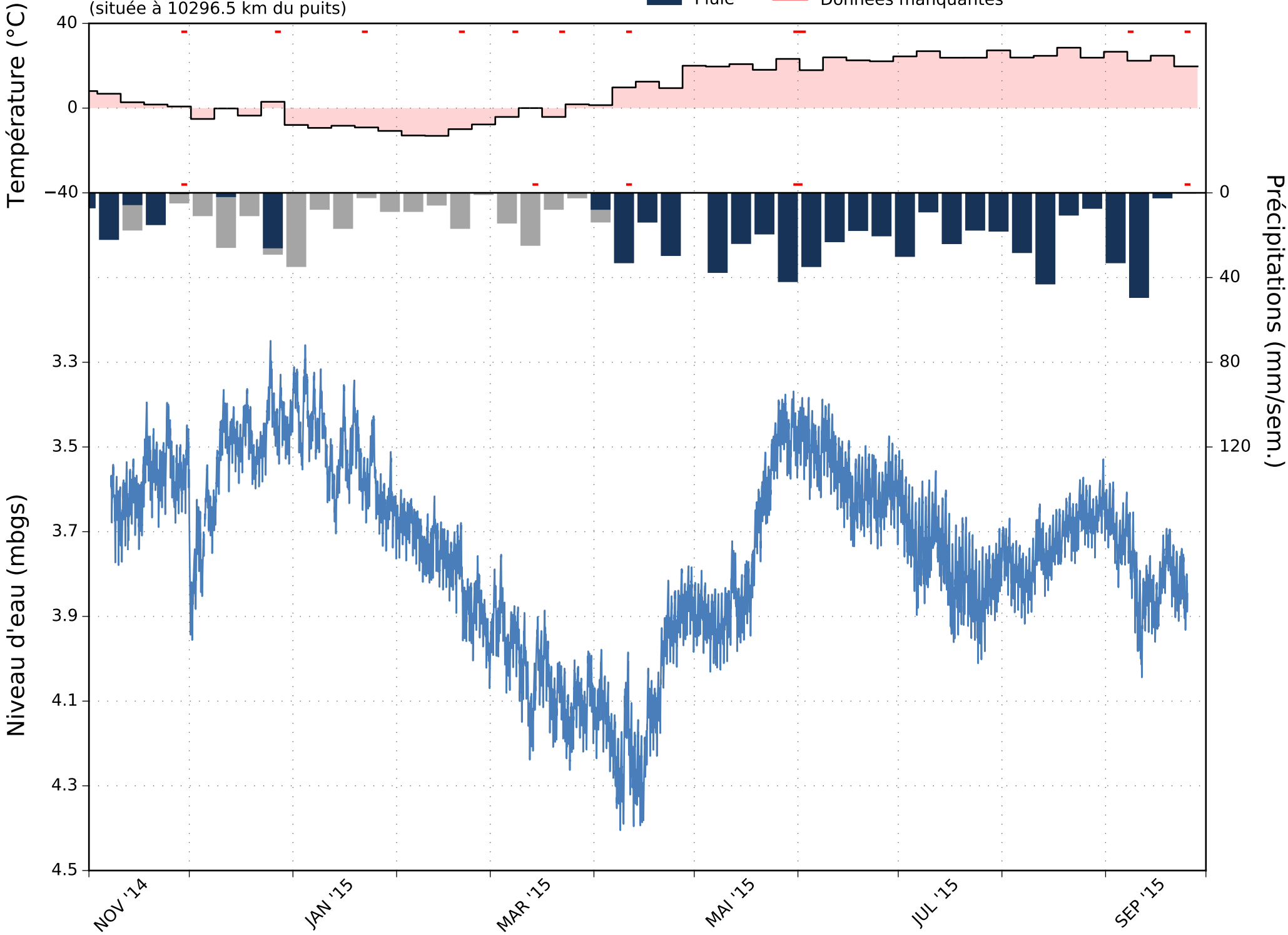
- Neige
- Température de l'air
- Niveau d'eau
- Pluie
- Données manquantes



Puits F7

Station météo FORTIERVILLE
(située à 10296.5 km du puits)

