POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

Commission de l'aménagement du territoire
Déposé le : 17 mai 2017
No CAT-150
Secrétaire :

ÉTUDE SUR LES TRAVERSES DE COURS D'EAU DANS LE CADRE DE LA CONSTRUCTION ET DE L'EXPLOITATION DES PIPELINES AU QUÉBEC

Préparé pour

Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles du Québec (MERN)

Préparé et soumis par:

Musandji Fuamba, Ph.D.
Professeur
Département des génies civil, géologique et des mines
Polytechnique Montréal

Vincenzo Silvestri, Ph.D.
Professeur
Département des génies civil, géologique et des mines
Polytechnique Montréal

Note de confidentialité et responsabilité

Ce rapport a été préparé par une équipe multidisciplinaire de Polytechnique Montréal comprenant le groupe GÉNIE EAU et le Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits procédés et services (CIRAIG). Le présent document a été réalisé pour le compte du gouvernement du Québec dans le cadre des évaluations environnementales stratégiques sur les hydrocarbures annoncées le 30 mai 2014. Les auteurs sont responsables du choix et de la présentation des faits. Les opinions exprimées dans ce document sont celles des auteurs et n'engagent aucunement le gouvernement du Québec.

Mise en garde : L'information provenant de la documentation publique du projet Oléoduc Energie Est qui était disponible à l'automne 2015 fut utilisée pour supporter cette analyse. Cette information est susceptible d'évoluer lors des prochains mois.

Avertissement

À l'exception des documents entièrement réalisés par le groupe GÉNIE EAU et le CIRAIG, comme le présent rapport, toute utilisation du nom du Groupe GÉNIE EAU, du CIRAIG ou de Polytechnique Montréal lors de communication destinée à une divulgation publique associée à ce projet et à ses résultats doit faire l'objet d'un consentement préalable écrit d'un représentant dûment mandaté du Groupe GÉNIE EAU et du CIRAIG ou de Polytechnique Montréal.

Équipe de travail

Réalisation de l'étude

Musandji Fuamba, Ph.D.

Professeur, Polytechnique Montréal
GÉNIE EAU

Vincenzo Silvestri, Ph.D.

Professeur, Polytechnique Montréal
GÉNIE EAU

Essoyéké Batchabani, Ph.D.

Post-Doctorant, Polytechnique Montréal
GÉNIE EAU

Christian Bravo-Jonard, B.Ing.

Auxiliaire de recherche, Polytechnique Montréal, GÉNIE EAU

Pierre-Olivier Roy, Ph.D.

Associé de recherche, Polytechnique Montréal, CIRAIG

Coordination du projet

Valérie Patreau, M.Sc.

Directrice des opérations, Polytechnique Montréal, CIRAIG

Table des matières

1 INTRODUCTION ET CADRE RÈGLEMENTAIRE RELATIF AU TRANSPORT DES HYDROCARBURES 12

1.1 Introduction 12

1.2 Cadre législatif et règlementaire relatif au transport des hydrocarbures par pipelines et mesures applicables spécifiquement aux traverses de cours d'eau 13

1.2.1 Cadre législatif et réglementaire pour la CONSTRUCTION des pipelines 13

1.2.2 Cadre législatif et réglementaire pour l'EXPLOITATION des pipelines 15

2 IDENTIFICATION DES COURS D'EAU POTENTIELLEMENT AFFECTÉS PAR LA TRAVERSE DE PIPELINES AU QUÉBEC ET IDENTIFICATION DES ENJEUX DE SÉCURITÉ ET DES CARACTÉRISTIQUES GÉOLOGIQUES DES ZONES DE TRAVERSE 18

2.1 Aperçu général des milieux humides et des cours d'eau du Québec selon leurs types ... 18

2.1.1 Milieux humides 19

2.1.2 Ruisseaux 20

2.1.3 Rivières 21

2.1.4 Fleuves 21

2.2 Description des infrastructures existantes ou projetées de transport des hydrocarbures par pipeline au Québec 21

2.2.1 Infrastructures existantes 21

2.2.2 Infrastructures projetées : Projet Oléoduc Énergie Est de TransCanada 23

2.3 Identification des cours d'eau potentiellement affectés par la traverse de pipelines au Québec 24

2.3.1 Cours d'eau critiques des projets existants 24

2.3.2 Cours d'eau critiques du projet futur Oléoduc Énergie Est 26

2.4 Caractéristiques géologiques, géotechniques et enjeux de sécurité des zones de traverse 27

2.4.1 Caractéristiques géologiques et géotechniques des zones de traverse 27

2.4.2 Enjeux de sécurité des zones de traverse 33

2.5 Conclusion 34

3 REVUE DES DIVERSES TECHNIQUES/TECHNOLOGIES EXISTANTES POUR LES TRAVERSES DE COURS D'EAU DANS LE CADRE DE LA CONSTRUCTION ET DE L'EXPLOITATION DES PIPELINES 36

3.1 Problématiques potentielles des traverses de cours d'eau 36

3.1.1 Crue d'inondation 36

3.1.2 Débit de rupture de barrage en amont 37

3.1.3 Rupture des berges du cours d'eau 37

3.1.4 Perturbation de l'écosystème aquatique 37

3.2 Description des techniques/technologies de traverses 38
3.2.1 Traverse aérienne 39
3.2.2 Traverse souterraine 39
3.3 Critères de choix d'une technique/technologie de traverse 61
3.3.1 Contraintes techniques 61
3.3.2 Sécurité environnementale et civile selon le type et la quantité d'hydrocarbure 62
3.3.3 Considérations économiques 62
3.3.4 Acceptabilité sociale 62
3.4 Risque de défaillance de chacune des techniques/technologies de traverse 62
3.4.1 Données historiques sur les défaillances: causes et conséquences selon la technique 62
3.4.2 Évaluation statistique des risques de défaillance pour chaque technique selon le site 63
3.5 Sélection d'une technique de traverse sur la base du risque 64
3.5.1 Risques liés à la construction 64
3.5.2 Risques encourus après la mise en opération de la conduite. 70
3.5.3 Coûts directs et indirects 70
3.5.4 Considérations dans la sélection des méthodes de franchissement 73
4 CONSÉQUENCES ENVIRONNEMENTALES ET MESURES POTENTIELLES DE PROTECTION ENVIRONNEMENTALE 74
4.1 Problématiques environnementales associées aux traverses de cours d'eau 74
4.2 Mesures de protection et de mitigations environnementales 79
4.2.1 Mesures de protection et mitigation environnementale 79
4.2.2 Impacts potentiels résiduels escomptés 82
5 PROCESSUS DE SÉLECTION MULTICRITÈRE DE LA MÉTHODE DE TRAVERSE DES COURS D'EAU 85
5.1.1 Choix des critères et pondérations 86
5.1.2 Évaluation de la performance des méthodes 88
5.1.3 Méthodes recommandées 108
6 APPLICATION AU PROJET OLÉODUC ÉNERGIE EST 110
6.1 Collecte de données 110
6.2 Application et comparaison des résultats avec les technologies prévues dans le projet Oléoduc Énergie Est 115
6.3 Problèmes géotechniques liés aux franchissements de divers cours d'eau au Québec (faisabilité des techniques proposées) 119
6.4 Conclusions partielles sur les techniques de traverses 127

6.5 Mise en perspective des problèmes environnementaux 128
6.5.1 Indicateur de la qualité de l'eau au Québec : IQBP 128
6.5.2 Vulnérabilité des cours d'eau : qualité de l'eau 129
6.5.3 Sensibilité de l'habitat du poisson 133
6.5.4 Déversement accidentel dans le fleuve Saint-Laurent 135
7 RECOMMANDATIONS SUR LES TRAVERSES DE COURS D'EAU DANS LE CADRE DE LA CONSTRUCTION ET DE L'EXPLOITATION DES PIPELINES AU QUÉBEC 137
7.1 Recommandations pour les techniques de construction 137
7.2 Recommandations pour les conséquences environnementales 138
8 CONCLUSION 140
9 RÉFÉRENCES 146

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Cours d'eau critiques des pipelines existants (gaz, pétrole et produits pétroliers) . 25

Tableau 2-2 : Cours d'eau critiques du projet Oléoduc Énergie Est (TransCanada, 2014a) 26

Tableau 3-1 : Techniques de construction de franchissement de cours d'eau par des pipelines (CFCEPC, 1999) 54

Tableau 3-2 : Considérations de risques pour les méthodes de franchissement des cours d'eau (CFCEPC, 1999) 65

Tableau 3-3 : Coûts relatifs des techniques de franchissement de cours d'eau (CFCEPC, 1999) .. 71

Tableau 3-4 : Impératifs économiques des méthodes de franchissement des cours d'eau (CFCEPC, 1999) 72

Tableau 3-5 : Considérations de sélection de technique de construction (CFCEPC, 1999) 73

Tableau 4-1 : Problématiques environnementales et conséquences potentielles associées aux traverses de cours d'eau 75

Tableau 4-2 : Évaluation qualitative des effets résiduels lors de la phase de construction (TransCanada, 2014a) 83

Tableau 5-1 : Critères regroupés par catégorie pour le choix d'une technique de traverse 86

Tableau 5-2 : Pondération des différents critères triés par niveau d'influence dans le choix d'une technique de traverse 87

Tableau 5-3 : Attribution des performances pour le critère C_1 89

Tableau 5-4 : Attribution des performances pour le critère C_2 90

Tableau 5-5 : Attribution des performances pour le critère C_3 91

Tableau 5-6 : Attribution des performances pour le critère C_4 92

Tableau 5-7 : Attribution des performances pour le critère C_5 93

Tableau 5-8 : Attribution des performances pour le critère C_6 94

Tableau 5-9 : Attribution des performances pour le critère C_7 95

Tableau 5-10 : Attribution des performances pour le critère C_8 96

Tableau 5-11 : Attribution des performances pour le critère C_9 97

Tableau 5-12 : Attribution des performances pour le critère C_{10} 98

Tableau 5-13 : Attribution des performances pour le critère C_{11} 99

Tableau 5-14 : Attribution des performances pour le critère C_{12} 100

Tableau 5-15 : Attribution des performances pour le critère C_{13} 102

Tableau 5-16 : Attribution des performances pour le critère C_{14} 103

Tableau 5-17 : Attribution des performances pour le critère C_{15} 104

Tableau 5-18 : Attribution des performances pour le critère C_{16} 105

Tableau 5-19 : Attribution des performances pour le critère C_{17} 106

Tableau 5-20 : Attribution des performances pour le critère C_{18} 107

Tableau 5-21 : Attribution des performances pour le critère C_{19} 108

Tableau 5-22 : Exemple de calcul de normalisation des performances..... 109

Tableau 6-1 : Valeurs des critères C_1 à C_{10} pour les traverses critiques du projet Oléoduc Énergie Est 111

Tableau 6-2 : Valeurs des critères C_{11} à C_{19} pour les traverses critiques du projet Oléoduc Énergie Est 113

Tableau 6-3 : Résultats de la somme pondérée pour les différentes méthodes de traverse à chaque site de l'étude de cas (1/3)..... 115

Tableau 6-4 : Résultats de la somme pondérée pour les différentes méthodes de traverse à chaque site de l'étude de cas (2/3)..... 116

Tableau 6-5 : Résultats de la somme pondérée pour les différentes méthodes de traverse à chaque site de l'étude de cas (3/3)..... 117

Tableau 6-6 : Comparaison entre les méthodes envisagées par le projet Oléoduc Énergie Est et les méthodes prédites par le modèle 118

Tableau 6-7 : Qualité à l'embouchure et à la tête des bassins versants d'importantes rivières du Québec potentiellement traversées par le pipeline prévu au projet Oléoduc Énergie Est 130

Tableau 6-8 : Vulnérabilité des habitats des poissons dans certains cours d'eau du Québec potentiellement traversés par le pipeline prévu au projet Oléoduc Énergie Est (TransCanada, 2014a)..... 134

Tableau 8-1 : Récapitulatif des constats et analyse pour les cours d'eau étudiés relativement au projet Oléoduc Énergie Est de TransCanada..... 142

Liste des figures

Figure 2-1 : Composantes d'un cours d'eau (Brownsburg-Chatham, 2015) 18

Figure 2-2 : Régions hydrographiques du Québec (CEHQ, 2015) 19

Figure 2-3 : Milieux humides du Québec (MDDELCC, 2015d) 20

Figure 2-4 : Réseau existant de transport des hydrocarbures par pipelines pour les compagnies membres d'Info-Excavation au Québec (Info-Excavation, 2015b) 22

Figure 2-5 : Tracé de la canalisation 9 (Enbridge, 2012) 23

Figure 2-6 : Tracé provisoire du projet Oléoduc Énergie Est (TransCanada, 2015a) 24

Figure 2-7 : Oléoduc Énergie Est au Québec (Golder Associates, 2015a) 27

Figure 2-8 : Argiles glaciaires et répartition des glissements de terrain au Québec (Chagnon, 1968) 28

Figure 2-9 : Zones à haut risque de glissement de la mer de Champlain (Quinn *et coll.*, 2007) 28

Figure 2-10 : Distance de rétrogression versus nombre de stabilité (D'après Mitchell et Markell, 1974) 30

Figure 3-1 : Mouvement vertical du lit d'un cours d'eau suite à l'érosion (CEPA, 2013) 36

Figure 3-2 : Mouvement horizontal du lit d'un cours d'eau suite à l'érosion (CEPA, 2013) 37

Figure 3-3 : Déplacement du lit d'un cours d'eau suite aux inondations (CEPA, 2013) 37

Figure 3-4 : Technique de construction - Charrue défonceuse type (TERA, 1998; CFCEPC, 1999) 40

Figure 3-5 : Technique de construction - tranchée ouverte type de petits cours d'eau (TERA, 1998; CFCEPC, 1999) 41

Figure 3-6 : Technique de construction - tranchée ouverte type de grands cours d'eau (TERA, 1998; CFCEPC, 1999) 42

Figure 3-7 : Technique de construction - Pelle à benne trainante (TCPL, 1994; CFCEPC, 1999) 43

Figure 3-8 : Technique de construction - canal type (TERA, 1998; CFCEPC, 1999) 44

Figure 3-9 : Technique de construction - barrage et pompe types (TERA, 1998; CFCEPC, 1999) .. 45

Figure 3-10 : Dérivation de pompe à grand débit type (TERA, 1998; CFCEPC, 1999) 46

Figure 3-11 : Technique de construction - batardeaux à deux étages types (TERA, 1996; CFCEPC, 1999) 47

Figure 3-12 : Technique de construction - dérivation de canal type (TERA, 1996; CFCEPC, 1999) 48

Figure 3-13 : Technique de construction – forage ou perforation types (TERA, 1998; CFCEPC, 1999) 50

Figure 3-14 : Technique de construction – forage dirigé type (a) (ASCE, 1996; TERA, 1998; CFCEPC, 1999) 52

Figure 3-15 : Technique de construction – forage dirigé type (b) (ASCE, 1996; CFCEPC, 1999) 53

Figure 3-16 : Localisation des incidents liés à des pipelines régis par l'ONE, de janvier 2009 à mars 2011 (BVG, 2011) 63

Figure 6-1 : Exemple d'une courbe d'appréciation de la qualité de l'eau pour l'un des 10 critères potentiels de l'IQBP (Hébert, 1996). 129

Figure 6-2 : IQBP du fleuve Saint-Laurent (MDDEFP, 2012a) 133

Figure 6-3 : Index du risque environnemental suite à un déversement de pétrole brut dans l'estuaire et dans le golfe du Saint-Laurent (WSP Canada Inc, 2014) 136

Liste des abréviations et sigles

API	American Petroleum Institute
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BST	Bureau de la Sécurité des Transports du Canada
BVG	Bureau du Vérificateur Général du Canada
CA	Certificat d'Autorisation
CAPP	Canadian Association of Petroleum Producers
CEHQ	Centre d'Expertise Hydrique du Québec
CEPA	Canadian Energy Pipeline Association
CFCEPC	Comité de Franchissement des Cours d'Eau par des Pipelines au Canada
CGA	Canadian Gas Association
CIRAIG	Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services
CNRC	Conseil National de Recherches du Canada
CPEC	Canadian Pipeline Environment Committee
CSA	Canadian Standards Association
DDP	Détérioration, Destruction, ou Perturbation
DMT	Directional Microtunnel
EES	Évaluation Environnementale Stratégique
ERI	Environmental Risk Index
GÉNIE EAU	Groupe Expérimental et Numérique d'Ingénierie des Écoulements d'Eau
HDD	Horizontal Directional Drilling
IQBP	Indice de Qualité Bactériologique et Physico-chimique de l'eau
LHE	Ligne des Hautes Eaux
MDDELCC	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques
MDDEFP	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs
MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles du Québec
MRC	Municipalité Régionale de Comté
NTSB	National Transportation Safety Board
ONE	Office National de l'Énergie
OQLF	Office Québécois de la Langue Française
RBQ	Régie du Bâtiment du Québec
RNC	Ressources Naturelles Canada
RPT	Règlement de l'Office national de l'énergie sur les Pipelines Terrestres
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
TCPL	TransCanada PipeLines Limited
ULC	Underwriters Laboratories of Canada
US EPA	United States Environmental Protection Agency

1 Introduction et cadre règlementaire relatif au transport des hydrocarbures

1.1 Introduction

Dans le cadre du plan d'action gouvernemental du Québec sur les hydrocarbures, une évaluation environnementale stratégique (EES) globale est en cours sur l'ensemble de la filière des hydrocarbures. Au début de l'année 2015, le gouvernement a complété la première phase des travaux de l'EES qui consistait à réaliser un bilan des connaissances actuelles en matière d'hydrocarbures. Ce bilan a également permis d'identifier les études nécessaires pour approfondir les connaissances sur les enjeux relatifs à la mise en valeur et au transport des hydrocarbures. Pour ce faire, une étude sur les bonnes pratiques et/ou meilleures technologies pour la traverse de cours d'eau par les pipelines sur le territoire du Québec a été demandée. En effet, dans le contexte où, notamment, le projet Oléoduc Énergie Est prévoit la construction d'un nouveau pipeline traversant une partie du Québec méridional, différentes parties prenantes de ce projet ont soulevé des inquiétudes en ce qui concerne les impacts potentiels sur les cours d'eau. L'étude a été confiée à une équipe de scientifiques du GÉNIE EAU et du CIRAIG à l'École Polytechnique de Montréal afin d'évaluer les risques et conséquences potentielles associées aux traverses de cours d'eau dans le cadre de la construction et de l'exploitation des pipelines au Québec en se basant notamment sur le projet Oléoduc Énergie Est.

Le groupe GENIE EAU concentre ses recherches dans les domaines de la sécurité et de la rentabilité des eaux de surface et des infrastructures hydrauliques. Ses professeurs sont spécialisés entre autres en mécanique des fluides, hydraulique (des réseaux, des pipelines et des cours d'eau), hydrologie urbaine, modélisation hydrologique et hydraulique, gestion intégrée des ressources en eau, aménagements hydroélectriques, sécurité des barrages et réhabilitation des infrastructures. Les travaux du groupe sont plus spécifiquement orientés vers une meilleure connaissance des interactions entre les ouvrages et les écoulements, l'accroissement de la sécurité et productivité des installations hydrauliques, l'amélioration de la qualité des services en eau, l'étude des mécanismes de défaillance des infrastructures hydrauliques et la gestion des risques de ces mécanismes.

Le CIRAIG est un centre de recherche d'envergure internationale, constitué d'un réseau de chercheurs dont l'expertise gravite autour des outils du cycle de vie. Les activités du centre comprennent plusieurs projets de recherche fondamentale et appliquée dans divers secteurs dont l'énergie, la gestion des déchets, les pâtes et papier, les mines et métaux, les télécommunications, la gestion des infrastructures urbaines, les bâtiments verts et l'industrie chimique. Les activités de recherche du CIRAIG comprennent divers aspects méthodologiques de l'analyse du cycle de vie, notamment liés à la caractérisation des impacts, à l'analyse d'incertitude, au développement d'indicateurs environnementaux, économiques et sociaux, de même qu'au développement de bases de données spécifiques aux marchés canadiens et américains.

L'objectif de cette étude était de recenser les meilleures pratiques sur les traverses de cours d'eau par les pipelines et les impacts environnementaux susceptibles d'affecter les zones de traverses. Un tel exercice de recherche devant permettre :

- La localisation des divers cours d'eau et l'identification des enjeux de sécurité et des caractéristiques géologiques des zones de traverse :
  - les cours d'eau potentiellement affectés par les traverses de pipeline au Québec ;
  - les types de cours d'eau sous forme d'archétype, par exemple : les ruisseaux, les milieux humides, les rivières ou le fleuve ;

- les caractéristiques géologiques des zones de traverse.

- La revue des diverses techniques/technologies existantes pour les traverses de cours d'eau dans le cadre de la construction et de l'exploitation des pipelines :

  - les techniques/technologies disponibles ;
  - les éléments techniques critiques à considérer ;
  - les risques de défaillance de chacune des techniques/technologies.

  Cette revue a visé à corréler le risque de défaillance de chacune des techniques/technologies avec la géologie de la zone de traverse. Dans ce contexte, il a été primordial d'évaluer les meilleures pratiques pour les cours d'eau critiques et pour le fleuve Saint-Laurent, en considérant les critères de sécurité. Un parallèle a été fait avec les technologies prévues dans le projet Oléoduc Énergie Est.

- L'identification des conséquences environnementales et mesures potentielles de protection environnementale, visant à recenser les mesures d'atténuation et/ou de protection environnementale disponibles pour les divers cours d'eau recensés.

- L'établissement de recommandations sur les traverses de cours d'eau dans le cadre de la construction et de l'exploitation des pipelines au Québec.

L'étude constitue un survol de la littérature disponible (incluant les guides de bonnes pratiques industrielles et rapports d'ingénierie publics) dans le domaine des pipelines et ne peut être considérée comme étant exhaustive. Toutefois elle permet de faire une première évaluation des différents aspects techniques et environnementaux qui pourront être approfondis par la suite lors d'études spécifiques subséquentes.

1.2 Cadre législatif et règlementaire relatif au transport des hydrocarbures par pipelines et mesures applicables spécifiquement aux traverses de cours d'eau

Afin d'illustrer le contexte normatif pour la construction et l'exploitation des pipelines au Québec, les prochains paragraphes donnent un aperçu des cadres législatifs/réglementaires canadien et québécois.

1.2.1 Cadre législatif et réglementaire pour la CONSTRUCTION des pipelines

De manière générale, pour la construction de pipelines interprovinciaux (jusqu'à la cessation de l'exploitation), la juridiction canadienne s'applique, sous l'égide de l'ONE. Plusieurs particularités législatives/réglementaires s'appliquent aux constructions intra-provinciales québécoises. Ces particularités font en sorte que l'assujettissement aux différentes lois et règlements doit être analysée « cas par cas » pour la construction de pipelines en territoire québécois.

Au niveau canadien :

La Loi sur l'Office national de l'énergie

Les articles 48 (2) et 57 s'appliquent notamment :

> « 48 (2) L'Office peut, avec l'approbation du gouverneur en conseil, prendre des règlements concernant la conception, la construction, l'exploitation et la cessation d'exploitation d'un pipeline ainsi que, dans le cadre de ces opérations, la protection des biens et de l'environnement et la sécurité du public et du personnel de la compagnie. »

« 57. Constitue une condition du certificat l'observation des dispositions de la présente loi et de ses règlements en vigueur à la date de délivrance et par la suite, ainsi que des ordonnances prises ou rendues sous le régime de la présente loi. »

Le Règlement de l'Office national de l'énergie sur les pipelines terrestres (RPT)

Les articles 4(1) et 4(2) s'appliquent notamment :

« 4. (1) La compagnie qui conçoit, construit ou exploite un pipeline, ou en cesse l'exploitation, ou qui obtient ces services par contrat, doit veiller à ce que la conception, la construction, l'exploitation ou la cessation d'exploitation soient conformes aux dispositions applicables :

a) du présent règlement ;

b) de la norme CSA Z276, s'il s'agit d'un pipeline servant au transport du gaz naturel liquéfié ;

c) de la norme CSA Z341, s'il s'agit d'un pipeline servant au stockage souterrain d'hydrocarbures ;

d) de la norme CSA Z662, s'il s'agit d'un pipeline servant au transport d'hydrocarbures liquides ou gazeux ;

e) de la norme CSA Z246.1 pour tous les pipelines.

(2) Il est entendu que la compagnie doit veiller à ce que le pipeline soit conçu, construit et exploité, ou que son exploitation cesse, selon la conception, les exigences techniques, les programmes, les manuels, les procédures, les mesures et les plans établis et appliqués par elle conformément au présent règlement. »

Au niveau du Québec :

La Loi sur la qualité de l'environnement (LQE)

De manière générale, pour l'implantation de pipelines de petite longueur ou capacité, un certificat d'autorisation (CA) délivré par le Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MDDELCC) doit être obtenu, selon l'article 22 de la LQE.

Par ailleurs, la construction d'une installation de gazéification ou de liquéfaction du gaz naturel ou la construction d'un oléoduc d'une longueur de plus de 2 kilomètres dans une nouvelle emprise (à l'exception des conduites de transport de produits pétroliers placées sous une rue municipale) sont soumises au processus d'évaluation environnementale du MDDELCC.

Sont cependant exclues la construction d'un tel gazoduc s'il est installé dans une emprise existante servant aux mêmes fins, ainsi que l'installation de conduites de distribution de gaz de moins de 30 centimètres de diamètre conçues pour une pression inférieure à 4 000 kilopascals.

La Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune

Les franchissements secondaires de cours d'eau (pipelines de petite longueur ou capacité) sont aussi sujets à l'article 128.7 de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune. Si le projet a lieu dans une région boisée, l'autorisation en vertu de l'article 3 de la Loi sur les forêts doit être obtenue.

Le Code de construction et code de sécurité

À l'instar des autres juridictions canadiennes, les sociétés qui exploitent des pipelines au Québec le font conformément aux normes techniques de conception, de construction et d'opération de divers

organismes de normalisation reconnus dont l'Association canadienne de normalisation (CSA), l'American Petroleum Institute (API), l'American Society of Mechanical Engineers (ASME), l'American Society for Testing and Materials (ASTM), les Underwriters Laboratories of Canada (ULC) et le Conseil national de recherches du Canada (CNRC).

Au Québec, l'obligation de respecter ces normes techniques se fait habituellement au moyen de références dans les lois et règlements, notamment le *Code de construction* et le *Code de sécurité* qui sont sous la responsabilité de la Régie du Bâtiment du Québec (RBQ) pour les produits pétroliers (excluant le pétrole brut).

1.2.2 Cadre législatif et réglementaire pour l'EXPLOITATION des pipelines

L'exploitation des pipelines au Québec et au Canada est sous juridiction canadienne dans le cas des pipelines interprovinciaux.

Sur le territoire du Québec, le code de sécurité s'applique pour certains pipelines (sous la responsabilité de la RBQ), notamment pour ceux qui transportent du gaz naturel. Le transport de pétrole brut n'y est pas assujetti. Le code de sécurité fait notamment des références aux codes CSA. La combinaison des cadres législatifs/réglementaires canadien et québécois font en sorte que l'assujettissement aux différentes lois et règlements concernant l'exploitation des pipelines doit être analysée « cas par cas ».

Guides de bonnes pratiques basés sur la norme CSA Z662-15

Plusieurs guides de bonnes pratiques ont été rédigés d'après la norme CSA Z662-15, mentionnons à titre d'exemple les documents « Pipeline Associated Watercourse Crossings » par CEPA/CAPP/CGA et « Mitigation of Internal Corrosion in Oil Effluent Pipeline Systems » par CAPP. Ils prévoient, entre autres, que :

- Des vannes de sectionnement doivent être installées de chaque côté d'une traverse de cours d'eau majeur.
- Le pipeline doit être enseveli à une profondeur minimale de 1,2 mètre du sol dans le cas d'une excavation normale.
- En ce qui a trait à l'épaisseur de paroi des tuyaux, une attention particulière doit être portée aux caractéristiques physiques des traversées, comme la composition et la stabilité du lit et des rives, les vagues, les courants, l'affouillement, le débordement, le type et la densité du trafic sur l'eau, ainsi que d'autres facteurs qui peuvent avoir des effets défavorables. Des lests, des ballasts, des ancrages ou d'autres dispositifs doivent être utilisés pour maintenir les canalisations en place dans les conditions prévues de poussée et de mouvement des eaux.
- Les canalisations peuvent être mises en place par forage dirigé à l'horizontale si les conditions suivantes sont respectées :

  a) Une évaluation de la faisabilité visant à évaluer le caractère adéquat du sous-sol a été effectuée.

  b) La conception du trajet de forage tient compte de l'emplacement et du type des caractéristiques du sous-sol qui influent sur la mise en place.

c) Une évaluation visant à déterminer le risque de rejet accidentel de fluides de forage de l'anneau de forage a été effectuée et un plan d'atténuation approprié a été élaboré.

d) Pour les tuyaux en acier, les contraintes longitudinales au cours de la mise en place ne dépassent pas la limite d'élasticité minimale spécifiée du tube.

- Les traversées de cours d'eau doivent être conformes aux exigences suivantes :

a) Il faut faire attention de ne pas faire subir de contraintes excessives à la tuyauterie pendant la mise en place.

b) La tuyauterie doit être mise en place selon les dimensions figurant sur les plans, et de manière à assurer qu'aucun tronçon ne soit sans appui ou ne repose sur des objets pouvant endommager les tuyaux ou leurs revêtements.

c) Les canalisations traversant des cours d'eau (y compris les réseaux de drainage à ciel ouvert) qui peuvent être soumises à des dragages périodiques ou à d'autres travaux de construction doivent porter une signalisation conforme.

d) Les canalisations traversant des voies navigables à vocation commerciale doivent porter des écriteaux qui indiquent la présence d'une traversée de canalisation, y compris un avertissement tel que « Amarrage interdit »* et « Dragage interdit »*. Les dimensions de ces écriteaux doivent être fonction de la largeur de la traversée et des restrictions touchant la visibilité. *En anglais : « No Anchorage » et « No Dredging », respectivement.

Exigences du RPT

Entretien des pipelines

31. (1) La compagnie doit établir un manuel de sécurité en matière d'entretien et le soumettre à l'Office national de l'énergie lorsqu'il l'exige.

Programme de Gestion des situations d'urgence

32. (1) La compagnie établit, met en œuvre et maintient un programme de gestion des situations d'urgence qui permet de prévoir, de prévenir, de gérer et d'atténuer les conditions pouvant avoir une incidence négative sur les biens, l'environnement ou la sécurité des travailleurs ou du public, en présence d'une situation d'urgence.

Système de commande du pipeline

37. La compagnie doit établir et mettre sur pied un système de commande du pipeline qui :

a) comprend les installations et procédures servant à commander et à contrôler l'exploitation du pipeline ;

b) enregistre les données chronologiques de l'exploitation du pipeline, les messages et les alarmes pour rappel ;

c) comprend un système de détection de fuites qui, dans le cas des oléoducs, respecte les exigences de la norme CSA Z662, et tient compte de la complexité du pipeline, de son exploitation et des produits transportés**.**

Surveillance et contrôle

> 39. La compagnie doit établir un programme de surveillance et de contrôle visant à assurer la protection du pipeline, du public et de l'environnement.

Programme de protection de l'environnement

> 48. La compagnie établit, met en œuvre et maintient un programme de protection environnementale qui permet de prévoir, de prévenir, de gérer et d'atténuer les conditions pouvant avoir une incidence négative sur l'environnement.

Exigences des normes CSA

Les exploitants doivent patrouiller régulièrement leurs canalisations afin d'observer l'état de l'emprise et des alentours ainsi que les activités sur l'emprise et aux alentours susceptibles de nuire à la sécurité et au fonctionnement des canalisations.

Inspection interne

L'entrepreneur en inspection doit évaluer la qualité et l'exhaustivité des données enregistrées et informer l'exploitant de tout problème ainsi que des conséquences que peuvent avoir les données incomplètes ou dégradées sur la qualité du rapport d'inspection final. Après avoir pris en compte cette information, l'exploitant doit décider si l'on doit refaire passer le véhicule d'inspection après que la cause de la dégradation des données ait été établie et corrigée.

L'exploitant doit, en utilisant le rapport d'inspection présenté par l'entrepreneur en inspection, déterminer les imperfections dues à la corrosion qui, en raison de leurs dimensions, sont classées comme des défauts (voir l'article 10.10.2), en prenant en compte les tolérances d'erreurs dans les dimensions communiquées fondées sur les résultats d'inspection escomptés. La priorité doit être accordée à l'excavation de ces imperfections signalées, en prenant en compte leur gravité relative, leur accessibilité et les conséquences éventuelles d'une défaillance.

Les exploitants doivent documenter et mettre en œuvre les méthodes et les procédures utilisées pour effectuer les inspections, la mise à l'essai, les patrouilles et la surveillance.

Une attention particulière doit être portée aux éléments suivants :

a) les systèmes de protection cathodique ;

b) les systèmes et les dispositifs de surveillance de la corrosion ;

c) les méthodes et les dispositifs de détection des fuites ;

d) les dispositifs et les systèmes d'arrêt ;

e) les systèmes de régulation de la pression, les systèmes limiteurs de pression et les systèmes de décharge de la pression ;

f) les dimensions, l'emplacement et la position de fonctionnement des robinets du réseau de canalisations ;

g) les patrouilles ;

h) l'inspection de la tuyauterie hors sol aux fins de détection de la corrosion et d'autres types d'imperfections.

2 Identification des cours d'eau potentiellement affectés par la traverse de pipelines au Québec et identification des enjeux de sécurité et des caractéristiques géologiques des zones de traverse

Cette section vise à identifier les cours d'eau critiques ainsi que les enjeux de sécurité et environnementaux relatifs aux zones de traverse. La probabilité de défaillance des techniques de traverse et les conséquences qui en résultent étant fonction de l'importance du cours d'eau traversé, un aperçu général est fait dans un premier temps sur la classification des cours d'eau au Québec. Dans le but d'identifier les cours d'eau d'intérêt, la deuxième sous-section fournit une description sommaire des infrastructures existantes ou projetées de transport des hydrocarbures par pipeline au Québec. Étant donné que les caractéristiques géologiques des zones de traverse ont un rôle important dans les risques associés, elles sont intégrées dans l'analyse des enjeux de sécurité.

2.1 Aperçu général des milieux humides et des cours d'eau du Québec selon leurs types

Au sens de l'article 2.8 de la Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables (Gouvernement du Québec, 2014), l'expression « cours d'eau » correspond à toute masse d'eau qui s'écoule dans un lit avec un débit régulier ou intermittent, y compris un lit créé ou modifié par une intervention humaine à l'exception des fossés de voies publiques ou privées, des fossés mitoyens et des fossés de drainage. Le caractère de cours d'eau est attribué à la totalité du parcours, depuis la source jusqu'à l'embouchure (point de jonction). Un cours d'eau comprend un littoral et des rives délimités par la ligne des hautes eaux (LHE) (Figure 2-1). Cette dernière peut être délimitée grâce à plusieurs méthodes dont celles qui font appel à des critères botaniques ou la cote d'inondation d'une crue de récurrence de deux ans. La rive est la bande de terre qui borde le cours d'eau et qui s'étend vers l'intérieur des terres à partir de la LHE. Le littoral est la partie du cours d'eau qui s'étend à partir de la LHE vers le centre du plan d'eau (MDDELCC, 2015a).

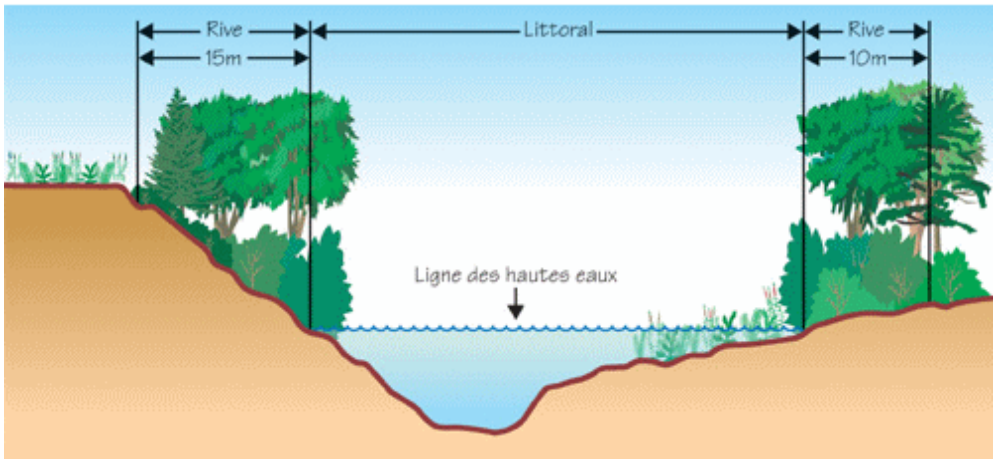


Figure 2-1 : Composantes d'un cours d'eau (Brownsburg-Chatham, 2015)

Pour situer chaque cours d'eau, il existe un système de classification du MDDELCC divisé en 13 régions hydrographiques (Figure 2-2).

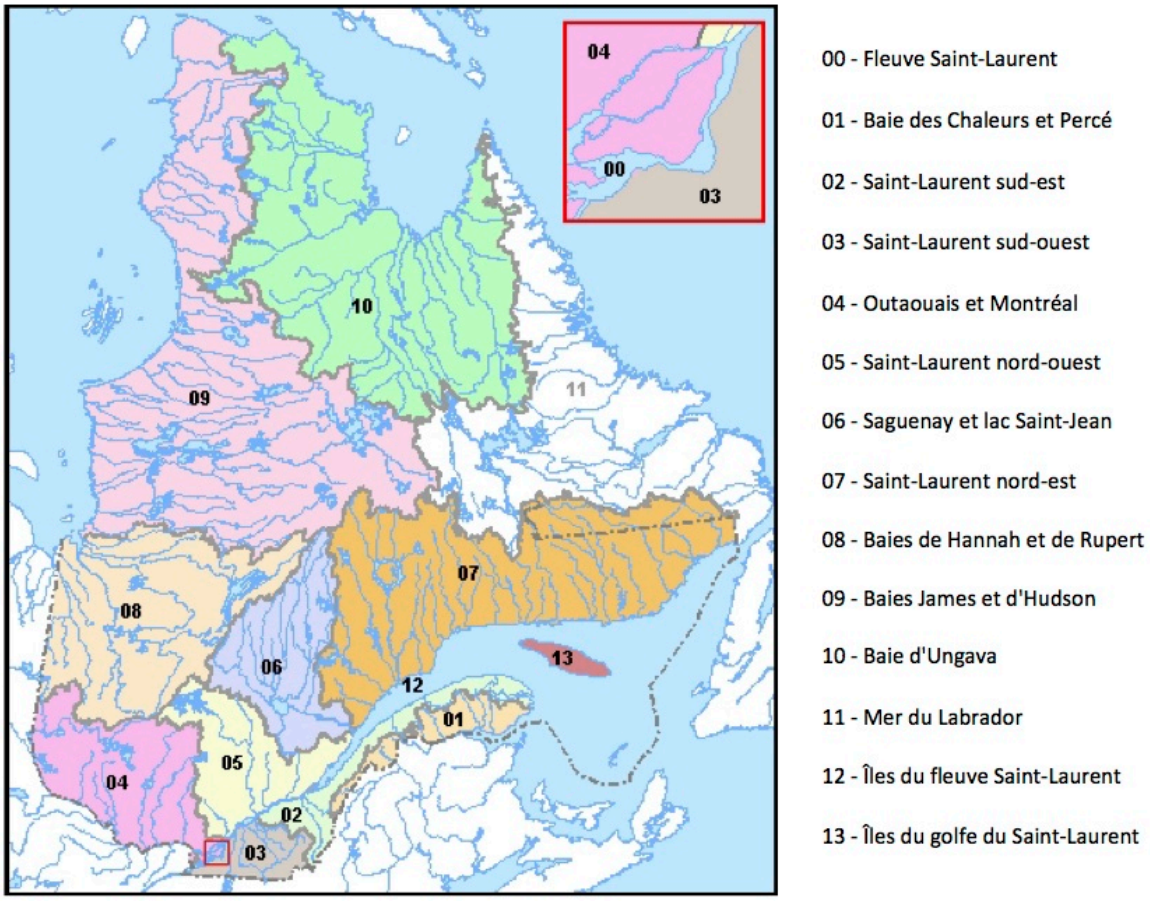


Figure 2-2 : Régions hydrographiques du Québec (CEHQ, 2015)

En fonction de l'importance et des caractéristiques du cours d'eau, on parlera de ruisseau, rivière ou fleuve. Ces catégories de cours d'eau sont définies dans les sections 2.1.2 à 2.1.4. Les milieux humides quant à eux sont définis dans la section 2.1.1.

2.1.1 Milieux humides

Il existe plusieurs définitions du terme milieu humide. Au Québec, la définition suivante est communément utilisée et acceptée : « *Les milieux humides regroupent l'ensemble des sites saturés d'eau ou inondés pendant une période suffisamment longue pour influencer, dans la mesure où elles sont présentes, les composantes sol ou végétation*. » (Couillard & Grondin, 1986). Ils sont de quatre grands types : étangs, marais, marécages et tourbières.

La carte des milieux humides du Québec est présentée à la Figure 2-3. Qu'elles soient boisées ou non, les tourbières représentent 80 % de ces milieux humides. Plus de 10 % du Québec est couvert par des milieux humides qui sont distribués de façon hétérogène sur le territoire. Les milieux humides sont très abondants en Abitibi-Témiscamingue où tous les bassins versants en sont couverts à au moins 50 %, voire jusqu'à 95 %. En Gaspésie, par contre, les milieux humides sont naturellement plus rares, en raison

du paysage montagneux que forment les Appalaches. Leur proportion dans les bassins versants de cette région ne dépasse pas les 5 % (MDDELCC, 2015d). Les rives et les îles du Saint-Laurent comptent de grandes superficies de milieux humides, principalement des marais et des marécages. Le tronçon entre Cornwall et Trois-Pistoles présentait en 2000-2002 environ 29 000 hectares de marais et marécages, dont plus de la moitié était concentrée au lac Saint-Pierre (Jean & Létourneau, 2011).

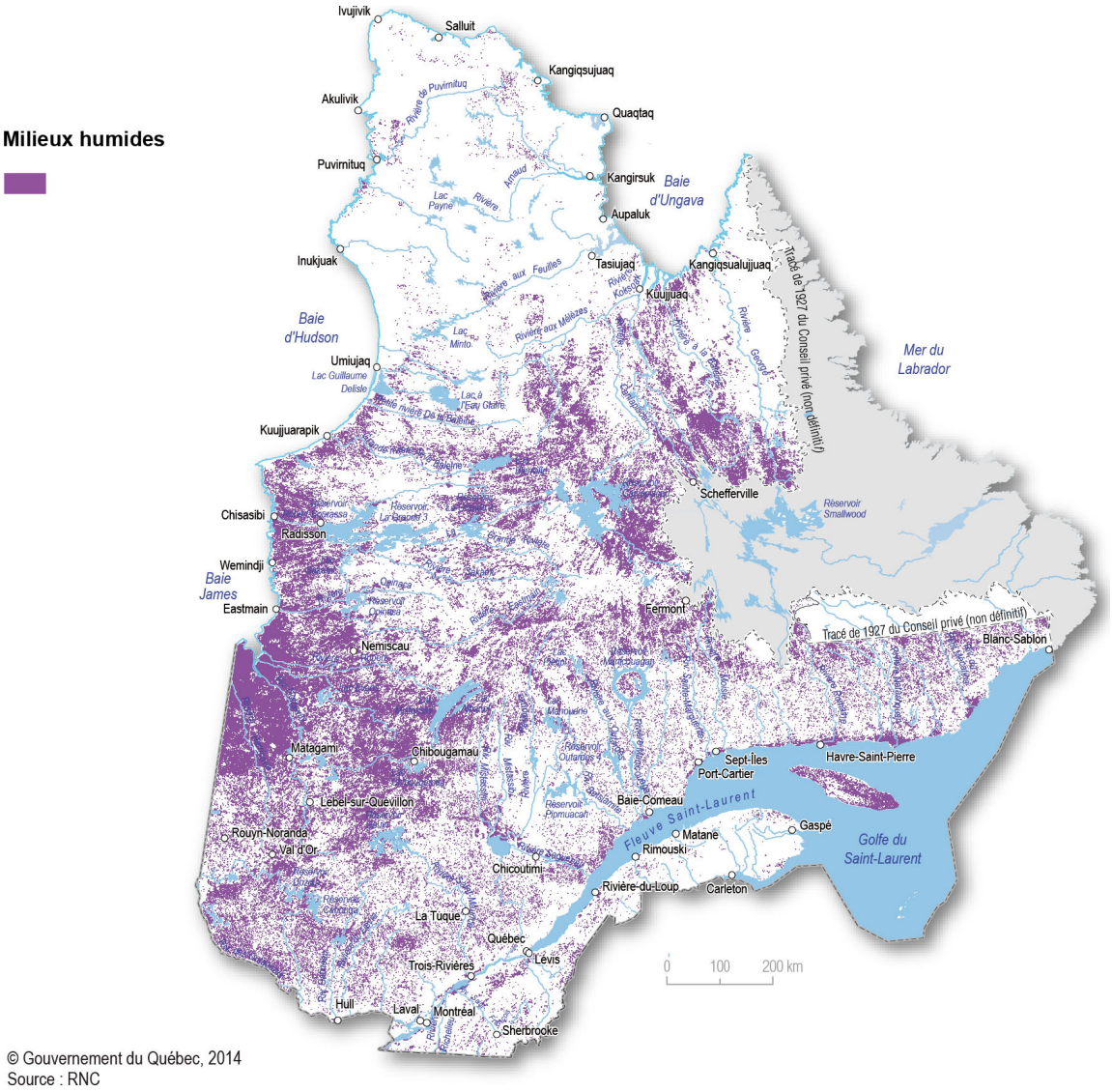


Figure 2-3 : Milieux humides du Québec (MDDELCC, 2015d)

2.1.2 Ruisseaux

Par définition, le ruisseau est un très petit cours d'eau (Commission de Toponymie du Québec, 2015). Par conséquent, les paramètres suivants d'un ruisseau sont faibles : profondeur, largeur, longueur, débit. Les ruisseaux se trouvent à la tête des bassins versants et sont souvent alimentés par des sources d'eau naturelles. Ils reçoivent les eaux des bassins versants de petite taille et sont affluents d'une rivière, d'un lac ou d'un étang.

2.1.3 Rivières

Une rivière est un cours d'eau d'importance variable recevant des tributaires et se déversant dans une nappe d'eau ou un cours d'eau plus important (Commission de Toponymie du Québec, 2015). Parmi les grandes rivières du Québec, une douzaine draine des territoires d'une superficie de plus de 40 000 km^2. À elle seule, la Grande Rivière située dans la région hydrographique de la Baie-James et d'Hudson (Figure 2-2), recueille les eaux d'un dixième de la superficie du Québec. Son bassin versant, de près de 175 000 km^2, équivaut à plus de 5,5 fois la superficie de la péninsule gaspésienne (MDDELCC, 2015d).

2.1.4 Fleuves

Un fleuve est un cours d'eau important qui se jette dans la mer (Commission de Toponymie du Québec, 2015). Par conséquent, le fleuve est à débit élevé, long et avec plusieurs affluents notamment des rivières. Le seul fleuve du Québec est le fleuve Saint-Laurent. Il relie les Grands Lacs à l'océan Atlantique et reçoit les eaux de plus du tiers de l'ensemble du territoire québécois. De fleuve à la sortie des Grands Lacs, il devient un estuaire à la hauteur de l'île d'Orléans. Il s'élargit ensuite à la hauteur de Pointe-des-Monts, à 1 780 km de sa source, pour devenir un golfe, véritable mer intérieure d'environ 240 000 km^2, dont quelque 137 000 km^2 à l'intérieur des limites du Québec. L'important débit du Saint-Laurent le classe au premier rang des cours d'eau du Canada, au troisième rang à l'échelle de l'Amérique du Nord et au sixième rang à l'échelle mondiale (Environnement Canada, 2015).

2.2 Description des infrastructures existantes ou projetées de transport des hydrocarbures par pipeline au Québec

Le terme hydrocarbure désigne notamment le pétrole et le gaz naturel, ainsi que les produits pétroliers. Lorsqu'il transporte le pétrole, le pipeline prend le nom d'oléoduc contrairement au terme gazoduc qui est utilisé pour le cas du transport du gaz naturel (OQLF, 2014). Un oléoduc ou un gazoduc peut traverser un cours d'eau dans son parcours. Cette section présente le réseau d'infrastructures au Québec incluant ces deux types de pipelines.

2.2.1 Infrastructures existantes

Au Québec, les principaux transporteurs d'hydrocarbures par pipelines souterrains sont : TransCanada, Gaz Métro, Pipelines Montréal, Pipelines Trans-Nord, Gazoduc TransQuébec & Maritimes, Enbridge, Niagara Gas Transmission et Corporation Champion Pipe Line. L'ensemble des réseaux de transport souterrains de ces transporteurs traverse plus de 250 municipalités (Info-Excavation, 2015a). La province est traversée par 12 353 km de pipelines de transport et de distribution provinciaux (RNC, 2015). La Figure 2-4 montre le réseau existant de transport des hydrocarbures par pipeline pour les compagnies membres d'Info-Excavation au Québec.

Figure 2-4 : Réseau existant de transport des hydrocarbures par pipelines pour les compagnies membres d'Info-Excavation au Québec (Info-Excavation, 2015b)

La canalisation existante d'Enbridge (Figure 2-4) a récemment fait l'objet d'un projet d'inversion du sens du pétrole transporté dans un tronçon de cette canalisation (ce projet est complété, la compagnie a reçu l'autorisation de remise en service et les premières livraisons sont survenues en décembre 2015).

La canalisation 9 (Figure 2-5), exploitée par la société canadienne Enbridge depuis 1976, est un pipeline existant d'un diamètre nominal de 750 mm (30 po) et d'une capacité actuelle de transport de pétrole brut d'environ 240 000 barils par jour qui relie Sarnia, en Ontario, et Montréal, au Québec (la capacité peut être augmentée à 300 000 barils par jour grâce à l'utilisation d'agent réducteur de frottement). Initialement, le sens d'écoulement allait d'ouest en est, mais il a été inversé en 1998 du fait que les importations de pétrole provenant de régions telles que l'Afrique occidentale et le Moyen-Orient étaient devenues plus économiques. Le prix actualisé du pétrole brut de l'Ouest canadien étant plus faible que celui du pétrole étranger, Enbridge a donc présenté une demande visant à inverser de nouveau le sens d'écoulement de la canalisation 9. Un plan en deux phases a été élaboré pour l'inversion: canalisation 9A (200 km entre Sarnia (ON) et North Westover (ON)) et canalisation 9B (639 km entre North Westover (ON) et Montréal (QC)). Les travaux pour la canalisation 9A se sont achevés en novembre 2013, et le flux de ce tronçon de la canalisation 9 s'écoule maintenant en sens inverse (Enbridge, 2015). La portion québécoise de la canalisation 9B est de 109 km et traverse les régions de la Montérégie, des Laurentides, de Lanaudière, de Laval et de Montréal (Gouvernement du Québec, 2013). Le projet est complété, la compagnie a reçu l'autorisation de remise en service et les premières livraisons sont survenues en décembre 2015.