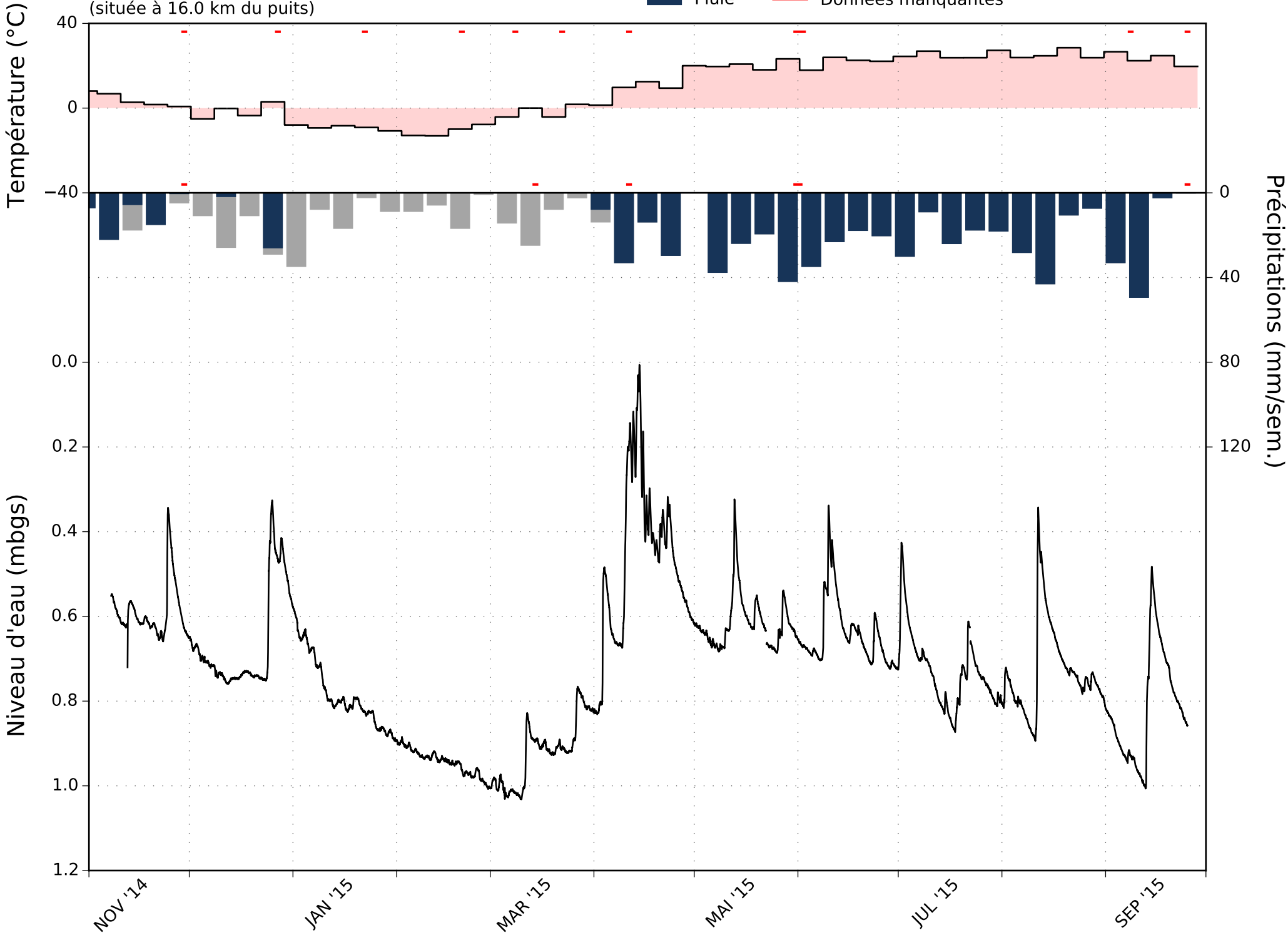
- Neige
- Température de l'air
- Niveau d'eau
- Pluie
- Données manquantes



Puits F8

Station météo FORTIERVILLE
(située à 16.0 km du puits)