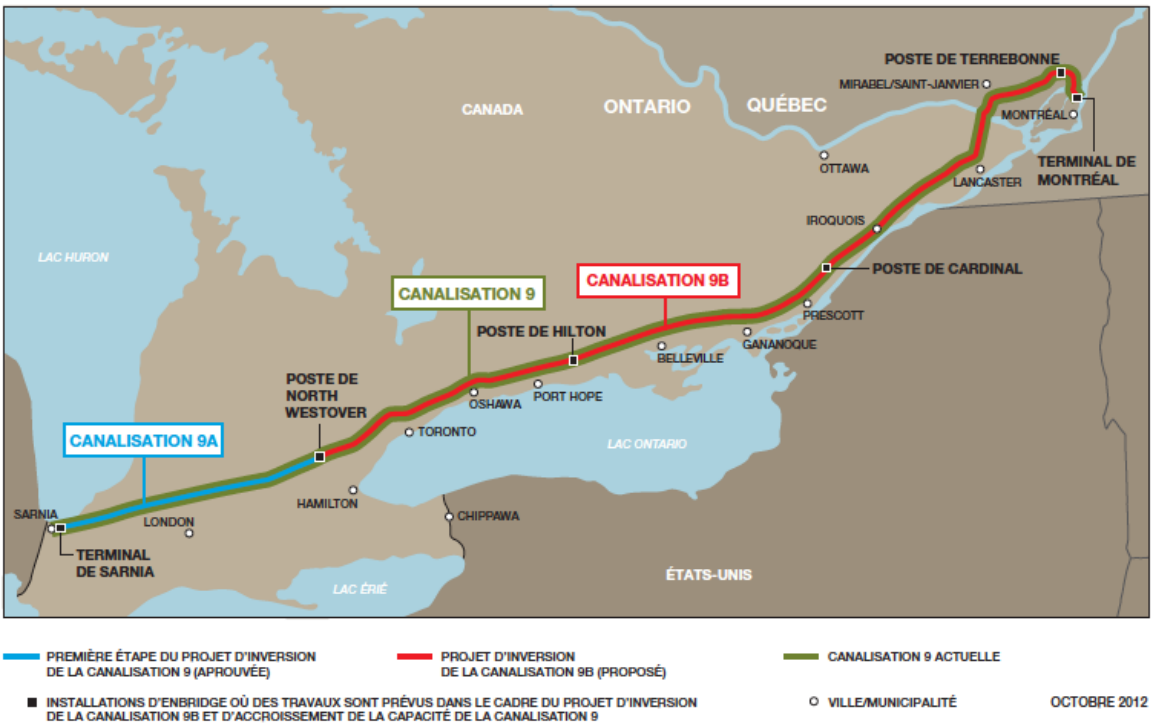


Figure 2-5 : Tracé de la canalisation 9 (Enbridge, 2012)

2.2.2 Infrastructures projetées : Projet Oléoduc Énergie Est de TransCanada

Un projet de pipeline, dont au moins une partie du tracé passe par le Québec, est actuellement en cours de développement afin d'acheminer le pétrole provenant de l'ouest du Canada vers l'est du pays. Il s'agit du « Projet Oléoduc Énergie Est » de TransCanada, qui impliquerait la construction d'un nouveau pipeline d'envergure sur le territoire québécois. Cette section donne un survol sommaire de ce projet.

Le projet Oléoduc Énergie Est (Figure 2-6) d'une longueur de 4 600 kilomètres propose une solution pour acheminer environ 1,1 million de barils de pétrole brut par jour de l'Alberta et de la Saskatchewan vers des raffineries et un terminal portuaire de l'Est du Canada (TransCanada, 2015c).

Le projet comporte trois grands volets :

a) La conversion d'un gazoduc existant en oléoduc sur près de 3 000 km.
b) La construction de nouveaux oléoducs en Alberta, en Saskatchewan, au Manitoba, dans l'est de l'Ontario, au Québec et au Nouveau-Brunswick, qui seront reliés à la conduite convertie. Le tronçon du Québec consiste à la construction d'environ 700 km de nouvelles canalisations.
c) La construction d'installations connexes telles que des stations de pompage et des terminaux de stockage nécessaires pour transporter le pétrole brut de l'Alberta vers le Québec et le Nouveau-Brunswick, y compris des installations maritimes pour faciliter l'accès à d'autres marchés par navires-citernes (le scénario de terminal maritime au Québec a été abandonné par TransCanada le 5 novembre 2015).

Figure 2-6 : Tracé provisoire du projet Oléoduc Énergie Est (TransCanada, 2015a)

2.3 Identification des cours d'eau potentiellement affectés par la traverse de pipelines au Québec

Les cours d'eau d'intérêt dans cette section sont ceux dont la ligne des hautes eaux a une largeur d'au moins 20 m. Ce chiffre a été retenu après l'analyse des documents suivants: Canadian Association of Petroleum Producers (CAPP), Canadian Energy Pipeline Association (CEPA) et Canadian Gas Association (CGA) (2012) et "Énergie Est Volume 2: Biophysical Effects Assessment, Part D: Québec". Ces cours d'eau sont dits critiques dans le cadre du présent projet. Bien entendu, le terme critique peut être aussi défini sur la base de critères autres que la largeur du cours d'eau. Cependant, le présent rapport ne focalise que sur la définition basée sur la largeur du cours d'eau.

2.3.1 Cours d'eau critiques des projets existants

Pour l'identification de ces cours d'eau, la Figure 2-4 a été géoréférencée et importée sur Google Maps. Les cours d'eau ont été ainsi identifiés directement sur la carte. Par conséquent, la liste reste approximative et n'est pas exhaustive. Elle ne contient que certains cours d'eau traversés par au moins un pipeline. D'autres cours d'eau éligibles ont probablement échappé à l'identification. Les cours d'eau identifiés, au nombre de 32, sont reportés au Tableau 2-1. Il est à noter que ces cours d'eau sont souvent traversés par plusieurs pipelines (gaz naturel et/ou pétrole) à des endroits distincts.

Tableau 2-1 : Cours d'eau critiques des pipelines existants (gaz, pétrole et produits pétroliers)

Numéro	Nom du cours d'eau	Municipalité	Région administrative
1	rivière Délisles	Vaudreuil-Soulanges	Montérégie
2	rivière Beaudette	Vaudreuil-Soulanges	Montérégie
3	rivière Rigaud	Vaudreuil-Soulanges	Montérégie
4	rivière Richelieu	Haut-Richelieu	Montérégie
5	rivière Châteauguay	Roussillon	Montérégie
6	rivière Saint-Louis	Beauharnois-Salaberry	Montérégie
7	rivière Yamaska	Maskoutains	Montérégie
8	ruisseau Fraser	Argenteuil	Laurentides
9	rivière des Outaouais	Saint-André-d'Argenteuil	Laurentides
10	rivière des Mille-îles	Thérèse-De Blainville	Laurentides
11	rivière du Nord	Argenteuil	Laurentides
12	rivière des Prairies	Laval	Laval
13	rivière Thompson	Abitibi	Abitibi-Témiscamingue
14	rivière Harricana	La Vallée-de-l'Or	Abitibi-Témiscamingue
15	rivière des Mille-Îles	Terrebonne	Lanaudière
16	rivière Bayonne	Saint-Félix-de-Valois	Lanaudière
17	rivière Chicot	Saint-Cuthbert	Lanaudière
18	rivière Mascouche	Les Moulins	Lanaudière
19	rivière l'Assomption	L'Assomption	Lanaudière
20	rivière Batiscan	Batiscan	Mauricie
21	rivière Sainte-Anne	Sainte-Anne-de-la-Pérade	Mauricie
22	rivière Maskinongé	Maskinongé	Mauricie
23	rivière du Loup	Yamachiche	Mauricie
24	rivière Saint-Maurice	Trois-Rivières	Mauricie
25	rivière Jacques-Cartier	Donnacona	Capitale-Nationale
26	fleuve Saint-Laurent	Saint-Augustin-de-Desmaures	Capitale-Nationale
27	rivière Chicoutimi	Saguenay	Saguenay-Lac-Saint-Jean
28	rivière aux sables	Saguenay	Saguenay-Lac-Saint-Jean
29	rivière Chaudière	Nouvelle-Beauce	Chaudière-Appalaches
30	rivière Beaurivage	Lévis	Chaudière-Appalaches
31	rivière Bécancour	Bécancour	Centre-du-Québec
32	rivière Saint-François	Drummondville	Centre-du-Québec

2.3.2 Cours d'eau critiques du projet futur Oléoduc Énergie Est

Le projet Oléoduc Énergie Est à lui seul parcourrait une grande partie du Québec et affecterait une vingtaine de rivières critiques ainsi que le fleuve Saint-Laurent. Son cheminement le long des rives du fleuve Saint-Laurent (embouchure d'une grande partie des rivières du Québec) fait qu'il rencontre des rivières de grande importance. Les cours d'eau critiques de ce projet sont reportés au Tableau 2-2.

Tableau 2-2 : Cours d'eau critiques du projet Oléoduc Énergie Est (TransCanada, 2014a)

Numéro	Nom du cours d'eau	Municipalité	Région administrative
1	rivière des Outaouais	Saint-André-d'Argenteuil	Laurentides
2	rivière des Prairies	Laval	Laval
3	rivière des Mille-Îles	Terrebonne	Lanaudière
4	rivière L'Assomption	L'Assomption	Lanaudière
5	rivière Bayonne	Saint-Félix-de-Valois	Lanaudière
6	rivière Chicot	Saint-Cuthbert	Lanaudière
7	rivière Maskinongé	Maskinongé	Mauricie
8	rivière du Loup	Yamachiche	Mauricie
9	rivière Saint-Maurice	Trois-Rivières	Mauricie
10	rivière Batiscan	Batiscan	Mauricie
11	rivière Sainte-Anne	Sainte-Anne-de-la-Pérade	Mauricie
12	rivière Jacques-Cartier	Donnacona	Capitale-Nationale
13	fleuve Saint-Laurent	Saint-Augustin-de-Desmaures	Capitale-Nationale
14	rivière Beaurivage	Lévis	Chaudière-Appalaches
15	rivière Chaudière	Saint-Lambert-de-Lauzon	Chaudière-Appalaches
16	rivière Etchemin	Lévis	Chaudière-Appalaches
17	rivière Etchemin Valero	Lévis	Chaudière-Appalaches
18	rivière du Sud	Saint-Raphaël	Chaudière-Appalaches
19	rivière Bras Saint-Nicolas	Lamartine	Chaudière-Appalaches
20	rivière Trois Saumons	Saint-Aubert	Chaudière-Appalaches
21	rivière Grande Rivière	Saint-Roch-des-Aulnaies	Chaudière-Appalaches
22	rivière Ouelle	Sainte-Anne-de-la-Pocatière	Bas-Saint-Laurent
23	rivière du Loup	Saint-Bruno-de-Kamouraska	Bas-Saint-Laurent
24	rivière Madawaska	Saint-Jean-de-la-Lande	Bas-Saint-Laurent

2.4 Caractéristiques géologiques, géotechniques et enjeux de sécurité des zones de traverse

Cette section concerne les caractéristiques et les enjeux propres au projet Oléoduc Énergie Est. Il est à noter que les enjeux discutés ne sont pas exhaustifs mais font partie des plus importants.

2.4.1 Caractéristiques géologiques et géotechniques des zones de traverse

2.4.1.1 Géologie des basses terres du St-Laurent

En superposant le tracé projeté du projet Oléoduc Énergie Est au Québec (Figure 2-7) sur la carte topographique de la province, il apparait que le premier tronçon, compris entre la frontière de l'Ontario et la zone située immédiatement à l'est de Lévis, traverse les basses terres du Saint-Laurent. Les dépôts de sols se trouvant dans cette région ont été formés dans les dépressions laissées par le glacier Laurentide qui reculait et qui couvrait l'est du Canada, il y a 14 000 ans (couleur beige sur la carte). L'ancienne mer de Champlain a ensuite envahi la dépression laissée par le retrait du glacier. Elle a existé pendant environ 2 500 ans, entre 12 500 et 10 000 ans BP (« before present »). Elle a envahi la vallée actuelle du Saint-Laurent, à partir du golfe, lorsque les vestiges du glacier qui formait un barrage ont fondu ou cédé près de la ville de Québec.

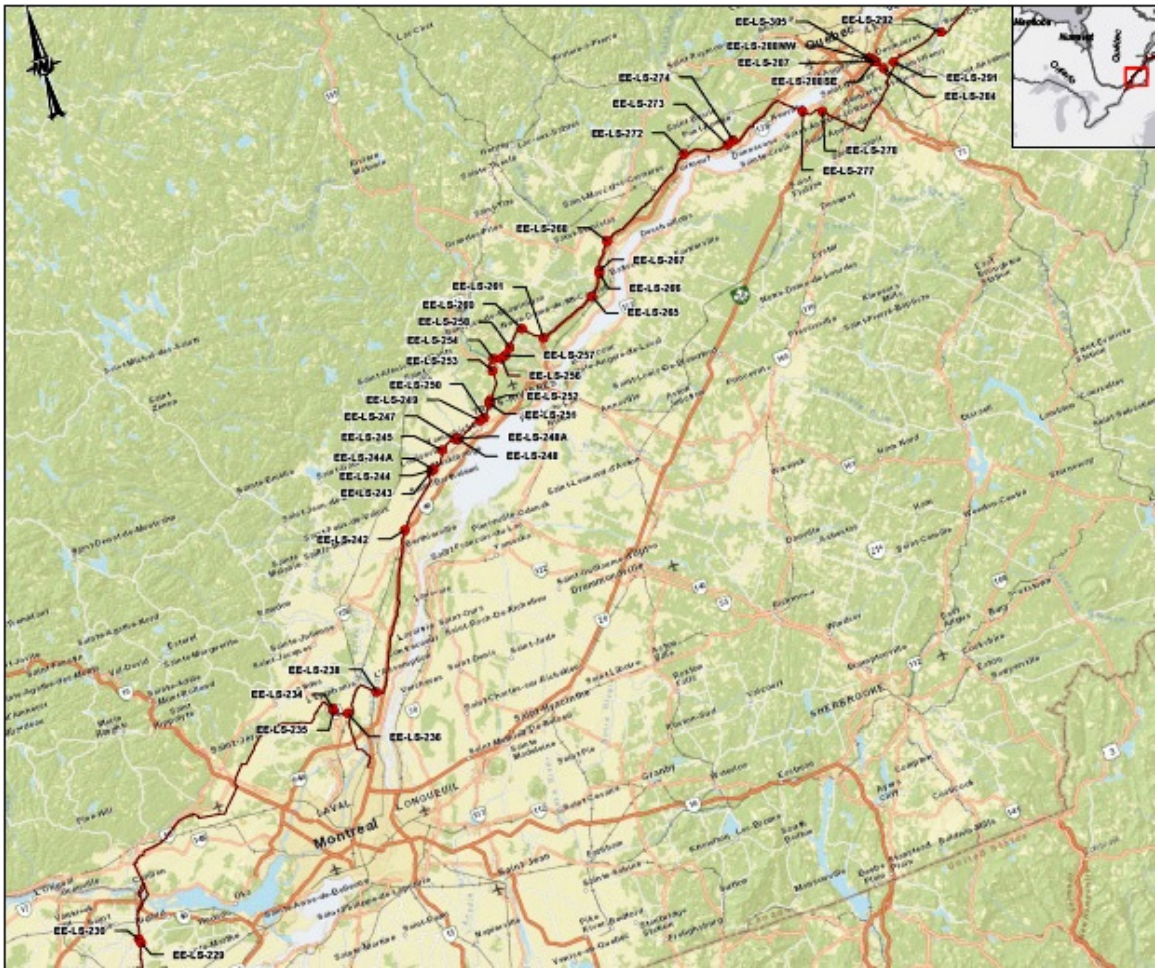


Figure 2-7 : Oléoduc Énergie Est au Québec (Golder Associates, 2015a)

Les Figure 2-8 et Figure 2-9 donnent un aperçu de l'étendue de la mer de Champlain et montrent la répartition géographique des glissements de terrain qui ont affecté les talus des vallées creusées par les différents affluents du fleuve Saint-Laurent.

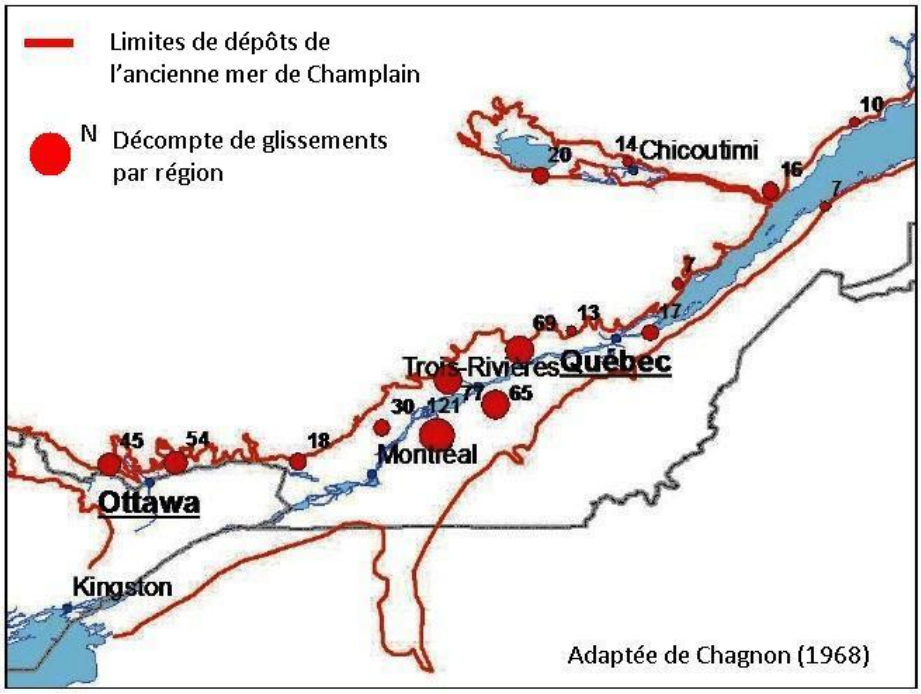


Figure 2-8 : Argiles glaciaires et répartition des glissements de terrain au Québec (Chagnon, 1968)

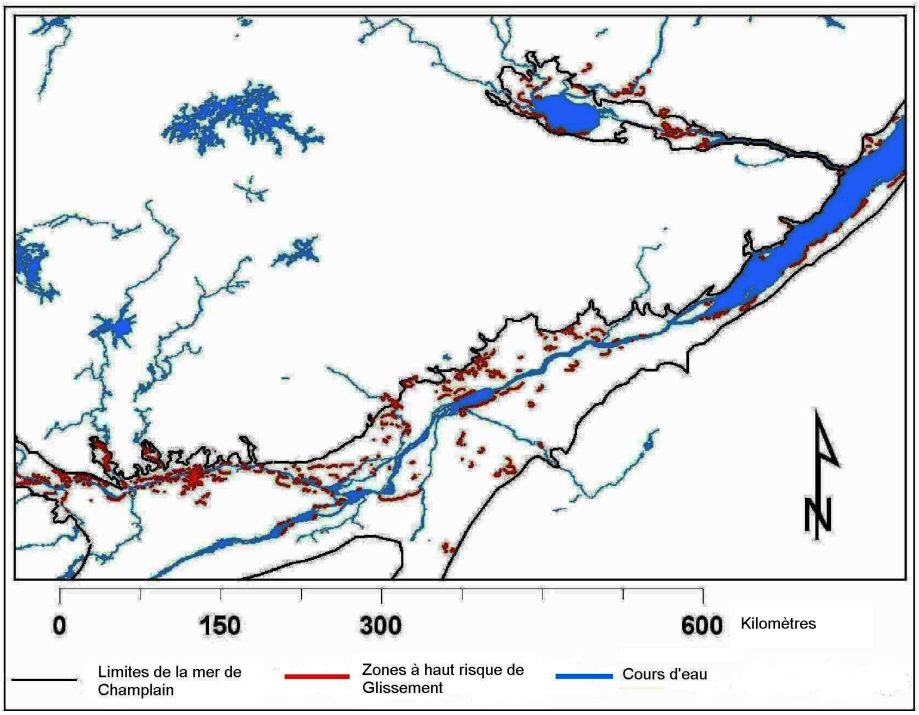


Figure 2-9 : Zones à haut risque de glissement de la mer de Champlain (Quinn *et coll.*, 2007)

La mer de Champlain demeura assez salée jusqu'à ce que le rebondissement de la surface du continent (causé par la disparition du glacier) permit le soulèvement des dépôts de sols et de leur émergence. Comme la sédimentation des sols charriés par les cours d'eau dans la mer de Champlain s'est produite dans une eau saumâtre, il est généralement admis que les sols argileux, constitués de particules très fines de roches broyées, ont acquis une structure très ouverte, contenant beaucoup d'eau. Cette structure qui est tenue ensemble par diverses liaisons physiques et chimiques demeure stable en autant qu'il n'y ait pas de perturbation. Ces derniers peuvent résulter soit de l'action humaine (ex. : excavations, remblayages) soit par des événements naturels (ex. : tremblements de terre, glissements de terrain). Une fois la structure modifiée, le sol argileux perd une partie de sa résistance et, dans certains cas, le sol peut se comporter comme un liquide visqueux. On parle alors d'argiles sensibles ou très sensibles. La sensibilité est définie comme le rapport de la résistance du sol dans son état naturel, avant remaniement, et la résistance après remaniement. Plus ce rapport est élevé, plus le sol est sensible.

Il est à noter que les sols argileux, au moment de leur sédimentation dans la mer, étaient peu sensibles. L'une des causes principales de la sensibilité actuelle des dépôts argileux est due à la diminution de la concentration en sels qui s'est produite depuis leur sédimentation. Cette diminution est causée par le lessivage continu des dépôts argileux résultant des eaux de percolation.

D'autre part, la nature des sols déposés dans la mer de Champlain est variée. Dans les parties centrales des basses terres, l'on rencontre des dépôts uniformes et très épais de sols argileux. Toutefois, près des bords de la mer, les sols sont très stratifiés et l'on rencontre souvent des couches superposées de sable, silt et gravier.

Comme les cours d'eau ont creusé des vallées plus ou moins profondes, l'inclinaison des talus est souvent très prononcée. Lorsque la hauteur et l'inclinaison des talus deviennent critiques, des glissements de terrain peuvent se déclencher, surtout en périodes de rechargement des nappes phréatiques et, aussi, à la suite de tremblements de terre.

Comme l'oléoduc traverserait un grand nombre de cours d'eau, dont certains sont très critiques en raison d'anciens glissements ou de glissements actifs sur leurs berges, il sera nécessaire d'adopter des méthodes de franchissement qui évitent de causer des impacts sur la stabilité présente et future des rives.

À l'est de la Ville de Québec, sur la rive sud du Saint-Laurent, le deuxième segment proposé du pipeline prévu dans le cadre du projet Oléoduc Énergie Est ferait transition avec un couvert de till jusqu'à Rivière-du-Loup environ, là où l'oléoduc pénètrerait dans la région géologique des Appalaches. Il est à noter que près de la ville de Rivière-du-Loup, l'oléoduc pourrait traverser des dépôts marins à grains fins (argile et silt argileux). Pour la partie restante du Bas-Saint-Laurent, l'oléoduc serait localisé dans la région physiographique des Appalaches et on s'attend à ce que les conditions de sol consistent en un socle rocheux peu profond, recouvert d'une mince couche de till glaciaire et de quelques zones de roc affleurant en surface (Golder Associates, 2014a).

2.4.1.2 Glissements de terrain dans les argiles sensibles des basses terres du St-Laurent

1. Glissements de talus naturels en bordure de cours d'eau

Les argiles sensibles des basses terres du St-Laurent, déposées dans l'ancienne mer Champlain, sont caractérisées par des propriétés géotechniques particulières qui affectent négativement les activités de planification et de construction. Par exemple, la prédisposition de ces sols à subir des coulées d'argile est bien connue. Déjà en 1968, Chagnon avait préparé un inventaire détaillé des nombreux glissements

de terrain qui se sont produits au Québec. Ces travaux avaient indiqué que les glissements étaient concentrés dans certaines régions données. LaRochelle et coll. (1970) ont étendu l'étude de Chagnon (1968). Ces auteurs ont montré des coïncidences remarquables entre la concentration des glissements et l'existence de vallées dans le socle rocheux sous-jacent aux dépôts d'argile. Les études ont révélé que des conditions d'écoulement particulières (c'est-à-dire, un gradient d'écoulement vers le bas dans la partie supérieure des pentes et un gradient vers le haut avec pressions artésiennes à la base des pentes) produisent un lessivage des sels dans le liquide interstitiel, ce qui donne lieu en une diminution de la résistance et une augmentation de la sensibilité de l'argile (voir aussi Lefebvre et LaRochelle, 1974). Comme la diminution de la résistance est beaucoup plus importante pour les sols remaniés, c'est-à-dire, affectés par les glissements, que pour les matériaux intacts (Leroueil et LeBihan, 1983), de simples ruptures de talus rotationnels peuvent se transformer en glissements rétrogressifs ou en coulées argileuses.

Mitchell et Markell (1974) ont complété une analyse de 41 glissements par l'étude de photographies aériennes, des travaux de chantier et de laboratoire, ainsi que la consultation des rapports géotechniques. Leurs études ont montré que les glissements de terrain peuvent être généralement classés en glissements rotationnels simples, glissements rotationnels rétrogressifs ou coulées argileuses. Une coulée implique l'extrusion de sol sensible en état non drainé (c'est-à-dire, à teneur en eau constante) et consiste en un écoulement fluide et visqueux qui ne se développe que lorsque le nombre de stabilité $N_s = \gamma H / S_u$ du matériau du talus, est supérieur à 6 dans la zone de glissement. Le paramètre S_u représente la résistance au cisaillement non drainé du sol, γ est le poids volumique du sol, et H est la hauteur initiale du talus. La Figure 2-10 ci-dessous donne une indication de la distance de rétrogression[1] en fonction du nombre de stabilité. Il est évident que dans certains cas, la distance de rétrogression peut atteindre et dépasser le kilomètre.

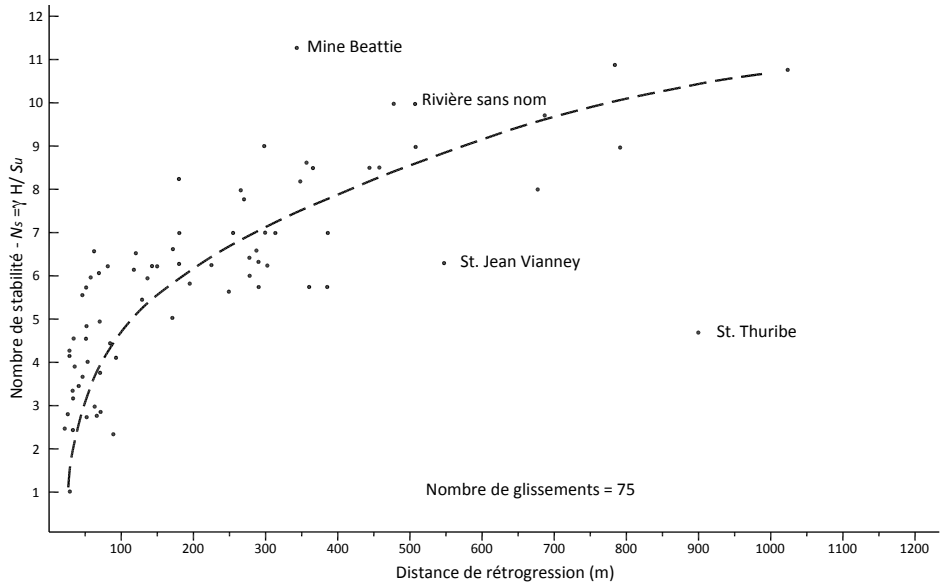


Figure 2-10 : Distance de rétrogression versus nombre de stabilité (D'après Mitchell et Markell, 1974)

Les principaux facteurs déclencheurs des glissements de terrain sont les suivantes : a) les conditions météorologiques, b) l'érosion par la rivière, c) les séismes, et d) l'activité humaine.

[1] La distance de rétrogression est la distance maximale affectée par le glissement

En ce qui concerne les conditions météorologiques, seules des précipitations soutenues peuvent augmenter les pressions d'eau interstitielles en profondeur et favoriser des ruptures profondes dans les sols argileux homogènes dont l'épaisseur est de plusieurs dizaines de mètres (Demers et coll., 1999). Par ailleurs, les fortes précipitations peuvent aussi augmenter le débit des cours d'eau qui érodent alors la base des talus argileux, provoquant ainsi des ruptures.

En ce qui a trait à l'érosion par un cours d'eau, celle-ci entraîne la dégradation progressive de la stabilité d'un talus, par son travail de sape incessant et répétitif (Lamontagne et coll., 2007). La modification de la géométrie du talus qui en résulte augmente les forces déstabilisatrices et diminue le coefficient de sécurité de la pente, aggravant ainsi les conditions de stabilité.

En ce qui concerne les séismes, Lamontagne et coll. (2007) ont analysé des glissements de terrain survenus le long d'un talus argileux de la rivière Champlain à Sainte-Geneviève-de-Batiscan. Ils ont conclu que le séisme du 25 octobre 1870 a été probablement l'un des facteurs déclencheurs des glissements de terrain, qui se sont produits dans les jours suivants. Cependant, les précipitations importantes, et l'érosion de la berge ont été considérées comme étant aussi des facteurs déclencheurs concomitants.

Enfin, les activités humaines telles que le remblayage de matériaux dans la partie supérieure d'un talus, l'excavation au bas des pentes, ainsi que le déboisement du talus, peuvent engendrer, à plus ou moins long terme, des glissements de terrain.

Tel que mentionné ci-haut, l'érosion d'un cours d'eau au bas d'un talus en modifie sa géométrie, ce qui peut résulter en un glissement de terrain. Souvent, ce type de glissement est très localisé et est de type rotationnel. Cependant, dans certaines conditions, le premier glissement, en déstabilisant le talus, peut engendrer des glissements rétrogressifs (Mitchell et Markell, 1974 ; Carson, 1977, Lebuis et coll., 1983), lesquels peuvent reculer sur plusieurs centaines de mètres et ainsi affecter un territoire important adjacent au cours d'eau. Si le sol impliqué est très sensible, il peut se liquéfier, entrainant la formation de coulées argileuses, et les débris peuvent se déplacer sur de grandes distances (Locat et coll., 2008). En effet, selon Tavenas et coll. (1983), un des éléments facilitant le développement de glissements rétrogressifs importants est que les débris puissent se remanier suffisamment de façon à s'évacuer de la zone de départ, laissant l'escarpement arrière sans appui dans des conditions instables.

2. Glissements de terrain pouvant être causés par la construction d'un oléoduc sur les talus argileux des cours d'eau.

Mise à part la modification géométrique des talus par l'empilement de matériaux excavés sur la crête des pentes et l'excavation au bas des talus qui sont connues comme représentant des facteurs favorisant le développement de glissements de terrain, il existe plusieurs autres facteurs d'importance pouvant déclencher des glissements de terrain lors de la construction d'un oléoduc. Ils varient selon la technologie choisie pour franchir le cours d'eau.

a) Tranchée

Toute tranchée ouverte dans un talus argileux, qu'elle soit perpendiculaire ou parallèle à la berge est une cause d'instabilité. À cet effet, si le maître d'œuvre décide de franchir le cours d'eau par la méthode de tranchée, il est recommandé, en premier lieu que la traverse se fasse le plus perpendiculairement possible au cours d'eau. Il faut éviter à tout prix que des segments de la tranchée soient excavés dans les berges parallèlement au cours d'eau. Cette dernière façon augmente considérablement le risque de développement de glissements de terrain. En deuxième lieu, il faut s'assurer que les matériaux excavés

dans le lit de la rivière ne viennent pas rétrécir le cours d'eau, de façon à augmenter le débit et accroître l'érosion subséquente des berges. D'autre part, le constructeur doit mettre en place des moyens de stabilisation des berges lors de ces travaux.

b) Forage dirigé

Concernant la méthode de franchissement des cours d'eau par le forage dirigé dans les sols argileux, il est indiqué dans les documents fournis par le projet Oléoduc Energie Est que les points d'entrée et de sortie des forages sont très éloignés des talus des berges des rivières. Bien que cette méthode minimise les effets aggravants causés par le forage et l'emploi de coulis sous pression sur la stabilité des talus, il n'en demeure pas moins que si la profondeur des trous de forage est insuffisante, il pourra se produire de la fracturation hydraulique dans le dépôt argileux. Ce phénomène entraine une diminution du coefficient de sécurité du talus, et ce sans compter les problèmes d'ordre environnemental dus à la contamination du milieu par la perte du coulis de forage. D'autre part, la perforation des agiles sensibles dans le voisinage immédiat des talus va causer un remaniement de l'argile et une perte partielle de sa résistance. Dans les cas extrêmes, le sol peut alors se liquéfier. Ce phénomène entraîne aussi une baisse des conditions de stabilité des talus.

En ce qui a trait à l'emploi de la technique des forages dirigés soit dans les sols granulaires contenant des cailloux et des blocs, ou bien dans le roc fracturé, cette méthode peut s'avérer problématique. En effet, des problèmes de guidage, d'infiltration d'eau, d'effondrement du trou de forage, et de perte de fluide peuvent survenir, rendant cette méthode très inefficace. Le risque lié à la fracturation hydraulique est très important lorsque l'épaisseur de mort terrain est faible. Ainsi, le danger d'induire des fissures dans un roc de faible résistance ou déjà fracturé pourrait causer la perte de fluides au pied des talus, à l'interface entre le sol argileux et le roc, et déclencher des glissements de terrain.

Il est donc recommandé que l'évaluation des pressions des coulis de forage et les volumes injectés soient surveillés constamment, afin de s'assurer que les risques liés à la fracturation hydraulique des dépôts argileux sont sous contrôle.

c) Forage horizontal par percussion, par poussée, et par tarière ou vis sans fin.

Ces techniques sont utilisées pour de courtes distances, c'est-à-dire, pour le franchissement de petits cours d'eau. Ces méthodes nécessitent l'excavation d'un puits de départ et d'un puits d'arrivée. En ce qui concerne la première méthode (forage horizontal par percussion), cette technique est surtout utilisée pour des conduites de petit diamètre. Pour la deuxième méthode (forage horizontal par poussée), comme la conduite projetée est de grand diamètre, cette technique peut être utilisée. Cependant, il sera nécessaire d'évacuer les sols de l'intérieur de la conduite. L'emploi de coulis pressurisé le long de la paroi extérieure de la conduite permet de faciliter son avancement. La troisième méthode (forage horizontal par tarière) représente aussi une bonne technique.

Il est recommandé que les parois des puits d'accès soient étayées adéquatement pour éviter des ruptures et des accidents de travail. Comme l'excavation des puits d'accès se fait habituellement près des crêtes des talus, il est aussi recommandé de tenir compte de l'influence des travaux d'excavation sur la stabilité des talus.

3. Glissements de terrain pouvant se produire après la construction de l'oléoduc

Comme indiqué dans la première partie de cette section, de nombreux glissements se sont produits (et se produiront) sur les talus argileux qui bordent les berges des cours d'eau des basses terres du St-Laurent.

Avant le début de la construction de l'oléoduc projeté, il est recommandé que le maître d'œuvre procède aux études géotechniques sur la stabilité des talus des cours d'eau traversés. Ces études devront débuter en premier lieu par l'inspection des lieux, de part et d'autre des traverses futures. La consultation de photographies aériennes est aussi recommandée. En deuxième lieu, des études géotechniques poussées, comportant la prise d'échantillons, et la réalisation d'essais de résistance sur place (essais au scissomètre et au piézocone) et en laboratoire, devront aussi être complétées. Une attention particulière devra être apportée aux conditions hydrogéologiques. Enfin, des études de stabilité à court et à long terme devront être effectuées pour évaluer la stabilité des talus.

Si les résultats des études de stabilité montrent que les coefficients de sécurité des talus sont insuffisants, la mise en place de mesures pour améliorer la stabilité des pentes argileuses sera à prévoir. Ce sera le rôle des consultants géotechniques de faire des recommandations sur les meilleures méthodes visant à éviter le développement de glissements de terrain qui pourrait compromettre l'intégrité de l'oléoduc.

Dans les endroits les plus critiques, il est aussi recommandé de faire un suivi des talus argileux au moyen soit d'inspections visuelles et aériennes, soit de levées géodésiques, ou encore d'inclinomètres pour évaluer les mouvements en profondeur des sols. L'emploi de piézomètres et de repères de surface installés sur les talus pourrait apporter une aide supplémentaire.

4. Techniques générales d'atténuation des glissements pour les traverses à haut risque

Les techniques les plus utilisées sont les suivantes :

- Minimiser le remaniement des sols et la profondeur des excavations lors des travaux dans les talus des cours d'eau.
- Réduire l'érosion au bas des pentes par l'emploi de moyens de protection (perrés, gabions, etc.)
- Ne pas empiler les sols excavés sur la crête des talus. Les sols excavés devraient être transportés à une distance minimale de la crête égale à deux fois la hauteur des talus.
- Ne pas excaver des tranchées parallèlement aux berges, au pied des talus et dans les pentes.
- Améliorer l'écoulement superficiel de l'eau près des talus. Employer des tranchées drainantes au des éperons drainants pour réduire les pressions d'eau dans les talus argileux.
- Éviter de traverser des zones de glissements actifs ou dormants. Lorsqu'il est nécessaire de traverser ces zones, il est recommandé d'employer des matériaux de remblai perméables et déformables pouvant permettre certains déplacements. Toutefois, en autant que possible, il est recommandé de déplacer l'axe de l'oléoduc, si celui-ci doit traverser des zones sujettes aux glissements rétrogressifs et aux coulées argileuses.

2.4.2 Enjeux de sécurité des zones de traverse

Plusieurs enjeux de sécurité se posent pour le projet Oléoduc Énergie Est, notamment par rapport au risque d'inondations, à la présence de barrages en amont des traverses ou à l'instabilité des berges des cours d'eau traversés.

2.4.2.1 Par rapport à l'inondation

Plusieurs traverses de rivières présentent une large plaine inondable avec des terrasses, signes d'érosion active. C'est le cas par exemple de la rivière Saint-Maurice (800 m), la rivière Sainte-Anne (250 - 650 m), la rivière Jacques-Cartier (250 m), la rivière Portneuf (250 m), et la rivière Ouelle (270 m) (Golder Associates, 2014b). Ces inondations, lorsqu'elles surviennent, remettent en cause l'intégrité du pipeline en accentuant l'érosion du lit et présentent même la possibilité d'une migration du chenal.

2.4.2.2 Par rapport à une rupture de barrage en amont

Des barrages existants se trouvent à une distance plus ou moins faible en amont de certaines traverses : rivière des Outaouais (1,65 km), rivière du Sud (4,2 km), rivière Saint-Maurice (6 km), rivière Jacques-Cartier (10 km), rivière des Prairies (13,14 km), et rivière Madawaska (grand barrage à 14 km). Il existe par ailleurs une retenue d'eau sur la rive droite en crête de la vallée à 200 - 300 m en amont de la traversée de la rivière Etchemin (Golder Associates, 2014b). En cas de rupture d'un barrage en amont d'une traverse, la zone en aval du barrage se trouverait inondée et le pipeline pourrait être directement menacé.

2.4.2.3 Par rapport à l'instabilité du lit et des berges du cours d'eau

De grandes pentes sont souvent responsables de vitesses d'écoulement importantes et par conséquent d'érosion du lit du cours d'eau. Dans le cas des traverses critiques du projet Oléoduc Énergie Est, les pentes du canal varient de 0,03 % (rivière Saint-Maurice) à 10,9 % (rivière Trois-Saumons). Une érosion et une déposition active sont présentes au niveau de plusieurs traverses de rivières telles que : rivière Saint-Maurice, rivière Batiscan, rivière Sainte-Anne (0,21 %), rivière Jacques-Cartier (0,38 %), rivière Etchemin (0,03 %), rivière du Sud (0,47 %), rivière Bras Saint-Nicolas (0,47 %) et rivière Trois-Saumons (10,9 %) (Golder Associates, 2014b). La profondeur d'enfouissement du pipeline suppose que le fond de la rivière est fixe, ce qui n'est pas le cas avec toutes les dynamiques d'érosion/déposition. L'instabilité du lit et des berges de cours d'eau pourrait affecter directement l'intégrité du pipeline.

2.5 Conclusion

Un tracé de pipeline au Québec mérite une attention particulière dans les cas suivants :

- Lorsqu'il longe l'une des rives du fleuve Saint-Laurent et plus particulièrement la rive Nord ;
- Lorsqu'il traverse le fleuve Saint-Laurent ;
- Quand le pipeline est d'un grand diamètre ou transporte un débit important.

En effet, dans l'un ou l'autre de ces cas, la vulnérabilité du pipeline vis-à-vis des défaillances est importante et l'impact d'une éventuelle défaillance est considérable.

Si le maître d'œuvre décide de franchir le cours d'eau par la méthode de tranchée, il est recommandé :

- Que la traverse se fasse le plus perpendiculairement possible au cours d'eau ;
- De s'assurer que les matériaux excavés dans le lit de la rivière ne viennent pas rétrécir le cours d'eau, de façon à augmenter le débit et accroître l'érosion subséquente des berges ;
- De mettre en place des moyens de stabilisation des berges lors de ces travaux.

Si le maître d'œuvre décide de franchir le cours d'eau par la méthode de forage dirigé, Il est recommandé que l'évaluation des pressions des coulis de forage et les volumes injectés soient surveillés constamment, afin de s'assurer que les risques liés à la fracturation hydraulique des dépôts argileux soient sous contrôle.

Pour le forage horizontal par percussion, par poussée, et par tarière ou vis sans fin, il est recommandé:

- Que les parois des puits d'accès soient étayées adéquatement pour éviter des ruptures et des accidents de travail ;
- De tenir compte des travaux d'excavation sur la stabilité des talus.

Avant le début de la construction de l'oléoduc projeté, il est recommandé :

- Que le maître d'œuvre procède aux études géotechniques sur la stabilité des talus des cours d'eau traversés ;
- Si les résultats des études de stabilité montrent que les coefficients de sécurité des talus sont insuffisants, prévoir la mise en place de mesures pour améliorer la stabilité des pentes argileuses ;
- Dans les endroits les plus critiques, faire un suivi des talus argileux au moyen soit d'inspections visuelles et aériennes, soit de levées géodésiques, ou encore d'inclinomètres pour évaluer les mouvements en profondeur des sols. L'emploi de piézomètres et de repères de surface installés sur les talus peut apporter une aide supplémentaire.

3 Revue des diverses techniques/technologies existantes pour les traverses de cours d'eau dans le cadre de la construction et de l'exploitation des pipelines

Cette section vise à fournir un processus de sélection d'une méthode de traverse de cours d'eau par les pipelines. Pour ce faire, une revue est faite sur les techniques existantes et les critères de choix. Ensuite, une analyse du risque de défaillance de chaque technique de traverse est réalisée. La section commence par une introduction sur les différentes problématiques reliées aux traverses de cours d'eau.

3.1 Problématiques potentielles des traverses de cours d'eau

Le pipeline rencontre souvent sur son trajet des cours d'eau qu'il doit franchir pour pouvoir poursuivre son trajet. Une telle traverse est problématique d'autant plus qu'un cours d'eau est un milieu sensible et dynamique. De ce fait, la sécurité de la conduite ainsi que celle du cours d'eau et de son environnement sont dépendantes de la technique utilisée.

3.1.1 Crue d'inondation

Une crue d'inondation peut entraîner d'importants changements dans la charge sédimentaire d'un cours d'eau ainsi que des changements dans son lit. Les quantités d'eau et de sédiments augmentent considérablement et d'autres débris tels que le bois peuvent aussi être transportés. La façon dont l'eau, les sédiments et les débris se déplacent en aval détermine comment le lit du cours d'eau se développe et change. Au fil du temps, il est normal d'observer une érosion des berges, un déplacement latéral du lit ainsi qu'une modification de son élévation, avec érosion ou dépôt de sable et/ou de gravier. Ce sont ces changements qui peuvent créer des risques d'exposition de la conduite et un potentiel d'endommagement de celle-ci. Les risques hydrotechniques résultant de problèmes de stabilité des lits de cours d'eau peuvent être classés selon le type de mouvement du chenal. Une méthode commune de catégorisation délimite ces risques en trois types à savoir : (1) mouvement vertical du lit (Figure 3-1) ; (2) mouvement horizontal du lit (Figure 3-2) ; (3) déplacement du lit (Figure 3-3) (CEPA, 2013). Le pipeline peut être menacé dans les trois cas de figure.

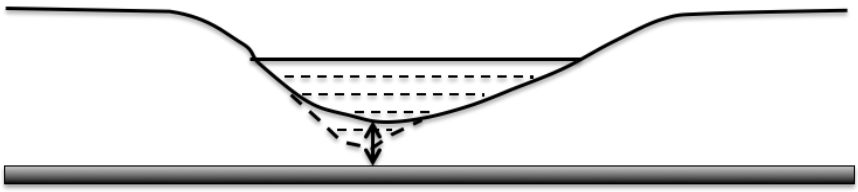


Figure 3-1 : Mouvement vertical du lit d'un cours d'eau suite à l'érosion (CEPA, 2013)

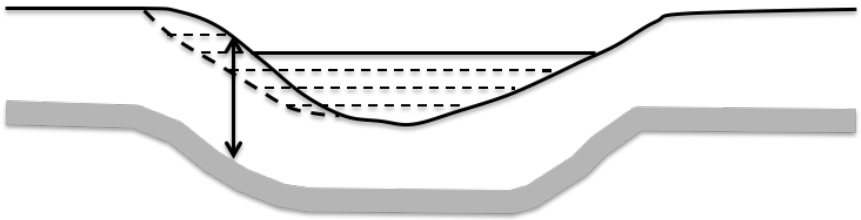


Figure 3-2 : Mouvement horizontal du lit d'un cours d'eau suite à l'érosion (CEPA, 2013)

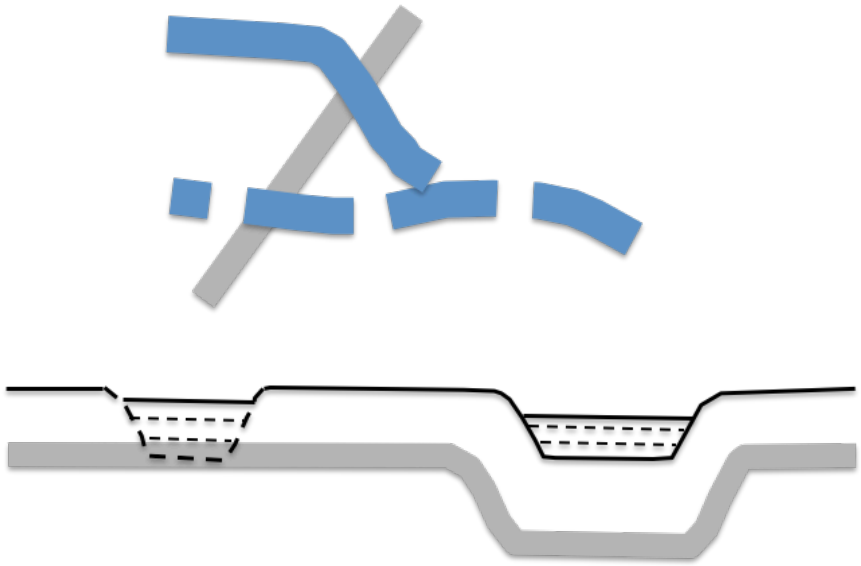


Figure 3-3 : Déplacement du lit d'un cours d'eau suite aux inondations (CEPA, 2013)

3.1.2 Débit de rupture de barrage en amont

Une rupture de barrage en amont d'une traverse de cours d'eau aura comme conséquence une inondation en aval du barrage notamment au niveau de la zone de traverse. Les risques auxquels s'expose la conduite seront donc de même type que ceux abordés dans la section 3.1.1. L'ampleur de ces risques dépend évidemment de la taille du réservoir de stockage en amont du barrage ainsi que la distance qui sépare le barrage de la zone de traverse.

3.1.3 Rupture des berges du cours d'eau

Une rupture des berges du cours d'eau augmente le risque d'exposition de la conduite et peut même occasionner un bris de cette dernière si la rupture a lieu dans la zone de traverse. Si elle a lieu en amont de la traverse, la grande quantité de sédiments ou de débris qu'elle va introduire dans le cours d'eau aura des effets d'érosion ou de dépôt de débris en aval notamment au niveau de la zone de traverse. Cette situation peut ainsi changer le lit du cours d'eau et mettre en cause l'intégrité de la conduite.

3.1.4 Perturbation de l'écosystème aquatique

Certaines techniques de traverses peuvent impliquer des travaux dans le lit du cours d'eau. Ce dernier abrite tout un écosystème, notamment des poissons. Généralement, le jeune poisson doit se déplacer de l'endroit où il est né vers une aire d'alimentation et de croissance. Ensuite, lorsqu'il atteint sa

maturité, il se déplacera de cette aire vers une aire de reproduction ou frayère. Cette période correspond à la montaison du poisson. Il est donc primordial que le poisson puisse circuler librement, non seulement pour se reproduire mais aussi pour coloniser de nouveaux plans d'eau ou encore pour trouver la nourriture dont il a besoin. Durant la montaison du poisson et la saison de frai, il faut s'abstenir de procéder à la mise en place d'une traverse de cours d'eau pour ne pas empêcher le poisson d'atteindre son aire de reproduction. Toute intervention sur un cours d'eau sera également évitée durant la période d'incubation des œufs afin d'éviter le dépôt de sédiments sur ces derniers (Hotte & Quirion, 2003).

Dépendamment de la technique utilisée pour la traverse des cours d'eau par les pipelines, beaucoup de sédiments peuvent être rejetés dans le cours d'eau. Les sédiments fins peuvent demeurer en suspension dans l'eau et voyager avec elle pour se déposer plus loin, parfois très loin, de leur point d'origine. Les sédiments fins, comme le sable et l'argile, qui se déposent et s'accumulent dans une frayère, colmatent le gravier et empêchent l'eau de circuler dans le substrat rocheux. Les œufs et les alevins qui s'y trouvent n'ont plus l'oxygène nécessaire à leur survie et meurent d'asphyxie. La sédimentation ou le dépôt des sédiments au fond du cours d'eau peut également restreindre la disponibilité de la nourriture des poissons. L'alimentation du poisson est composée principalement d'insectes, dont une grande partie se trouve au fond du cours d'eau dans les 15 à 30 premiers centimètres du substrat. Ainsi, si les sédiments obstruent le substrat, la disponibilité de nourriture pour les poissons peut être grandement diminuée. Les sédiments en suspension dans l'eau peuvent également causer des problèmes respiratoires aux poissons en irritant leurs branchies et en réduisant l'accès à l'oxygène de l'eau. De plus, en diminuant la visibilité dans l'eau, ils constituent un agent répulsif qui limite les déplacements, la migration du poisson et l'accès à la nourriture (Hotte & Quirion, 2003). Cet impact serait essentiellement temporaire, pendant la phase de construction.

De plus amples informations sur les conséquences environnementales sont fournies à la section 4.

3.2 Description des techniques/technologies de traverses

Le comité de franchissement des cours d'eau par des pipelines au Canada (CFCEPC) offre un aperçu des différentes techniques de construction de franchissement d'un cours d'eau par pipeline généralement utilisées au Canada (CAPP/CEPA/CGA, 2012; CFCEPC, 1999). Il est à noter qu'une réglementation existe tant au niveau fédéral qu'au niveau provincial en matière de construction, d'exploitation, de cessation d'exploitation et de franchissements de cours d'eau par des pipelines. Selon la zone où les franchissements sont implantés, un même projet pourrait devoir se conformer à plusieurs règlements. Au Québec, les franchissements des cours d'eau doivent notamment répondre aux dispositions de la Loi sur la qualité de l'environnement (MDDELCC, 2015c) et la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune (MDDELCC, 2015b). La méthode de franchissement des cours d'eau a une influence directe sur les composantes du milieu. Deux types de traverses peuvent être utilisés pour franchir un cours d'eau: la traverse aérienne ou la traverse souterraine. Les sections suivantes présentent ces deux types tels que décrits dans le rapport du CFCEPC (1999). Le Tableau 3-1, tiré du document *Franchissement des cours d'eau, 2e édition* du CFCEPC (1999), résume les principales caractéristiques des diverses méthodes de franchissement, et indique les avantages/désavantages de chaque technique. Même si les principales utilisations de chaque technique sont identifiées, la mise en œuvre de techniques alternatives avec des mesures d'atténuation ou d'une combinaison de techniques peut aussi être envisagée.

3.2.1 Traverse aérienne

Elle peut se faire de deux façons différentes : i) **Fixation sur pont** ; ii) **Travée ou pont autoportant**. La première option consiste à fixer le pipeline sur la structure d'un pont existant tandis que la seconde nécessite la construction d'un nouveau pont ou d'une butée pour servir d'appui pour le pipeline.

Parmi les avantages, ce mode de franchissement pourrait dans certains cas éviter des travaux dans le lit du cours d'eau. Toutefois, il peut s'avérer potentiellement dispendieux, nécessiter un entretien continu et exigeant, et engendrer un impact visuel important (CFCEPC, 1999). Sans oublier qu'il peut déclencher un examen réglementaire s'il y a risque d'introduction de produits dangereux dans le cours d'eau ou sur la route surplombée à cause de dommages éventuels causés au pipeline par une tierce partie.

L'emploi de conduites aériennes supportées par des passerelles peut être envisagé dans le cas de cours d'eau encaissés dans des vallées à parois rocheuses. Ces conduites peuvent être aussi supportées par des ponts existants, si les autorités concernées le permettent. Une traverse aérienne est particulièrement adaptée dans le cas d'un grand cours d'eau comportant un habitat sensible et où aucune activité dans le lit n'est permise ou dans une zone à pentes d'approche instable.

3.2.2 Traverse souterraine

Ce type de traverse peut se faire **avec** ou **sans tranchée** et la tranchée peut être **ouverte** ou **isolée**. Ceci donne lieu à trois catégories de traverse souterraine, à savoir : i) Tranchée ouverte ; ii) Tranchée isolée ; iii) Sans tranchée. Elles sont décrites dans les sections suivantes.

3.2.2.1 Tranchée ouverte

Cinq techniques permettent de réaliser une tranchée ouverte dans le lit d'un cours d'eau, à savoir: i) Charrue défonceuse type ; ii) Trancheuse à roue-pelle ; iii) Excavatrice ; iv) Pelle à benne trainante; v) Dragage. L'excavation de la tranchée et la pose des canalisations ont lieu directement dans le canal, ce qui ne nécessite pas forcément un équipement très élaboré, mais peut causer des problèmes de dépôts de sédiments en aval du site de construction.

Ce type de traversée cause le plus d'impacts sur le milieu aquatique. Pour ces techniques, des pelles hydrauliques (ou des draglines) sont situées de part et d'autre du cours d'eau, ou œuvrent à partir d'un remblai d'accès dans le cours d'eau. Cette méthode est utilisée dans les cours d'eau mineurs, à débits intermittents, ou à faible débit, lorsque le milieu aquatique est moins vulnérable.

Il faut noter, cependant, que l'excavation de tranchées dans les berges d'un cours d'eau peut causer l'instabilité des talus. Par conséquent, des mesures doivent être prises pour stabiliser, si nécessaire, les parois des tranchées lors des travaux, et pour s'assurer que les talus demeureront stables dans le futur, une fois les travaux complétés.

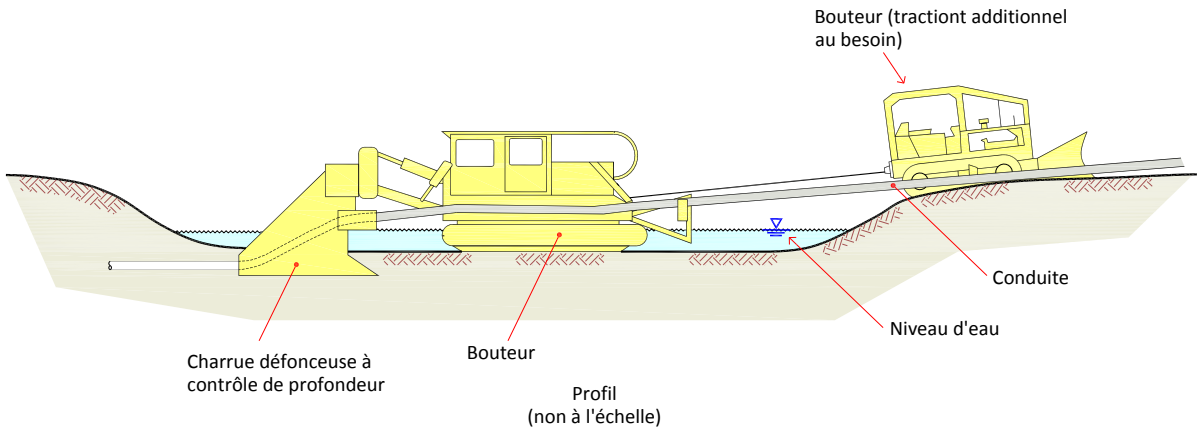
Un lestage de la conduite par un revêtement en béton peut être nécessaire dans certaines situations. À part la trancheuse à roue-pelle qui peut bloquer le passage des poissons et l'écoulement de l'eau, les trois autres techniques conservent ces deux paramètres (passage des poissons et écoulement d'eau).

3.2.2.2 Tranchée isolée

Cinq techniques permettent de réaliser une tranchée isolée dans le lit d'un cours d'eau, à savoir : i) Conduite de dérivation ; ii) Barrage et pompe ; iii) Dérivation par pompe à haut volume ; iv) Batardeau ; v) Dérivation du chenal.

Si le cours d'eau est assez large, l'excavation de la tranchée et la pose de la conduite peuvent être effectuées par sections. La zone de travail est d'abord isolée à l'aide d'un batardeau et l'excavation est ensuite gardée au sec par pompage. Si le cours d'eau est relativement étroit, un ponceau peut être construit pour permettre la circulation de la machinerie. Un barrage temporaire est aménagé en amont de la future tranchée et l'eau est pompée vers la partie aval. La tranchée peut alors être excavée à l'aide de pelles hydrauliques situées de part et d'autre du cours d'eau. Les ouvrages temporaires sont démantelés après le remblayage de la conduite. Dans le cas de travaux à sec sur cours d'eau intermittents, des barrières de rétention des sédiments doivent être prévues en cas de pluie. La traverse par tranchée isolée est compatible avec les substrats consolidés.

Les Figure 3-4 à Figure 3-12 illustrent l'emploi des méthodes avec tranchée ouverte ou isolée.

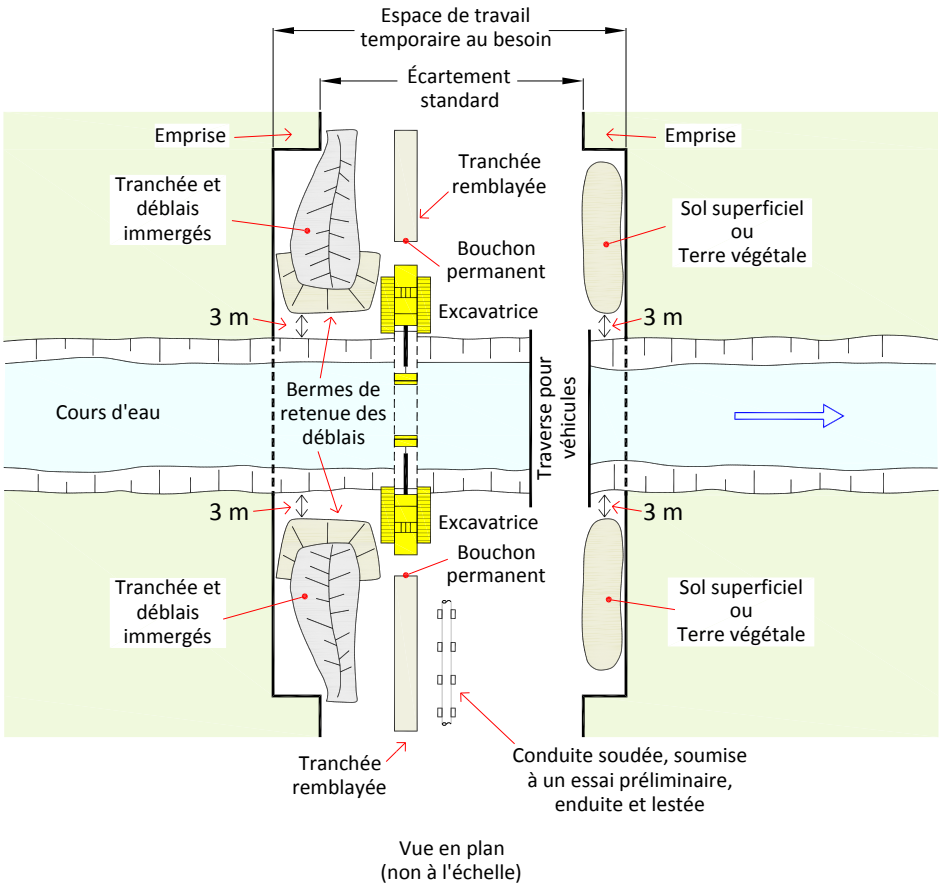


Séquence d'exécution :

1. Installer une traverse de véhicule si la situation le justifie.
2. Niveler les berges afin que la machinerie (Bouteur équipé avec une charrue défonceuse) puisse accéder au cours d'eau.
3. Terminer la construction de la section du pipeline destiné au tronçon placé sous le cours d'eau. Peser et tester le tuyau, si justifié, avant de commencer les travaux d'excavation dans le cours d'eau.
4. Ajouter un Bouteur additionnel (tracteur) afin d'offrir un soutien à la charrue, si justifié. S'assurer que la force de traction utilisée pour excaver le fond du cours d'eau soit adéquate.
5. Niveler et stabiliser les berges du cours d'eau en essayant de leur redonner leurs aspects d'origine.

Source: Tiré de TERA (1998)

Figure 3-4 : Technique de construction - Charrue défonceuse type (TERA, 1998; CFCEPC, 1999)

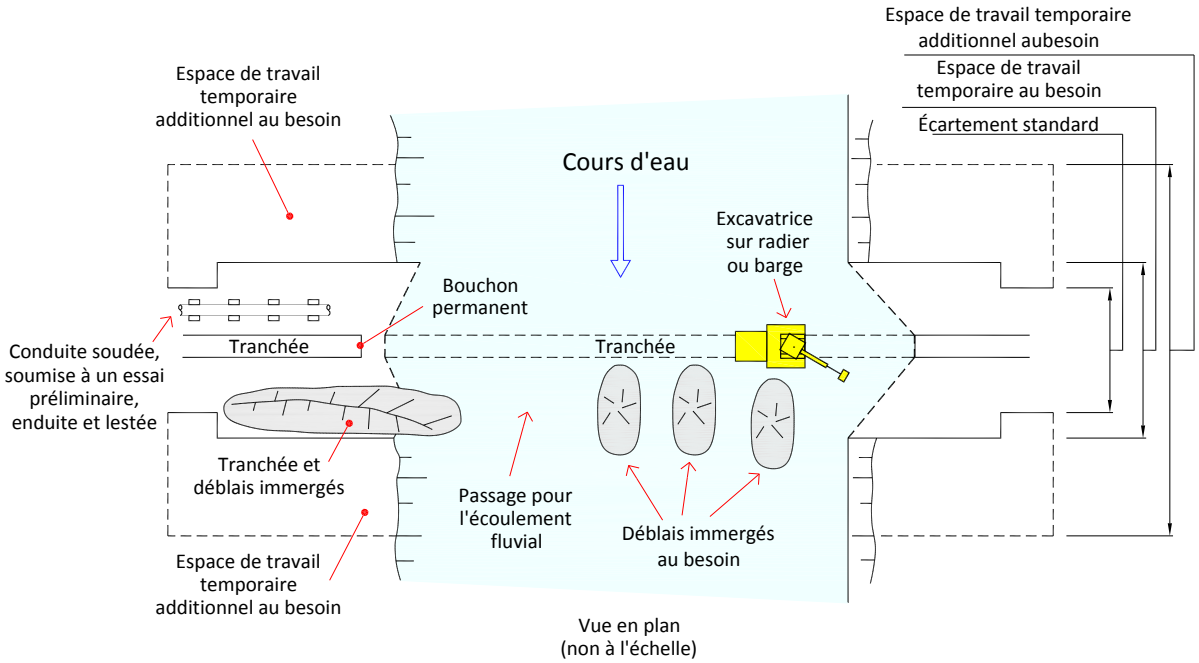


Séquence d'exécution :

1. Prévoir une zone de travail supplémentaire et temporaire destinée au stockage des déblais extraits de la tranchée et de la tranchée creusée dans le cours d'eau (déblais immergés).
2. Installer une traverse de véhicule si la situation le justifie.
3. Placer des bouchons résistants aux extrémités de la tranchée.
4. Terminer l'assemblage de la section du pipeline destiné au tronçon placé sous le cours d'eau. Peser et tester le tuyau, si justifié, le tout avant de commencer les travaux d'excavation dans le cours d'eau.
5. Creuser en travers du cours d'eau et garder en place les bouchons résistants sur chaque berge jusqu'à être prêt à installer le tuyau. Empiler les déblais des extraits des cours d'eau sur les berges. Si nécessaire, afin de contrôler la circulation de l'eau et l'envasement de la tranchée, installer temporairement des bouchons mous et drainer la tranchée dans une zone convenablement éloignée et avec végétation (si c'est possible), pas directement dans le cours d'eau. Construire des bermes afin d'éviter que des déblais saturés s'écoulent à nouveau dans le cours d'eau. Garder l'écoulement d'eau, si présent, durant la période de construction. Abaisser et remblayer immédiatement. Redonner au cours de l'eau approximativement le même profil et le même fond de lit qu'avant la construction. Tenter de terminer tous les travaux dans le cours d'eau en respectant un délai de 24 heures.
6. Niveler et stabiliser les berges du cours d'eau en essayant de leur redonner leurs aspects d'origine.

Source: Tiré de TERA (1998)

Figure 3-5 : Technique de construction - tranchée ouverte type de petits cours d'eau (TERA, 1998; CFCEPC, 1999)

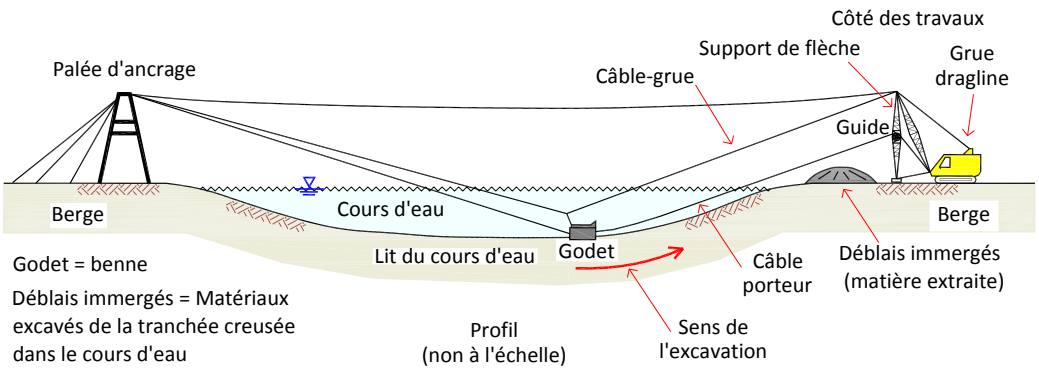


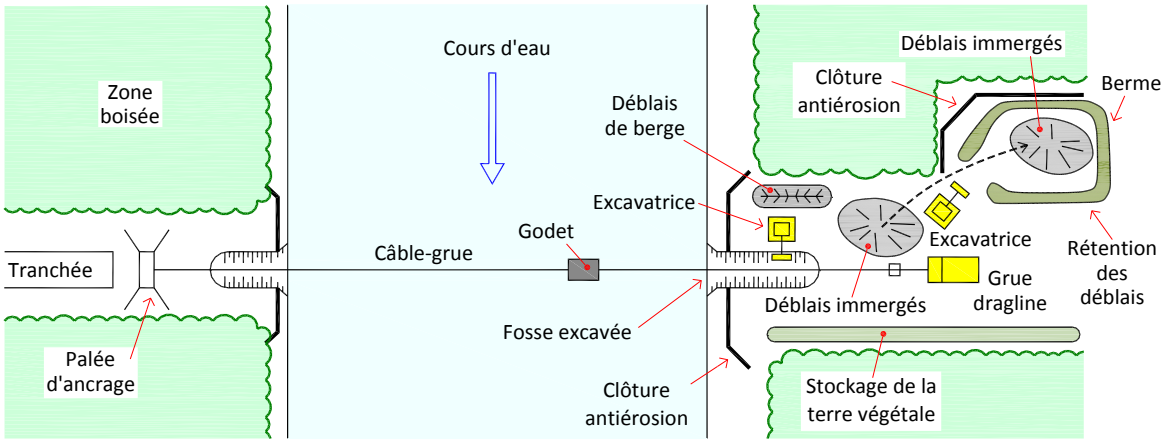
Séquence d'exécution :

1. Prévoir une zone de travail supplémentaire et temporaire destinée au stockage des déblais extraits de la tranchée et de la tranchée creusée dans le cours d'eau (déblais immergés).
2. Garder en place les bouchons résistants sur les berges.
3. Terminer l'assemblage de la section du pipeline destiné au tronçon placé sous le cours d'eau. Peser et tester le tuyau, si justifié, le tout avant de commencer les travaux d'excavation dans le cours d'eau.
4. Creuser en travers du cours d'eau en utilisant des excavatrices (pelles hydrauliques), garder en place les bouchons résistants jusqu'à ce que vous soyez prêt à installer le tuyau. Stocker le plus de déblais possibles sur les berges. Placer les stocks de déblais en tas en évitant les endroits où la vitesse de l'eau est plus élevée. Les déblais retirés des cours d'eau devraient être empilés formant longues piles parallèles au courant de l'eau afin de minimiser l'érosion. N'empilez pas les déblais au travers du canal ou ne bloquez pas plus que les 2/3 de celui-ci. Si nécessaire, afin de contrôler la circulation de l'eau et l'envasement de la tranchée, installer temporairement des bouchons mous et drainer la tranchée dans une zone convenablement éloignée et avec végétation (si c'est possible), pas directement dans le cours d'eau. Si l'écoulement de l'eau est permanent, il faut pouvoir le garder durant toute la période de construction. Les stocks exacts de déblais dépendront de la condition des lieux et de l'équipement utilisé.
5. Placer le tuyau au fond de la tranchée et remplir celle-ci. Redonner au cours d'eau approximativement le même profil et le même fond de lit qu'avant la construction. Essayer de terminer les travaux dans le cours d'eau le plus rapidement possible.
6. Niveler et stabiliser les berges du cours d'eau en essayant de leur redonner leurs aspects d'origine.

Source: Tiré de TERA (1998)

Figure 3-6 : Technique de construction - tranchée ouverte type de grands cours d'eau (TERA, 1998; CFCEPC, 1999)





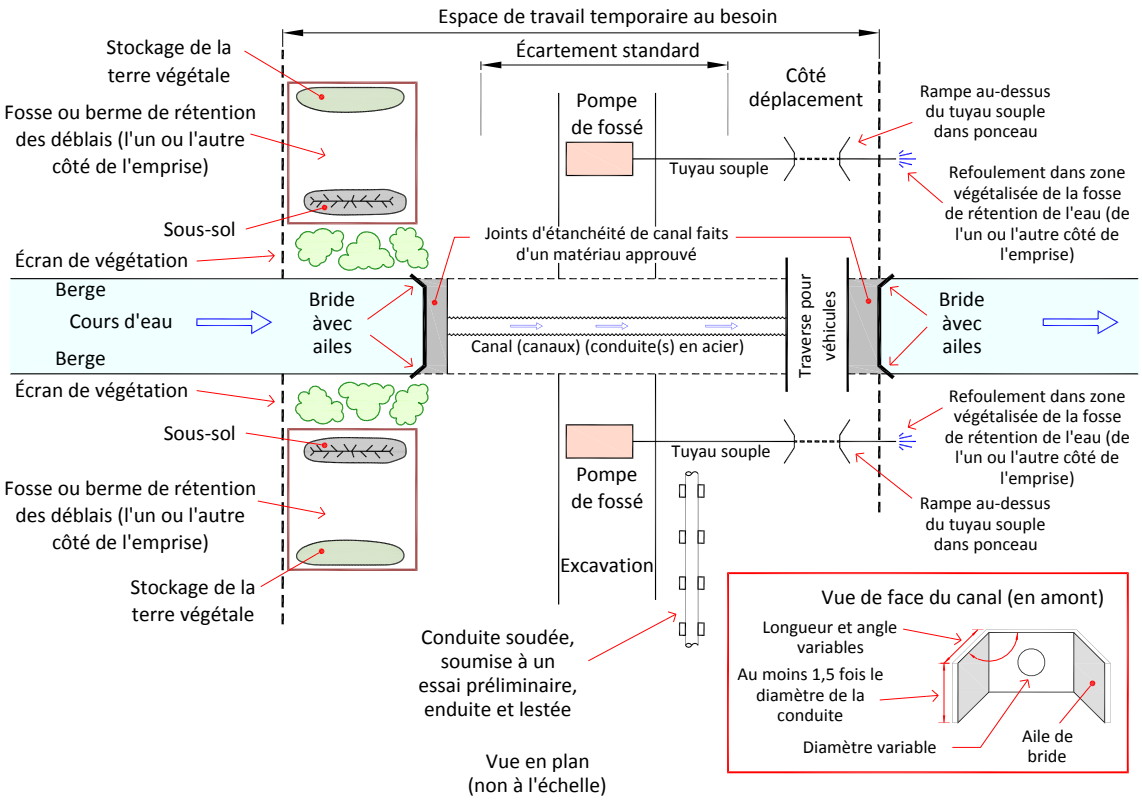
Vue en plan
(non à l'échelle)

Séquence d'exécution :

1. Prévoir des périodes de construction lors de faibles débits.
2. Procurer un espace de travail supplémentaire et temporaire afin de stoker les déblais immergés sur les berges.
3. Terminer la construction de la section du tuyau. Peser et tester le tuyau, si justifié, avant le commencement des travaux de remblayage.
4. Construire une digue ou un puisard afin d'éviter que les déblais ne s'écoulent à nouveau dans le cours d'eau. Utiliser des bouteurs (tracteurs) et de la machinerie d'excavation pour stocker les déblais à distance. Essayer de terminer les travaux le plus rapidement possible.
5. Redonner au cours d'eau approximativement le même profil et le même fond de lit qu'avant la construction. Niveler et stabiliser les berges du cours d'eau en essayant de leur redonner leurs aspects d'origine.

Source: Tiré de TCPL (1994)

Figure 3-7 : Technique de construction - Pelle à benne trainante (TCPL, 1994; CFCEPC, 1999)

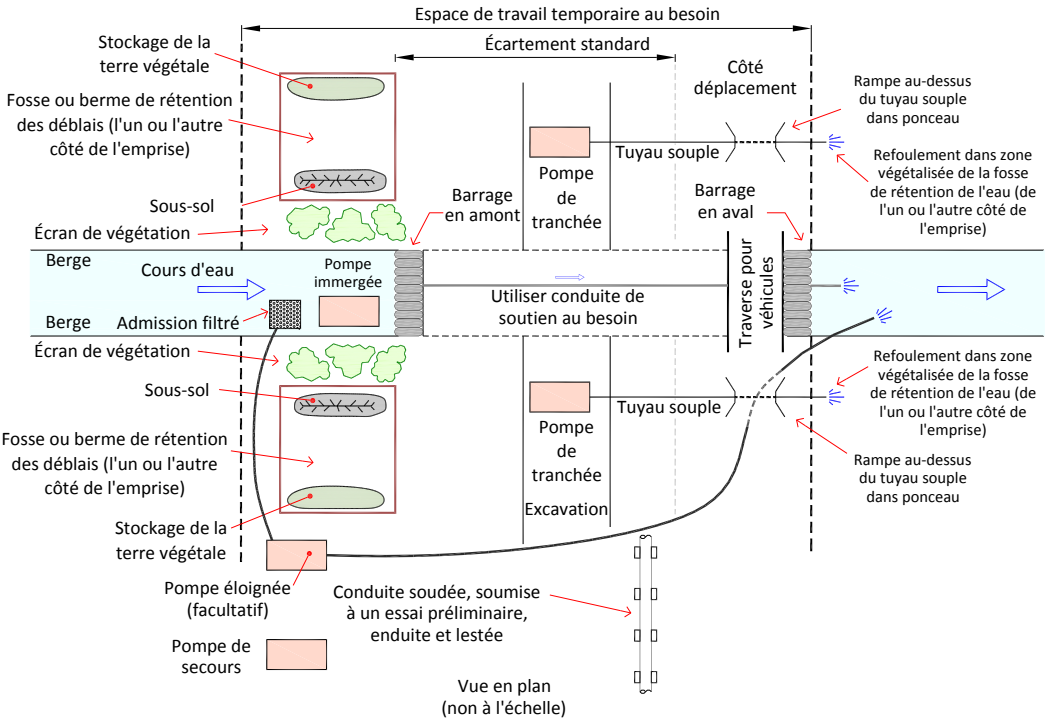


Séquence d'exécution :

1. Aménager un canal de déviation (ou tuyau) qui pourra contenir le débit d'eau prévu. (150 % du débit d'eau ou un niveau d'inondation de 5 ans).
2. Stocker tous les matériaux requis avant de commencer les travaux. Terminer la construction de la section de tuyau dans le cours d'eau. Peser et tester le tuyau, si justifié, avant de commencer les travaux.
3. Installer une traverse de véhicule sur le côté de l'emprise pour pratiquer une excavation large.
4. Installer un tuyau de dérivation pré-assemblé ou construire un barrage à l'aide de sacs de sable et tuyau.
5. Commencer très tôt le matin, excaver la tranchée aussi rapidement que possible en plaçant les déblais hors du cours d'eau. Éviter que les déblais s'écoulent à nouveau dans le canal du cours d'eau.
6. Pomper l'excavation afin de prévenir l'écoulement vers l'aval d'eau chargée de sédiments. Diriger l'eau pompée vers la végétation à une bonne distance du cours d'eau. Construire des puisards pouvant recueillir l'eau, si justifié.
7. Installer le tuyau.
8. Remblayer tout d'abord le cours d'eau, diriger l'eau chargée de sédiments vers les berges des excavations. Pomper ou drainer les berges des excavations, tout en remblayant progressivement l'extérieur du cours d'eau.
9. Terminer le remblayage.
10. Retirer les matériaux d'étanchéité en aval.
11. Retirer les matériaux d'étanchéité en amont.
12. Retirer le barrage ou tuyau de dérivation.
13. Niveler les berges et le lit du cours d'eau en leur redonnant leurs profils originaux.

Source: Tiré de TERA (1998)

Figure 3-8 : Technique de construction - canal type (TERA, 1998; CFCEPC, 1999)

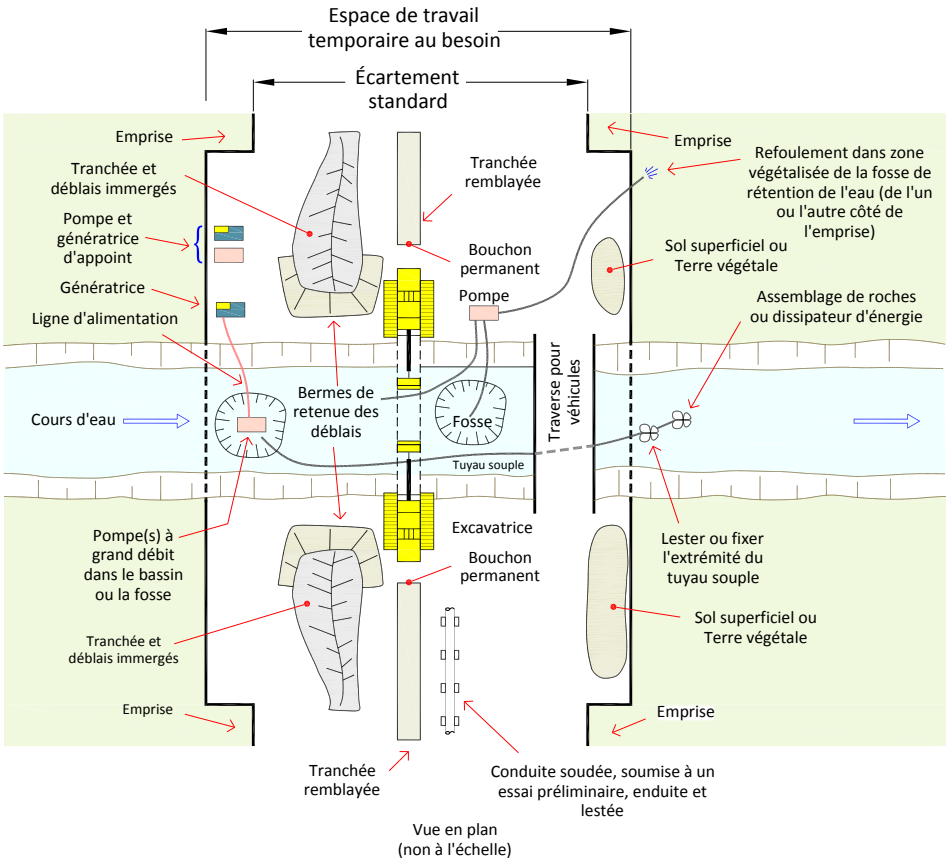


Séquence d'exécution :

1. Installer une traverse de véhicule sur l'autre côté de l'emprise afin de pratiquer une excavation large.
2. Stocker tous les matériaux et l'équipement requis sur place avant de commencer les travaux dans le cours d'eau.
3. Terminer la construction de la section du tuyau. Peser, enduire et tester le tuyau, si justifié, avant de commencer les travaux dans le cours d'eau.
4. Commencer cette opération très tôt le matin afin que l'installation soit terminée dans la même journée, si possible.
5. Installer les pompes et vérifier l'opération afin d'équilibrer le débit de l'eau.
6. Construire le barrage en amont. Le barrage devrait être construit sur le côté de l'espace de travail supplémentaire aménagé pour une excavation large. Assurez-vous que le barrage est imperméable en installant une membrane en polyéthylène. Le barrage peut être construit avec des sacs de sable, un barrage subaquatique ou tout autre matériau qui assureront l'étanchéité des berges et du lit.
7. Boucher le ponceau de la traverse de véhicule ou construire un barrage en aval. Là où un pont est utilisé, le pont et le barrage devraient être installés le plus près possible du côté de l'espace de travail temporaire permettant une excavation large.
8. Excaver la tranchée aussi rapidement que possible. Éviter que les déblais ne s'écoulent à nouveau dans le cours d'eau.
9. Installer le tuyau.
10. Remblayer tout d'abord la tranchée creusée dans le cours d'eau et éloigner l'eau chargée de sédiments sur les berges des excavations. Pomper ou drainer les berges des excavations, tout en remblayant progressivement vers l'extérieur du cours d'eau.
11. Niveler les berges et le lit du cours d'eau en leur redonnant leurs profils d'avant construction.
12. Enlever le barrage en aval ou le bouchon de la traverse de véhicule.
13. Enlever le barrage en amont ou le bouchon de la traverse de véhicule.

Source: Tiré de TERA (1998)

Figure 3-9 : Technique de construction - barrage et pompe types (TERA, 1998; CFCEPC, 1999)

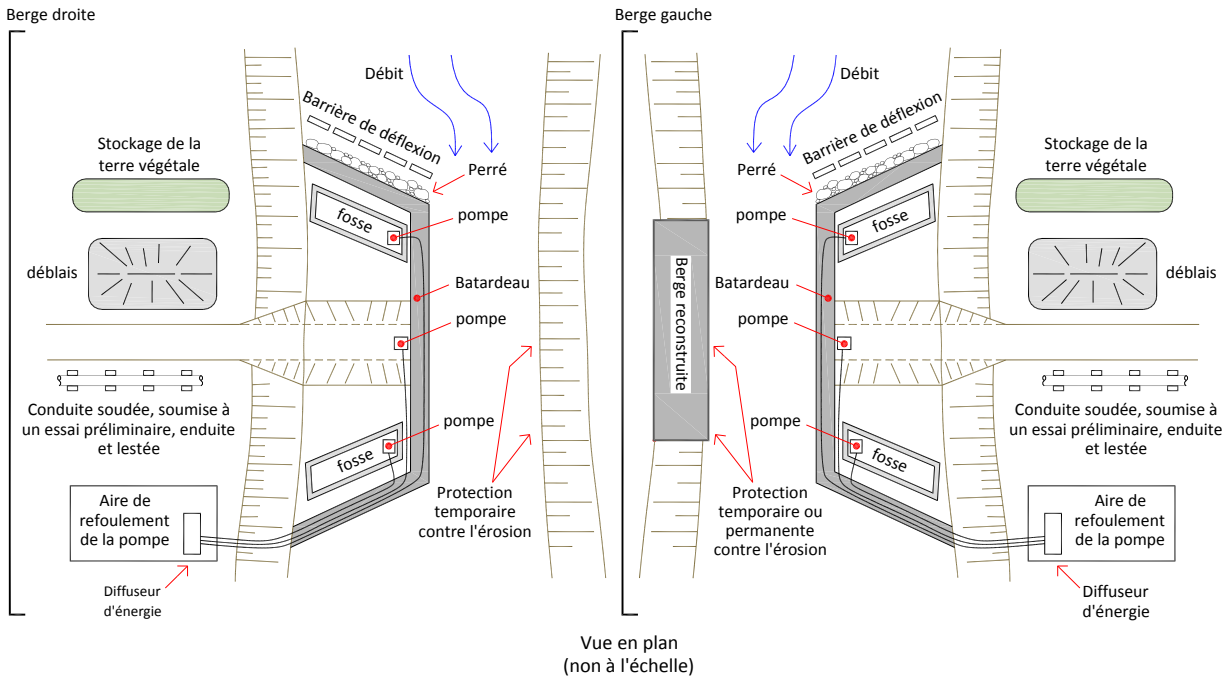


Séquence d'exécution :

1. Installer une traverse de véhicule, si justifié.
2. Assurez-vous d'un apport de courant électrique adéquat et de pompes à capacité adéquate. Les pompes devraient avoir le double de capacité de pompage que le débit prévu. Prévoir des pompes auxiliaires et des génératrices sur les lieux.
3. Installer une pompe à haut volume dans un bassin en amont de l'excavation. Creuser un puisard temporaire en amont s'il n'existe pas de bassin naturel. Ajouter des pompes supplémentaires, si nécessaire. Déverser l'eau dans un dissipateur d'énergie dans le cours d'eau, suffisamment en aval de la tranchée pour éviter que l'eau s'écoule à nouveau dans l'excavation.
4. Débuter immédiatement la récupération des poissons dans des bassins isolés. S'assurer que vous avez en main l'autorisation de la récupération des poissons avant d'installer la pompe.
5. Creuser un petit puisard en aval de la traverse pour recueillir les eaux chargées de limon. Installer de petites pompes dans le puisard et la tranchée pour déverser l'eau chargée de limon sur des terres végétalisées, éloignées du cours d'eau.
6. Excaver la tranchée, compléter l'installation et remplir la tranchée. Placer un boyau, si justifié, pour maintenir le débit du cours d'eau.
7. Laver l'aire remblayée de la tranchée dans le puisard. Pomper l'eau chargée de limon et déversez-la dans la végétation hors du tracé. Effectuer cette étape en soirée chaque jour avant de fermer la pompe en aval, si les travaux en rivière se poursuivent durant plusieurs jours consécutifs.

Source: Tiré de TERA (1998)

Figure 3-10 : Dérivation de pompe à grand débit type (TERA, 1998; CFCEPC, 1999)

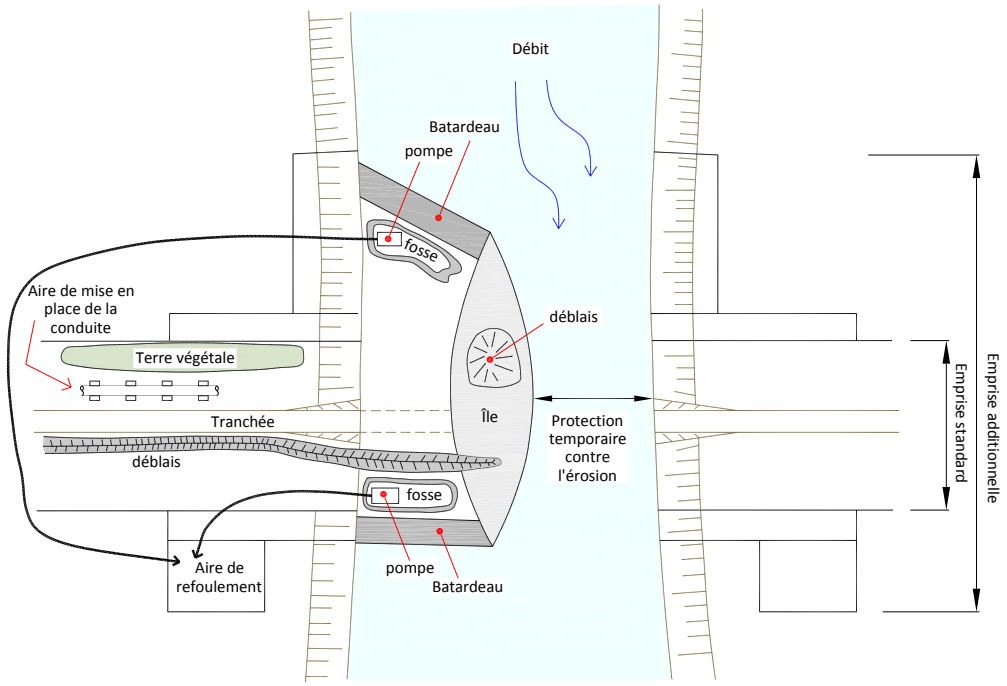


Séquence d'exécution :

1. Prévoir à l'intérieur du batardeau un espace suffisant de travail pour creuser une fosse (puisard) stable.
2. S'il y a un écoulement de l'eau dont la vitesse est importante, installer une barrière de déviation (ex. barrières médianes) pour que la construction du batardeau puisse se faire sans être exposée à un écoulement de l'eau trop important.
3. Construire le batardeau avec des matériaux locaux, des sacs de sable, des sacs de sable de 1 m^3, un barrage subaquatique, un rideau de palplanches, du gravier ou tout autre matériau pouvant s'étendre à mi-chemin en travers du cours d'eau.
4. Installer une barrière imperméable à l'extérieur du batardeau.
5. Installer un enrochement de protection du côté amont pour protéger le batardeau de l'érosion s'il est construit de sols lâches.
6. Installer des puisards pour recueillir l'eau et pomper pour assécher cette aire.
7. Assurez-vous que l'aire de déversement peut recevoir le volume d'eau et de vase qui sont pompés vers la berge.
8. Terminer le creusement, la mise en place, le remblayage et marquer l'extrémité du tuyau.
9. Enlever le batardeau et reconstruire la berge.
10. Installer une structure similaire sur le côté opposé du cours d'eau contenant l'extrémité marquée du tuyau.

Source: Tiré de TERA (1996)

Figure 3-11 : Technique de construction - batardeaux à deux étages types (TERA, 1996; CFCEPC, 1999)



Vue en plan
(non à l'échelle)

Séquence d'exécution :

1. S'il y a un écoulement de l'eau dont la vitesse est importante, installer une barrière de déviation (ex. barrières médianes) pour que la construction du batardeau puisse se faire sans être exposée à un écoulement de l'eau trop important.
2. Construire le batardeau avec des matériaux locaux, des sacs de sable de 1 m^3, un barrage subaquatique, un rideau de palplanches, du gravier ou tout autre matériau pouvant s'étendre à mi-chemin en travers du cours d'eau.
3. Installer une barrière imperméable à l'extérieur du batardeau.
4. Installer un enrochement de protection du côté de l'amont pour protéger le batardeau de l'érosion s'il est construit de sols lâches.
5. Les déblais devraient être stockés au-dessus du niveau d'eau le plus élevé ou devraient être protégés par des moyens contre l'érosion, pour que quand le niveau de l'eau s'élèvera et sera canalisé en un seul canal les déblais ne soient emportés.
6. Installer des puisards pour recueillir l'eau et pomper pour assécher cette aire.
7. Assurez-vous que l'aire de déversement peut recevoir le volume d'eau et de vase qui sont pompés vers la berge.
8. Terminer le creusement, la mise en place et le remblayage.
9. Retirer le batardeau et reconstruire la berge.
10. Répétez ce procédé pour tous les canaux.
11. La déviation temporaire peut demeurer en place dans les canaux abandonnés aussi longtemps que des opérations pour minimiser la vidange de sédiments seront en cours et que les cours d'eau soient redirigés dans le « nouveau » canal.
12. Une déviation temporaire par un canal excavé dans une plaine inondée est possible s'il passe par un canal flexible pour prévenir une érosion excessive le long du « nouveau » canal.

Source: Tiré de TERA (1996)

Figure 3-12 : Technique de construction - dérivation de canal type (TERA, 1996; CFCEPC, 1999)

3.2.2.3 Sans Tranchée

Selon le type de sol ou de roc, il existe plusieurs techniques sans tranchée qui permettent de réaliser une traverse de cours d'eau (Najafi, 2005, 2010). Entre autres, pour les courtes distances :

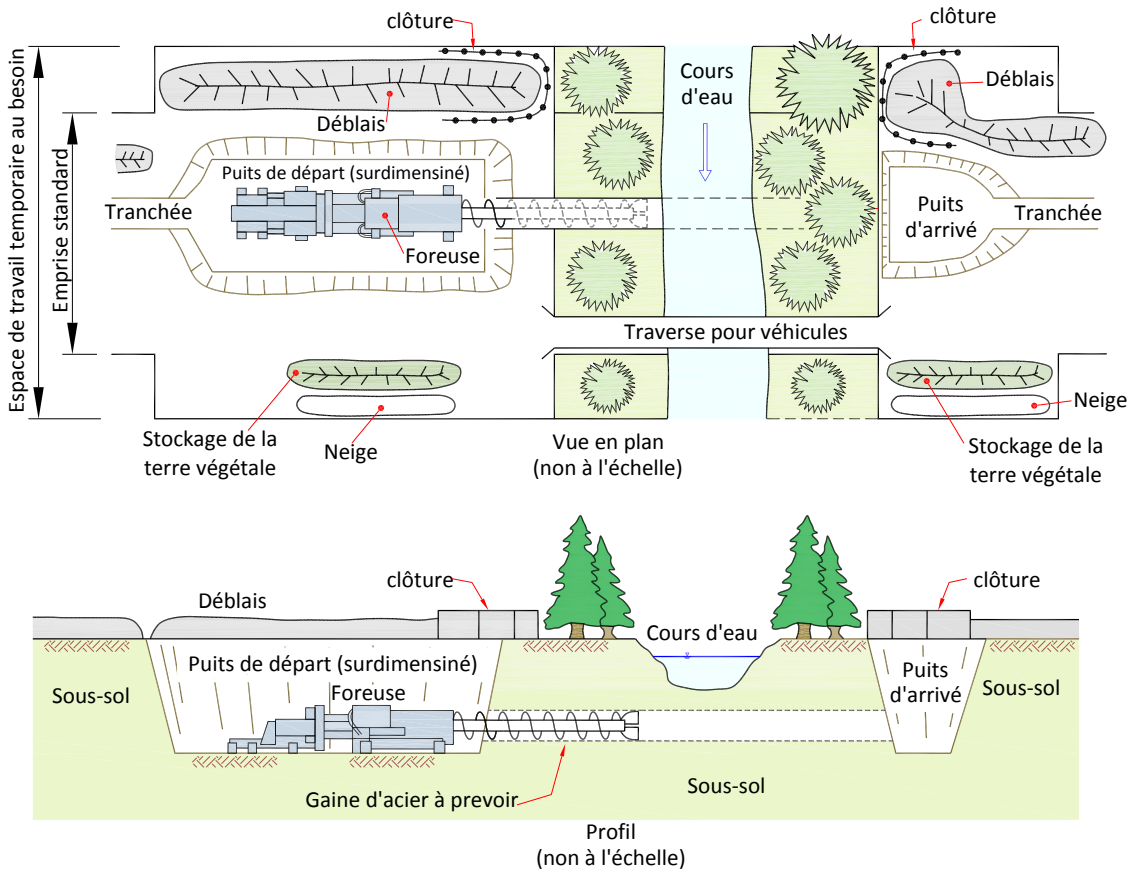
1) Fonçage horizontal à percussion (*pipe ramming* ou *push pipe*) dans le sol ;
2) Forage horizontal à la tarière ou vis sans fin (*auger boring*) dans le sol ;
3) Forage horizontal dans le roc par alésage (*raise boring*) ou avec marteau fond de trou (*down the hole hammer*) ;

Pour de longues distances, les techniques sont les suivantes :

4) Forage dirigé (*horizontal directional drilling* (HDD)) dans le sol ou le roc ;
5) Tunnel et forage en poussée :
    a. Microtunnellier (*microtunnelling*). Technique qui permet d'effectuer un tunnel dans le sol ou le roc à partir d'un puits de départ vers un puits d'arrivée. Le module d'excavation est dirigeable à distance de la surface ;
    b. Microtunnellier dirigé (*directional microtunnel* (DMT) ou *Direct Pipe*) dans le sol. Technique qui permet d'installer la conduite dans le sol à partir de la surface, passer sous un obstacle et ressortir à la surface selon trajectoire courbe ;
    c. Forage par poussée (*pipe jacking*). Technique qui permet d'effectuer un tunnel dans le sol à partir d'un puits de départ vers un puits d'arrivée en enfonçant des sections de conduites préfabriquées ;
    d. Tunnelier utilitaire. Technique qui permet d'effectuer un tunnel dans le sol ou le roc à partir d'un puits de départ vers un puits d'arrivée. Le module d'excavation est dirigeable et employé par de la main d'œuvre sous terre.

Chaque méthode a ses limites, ses avantages, et ses inconvénients. Par exemple, le forage dirigé est surtout utilisé dans les sols fins, bien que son utilisation dans les formations rocheuses devienne de plus en plus courante. Cette technique n'affecte pas la stabilité des berges et du lit du cours d'eau traversé, en autant que la profondeur du forage soit suffisante pour éviter la fracturation hydraulique causée par une trop forte pression du coulis injecté.

Ces techniques seront regroupées en quatre grandes catégories à savoir : i) Forage (Figure 3-13) ; ii) Fonçage/Poussée ; iii) Forage dirigé (Figure 3-14 et 3-15) ; iv) Tunnel. Elles permettent de forer directement sous le lit du cours d'eau, ce qui réduit les travaux de surface et la perturbation de l'environnement. Par conséquent, ce type de traverse conserve le passage des poissons.



Séquence d'exécution :

1. Acquérir et marquer temporairement un espace de travail supplémentaire.
2. Mettre l'équipement en place à un minimum de 10 m de du bord du cours d'eau, ne pas dégager ou modifier la pente ou la berge selon le cas dans cette zone de 10 m, sauf le long de la zone de construction si une traverse de véhicule temporaire est installée.
3. Excaver le trou d'emboîtement. Stocker les déblais sur le côté opposé du tracé.
4. Terminer le forage et raccorder à la ligne principale.
5. Pomper le trou d'emboîtement pour l'assécher si les venues d'eau deviennent un problème. Drainer le trou d'emboîtement dans la végétation et non directement dans le cours d'eau.
6. Remblayer et compacter. Laisser un surplus de remblais pour permettre une subsidence.

Source: Tiré de TERA (1998)

Figure 3-13 : Technique de construction – forage ou perforation types (TERA, 1998; CFCEPC, 1999)

La traversée par forage dirigé permet de réduire énormément (voire d'éviter) les impacts sur le milieu aquatique lors de la traversée de cours d'eau majeurs ou si les berges existantes sont sujettes aux glissements de terrain. Le succès d'un forage dirigé dépend primordialement des conditions géotechniques présentes, du type et de la capacité de l'équipement (foreuse), de l'expérience de l'opérateur, et de la profondeur et longueur de l'emprise.

La première étape de cette technique est le forage d'un trou pilote de petit diamètre sous le cours d'eau à traverser. Une fois le trou pilote complété, l'alésage[2] du trou pilote à un diamètre plus grand (1,5 fois en moyenne) doit être effectué pour permettre l'insertion de la conduite. Lors de cette opération, le trou pilote est agrandi par le passage successif d'un aléseur. En dernier lieu, la conduite pré-assemblée est insérée par tirage dans le trou de forage.