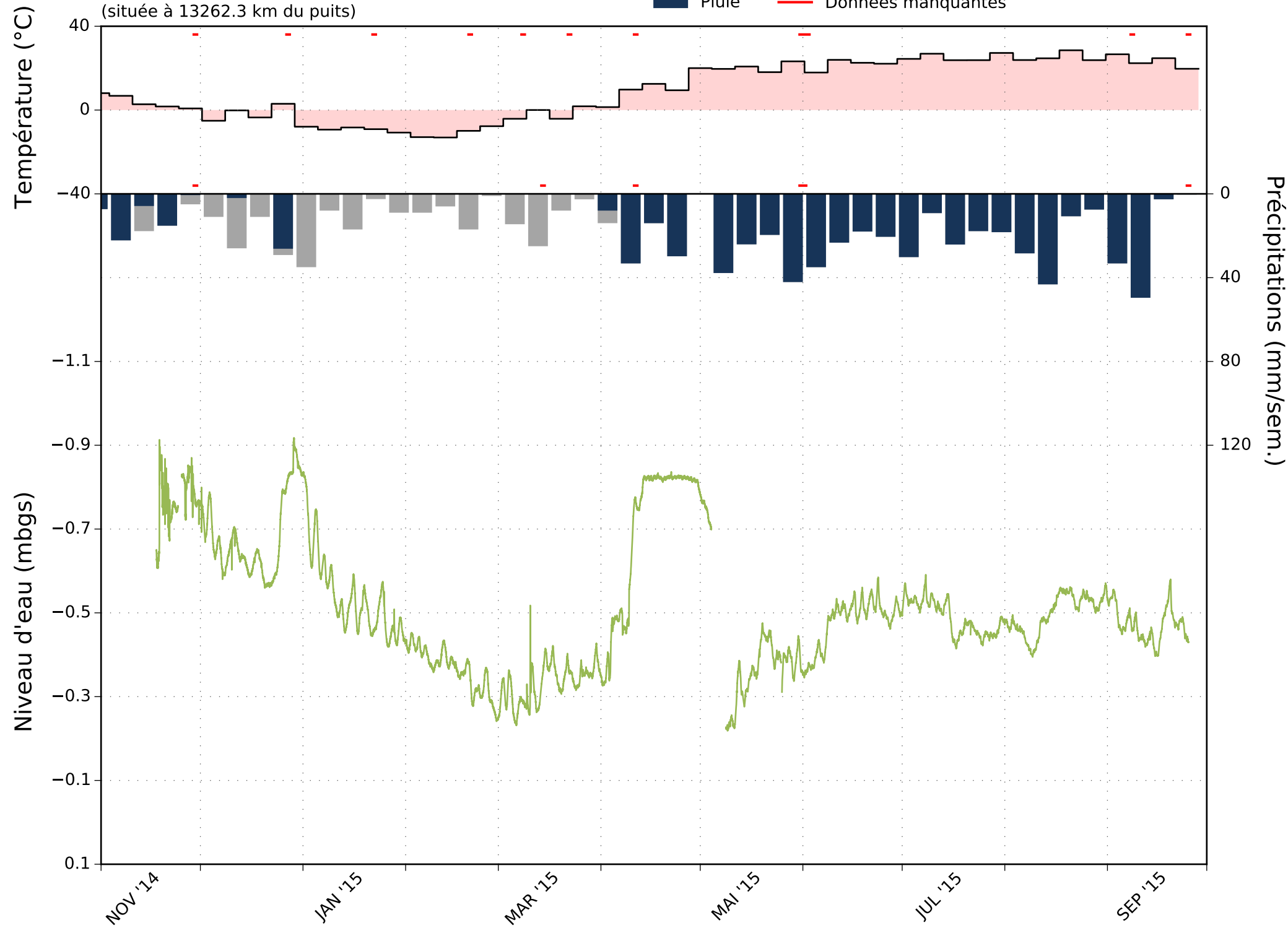
- Neige
- Température de l'air
- Niveau d'eau
- Pluie
- Données manquantes



Puits F10

Station météo FORTIERVILLE
(située à 13262.3 km du puits)