Tout au long des travaux de forage, les débris des matériaux forés (sols et roc) sont évacués du trou de forage à l'aide de la circulation sous pression d'une boue de forage ou coulis (ciment) constitué d'un mélange de bentonite et d'eau et/ou d'additifs.

Bien que le forage dirigé soit surtout indiqué pour les matériaux fins, il peut néanmoins être employé dans le roc. Toutefois, si le mort terrain[3] (sol meuble) traversé est très grossier et contient des cailloux, blocs ou galets, ou si le roc est fracturé, le forage dirigé peut ne pas être assuré car le coulis se perdrait en grand volume sans remplir son rôle.

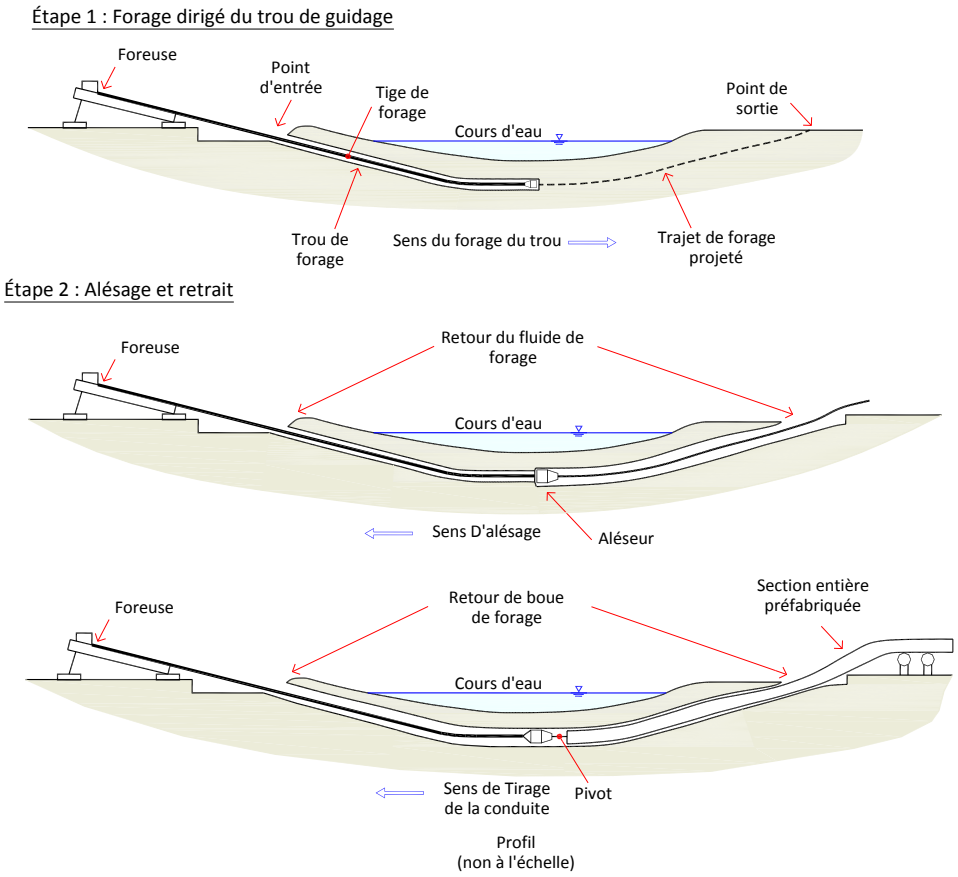
Pour une évaluation complète et détaillée de la méthode, il faut disposer d'une description granulométrique de sols meubles rencontrés (sols fins ; argiles, silts, sols granulaires ; sables et graviers), des caractéristiques de roches traversées, et plus particulièrement, d'une évaluation de la perméabilité que ces mêmes sols ont vis-à-vis à capacité de fixation du coulis lors du forage du trou pilote et le trou de forage final.

Les Figure 3-14 et Figure 3-15 présentent la technique de traversée par forage dirigé.

Il est à noter que les traverses sans tranchée nécessitent généralement un grand espace de travail pour les équipements.

[2] Opération consistant à parachever, en calibrant de façon précise, les dimensions et les trous de forage

[3] Terme technique en géologie qui désigne une couche sédimentaire à percer avant d'atteindre le minerai. Le terme est notamment utilisé dans l'exploitation minière pour désigner un sol qui ne contient aucune matière utile.

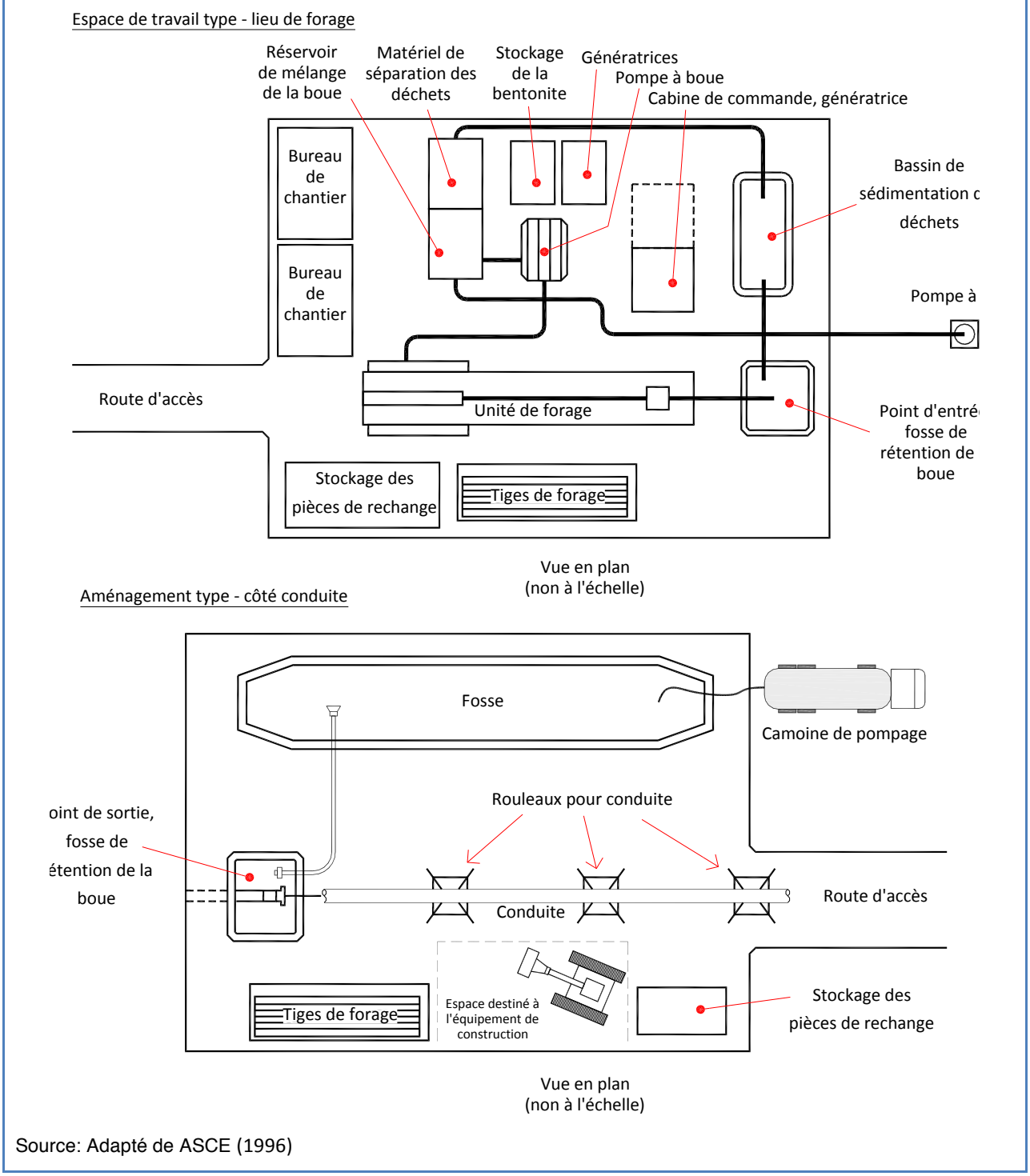


Séquence d'exécution :

1. Obtenir des données géotechniques avant de commencer le forage. Le forage peut s'avérer impraticable dans des matériaux comme le gravier non consolidé.
2. Prévoir un plan d'intervention pour retirer la boue de forage.
3. Mettre l'équipement en place à un minimum de 10 m du bord du cours d'eau, ne pas dégager ou modifier la pente dans cette zone de 10 m.
4. Engager des inspecteurs à temps complet qui superviseront pour éviter un écoulement non voulu de boue dans le cours d'eau.
5. Assurez-vous que vous n'utilisez que de la boue à base de bentonite. N'ajouter aucun additif à la boue sans l'autorisation des autorités chargées de la réglementation.
6. Installer des réservoirs adaptés pour la boue ou des puisards pour prévenir la contamination du cours d'eau.
7. Installer des bermes sur la pente descendante pour l'entrée de la foreuse et prévoir des points de sortie pour contenir un déversement éventuel de boue.
8. Se débarrasser de la boue conformément aux exigences des autorités chargées de la règlementation.

Source: Tiré de ASCE (1996) et de TERA (1998)

Figure 3-14 : Technique de construction – forage dirigé type (a) (ASCE, 1996; TERA, 1998; CFCEPC, 1999)



Source: Adapté de ASCE (1996)

Figure 3-15 : Technique de construction – forage dirigé type (b) (ASCE, 1996; CFCEPC, 1999)

Tableau 3-1 : Techniques de construction de franchissement de cours d'eau par des pipelines (CFCEPC, 1999)

Catégorie / Méthode	Considérations environnementales	Considérations de construction et d'ingénierie
Tranchée ouverte / Charrue défonceuse type (voir Figure 3-4)		
Description ▫ Déposer le pipeline sans préexcavation de tranchée. ▫ Alimenter ou entraîner le pipeline dans la tranchée derrière la charrue défonceuse type. **Utilisation appropriée** ▫ Cours d'eau à substrat non consolidé (ex. sable et petits graviers). ▫ Lacs ou cours d'eau peu profonds comportant peu ou aucun débit (<1 m). ▫ Le pipeline peut être enfoui dans des zones élevées sans présence d'eau et/ou peu exposées aux cours d'eau. ▫ Commun pour les lignes de diamètre inférieur (#168.3 mm de diamètre extérieur). ▫ Lorsque les travaux dans les cours d'eau sont permis mais la décharge de sédiments doit être réduite au minimum.	**Avantages** ▫ Installation et construction rapides. ▫ Minimise la période d'activité dans les cours d'eau. ▫ Minimise la décharge totale de sédiments. ▫ Courte période de décharge de sédiments. ▫ Conserve l'écoulement de l'eau. ▫ Conserve le passage des poissons. ▫ Nécessite un espace minimal de travail temporaire. **Désavantages** ▫ Nivellement des berges nécessaire. ▫ Décharge de sédiments potentielle pendant le nivellement des berges. ▫ Décharge de sédiments pendant le travail dans les cours d'eau.	**Avantages** ▫ Réduit les activités dans les cours d'eau. ▫ Élimine l'étape de remblai. ▫ Peu dispendieux si l'équipement est sur le site. ▫ Construction et installation rapides. **Désavantages** ▫ Équipement spécialisé. ▫ Nécessite une rampe d'accès au ruisseau. ▫ Problématique pour les rochers et les roches-mères. ▫ La profondeur de la couverture est limitée.
Tranchée ouverte / Trancheuse à roue-pelle (sans Figure)		
Description ▫ Creuser la tranchée dans le cours d'eau avec l'aide d'une trancheuse à roue pelle ad hoc. **Utilisation appropriée** ▫ Cours d'eau secs intermittents avec substrat à fine texture où la trancheuse à roue est utilisée en zone sèche. ▫ Possiblement pour les ruisseaux à faible débit, faible fragilité et berges basses. ▫ Commun pour les ruisseaux asséchés. ▫ Là où le déchargement de sédiments n'est pas une préoccupation.	**Avantages** ▫ Installation et construction rapides. ▫ Minimise la période d'activité dans les cours d'eau. ▫ Courte période de décharge de sédiments. **Désavantages** ▫ Risque élevé de décharge de sédiments. ▫ Le déblai risque de bloquer le débit. ▫ La tranchée est à risque de desquamation. ▫ Nécessite un nivellement élaboré. ▫ Peut bloquer le passage du poisson.	**Avantages** ▫ Aucun équipement spécialisé n'est nécessaire. ▫ Pas limité par la largeur du cours d'eau. ▫ À peu de frais. ▫ Construction et installation rapide. **Désavantages** ▫ Limité par la profondeur de l'eau (<1 m). ▫ La tranchée est sujette à la desquamation. ▫ La largeur de la tranchée peut être insuffisante. ▫ L'équipement a de la difficulté sur les berges fort escarpées. ▫ Difficultés avec le substrat rocheux ou la roche-mère. ▫ La profondeur de la tranchée peut s'avérer inadéquate.
Tranchée ouverte / Excavatrice (Petits et grands cours d'eau) (voir Figures 3-5 et 3-6)		
Description ▫ Creuser une tranchée dans le cours d'eau à l'aide d'une ou d'excavatrices placées aux berges ou même placées à l'intérieur du cours d'eau (barges ou structures ad-hoc). **Utilisation appropriée** ▫ Les cours d'eau peu profonds (<1.5 m) composés d'un substrat granulaire non consolidé. ▫ La méthode la plus commune d'excavation de tranchée dans les cours d'eau. ▫ Lorsque la décharge de sédiments n'est pas une préoccupation. ▫ Les cours d'eau comportant un pourcentage réduit d'éléments fins.	**Avantages** ▫ Installation et construction rapides. ▫ Minimise la période d'activité dans les cours d'eau. ▫ Conserve l'écoulement de l'eau. ▫ Conserve le passage des poissons. ▫ Période relativement courte de décharge de sédiments (<24 heures). **Désavantages** ▫ Risque élevé de décharge de sédiments durant l'excavation et le remblai. ▫ Emplacement et disposition de tas de déblais au sein du cours d'eau lorsque celui-ci est assez large. Possible obstruction du cours d'eau.	**Avantages** ▫ Aucun besoin d'équipement spécialisé. ▫ Construction et installation rapides à peu de frais. ▫ Compatible avec substrat granulaire et certaines roches. **Désavantages** ▫ Limité à moins de 20 m, à moins que l'excavatrice ne travaille dans les cours d'eau. ▫ Limité par la profondeur de l'eau à moins que l'excavatrice travaille à partir d'une barge. ▫ Il est possible que plusieurs excavatrices doivent travailler ensemble afin de faciliter l'excavation.

Tableau 3-1 : TECHNIQUES DE CONSTRUCTION DE FRANCHISSEMENTS DE COURS D'EAU PAR DES PIPELINES (suite)

Catégorie / Méthode	Considérations environnementales	Considérations de construction et d'ingénierie
Tranchée ouverte / Pelle à benne trainante (voir Figure 3-7)		
Description ▫ Creuser une tranchée dans le cours d'eau à l'aide d'une pelle à benne trainante de part et d'autre de berges. **Utilisation appropriée** ▫ Les cours d'eau larges et profonds comportant un substrat mou et des préoccupations de navigation limitées. ▫ Commun sur les rivières larges. ▫ Lorsque la décharge de sédiments n'est pas une préoccupation. ▫ Les cours d'eau comportant une hauteur minimale des berges. ▫ Souvent utilisé pour nettoyer les tranchées creusées par des excavatrices.	**Avantages** ▫ L'équipement ne se trouve pas dans le cours d'eau. ▫ Les déblais se trouveront sur les berges. ▫ Conserve l'écoulement de l'eau. ▫ Conserve le passage des poissons. **Désavantages** ▫ Risque élevé de décharge de sédiments. ▫ Construction et installation lentes. ▫ Durée prolongée de décharge de sédiments. ▫ Préoccupation de sécurité à cause des câbles tendus de part et d'autre du cours d'eau. ▫ Le nivellement des berges peut être nécessaire, ce qui entraîne une décharge de sédiments. ▫ Nécessite une grande surface pour l'équipement.	**Avantages** ▫ Permet plusieurs passes sur la tranchée. ▫ Nettoie le matériau vaseux des tranchées. ▫ Bon pour un substrat non consolidé. ▫ Permet de creuser une tranchée plus profonde. **Désavantages** ▫ Moyennement dispendieux. ▫ Contrôle inexact de la largeur et de l'alignement de la tranchée. ▫ Construction et installation lentes. ▫ Équipement spécialisé. ▫ La tranchée est susceptible à la desquamation. ▫ Nécessite une grande surface de travail pour l'installation de l'équipement. ▫ Les câbles empêchent de naviguer sur le cours d'eau. ▫ Incompatible avec les blocs rocheux ou les matériaux de fond consolidés.
Tranchée ouverte / Dragage (sans Figure)		
Description ▫ Draguer une tranchée à travers le cours d'eau avec succion et pomper la boue liquide sur les berges ou dans des réservoirs sur les barges. **Utilisation appropriée** ▫ Les lacs et les rivières profondes et larges, comportant un substrat fin et non consolidé. ▫ Lorsque la décharge de sédiments est une préoccupation.	**Avantages** ▫ Décharge minimale de sédiments durant l'excavation de tranchées. ▫ Conserve l'écoulement de l'eau. ▫ Conserve le passage des poissons. ▫ Aucun entreposage du terril dans les circuits liquides. ▫ Dépend du transport naturel des sédiments pour le remblai. **Désavantages** ▫ Des étangs de décantation sont nécessaires pour la boue liquide. ▫ Élimination des eaux décantées. ▫ Possibilité de blessures ou de mort pour les poissons.	**Avantages** ▫ Permet l'excavation de tranchées en eau profonde. ▫ Technique pour le transport aux berges. ▫ Aucun entreposage du terril dans les circuits liquides. **Désavantages** ▫ Dispendieux. ▫ Équipement spécialisé. ▫ Des étangs de décantation doivent être construits. ▫ Difficile lorsqu'il s'agit de substrat large et granuleux ou de roche mère. ▫ Il est possible que la profondeur de la tranchée soit inadéquate.

Tableau 3-1 : **TECHNIQUES DE CONSTRUCTION DE FRANCHISSEMENTS DE COURS D'EAU PAR DES PIPELINES (suite)**

Catégorie / Méthode	Considérations environnementales	Considérations de construction et d'ingénierie
Tranchée isolée / Conduite de dérivation type (voir Figue 3-8)		
Description ▫ Bloquer le courant en amont du franchissement et le dériver à travers des tuyaux installés dans le lit du cours d'eau perpendiculaires au pipeline. ▫ Ériger un barrage en aval du franchissement afin d'éviter un refoulement. ▫ La dimension de la conduite de dérivation devrait être appropriée pour accommoder le débit. ▫ La super conduite de dérivation est une variation de haute capacité construite à partir de sections de boîtes d'acier de 2 m x 3 m x 32 m. ▫ Peut être augmenté avec une pompe *bypass*. **Utilisation appropriée** ▫ Petit cours d'eau comportant un chenal et des berges bien définies, ainsi qu'un fond droit, solide et en sol fin. ▫ Là où la décharge de sédiments et le passage des poissons sont des préoccupations. ▫ Fonctionne mieux lorsque le substrat est imperméable. ▫ Utilisation commune pour des débits <1 m^3/s	**Avantages** ▫ Décharge limitée de sédiments. ▫ Conserve l'écoulement de l'eau. ▫ Conserve le passage des poissons. ▫ Une DDP (Détérioration, Destruction, ou Perturbation) est peu probable en aval du franchissement. ▫ Permet l'évacuation du substrat. **Désavantages** ▫ Une décharge mineure de sédiments durant la construction et le démontage du barrage, ainsi que lorsque l'eau rincera la zone de construction. ▫ Une construction et installation lente prolonge la décharge de sédiments. ▫ Un sauvetage de poissons pourrait être nécessaire aux tronçons asséchés. ▫ Obstacle à court terme au passage des poissons si la vitesse du courant à l'intérieur du tuyau est trop élevée.	**Avantages** ▫ Conditions de travail relativement sèches ou sans aucun débit. ▫ Temps ample pour la construction du pipeline. ▫ Peut être adapté pour des conditions non idéales. ▫ Compatible avec les substrats consolidés. ▫ Possibilité d'incorporer un pont. ▫ Possibilité de réduire la desquamation et la largeur de la tranchée. **Désavantages** ▫ Difficile d'effectuer une fouille en tranchée et d'insérer le pipeline, surtout un pipeline de grand diamètre, sous la conduite de dérivation. ▫ Difficile à installer convenablement. ▫ Le débit est limité par la dimension de la conduite de dérivation 2-3 m^3/s en utilisant plusieurs conduits de dérivation ou une super conduite de dérivation >20 m^3/s. ▫ Moyennement dispendieux. ▫ Le franchissement risque de ne pas rester au sec avec un substrat perméable à grains grossiers. ▫ Une conduite de dérivation trop courte risque d'être insuffisante pour une tranchée instable. ▫ Il est possible que la conduite de dérivation se bloque ou soit écrasée durant la construction du pipeline. ▫ L'installation de la conduite de dérivation nécessite un chenal long et droit.
Tranchée isolée / Barrage et pompe (voir Figure 3-9)		
Description ▫ Ériger des barrages en amont et en aval du franchissement et détourner l'eau à l'aide de pompes et de boyaux. **Utilisation appropriée** ▫ Petit cours d'eau à faible débit comportant des berges et un chenal bien définis et ne comportant aucune exigence de passage de poissons. ▫ Là où la décharge de sédiments est une préoccupation. ▫ Fonctionne le mieux lorsque le substrat est imperméable. ▫ L'utilisation commune est pour des débits <1 m^3/s (capacité maximale d'une pompe 0.3 m^3/s)	**Avantages** ▫ Décharge limitée de sédiments. ▫ Conserve l'écoulement de l'eau. ▫ Une DDP est peu probable en aval du franchissement. **Désavantages** ▫ Une décharge mineure de sédiments durant la construction et le démontage du barrage, ainsi que lorsque l'eau rincera la zone de construction. ▫ Une construction et installation lente résulte en une période prolongée dans les circuits liquides et prolonge la décharge de sédiments. ▫ Un sauvetage de poissons pourrait être nécessaire aux tronçons asséchés. ▫ Obstacle à court terme au mouvement des poissons.	**Avantages** ▫ Conditions de travail relativement sèches. ▫ Amplement de temps pour la construction du pipeline. ▫ Peut être adapté pour des conditions non idéales. ▫ Le tuyau peut être dirigé autour de la zone de construction. ▫ Multiples pompes peuvent être utilisées. ▫ Compatible avec les substrats consolidés. ▫ Peut être utilisé dans les cours d'eau comportant un chenal méandrique. **Désavantages** ▫ La taille du cours d'eau est limitée à la capacité de la pompe. ▫ Équipement et matériaux spécialisés. ▫ Construction et installation lentes. ▫ Moyennement dispendieux. ▫ Les boyaux risquent de gêner la circulation de construction. ▫ L'infiltration d'eau risque de se produire si le substrat est grossier et perméable. ▫ Susceptible à des bris mécaniques. ▫ Nécessite des pompes de réserve. ▫ Possibilité de réduire la desquamation et la largeur de la tranchée.

Tableau 3-1 : **TECHNIQUES DE CONSTRUCTION DE FRANCHISSEMENTS DE COURS D'EAU PAR DES PIPELINES (suite)**

Catégorie / Méthode	Considérations environnementales	Considérations de construction et d'ingénierie
Tranchée isolée / Dérivation par pompe à haut volume (voir Figure 3-10)		
Description ▫ Installer la dérivation par pompe à haut volume dans l'étang en amont du franchissement et assécher le cours d'eau à l'aide de la pompe, en déversant à l'aval du franchissement. ▫ Construire le puisard de la zone de travaux en aval de la tranchée afin de rincer la zone de travaux. ▫ Pomper l'eau chargée de limon du puisard sur une zone bien fournie de végétation. ▫ Lors de situations à haut débit, il est possible d'effectuer une dérivation partielle afin de réduire la vitesse du courant dans les circuits liquides. **Utilisation appropriée** ▫ Petits à moyens cours d'eau comportant un débit faible à modéré (1 m^3/s) et aucune exigence de passage de poissons (capacité maximale d'une pompe 0.3 m^3/s). ▫ Lors de situations à haut débit, il est possible d'effectuer une dérivation partielle afin de réduire la vitesse du courant dans les circuits liquides.	**Avantages** ▫ Décharge limitée de sédiments. ▫ Conserve l'écoulement de l'eau. ▫ Les circuits liquides habituels peuvent être remis à l'état initial. ▫ Aucune décharge de sédiments, résultant de la construction du barrage. ▫ Une DDP est peu probable en aval du franchissement **Désavantages** ▫ Une décharge mineure de sédiments lorsque l'eau rincera la zone de construction. ▫ Assèche un court tronçon du lit du cours d'eau. ▫ Obstacle à court terme au mouvement des poissons. ▫ Un sauvetage de poissons pourrait être nécessaire aux zones asséchées. ▫ Des puisards sont nécessaires.	**Avantages** ▫ Aucun barrage nécessaire. Si nécessaire, la régulation du débit est possible. ▫ Les tuyaux peuvent être dirigés autour de la zone de construction. ▫ De multiples pompes peuvent être utilisées. ▫ Compatible avec les substrats consolidés. **Désavantages** ▫ Il est possible que les puisards doivent être creusés. ▫ Équipement et matériaux spécialisés. ▫ Moyennement dispendieux. ▫ Les boyaux risquent de gêner la circulation de construction. ▫ Nécessite des pompes de réserve. ▫ Susceptible à des bris mécaniques.
Tranchée isolée / Batardeau (voir Figure 3-11)		
Description ▫ Installer approximativement 2/3 du barrage dans le cours d'eau entourant la zone de travaux. ▫ Assécher la zone ou travailler dans des eaux calmes. ▫ Retirer le barrage et répéter de l'autre côté du cours d'eau. ▫ Des matériaux tels que des sacs de sable, des palplanches, des sacs de sable surdimensionnés (1 m^3), des enrochements/médian barrières, des structures d'eau recouvertes de polyéthylène ou une combinaison de ces matériaux peuvent être utilisés. **Utilisation appropriée** ▫ Cours d'eau de moyenne ou de grande taille, trop grand pour les techniques de pompe ou d'une conduite de dérivation. ▫ Lorsque la décharge de sédiments et le passage des poissons sont des préoccupations. ▫ Réseau de l'eau anastomosé. ▫ Cours d'eau comportant des berges basses. ▫ Lorsqu'une période prolongée est nécessaire dans les cours d'eau.	**Avantages** ▫ Conserve l'écoulement de l'eau. ▫ Conserve le passage des poissons. ▫ Une DDP est peu probable en aval du franchissement. **Désavantages** ▫ Décharge de sédiments limitée à modérée selon le montant de travail effectué dans les cours d'eau. ▫ Peut assécher un long tronçon du cours d'eau. ▫ Un sauvetage de poissons pourrait être nécessaire au tronçon asséché. ▫ Vitesse du courant augmentée et chasse potentielle. ▫ Possibilité d'augmentation de l'érosion sur la berge opposée. ▫ Affouillement possible du barrage. ▫ Installation et construction lentes. ▫ Il est possible que des activités extensives dans les cours d'eau à l'aide d'équipement lourd soient nécessaires afin d'ériger les barrages. ▫ Nécessite une large emprise et le remaniement du terrain.	**Avantages** ▫ Conditions de travail relativement sèches ou sans aucun débit. ▫ Temps ample pour la construction du pipeline. ▫ Compatible avec les substrats consolidés. **Désavantages** ▫ Une source de matériaux est nécessaire pour la construction du barrage (p. ex. sacs de sable, palplanches, etc.). ▫ Il peut être nécessaire de pomper. ▫ Dispendieux. ▫ Matériaux spécialisés. ▫ Difficile à aligner. ▫ Construction et installation lentes. ▫ Affouillement possible du barrage. ▫ Préoccupations sécuritaires.

Tableau 3-1 : **TECHNIQUES DE CONSTRUCTION DE FRANCHISSEMENTS DE COURS D'EAU PAR DES PIPELINES (suite)**

Catégorie / Méthode	Considérations environnementales	Considérations de construction et d'ingénierie
Tranchée isolée / Dérivation du chenal (voir Figure 3-12)		
Description ▫ Dériver l'écoulement de l'eau dans un chenal abandonné ou dans un chenal préalablement construit. ▫ Utiliser des enrochements, des palplanches ou des structures d'eau recouvertes de polyéthylène. ▫ Le chenal peut être muni d'un revêtement extérieur imperméable ou un conduit flexible de dérivation de cours d'eau peut être installé. **Utilisation appropriée** ▫ Cours d'eau trop grand pour pompe ou une conduite de dérivation. ▫ Mieux utilisé lorsque le nouveau chenal est libre de substrat fin et causera une faible décharge de sédiments. ▫ Réseau anastomosé. ▫ Lorsque la décharge de sédiments et le passage des poissons sont des préoccupations.	**Avantages** ▫ Conserve l'écoulement de l'eau. ▫ Conserve le passage des poissons. ▫ Une DDP est peu probable en aval du franchissement. **Désavantages** ▫ À moins que le nouveau chenal soit muni d'un revêtement intérieur imperméable, une décharge de sédiments très élevée se produira lorsqu'il sera rincé. ▫ Assèche un long tronçon du cours d'eau. ▫ Un sauvetage de poissons pourrait être nécessaire au tronçon asséché. ▫ Construction et installation lentes. ▫ Affouillement possible du barrage de dérivation. ▫ Dommages à la berge et aux terres adjacentes.	**Avantages** ▫ Zone de travaux relativement sèche. ▫ Temps ample pour la construction du pipeline. ▫ Compatible avec les substrats consolidés. **Désavantages** ▫ Dispendieux. ▫ Une source de matériaux est nécessaire pour la construction du barrage (p. ex., sacs de sable, palplanches, etc.). ▫ Peut nécessiter d'un revêtement intérieur imperméable de chenal ou d'un conduit. ▫ Peut nécessiter une préparation élaborée, un nivellement et une restauration du chenal. ▫ Des matériaux spécialisés sont nécessaires. ▫ Construction et installation lentes. ▫ Affouillement possible du barrage de dérivation.
Sans Tranchée / Forage (voir Figure 3-13)		
Description ▫ Creuser un trou de forage sous le cours d'eau à partir des puits excavés de part et d'autre du cours d'eau, avec ou sans tubage de revêtement. ▫ Le forage humide à l'aide d'un avant-trou et d'un alésoir peut aussi être effectué. **Utilisation appropriée** ▫ Sols imperméables à texture fine. ▫ Nappe phréatique basse. ▫ Lorsque le lit du cours d'eau ne peut être perturbé. ▫ Fréquemment utilisé pour les fossés d'irrigation. ▫ Lorsque l'habitat des poissons et riverain ne peut être perturbé. ▫ Lorsque le cours d'eau est seulement légèrement encaissé et les pentes d'approche sont absentes ou légères.	**Avantages** ▫ Aucune décharge de sédiments. ▫ Aucune perturbation du lit ou des berges du cours d'eau. ▫ Conserve un écoulement de l'eau normal. ▫ Conserve le passage des poissons. ▫ Conserve un tampon végétal des deux côtés du cours d'eau. ▫ Une DDP est peu probable. **Désavantages** ▫ Des pompes peuvent être nécessaires afin d'évacuer l'infiltration des avant-trous sur les terres avoisinantes. ▫ Il est possible que l'eau du puisard cause une décharge de sédiments dans le cours d'eau. ▫ Nécessite de l'espace de travail additionnel pour les avant-trous, les déblais et les puisards. ▫ Possibilité d'affaissement du trou de forage.	**Avantages** ▫ Peut être rapide et économique avec les bonnes conditions. ▫ Minimise le nettoyage du lit et des berges. ▫ L'équipement de forage horizontal peut être disponible. **Désavantages** ▫ Peut-être lent ou impossible avec des conditions défavorables. ▫ Difficile avec des matières grossières ou des formations morainiques. ▫ Possibilité d'affaissement du trou de forage. ▫ Profondeur excessive du trou de forage lors de cours d'eau profondément encaissés ou de cours d'eau comportant des pentes d'approche modérées ou grandes. ▫ Une infiltration excessive dans les matières grossières peut rendre impossible de garder le trou au sec. ▫ Une infiltration dans les avant-trous pourrait causer une desquamation. ▫ Possiblement besoin d'équipement et de pompes spécialisées. ▫ Limité à environ 100 m.

Tableau 3-1 : **TECHNIQUES DE CONSTRUCTION DE FRANCHISSEMENTS DE COURS D'EAU PAR DES PIPELINES (suite)**

Catégorie / Méthode	Considérations environnementales	Considérations de construction et d'ingénierie
Sans Tranchée / Forage horizontal : par poussée (*Pipe jacking*)/ par percussion (*Pipe ramming*) - (pas de Figure)		
Description ▫ Pousser ou enfoncer le caisson ou le tuyau sous le cours d'eau **Utilisation appropriée** ▫ Sols imperméables à texture fine. ▫ Nappe phréatique basse. ▫ Les fossés d'irrigation. ▫ Peut aussi être utilisé dans un substrat à texture grossière. ▫ Cours d'eau étroits à modérés (p. ex. <30 m). ▫ Lorsque le cours d'eau est seulement légèrement encaissé et les pentes d'approche sont absentes ou légères.	**Avantages** ▫ Aucune décharge de sédiments. ▫ Aucune perturbation du lit du cours d'eau. ▫ Aucune perturbation des berges. ▫ Conserve un écoulement de l'eau normal. ▫ Conserve le passage des poissons. ▫ Conserve un tampon végétal des deux côtés du cours d'eau. ▫ Une DDP est peu probable. **Désavantages** ▫ Des pompes peuvent être nécessaires afin d'évacuer l'infiltration des avant-trous sur les terres avoisinantes. ▫ Il est possible que l'eau du puisard cause une décharge de sédiments dans le cours d'eau. ▫ Nécessite de l'espace de travail additionnel pour les avant-trous, le terril et les puisards.	**Avantages** ▫ Peut être rapide avec les bonnes conditions. ▫ Minimise le nettoyage du lit et des berges. ▫ Les possibilités d'affaissement du trou de forage sont peu probables. ▫ Des diamètres supérieurs de tuyaux peuvent être accommodés. **Désavantages** ▫ Peut-être lent avec des conditions défavorables. ▫ Affaissement potentiel de l'avant-trou à l'avant du ram. ▫ Infiltration dans l'avant-trou. ▫ Une infiltration excessive dans les matières grossières peut rendre impossible de garder le trou au sec. ▫ De l'équipement spécialisé peut être nécessaire. ▫ Problèmes de corrosion possibles à cause du dénudement du revêtement. ▫ Relativement sans précision. ▫ Limité à une longueur d'environ 50 m. ▫ Profondeur excessive du trou de forage lors de cours d'eau profondément encaissés ou de cours d'eau comportant des pentes d'approche modérées ou grandes.
Sans Tranchée / Forage dirigé (voir Figures 3-14 et 3-15)		
Description ▫ Une foreuse à forage oblique est utilisée pour forer sous le cours d'eau et, lorsqu'il est pratique de le faire, de forer les pentes d'approche. **Utilisation appropriée** ▫ Cours d'eau comportant un habitat sensible et où aucune activité n'est permise. ▫ Les cours d'eau où une activité dans ses eaux pourrait entraîner une DDP. ▫ Les zones à pentes d'approche instables. ▫ Préoccupations importantes quant à l'esthétique (par exemple parcs).	**Avantages** ▫ Aucune décharge de sédiments. ▫ Aucune perturbation du lit du cours d'eau. ▫ Aucune perturbation des berges. ▫ Possible d'éviter une perturbation des pentes d'approche. ▫ Conserve un écoulement de l'eau normal. ▫ Conserve le passage des poissons. ▫ Une DDP est peu probable. **Désavantages** ▫ Perturbation de la zone de forage et de la zone ciblée (zone très fracturée susceptible de contaminer les nappes ou même atteindre le cours d'eau à franchir). ▫ Évacuation des fluides de forage. ▫ Des fractures dans le substrat pourraient décharger des fluides pressurisés de forage dans le cours d'eau. ▫ Le fluide de forage circulant pourrait rincer des cavités sous le cours d'eau et les berges ce qui entraînerait des dolines. ▫ Possibilité de déversement des puisards de forage vers le cours d'eau. ▫ Une zone de grande surface pourrait être nécessaire sur les plaines d'inondation.	**Avantages** ▫ Élimine le nettoyage et la remise en état entre les points d'entrée et de sortie. ▫ Travaux réduits pour la réparation et la remise en état des berges. ▫ Réduction de frais de remise en état. ▫ Réduction de l'entretien à long terme. **Désavantages** ▫ Modérément à très dispendieux. ▫ Le succès dépend du substrat/roche-mère. ▫ Équipement spécialisé. ▫ Installation et construction lentes. ▫ Limité à l'arc qui peut être foré pour l'avant-trou (angles d'entrée et de sortie de 10-20°). ▫ Un arc limite que le tuyau peut enfiler dans le trou, plus particulièrement les tuyaux de grand diamètre. ▫ Peut nécessiter quelques tentatives. ▫ Le système de forage peut rester coincé dans le trou et l'équipement peut être perdu, surtout lors des alésages de grand diamètre. ▫ Aucune garantie que le forage sera un succès. ▫ Peut endommager le tuyau ou la gaine.

Tableau 3-1 : **TECHNIQUES DE CONSTRUCTION DE FRANCHISSEMENTS DE COURS D'EAU PAR DES PIPELINES (suite)**

Catégorie / Méthode	Considérations environnementales	Considérations de construction et d'ingénierie
Sans Tranchée / Tunnel (pas de Figure)		
Description ▫ Utiliser un petit tunnelier pour créer un tunnel pour le tuyau ou la gaine. **Utilisation appropriée** ▫ Pipelines à grand diamètre. ▫ Les franchissements de cours d'eau qui comprennent amplement d'espace pour l'entreposage de déblais extraits des tunnels creusés et des puits excavés. ▫ Préoccupations importantes quant à l'esthétique (p. ex., parcs).	**Avantages** ▫ Aucune décharge de sédiments. ▫ Aucune perturbation du lit du cours d'eau. ▫ Aucune perturbation des berges. ▫ Aucune perturbation des pentes d'approche. ▫ Conserve un écoulement de l'eau normal. ▫ Conserve le passage des poissons. ▫ Une DDP est peu probable. **Désavantages** ▫ Les déblais et la boue liquide du tunnel nécessitent de grandes surfaces. ▫ Évacuation des déblais du tunnel. ▫ Une zone de grande surface pourrait être nécessaire sur les plaines d'inondation.	**Avantages** ▫ Peut être utilisé dans la plupart des substrats au- dessus ou en dessous de la nappe phréatique. ▫ Élimine le nettoyage et la remise en état du lit et des berges du cours d'eau. **Désavantages** ▫ De la machinerie ad hoc et très spécialisée est nécessaire. ▫ Éventuellement limité par la longueur du tuyau qui sera inséré et les forces de friction imposées (techniques plus ou mois restrictives à ce sujet). ▫ Coûts élevés. ▫ Le matériau excavé et la boue liquide du tunnel peuvent nécessiter une évacuation ou des bacs de décantation et un traitement de l'eau si des lubrifiants chimiques ont été utilisés.
Aérienne / Fixation sur pont (pas de Figure)		
Description ▫ Fixer le pipeline sur la structure d'un pont existant. **Utilisation appropriée** ▫ Grand cours d'eau comportant un habitat sensible et où aucune activité dans les circuits liquides n'est permise. ▫ Les zones à pentes d'approche instables. ▫ Préoccupations importantes quant à l'esthétique (p. ex., parcs). ▫ Là où un pont déjà existant a été construit. ▫ Gorges et canyons profonds. ▫ Zones urbaines où les ponts sont abondants.	**Avantages** ▫ Aucune décharge de sédiments. ▫ Aucune perturbation du lit du cours d'eau. ▫ Aucune perturbation des berges. ▫ Conserve un écoulement de l'eau normal. ▫ Conserve le passage des poissons. ▫ Une DDP est peu probable. **Désavantages** ▫ Impact visuel possible. ▫ Sécurité et possibilité d'introduction de produits dans le cours d'eau à cause de dommages causés par une tierce partie.	**Avantages** ▫ Élimine le nettoyage et la remise en état du lit et des berges du cours d'eau. **Désavantages** ▫ Potentiellement dispendieux. ▫ Dépend du design du pont. ▫ Une équipe et un équipement spécialisés seront nécessaires. ▫ Construction et installation lentes. ▫ Potentiel de dommages causés par une tierce partie. ▫ L'approbation régulatrice pourrait être retardée ou refusée. ▫ Un entretien continu est exigé. ▫ Courbures d'approche peuvent empêcher le raclage ou ramonage de la conduite.
Aérienne / Travée ou pont autoportant (pas de Figure)		
Description ▫ Construire un pont ou une butée pour transporter le pipeline. **Utilisation appropriée** ▫ Grand cours d'eau comportant un habitat sensible et où aucune activité dans les circuits liquides n'est permise. ▫ Les zones à pentes d'approche instables. ▫ Gorges et canyons profonds.	**Avantages** ▫ Aucune décharge de sédiments. ▫ Aucune perturbation du lit du cours d'eau. ▫ Aucune perturbation des berges. ▫ Conserve un écoulement de l'eau normal. ▫ Conserve le passage des poissons. ▫ Une DDP est peu probable. **Désavantages** ▫ Impact visuel. ▫ Sécurité et possibilité d'introduction de produits dans le cours d'eau à cause de dommages causés par une tierce partie. ▫ La construction dans les cours d'eau est nécessaire pour les butées du pont. ▫ Pourrait déclencher un examen réglementaire additionnel.	**Avantages** ▫ Élimine le nettoyage et la remise en état du lit et des berges du cours d'eau. **Désavantages** ▫ Très dispendieux. ▫ Une équipe et un équipement spécialisés seront nécessaires. ▫ Construction et installation lentes. ▫ Potentiel de dommages causés par une tierce partie. ▫ L'approbation régulatrice pourrait être retardée ou refusée. ▫ Un entretien continu est exigé. ▫ Courbures d'approche peuvent empêcher le raclage ou ramonage de la conduite. ▫ Exige que le design réponde aux exigences de la Loi sur la protection des eaux navigables.

3.3 Critères de choix d'une technique/technologie de traverse

Le choix d'une technique/technologie de traverse fait appel à un certain nombre de critères tels que les contraintes techniques, la sécurité environnementale et civile ainsi que l'acceptabilité sociale et économique. Ces différents critères sont discutés dans les sections suivantes.

3.3.1 Contraintes techniques

Les contraintes techniques qui peuvent influencer le choix d'une technique/technologie de traverse peuvent être de type hydrologique, géotechnique ou géographique.

3.3.1.1 Contraintes hydrologiques (crue d'inondation, de rupture de barrages, etc.)

En fonction des conditions locales, l'évaluation hydrologique devrait inclure : l'hydrologie de la rivière, le contrôle du drainage sur les pentes d'approche ainsi que l'érosion du lit. L'hydrologie de la rivière doit être évaluée pour identifier les débits qui pourraient survenir au cours des travaux ainsi que les débits potentiels lors d'une inondation. Cette évaluation peut aussi donner une indication sur les périodes à éviter pour les travaux. La présence d'un barrage en amont de la traverse devrait être prise en compte car la rupture d'un tel barrage pourrait avoir un effet sur le pipeline.

La largeur du cours d'eau et le débit d'eau déterminent en grande partie la technique de traverse à aménager. Deux cours d'eau de même largeur peuvent présenter des débits d'eau très différents. Un débit important avec de fortes variations de niveau est relié à une pente de terrain prononcée. Pour un cours d'eau ayant un fort débit, le tuyau installé devrait pouvoir résister à long terme à la pression exercée par l'eau.

3.3.1.2 Contraintes géotechniques

Le choix d'une technique de traverse doit tenir compte des caractéristiques intrinsèques du sol meuble, de la topographie locale (profil de la traverse), de la stratigraphie de la zone à franchir et de tous les facteurs extérieurs qui peuvent venir affecter ces derniers (contamination par des sols acides, migration des sols fins, sismicité, niveau ou profil de la nappe, charges externes, présence de végétation, risque potentiel d'érosion, etc.).

Les propriétés indispensables aux analyses de sols meubles sont :

- pour les sols fins (argiles) : la résistance drainée et non drainée, la sensibilité, les coefficients de compressibilité, la pression de pré-consolidation, la teneur en eau naturelle, les limites d'Atterberg, les angles de frottement interne et le poids volumique ;
- pour les sols granulaires (sables) ; la granulométrie, l'indice de densité relative (I_D), les angles de frottement interne, le poids volumique et finalement le risque de liquéfaction.

3.3.1.3 Contraintes géographiques

La traverse en milieu rural ne présente pas toujours les mêmes difficultés qu'une traverse en milieu urbain. L'existence de nombreuses installations en milieu urbain peut restreindre le choix d'une technique/technologie de traverse. Des méthodes sans tranchée, minimisant les perturbations du trafic et des travaux de surface, sont donc souvent préférées dans ces zones. Les questions d'esthétique peuvent également influencer le choix selon la zone géographique.

3.3.2 Sécurité environnementale et civile selon le type et la quantité d'hydrocarbure

Les contraintes environnementales incluent la sensibilité des habitats de poissons, l'entrave à la libre circulation des poissons, la présence d'espèces protégées, la navigabilité, la proximité des résidences ou les utilisateurs d'eau en aval. Le degré de nocivité des hydrocarbures n'est pas le même pour tous les types et les conséquences d'une rupture peuvent varier selon la technique de traverse pour un type donné. Les propriétés physicochimiques (densité, viscosité, composition) du pétrole brut ont une influence directe sur le design et le comportement des pipelines (Guo *et coll.*, 2005).

3.3.3 Considérations économiques

L'aspect économique doit être examiné dans le processus de sélection d'une technologie de traverse. Cet aspect est relié au niveau de risque et à la sensibilité du milieu. Un projet de traverse aura pour conséquence d'induire un risque pour une ressource donnée. Des mesures de protection de cette ressource sont souvent nécessaires. Idéalement, le coût des mesures de protection devrait être lié au niveau de risque ainsi qu'à la sensibilité du milieu. Pour cette raison, les coûts économiques associés à diverses techniques de construction doivent être équilibrés par les effets environnementaux négatifs potentiels.

3.3.4 Acceptabilité sociale

L'acceptabilité sociale est reliée au rejet ou à l'acceptation du projet. Par conséquent, la consultation de la population concernée est souvent nécessaire afin de tenir compte de leur préoccupation dans le choix d'une technique de traverse.

3.4 Risque de défaillance de chacune des techniques/technologies de traverse

Cette section vise à estimer un risque de défaillance des techniques/technologies de traverse sur la base des incidents recensés par le passé. Ce risque demeure statistique et sa fiabilité dépend évidemment de la quantité des données disponibles.

3.4.1 Données historiques sur les défaillances: causes et conséquences selon la technique

Le terme « incident » est souvent utilisé dans les inventaires statistiques. Il est plus large que celui d'« accident », car il englobe les évènements non autorisés présentant un risque d'accident (sans qu'il y ait spécialement eu un accident). Ainsi, cette section du rapport abordera les incidents, incluant les accidents. Basé sur les critères de l'Office national de l'énergie (ONE) (2015), un « incident » englobe ce qui suit :

- la mort d'une personne ou une blessure grave ;
- un effet négatif significatif sur l'environnement ;
- un incendie ou une explosion non intentionnelle ;
- un rejet d'hydrocarbures à basse pression de vapeur ou non intentionnel non confiné de plus de 1,5 m^3 ;
- un rejet de gaz ou d'hydrocarbures à haute pression de vapeur non intentionnel ou non contrôlé ;
- l'exploitation d'un pipeline au-delà de ses tolérances de conception.

Une revue des statistiques disponibles sur les incidents de pipelines est effectuée pour en identifier la fréquence, les causes et les conséquences.

Selon l'ONE (2011), au Canada, certains pipelines construits selon des méthodes particulières ont présenté un taux de rupture plus faible que d'autres. Plusieurs facteurs expliquent une variation des taux de rupture, notamment la qualité du revêtement de la canalisation et de la protection cathodique, l'amélioration des méthodes de construction, l'efficacité des essais sous pression et l'instauration de programmes de gestion de l'intégrité plus précis et adaptés.

Le Bureau de la Sécurité des Transports (BST) (2015) souligne la présence de plusieurs accidents lors de la réparation d'installations ou de la mise en service de nouvelles installations, ainsi que lors de la conversion d'un gazoduc en oléoduc et lors du changement de pression d'exploitation qui en résulte.

La Figure 3-16 cartographie au Canada l'emplacement des incidents liés à des pipelines règlementés par l'ONE. Les incidents, qui sont survenus entre janvier 2009 et mars 2011, sont classés selon trois niveaux d'importance. Tel qu'indiqué sur le graphique, la liste des conditions décrites pour chacun des niveaux n'est pas exhaustive.