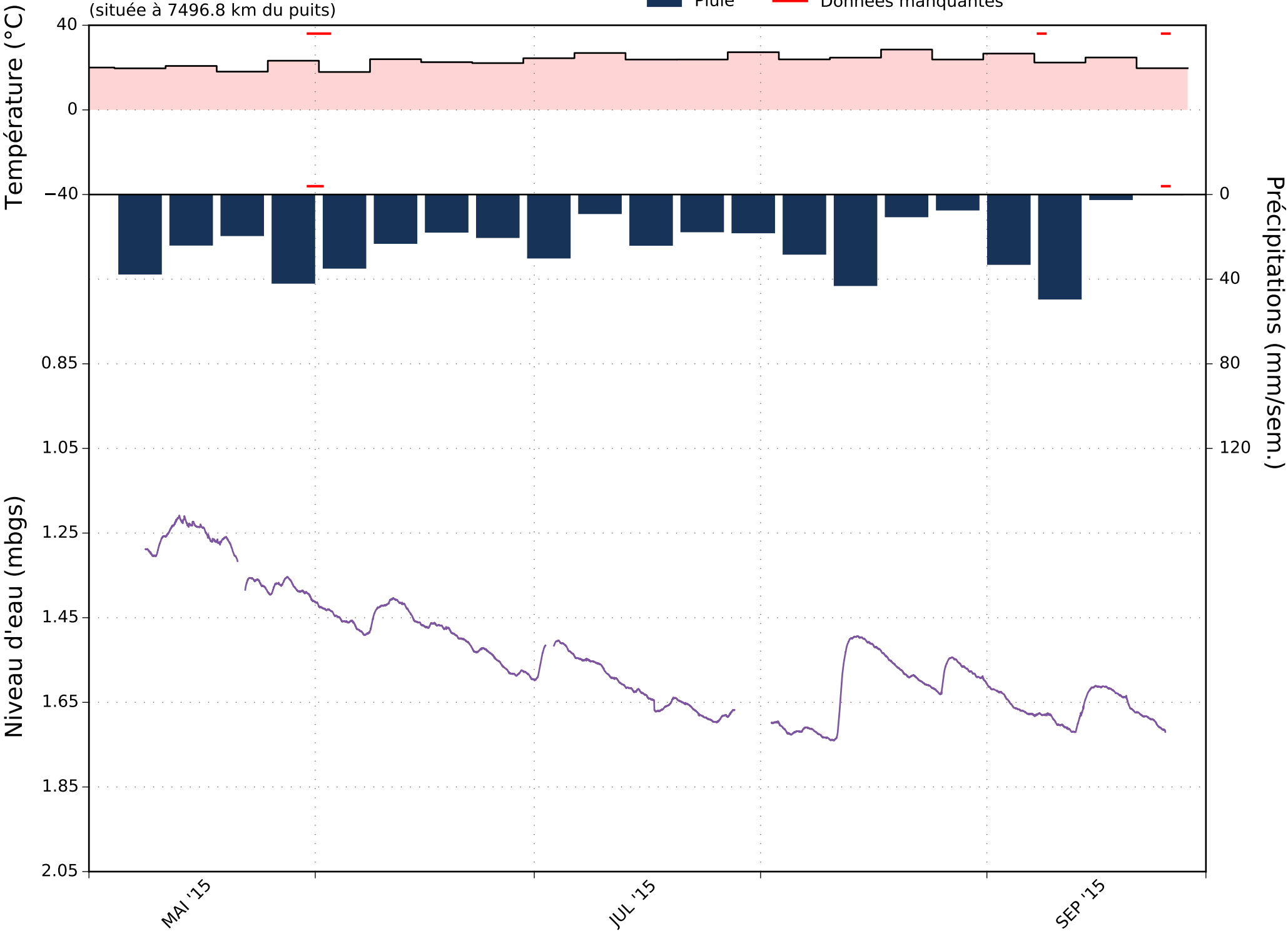
- Neige
- Température de l'air
- Niveau d'eau
- Pluie
- Données manquantes



Puits F11

Station météo FORTIERVILLE
(située à 7496.8 km du puits)

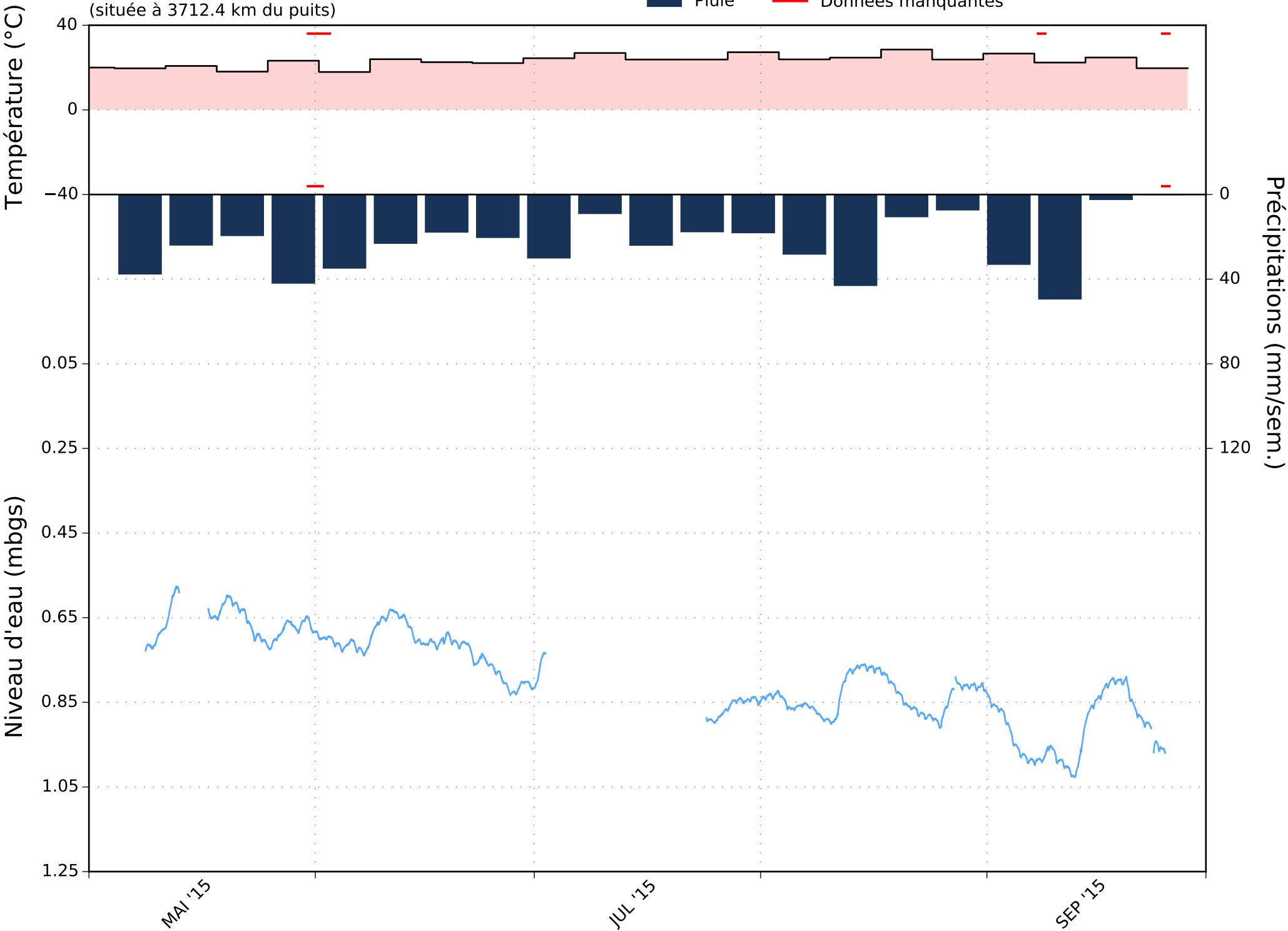
- Neige
- Température de l'air
- Niveau d'eau
- Pluie
- Données manquantes



Puits F12

Station météo FORTIERVILLE
(située à 3712.4 km du puits)