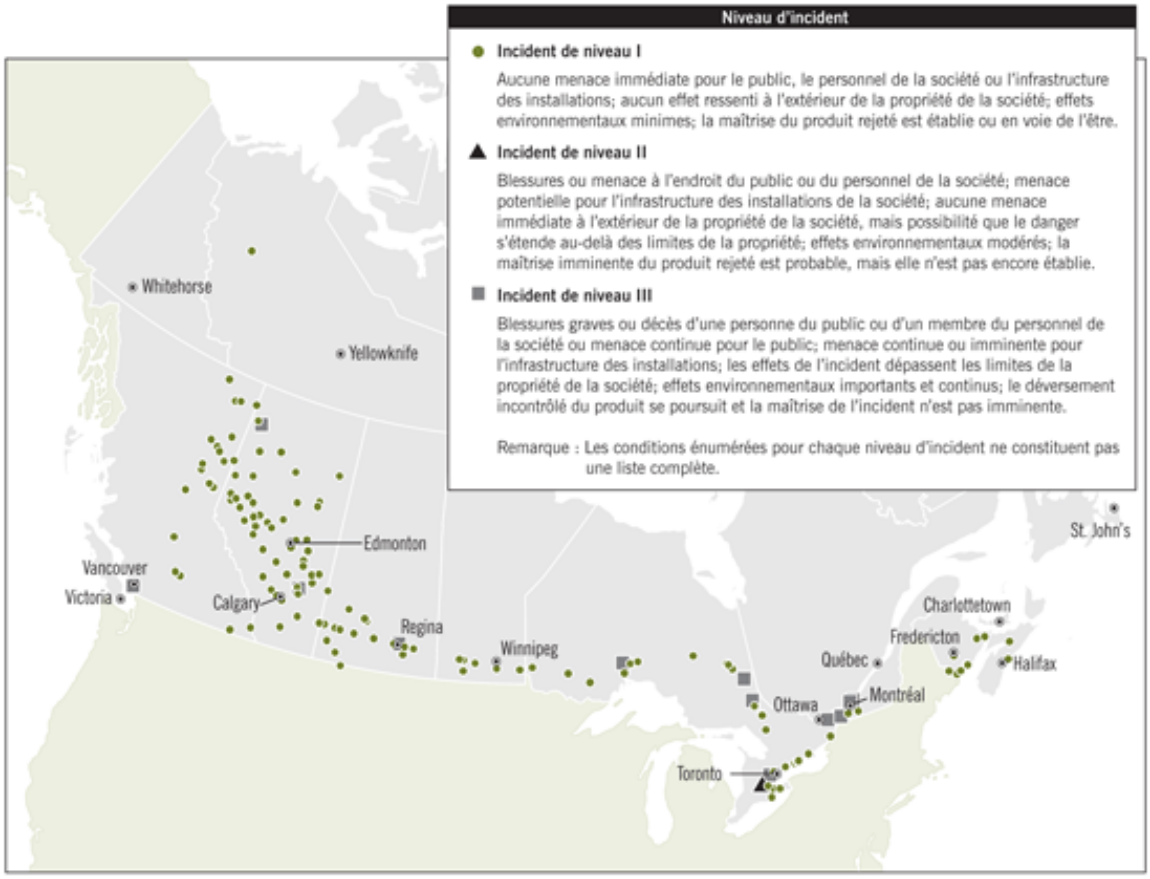


Figure 3-16 : Localisation des incidents liés à des pipelines régis par l'ONE, de janvier 2009 à mars 2011 (BVG, 2011)

3.4.2 Évaluation statistique des risques de défaillance pour chaque technique selon le site

Les données à disposition au moment de la rédaction du présent rapport ne permettent pas d'évaluer le risque de défaillance pour chaque technique selon un site donné. Une telle évaluation nécessite une grande base de données spécifique aux incidents survenus au niveau des traverses de cours d'eau.

3.5 Sélection d'une technique de traverse sur la base du risque

Des risques pouvant être encourus pendant la construction ou après la mise en opération de la conduite, des mesures appropriées doivent être planifiées et mises en application afin de prévenir ou de réduire ces effets néfastes. Cette section donne un bref aperçu des risques pendant et après la construction d'une traverse de cours d'eau.

3.5.1 Risques liés à la construction

Chaque technique de traversée des cours d'eau possède ses propres risques ; alors que certaines sont difficiles à planifier, d'autres demandent des défis pour atténuer les problèmes qui peuvent survenir lors de la construction. Les risques associés à chaque technique varient en fonction de plusieurs facteurs, tels le but du projet, l'expérience du constructeur, le diamètre de la conduite, et la saison de construction.

Le Tableau 3-2 résume les problèmes associés aux diverses techniques rencontrés le plus souvent et identifie les risques environnementaux qui sont associés à chaque méthode. Il donne aussi des indications sur les mesures d'atténuation et les plans d'urgence qui devraient être considérés avant le début des travaux.

Tableau 3-2 : Considérations de risques pour les méthodes de franchissement des cours d'eau (CFCEPC, 1999)

Notes :

1. N/D = non disponible (aucune donnée des cas types)
2. Pb = Probabilité de manifestation du problème

   H - Se manifeste dans la plupart des cas ; M - Se manifeste souvent ; R - Rare mais critique

Problèmes potentiels sélectionnés: TERA (1996), Harder (1996)	Impacts environnementaux	Pb[2]	Mesures d'atténuation
Tranchée ouverte / Charrue défonceuse type			
N/D[1]			
Tranchée ouverte / Trancheuse à roue-pelle			
N/D[1]			
Tranchée ouverte / Excavatrice (Petits et grand cours d'eau)			
Périodes prolongées inattendues dans le cours d'eau.	Charge solide et dépôt de sédiments prolongés.	M	Travailler jusque dans la nuit, assurer que les autorisations sont en place pour des périodes prolongées, obtenir plus d'équipement de plus grande taille.
Érosion dans les tas de déblais entreposés au milieu du cours d'eau.	Charge solide et dépôt de sédiments prolongés.	M	Transporter et entreposer autant de déblais que possible aux berges.
L'équipement est trop petit et les activités dans les cours d'eau sont prolongées.	Charge solide et dépôt de sédiments prolongés.	M	Obtenir plus d'équipement et de plus grande taille.
Substrat à fine texture.	Augmentation des matières en suspension introduites dans la cours d'eau durant l'excavation de la tranchée, le remblai et provenant de la zone d'entreposage des déblais.	H	Préparer un plan de contrôle de sédiments à l'avance.
Perte de la tranchée à cause de l'instabilité des matériaux du lit.	Charge solide et dépôt de sédiments prolongés.	M	Travailler jusque dans la nuit, assurer que les autorisations sont en place pour des périodes prolongées, obtenir plus d'équipement de plus grande taille.
Tranchée ouverte / Pelle à benne trainante			
Défaillance de l'équipement.	Charge solide et dépôt de sédiments prolongés.	M	Compléter avec l'équipement apte à reprendre l'activité dans un délai réduit (équipement de réserve).
Périodes prolongées dans le cours d'eau.	Charge solide et dépôt de sédiments prolongés.	M	Travailler jusque dans la nuit, assurer que les autorisations sont en place pour des périodes prolongées, obtenir plus d'équipement de plus grande taille.

Problèmes potentiels sélectionnés: TERA (1996), Harder (1996)	Impacts environnementaux	Pb[2]	Mesures d'atténuation
Substrat à fine texture.	Augmentation des matières en suspension introduites dans la tranche d'eau durant l'excavation de la tranchée, le remblai et provenant de la zone d'entreposage du terril.	H	Préparer un plan de contrôle de sédiments à l'avance, assurer que les autorisations sont en place pour un franchissement alternatif (p. ex., isolé).
Perte de la tranchée à cause de l'instabilité des matériaux du lit.	Charge solide et dépôt de sédiments prolongés.	H	Travailler jusque dans la nuit, assurer que les autorisations sont en place pour des périodes prolongées, obtenir plus d'équipement de plus grande taille.
Tranchée isolée / Conduite de dérivation			
Non-étanchéité du barrage ou de la bride.	Préoccupations augmentées de pompage et d'évacuation d'eau, inondation de la zone de travaux et faille du barrage.	H	Assurer qu'il y a suffisamment de matériaux disponibles pour conserver l'étanchéité des barrages.
Le diamètre de la conduite de dérivation est insuffisant.	Débit incontrôlé dans la zone isolée.	M	Assurer que les dimensions de la conduite de dérivation sont à 150 % du débit maximal anticipé et que des pompes sont en réserve pour assister une dérivation partielle.
La conduite de dérivation est trop longue, droite ou grosse pour atteindre le cours d'eau.	Perturbation exagérée de l'habitat riverain, des berges et du lit.	M	Considérer la possibilité d'une technique alternative.
Problèmes d'évacuation des eaux dans la tranchée.	Souvent, l'eau pompée sur la terre reflue dans le cours d'eau.	M	Disposer de pompes de réserve additionnelles à la portée de la main et identifier des bacs et des étangs de décantation appropriés.
Le gel.	Inondation de la zone de travaux.	M	Assurer qu'il y a suffisamment d'équipement (p. ex., excavatrice) disponible pour retirer la glace.
La conduite de dérivation peut être trop courte ou l'excavation de la tranchée devient trop large et menace l'installation de la conduite.	Augmentation des matières en suspension introduites dans la tranche d'eau dans le cas d'un affaissement de la conduite de dérivation.	M	Disposer de pompes de réserve additionnelles à portée de main afin d'assister à une dérivation partielle.
Les pentes d'approche sont trop escarpées pour enfiler les courbures trop prononcées dans le tuyau sous la conduite de dérivation.	Nivellement et remise en état excessive du terrain et des berges.	M	Remplacer la conduite de dérivation par des pompes à haut volume ou par un barrage et une pompe afin de faciliter la mise en place du tuyau.
Infiltration d'eau souterraine dans la zone de travaux.	Préoccupations augmentées de pompage et d'évacuation d'eau.	H	Disposer de pompes de réserve additionnelles à portée de main et identifier des surfaces de décantation convenables.
Tranchée isolée / Barrage et pompe			
Les barrages ne sont pas très étanches.	Préoccupations augmentées de pompage et d'évacuation d'eau, potentiel d'inondation de la zone de travaux et faille du barrage.	H	Assurer qu'il y a suffisamment de matériaux disponibles pour conserver l'étanchéité des barrages.

Problèmes potentiels sélectionnés: TERA (1996), Harder (1996)	Impacts environnementaux	Pb[2]	Mesures d'atténuation
La capacité de la pompe est insuffisante.	Inondation de la zone de travaux et préoccupations augmentées de pompage et d'évacuation d'eau.	M	Disposer de pompes de réserve additionnelles à portée de main et identifier des surfaces de décantation convenables.
Défaillance de la pompe.	Inondation de la zone de travaux et préoccupations augmentées de pompage et d'évacuation d'eau.	M	Disposer de pompes de réserve additionnelles à portée de main.
Débordement ou faille du barrage.	Augmentation des matières en suspension introduites dans la tranche d'eau dans le cas d'un affaissement.	M	Disposer de pompes de réserve additionnelles à portée de main et identifier des surfaces de décantation convenables.
Le gel.	Inondation de la zone de travaux.	M	Assurer qu'il y a suffisamment d'équipement (p. ex., excavatrice) disponible pour retirer la glace.
Problèmes d'évacuation des eaux dans la tranchée.	Souvent, l'eau pompée sur la terre reflue dans le cours d'eau.	M	Disposer de pompes de réserve additionnelles à portée de main et identifier des bacs et des étangs de décantation appropriés.
Infiltration d'eau souterraine dans la zone de travaux.	Préoccupations augmentées de pompage et d'évacuation d'eau.	H	Disposer de pompes de réserve additionnelles à portée de main et identifier des surfaces de décantation convenables.
La capacité de la pompe est insuffisante.	Inondation de la zone de travaux et préoccupations augmentées de pompage et d'évacuation d'eau.	M	Disposer de pompes de réserve additionnelles à portée de main et identifier des surfaces de décantation convenables.
Tranchée isolée / Pompe à haut volume			
Défaillance de la pompe.	Inondation de la zone de travaux et préoccupations augmentées de pompage et d'évacuation d'eau.	M	Disposer de pompes de réserve additionnelles à portée de main.
Le gel.	Inondation de la zone de travaux.	M	Assurer qu'il y a suffisamment d'équipement (p. ex., excavatrice) disponible pour retirer la glace.
Problèmes d'évacuation des eaux dans la tranchée.	Préoccupations augmentées de pompage et d'évacuation d'eau.	M	Disposer de pompes de réserve additionnelles à portée de main et identifier des surfaces de décantation convenables.
Infiltration d'eau souterraine dans la zone de travaux.	Préoccupations augmentées de pompage et d'évacuation d'eau.	H	Disposer de pompes de réserve additionnelles à portée de main et identifier des surfaces de décantation convenables.
Problèmes d'évacuation des eaux dans la tranchée.	Souvent, l'eau pompée sur la terre reflue dans le cours d'eau.	M	Disposer de pompes de réserve additionnelles à portée de main et identifier des surfaces de décantation convenables.

Problèmes potentiels sélectionnés: TERA (1996), Harder (1996)	Impacts environnementaux	Pb[2]	Mesures d'atténuation
Tranchée isolée / Batardeau			
Infiltration d'eau souterraine dans la zone de travaux.	Préoccupations augmentées de pompage et d'évacuation d'eau.	H	Disposer de pompes de réserve additionnelles à portée de main et identifier des surfaces de décantation convenables.
La capacité de la pompe est insuffisante.	Inondation de la zone de travaux et préoccupations augmentées de pompage et d'évacuation d'eau.	M	Disposer de pompes de réserve additionnelles à portée de main et identifier des surfaces de décantation convenables.
Défaillance de la pompe.	Inondation de la zone de travaux et préoccupations augmentées de pompage et d'évacuation d'eau.	M	Disposer de pompes de réserve additionnelles à portée de main.
Rupture du barrage.	Inondation de la zone de travaux, augmentation des matières en suspension introduites dans la tranche d'eau et sécurité.	M	Disposer de matériaux de construction de barrage additionnels à portée de main (p. ex., barrages médians et barrières type ''*aquadams*'').
Tranchée isolée / Dérivation du chenal			
Érosion et lavage de grandes quantités de matériaux dans le « nouveau » chenal, surtout s'il n'est pas muni d'un revêtement intérieur imperméable.	Inondation, augmentation des matières en suspension introduites dans la tranche d'eau.	H	Munir le chenal d'un revêtement intérieur imperméable ou utiliser une structure ou un tuyau de dérivation.
Rupture du barrage.	Inondation de la zone de travaux, augmentation des matières en suspension introduites dans la tranche d'eau et sécurité.	M	Disposer de matériaux de construction de barrage additionnels à portée de main (p. ex., barrages médians et barrières type ''*aquadams*'').
Sans tranchée / Forage			
Affaissement du trou de forage.	La défaillance de la foreuse mène à de nouveaux essais et la possibilité d'exigences additionnelles pour la terre.	M	Assurer que suffisamment de terres sont obtenues afin de tenter des nouveaux essais et qu'un plan de protection est en place pour minimiser la perturbation de la terre.
Les niches se remplissent d'eau.	L'incapacité de vider l'eau dans les niches mènera à l'abandon de la technique.	M	Assurer que les mesures sont en place pour maîtriser le dénoyage et que les autorisations sont en place pour des techniques alternatives.

Problèmes potentiels sélectionnés: TERA (1996), Harder (1996)	Impacts environnementaux	Pb[2]	Mesures d'atténuation
Sans tranchée / Forage horizontal : par poussée (*Pipe jacking*)/ par percussion (*Pipe ramming*)			
Un sol trop dur et rocheux empêche la facile progression du forage horizontal.	La défaillance mène à des nouveaux essais et la possibilité d'exigences additionnelles pour la terre.	M	Assurer que suffisamment de terres sont obtenues afin de tenter des nouveaux essais et que les autorisations sont en place pour des techniques alternatives.
Les niches se remplissent d'eau.	L'incapacité de vider l'eau dans les puits mènera à l'abandon de la technique.	M	Assurer que les mesures sont en place pour maîtriser le dénoyage et que les autorisations sont en place pour des techniques alternatives.
Sans tranchée / Forage dirigé			
Perte de la circulation, trou affaissé, train de forage coincé, perte d'outils.	La défaillance mène à des nouveaux essais et la possibilité d'exigences additionnelles pour la terre.	M	Assurer que suffisamment de terres sont obtenues afin de tenter des nouveaux essais et que les autorisations sont en place pour des techniques alternatives.
Forer dans le lit du cours d'eau en créant une considérable infiltration de boue dans celui-ci.	Charge solide et dépôt de sédiments prolongés.	M	Assurer qu'un plan d'urgence soit en place pour la boue excavée.
Forer dans une couche de sol meuble puis le lit du cours d'eau en créant une considérable infiltration de boue et de sédiments dans celui-ci.	Charge solide et dépôt de sédiments prolongés.	M	Assurer qu'un plan d'urgence soit en place pour la boue excavée.
Lavement des cavités et affaissement du tracé.	Dolines sur le tracé.	M	Assurer qu'il y a suffisamment d'équipement sur le site pour décaper la terre végétale, pour niveler les dolines et remettre la zone en état.
	Dolines sous le cours d'eau.	M	Assurer qu'un plan d'urgence soit en place pour la boue excavée.
Aérienne / Fixation sur pont			
Cible de vandalisme.	Déversement du produit.	R	Assurer que la compagnie dispose d'un plan d'action en cas d'urgence sur mesure pour aborder le problème.
Aérienne / Pont autoportant			
Cible de vandalisme.	Déversement du produit.	R	Assurer que la compagnie dispose d'un plan d'action sur mesure en cas d'urgence pour aborder le problème.

3.5.2 Risques encourus après la mise en opération de la conduite.

Les considérations suivantes devraient être analysées : la stabilité à long terme des talus et des berges, l'érosion et la sédimentation, l'entretien et le suivi, et l'utilisation de l'emprise à d'autres fins.

3.5.3 Coûts directs et indirects

Le Tableau 3-3 et le Tableau 3-4 résument les coûts relatifs, directs et indirects, attendus et qui sont reliés aux diverses techniques de construction.

Tableau 3-3 : Coûts relatifs des techniques de franchissement de cours d'eau (CFCEPC, 1999)

Méthode	Technique	Petits cours d'eau largeur <10 m	Moyens cours d'eau largeur 10-20 m	Grands cours d'eau largeur >20 m
Tranchée ouverte	i) Charrue défonceuse type	Bas	Bas	Bas
	ii) Trancheuse à roue-pelle	Bas	Bas	s.o.
	iii) Excavatrice	Bas	Bas	Bas à élevé
	iv) Pelle à benne trainante	Élevé	Élevé	Élevé
	v) Dragage	Élevé	Élevé	Élevé
Tranchée isolée	i) Conduite de dérivation	Bas à modéré	Modéré	s.o.
	ii) Barrage et pompe	Bas à modéré	Modéré	s.o.
	iii) Dérivation par pompe à haut volume	Bas à modéré	Modéré	s.o.
	iv) Batardeau	Élevé	Élevé	Élevé
	v) Dérivation du chenal	Élevé	Élevé	Élevé
Sans tranchée	i) Forage	Bas à modéré	Modéré	modéré
	ii) Forage horizontal : à percussion et par poussée	Bas à modéré	Modéré	s.o.
	iii) Forage dirigé	Modéré à élevé	Modéré à élevé	modéré à élevé
	iv) Tunnel	Très élevé	Très élevé	Très élevé
Aérienne	i) Fixation sur pont*	Modéré à élevé	Modéré à élevé	Élevé
	ii) Pont ou travée autoportants	Très élevé	Très élevé	Très élevé

Notes :

1. La charge estimative des coûts relatifs dans le tableau ne signifie pas que la méthode de franchissement est généralement convenable pour l'environnement - voir le Tableau 3-1

2. s.o. = sans objet

3. * Le pont qui servira à fixer le pipeline dans l'option « fixation sur pont » doit se trouver sur le tracé du pipeline sinon des frais additionnels seront nécessaires pour atteindre le pont.

Tableau 3-4 : Impératifs économiques des méthodes de franchissement des cours d'eau (CFCEPC, 1999)

Activités et exigences des franchissements de cours d'eau	Techniques à tranchée ouverte					Techniques isolées					Techniques sans tranchée				Techniques aériennes	
	Charrue défonceuse	Trancheuse à roue-pelle	Excavatrice	Pelle à benne trainante	Dragage	Conduite de dérivation	Barrage et pompe	Pompe à haut volume	Batardeau	Dérivation du chenal	Forage	Forage horizontal : à percussion et par poussée	Forage dirigé	Tunnel	Fixation sur pont	Pont ou travée autoportants
Design et enquête géotechnique	B	B	M	M	M	M	M	M	E	E	M	M	E	M	E	E
Disponibilité d'entrepreneurs expérimentés et capacité d'obtenir des soumissions concurrentielles	M	B	M	E	E	M	M	M	E	E	M	E	E	E	E	E
Permis et autorisations spéciales	M	M	M	M	M	M	M	M	M	E	B	B	B	B	E	E
Espace de travail temporaire additionnel	B	B	M	E	E	M	M	M	E	E	M	M	E	M	B	E
Arpentage	B	B	M	M	M	M	M	M	M	E	M	M	E	B	M	E
Déblaiement	B	B	M	E	E	M	M	M	M	E	M	M	M	M	B	E
Nivellement	B	B	M	E	E	M	M	M	M	E	M	M	M	M	B	E
Fouille en tranchée et forage	B	B	M	E	E	M	M	M	E	E	M	M	E	E	E	E
Matériaux spéciaux	M	M	M	M	M	E	E	M	E	E	M	M	E	M	E	E
Équipement spécial	M	M	M	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
Perturbation de la navigation et des loisirs	B	B	M	E	E	E	E	E	E	E	X	X	X	X	X	X
Dénoyage	X	B	M	M	M	E	E	E	E	E	E	E	X	E	X	X
Mesures spéciales d'atténuation dans les circuits liquides	B	B	M	M	M	E	E	M	E	E	X	X	X	X	X	X
Remise en état des berges	M	M	M	E	M	M	M	M	E	E	X	X	X	X	X	X
Inspection	B	B	M	E	E	E	E	E	E	E	M	M	E	M	E	E
Accès au site et à la zone de travaux	B	B	M	E	E	M	M	M	E	E	M	M	E	M	E	E
Opérations et entretien	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	B	B	B	B	E	E
Compensation de l'habitat	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	X	X	X	X	X	X

Notes :

E Élevé = Exigences de temps et de frais plus grandes que prévu avec une construction traditionnelle (bineuse).

M Modéré = Exigences de temps et de frais d'une construction traditionnelle.

B Bas = Exigences de temps et de frais inférieurs à une construction traditionnelle.

X Néant = Aucune exigence de temps ou de frais.

3.5.4 Considérations dans la sélection des méthodes de franchissement

Le Tableau 3-5 indique les principales considérations à retenir pour la sélection des méthodes de franchissement des cours d'eau.

Tableau 3-5 : Considérations de sélection de technique de construction (CFCEPC, 1999)

Méthode de construction dans les cours d'eau		Petit cours d'eau largeur <10 m			Moyen cours d'eau largeur de 10 - 20 m			Grand cours d'eau largeur >20 m		
		Fragilité écologique			Fragilité écologique			Fragilité écologique		
		Bas	Moyen	Élevé	Bas	Moyen	Élevé	Bas	Moyen	Élevé
TRANCHÉE OUVERTE	Charrue défonceuse type	□	□	x	□	□	x	□	□	x
	Trancheuse à roue-pelle	□	x	x	□	x	x	N/D	N/D	N/D
	Excavatrice	□	□	x	□	□	x	□	□	x
	Pelle à benne trainante	$	$	x	$	$	x	□	□	x
	Dragage	$	$	$	$	$	$	□	□	□
TRANCHÉE ISOLÉE	Conduite de dérivation	□	□	□	□	□	□	N/D	N/D	N/D
	Barrage et pompe	□	□	□	□	□	□	N/D	N/D	N/D
	Dérivation par pompe à haut volume	□	□	□	□	□	□	N/D	N/D	N/D
	Batardeau	$	□	$	$	□	□	$	□	□
	Dérivation du chenal	$	$	$	$	□	□	$	□	□
SANS TRANCHÉE	Forage	$	□	□	$	□	□	$	□	□
	Percussion /poussée	$	□	□	$	□	□	N/D	N/D	N/D
	Tunnel	$	$	□	$	$	□	$	$	□
	Forage dirigé	$	□	□	$	□	□	$	□	□
AÉRIENNE	Fixation sur pont	$	$	□	$	$	□	$	$	□
	Autoportants	$	$	□	$	$	□	$	$	□

NOTES:

1. Facteurs utilisés pour déterminer le niveau de fragilité écologique d'un cours d'eau.

Bas

- Aucun débit.
- Aucun habitat des poissons n'est affecté par la construction.
- Aucun utilisateur d'eau en aval ne pourrait être affecté par la construction.
- Peu à aucun effet sur les écosystèmes terrestres.
- Pêcheries d'eaux chaudes et froides hors des périodes sensibles.

Moyen

- Les poissons d'eaux froides, les poissons d'eaux chaudes ou l'habitat des poissons seront affectés par la charge solide, la turbidité, le dépôt de sédiments de construction, les contaminations chimiques ou les transformations de l'écoulement de l'eau.
- Pêcheries d'eaux chaudes et froides durant les périodes sensibles.
- Pêcheries d'eaux froides hors des périodes sensibles.
- Certains effets sur les écosystèmes terrestres.

Élevé

- Les poissons d'eaux froides ou l'habitat des poissons seront affectés par la charge solide, la turbidité, le dépôt de sédiments de construction, les contaminations chimiques ou les transformations de l'écoulement de l'eau.
- Pêcheries d'eaux froides durant les périodes sensibles.
- Des utilisateurs d'eau en aval qui ne peuvent tolérer la charge solide.
- Effets considérables sur les écosystèmes terrestres

2. Les tailles des cours d'eau sont définies ci-dessous.

Petit

- Les cours d'eau d'une largeur de moins de 10 m qui comportent un débit qui peut être facilement endigué ou pompé pour des franchissements isolés.

Moyen

- Les cours d'eau d'une largeur de 10 à 20 m qui peuvent généralement être endigués, dérivés ou pompés mais qui peuvent être excavés par des bineuses à partir des berges.

Grand

- Les cours d'eau d'une largeur supérieure à 20 m qui sont trop larges pour construire à partir des berges à moins que de l'équipement spécialisé soit utilisé. Ces cours d'eau ne peuvent pas être endigués, dérivés ou pompés.

3.

□	La méthode est généralement respectueuse de l'environnement.
$	La méthode est respectueuse de l'environnement, toutefois, elle n'est pas très pratique à cause des frais élevés de construction relatifs à la fragilité écologique.
X	Cette méthode n'est généralement pas respectueuse de l'environnement.
N/D	Pas toujours très pratiques d'un point de vue d'ingénierie ou de construction.

Adapté de *Alberta Environment, 1988a*

4 Conséquences environnementales et mesures potentielles de protection environnementale

Tous les pipelines ont des conséquences sur l'environnement au cours de leur cycle de vie ; de leur conception à leur fin de vie incluant leur construction et leur exploitation. Ce chapitre évalue plus spécifiquement les problématiques environnementales découlant des traverses de cours d'eau et des mesures potentielles existantes afin de protéger l'environnement.

4.1 Problématiques environnementales associées aux traverses de cours d'eau

Le Tableau 4-1 recense les conséquences environnementales attribuables aux traverses de cours d'eau tout au long de leur cycle de vie.

Parmi ces problématiques, la CEPA note que l'ampleur des problématiques environnementales dépendra particulièrement (CEPA, 2014) :

- De la présence des poissons et de la sensibilité/vulnérabilité de ces derniers ;
- Du type et de la qualité de l'habitation des poissons à la fois à la traverse, mais également en aval de cette dernière ;
- De la stabilité du lit des cours d'eau et des berges.

Selon les observations du Tableau 4-1, il apparaît que les phases de construction et de maintenance seraient à l'origine de la plupart des problématiques environnementales. Parmi ces dernières, il apparaît que les plus importantes ont trait à une altération de la qualité (et de la quantité) de l'eau (de surface ou souterraine) qui se répercute alors directement ou indirectement sur une perte de la biodiversité des écosystèmes ou même sur la santé humaine (via l'ingestion directe de l'eau ou indirecte de poisson).

Très peu de problématiques environnementales trouvent leur genèse dans la phase d'exploitation de l'oléoduc : on y dénombre que l'émission potentielle de substances atmosphériques, de bruits près des stations de pompage qui peuvent se répercuter sur une fragmentation du territoire et/ou sur le comportement de la faune. La problématique la plus importante de la phase d'exploitation, aux conséquences très importantes sur les cours d'eau de surface ou souterrain ainsi qu'aux sols, demeure la rupture partielle ou totale du pipeline au niveau de la traverse de cours d'eau.

Tableau 4-1 : Problématiques environnementales et conséquences potentielles associées aux traverses de cours d'eau

Problématique environnementale (tirée de (Parlement du Canada, 2012))	**Source de la problématique**	**Applicabilité**	**Conséquences**
Problématiques communes à la plupart des activités industrielles			
Émissions atmosphériques	Modification de la qualité de l'air : émissions de particules/poussières	Causées par une perturbation des sols lors de la phase de construction ou de maintenance	Impacts potentiels aux voies respiratoires des humains et de la faune
	Modification de la qualité de l'air : émissions de contaminants (p.ex. CO_2, CO, NO_x, SO_2) provenant de la combustion de carburant	Provenant de divers équipements de construction, de maintenance ou potentiellement de stations de pompage	Émissions de gaz à effet de serre (p. ex. CO2) et impacts potentiels sur l'acidification (p. ex. SO_2, NOx) des sols et des cours d'eau (affecte la biodiversité) ainsi que la création de troubles respiratoires des humains et de la faune (p. ex. NO_x, CO) et autres impacts écotoxiques ou toxiques
Bruits	Augmentation du bruit	Provenant des activités de construction et de pompage lors de l'exploitation	Désagrément pour les populations environnantes. (voir également « Faune »)
Sols	Érosion des sols	Causé par le passage de la machinerie lors des phases de construction et de maintenance. La mise en place du pipeline pourrait également modifier la pente des sols et faciliter l'érosion.	Perte des services écosystémiques des sols ; conséquences potentielles à la géologique (voir géologie) à proximité des cours d'eau.
	Compactage	Causé par le passage de la machinerie lors des phases de construction et de maintenance	Perte des services écosystémiques des sols
	Contamination des sols	Causée par des émissions accidentelles provenant de la machinerie utilisée lors des phases de construction et de maintenance	Écotoxicité et potentiellement toxicité humaine ; atteinte à la biodiversité

Problématique environnementale (tirée de (Parlement du Canada, 2012))	**Source de la problématique**	**Applicabilité**	**Conséquences**
Faune	Habitat et création de barrières pour le mouvement	Causé par les phases de construction et de maintenance	Altération, fragmentation ou retrait des habitats ; atteinte à la biodiversité
	Modification du comportement animal à la suite du bruit ou de la présence de machinerie	Causé par les phases de construction et de maintenance et dans les zones à proximité d'une station de pompage lors de la phase d'exploitation	Atteinte à la biodiversité
	Risque de mortalité	Causé par le va-et-vient lors de la phase de construction et de maintenance	Atteinte à la biodiversité
Végétation	Affectée par les activités de surface : changement de communauté indigène, communauté écologique et/ou d'espèces d'intérêts	Causée par la machinerie utilisée lors des phases de construction et de maintenance	Atteinte à la biodiversité
	Induction ou propagation d'espèces floristiques envahissantes et non indigènes	Causées par le transport de la machinerie d'un écosystème à l'autre	Atteinte à la biodiversité
	La zone d'emprise (d'une largeur approximative de 20 m) du pipeline devra être libre de toute végétation ; utilisation potentielle d'herbicide	Tout au long du cycle de vie du pipeline	Atteinte à la biodiversité

Problématique environnementale (tirée de (Parlement du Canada, 2012))	**Source de la problématique**	**Applicabilité**	**Conséquences**
Problématiques associées au transport des hydrocarbures			
Incidents	Déversements accidentels d'hydrocarbures	Phase d'exploitation du pipeline	Atteinte à la biodiversité ; Contamination des sols, des aquifères souterrains et des cours d'eau par les hydrocarbures
Spécifiques aux traverses de cours d'eau			
Eaux de surface	Altération de la quantité et de la qualité (c.-à-d. couleur, odeur, transparence) de l'eau par augmentation des sédiments	Lors de la phase de construction de pipeline en tranchée ainsi que lors de la phase d'exploitation à la suite de l'érosion	Atteinte à la biodiversité. L'augmentation des sédiments peut être une cause directe de la mortalité des poissons ou augmenter le stress sur les poissons nuisant à leurs interactions sociales, leur reproduction et leur capacité à se nourrir.
	Qualité et quantité de l'eau affectée lors l'excavation des traverses de cours d'eau	Lors de la phase de construction de pipeline en tranchée ou autres types directement appliqués aux eaux de surface	Atteinte à la biodiversité
	Lixiviation des herbicides utilisés afin de dégager les pipelines aux abords des cours d'eau	Lors de la phase de construction et de l'exploitation des pipelines	Écotoxicité et potentiellement toxicité humaine ; atteinte à la biodiversité
	Altération de la qualité de l'eau par une contamination non identifiée	Lors de la phase de construction et de l'exploitation du pipeline	Atteinte à la biodiversité et potentiellement à la santé humaine par ingestion directe de l'eau ou indirectement par les poissons
Eaux souterraines	Lixiviation des herbicides utilisés afin de créer la zone d'emprise près du pipeline	Lors de la phase de construction et de l'exploitation des pipelines	Écotoxicité et potentiellement toxicité humaine ; atteinte à la biodiversité
	Lixiviation des contaminants émis aux sols	Voir « Sols » pour les diverses sources de contaminations des sols	Écotoxicité et potentiellement toxicité humaine ; atteinte à la biodiversité

Problématique environnementale (tirée de (Parlement du Canada, 2012))	**Source de la problématique**	**Applicabilité**	**Conséquences**
Hydrogéologie	Construction de tunnels pouvant affecter le flot des eaux de surfaces et/ou les aquifères souterrains	Lors de la phase de construction des pipelines requérant un forage souterrain	Atteinte à la biodiversité
	Exposition potentielle des formations de roche pouvant lixivier des acides et des métaux jusque dans les cours d'eau	Lors de la phase de construction des pipelines requérant un forage souterrain	Écotoxicité et potentiellement toxicité humaine ; atteinte à la biodiversité
Géologie	Glissement de terrain affectant la quantité et la qualité des eaux de surfaces	Lors de la phase de construction et de la phase d'exploitation	Voir « Eaux de surface »
Poissons	Impacts directs à l'habitat du poisson	Lors de l'installation des infrastructures et de la phase de maintenance pour les pipelines en tranchée	Atteinte à la biodiversité ; augmentation des sédiments et/ou diminution de la quantité d'eau
	Altération de la qualité de l'eau par une contamination non identifiée se répercutant indirectement sur les poissons	Lors de la phase de construction et de l'exploitation du pipeline	Atteinte à la biodiversité et potentiellement à la santé humaine par ingestion directe de l'eau ou indirectement par les poissons
	Impacts indirects des infrastructures dans les cours d'eau ; possibilité d'affecter les couloirs migratoires des poissons, les lieux de reproduction, les lieux d'hibernation	Pour les pipelines en tranchée	Atteinte à la biodiversité
Végétation	Modification des cours d'eau et/ou atteinte aux aquifères souterrains (voir « Hydrogéologie ») ; La végétation terrestre n'a plus le même accès à l'eau.	Particulièrement lors de la phase de construction	Atteinte à la biodiversité

4.2 Mesures de protection et de mitigations environnementales

4.2.1 Mesures de protection et mitigation environnementale

Cette sous-section se veut un résumé des meilleures pratiques lors de la phase de construction et d'exploitation des traverses de cours d'eau. Il s'agit donc d'un condensé de l'information retrouvée dans divers documents consultés, visant plus particulièrement les mesures d'atténuation listées se référant aux traverses de cours d'eau et ne se substitue en aucun cas aux documents originaux (CAPP et coll., 2005 ; CEPA, 2014 ; Canadian Pipeline Environment Committee (CPEC), 2009 ; TransCanada, 2014a).

Lors de la phase de construction (et la phase de maintenance)

Généralités

- Utiliser les meilleures pratiques de construction ayant le moins d'impacts potentiels possible ;
- Employer une équipe spécialisée ayant de l'expérience avec les traverses de rivières pour effectuer les travaux ;
- Minimiser la durée des travaux ;
- Tenir compte et minimiser les effets cumulatifs de la construction et de l'exploitation du pipeline sur le milieu environnant ;
- Assurer la stabilité des traverses de rivières ainsi que des berges : stabiliser au besoin les pentes de façon préventive à la fois lors de la phase de construction et à long terme.

Émissions atmosphériques

- Utiliser des systèmes d'abattement de la poussière et les moteurs les plus efficaces (donc les moins émetteurs) ;
- Éviter de laisser tourner les moteurs ;
- Limiter la circulation ;
- Ne brûler aucun débris de construction ou déchets.

Protection des eaux de surface

- Favoriser les techniques qui ne requièrent pas de tranchées limitant ainsi de nombreuses perturbations du milieu aquatique et des berges ;
- Maintenir un flot et un débit acceptable vers l'aval pendant la phase de construction ;
- Minimiser l'augmentation des sédiments ou des matières en suspension dans l'eau. Pour ce faire, il est recommandé de :
    - Minimiser la quantité de sols perturbés ;
    - Prévenir le ruissellement et/ou réduire la vitesse du ruissellement du site vers les eaux ;
    - Retirer les sédiments du site dans les eaux de ruissellement ;
    - Utiliser des techniques de contrôle des sédiments, lorsque requis.
- Diminuer le potentiel d'érosion et d'augmentation de la quantité de sédiments en échelonnant (« *grading* ») les berges et les sols adjacents ;
- Capter, retenir et contrôler les rejets d'eaux de ruissellement ;
- Inventorier les prises d'eau potable municipales et mettre en place des mesures de protection adéquates le cas échéant ;
- S'assurer qu'aucun contaminant ne s'échappe dans l'eau.

Protection des poissons et habitats

- Favoriser les techniques qui ne requièrent pas de tranchées limitant ainsi de nombreuses perturbations du milieu aquatique et des berges ;
- Planifier les travaux de façon à éviter les périodes où les poissons ou leurs œufs sont présents au lieu de la traverse de cours d'eau et en aval de cette dernière ;
- Minimiser l'augmentation des sédiments ou des matières en suspension dans l'eau ;
- Diminuer le potentiel d'érosion et d'augmentation de la quantité de sédiments en échelonnant (« *grading* ») les berges et les sols adjacents ;
- Maintenir une voie d'accès pour les poissons lors des travaux ;
- S'assurer qu'aucun contaminant ne s'échappe dans l'eau.

Protection eaux souterraines

- Confirmer la localisation des zones critiques en matière de ressources en eau souterraine ;
- Établir un protocole de suivi des plaintes.

Végétation

- S'assurer de laver/traiter la machinerie avant l'arrivée à un nouveau site dans le but de retirer les espèces invasives.

Contamination des sols

- Excaver les sols contaminés et les traiter ex-situ ou in situ.

Une fois les travaux terminés

- Ramener les conditions hydraulique, hydrologique et hydrogéologique d'origine ;
- Remettre en place la végétation riveraine afin de prévenir ou minimiser l'émission de sédiments dans les cours d'eau ;
- Assurer une compensation du milieu lorsque des effets négatifs n'ont pu être évités ou mitigés.

Lors de la phase d'exploitation

Le contrôle de l'intégrité d'un pipeline est effectué tout le long de son exploitation pour en vérifier l'état, identifier les dommages et minimiser les accidents potentiels. Il comprend de nombreuses mesures comme (Liu, 2003 ; Miesner et Leffler, 2006) :

- La surveillance aérienne et au sol des installations par des patrouilles pour identifier des sources potentielles de dommages (travaux d'excavations, risques naturels, …) ;
- L'inspection des traverses de rivières ainsi que des berges afin d'en assurer la stabilité, particulièrement à la suite d'inondations ;
- L'utilisation de nombreux et adéquats systèmes de mesures et de suivi ;
- Le recours à des opérateurs de pipeline qualifiés capables de répondre rapidement en cas de problèmes ;
- Une limitation des erreurs humaines potentielles lors du suivi ;
- Le recours à des tuyaux plus épais, un enduit (« *coating* ») spécial et des vannes de sectionnement (« *block valves* ») ;
- Des mesures de détection des fuites ;
- Une inspection interne du pipeline à l'aide de sondes pour identifier les bosses, possibles fissures et parties corrodées ;
- Une inspection du pipeline à l'aide d'ultrasons ou d'un flux magnétique ;
- Une vérification des pompes, valves et autres machines de contrôle du transport ;
- Une vérification de la calibration des instruments de mesure.

Plusieurs méthodes sont employées pour détecter les éventuelles fuites sur un pipeline (Liu, 2003 ; Miesner et Leffler, 2006) :

- Des bilans de masse ou des chutes de pression permettent de repérer une fuite entre deux points de mesure du débit lorsque deux valeurs mesurées ne concordent pas. Cependant, la marge d'erreur sur les appareils de mesure ne permet pas de repérer des petites fuites et l'éloignement entre les appareils de mesure nécessite souvent le recours à une autre méthode pour identifier le lieu exact de la fuite.
- Une mise en équation du système de canalisations et sa modélisation informatique permettent de prévoir la valeur de plusieurs paramètres comme la vitesse, la pression ou la température en différents points. Une comparaison des valeurs attendues et des valeurs mesurées permet d'identifier des conditions anormales d'opération, dont les fuites. Cette méthode peut être incorporée dans le programme de SCADA (« supervisory control and data acquisition ») et prendre en charge automatiquement des mesures d'urgence en cas de problème, comme le déclenchement de vannes de contrôle.
- Une observation visuelle du pipeline et de ses alentours par une patrouille ou par des photographies permet de repérer une éventuelle fuite. Cette méthode est efficace à la fois pour les pipelines en surface, mais aussi pour ceux enterrés, où une fuite est susceptible d'affecter la végétation poussant sur le sol contaminé et être ainsi repérée.
- Une surveillance du pipeline peut être effectuée en balayant le sol environnant avec un radar pénétrant (« *ground penetrating radar* ») pour y détecter les fuites. Un technicien sonde la région au-dessus d'un pipeline enfoui sous la surface. La sonde est positionnée sur le sol et sert à détecter les changements potentiels aux propriétés de « réflexion » de l'onde du radar qui peut ainsi indiquer une fuite.
- L'utilisation d'une sonde magnétique ou à ultrason à l'intérieur du pipeline permet de détecter une éventuelle corrosion du pipeline ou une diminution de l'épaisseur de la

paroi de la canalisation. Cette méthode est de plus en plus utilisée, mais est encore en développement. Elle ne permet pas par compte de repérer de petites fuites dues à des fissures.

4.2.2 Impacts potentiels résiduels escomptés

Des impacts potentiels résiduels sont escomptés, et ce, malgré l'application des meilleures pratiques, des mesures de protection établies et même des mesures d'atténuation mises en place.

Lors de la phase de construction

L'ampleur des impacts potentiels lors de la phase de construction est tributaire de la vulnérabilité des divers écosystèmes traversés par l'oléoduc ; plus un écosystème sera fragile, plus ce dernier sera affecté négativement par le cycle de vie de l'oléoduc.

Considérant la variabilité de la vulnérabilité des cours d'eau, il est difficile d'évaluer quantitativement l'ampleur des impacts potentiels résiduels liés aux activités de mise en place et d'exploitation des pipelines ou de l'efficacité des mesures de protection et de mitigation environnementales qui pourraient être mises en place dans une évaluation générique telle que préconisée dans ce rapport.

Il est toutefois certain que, malgré l'emploi de mesures de protection et de mitigation environnementales, il y aura des impacts potentiels résiduels. Par exemple, bien que l'emploi de moteurs (pour la machinerie) efficaces limite les émissions de contaminants atmosphériques, ces moteurs produiront tout de même des émissions qui auront des impacts potentiels, et ce, même si les émissions se trouvent en deçà des normes réglementaires.

Une des études soumises par TransCanada pour l'évaluation environnementale du projet Oléoduc Énergie Est, semble abonder dans ce sens (TransCanada, 2014a). En effet, il semble que des effets résiduels y soient attendus pour toutes les problématiques environnementales répertoriées, et ce, malgré l'application de moyens de protection et de mitigation environnementales.

L'évaluation réalisée par TransCanada (voir Tableau 4-2) est de nature qualitative et fait état d'effets résiduels d'ampleur faible à élevée lors de la phase de construction de l'oléoduc (notamment sur le poisson et son habitat lors de la phase de construction requérant des tranchées ouvertes). Il existe toutefois certaines imprécisions dans l'évaluation qualitative effectuée par TransCanada, notamment, lorsqu'il est question de l'évaluation des effets résiduels sur les poissons et son habitat sans que la/les technique(s) de traverse des cours d'eau ne soient explicitement présentées.

Aux meilleures des connaissances, il n'existe pas d'évaluation quantitative des impacts potentiels résiduels appréhendés.

Tableau 4-2 : Évaluation qualitative des effets résiduels lors de la phase de construction (TransCanada, 2014a)

Problématiques environnementales	Caractéristiques des effets résiduels				
	Durée	Fréquence	Ampleur	Réversibilité	Degré de confiance des prévisions
Qualité de l'air					
Modification de la qualité de l'air	Courte	Unique	Faible	Réversible	Élevé
Eaux de surface					
Modification de la quantité d'eau de surface	Courte	Unique	Faible	Réversible	Élevé
Modification de la qualité de l'eau de surface	Courte	Unique	Faible	Réversible	Élevé
Eaux souterraines					
Modification de la quantité de l'eau souterraine	Courte	Unique	Faible	Réversible	Élevé
Modification de la qualité de l'eau souterraine	Courte	Unique	Faible	Réversible	Élevé
Poisson et l'habitat du poisson : Technique non précisée					
Modification dans l'habitat du poisson	Courte	Unique	Faible à moyenne	Réversible	Élevé
Modifications dans les déplacements et la migration des poissons	Courte	Unique	Faible	Réversible	Élevé
Modifications dans les taux de mortalité des poissons	Courte	Unique	Faible	Réversible	Élevé
Introduction de substances nocives	Courte	Unique	Faible	Réversible	Élevé
Poisson et l'habitat du poisson : Tranchée ouverte					
Modification dans l'habitat du poisson	Courte	Unique à irréguliers multiples	Moyenne à élevée	Réversible	Élevé
Modifications dans les déplacements et la migration des poissons	Courte	Unique à irréguliers multiples	Faible	Réversible	Élevé
Modifications dans les taux de mortalité des poissons	Courte	Unique à irréguliers multiples	Moyenne	Réversible	Élevé
Introduction de substances nocives	Courte	Unique à irréguliers multiples	Moyenne à élevée	Réversible	Élevé
Sols					
Changement qualitatif du sol	Courte	Unique	Faible	Réversible	Élevé
Perte de sol	Longue	Unique	Faible	Irréversible	Élevé
Végétation					
Changement dans les communautés floristiques indigènes	Longue	Unique	Faible	Réversible	Élevé
Perte ou perturbation des milieux humide	Longue	Unique	Faible	Réversible	Élevé
Changement dans les communautés écologiques	Longue	Unique	Faible	Réversible	Élevé
Changement dans les espèces floristiques d'intérêt	Longue	Unique	Faible à moyenne	Irréversible	Faible
Induction ou propagation d'espèces floristiques envahissantes et non indigènes	N/D				
Faune					
Changement dans la disponibilité de l'habitat	Courte/moyenne/longue	Unique	Moyenne	Réversible	Élevé
Changement dans la connectivité de l'habitat	Courte/moyenne/longue	Unique	Faible à moyenne	Réversible	Élevé
Risque de mortalité	Courte	Multiple irrégulier	Faible	Réversible	Élevé

Déversements accidentels

Le risque nul n'existant pas, certains problèmes peuvent survenir lors de l'exploitation des pipelines. Les incidents impliquant les traverses de pipelines trouvent généralement leur cause après plusieurs années d'opération. En effet, la corrosion (c.-à-d. la détérioration des matériaux à la suite de son oxydation) a été identifiée comme étant l'une des sources de rupture de traverses de cours d'eau par le passé, par exemple dans les cas de Reedy River (National Transportation Safety Board (NTSB), 1996) ou de Kalamazoo (United States Environmental Protection Agency (US EPA), 2015). Les effets des inondations, de la marée, de l'achalandage maritime ou toutes autres conditions anormales peuvent également modifier les conditions d'opération des traverses de cours d'eau et conduire à une rupture ou un bris du pipeline.

Le bris ou la rupture du pipeline engendre un déversement accidentel des hydrocarbures. Dans le contexte d'une traverse de rivière, il est considéré qu'un déversement accidentel de pétrole est **impossible** à totalement contenir et nettoyer (West Coast Environmental Law, 2011). Le pétrole pourrait rapidement voyager sur plusieurs kilomètres en aval du bris ou de la rupture. La situation est considérée comme étant encore plus préoccupante dans le cas de rivières à basse température (« cold rivers ») (West Coast Environmental Law, 2011). Dans ce cas, le pétrole peut perler, ce qui rend plus difficile sa séparation de l'eau et la récupération des toxines contenues dans le pétrole (West Coast Environmental Law, 2011). Il en résulte une plus grande dispersion du pétrole. Une rivière peut alors transporter les contaminants sur une plus grande distance et ainsi affecter les berges et potentiellement se mélanger avec les aquifères souterrains.

5 Processus de sélection multicritère de la méthode de traverse des cours d'eau

Cette section a pour but de fournir une méthodologie théorique permettant de faire un choix d'une technique de traverse. La démarche se veut méthodologique étant donné que les différentes décisions prises à chaque étape émanent des auteurs du présent rapport dans le but de livrer la procédure à suivre. Les données spécifiques à un projet et les exigences de ses promoteurs orienteront les vraies décisions. Par ailleurs, il convient de noter qu'il n'existe aucun processus de sélection automatique pour les méthodes de traverse de cours d'eau (CAPP/CEPA/CGA, 2012).

Une méthode mathématique d'analyse multicritère a pour but la résolution d'un problème d'aide à la décision. Ces méthodes constituent une étape importante du processus de décision, qui suit celle d'identification et de définition du problème, et aboutissent au choix d'une ou plusieurs solution(s) optimale(s) parmi un ensemble discret de solutions, via une procédure de sélection. Elles sont confrontées à deux limites : l'une liée au manque de données fiables sur une durée suffisante, ce qui peut empêcher la construction ou la validation de la méthode ; l'autre liée à la technicité inhérente à de telles méthodes puisque ces dernières nécessitent l'usage de concepts délicats qui peuvent déboucher sur des résultats erronés ou une analyse confuse.

L'aide à la décision multicritère s'intéresse au choix parmi un nombre fini d'actions (décision, variante, candidat...) possibles pour atteindre un objectif. Un critère est une fonction définie sur l'ensemble des actions représentant les préférences de l'utilisateur selon son point de vue. Le poids mesure l'importance d'un critère par rapport aux autres du point de vue du décideur. Parmi les méthodes d'analyse multicritères existantes, celle de la somme pondérée, connue de par son accessibilité mathématique, sera utilisée dans ce rapport.

La méthode de la somme pondérée a comme données de départ:

- m actions A_1, A_2, A_3...A_m
- n critères C_1, C_2, C_3...C_n
- n vecteur poids W_1, W_2,...W_n , avec $W_j > 0$
- $a_{ij} = U_j(A_i)$, représentent les performances de chaque action sur chacun des critères

Avant le calcul de la somme pondérée, les données sont transformées de la manière suivante:

- Normalisation de tous les a_{ij} afin de conserver la proportionnalité entre les valeurs
- Normalisation des poids (somme des poids = 1)

La somme pondérée R (A_i) pour chaque action est alors calculée selon l'équation suivante:

$$R(A_i) = \sum_{j=1}^{n} W_j * a_{ij} \, , \forall i \in [1, m]$$

Dans le cas du présent projet, l'objectif à atteindre est la traverse d'un cours d'eau par un pipeline. Les actions sont les différentes méthodes de traverse existantes. Les critères sont les différents paramètres qui entrent en jeux dans le choix d'une méthode de traverse. La performance d'une méthode sur un critère traduira son degré d'applicabilité vis-à-vis de la

valeur quantitative ou qualitative du critère. Les différentes étapes de l'application de ce processus de sélection au présent rapport sont décrites dans les sous-sections suivantes.

5.1.1 Choix des critères et pondérations

Les critères de choix des méthodes de traverse ont été abordés dans la section 3.3. Cependant, chaque enjeu discuté dans cette section peut résulter en plusieurs variables élémentaires. De la même manière, plusieurs enjeux peuvent être regroupés dans une variable unique. Il est à noter que le nombre de critères n'est pas un ensemble fini. Plusieurs variables peuvent surgir en fonction de la situation. Par conséquent, la liste utilisée ici n'est pas exhaustive mais regroupe plutôt les variables couramment rencontrées dans le choix d'une technique de traverse. Le Tableau 5-1 donne une compilation des critères de choix regroupés par catégorie. Le nombre de critères (n) correspondant est de 19.

Tableau 5-1 : Critères regroupés par catégorie pour le choix d'une technique de traverse

Type de variable	Numéro	Nom de la variable
Données Hydrologiques/Hydrauliques	1	Régime du cours d'eau
	2	Débit du cours d'eau
	3	Potentiel d'affouillement
	4	Présence de zones inondables
	5	Niveau de la nappe phréatique
Données Géométriques	6	Largeur du canal
	7	Profondeur du canal
Données Géologiques/Géotechniques	8	Géologie
	9	Géotechnique
Données Environnementales/Sociales	10	Habitats et circulation de poissons
	11	Navigabilité
	12	Utilisateurs d'eau en aval
	13	Proximité de résidences
Contraintes Règlementaires/Techniques	14	Droits de passage
	15	Proximité d'autres infrastructures
	16	Sécurité pour la construction
	17	Diamètre de la conduite
	18	Différence d'élévation entre l'entrée et la sortie de la conduite
Contraintes Économiques	19	Coût

Pour la pondération à accorder à chaque critère, un raisonnement permettant dans un premier temps de classer les critères selon leur influence dans le choix d'une technique va être mené. Ce classement ne reflète pas l'importance absolue des variables l'une par rapport à l'autre mais plutôt le dégrée d'influence de la variable dans le choix d'une technologie.

Niveau 1 : La variable 1 (régime du cours d'eau) prend deux valeurs possibles à savoir "intermittent" ou "permanent". Dans le cas d'un cours d'eau intermittent, le problème ne se pose généralement pas pour le choix de la méthode de traverse. En effet, dans un tel cas, les enjeux relatifs à l'eau et la vulnérabilité du cours d'eau sont moindres, à condition de choisir la

période d'intermittence pour les travaux. Cette variable sera alors considérée comme le premier critère orientant le choix des techniques.

Niveau 2 : Pour un cours d'eau permanent (débit d'eau continu), l'écosystème aquatique et tout ce qui est vulnérabilité du cours d'eau sont considérés en premier lieu. Ainsi, les critères suivants seront les prochains à être décisifs : 10 (Habitats et circulation de poissons) ; 14 (Droits de passage) ; 11 (Navigabilité) ; 13 (Proximité de résidences) ; 12 (Utilisateurs d'eau en aval) ; 15 (Proximité d'autres infrastructures) ; 16 (Sécurité pour la construction).

Niveau 3 : Après avoir considéré l'écosystème aquatique et l'environnement du cours d'eau, on s'intéressera ensuite à l'importance physique du cours d'eau. Il s'agit des critères suivants : 6 (Largeur du canal) ; 7 (Profondeur du canal) ; 2 (Débit du cours d'eau).

Niveau 4 : Une fois l'importance du cours d'eau maîtrisée, il s'agira de prendre en considération les critères qui affectent la faisabilité et la sécurité de l'installation soit : 8 (Géologie) ; 9 (Géotechnique) ; 5 (Niveau de la nappe phréatique).

Niveau 5 : Par la suite, il s'agira de prendre en compte les critères qui affectent les risques à long terme sur la conduite installée à savoir : 3 (Potentiel d'affouillement) ; 4 (Présence de zones inondables).

Niveau 6 : L'avant-dernière catégorie est relative aux données techniques de la traverse à savoir: 17 (Diamètre de la conduite) ; 18 (Différence d'élévation entre l'entrée et la sortie de la conduite).

Niveau 7 : Enfin, les considérations économiques pourront entrer en jeu avec le critère 19 (Coût).

On obtient alors sept niveaux différents d'importance. Il est posé que les variables dans un niveau donné auront le même poids et que les niveaux auront un poids décroissant de 7 à 1. Ainsi, le niveau 1 aura comme poids 7 ; le niveau 2 aura comme poids 6 ; ainsi de suite jusqu'à un poids 1 pour le niveau 7. La normalisation du poids d'un critère sera alors le rapport entre le poids de ce critère et le poids total de l'ensemble des 19 critères qui est de 87. Le Tableau 5-2 présente les critères par niveau avec les poids normalisés (pondérations) correspondants.

Tableau 5-2 : Pondération des différents critères triés par niveau d'influence dans le choix d'une technique de traverse

Niveau	Critère	Nom du Critère	Poids	Pondération
1	C_1	Régime du cours d'eau	7	0,080
2	C_2	Habitats et circulation de poissons	6	0,069
2	C_3	Droits de passage	6	0,069
2	C_4	Navigabilité	6	0,069
2	C_5	Proximité de résidences	6	0,069
2	C_6	Utilisateurs d'eau en aval	6	0,069
2	C_7	Proximité d'autres infrastructures	6	0,069
2	C_8	Sécurité pour la construction	6	0,069
3	C_9	Largeur du canal	5	0,057
3	C_{10}	Profondeur du canal	5	0,057

Niveau	Critère	Nom du Critère	Poids	Pondération
3	C_{11}	Débit du cours d'eau	5	0,057
4	C_{12}	Géologie	4	0,046
4	C_{13}	Géotechnique	4	0,046
4	C_{14}	Niveau de la nappe phréatique	4	0,046
5	C_{15}	Potentiel d'affouillement	3	0,034
5	C_{16}	Présence de zones inondables	3	0,034
6	C_{17}	Diamètre de la conduite	2	0,023
6	C_{18}	Différence d'élévation entre l'entrée et la sortie de la conduite	2	0,023
7	C_{19}	Coût	1	0,011
		Total	**87**	**1**

5.1.2 Évaluation de la performance des méthodes

L'évaluation de la performance se fait critère par critère. Il est à noter que les méthodes de traverses aériennes ne seront pas considérées parmi les options possibles dans le cadre de ce mandat. Il reste alors quatorze méthodes ou actions (m = 14) pour ce problème :

A_1 : Tranchée ouverte par charrue défonceuse type

A_2 : Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle

A_3 : Tranchée ouverte par excavatrice

A_4 : Tranchée ouverte par pelle à benne trainante

A_5 : Tranchée ouverte par dragage

A_6 : Tranchée isolée par conduite de dérivation

A_7 : Tranchée isolée par barrage et pompe

A_8 : Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume

A_9 : Tranchée isolée par batardeau

A_{10} : Tranchée isolée par dérivation du chenal

A_{11} : Forage

A_{12} : Fonçage/Poussée

A_{13} : Forage dirigé

A_{14} : Tunnel

Les 19 critères seront parcourus un à un dans cette section et la démarche proposée pour l'affectation des performances à chacune des quatorze techniques de traverse sera donnée. Il est à noter que l'information contenue dans le Tableau 3-1 sera utilisée dans l'affectation des performances.

Rappel :
Il est à noter que les critères de performance stipulés dans les sections qui suivent sont basés sur le jugement d'expert des auteurs de ce rapport. Étant donné que les performances sont ultérieurement normalisées pour chaque critère de telle sorte que les performances soient comprises entre 0 et 1, l'échelle utilisée (20, 40, 50...) dans l'affectation des performances ne devrait pas être une préoccupation majeure pour le lecteur.

C_1 : Régime du cours d'eau

Les méthodes par tranchée ouverte et plus spécifiquement celles par charrue défonceuse type et trancheuse à roue-pelle s'appliquent bien[4] dans le cas d'un cours d'eau intermittent. Dans le cas d'un régime intermittent, une performance importante sera donnée à ces deux techniques (A_1 et A_2), une performance faible aux trois autres techniques par tranchée ouverte (A_3 à A_5) et une performance nulle aux autres techniques (A_6 à A_{14}). Pour un cours d'eau permanent, les performances seront identiques pour les 14 méthodes de traverse car ce sont les autres variables qui seraient décisives. Les performances peuvent alors être réparties telles que présentées dans le Tableau 5-3.

Tableau 5-3 : Attribution des performances pour le critère C_1

Méthode	Performance	
	C_1 = Intermittent	C_1 = Permanent
A_1 = Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	40	10
A_2 = Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	40	10
A_3 = Tranchée ouverte par excavatrice	10	10
A_4 = Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	10	10
A_5 = Tranchée ouverte par dragage	10	10
A_6 = Tranchée isolée par conduite de dérivation	0	10
A_7 = Tranchée isolée par barrage et pompe	0	10
A_8 = Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	0	10
A_9 = Tranchée isolée par batardeau	0	10
A_{10} = Tranchée isolée par dérivation du chenal	0	10
A_{11} = Forage	0	10
A_{12} = Fonçage/Poussée	0	10
A_{13} = Forage dirigé	0	10
A_{14} = Tunnel	0	10

[4] Basé essentiellement sur l'information contenue dans le Tableau 3-1.

C_2 : Habitats et circulation de poissons

Ce paramètre doit être évalué pour attribuer une note qualitative de fragilité parmi les options suivantes : Bas ; Moyen ; Élevé. Les performances à attribuer aux méthodes[5] doivent tenir compte des informations suivantes[6] :

- Les méthodes suivantes conservent le passage des poissons : A_1, A_3, A_4 et A_{11} à A_{14} ;
- Les méthodes A_7 à A_{10} conservent le passage des poissons mais un sauvetage de poissons pourrait être nécessaire aux tronçons asséchés ;
- La méthode A_6 conserve le passage des poissons mais un sauvetage de poissons pourrait être nécessaire aux tronçons asséchés. En plus, elle constitue un obstacle à court terme au passage des poissons si la vitesse du courant à l'intérieur de la buse est trop élevée ;
- La méthode A_5 conserve le passage des poissons mais avec possibilité de blessures ou de mort pour ces derniers ;
- La méthode A_2 peut bloquer le passage du poisson.

Une performance relativement élevée devrait alors être accordée aux méthodes qui conservent le passage des poissons contrairement à celles qui peuvent les bloquer dans le cas d'une fragilité élevée. Dans le cas d'une fragilité moyenne, la variation relative des performances d'une méthode à l'autre sera moindre. Pour une fragilité basse, les performances seront identiques pour les 14 méthodes de traverse car ce sont les autres variables qui seraient décisives. Les performances peuvent alors être réparties telles que présentées dans le Tableau 5-4.

Tableau 5-4 : Attribution des performances pour le critère C_2

Méthode	Performance		
	C_2 = Bas	C_2 = Moyen	C_2 = Élevé
A_1 = Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	20	30	40
A_2 = Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	20	10	0
A_3 = Tranchée ouverte par excavatrice	20	30	40
A_4 = Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	20	30	40
A_5 = Tranchée ouverte par dragage	20	10	5
A_6 = Tranchée isolée par conduite de dérivation	20	15	10
A_7 = Tranchée isolée par barrage et pompe	20	20	20
A_8 = Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	20	20	20
A_9 = Tranchée isolée par batardeau	20	20	20
A_{10} = Tranchée isolée par dérivation du chenal	20	20	20
A_{11} = Forage	20	30	40
A_{12} = Fonçage/Poussée	20	30	40
A_{13} = Forage dirigé	20	30	40
A_{14} = Tunnel	20	30	40

[5] Le nom des méthodes correspondant aux symboles A_1...A_{14} est disponible dans les tableaux de performance.

[6] Basé essentiellement sur l'information contenue dans le Tableau 3-1.

C_3 : Droits de passage

Les travaux dans les cours d'eau peuvent être permis ou interdits selon la zone de traverse. Dans le cas où ces travaux sont interdits, une performance positive sera donnée aux techniques par tranchée et une performance nulle aux autres techniques. Dans le cas contraire, les performances seront identiques pour les 14 méthodes de traverse car ce sont les autres variables qui seraient décisives. Les performances peuvent alors être réparties telles que présentées dans le Tableau 5-5.

Tableau 5-5 : Attribution des performances pour le critère C_3

Méthode	Performance	
	C_3 = Permis	C_3 = Interdit
A_1 = Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	10	0
A_2 = Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	10	0
A_3 = Tranchée ouverte par excavatrice	10	0
A_4 = Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	10	0
A_5 = Tranchée ouverte par dragage	10	0
A_6 = Tranchée isolée par conduite de dérivation	10	0
A_7 = Tranchée isolée par barrage et pompe	10	0
A_8 = Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	10	0
A_9 = Tranchée isolée par batardeau	10	0
A_{10} = Tranchée isolée par dérivation du chenal	10	0
A_{11} = Forage	10	20
A_{12} = Fonçage/Poussée	10	20
A_{13} = Forage dirigé	10	20
A_{14} = Tunnel	10	20

C_4 : Navigabilité

Ce paramètre doit être évalué pour attribuer une note qualitative relative aux préoccupations de navigation parmi les options suivantes : Bas ; Moyen ; Élevé. Les performances à attribuer aux méthodes[7] doivent tenir compte des informations suivantes[8]:

- Les méthodes A_{11} à A_{14} ne perturbent pas la navigation, contrairement aux autres (A_1 à A_{10}) ;
- Le degré de perturbation de la navigation pour les méthodes A_4 à A_{10} est élevé ;
- Le degré de perturbation de la navigation pour les méthodes A_1 et A_2 est bas ;
- Le degré de perturbation de la navigation pour la méthode A_3 est moyen.

[7] Le nom des méthodes correspondant aux symboles A_1...A_{14} est disponible dans les tableaux de performance

[8] Basé essentiellement sur l'information contenue dans le Tableau 3-1

Dans le cas d'une préoccupation élevée, une performance relativement élevée devrait alors être accordée aux méthodes qui ne perturbent pas la navigation contrairement à celles qui la perturbent. Dans le cas d'une préoccupation moyenne, la variation relative des performances d'une méthode à l'autre sera moindre. Pour une préoccupation basse, les performances seront identiques pour les 14 méthodes de traverse car ce sont les autres variables qui seraient décisives. Les performances peuvent alors être réparties telles que présentées dans le Tableau 5-6.

Tableau 5-6 : Attribution des performances pour le critère C_4

Méthode	Performance		
	C_4 = Bas	C_4 = Moyen	C_4 = Élevé
A_1 = Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	20	20	20
A_2 = Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	20	20	20
A_3 = Tranchée ouverte par excavatrice	20	15	10
A_4 = Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	20	10	0
A_5 = Tranchée ouverte par dragage	20	10	0
A_6 = Tranchée isolée par conduite de dérivation	20	10	0
A_7 = Tranchée isolée par barrage et pompe	20	10	0
A_8 = Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	20	10	0
A_9 = Tranchée isolée par batardeau	20	10	0
A_{10} = Tranchée isolée par dérivation du chenal	20	10	0
A_{11} = Forage	20	30	40
A_{12} = Fonçage/Poussée	20	30	40
A_{13} = Forage dirigé	20	30	40
A_{14} = Tunnel	20	30	40

C_5 : Proximité de résidences

Des études sur la classe d'emplacement doivent être réalisées pour la zone de traverse considérée. Cette étude doit mener à l'affectation d'une classe entre 1 et 4 selon divers facteurs, notamment la densité de la population et la présence d'installations industrielles ou d'aires extérieures bien définies comme les parcs, les aires de repos et les campings. Une classe élevée est synonyme de vulnérabilité élevée. Les méthodes par tranchée sont naturellement plus susceptibles de nuire en surface en cas de défaillance de l'installation. Elles auront alors une très faible performance pour la classe 4 tandis que celles sans tranchée auront la meilleure performance dans ce cas. Les performances peuvent alors être réparties telles que présentées dans le Tableau 5-7.

Tableau 5-7 : Attribution des performances pour le critère C_5

Méthode	Performance			
	C_5 = 1	C_5 = 2	C_5 = 3	C_5 = 4
A_1 = Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	20	20	15	10
A_2 = Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	20	20	15	10
A_3 = Tranchée ouverte par excavatrice	20	20	15	10
A_4 = Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	20	20	15	10
A_5 = Tranchée ouverte par dragage	20	20	15	10
A_6 = Tranchée isolée par conduite de dérivation	20	20	15	10
A_7 = Tranchée isolée par barrage et pompe	20	20	15	10
A_8 = Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	20	20	15	10
A_9 = Tranchée isolée par batardeau	20	20	15	10
A_{10} = Tranchée isolée par dérivation du chenal	20	20	15	10
A_{11} = Forage	20	30	30	40
A_{12} = Fonçage/Poussée	20	30	30	40
A_{13} = Forage dirigé	20	30	30	40
A_{14} = Tunnel	20	30	30	40

C_6 : Utilisateurs d'eau en aval

Le paramètre « Utilisateurs d'eau en aval » doit être évalué pour attribuer une note qualitative de fragilité parmi les options suivantes : Bas ; Moyen ; Élevé. Une fragilité basse signifie l'absence d'utilisateur d'eau en aval qui pourrait être affecté par la construction. Une fragilité élevée correspond à la présence d'utilisateurs d'eau en aval qui ne peuvent tolérer la charge solide ou une perturbation d'écoulement. La note de fragilité doit également tenir compte de l'indice de qualité bactériologique et physico-chimique de l'eau (IQDP, voir sous-section 6.5.1). En effet une eau de bonne qualité a une vulnérabilité élevée et contribue à élever la note de fragilité relative aux utilisateurs d'eau en aval. Les performances à attribuer aux méthodes[9] doivent tenir compte des informations suivantes[10]:

- À part la méthode A_2 dans laquelle le déblai risque de bloquer le débit, toutes les autres méthodes conservent un écoulement de l'eau normal ;
- Les méthodes sans tranchée (A_{11} à A_{14}) ne donnent aucune décharge de sédiments ;
- Les méthodes A_1 et A_5 minimisent la décharge totale de sédiments ;
- Les méthodes A_6 à A_8 conduisent à une décharge limitée de sédiments ;
- La méthode A_9 entraîne une décharge de sédiments limitée à modérée ;
- Les méthodes A_2 à A_4 présentent un risque élevé de décharge de sédiments ;
- La méthode A_{10} conduit à une décharge de sédiments très élevée.

[9] Le nom des méthodes correspondant aux symboles A_1...A_{14} est disponible dans les tableaux de performance

[10] Basé essentiellement sur l'information contenue dans le Tableau 3-1

Dans le cas d'une fragilité élevée, une performance élevée devrait alors être accordée aux méthodes qui ne déchargent pas de sédiment dans le cours d'eau contrairement à celles qui peuvent en déverser. Dans le cas d'une fragilité moyenne, la variation relative des performances d'une méthode à l'autre sera moindre. Pour une fragilité basse, les performances seront identiques pour les 14 méthodes de traverse car ce sont les autres variables qui seraient décisives. Les performances peuvent alors être réparties telles que présentées dans le Tableau 5-8.

Tableau 5-8 : Attribution des performances pour le critère C_6

Méthode	Performance		
	C_6 = Bas	C_6 = Moyen	C_6 = Élevé
A_1 = Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	20	25	30
A_2 = Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	20	5	0
A_3 = Tranchée ouverte par excavatrice	20	10	0
A_4 = Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	20	10	0
A_5 = Tranchée ouverte par dragage	20	25	30
A_6 = Tranchée isolée par conduite de dérivation	20	20	10
A_7 = Tranchée isolée par barrage et pompe	20	20	10
A_8 = Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	20	20	10
A_9 = Tranchée isolée par batardeau	20	15	0
A_{10} = Tranchée isolée par dérivation du chenal	20	5	0
A_{11} = Forage	20	30	40
A_{12} = Fonçage/Poussée	20	30	40
A_{13} = Forage dirigé	20	30	40
A_{14} = Tunnel	20	30	40

C_7 : Proximité d'autres infrastructures

En cas de présence d'un pipeline existant ayant traversé le même cours d'eau dans un secteur très proche de la traverse, la méthode de traverse utilisée pour ce pipeline aura une performance plus élevée que les autres. Par exemple, une performance de 40 peut être donnée à cette méthode et une performance de 10 aux autres. Les performances peuvent alors être réparties telles que présenté dans le Tableau 5-9.

Tableau 5-9 : Attribution des performances pour le critère C_7

Méthode	Performance				
	$C_7 = A_1$	$C_7 = A_2$	-----	$C_7 = A_{13}$	$C_7 = A_{14}$
A_1 = Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	**40**	10	-----	10	10
A_2 = Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	10	**40**	-----	10	10
A_3 = Tranchée ouverte par excavatrice	10	10	-----	10	10
A_4 = Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	10	10	-----	10	10
A_5 = Tranchée ouverte par dragage	10	10	-----	10	10
A_6 = Tranchée isolée par conduite de dérivation	10	10	-----	10	10
A_7 = Tranchée isolée par barrage et pompe	10	10	-----	10	10
A_8 = Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	10	10	-----	10	10
A_9 = Tranchée isolée par batardeau	10	10	-----	10	10
A_{10} = Tranchée isolée par dérivation du chenal	10	10	-----	10	10
A_{11} = Forage	10	10	-----	10	10
A_{12} = Fonçage/Poussée	10	10	-----	10	10
A_{13} = Forage dirigé	10	10	-----	**40**	10
A_{14} = Tunnel	10	10	-----	10	**40**

C_8 : Sécurité pour la construction

Si le site de traverse présente des enjeux sécuritaires importants, une meilleure performance sera accordée aux méthodes[11] dont l'installation et la construction sont rapides (A_1 à A_3) contrairement aux autres qui sont lentes[12]. Ce paramètre prendra les valeurs "Oui" ou "Non" selon que la sécurité soit en jeu ou non. Dans le cas où la sécurité n'est pas menacée, les performances seront identiques pour les 14 méthodes de traverse car ce sont les autres variables qui seraient décisives. Les performances peuvent alors être réparties telles que présentées dans le Tableau 5-10.

[11] Le nom des méthodes correspondant aux symboles A_1...A_{14} est disponible dans les tableaux de performance

[12] Basé essentiellement sur l'information contenue dans le Tableau 3-1

Tableau 5-10 : Attribution des performances pour le critère C_8

Méthode	Performance	
	C_8 = Non	C_8 = Oui
A_1 = Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	10	20
A_2 = Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	10	20
A_3 = Tranchée ouverte par excavatrice	10	20
A_4 = Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	10	10
A_5 = Tranchée ouverte par dragage	10	10
A_6 = Tranchée isolée par conduite de dérivation	10	10
A_7 = Tranchée isolée par barrage et pompe	10	10
A_8 = Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	10	10
A_9 = Tranchée isolée par batardeau	10	10
A_{10} = Tranchée isolée par dérivation du chenal	10	10
A_{11} = Forage	10	10
A_{12} = Fonçage/Poussée	10	10
A_{13} = Forage dirigé	10	10
A_{14} = Tunnel	10	10

C_9 : Largeur du canal

La largeur du canal sera subdivisée en cinq classes selon la valeur : (1) < 10 m ; (2) 10-20 m ; (3) 20-50 m ; (4) 50-100 m ; (5) >100 m. Les performances à attribuer aux méthodes[13] doivent tenir compte des informations suivantes[14]:

- La méthode A_{11} est limitée à environ 100 m ;
- La méthode A_{12} est limitée à environ 50 m ;
- La méthode A_3 est limitée à environ 20 m ;
- Les méthodes A_6 et A_7 sont réservées pour des petits cours d'eau.

Les performances peuvent être réparties telles que présentées dans le Tableau 5-11.

[13] Le nom des méthodes correspondant aux symboles A_1...A_{14} est disponible dans les tableaux de performance

[14] Basé essentiellement sur l'information contenue dans le Tableau 3-1

Tableau 5-11 : Attribution des performances pour le critère C_9

Méthode	Performance				
	C_9 = 1	C_9 = 2	C_9 = 3	C_9 = 4	C_9 = 5
A_1 = Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	40	40	30	20	10
A_2 = Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	40	40	15	10	5
A_3 = Tranchée ouverte par excavatrice	40	40	0	0	0
A_4 = Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	5	5	5	5	5
A_5 = Tranchée ouverte par dragage	5	5	5	5	5
A_6 = Tranchée isolée par conduite de dérivation	20	15	15	10	5
A_7 = Tranchée isolée par barrage et pompe	20	15	15	10	5
A_8 = Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	20	15	15	10	5
A_9 = Tranchée isolée par batardeau	5	5	5	5	5
A_{10} = Tranchée isolée par dérivation du chenal	5	5	5	5	5
A_{11} = Forage	20	15	30	5	0
A_{12} = Fonçage/Poussée	20	15	20	0	0
A_{13} = Forage dirigé	10	10	10	30	20
A_{14} = Tunnel	0	0	5	5	10

C_{10} : Profondeur du canal

La profondeur du canal sera subdivisée en trois classes selon la valeur : (1) < 1 m ; (2) 1-1,5 m ; (3) > 1,5 m. Les performances à attribuer aux méthodes[15] doivent tenir compte des informations suivantes[16]:

- La méthode A_1 est limitée à 1 m ;
- La méthode A_3 est limitée à 1,5 m ;
- Les méthodes A_4 et A_5 peuvent aller plus profondément ;
- Les méthodes sans tranchée ne sont pas limitées par la profondeur.

Les performances peuvent être réparties telles que présentées dans le Tableau 5-12.

[15] Le nom des méthodes correspondant aux symboles A_1...A_{14} est disponible dans les tableaux de performance

[16] Basé essentiellement sur l'information contenue dans le Tableau 3-1

Tableau 5-12 : Attribution des performances pour le critère C_{10}

Méthode	Performance		
	C_{10} = 1	C_{10} = 2	C_{10} = 3
A_1 = Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	30	0	0
A_2 = Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	30	10	10
A_3 = Tranchée ouverte par excavatrice	30	10	0
A_4 = Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	30	30	20
A_5 = Tranchée ouverte par dragage	30	30	20
A_6 = Tranchée isolée par conduite de dérivation	20	20	10
A_7 = Tranchée isolée par barrage et pompe	20	20	10
A_8 = Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	20	20	10
A_9 = Tranchée isolée par batardeau	20	20	10
A_{10} = Tranchée isolée par dérivation du chenal	20	20	10
A_{11} = Forage	20	20	30
A_{12} = Fonçage/Poussée	20	20	30
A_{13} = Forage dirigé	20	20	30
A_{14} = Tunnel	20	20	30

C_{11}: Débit du cours d'eau

Le débit du cours d'eau sera subdivisé en deux classes selon la valeur : (1) < 1 m^3/s et (2) > 1 m^3/s. Les performances à attribuer aux méthodes [17] doivent tenir compte des informations suivantes[18]:

- Les méthodes A_1, A_2, et A_7 sont adaptées pour un faible débit ;
- Les méthodes A_9 et A_{10} peuvent s'appliquer pour des débits moyens ;
- Les méthodes sans tranchée ne sont pas limitées par le débit.

Les performances peuvent être réparties telles que présentées dans le Tableau 5-13.

[17] Le nom des méthodes correspondant aux symboles A_1...A_{14} est disponible dans les tableaux de performance

[18] Basé essentiellement sur l'information contenue dans le Tableau 3-1

Tableau 5-13 : Attribution des performances pour le critère C_{11}

	Performance	
Méthode	**C_{11} = 1**	**C_{11} = 2**
A_1 = Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	20	5
A_2 = Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	20	5
A_3 = Tranchée ouverte par excavatrice	20	5
A_4 = Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	20	5
A_5 = Tranchée ouverte par dragage	20	5
A_6 = Tranchée isolée par conduite de dérivation	20	10
A_7 = Tranchée isolée par barrage et pompe	20	5
A_8 = Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	20	10
A_9 = Tranchée isolée par batardeau	20	15
A_{10} = Tranchée isolée par dérivation du chenal	20	15
A_{11} = Forage	10	30
A_{12} = Fonçage/Poussée	10	30
A_{13} = Forage dirigé	10	30
A_{14} = Tunnel	10	30

C_{12} : Géologie

Le critère qui tient compte de la géologie de la traverse est fondé primordialement sur la morphologie et les types de sols à franchir. Pour cette méthode, une échelle des phénomènes locaux est conservée, autrement dit, l'analyse de grandes failles ou des déformations terrestres n'est pas considérée dans notre analyse.

Ce critère sera formé comme étant une combinaison de la composition du substrat et celle du sol sous le substrat. Le substrat désigne ici le support du cours d'eau et non le terme géologique qui désignerait le roc. Dans ce sens, le substrat peut être vu comme étant la couche géologique de surface et le sol la couche en dessous de cette couche. Le substrat tout comme le sol peuvent prendre les valeurs élémentaires suivantes:

1. Meuble granulaire consolidé
2. Meuble granulaire non consolidé
3. Meuble à texture fine consolidé
4. Meuble à texture fine non consolidé
5. Rocher fracturé
6. Rocher non fracturé
7. Roche mère

Pour ce critère géologie, une notation du type "n.m" (n et m vont de 1 à 7 ; "n" représente le substrat et "m" le sol sous le substrat) est adoptée pour les valeurs qu'il peut prendre. Ainsi, une valeur de 3.7 désigne un substrat meuble à texture fine consolidé avec un sous-sol formé par la roche mère. Dans le cas où le lit de la rivière repose sur la roche mère (n = 7), le sous-sol sera aussi constitué par cette roche mère (m = 7). Par conséquent, le critère géologie prendra 43

valeurs différentes. Cependant, il faudra noter qu'il s'agit d'une simplification car la composition du sol ou du substrat est en principe un mélange de plusieurs textures ou configuration.

Les performances à attribuer aux méthodes[19] doivent tenir compte des informations suivantes[20]:

- Les méthodes suivantes sont compatibles avec les substrats consolidés : A_6 à A_{10} ;
- Les méthodes A_1 et A_4 sont compatibles avec les substrats non consolidés ;
- La méthode A_3 est compatible avec les substrats granulaires non consolidés et certaines roches ;
- La méthode A_2 est compatible avec les substrats à fine texture ;
- Les méthodes suivantes sont problématiques avec les substrats rocheux ou la roche-mère : A_1, A_2, A_4 et A_5 ;
- La méthode A_5 est difficile lorsqu'il s'agit de substrat large et granuleux ;
- Les méthodes A_6 et A_7 fonctionnent mieux lorsque le substrat est imperméable ;
- Les méthodes A_{11} et A_{12} sont compatibles avec les sols imperméables à texture fine ;
- La méthode A_{12} peut aussi être utilisée dans un substrat à texture grossière ;
- La méthode A_{13} est surtout adaptée pour les matériaux fins ; elle peut néanmoins être employée dans le roc. Toutefois, si le mort terrain traversé est très grossier et contient des cailloux, blocs ou galets, ou si le roc est fracturé, cette méthode peut ne pas être assurée ;
- La méthode A_{14} peut être utilisée dans la plupart des substrats au-dessus ou en dessous de la nappe phréatique.

Les performances peuvent être réparties telles que présentées dans le Tableau 5-14. Compte tenu de l'espace limité pour ce tableau, le nom des méthodes a été substitué par leurs symboles (A_1 à A_{14}) dans ce tableau.

Tableau 5-14 : Attribution des performances pour le critère C_{12}

		Méthode													
		A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}
Performance	C_{12} = 1.1	10	10	10	10	5	40	40	50	50	50	20	40	30	50
	C_{12} = 1.2	10	10	10	10	5	40	40	50	50	50	20	40	30	50
	C_{12} = 1.3	10	10	10	10	5	40	40	50	50	50	50	50	50	50
	C_{12} = 1.4	10	10	10	10	5	40	40	50	50	50	20	20	50	50
	C_{12} = 1.5	10	10	10	10	5	40	40	50	50	50	5	5	5	50
	C_{12} = 1.6	10	10	10	10	5	40	40	50	50	50	10	10	20	50
	C_{12} = 1.7	10	10	10	10	5	40	40	50	50	50	0	0	0	0
	C_{12} = 2.1	50	10	50	50	5	10	10	10	10	10	20	40	30	50
	C_{12} = 2.2	50	10	50	50	5	10	10	10	10	10	20	40	30	50
	C_{12} = 2.3	50	10	50	50	5	10	10	10	10	10	50	50	50	50
	C_{12} = 2.4	50	10	50	50	5	10	10	10	10	10	20	20	50	50
	C_{12} = 2.5	50	10	50	50	5	10	10	10	10	10	5	5	5	50
	C_{12} = 2.6	50	10	50	50	5	10	10	10	10	10	10	10	20	50

[19] Le nom des méthodes correspondant aux symboles A_1...A_{14} est disponible dans les tableaux de performance

[20] Basé essentiellement sur l'information contenue dans le Tableau 3-1

		Méthode													
		A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}
	C_{12} = 2.7	50	10	50	50	5	10	10	10	10	10	0	0	0	0
	C_{12} = 3.1	10	50	10	10	50	50	50	50	50	50	20	40	30	50
	C_{12} = 3.2	10	50	10	10	50	50	50	50	50	50	20	40	30	50
	C_{12} = 3.3	10	50	10	10	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	C_{12} = 3.4	10	50	10	10	50	50	50	50	50	50	20	20	50	50
	C_{12} = 3.5	10	50	10	10	50	50	50	50	50	50	5	5	5	50
	C_{12} = 3.6	10	50	10	10	50	50	50	50	50	50	10	10	20	50
	C_{12} = 3.7	10	50	10	10	50	50	50	50	50	50	0	0	0	0
	C_{12} = 4.1	50	50	10	50	50	10	10	10	10	10	20	40	30	50
	C_{12} = 4.2	50	50	10	50	50	10	10	10	10	10	20	40	30	50
	C_{12} = 4.3	50	50	10	50	50	10	10	10	10	10	50	50	50	50
	C_{12} = 4.4	50	50	10	50	50	10	10	10	10	10	20	20	50	50
	C_{12} = 4.5	50	50	10	50	50	10	10	10	10	10	5	5	5	50
	C_{12} = 4.6	50	50	10	50	50	10	10	10	10	10	10	10	20	50
	C_{12} = 4.7	50	50	10	50	50	10	10	10	10	10	0	0	0	0
	C_{12} = 5.1	5	5	50	5	5	5	5	5	5	5	20	40	30	50
	C_{12} = 5.2	5	5	50	5	5	5	5	5	5	5	20	40	30	50
	C_{12} = 5.3	5	5	50	5	5	5	5	5	5	5	50	50	50	50
	C_{12} = 5.4	5	5	50	5	5	5	5	5	5	5	20	20	50	50
	C_{12} = 5.5	5	5	50	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	50
	C_{12} = 5.6	5	5	50	5	5	5	5	5	5	5	10	10	20	50
	C_{12} = 5.7	5	5	50	5	5	5	5	5	5	5	0	0	0	0
	C_{12} = 6.1	5	5	50	5	5	5	5	5	5	5	20	40	30	50
	C_{12} = 6.2	5	5	50	5	5	5	5	5	5	5	20	40	30	50
	C_{12} = 6.3	5	5	50	5	5	5	5	5	5	5	50	50	50	50
	C_{12} = 6.4	5	5	50	5	5	5	5	5	5	5	20	20	50	50
	C_{12} = 6.5	5	5	50	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	50
	C_{12} = 6.6	5	5	50	5	5	5	5	5	5	5	10	10	20	50
	C_{12} = 6.7	5	5	50	5	5	5	5	5	5	5	0	0	0	0
	C_{12} = 7.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

C_{13} : Géotechnique

Ce critère sera résumé en termes de risque de glissement de terrain aux berges du cours d'eau (stabilité des pentes du cours d'eau). La gradation des dommages possibles va de la simple érosion du talus et l'exposition du pipeline jusqu'au risque d'un gros glissement de terrain et la rupture catastrophique de l'oléoduc. La pondération du risque de glissement varie selon une

combinaison de plusieurs facteurs, mais dans notre modèle une première simplification s'imposera. Trois cas réduits sont retenus :

a) Faible : sols résistants, berges à faible pente ou inexistantes, dénivelé du talus moindre, nappe d'eau basse ou inexistante, risque de liquéfaction minimal, couverte végétale des berges

b) Modéré : sols moins résistants et sensibles, berges à pentes modérées (10° à 25°), dénivelé du talus à considérer (5 m à 15 m), nappe d'eau engagée dans un possible cercle de rupture et ruisselant en bas du talus, stratigraphie irrégulière avec présence de sous strates faibles, risque de liquéfaction modérée, peu de végétation, talus exposé moyennement à l'érosion

c) Élevé : sols très peu résistants et hautement sensibles (argiles molles), pentes très prononcées (25° à 40°), dénivelé du talus important (15 m à 30 m), nappe d'eau près de la surface ou imbibant tout le sol, l'eau ruisselant de façon à éroder un talus sans végétation, haut risque de liquéfaction.

Le risque de glissement par sismicité s'évalue à partir d'un diagramme des courbes d'iso-accélération de pointe du sol. Faible: de 0,01 g à 0,20 g, Modéré : de 0,20 g à 0,40 g et Élevé : de 0,40 g à 0,85 g.

Une performance relativement élevée devrait alors être accordée aux méthodes sans tranchée (A_1 à A_{10}) dans le cas d'un risque de glissement élevé. Dans le cas d'un risque modéré, la variation relative des performances d'une méthode à l'autre sera moindre. Pour un risque faible, les performances seront identiques pour les 14 méthodes de traverse car ce sont les autres variables qui seraient décisives. Les performances peuvent alors être réparties telles que présentées dans le Tableau 5-15.

Tableau 5-15 : Attribution des performances pour le critère C_{13}

	Performance		
Méthode	**C_{13} = Faible**	**C_{13} = Modéré**	**C_{13} = Élevé**
A_1 = Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	20	10	5
A_2 = Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	20	10	5
A_3 = Tranchée ouverte par excavatrice	20	10	5
A_4 = Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	20	10	5
A_5 = Tranchée ouverte par dragage	20	10	5
A_6 = Tranchée isolée par conduite de dérivation	20	10	5
A_7 = Tranchée isolée par barrage et pompe	20	10	5
A_8 = Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	20	10	5
A_9 = Tranchée isolée par batardeau	20	10	5
A_{10} = Tranchée isolée par dérivation du chenal	20	10	5
A_{11} = Forage	20	30	40
A_{12} = Fonçage/Poussée	20	30	40
A_{13} = Forage dirigé	20	30	40
A_{14} = Tunnel	20	30	40

C_{14} : Niveau de la nappe phréatique

Le niveau de la nappe phréatique sera qualifié de "bas" ou "élevé" selon qu'il se trouve respectivement à l'intérieur ou à l'extérieur de la profondeur de recouvrement. Les performances à attribuer aux méthodes[21] doivent tenir compte des informations suivantes[22]:

- Les méthodes avec tranchée (A_1 à A_{10}) sont insensibles au niveau de la nappe phréatique ;
- Les méthodes A_{11} et A_{12} requièrent une nappe phréatique basse.

Les performances peuvent être réparties telles que présentées dans le Tableau 5-16.

Tableau 5-16 : Attribution des performances pour le critère C_{14}

	Performance	
Méthode	**C_{14} = Bas**	**C_{14} = Élevé**
A_1 = Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	20	30
A_2 = Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	20	30
A_3 = Tranchée ouverte par excavatrice	20	30
A_4 = Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	20	30
A_5 = Tranchée ouverte par dragage	20	30
A_6 = Tranchée isolée par conduite de dérivation	20	30
A_7 = Tranchée isolée par barrage et pompe	20	30
A_8 = Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	20	30
A_9 = Tranchée isolée par batardeau	20	30
A_{10} = Tranchée isolée par dérivation du chenal	20	30
A_{11} = Forage	20	10
A_{12} = Fonçage/Poussée	20	10
A_{13} = Forage dirigé	20	10
A_{14} = Tunnel	20	10

C_{15} : Potentiel d'affouillement

Cette variable peut prendre les valeurs "Faible" ou "Élevé". Lorsque le potentiel d'affouillement est élevé, il serait préférable de s'orienter vers les méthodes sans tranchée (A_{11} à A_{14}) car celles-ci vont plus profondément sous le lit du cours d'eau. Les performances peuvent être réparties telles que présentées dans le Tableau 5-17.

[21] Le nom des méthodes correspondant aux symboles A_1...A_{14} est disponible dans les tableaux de performance

[22] Basé essentiellement sur l'information contenue dans le Tableau 3-1

Tableau 5-17 : Attribution des performances pour le critère C_{15}

	Performance	
Méthode	**C_{15} = Faible**	**C_{15} = Élevé**
A_1 = Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	20	10
A_2 = Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	20	10
A_3 = Tranchée ouverte par excavatrice	20	10
A_4 = Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	20	10
A_5 = Tranchée ouverte par dragage	20	10
A_6 = Tranchée isolée par conduite de dérivation	20	10
A_7 = Tranchée isolée par barrage et pompe	20	10
A_8 = Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	20	10
A_9 = Tranchée isolée par batardeau	20	10
A_{10} = Tranchée isolée par dérivation du chenal	20	10
A_{11} = Forage	20	30
A_{12} = Fonçage/Poussée	20	30
A_{13} = Forage dirigé	20	30
A_{14} = Tunnel	20	30

C_{16} : Présence de zones inondables

Cette variable peut prendre les valeurs "Étroit" ou "Large" selon la taille de la zone inondable. Les zones inondables sont très sujettes à l'affouillement et pourraient augmenter le risque de glissement. Pour une large plaine inondable, il serait préférable comme dans le cas du critère C_{15} de s'orienter vers les méthodes sans tranchée car une tranchée en pleine plaine inondable serait peu sécuritaire pour la conduite qui risque d'être exposée suite aux érosions, conséquences des inondations. Les performances peuvent être réparties telles que présentées dans le Tableau 5-18

Tableau 5-18 : Attribution des performances pour le critère C_{16}

	Performance	
Méthode	**C_{16} = Étroit**	**C_{16} = Large**
A_1 = Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	20	10
A_2 = Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	20	10
A_3 = Tranchée ouverte par excavatrice	20	10
A_4 = Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	20	10
A_5 = Tranchée ouverte par dragage	20	10
A_6 = Tranchée isolée par conduite de dérivation	20	10
A_7 = Tranchée isolée par barrage et pompe	20	10
A_8 = Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	20	10
A_9 = Tranchée isolée par batardeau	20	10
A_{10} = Tranchée isolée par dérivation du chenal	20	10
A_{11} = Forage	20	30
A_{12} = Fonçage/Poussée	20	30
A_{13} = Forage dirigé	20	30
A_{14} = Tunnel	20	30

C_{17} : Diamètre de la conduite

Le diamètre de la conduite sera subdivisé en trois classes qualitatives : à savoir "Petit" ; "Moyen" ou "Grand". Les performances à attribuer aux méthodes [23] doivent tenir compte des informations suivantes[24]:

- La méthode A_1 est faite pour les petits diamètres (diamètre nominal < 150 mm) ;
- Avec un pipeline de grand diamètre, il est difficile d'effectuer une fouille en tranchée et d'insérer le pipeline avec la méthode A_6 ;
- Avec la méthode A_{13}, le système de forage peut rester coincé dans le trou et l'équipement peut être perdu, surtout lors des alésages de grand diamètre ;
- La méthode A_{12} peut accommoder de grands diamètres de tuyaux ;
- La méthode A_{14} est spécialement adaptée pour les pipelines à grand diamètre.

Les performances peuvent être réparties telles que présentées dans le Tableau 5-19.

[23] Le nom des méthodes correspondant aux symboles A_1...A_{14} est disponible dans les tableaux de performance

[24] Basé essentiellement sur l'information contenue dans le Tableau 3-1

Tableau 5-19 : Attribution des performances pour le critère C_{17}

	Performance		
Méthode	**C_{17} = Petit**	**C_{17} = Moyen**	**C_{17} = Grand**
A_1 = Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	40	0	0
A_2 = Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	30	30	25
A_3 = Tranchée ouverte par excavatrice	30	30	25
A_4 = Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	30	30	25
A_5 = Tranchée ouverte par dragage	30	30	25
A_6 = Tranchée isolée par conduite de dérivation	20	20	20
A_7 = Tranchée isolée par barrage et pompe	20	30	25
A_8 = Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	20	30	25
A_9 = Tranchée isolée par batardeau	20	30	25
A_{10} = Tranchée isolée par dérivation du chenal	20	30	25
A_{11} = Forage	20	30	25
A_{12} = Fonçage/Poussée	20	30	30
A_{13} = Forage dirigé	20	20	20
A_{14} = Tunnel	0	5	40

C_{18} : Différence d'élévation entre l'entrée et la sortie de la conduite

Cette variable sera subdivisée en trois classes selon la valeur: "Nulle" = 0 m ; "Faible" = 0-2 m ; "Élevée" > 2 m. Le nivellement des berges est nécessaire[25] pour les méthodes[26] A_1, A_2 et A_4. Elles auront donc une performance faible dans le cas d'une grande différence d'élévation. Pour une différence nulle, les performances seront identiques pour les 14 méthodes de traverse car ce sont les autres variables qui seraient décisives.

Les performances peuvent être réparties telles que présentées dans le Tableau 5-20.

[25] Basé essentiellement sur l'information contenue dans le Tableau 3-1

[26] Le nom des méthodes correspondant aux symboles A_1...A_{14} est disponible dans les tableaux de performance

Tableau 5-20 : Attribution des performances pour le critère C_{18}

	Performance		
Méthode	**C_{18} = Nulle**	**C_{18} = Faible**	**C_{18} = Élevée**
A_1 = Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	20	10	0
A_2 = Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	20	10	0
A_3 = Tranchée ouverte par excavatrice	20	20	30
A_4 = Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	20	10	0
A_5 = Tranchée ouverte par dragage	20	25	30
A_6 = Tranchée isolée par conduite de dérivation	20	25	30
A_7 = Tranchée isolée par barrage et pompe	20	25	30
A_8 = Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	20	25	30
A_9 = Tranchée isolée par batardeau	20	25	30
A_{10} = Tranchée isolée par dérivation du chenal	20	25	30
A_{11} = Forage	20	15	5
A_{12} = Fonçage/Poussée	20	15	5
A_{13} = Forage dirigé	20	25	30
A_{14} = Tunnel	20	25	30

C_{19} : Coût

Il existe plusieurs caractéristiques de cours d'eau qui peuvent affecter le coût de chaque franchissement, telles que la largeur, la profondeur, la forme du chenal, le volume du débit et la composition du substrat. La plupart des franchissements doivent être évalués en fonction de chaque cas. Les performances à attribuer aux méthodes relativement au critère "coût" doivent tenir compte des informations suivantes qui sont données seulement de façon générique à titre indicatif[27]:

- Les méthodes A_1 et A_2 ont généralement un coût bas ;
- Les méthodes suivantes ont généralement un coût modéré : A_3, A_6, A_7, A_8, A_{11} et A_{12} ;
- La méthode A_{13} a généralement un coût entre modéré et élevé ;
- Les méthodes suivantes ont généralement un coût élevé : A_4, A_5, A_9 et A_{10}.

Les performances peuvent être réparties telles que présentées dans le Tableau 5-21.

[27] Basé essentiellement sur l'information contenue dans le Tableau 3-3

Tableau 5-21 : Attribution des performances pour le critère C_{19}

	Performance
Méthode	**C_{19}**
A_1 = Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	50
A_2 = Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	50
A_3 = Tranchée ouverte par excavatrice	40
A_4 = Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	20
A_5 = Tranchée ouverte par dragage	20
A_6 = Tranchée isolée par conduite de dérivation	40
A_7 = Tranchée isolée par barrage et pompe	40
A_8 = Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	40
A_9 = Tranchée isolée par batardeau	20
A_{10} = Tranchée isolée par dérivation du chenal	20
A_{11} = Forage	40
A_{12} = Fonçage/Poussée	40
A_{13} = Forage dirigé	30
A_{14} = Tunnel	10

5.1.3 Méthodes recommandées

Pour une traverse donnée, une fois que les poids normalisés et les performances ont été définis selon la méthodologie décrite dans les sections 5.1.1 et 5.1.2, les performances sont normalisées pour chaque critère en divisant la valeur de la performance par la performance maximale pour ce critère de telle sorte que les performances pour tous les critères soient comprises entre 0 et 1. Ceci évite l'impact du problème d'échelle propre à la méthode de la somme pondérée (Maystre *et coll.*, 1994). Ensuite, il faut calculer la somme pondérée des performances normalisées méthode par méthode pour finalement classer les méthodes recommandées par ordre de préférence. Un exemple de calcul de normalisation de performance est donné au Tableau 5-22.

Tableau 5-22 : Exemple de calcul de normalisation des performances

Méthode	Performance	Performance normalisée
A_1 = Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	20	0,67
A_2 = Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	20	0,67
A_3 = Tranchée ouverte par excavatrice	15	0,5
A_4 = Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	10	0,33
A_5 = Tranchée ouverte par dragage	10	0,33
A_6 = Tranchée isolée par conduite de dérivation	10	0,33
A_7 = Tranchée isolée par barrage et pompe	10	0,33
A_8 = Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	10	0,33
A_9 = Tranchée isolée par batardeau	10	0,33
A_{10} = Tranchée isolée par dérivation du chenal	10	0,33
A_{11} = Forage	30	1
A_{12} = Fonçage/Poussée	30	1
A_{13} = Forage dirigé	30	1
A_{14} = Tunnel	30	1

6 Application au projet Oléoduc Énergie Est

La méthodologie décrite dans la section 5 sera appliquée à quelques sites de traverse du projet Oléoduc Énergie Est. Les sites choisis sont ceux pour lesquels assez d'information est disponible pour pouvoir appliquer la méthodologie. Il s'agit notamment des traverses de cours d'eau où une étude de faisabilité par forage dirigé a été réalisée.

6.1 Collecte de données

Le Tableau 6-1 et le Tableau 6-2 donnent le résumé de la collecte de données provenant de plusieurs sources (dépôt à l'Office national de l'énergie projet Oléoduc Énergie Est ; Connaissances sur des projets existants ; système d'information hydrogéologique du Québec ; bases de données publiques du CEHQ ; cartes de zones inondables relativement aux valeurs spécifiques des différents critères au niveau des traverses identifiées pour l'étude de cas. Les valeurs représentent parfois une interprétation des données sources par les auteurs de ce rapport ou une valeur par défaut. Par ailleurs, les données reçues et/ou analysées sont parfois très anciennes et ne représentent pas nécessairement la réalité actuelle de la situation. Par conséquent, ces données sont fournies seulement dans le but de l'application du modèle. Il est à noter que la disposition de données à jour conduirait à des résultats conséquents.

Mise en garde : L'information provenant de la documentation publique du projet Oléoduc Energie Est qui était disponible à l'automne 2015 fut utilisée pour supporter cette analyse. Cette information est susceptible d'évoluer lors des prochains mois.