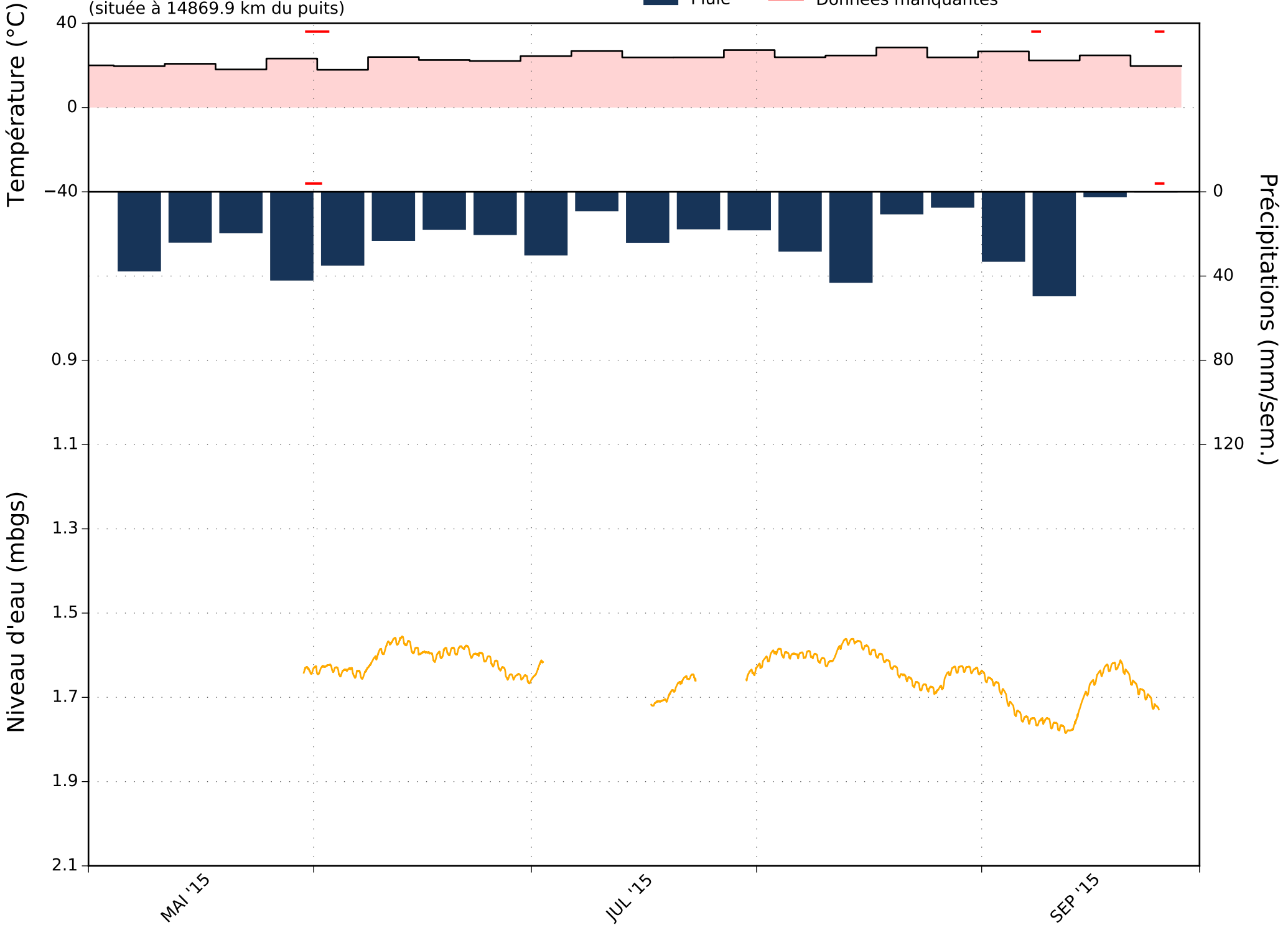
- Neige
- Température de l'air
- Niveau d'eau
- Pluie
- Données manquantes



Puits F13

Station météo FORTIERVILLE
(située à 14869.9 km du puits)