Tableau 6-1 : Valeurs des critères C_1 à C_{10} pour les traverses critiques du projet Oléoduc Énergie Est

ID Traverse	Nom du cours d'eau	Régime du cours d'eau (C_1)	Habitats et circulation de poissons (C_2)	Droits de Passage (C_3)	Navigabilité (C_4)	Proximité de résidences (C_5)	Utilisateurs d'eau en aval (C_6)	Proximité d'autres infrastructures (C_7)	Sécurité pour la construction (C_8)	Largeur du cours d'eau (C_9)	Profondeur du canal (C_{10})
QC-LM015	rivière des Mille Îles	Permanent	Élevé	Permis	Bas	1	Élevé[a]	A_{13}[a]	Non[a]	5	3
QC-LM021	rivière des Prairies	Permanent	Élevé	Permis	Bas	1	Élevé[a]	A_{13}[a]	Non[a]	5	3
QC-ML007*	rivière des Outaouais	Permanent	Élevé	Permis	Bas	2	Élevé[a]	A_{13}[a]	Non[a]	5	3
QC-ML1004*	rivière Madawaska	Permanent	Élevé	Permis	Élevé	1	Élevé[a]	A_{13}[a]	Non[a]	5	2[a]
QC-ML110	rivière L'Assomption	Permanent	Élevé	Permis	Élevé	2	Élevé[a]	A_{13}[a]	Non[a]	5	3[a]
QC-ML140	rivière Bayonne	Permanent	Élevé	Permis	Élevé	1	Élevé[a]	A_{13}[a]	Non[a]	3	3
QC-ML144	rivière Chicot	Permanent	Élevé	Permis	Moyen	2	Élevé[a]	A_{13}[a]	Non[a]	3	3
QC-ML168	rivière Maskinongé	Permanent	Moyen	Permis	Élevé	2	Élevé[a]	A_{13}[a]	Oui	3	3
QC-ML207	rivière du Loup	Permanent	Élevé	Permis	Élevé	2	Élevé[a]	A_{13}[a]	Non[a]	3	3
QC-ML240	rivière Saint-Maurice	Permanent	Moyen	Permis	Bas	1	Élevé[a]	A_{13}[a]	Non[a]	5	3
QC-ML257*	rivière Batiscan	Permanent	Élevé	Permis	Élevé	1	Élevé[a]	A_{13}[a]	Non[a]	5	3[a]
QC-ML272	rivière Sainte-Anne	Permanent	Élevé	Permis	Élevé	1	Élevé[a]	A_{13}[a]	Non[a]	5	3

ID Traverse	Nom du cours d'eau	Régime du cours d'eau (C_1)	Habitats et circulation de poissons (C_2)	Droits de Passage (C_3)	Navigabilité (C_4)	Proximité de résidences (C_5)	Utilisateurs d'eau en aval (C_6)	Proximité d'autres infrastructures (C_7)	Sécurité pour la construction (C_8)	Largeur du cours d'eau (C_9)	Profondeur du canal (C_{10})
QC-ML308	rivière Jacques-Cartier	Permanent	Élevé	Permis	Élevé	1	Élevé[a]	A_{13}[a]	Non[a]	5	2
QC-ML325	Fleuve Saint-Laurent	Permanent	Élevé	Permis	Bas	1	Élevé[a]	A_{14}	Non[a]	5	3
QC-ML335*	rivière Beaurivage	Permanent	Élevé	Permis	Élevé	1	Élevé[a]	A_{13}[a]	Non[a]	3	3[a]
QC-ML345*	rivière Chaudière	Permanent	Élevé	Permis	Élevé	2	Élevé[a]	A_{13}[a]	Non[a]	5	3[a]
QC-ML404*	rivière Etchemin	Permanent	Élevé	Permis	Élevé	1	Élevé[a]	A_{13}[a]	Non[a]	4	3[a]
QC-ML536	rivière du Sud	Permanent	Élevé	Permis	Élevé	1	Élevé[a]	A_{13}[a]	Non[a]	4	1
QC-ML574	rivière Bras Saint-Nicolas	Permanent	Élevé	Permis	Moyen	1	Élevé[a]	A_{13}[a]	Non[a]	3	1
QC-ML589	rivière Trois Saumons	Permanent	Élevé	Permis	Moyen	1	Élevé[a]	A_{13}[a]	Non[a]	4	1
QC-ML605*	rivière Ouelle	Permanent	Élevé	Permis	Élevé	1	Élevé[a]	A_{13}[a]	Non[a]	3	1[a]
QC-ML609*	La Grande Rivière	Permanent	Élevé	Permis	Élevé	1	Élevé[a]	A_{13}[a]	Non[a]	3	1[a]
QC-ML917*	rivière du Loup	Permanent	Élevé	Permis	Élevé	1	Élevé[a]	A_{13}[a]	Non[a]	2	1[a]

[a]: La donnée a été complétée par hypothèse. Elle n'est donc pas forcément réelle. Elle est utilisée uniquement en vue de l'application du modèle.

NB: L'ID Traverse, y compris les ID avec une étoile, est le numéro utilisé par TransCanada pour identifier la traverse. Ainsi le lecteur peut retrouver la traverse en question dans les documents relatifs au projet Oléoduc Énergie Est

Tableau 6-2 : Valeurs des critères C_{11} à C_{19} pour les traverses critiques du projet Oléoduc Énergie Est

ID Traverse	Nom du cours d'eau	Débit moyen du cours d'eau (C_{11})	Géologie (C_{12})	Géotechnique (Risque de Glissement) (C_{13})	Niveau de la nappe phréatique (C_{14})	Risque d'affouillement (C_{15})	Présence de zones inondables (C_{16})	Diamètre de la conduite (C_{17})	Différence d'élévation entrée/sortie (C_{18})	Coût (C_{19}) [b]
QC-LM015	rivière des Mille Îles	2	2.3	Faible	Élevé	Faible	Étroit	Grand	Élevée	-
QC-LM021	rivière des Prairies	2	2.3	Faible	Élevé	Faible	Étroit	Grand	Nulle	-
QC-ML007*	rivière des Outaouais	2	2.5	Faible	Élevé	Élevé	Étroit[a]	Grand	Nulle[a]	-
QC-ML1004*	rivière Madawaska	2	2.1	Faible	Élevé	Faible	Étroit[a]	Grand	Élevée	-
QC-ML110	rivière L'Assomption	2	2.3	Faible	Élevé	Faible	Étroit	Grand	Faible	-
QC-ML140	rivière Bayonne	2	2.3	Faible	Élevé[a]	Faible	Étroit	Grand	Faible	-
QC-ML144	rivière Chicot	2[a]	2.3	Faible	Élevé	Faible	Étroit	Grand	Nulle	-
QC-ML168	rivière Maskinongé	2	2.3	Modéré	Élevé	Élevé	Étroit[a]	Grand	Faible	-
QC-ML207	rivière du Loup	2	2.3	Élevé	Élevé	Élevé	Étroit[a]	Grand	Élevée	-
QC-ML240	rivière Saint-Maurice	2	2.1	Modéré	Élevé	Élevé	Large	Grand	Faible	-
QC-ML257*	rivière Batiscan	2	2.3	Élevé	Élevé	Élevé	Large[a]	Grand	Élevée	-
QC-ML272	rivière Sainte-Anne	2	2.3	Élevé	Élevé	Élevé	Large	Grand	Élevée	-

ID Traverse	Nom du cours d'eau	Débit moyen du cours d'eau (C_{11})	Géologie (C_{12})	Géotechnique (Risque de Glissement) (C_{13})	Niveau de la nappe phréatique (C_{14})	Risque d'affouillement (C_{15})	Présence de zones inondables (C_{16})	Diamètre de la conduite (C_{17})	Différence d'élévation entrée/sortie (C_{18})	Coût (C_{19}) [b]
QC-ML308	rivière Jacques-Cartier	2	2.3	Faible	Élevé	Élevé	Large	Grand	Élevée	-
QC-ML325	Fleuve Saint-Laurent	2	2.3	Faible	Élevé	Élevé	Large[a]	Grand	Élevée	-
QC-ML335*	rivière Beaurivage	2	2.1	Faible	Élevé	Faible	Étroit	Grand	Faible	-
QC-ML345*	rivière Chaudière	2	2.1	Faible	Élevé	Élevé	Étroit	Grand	Nulle	-
QC-ML404*	rivière Etchemin	2	2.1[a]	Élevé	Élevé	Élevé	Étroit	Grand	Élevée	-
QC-ML536	rivière du Sud	2	2.1	Faible	Élevé	Élevé	Étroit[a]	Grand	Faible	-
QC-ML574	rivière Bras Saint-Nicolas	2	2.1[a]	Faible	Élevé[a]	Élevé	Étroit[a]	Grand	Faible	-
QC-ML589	rivière Trois Saumons	2[a]	2.5	Faible	Élevé	Élevé	Étroit[a]	Grand	Élevée	-
QC-ML605*	rivière Ouelle	2	2.1	Faible	Élevé	Faible	Large	Grand	Élevée	-
QC-ML609*	La Grande Rivière	2[a]	2.5	Faible	Élevé	Faible	Large[a]	Grand	Faible	-
QC-ML917*	rivière du Loup	2[a]	2.1	Faible	Élevé	Faible	Large[a]	Grand	Élevée	-

[a] : La donnée a été complétée par hypothèse. Elle n'est donc pas forcément réelle. Elle est utilisée uniquement en vue de l'application du modèle.
[b] : Selon la méthodologie présentée à la section 4, la valeur du critère de coût dépend uniquement de la méthode et non de la traverse.

6.2 Application et comparaison des résultats avec les technologies prévues dans le projet Oléoduc Énergie Est

L'application du processus de sélection donne les résultats présentés aux Tableau 6-3 à Tableau 6-6 pour les traverses critiques étudiées.

Tableau 6-3 : Résultats de la somme pondérée pour les différentes méthodes de traverse à chaque site de l'étude de cas (1/3)

	Rivière des Mille Îles	Rivière des Prairies	Rivière des Outaouais	Rivière Madawaska	Rivière L'Assomption	Rivière Bayonne	Rivière Chicot	Rivière Maskinongé
Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	0,814	0,849	0,795	0,780	0,770	0,828	0,837	0,736
Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	0,675	0,709	0,656	0,640	0,631	0,671	0,681	0,602
Tranchée ouverte par excavatrice	0,779	0,779	0,726	0,751	0,698	0,721	0,722	0,629
Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	0,799	0,833	0,780	0,753	0,721	0,738	0,759	0,612
Tranchée ouverte par dragage	0,773	0,773	0,719	0,727	0,681	0,698	0,698	0,586
Tranchée isolée par conduite de dérivation	0,744	0,744	0,691	0,698	0,652	0,693	0,693	0,584
Tranchée isolée par barrage et pompe	0,756	0,756	0,703	0,710	0,664	0,705	0,705	0,590
Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	0,766	0,766	0,712	0,720	0,674	0,714	0,714	0,599
Tranchée isolée par batardeau	0,749	0,749	0,695	0,703	0,657	0,674	0,674	0,559
Tranchée isolée par dérivation du chenal	0,749	0,749	0,695	0,703	0,657	0,674	0,674	0,559
Forage	0,906	0,935	0,883	0,848	0,921	0,990	**1,004**	0,955
Fonçage/Poussée	0,910	0,939	0,887	0,876	0,925	0,971	0,985	0,937
Forage dirigé	**1,046**	**1,046**	**0,995**	**1,000**	**1,046**	**1,000**	1,000	**0,966**
Tunnel	0,968	0,968	0,968	0,945	0,968	0,945	0,945	0,911

Tableau 6-4 : Résultats de la somme pondérée pour les différentes méthodes de traverse à chaque site de l'étude de cas (2/3)

	Rivière du Loup	Rivière Saint-Maurice	Rivière Batiscan	Rivière Sainte-Anne	Rivière Jacques-Cartier	Fleuve Saint-Laurent	Rivière Beaurivage	Rivière Chaudière
Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	0,710	0,728	0,668	0,668	0,718	0,753	0,828	0,761
Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	0,554	0,612	0,529	0,529	0,579	0,614	0,671	0,621
Tranchée ouverte par excavatrice	0,624	0,673	0,616	0,616	0,689	0,718	0,721	0,674
Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	0,620	0,713	0,618	0,618	0,692	0,738	0,738	0,711
Tranchée ouverte par dragage	0,594	0,688	0,593	0,593	0,666	0,712	0,698	0,650
Tranchée isolée par conduite de dérivation	0,589	0,662	0,564	0,564	0,637	0,683	0,693	0,622
Tranchée isolée par barrage et pompe	0,601	0,668	0,576	0,576	0,649	0,695	0,705	0,634
Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	0,610	0,678	0,585	0,585	0,659	0,705	0,714	0,643
Tranchée isolée par batardeau	0,570	0,661	0,569	0,569	0,642	0,688	0,674	0,627
Tranchée isolée par dérivation du chenal	0,570	0,661	0,569	0,569	0,642	0,688	0,674	0,627
Forage	0,975	0,886	0,906	0,906	0,883	0,906	0,955	0,900
Fonçage/Poussée	0,956	0,914	0,910	0,910	0,887	0,910	0,960	0,927
Forage dirigé	**1,000**	**1,023**	**1,046**	**1,046**	**1,023**	0,995	**0,977**	**1,023**
Tunnel	0,945	0,968	0,968	0,968	0,945	**1,020**	0,945	0,968

Tableau 6-5 : Résultats de la somme pondérée pour les différentes méthodes de traverse à chaque site de l'étude de cas (3/3)

	Rivière Etchemin	Rivière du Sud	Rivière Bras Saint-Nicolas	Rivière Trois Saumons	Rivière Ouelle	La Grande Rivière	Rivière du Loup
Tranchée ouverte par charrue défonceuse type	0,710	0,843	0,878	0,841	0,852	0,866	0,852
Tranchée ouverte par trancheuse à roue-pelle	0,565	0,675	0,698	0,673	0,673	0,687	0,707
Tranchée ouverte par excavatrice	0,647	0,759	0,776	0,783	0,766	0,759	0,835
Tranchée ouverte par pelle à benne trainante	0,643	0,730	0,753	0,740	0,717	0,730	0,714
Tranchée ouverte par dragage	0,617	0,691	0,714	0,714	0,691	0,691	0,688
Tranchée isolée par conduite de dérivation	0,600	0,674	0,708	0,697	0,685	0,685	0,676
Tranchée isolée par barrage et pompe	0,612	0,686	0,720	0,709	0,697	0,697	0,688
Tranchée isolée par dérivation par pompe à haut volume	0,622	0,695	0,730	0,718	0,707	0,707	0,698
Tranchée isolée par batardeau	0,593	0,667	0,690	0,690	0,667	0,667	0,664
Tranchée isolée par dérivation du chenal	0,593	0,667	0,690	0,690	0,667	0,667	0,664
Forage	0,883	0,875	0,932	0,843	0,917	0,915	0,874
Fonçage/Poussée	0,899	0,891	0,937	0,835	0,922	0,896	0,902
Forage dirigé	**1,023**	**1,000**	**0,954**	**0,972**	**0,954**	**0,926**	**0,949**
Tunnel	0,945	0,922	0,922	0,922	0,922	0,922	0,911

Tableau 6-6 : Comparaison entre les méthodes envisagées par le projet Oléoduc Énergie Est et les méthodes prédites par le modèle

ID Traverse	Nom du cours d'eau	Méthode envisagée	Méthode du modèle
QC-LM015	rivière des Mille Îles	Forage dirigé	Forage dirigé
QC-LM021	rivière des Prairies	Forage dirigé	Forage dirigé
QC-ML007*	rivière des Outaouais	Forage dirigé	Forage dirigé
QC-ML1004*	rivière Madawaska	Forage dirigé	Forage dirigé
QC-ML110	rivière L'Assomption	Forage dirigé	Forage dirigé
QC-ML140	rivière Bayonne	Forage dirigé	Forage dirigé
QC-ML144	rivière Chicot	Forage dirigé	Forage
QC-ML168	rivière Maskinongé	Forage dirigé	Forage dirigé
QC-ML207	rivière du Loup	Forage dirigé	Forage dirigé
QC-ML240	rivière Saint-Maurice	Forage dirigé	Forage dirigé
QC-ML257*	rivière Batiscan	Forage dirigé	Forage dirigé
QC-ML272	rivière Sainte-Anne	Forage dirigé	Forage dirigé
QC-ML308	rivière Jacques-Cartier	Forage dirigé	Forage dirigé
QC-ML325	Fleuve Saint-Laurent	Tunnel	Tunnel
QC-ML335*	rivière Beaurivage	Forage dirigé	Forage dirigé
QC-ML345*	rivière Chaudière	Forage dirigé	Forage dirigé
QC-ML404*	rivière Etchemin	Forage dirigé	Forage dirigé
QC-ML536	rivière du Sud	Forage dirigé	Forage dirigé
QC-ML574	rivière Bras Saint-Nicolas	Forage dirigé	Forage dirigé
QC-ML589	rivière Trois Saumons	Forage dirigé	Forage dirigé
QC-ML605*	rivière Ouelle	Forage dirigé	Forage dirigé
QC-ML609*	La Grande Rivière	Forage dirigé	Forage dirigé
QC-ML917*	rivière du Loup	Forage dirigé	Forage dirigé

Le classement des méthodes pour ces cas d'application privilégie généralement les méthodes sans tranchée en priorité avant les méthodes par tranchée. À part le cas du fleuve Saint-Laurent et celui de la rivière Chicot, le forage dirigé apparaît en tête de liste ; ce qui suggère alors cette technique comme étant la mieux adaptée pour traverser ces rivières. Cette méthode est celle qui est également envisagée pour le projet Oléoduc Énergie Est à la suite des études préliminaires (TransCanada, 2014b).

Dans les techniques par tranchée, la tranchée ouverte par rabot apparaît souvent comme la technique préférable. Cependant cette technique devrait ne pas être privilégiée dans certains cas de traverse compte tenu de la profondeur relativement importante du cours d'eau pour son application. D'ailleurs, l'une des faiblesses de la méthode de la somme pondérée porte sur la compensation entre les critères : un projet ayant fait l'objet d'une évaluation très négative sur un critère, peut compenser cette "mauvaise note" par des évaluations plus positives sur d'autres critères (Maystre *et coll.*, 1994).

La méthode prédite par le modèle pour traverser le fleuve Saint-Laurent est la construction d'un tunnel. Ce résultat apparaît raisonnable compte tenu de l'importance de ce fleuve et de tous les enjeux associés.

Pour la rivière Chicot, bien que le forage simple apparaisse en première position sur la base de la somme pondérée (1,004), le forage dirigé suit de très près (1,000). Les deux méthodes peuvent ainsi être considérées comme ayant une performance équivalente pour cette traverse. Il n'y a donc pas lieu de parler d'un conflit entre la méthode envisagée et celle prédite par le modèle.

Il est à noter que le modèle ne permet pas de conclure sur la faisabilité d'une méthode mais donne plutôt un classement des méthodes sur la base d'une moyenne de l'ensemble des critères considérés. Dans la pratique, un critère spécifique peut impliquer la non-faisabilité d'une technique au site étudié. C'est le cas par exemple du site de traverse de la rivière des Outaouais qui a été jugé non faisable sur la base des informations géologiques recueillies à cet endroit.

La section 6.3 focalise sur les aspects géotechniques de certaines traverses.

6.3 Problèmes géotechniques liés aux franchissements de divers cours d'eau au Québec (faisabilité des techniques proposées)

Le pipeline prévu dans le cadre du projet Oléoduc Énergie Est doit franchir un grand nombre de cours d'eau, dont plus d'une trentaine présentent des risques de glissement de terrain en raison de l'instabilité des berges. La majorité des traverses à risque se situe sur la rive nord du Saint-Laurent, entre Montréal et Saint-Augustin-de-Desmaures, où l'oléoduc doit traverser le fleuve. Sur la rive sud, le pipeline traverse la région de Lévis où les cours d'eau traversés présentent aussi des risques connus de glissements de terrain, principalement dans six zones.

Mise en garde : L'information provenant de la documentation publique du projet Oléoduc Energie Est qui était disponible à l'automne 2015 fut utilisée pour supporter cette analyse. Cette information est susceptible d'évoluer lors des prochains mois.

a) Risques de glissement

Au total, une trentaine de cours d'eau ont été analysés par la firme Golder Associates Ltd (par la suite devenue Golder) et sont regroupés dans le rapport *''Hydrotechnical Hazard Phase II Assessment, Revision 2''* du 12 mars 2015 (Golder Associates, 2015b). Parmi les cours d'eau présentant des risques de glissement de terrain se trouvent les traverses suivantes :

Traverses à risque élevé:

- la Petite rivière du Loup ;
- La rivière Chacoura ;
- la rivière du Loup ;
- la Petite rivière Yamachiche ;
- la rivière Champlain ;
- la rivière Batiscan et un affluent de la rivière Batiscan;
- la rivière Sainte-Anne ;
- la rivière Etchemin et un affluent de la rivière Etchemin.

Traverses à risque modéré:

- la rivière à la Graisse et son affluent ;
- la rivière de la Cabane Ronde ;
- la rivière des Outaouais ;
- la rivière de Mille Îles ;
- la rivière Bras Saint-Nicolas ;
- la rivière du Sud ;
- la rivière Trois-Saumons.

Traverses à faible risque:

- la rivière du Nord ;
- la rivière des Prairies ;
- la rivière Chaudière.

Les prochains paragraphes analysent les résultats des forages effectués de part et d'autre d'un certain nombre de traverses de cours d'eau, en procédant selon le risque de glissement et d'ouest en est, au Québec. Les résultats des forages se trouvent dans le rapport *Conception de l'oléoduc, TransCanada, Oléoduc Énergie Est* (TransCanada, 2014b). Alors que les forages ont été effectués par la firme Exp., les études de faisabilité des traversées ont été effectuées par la firme Entec. Les numéros tels que "EE-LS-245" permettent de repérer la traverse dans les documents du projet Oléoduc Énergie Est.

Traverses à risque élevé:

Petite rivière du Loup (EE-LS-245) et rivière Chacoura (EE-LS-247)

Bien qu'aucun résultat de forage ne soit disponible, ces zones sont caractérisées par des risques de glissements élevés. La méthode de franchissement par forage dirigé semble être la meilleure solution.

Rivière du Loup (EE-LS-248)

Trois forages, QEEP-022, QEEP-023 et QEEP-024, furent complétés à cet endroit. Le mort terrain est constitué, en premier lieu, d'une couche superficielle stratifiée, de silt argileux et sable silteux, sur une épaisseur variant de 2,6 à 2,8 m. Ensuite, un dépôt épais de silt argileux et d'argile silteuse a été rencontré. Les trois forages furent arrêtés dans ce dépôt, à des profondeurs variant entre 30,6 m (QEEP-022) et 39,8 m (QEEP-023).

Le forage dirigé est la meilleure solution, des zones de glissements de terrain sont dénombrées sur les berges de cette rivière (risque élevé).

Notons par ailleurs que des risques liés au forage dirigé dans les sols argileux mous sont aussi présents à cet endroit.

Petite rivière Yamachiche (EE-LS-249), rivière Yamachiche (EE-LS-250) et deux ruisseaux (EE-LS-251 et EE-LS-252)

Aucun résultat de forages à ces endroits n'est disponible. Cependant, comme ces rivières se trouvent dans la même zone que celles rencontrées juste précédemment, il est supposé que les

mêmes sols sont présents à ces traverses. Par conséquent, la méthode de franchissement par forage dirigé semble la plus adaptée, en tenant toujours compte des risques associés à cette technique dans les sols argileux. De plus, les berges de ces cours d'eau présentent des cicatrices de glissements de terrain.

Affluents sans nom de la rivière Champlain (EE-LS-260 et EE-LS-261) et rivière Champlain (EE-LS-265)

Bien qu'aucun résultat de forage ne soit disponible à ces endroits, les risques de glissement sont élevés car les berges portent les cicatrices d'anciens glissements et de glissements récents. Il est probable que la méthode de franchissement par forage dirigé puisse être envisagée.

Rivière Batiscan (EE-LS-266) et affluent de la rivière Batiscan (EE-LS-267)

Comme dans le cas de la rivière Champlain, de nombreuses cicatrices de glissement sont présentes sur les berges de cette rivière.

Deux forages furent effectués sur les deux rives de la rivière Batiscan. Dans le forage QEEP-029, la stratigraphie est composée de silt argileux. Ce forage fut arrêté dans ce dépôt, à une profondeur de 41,23 m (Élévation : -24,63 m). Dans le forage QEEP-031, sous une couche superficielle de 1,47 m d'épaisseur de sable silteux brun, se rencontre un épais dépôt de silt et argile jusqu'à une profondeur de 32,80 m (Élévation : -25,90 m). Sous le silt et l'argile se rencontre une couche de 1,85 m d'épaisseur de sable silteux et graveleux fin dense, reposant sur le socle rocheux à une profondeur de 34,65 m (Élévation : -27,75 m). Le roc est constitué de shale argileux gris à noir peu résistant. Les premiers mètres du socle rocheux sont très fracturés (Élévation : -35,98 m).

Le franchissement de la rivière Batiscan par forage dirigé est faisable, surtout en raison des risques élevés de glissements. Toutefois, demeurent les risques associés au gonflement du sol argileux, à l'effondrement du trou de forage, aux pertes de fluide et aux pertes par fracturation.

Rivière Sainte-Anne (EE-LS-268)

Deux forages (QEEP-032 et QEEP-034) furent complétés à cet endroit. Dans les deux forages, le mort terrain est très stratifié. Il est composé de couches alternées de sable, d'argile silteuse et de sable silteux, reposant sur du till dense contenant des cailloux et des blocs. Dans le forage QEEP-032, la présence probable de schiste a été détectée à 34,8 m de profondeur, alors que le forage fut arrêté à 35,37 m de profondeur (Élévation : -15,97 m). Dans le forage QEEP-034, le socle rocheux, constitué de calcaire gris et de calcaire argileux ayant de minces lits de shale argileux, fut rencontré à 20,60 m de profondeur (Élévation : -12,10 m).

Il est à noter que le niveau du terrain naturel sur la rive gauche de la rivière Sainte-Anne est bien plus bas que celui sur la rive droite. En effet, alors que l'élévation du terrain naturel au droit du forage QEEP-032 (rive droite) est de 19,40 m, celui au droit du forage QEEP-034 (rive gauche est de 8,50 m). Le talus droit a une hauteur de 15 à 20 m et est très escarpé. Comme des cicatrices de glissements récents et des glissements actifs y sont observés, cette zone est considérée à très haut risque de glissements.

La méthode de franchissement par forage dirigé est faisable. Toutefois, des risques de faisabilité subsistent dus aux problèmes de guidage, à la perte de fluide et aux pertes par fracturation.

Rivière Etchemin et affluents (EE-LS-284, EE-LS-287, EE-LS-288NN et EE-LS-288SE)

A ces endroits, des cicatrices d'anciens glissements importants et des glissements récents sont observées, ainsi que des glissements actifs. Le risque de glissements est donc élevé.

Aucune information géotechnique n'était disponible au moment de la rédaction de ce rapport. Toutefois, comme le risque de glissements de terrain est élevé dans cette zone, la méthode de franchissement devra tenir compte.

Traverses à risque modéré:

Rivière à la Graisse et son affluent (EE-LS-229 et EE-LS-230)

Golder a classé ces franchissements comme ayant des risques modérés de glissements de terrain. En effet, des cicatrices de glissements sont observées sur les deux rives de la rivière à la Graisse, dont une très étendue près du futur coude de l'oléoduc. Il serait préférable de déplacer la conduite afin de l'éloigner de la zone affectée par l'ancien glissement.

Comme ce site se trouve dans les dépôts de la mer de Champlain, il est recommandé d'adopter une méthode de franchissement qui minimise l'impact sur les berges de ces cours d'eau. Ainsi, il est probable que les techniques par forage dirigé ou par poussée soient les plus adaptées. Toutefois, la décision finale devra être basée sur les résultats de la future étude géotechnique.

Rivière de la Cabane Ronde (EE-LS-236)

Les mêmes remarques que celles faites pour la rivière à La Graisse s'appliquent aussi pour le franchissement de ce petit cours d'eau.

Rivière des Outaouais

Deux forages ont été effectués à l'emplacement de cette rivière : QEEP-001 et QEEP-004. Dans le premier forage, le mort terrain est constitué de sable silteux et de silt argileux, ainsi que d'un peu d'argile, suivis de silt sableux gris, et ce jusqu'à une profondeur de 31,5 m (Élévation : 3,77 m) où le socle rocheux, constitué de shale dolomitique et dolomie, fut rencontré. Dans le deuxième forage, le mort terrain est constitué de sable silteux, silt argileux, et silt sableux, avec cailloux, blocs et fragments de roc à différents niveaux. Ce forage fut arrêté à 79,1 m de profondeur, sans avoir rencontré le socle rocheux.

La traverse par forage dirigé n'est pas jugée faisable en raison de l'hétérogénéité du mort terrain qui contient beaucoup de cailloux, galets, blocs et fragments de roc. Le sol rocheux de mauvaise qualité est, de plus, très profond.

Il est recommandé soit de choisir d'autres emplacements pour traverser la rivière, ou de recourir à une autre technique de franchissement. La méthode par tranchée pourrait être envisagée si des mesures adéquates sont prises pour minimiser les impacts sur l'environnement.

Rivière des Mille Îles

A cet endroit, le mort terrain est constitué d'argile et de silt, ainsi que de sable. Le socle rocheux fut rencontré à 22,8 m de profondeur (Élévation : -11,99 m) dans le forage QEEP-051 et à 28,8 m de profondeur (Élévation : -16,28 m) dans le forage QEEP-053. Le socle rocheux est constitué de schiste fracturé et stratifié.

Bien que la solution par forage dirigé soit techniquement envisageable, il existe des risques liés aux problèmes de guidage, au gonflement, à la perte de fluide et aux pertes par fracturation.

Advenant que la technique par tranchée ouverte soit retenue, il faut s'assurer que la future conduite ne soit pas affectée par l'érosion du lit et des berges de la rivière. Il ne semble pas qu'il existe de risques de glissements de terrain à cet endroit.

Rivière Bras Saint-Nicolas

Cette rivière est un affluent de la rivière du Sud. L'eau coule sur un lit sableux avec gravier, galets et blocs. La rive droite est caractérisée par l'érosion active, à environ 200 m en amont de la traverse.

Comme pour le cas de la rivière du Sud, il n'est pas possible de se prononcer sur la méthode de franchissement la plus appropriée, car aucun rapport de forage n'est disponible.

Rivière du Sud

En raison de la stratigraphie des sols (surtout granulaires) et du type de socle rocheux rencontrés à cet endroit, la méthode de franchissement par forage dirigé est techniquement faisable. Cependant, il existe des risques associés aux difficultés de guidage, l'effondrement du trou de forage, aux pertes de fluides et aux pertes par fracturation.

Rivière Trois Saumons

La méthode de franchissement par forage dirigé n'est pas indiquée dans ces deux cas. Le socle rocheux est très fracturé et peu résistant.

Traverses à faible risque:

Rivière du Nord

D'après le rapport de Golder (2015b), la rivière coule sur fond rocheux avec blocs. Les berges sont raides, et couvertes d'arbres matures. En ce cas, la méthode par forage dirigé pourrait être envisagée, dépendant des conditions géotechniques.

Il est à noter qu'à la date de rédaction de ce rapport, aucun résultat de forage n'est disponible pour ce cours d'eau.

Rivière des Prairies

Le mort terrain est constitué de silt et argile surmontant une couche de sable et de silt. Celle-ci repose sur du roc fracturé. Le socle rocheux fut rencontré à 25,6 m de profondeur (Élévation : -15,97 m) dans le forage QEEP-054, à 24,1 m de profondeur (Élévation : -17,35 m) dans le forage QEEP-055, et à 19,2 m de profondeur (Élévation : -9,13 m) dans le forage QEEP-058. Le socle rocheux est constitué de shale argileux et silteux, fracturé à sain.

Bien que la solution par forage dirigé soit techniquement faisable, des problèmes liés au gonflement de la cavité de forage dû à la présence d'argile et de shale, à la perte de circulation et aux fuites du fluide de forage, à l'effondrement du trou de forage et aux difficultés de guidage pourraient être rencontrés.

Par ailleurs, notons qu'il y a de l'érosion active sur les deux rives de la rivière. Ce facteur devient important si une technique de franchissement autre que le forage dirigé est retenue et, surtout, si la conduite future se trouve à une profondeur relativement faible sous le lit de la rivière.

Rivière Chaudière

Les résultats de trois forages (PSL-30, F-CH-02 en rive gauche et F-CH-01 en rive droite) sont disponibles. Les deux derniers forages furent effectués par la firme Technisol inc., dans le cadre du projet Rabaska. D'après la stratigraphie observée, le mort terrain est constitué de sable et silt reposant sur du till dense avec cailloux. Le socle rocheux fut rencontré à 40,0 m dans le forage PSL-3-, 20,0 m dans le forage F-CH-02 et 11,9 m dans le forage F-CH-01. Toutes ces profondeurs sont approximatives.

La rivière coule sur le roc et il existe de l'érosion au bas de berges. Celles-ci sont constituées de matériaux sableux.

Bien que la méthode de franchissement par forage dirigé soit techniquement faisable, il existe des risques dus aux problèmes de guidage, à la perte de fluide et à la perte par fracturation.

Autres traverses:

Rivière L'Assomption

Deux forages (QEEP-010 et QEEP-011) furent complétés à cet endroit. Dans le premier forage, le mort terrain est constitué d'argile silteuse sur environ 34,2 m d'épaisseur. Ce forage fut arrêté à 36,6 m de profondeur sans avoir rencontré le socle rocheux, dans une couche de silt et sable graveleux contenant des blocs. Dans le deuxième forage, l'argile se termine à 36,1 m de profondeur. Ce forage fut arrêté à 38,3 m de profondeur, sans avoir lui aussi atteint le socle rocheux.

La traversée par forage dirigé est jugée faisable, bien que des risques subsistent quant aux difficultés de guidage, au gonflement de l'argile, à l'effondrement du trou de forage et aux pertes de fluide.

Le rapport de Golder (2015b) a révélé des cicatrices de glissement sur les berges de cette rivière. En effet, les berges subissent, de temps en temps, des glissements de terrain, liés surtout à l'érosion des rives en cas de crue, au remblayage des terrains et à l'augmentation des pressions d'eau dans les sols à la suite de périodes pluvieuses et de la fonte des neiges.

Rivière Bayonne

Trois forages (QEEP-013, QEEP-014, QEEP-015) furent complétés à cet endroit. Dans les trois forages, le mort terrain est constitué de sable silteux reposant sur un dépôt épais de silt argileux. Les forages furent arrêtés aux profondeurs suivantes : 30,6 m à QEEP-013, 40,0 m à QEEP-014 et 30,7 m à QEEP-015. Le socle rocheux ne fut pas rencontré à aucun forage.

La méthode de franchissement par forage dirigé est jugée faisable, malgré que des risques subsistent quant aux difficultés de guidage, au gonflement des sols argileux, à l'effondrement du trou de forage et aux pertes de fluides.

Rivière Chicot

Trois forages (QEEP-016, QEEP-017, QEEP-018) furent complétés à cet endroit. Les forages furent arrêtés aux profondeurs de 30,6 m dans QEEP-016, 35,2 m dans QEEP-017, et 30,3 m dans QEEP-018, sans avoir rencontré le roc. Le mort terrain est constitué essentiellement d'argile silteuse.

La méthode par forage dirigé est jugée faisable, malgré que subsistent les mêmes risques que ceux mentionnés pour la rivière Bayonne.

Rivière Maskinongé (EE-LS-244)

Deux forages, QEEP-0019 et QEEP-0020, furent complétés de part et d'autre de cette rivière. Dans le premier forage, le mort terrain est constitué d'argile silteuse jusqu'à la profondeur maximale de 35,29 m forée (Élévation : -10,49 m). Dans le deuxième forage, l'argile silteuse se rencontre sous une mince couche superficielle de 4,29 m d'épaisseur. Ce forage fut arrêté aussi dans l'argile silteuse, à 35,14 m de profondeur (Élévation : -23,94 m).

La méthode de traversée, préconisée pour cette rivière, est le forage dirigé. Les mêmes risques que ceux mentionnés pour les rivières Bayonne et Chicot subsistent pour ce franchissement.

Il est à noter que des risques modérés de glissement existent à cet endroit.

Rivière Saint-Maurice (EE-LS-256)

Trois forages (QEEP-025, QEEP-027 et QEEP-028) furent complétés à cet endroit. Le mort terrain est stratifié et constitué de couches de sable et silt, contenant du gravier, des galets et des blocs, reposant sur le socle rocheux. Dans le forage QEEP-025, le socle rocheux fut rencontré à 21,54 m de profondeur (Élévation : -0,74 m). Dans le forage QEEP-027, le socle rocheux fut rencontré à 23,34 m de profondeur (Élévation : 4,36 m). Dans le forage QEEP-028, le socle rocheux fut rencontré à 23,77 m de profondeur (Élévation : 3,93 m). Le socle rocheux est constitué de calcaire gris contenant des lits de shale calcareux. La qualité du roc va de mauvaise à bonne. Les forages furent arrêtés à des profondeurs variant entre 50,1 m (QEEP-025) et 55,8 m (QEEP-027).

Bien que la méthode de franchissement par forage dirigé soit considérée techniquement faisable, il existe des risques liés aux difficultés de guidage et la perte de fluide.

Rivière Portneuf (EE-LS-272)

Bien qu'aucun rapport de forage ne soit encore disponible, une méthode de franchissement qui minimise l'impact sur l'environnement immédiat doit être considéré, car les berges présentent de l'érosion très active. Sur la rive droite, un glissement de terrain probablement causé par l'érosion est observé au bas de talus.

Étant donné que les sols semblent être composés par du sable et du gravier avec cailloux et blocs, la méthode de franchissement par forage dirigé, bien que techniquement faisable, peut être exposée à des risques de guidage difficile, d'effondrement du trou de forage, de perte de fluide et de pertes par fracturation. Une étude géotechnique permettra de lever les incertitudes.

Rivière Jacques-Cartier (EE-LS-273)

Quatre forages furent complétés à cet endroit, dont trois sur la rive gauche (QEEP-039, QEEP-040, et QEEP-064) et un sur la rive droite (QEEP-038). Il existe un talus très haut et très incliné sur la rive droite. Il existe aussi un glissement de terrain sur la rive gauche dans le corridor de la traverse. Il y a par ailleurs énormément d'érosion. Le risque est donc élevé.

En ce qui concerne les sols rencontrés dans le forage QEEP-038 sur la rive droite, l'élévation du terrain naturel est de 26,89 m. Le mort terrain est constitué de sable brun et de silt sableux gris avec des traces de gravier, reposant sur une mince couche de till. Le socle rocheux, constitué de shale silteux avec lits de grès fin, fut rencontré à 9,23 m de profondeur (Élévation : 17,56 m). Le forage fut arrêté à 35,23 m de profondeur. La qualité du roc est relativement bonne.

L'élévation du terrain naturel au droit des forages QEEP-039, QEEP-040 et QEEP-064 sur la rive gauche varie entre 52,60 m au forage QEEP-039 et 60,21 m au forage QEEP-064. Dans les forages QEEP-039 et QEEP-040, le mort terrain est constitué d'un remblai probable de sable et silt d'environ 2 m d'épaisseur, suivi de couches de silt argileux, de sable, et gravier gris. Cette dernière couche contient des cailloux et des blocs. Le socle rocheux, constitué de shale argileux avec minces lits de siltstone et de grès dolomitique, fut rencontré à 12,40 m de profondeur (Élévation : 40,20 m) au forage QEEP-039 et à 12,19 m (Élévation : 45,23 m) au forage QEEP-040. Le roc rencontré est très fracturé.

Le mort terrain rencontré au forage QEEP-064 ressemble beaucoup aux sols naturels rencontrés aux forages précédents. Toutefois, aucune couche de remblai en surface n'a été rencontrée. Le socle rocheux qui fut rencontré à une profondeur de 17,35 m (Élévation : 42.86 m) est aussi constitué de shale argileux et silteux.

La méthode de franchissement par forage dirigé est techniquement faisable. Cependant, les risques liés à la qualité du socle rocheux comprennent la perte de fluide de forage et les pertes par fracturation.

Rivière aux Pommes (EE-LS-274)

Aucun rapport de forage n'était disponible au moment de rédiger ce rapport. Toutefois, d'après les observations de Golder (2015b), il existe sur les rives de nombreuses cicatrices d'anciens grands glissements de terrain. La longueur d'un grand glissement à proximité du corridor de l'oléoduc est d'environ 200 m.

Par conséquent, la méthode de franchissement retenue pour cette rivière doit tenir compte de l'instabilité des rives.

Fleuve Saint-Laurent

Au moment de rédiger ce rapport, seuls les résultats de deux forages (QEEP-063 et QEEP-070), complétés sur la rive gauche du fleuve étaient disponibles. Au droit du forage QEEP-063, l'élévation du terrain est de 35,26 m. Le mort terrain est constitué de sable gris avec du silt devenant très dense vers 11 m de profondeur. Le socle rocheux, constitué de shale argileux gris très fracturé fut rencontré à 26,62 m de profondeur (Élévation : 8,64).

Au droit du forage QEEP-070, l'élévation du terrain naturel est de 32,30 m. Le mort terrain est constitué d'une mince couche de sable silteux gris, reposant sur le socle rocheux. Celui-ci fut rencontré à 1,68 m de profondeur (Élévation : 30,62 m). Il est constitué de shale ardoisier gris. Le roc est très fracturé

En raison de la largeur du fleuve, de son importance et de la stratigraphie des sols et du roc rencontrée, la méthode par forage dirigé n'est pas recommandée. La seule méthode valable de franchissement demeure le forage en tunnel.

Rivière Aulneuse (EE-LS-278)

Au moment de la rédaction de ce rapport, aucun résultat de forage n'était disponible. Les observations de Golder montrent que le risque de glissement de terrain est faible à cet endroit. Il est probable que le forage dirigé s'avère être la technique appropriée.

Rivière Beaurivage

Trois forages furent complétés à cet endroit (QEEP-041 et QEEP-043 en rive gauche, et QEEP-042 en rive droite). Les élévations du terrain naturel varient de 102,26 m au forage QEEP-041 à 95,37 m au forage QEEP-043, ce dernier étant plus près de la rivière. Quant au forage QEEP-042, le niveau du terrain naturel se situe à l'élévation 102,37 m.

Le mort terrain est constitué de sable silteux, et de sable et silt avec gravier et cailloux. Le socle rocheux, très fracturé, constitué de schiste et de grès quartzeux, fut rencontré à 11,58 m de profondeur (Élévation : 88,26 m) dans QEEP-041, à 15,24 m de profondeur (Élévation : 87,13 m), et probablement à 5,56 m de profondeur (Élévation : 89,81 m) dans QEEP-043.

Bien que le franchissement par forage dirigé soit techniquement faisable, il subsiste des risques dus aux problèmes de guidage, à la perte de fluide et aux pertes par fracturation.

Rivière Ouelle, rivière du Loup (St-Bruno) et rivière Madawaska

En raison de la stratigraphie des sols (surtout granulaires) et du type de socle rocheux rencontrés à ces endroits, la méthode de franchissement par forage dirigé est techniquement faisable. Cependant, il existe des risques associés aux difficultés de guidage, l'effondrement du trou de forage, aux pertes de fluides et aux pertes par fracturation.

Grande Rivière

La méthode de franchissement par forage dirigé n'est pas indiquée dans ce cas. Le socle rocheux est très fracturé et peu résistant.

6.4 Conclusions partielles sur les techniques de traverses

D'après la description des sols rencontrés dans les différents forages, complétés sur les berges des divers cours d'eau, il ressort que :

a. La méthode de franchissement recommandée pour les traverses des cours d'eau situés dans les dépôts argileux de l'ancienne mer Champlain est la technique par forage dirigé. L'emploi de cette méthode n'affecte pas la stabilité actuelle des berges, car les points d'entrée et de sortie de la conduite sont loin des rives. Toutefois, les concepteurs devront s'assurer que des glissements de terrain futurs ne viendront pas affecter l'intégrité de la conduite.
b. Dans le cas de petits cours d'eau (ruisseaux) se trouvant toujours dans les dépôts argileux de la mer Champlain, il sera possible d'employer la méthode de franchissement par tranchée, en autant que la stabilité des berges soit assurée pendant et après les travaux. Ceci implique que des mesures devront être prises pour stabiliser les berges, si celles-ci montrent des signes d'instabilité.
   Une alternative à l'emploi de tranchées consiste à utiliser la méthode par poussée de la conduite, associée à l'excavation du sol de l'intérieur de celle-ci et à l'utilisation d'un coulis, si nécessaire, pour faciliter la pénétration de la conduite sous le lit du cours d'eau. Cette

dernière technique n'affecterait pas, comme la méthode par forage dirigé, la stabilité des berges au moment des travaux. Mais, encore une fois, la stabilité future des berges doit être assurée.

c. Dans le cas où les sols traversés par la conduite sont constitués soit de matériaux granulaires grossiers contenant des cailloux, galets et blocs, soit de roc fracturé, la méthode de franchissement par forage dirigé peut s'avérer inadéquate ou impossible à réaliser, en raison notamment des problèmes de guidage, de l'effondrement possible du trou de forage, de l'infiltration d'eau et de sol fin et des pertes de fluide.
   Dans cette éventualité, les méthodes envisagées sont soit la méthode par tranchée (à sec ou en eau libre), soit la méthode par tunnel. Dans tous les cas, les divers critères de sauvegarde de l'environnement devront être respectés.
d. Dans le cas de cours d'eau majeurs, tels le Fleuve St-Laurent et la Rivière des Outaouais, il pourrait être recommandé de procéder par tunnel, en raison notamment des matériaux rencontrés et de l'importance de ces cours d'eau. Cependant, avant d'investir des montants importants dans des tunnels, d'autres alternatives peuvent être envisagées, notamment des changements de tracé.
e. Enfin, compte tenu du diamètre important de la conduite, il est recommandé d'augmenter la profondeur de recouvrement minimale de 1,5 m à 2,0 m en terrain plat.

6.5 Mise en perspective des problèmes environnementaux

Le tracé du pipeline prévu dans le cadre du projet Oléoduc Énergie Est n'est pas encore totalement établi, mais traverserait plusieurs cours d'eau au Québec. Parmi les préoccupations environnementales soulevées au Tableau 4-1, il est apparu que le maintien de la qualité de l'eau (c.-à-d. l'absence de sédiments et de contaminants) et le maintien de la biodiversité, particulièrement les poissons, semblent de prime importance dans le cadre des traverses de cours d'eau.

Il est important de noter que TransCanada a effectué un sondage auprès des municipalités régionales de comté (MRC) afin d'identifier leur accès à l'eau potable. TransCanada (2014) rapporte qu'aucune prise d'eau de surface ne se trouve dans la zone d'implantation du projet. Une étude plus poussée de la migration potentielle des hydrocarbures vers ces prises d'eau, en cas de bris, devrait être effectuée.

Les sections suivantes cherchent à identifier les conditions actuelles et les cours d'eau qui sont les plus critiques. **Ce travail se veut théorique et ne se substitue en aucun cas à une analyse de risque basée sur des données/observations de terrain**.

6.5.1 Indicateur de la qualité de l'eau au Québec : IQBP

Au Québec, la qualité de l'eau est évaluée à partir de l'indice de qualité bactériologique et physico-chimique de l'eau (IQBP). Au total, dix variables peuvent être considérées pour déterminer la qualité de l'eau. En pratique, toutefois, six ou sept variables seulement sont généralement utilisées pour en déterminer la qualité :

- L'$IQBP_6$ est basé sur les six variables suivantes : le phosphore total, les coliformes fécaux, les matières en suspension, l'azote ammoniacal, les nitrites-nitrates et la chlorophylle *a* totale (chlorophylle *a* et phéopigments) ;
- L'$IQBP_7$ considère les six précédents plus la turbidité.

Pour chacune des variables, la concentration mesurée est transformée, à l'aide d'une courbe d'appréciation de la qualité de l'eau (voir Figure 6-1), en un sous-indice variant de 0 (très mauvaise qualité) à 100 (bonne qualité) et par la suite, elle-même, transformée en cinq classes diverses de qualité (chaque tranche de 20 %) pour donner une appréciation de la qualité de l'eau.

L'IQBP d'un cours d'eau correspond au sous-indice de la variable qui présente la valeur la plus faible.

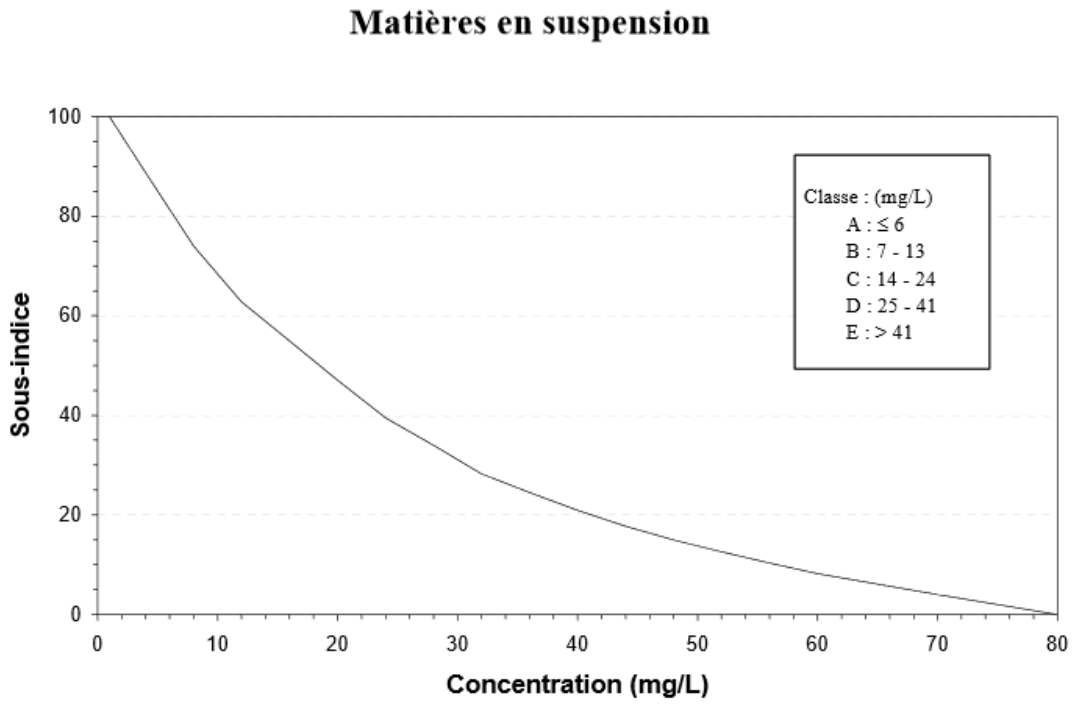


Figure 6-1 : Exemple d'une courbe d'appréciation de la qualité de l'eau pour l'un des 10 critères potentiels de l'IQBP (Hébert, 1996).

Note : les autres courbes d'appréciation suivent une tendance similaire, seules les classes et les concentrations sont modifiées. Ces courbes sont disponibles dans le document de référence.

6.5.2 Vulnérabilité des cours d'eau : qualité de l'eau

6.5.2.1 Les ruisseaux

Il ne semble pas y avoir de données publiques disponibles permettant d'évaluer la qualité de l'eau ou de l'atteinte possible à la biodiversité des ruisseaux au Québec. L'absence de données sur la qualité de l'eau des ruisseaux rend impossible l'évaluation théorique de leur vulnérabilité.

6.5.2.2 Les rivières

Le Tableau 6-7 recense la qualité de l'eau à l'embouchure et à la tête des bassins versants d'un nombre limité de cours d'eau qui seraient traversés par le pipeline prévu au projet Oléoduc Énergie Est.

Tableau 6-7 : Qualité à l'embouchure et à la tête des bassins versants d'importantes rivières du Québec potentiellement traversées par le pipeline prévu au projet Oléoduc Énergie Est

Nom du cours d'eau	$IQBP_7$ (2000-2002)			$IQBP_6$ (1999-2008) (MDDEFP, 2012b)		Résultats de TransCanada (TransCanada, 2014a) $IQBP_6$	
	Qualité à l'embouchure	Qualité à la tête	Appréciation	Qualité à l'embouchure	Appréciation de la qualité de l'eau	Qualité	Appréciation de la qualité de l'eau
Du nord	55	45	Satisfaisante à douteuse	60	Douteuse	64	Acceptable
Rouge	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	19	Très mauvaise
Du Chêne	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	32	Mauvaise
Aux Chiens	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	18	Très mauvaise
Mille Îles	52	35	Douteuse à mauvaise	N/D	N/D	57	Passable
Mascouche	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	34	Mauvaise
L'assomption	25	95	Mauvaise à bonne	50	Douteuse	45	Passable
Saint-Esprit	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	40	Passable
L'Achigan	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	37	Mauvaise
Point du jour	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	37	Mauvaise
Ouareau	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	72	Acceptable
Chaloupe	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	14	Très mauvaise
Bayonne	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	34	Mauvaise
Chicot	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	36	Mauvaise
Maskinongé	55	82	Satisfaisante à bonne	65	Satisfaisante	72	Acceptable
Petite rivière du loup	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	1	Très mauvaise
Petite rivière Yamachiche	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	21	Mauvaise
Saint-Maurice	85	95	Bonne	85	Bonne	90	Bonne
Champlain	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	17	Très mauvaise

Nom du cours d'eau	$IQBP_7$ (2000-2002)			$IQBP_6$ (1999-2008) (MDDEFP, 2012b)		Résultats de TransCanada (TransCanada, 2014a) $IQBP_6$	
	Qualité à l'embouchure	Qualité à la tête	Appréciation	Qualité à l'embouchure	Appréciation de la qualité de l'eau	Qualité	Appréciation de la qualité de l'eau
Batiscan	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	81	Bonne
Sainte-Anne	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	54-76	Passable à acceptable
Blanche	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	58	Passable
Noire	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	81	Acceptable
La Chevrotière	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	18	Très mauvaise
Portneuf	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	58	Passable
Jacques-Cartier	87	92	Bonne	90	Bonne	88	Bonne
aux Pommes	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	47	Passable
Beaurivage	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	55	Passable
Chaudière	75	80	Satisfaisante à bonne	N/D	N/D	69	Acceptable
Etchemin	65	95	Satisfaisante à bonne	55	Douteuse	62	Acceptable
Le Bras Saint-Henri	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	26	Mauvaise
Boyer	20	15	Mauvaise à très mauvaise	25	Douteuse	17	Très mauvaise
Aux Perles	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	63	Acceptable
Du Sud	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	76	Acceptable
Ouelle	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	88	Bonne
Fouquette	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	64	Acceptable
Cabano	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	93	Bonne
Du loup	8	95	Très mauvaise à bonne	60	Douteuse	92	Bonne
Des Prairies	58	65	Douteuse à satisfaisante	70	Satisfaisante	N/D	N/D
Madawaska	92	93	Bonne	90	Bonne	N/D	N/D
Outaouais	65	85	Satisfaisante à bonne	85	Bonne	N/D	N/D

En considérant qu'une augmentation des sédiments dans l'eau affecte les indicateurs *matières en suspension* et *turbidité*, les courbes d'appréciation de la qualité de l'eau de ces indicateurs (voir Figure 6-1) indiquent qu'il est plus facile, à la suite d'une perturbation du milieu, pour une eau de bonne qualité de diminuer de classe. En effet, une faible augmentation des *matières en suspension* ou de la *turbidité* dans une eau de bonne qualité entraîne une chute de classe plus rapide que dans une eau de moindre qualité (voir Figure 6-1, l'endroit où la pente étant la plus abrupte indiquant une zone plus sensible). Un raisonnement similaire peut être appliqué aux autres indicateurs de l'IQBP dont les courbes d'appréciation présentant les mêmes tendances.

En ce sens, les rivières Outaouais, Saint-Maurice, Jacques-Cartier et Madawaska seraient les plus vulnérables en termes de qualité de l'eau.

Il est à noter que TransCanada a répertorié l'$IQBP_6$ pour 46 rivières potentiellement traversées par le pipeline prévu au projet Oléoduc Énergie Est. Les valeurs rapportées sont légèrement différentes de celles rapportées publiquement et couvrent un plus grand éventail de rivières que celles publiquement disponibles.

6.5.2.3 Fleuve Saint-Laurent

Le tracé actuel du pipeline prévu au projet Oléoduc Énergie Est fait état d'une traverse de cours d'eau du fleuve Saint-Laurent entre Saint-Augustin de Desmaures et Saint-Nicolas près de Québec. L'évaluation de l'IQBP pour le fleuve Saint-Laurent s'avère très variable selon l'emplacement, variant de très mauvaise à bonne. Dans la région de Québec, où la traverse devrait se situer, l'IQBP fait état d'une qualité de l'eau satisfaisante.

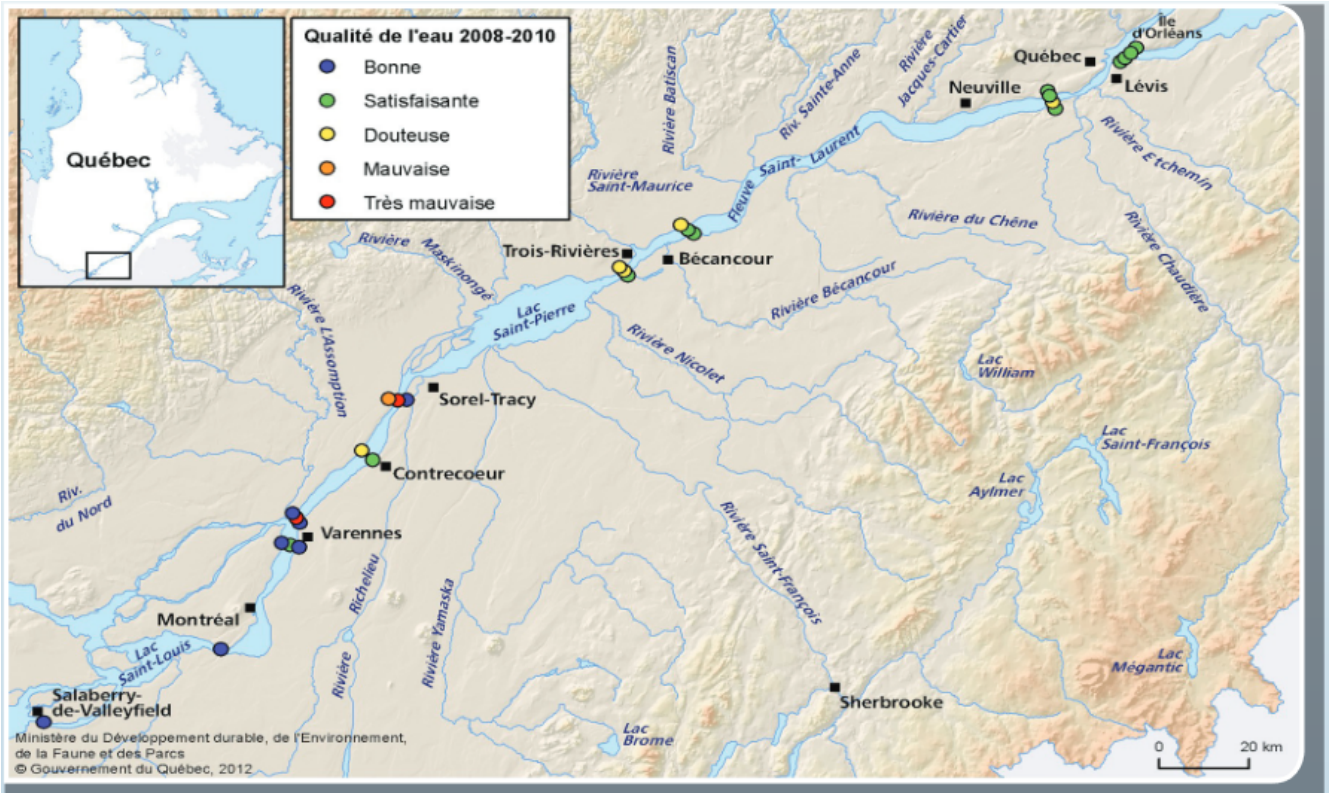


Figure 6-2 : IQBP du fleuve Saint-Laurent (MDDEFP, 2012a)

6.5.3 Sensibilité de l'habitat du poisson

Une étude de TransCanada (2014) réalisée lors de l'évaluation environnementale du projet Oléoduc Énergie Est a fait état de la vulnérabilité des divers habitats. Cette étude se base sur le processus d'évaluation des risques tel que défini par Pêches et Océans Canada (2006). Le rapport de TransCanada (2014) ne fournit pas assez de détail quant aux hypothèses employées pour permettre une validation indépendante de leur évaluation de la sensibilité de l'habitat du poisson. Toutefois, en considérant que tous les habitats évalués présentent la vulnérabilité la plus élevée, une telle validation ne semble pas primordiale.

Dans la méthode employée, la sensibilité de l'habitat du poisson est déterminée à partir de quatre sous-indicateurs :

- La sensibilité des espèces : représentatif de la sensibilité des espèces aux changements environnementaux ;
- La dépendance des espèces à leur habitat : l'utilisation de l'habitat par les espèces de poissons présentes ;
- La rareté : la présence d'une grande population de poisson ;
- La résilience de l'habitat : la capacité de l'habitat de se remettre d'un changement des conditions environnementales.

Les résultats partiels (TransCanada n'a pas fait l'évaluation de toutes les rivières) sont présentés au Tableau 6-8. Ce tableau présente également le résultat de l'indice de qualité de l'eau (IQBP) obtenu préalablement au Tableau 6-7 aux fins de comparaison.

Tableau 6-8 : Vulnérabilité des habitats des poissons dans certains cours d'eau du Québec potentiellement traversés par le pipeline prévu au projet Oléoduc Énergie Est (TransCanada, 2014a)

Rivière	Vulnérabilité des habitats des poissons	Résultat de l'indice de la qualité de l'eau ($IQBP_7$)
Rivières		
Outaouais	Élevée	Satisfaisante à bonne
du Nord	Élevée	Satisfaisante à douteuse
des Mille-Îles	Élevée	Douteuse à mauvaise
des Prairies	Élevée	Douteuse à satisfaisante
l'Assomption	Élevée	Mauvaise à bonne
Bayonne	Élevée	N/D
Chicot	Élevée	N/D
Maskinongé	Modérée	Satisfaisante à bonne
du Loup	Élevée	Très mauvaise à bonne
Saint-Maurice	Modérée	Bonne
Batiscan	Élevée	N/D
Sainte-Anne	Élevée	N/D
Jacques-Cartier	Élevée	Bonne
aux Pommes	Élevée	N/D
Beaurivage	Élevée	N/D
Chaudière	Élevée	Satisfaisante à bonne
Etchemin	Élevée	Satisfaisante à bonne
Fleuve		
Saint-Laurent	Élevée	Satisfaisante (au lieu de traverse)

Il apparaît que les cours d'eau potentiellement traversés par le pipeline prévu au projet Oléoduc Énergie Est au Québec présentent généralement une vulnérabilité élevée de l'habitat des poissons. Cette évaluation corrèle généralement bien avec les résultats de l'indice de la qualité de l'eau si l'on considère qu'une qualité d'eau satisfaisante à bonne sur une partie du tronçon est représentative des habitats les plus vulnérables.

Les rivières Maskinongé et Saint-Maurice s'avèrent des exceptions à cette corrélation. Pour ces rivières, la différence entre la vulnérabilité et l'indice de la qualité de l'eau proviendrait potentiellement de l'absence dans ces rivières d'espèces d'intérêt pour la conservation (TransCanada, 2014a). Ceci explique une vulnérabilité de l'habitat moins élevée, et ce, malgré une vulnérabilité accrue en ce qui a trait à la qualité de l'eau.

6.5.4 Déversement accidentel dans le fleuve Saint-Laurent

En cas de déversement accidentel, trois espèces du fleuve Saint-Laurent, particulièrement intolérantes à la pollution, seraient touchées (MDDLCC, 2015) :

- L'esturgeon noir ;
- Le fouille-roche gris : une espèce vulnérable au sens de la *Loi sur les espèces menacées ou vulnérables* et protégées par la *Loi sur les espèces en péril au Canada* ;
- La laquaiche argentée.

La présence de l'alose savoureuse et de l'éperlan arc-en-ciel, deux espèces désignées vulnérables au sens de la *Loi sur les espèces menacées ou vulnérables*, est également notée.

De plus, l'aval du fleuve Saint-Laurent est considéré extrêmement à risque à la suite d'un déversement accidentel. En effet, un rapport destiné à Transports Canada (WSP Canada Inc, 2014) souligne l'importance des conséquences anticipées suite à un déversement accidentel de pétrole dans l'estuaire ou ailleurs dans le golfe du Saint-Laurent. Dans cette étude, l'index du risque environnemental (ERI) a été utilisé afin d'estimer le risque relatif pour chaque zone suite à un déversement d'hydrocarbures. Cet index permet l'intégration de considérations environnementales dans l'analyse de risque. Il a été défini comme suit :

La Figure 6-3 présente l'ERI pour les zones du golfe du Saint-Laurent. Ce rapport conclut que l'un des écosystèmes les plus vulnérables se situe dans l'estuaire du Saint-Laurent, soit en aval des traverses de cours d'eau pressenties pour le projet Oléoduc Énergie Est.

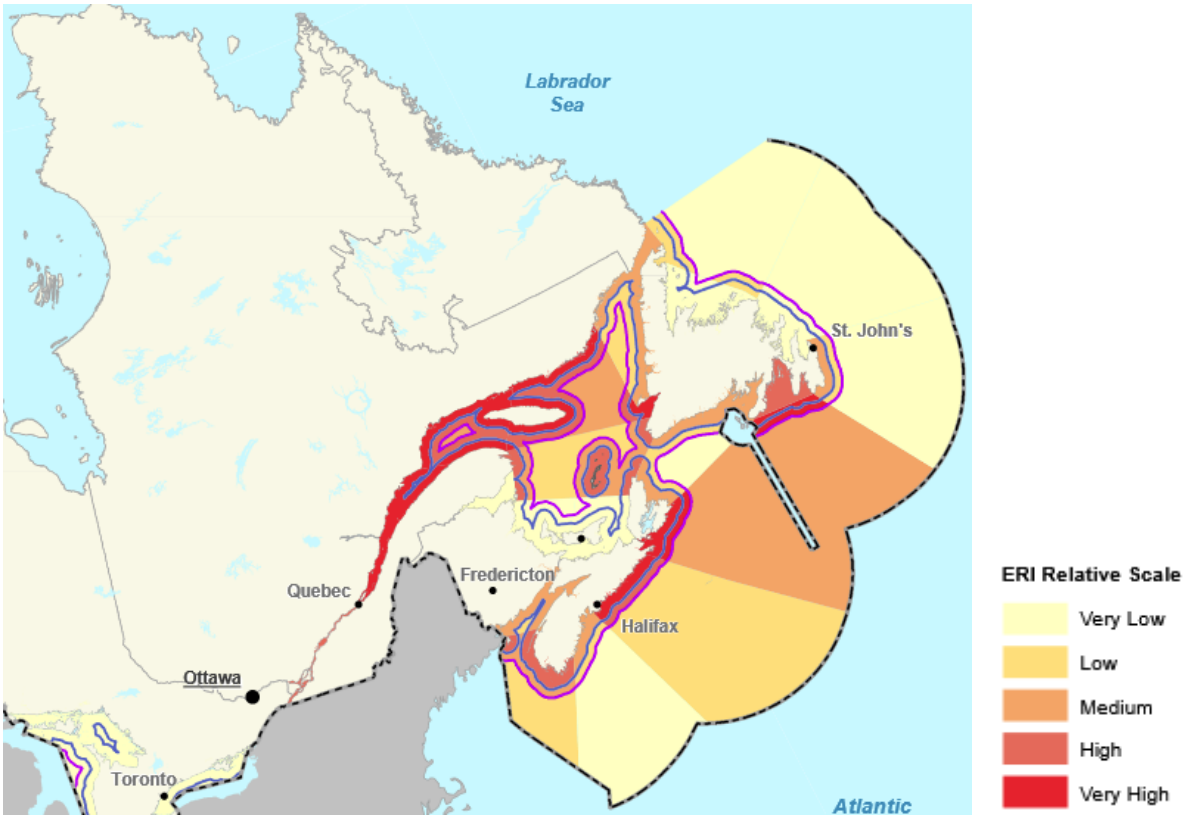


Figure 6-3 : Index du risque environnemental suite à un déversement de pétrole brut dans l'estuaire et dans le golfe du Saint-Laurent (WSP Canada Inc, 2014)

7 Recommandations sur les traverses de cours d'eau dans le cadre de la construction et de l'exploitation des pipelines au Québec

7.1 Recommandations pour les techniques de construction

Pour pouvoir élaborer une stratégie solide d'aide à la décision dans le choix d'une technique de traverse, il serait important de :

- Avoir une base de données des coordonnées de toutes les traverses de cours d'eau des projets déjà en place ainsi que les techniques qui ont été utilisées pour ces traverses et les données utilisées pour leur choix ;
- Répertorier les accidents de pipeline survenus près des traverses de cours d'eau ;
- Inventorier ou mettre à jour la liste et les données sur les cours d'eau du Québec selon leur importance ;
- Prioriser dans la collecte des données le couloir longeant le fleuve Saint-Laurent qui est l'embouchure d'une grande partie des rivières du Québec et plus particulièrement la rive nord de ce fleuve. Les données à collecter pourraient être les variables identifiées dans le présent rapport comme ayant une influence dans le choix d'une technique de traverse.

Ces informations permettraient la mise en place d'une approche multicritère beaucoup plus élaborée et fiable.

Pour la construction des traverses de cours d'eau, les recommandations suivantes sont formulées :

- S'assurer des conditions géotechniques des zones de traverse notamment le risque de glissement ;
- Pour les sites se trouvant dans les dépôts de la mer de Champlain, adopter une méthode de franchissement qui minimise l'impact sur les berges du cours d'eau ;
- Mettre en place des mesures de stabilisation des berges au cas où la technique retenue menacerait cette stabilité ;
- Porter une attention particulière dans le choix de la profondeur de recouvrement pour les cours d'eau à potentiel d'affouillement élevé ou présentant des signes d'érosion évidents ;
- Si une technique de forage est retenue, s'assurer de la nature du sol ou du roc afin d'éviter des déversements de produits de forage dans le cours d'eau.

Si le maître d'œuvre décide de franchir le cours d'eau par la méthode de tranchée, il est recommandé de :

- Faire la traverse le plus perpendiculairement possible au cours d'eau ;
- S'assurer que les matériaux excavés dans le lit de la rivière ne viennent pas rétrécir le cours d'eau, de façon à augmenter le débit et accroître l'érosion subséquente des berges ;
- Mettre en place des moyens de stabilisation des berges lors de ces travaux ;
- Prendre des mesures adéquates pour minimiser les impacts sur l'environnement.

Si le maître d'œuvre décide de franchir le cours d'eau par la méthode de forage dirigé, il est recommandé que l'évaluation des pressions des coulis de forage et des volumes injectés soit effectuée constamment, afin de s'assurer que les risques liés à la fracturation hydraulique des dépôts argileux soient sous contrôle.

Pour le forage horizontal par percussion, par poussée, et par tarière ou vis sans fin, il est recommandé :

- D'étayer adéquatement les parois des puits d'accès pour éviter des ruptures et des accidents de travail ;
- De tenir compte des travaux d'excavation sur la stabilité des talus.

Avant le début de la construction de l'oléoduc projeté, il est recommandé que :

- Le maître d'œuvre procède aux études géotechniques sur la stabilité des talus des cours d'eau traversés ;
- Dans le cas où les résultats des études de stabilité montrent que les coefficients de sécurité des talus sont insuffisants, la mise en place de mesures pour améliorer la stabilité des pentes argileuses soit prévue ;
- Dans les endroits les plus critiques, un suivi des talus argileux soit fait au moyen, soit d'inspections visuelles et aériennes, soit de levées géodésiques, ou encore d'inclinomètres pour évaluer les mouvements en profondeur des sols. L'emploi de piézomètres et de repères de surface installés sur les talus pourrait apporter une aide supplémentaire.

7.2 Recommandations pour les conséquences environnementales

Le seul moyen de prévenir toutes les conséquences environnementales serait de ne pas réaliser de traverses de cours d'eau. Dans le contexte où la construction d'une traverse de cours d'eau serait souhaitable, des impacts potentiels doivent être attendus. Afin de diminuer les impacts potentiels à l'environnement, il est recommandé de :

- Mettre en place les diverses mesures de protection environnementales décrites dans ce document lors de la phase de construction et d'exploitation du pipeline ;
- Assurer le suivi de ses mesures de protections et de mitigations environnementales ;
- Établir des plans de mesure d'urgence et assurer une réponse rapide en cas de déversement accidentel.

Il a été également montré que l'évaluation des impacts potentiels était, jusqu'à présent, de nature qualitative et qu'il était difficile d'évaluer les impacts potentiels résiduels des diverses activités de construction et d'exploitation des pipelines puisqu'ils sont tributaires de la sensibilité spécifique des milieux. En ce sens, il est recommandé de :

- Déterminer le tracé optimal d'un oléoduc (le plus avancé possible au niveau de l'analyse) avant d'en évaluer les conséquences potentielles sur les milieux ;
- **Quantifier** (et non pas uniquement *qualifier*) les impacts potentiels, à l'atmosphère, l'eau et aux sols ainsi que sur la biodiversité et la santé humaine.

D'un point de vue environnemental, il peut être considéré que les problématiques les plus importantes ont trait à la qualité (et la quantité) d'eau ainsi qu'aux impacts sur la biodiversité (particulièrement les poissons). En ce sens, il est recommandé de s'assurer de quantifier en

amont et en aval d'une traverse de cours d'eau la qualité de l'eau des divers cours d'eau (ruisseaux, rivière et fleuve) traversés par un pipeline.

Dans le cas du pipeline prévu au projet Oléoduc Énergie Est, il est apparu que le niveau de connaissances pour les ruisseaux traversés était inexistant et qu'un certain nombre de rivières traversées n'avaient pas d'IQBP rapportés, diminuant la cohérence d'une évaluation de la vulnérabilité des cours d'eau quant à sa qualité.

La même recommandation peut être établie pour l'évaluation de la sensibilité de l'habitat du poisson.

8 Conclusion

Cette étude s'inscrit dans le cadre du plan d'action gouvernemental du Québec sur les hydrocarbures et avait pour objectif de recenser les meilleures pratiques sur les traverses des cours d'eau par les pipelines et les impacts environnementaux susceptibles d'affecter les zones de traverses. En effet, un pipeline rencontre souvent sur son trajet des cours d'eau qu'il doit franchir pour pouvoir poursuivre son trajet. Une telle traverse peut être problématique étant donné qu'un cours d'eau est un milieu sensible et dynamique.

Les travaux réalisés ont permis de caractériser 19 critères d'importance afin d'assurer la sécurité de la conduite ainsi que celle du cours d'eau et de son environnement : le régime du cours d'eau, les habitats et la circulation des poissons, les droits de passage, la navigabilité, la proximité de résidences, les utilisateurs d'eau en aval, la proximité d'autres infrastructures, la sécurité pour la construction, la largeur du canal, la profondeur du canal, le débit du cours d'eau, la géologie, la géotechnique, le niveau de la nappe phréatique, le potentiel d'affouillement, la présence de zones inondables, le diamètre de la conduite, la différence d'élévation entre l'entrée et la sortie de la conduite et le coût.

D'un point de vue environnemental, de nombreux impacts potentiels peuvent survenir. Parmi ces impacts potentiels, une diminution de la qualité (et de la quantité) de l'eau ainsi qu'une atteinte aux habitats des poissons sont considérées comme étant les plus importants dans le cadre d'une traverse de cours d'eau. Ces deux critères sont pris en compte parmi les 19 critères préalablement présentés.

L'application des 19 critères, selon les informations disponibles et du jugement d'experts, au tracé provisoire du pipeline prévu dans le cadre du projet Oléoduc Énergie Est privilégie la méthode par forage dirigé pour toutes les rivières investiguées au Québec et la méthode par tunnel pour le fleuve Saint-Laurent. Il est toutefois à noter que le modèle conçu à partir des 19 critères ne permet pas de conclure sur la faisabilité d'une méthode mais donne plutôt un classement des méthodes sur la base d'une moyenne de l'ensemble des critères considérés. Dans la pratique, un critère spécifique peut impliquer la non-faisabilité d'une technique au site étudié.

De plus, il est à noter que le pipeline prévu au projet Oléoduc Énergie Est doit franchir plus d'une trentaine de cours d'eau présentant des risques de glissement de terrain en raison de l'instabilité des berges. La majorité des traverses à risque se situe sur la rive nord du Saint-Laurent, entre Montréal et Saint-Augustin-de-Desmaures, où l'oléoduc doit traverser le fleuve. Sur la rive sud, le pipeline traverserait la région de Lévis où les cours d'eau traversés présentent des risques connus de glissement de terrain principalement dans six zones. Parmi les cours d'eau présentant des risques élevés de glissement de terrain, se trouve : la Petite rivière du Loup, la rivière Chacoura, la rivière du Loup, un ruisseau sur la route de Louiseville-Saint-Paulin, la Petite rivière Yamachiche, la rivière Champlain, la rivière Batiscan, un affluent de la rivière Batiscan, la rivière Sainte-Anne, la rivière Pénin, un affluent de la rivière Etchemin et la rivière Etchemin.

Sur la base des données disponibles et des hypothèses faites dans ce rapport, le Tableau 8-1 donne pour chaque cours d'eau étudié relativement au projet Oléoduc Énergie Est de TransCanada, un récapitulatif de :

- Constats par rapport à la géologie/géotechnique ;
- Vulnérabilité des habitats des poissons ;
- Classe d'emplacement ;
- Technique proposée par l'analyse multicritère ;
- Technique proposée par TransCanada ;
- Analyse ou conclusion.

Tableau 8-1 : Récapitulatif des constats et analyse pour les cours d'eau étudiés relativement au projet Oléoduc Énergie Est de TransCanada

Nom de la rivière	Constats par rapport à la géologie/géotechnique	Vulnérabilité des habitats des poissons	Classe d'emplacement[28]	Technique proposée par l'analyse multicritère	Technique proposée par TransCanada	Analyse/Conclusion
rivière des Mille Îles	Socle rocheux rencontré proche du fond du lit	Élevée	1	Forage dirigé	Forage dirigé	Forage dirigé techniquement réalisable, mais le socle rocheux pourrait amener des risques pour cette technique. Des informations additionnelles sont requises pour définir une technique alternative
rivière des Prairies	Socle rocheux rencontré proche du fond du lit	Élevée	1	Forage dirigé	Forage dirigé	Forage dirigé techniquement réalisable, mais le socle rocheux pourrait amener des risques pour cette technique. Des informations additionnelles sont requises pour définir une technique alternative
rivière des Outaouais	Sol meuble et sol rocheux de mauvaise qualité	Élevée	2	Forage dirigé	Forage dirigé	Sol rocheux de mauvaise qualité rend le forage dirigé non recommandée. Les options possibles sont le choix d'un nouvel emplacement ou le recours à une technique alternative de franchissement moyennant des informations additionnelles.
rivière Madawaska	Socle rocheux rencontré proche du fond du lit	Élevée	1	Forage dirigé	Forage dirigé	Forage dirigé techniquement réalisable, mais le socle rocheux pourrait amener des risques pour cette technique. Des informations additionnelles sont requises pour définir une technique alternative
rivière L'Assomption	Sol argileux et silteux	Élevée	2	Forage dirigé	Forage dirigé	Forage dirigé techniquement réalisable, bien que des risques subsistent quant aux difficultés de guidage, au gonflement de l'argile, à l'effondrement du trou de forage et aux pertes de fluide

[28] La classe d'emplacement est représentée par un nombre entier compris entre 1 et 4. Elle est déterminée d'après divers facteurs, notamment la densité de la population, la présence d'installations industrielles ou d'aires extérieures bien définies comme les parcs, les aires de repos et les campings. Plus la classe est élevée, plus les conséquences d'une éventuelle défaillance du pipeline seront importantes.

Nom de la rivière	Constats par rapport à la géologie/géotechnique	Vulnérabilité des habitats des poissons	Classe d'emplacement[28]	Technique proposée par l'analyse multicritère	Technique proposée par TransCanada	Analyse/Conclusion
rivière Bayonne	Sol argileux et silteux	Élevée	1	Forage dirigé	Forage dirigé	Forage dirigé techniquement réalisable, bien que des risques subsistent quant aux difficultés de guidage, au gonflement de l'argile, à l'effondrement du trou de forage et aux pertes de fluide
rivière Chicot	Sol argileux et silteux	Élevée	2	Forage	Forage dirigé	Forage dirigé techniquement réalisable, bien que des risques subsistent quant aux difficultés de guidage, au gonflement de l'argile, à l'effondrement du trou de forage et aux pertes de fluide
rivière Maskinongé	Sol argileux et silteux. Risque de glissement M2	Modérée	2	Forage dirigé	Forage dirigé	Forage dirigé techniquement réalisable, bien que des risques subsistent quant aux difficultés de guidage, au gonflement de l'argile, à l'effondrement du trou de forage et aux pertes de fluide. Traverse par tranchée non recommandée
rivière du Loup	Sol argileux et silteux. Risque de glissement élevé	Élevée	2	Forage dirigé	Forage dirigé	Forage dirigé techniquement réalisable, bien que des risques subsistent quant aux difficultés de guidage, au gonflement de l'argile, à l'effondrement du trou de forage et aux pertes de fluide. Traverse par tranchée non recommandée
rivière Saint-Maurice	Sol graveleux et rocheux. Risque de glissement M2	Modérée	1	Forage dirigé	Forage dirigé	Forage dirigé techniquement faisable, bien que des risques subsistent quant aux difficultés de guidage, au gonflement de l'argile, à l'effondrement du trou de forage et aux pertes de fluide. Traverse par tranchée non recommandée
rivière Batiscan	Sol argileux et silteux. Risque de glissement élevé	Élevée	1	Forage dirigé	Forage dirigé	Forage dirigé techniquement réalisable, bien que des risques subsistent quant aux difficultés de guidage, au gonflement de l'argile, à l'effondrement du trou de forage et aux pertes de fluide. Traverse par tranchée non recommandée

Nom de la rivière	Constats par rapport à la géologie/géotechnique	Vulnérabilité des habitats des poissons	Classe d'emplacement[28]	Technique proposée par l'analyse multicritère	Technique proposée par TransCanada	Analyse/Conclusion
rivière Sainte-Anne	Mélange d'argile, limon et sable jusqu`à 31,8 m. Talus prononcé	Élevée	1	Forage dirigé	Forage dirigé	Forage dirigé techniquement réalisable, bien que des risques subsistent quant aux difficultés de guidage, au gonflement de l'argile, à l'effondrement du trou de forage et aux pertes de fluide. Traverse par tranchée non recommandée
rivière Jacques-Cartier	Sol granulaire et rocheux. Talus prononcé	Élevée	1	Forage dirigé	Forage dirigé	Forage dirigé techniquement réalisable, bien que des risques subsistent quant aux difficultés de guidage, au gonflement de l'argile, à l'effondrement du trou de forage et aux pertes de fluide. Traverse par tranchée non recommandée
Fleuve Saint-Laurent	Sol argileux et silteux	Élevée	1	Tunnel	Tunnel	Forage dirigé techniquement réalisable, mais non recommandé compte tenu de l'ampleur du cours d'eau. Tunnel à préconiser
rivière Beaurivage	Sol granulaire et rocheux. Talus peu prononcés	Élevée	1	Forage dirigé	Forage dirigé	Forage dirigé techniquement réalisable, bien que des risques subsistent quant aux difficultés de guidage, au gonflement de l'argile, à l'effondrement du trou de forage et aux pertes de fluide
rivière Chaudière	Moraine dense et socle rocheux proche du fond du lit de la rivière	Élevée	2	Forage dirigé	Forage dirigé	Forage dirigé techniquement réalisable, bien que des risques subsistent quant aux difficultés de guidage, au gonflement de l'argile, à l'effondrement du trou de forage et aux pertes de fluide
rivière Etchemin	Pas d'information géotechnique Risque élevé de glissement	Élevée	1	Forage dirigé	Forage dirigé	Traverse par tranchée possible si des mesures sont prises pour stabiliser les berges
rivière du Sud	Socle rocheux rencontré proche du fond du lit	Élevée	1	Forage dirigé	Forage dirigé	Forage dirigé techniquement réalisable, mais le socle rocheux pourrait amener des risques pour cette technique. Des informations additionnelles sont requises pour définir une technique alternative
rivière Bras Saint-Nicolas	Pas d'information de forages	Élevée	1	Forage dirigé	Forage dirigé	Forage dirigé en principe faisable

Nom de la rivière	Constats par rapport à la géologie/géotechnique	Vulnérabilité des habitats des poissons	Classe d'emplacement[28]	Technique proposée par l'analyse multicritère	Technique proposée par TransCanada	Analyse/Conclusion
rivière Trois Saumons	Socle rocheux très fracturé	Élevée	1	Forage dirigé	Forage dirigé	Forage dirigé non adapté. Des informations additionnelles sont requises pour définir une technique alternative
rivière Ouelle	Socle rocheux rencontré proche du fond du lit	Élevée	1	Forage dirigé	Forage dirigé	Forage dirigé techniquement réalisable, mais le socle rocheux pourrait amener des risques pour cette technique. Des informations additionnelles sont requises pour définir une technique alternative
La Grande Rivière	Socle rocheux très fracturé	Élevée	1	Forage dirigé	Forage dirigé	Forage dirigé non adapté. Des informations additionnelles sont requises pour définir une technique alternative
rivière du Loup	Socle rocheux rencontré proche du fond du lit	Élevée	1	Forage dirigé	Forage dirigé	Forage dirigé techniquement réalisable, mais le socle rocheux pourrait amener des risques pour cette technique. Des informations additionnelles sont requises pour définir une technique alternative

Mise en garde : L'information provenant de la documentation publique du projet Oléoduc Energie Est qui était disponible à l'automne 2015 fut utilisée pour supporter cette analyse. Cette information est susceptible d'évoluer lors des prochains mois.

9 Références

American Petroleum Institute (API). (2009). Analysis of US oil spillage. [En ligne] http://www.api.org/environment-health-and-safety/clean-water/oil-spill-prevention-and-response/~/media/93371edfb94c4b4d9c6bbc766f0c4a40.ashx. Page consultée le 18 décembre 2014

American Society of Civil Engineers (ASCE). (1996). Pipeline Crossings. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No.89. Préparé par : The Task Committee on Pipeline Crossings of the Technical Committee on Pipeline Crossings of the Pipeline Division of the American Society of Civil Engineers.

Brownsburg-Chatham. (2015). Vos lacs et cours d'eau. Retrieved September 18, 2015, from http://www.brownsburgchatham.ca/services-municipaux/urbanisme/vos-lacs-et-cours-deau/

Bureau de la Sécurité des Transports du Canada (BST). (2015). Sommaire statistique des événements de pipeline 2012. Retrieved October 2, 2015, from http://www.tsb.gc.ca/fra/stats/pipeline/2012/ss12.asp

Bureau du Vérificateur Général du Canada (BVG). (2011). Le transport des produits dangereux. Chapitre du Rapport du commissaire à l'environnement et au développement durable.

Canadian Association of Petroleum Producers (CAPP), Canadian Energy Pipeline Association (CEPA) and Canadian Gas Association (CGA). (2005). Pipeline Associated Watercourse Crossings. Preparé by TERA Environmental Consultants and Salmo Consulting Inc. Calgary, AB. [En ligne] http://www.cepa.com/wp-content/uploads/2014/01/Pipelines-Associated-Watercourse-Crossings.pdf. Page consultée le 6 octobre 2015

Canadian Association of Petroleum Producers (CAPP), Canadian Energy Pipeline Association (CEPA) and Canadian Gas Association (CGA). (2012). Pipeline Associated Watercourse Crossings (4th ed.): Canadian Energy Pipeline Association.

Canadian Energy Pipeline Association (CEPA). (2013). Pipeline Watercourse Management, Recommended Practices, 1st Edition: Canadian Energy Pipeline Association.

Canadian Energy Pipeline Association (CEPA). (2014). Protecting the environment at watercourse crossings. [En ligne] http://www.cepa.com/protecting-the-environment-at-watercourse-crossings. Page consultée le 6 octobre 2015.

Canadian Pipeline Environment Committee (CPEC). (2009). The life cycle of pipeline watercourse crossings in Canada. [En ligne] http://www.cepa.com/wp-content/uploads/2014/01/CPEC-Life-Cycle-of-Pipeline-Watercourse-Crossings.pdf. Page consultée le 6 octobre 2015.

Carson, M.A. (1977). On the retrogression of landslides in sensitive muddy sediments. Revue canadienne de géotechnique, Vol.14:582-602.

Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ). (2015). Carte des régions hydrographiques. Retrieved September 18, 2015, from https://www.cehq.gouv.qc.ca/suivihydro/default.asp

Chagnon, J.-Y. (1968). Les coulées d'argile dans la province de Québec. Naturaliste canadien, 95, 1327-1343.

Comité de Franchissement des Cours d'Eau par des Pipelines au Canada (CFCEPC). (1999). Franchissement des cours d'eau (2ème ed.)

Couillard, L., & Grondin, P. (1986). La végétation des milieux humides du Québec: Gouvernment du Québec, Ministère de l'environnement.

Demers, D., Leroueil, S. et D'Astons, J. (1999). Investigation of a landslide in Maskinongé, Québec. Revue canadienne de géotechnique, Vol.36:1001-1014.

ENBRIDGE. (2012). Projet d'inversion de la canalisation 9B et d'accroissement de la capacité de la canalisation 9. Retrieved September 23, 2015, from http://www.enbridge.com/~/media/www/Site Documents/Delivering Energy/Projects/Line9B/Line9BMap_FR.pdf?la=en

ENBRIDGE. (2015). Inversion de la canalisation 9 (initiative d'accès aux raffineries de l'Est du Canada). Retrieved September 23, 2015, from http://www.enbridge.com/ECRAI_FR.aspx

Energy and Utilities Board (EUB) (2007). Pipeline Performance in Alberta, 1990-2005. Rapport de l'Alberta Energy and Utilities Board. En ligne : http://www.aer.ca/documents/reports/r2007-A.pdf [Consulté le 12 août 2013].

Environnement Canada. (2015). Fleuve Saint-Laurent. Retrieved September 21, 2015, from http://www.ec.gc.ca/stl/default.asp?lang=Fr&n=F46CF5F8-1

Golder Associates. (2014a). Portion à construire de l'Oléoduc Énergie Est, Évaluation de phase I des géorisques.

Golder Associates. (2014b). Portion à construire de l'Oléoduc Énergie Est, Évaluation de phase I des risques hydrotechniques, révision 3.

Golder Associates. (2015a). Energie East Pipeline East Pipeline (New-Build Portion), Phase II Geologic Hazard assessment.

Golder Associates. (2015b). Hydrotechnical Hazard Phase II Assessment, Revision 2.

Gouvernement du Québec. (2013). Inversion du flux de l'oléoduc 9B d'Enbridge - Consultation publique. Retrieved from http://www.assnat.qc.ca/Media/Process.aspx?MediaId=ANQ.Vigie.Bll.DocumentGenerique_77247&process=Default&token=ZyMoxNwUn8ikQ+TRKYwPCjWrKwg+vIv9rjij7p3xLGTZDmLVSmJLoqe/vG7/YWzz.

Gouvernement du Québec. (2014). Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables. Éditeur officiel du Québec Retrieved from http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q2R35.HTM.

Guo, B., Song, S., Ghalambor, A., & Chacko, J. (2005). Offshore Pipelines: Elsevier.

Harder PA and Associates Ltd. (1996). Case History Review of Directional Drill Projects for Water Crossings, Préparé pour Westcoast Energy Inc.

Hébert, S. (1996). Développement d'un indice de la qualité bactériologique et physico-chimique de l'eau pour les rivières du Québec. Ministère de l'environnement et de la faune. [En

ligne] http://www.obvcapitale.org/wp-content/uploads/2012/07/D%C3%A9veloppement-de-lIQBP.pdf Page consultée le 6 octobre 2015.

Hotte, M., & Quirion, M. (2003). Guide technique no. 15, Traverses de cours d'eau. Fondation de la faune du Québec et Fédération des producteurs de bois du Québec, Sainte-Foy, Publications du gouvernement du Québec.

Info-Excavation. (2015a). Les réseaux de transport d'hydrocarbures à haute pression – réseaux méconnus. Retrieved September 22, 2015, from http://www.info-ex.com/wp-content/uploads/2013/11/Activites_agricoles-2008.pdf

Info-Excavation. (2015b). Réseaux de transport d'hydrocarbures par pipelines souterrains. Retrieved September 22, 2015, from http://www.info-ex.com/wp-content/uploads/2013/11/2014-carte_reseaux1.pdf

International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF). (2014). Oil tanker spill statistics 2013. [En lgine] http://www.itopf.com/knowledge-resources/data-statistics/statistics/. Page consultée le 18 décembre 2014

Jean, M., & Létourneau, G. (2011). Changements dans les milieux humides du fleuve Saint-Laurent de 1970 à 2002: Direction générale des sciences et de la technologie, Environnement Canada.

Lamontagne, M., Demers, D. et Savopol, F. (2007). Description et analyse du glissement de terrain meurtrier du 25 octobre 1870 dans les rangs des Lahaie, Sainte-Geneviève-de-Batiscan, Québec. Revue canadienne des sciences de la terre, Vol. 44:947-960.

LaRochelle, P., Chagnon, J.-Y. et Lefebvre, G. (1970). Regional geology and landslides in the marine clay deposits of eastern Canada, Revue canadienne de géoetchnique, Vol.7:145-156.

Lebuis, J., Robert, S.M. et Rissmann, P. (1983). Regional mapping of landslide hazard in Quebec. Comptes rendus du Symposium sur les talus dans les argiles molles. Rapport No.17, Institut Géotechniques de Suède, pp. 205-262.

Lefebvre, G. et LaRochelle, P. (1974). The analysis of two slope failures in cemented sensitive clays. Revue canadienne de géotechnique, Vol.11:89-108.

Leroueil, S. et Le Bihan, J.-P. (1983). Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada. Revue canadienne de géotechnique, Vol.20 :681-705.

Liu, H. (2003). Pipeline engineering. Lewis Publishers, Washington D.C., 420 pages.

Locat, P., Leroueil, S. et Locat, J. (2008). Remaniement et mobilité des débris de glissements de terrains dans les argiles sensibles de l'est du Canada. Comptes rendus de la 4e Conférence canadienne sur les géorisques : des causes à la gestion. Québec, 2008, pp. 97-106.

Maystre, L. Y., Pictet, J., Simos, J., & Roy, B. (1994). Méthodes multicritères ELECTRE: description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale (Vol. 8): PPUR presses polytechniques.

Miesner, T.O. et Leffler, W.L. (2006). Oil and Gas Pipelines in Nontechnical Language. PennWell Books, Tulsa, Etats-Unis, 357 pages.

Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MDDELCC). (2015a). Identification et délimitation des milieux hydriques et riverains. Retrieved September 18, 2015, from http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/rives/delimitation.pdf

Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MDDELCC). (2015b). Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune. Éditeur officiel du Québec Retrieved from http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/C_61_1/C61_1.html.

Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MDDELCC). (2015c). Loi sur la qualité de l'environnement. Éditeur officiel du Québec Retrieved from http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/Q_2/Q2.htm.

Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MDDELCC). (2015d). Rapport sur l'état de l'eau et des écosystèmes aquatiques au Québec. Retrieved September 21, 2015, from http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/rapportsurleau/portrait-Qc-aquatique-eau-nord-sud-est-ouest.htm

Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs (MDDEFP). (2012a). Portrait de la qualité des eaux de surface au Québec 1999-2008 : Le Fleuve Saint-Laurent. [En ligne] http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/portrait/eaux-surface1999-2008/chap2.pdf. Page consultée le 6 octobre 2015.

Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs (MDDEFP). (2012b). Portrait de la qualité des eaux de surface au Québec 1999-2008 : Les rivières. [En ligne] http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/portrait/eaux-surface1999-2008/chap1.pdf. Page consultée le 6 octobre 2015.

Ministère du développement durable, de l'environnement et lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). (2015). La diversité des poissons : le fleuve Saint-Laurent ; états de santé des communautés de poissons du tronçon de Grondines- Saint-Nicholas. [En ligne] http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/poissons/Fl-St-Laurent/etat_Grondines-StNicolas.htm. Page consultée le 6 octobre 2015.

Mitchell, R.J., et Markell, A.R. (1974). Flow sliding in sensitive clays. Revue canadienne de géotechnique, Vol. 11:11-31.

Najafi, M. (2005). Trenchless technology: pipeline and utility design, construction, and renewal. Mc Graw-Hill.

Najafi, M. (2010). Trenchless technology piping: installation and inspection. Mc Graw-Hill.

National Transportation Safety Board (NTSB). (1996). Pipeline rupture and release of fuel oil in the Reedy River. [En ligne] http://www.ntsb.gov/investigations/AccidentReports/Pages/PAR9801.aspx. Page consultée le 6 octobre 2015.

Office National de l'Énergie (ONE). (2000). Les sables bitumineux du Canada : Perspectives de l'offre et du marché jusqu'en 2015

Office National de l'Énergie (ONE). (2011). Gros plan sur la sécurité et l'environnement. Analyse comparative du rendement des pipelines 2000-2009.

Office National de l'Énergie (ONE). (2015). Rapport sur les incidents pipeliniers de 2000 à 2013. Retrieved October 2, 2015, from https://www.neb-one.gc.ca/sftnvrnmnt/sft/archive/pplnncdntgrprtng/pplnncdts/pplnncdts-fra.html

Office Québécois de la Langue Française (OQLF). (2014). Le grand dictionnaire terminologique. Retrieved September 22, 2015, from http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca

Parlement du Canada. (2012). Les oléoducs : considérations environnementales. [En ligne] http://www.parl.gc.ca/Content/LOP/ResearchPublications/2012-37-e.htm. Page consultée le 6 octobre 2015.

Pêches et océans Canada. (2006). Practitioners guide to the risk management framework for DFO habitat management staff version 1.0. [En ligne] http://www.dfo-mpo.gc.ca/Library/343443.pdf. Page consultée le 6 octobre 2015.

Quinn, P., Hutchinson, D. J., Diederichs, M. S., Rowe, R. K., Harrap, R., & Alvarez, J. (2007). A digital inventory of landslides in Champlain clay. Paper presented at the Proceedings of the 60th Canadian Geotechnical Conference, Ottawa, Ont.

Ressources Naturelles Canada (RNC). (2015). Régime de réglementation des pipelines du Québec. Retrieved September 22, 2015, from http://www.rncan.gc.ca/energie/infrastructure/regimes-reglementation-pipelines/16455

Tavenas, F., Flon, P. Leroueil, S. et Lebuis, J. (1983). Remolding energy and risk of retrogression in sensitive clays. Comptes rendus du symposium sur les talus dans les argiles molles. Rapport No. 17, Institut Géotechnique de Suède, pp. 423-454.

TERA Environmental Consultants. (1996). Water Crossing Case History Review. Préparé pour Westcoast Energy Inc.

TERA Environmental Consultants. (1998). Typical Drawings for Pipeline Construction.

Commission de Toponymie du Québec. (2015). Liste complète des types d'entités et leurs définitions. Retrieved September 21, 2015, from http://www.toponymie.gouv.qc.ca/ct/normes-procedures/terminologie-geographique/entite.aspx

TransCanada PipeLines Limited (TCPL). (1994). Water Crossing Manual.

TransCanada. (2014a). Oléoduc Énergie Est : évaluation environnementale et socioéconomique. Volume 2 : évaluation biophysique et l'incidence biophysique des éléments du nouveau pipeline, des tronçons convertis et des installations connexes, structurés par province. [En ligne]. http://www.oleoducenergieest.com/depot-reglementaire/ees/. Page consultée le 6 octobre 2015.

TransCanada. (2014b). Project Énergie Est - Volume 4 : Conception du pipeline.

TransCanada. (2015a). Carte du tracé. Retrieved December 8, 2015, from http://www.oleoducenergieest.com/a-propos/carte-du-trace/

TransCanada. (2015b). Oléoduc Énergie Est. Retrieved September 23, 2015, from http://www.oleoducenergieest.com/a-propos/le-projet/

TransCanada. (2015c). Oléoduc Énergie Est : rapport supplémentaire #4. [En ligne]. http://www.oleoducenergieest.com/rapport-supplementaire-no-4/. Page consultée le 16 octobre 2015.

United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2015). EPA's response to the Enbridge oil spill. [En ligne] http://www3.epa.gov/region5/enbridgespill/. Page consultée le 19 novembre 2015.

West Coast Environmental Law. (2011). Enbridge Northern Gateway Pipeline – risks for downstream communities and fisheries. [En ligne] http://wcel.org/sites/default/files/publications/Enbridge%20Northern%20Gateway%20Pipeline%20risks%20for%20downstream%20communities%20and%20fisheries.pdf Page consultée le 6 octobre 2015.

WSP Canada Inc. (2014). Risk Assessment for Marine Spill in Canadian Waters : Phase 1, Oil spills South of the 60th Parallel. 124 p. [En ligne] http://wcel.org/sites/default/files/file-downloads/131-17593-00_ERA_Oil-Spill-South_150116_pp1-124.pdf Page consultée le 31 octobre 2014.