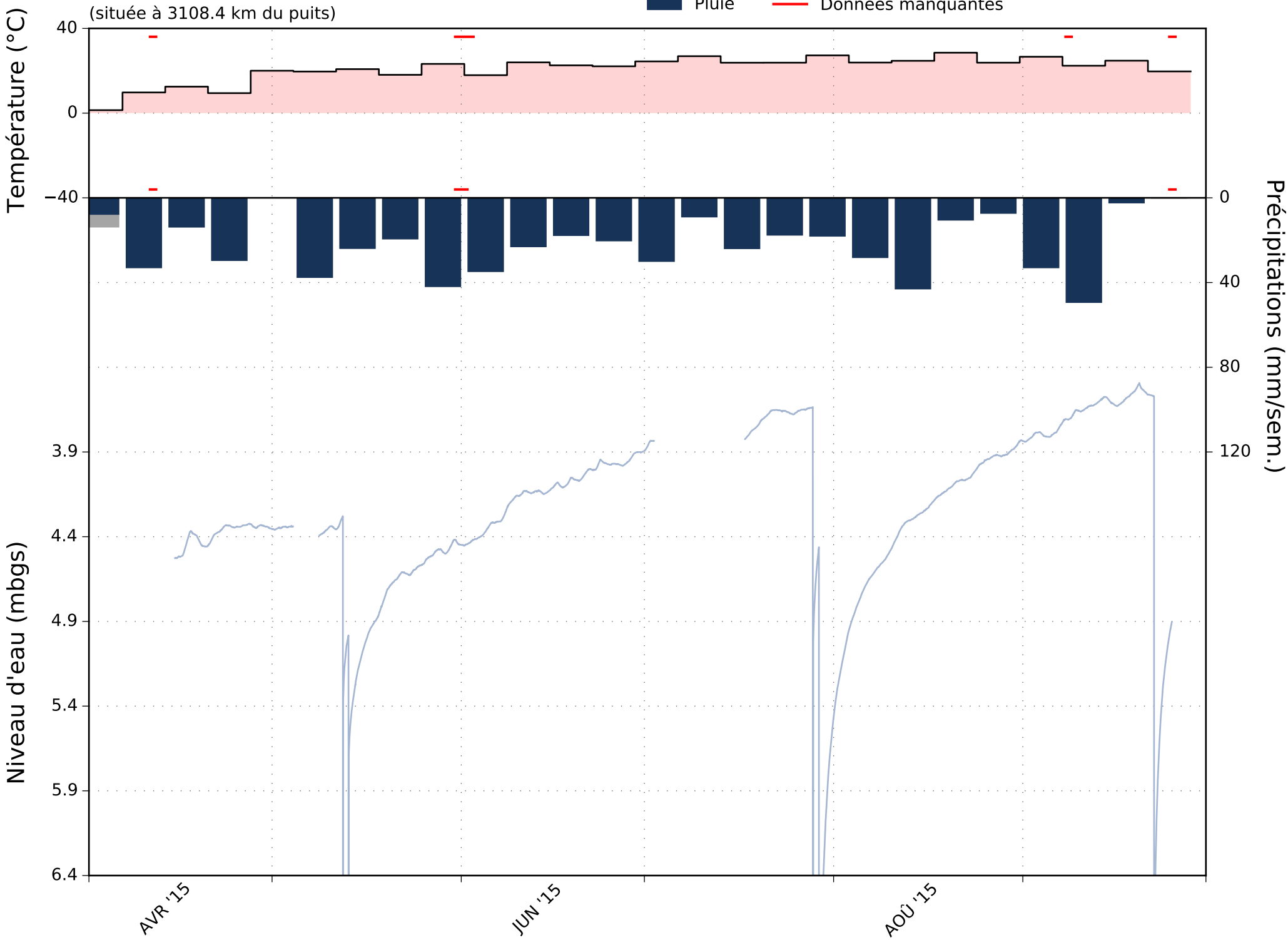
- Neige
- Température de l'air
- Niveau d'eau
- Pluie
- Données manquantes



Puits F21

Station météo FORTIERVILLE
(située à 3108.4 km du puits)

- Neige
- Température de l'air
- Niveau d'eau
- Pluie
- Données manquantes



*Annexe 4. Courbes de variation de charge normalisée des essais de perméabilité
in situ réalisés sur les puits forés lors du projet*

