

Lignes directrices sur le rendement des structures d'acier enterrées

1.0 Introduction

Le but de ces lignes directrices est d'aider les praticiens à sélectionner le type de structure approprié, les détails de protection finale et la combinaison optimale de revêtement et d'épaisseur de plaque pour permettre aux structures en plaques de tôle ondulée de satisfaire aux spécifications de durée de vie utile nominale. L'exposition de l'application, son emplacement et les conditions environnementales propres au site sont des paramètres clés dans l'estimation de la durée de vie utile de structures d'acier flexibles souterraines. Ces lignes directrices visent à compléter les connaissances locales en matière de performance des plaques structurelles enterrées.

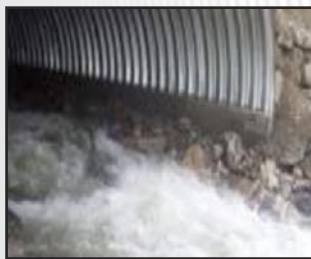
Parmi les applications courantes des plaques de tôle ondulée, dont certaines sont illustrées par les photos de la Figure 1, on compte les suivantes :

- Ponceaux sur des cours d'eau – Tuyaux à section circulaire, en arche et elliptiques
- Ponts de courte portée sur des cours d'eau – Arches à radier ouvert et formes rectangulaires
- Sauts-de-moutons (applications autres que de cours d'eau) – passages souterrains ou supérieurs pour véhicules, piétons ou animaux; franchissements de services publics

Figure 1 – Installations de tuyaux en tôle forte ondulée



PONCEAU EN ARCHE AVEC RADIER ENTERRÉ SUR UN COURS D'EAU



ARCHE À RADIER OUVERT SUR UN COURS D'EAU



PASSAGE PIÉTONNIER SOUTERRAIN

Les plaques de tôle ondulée peuvent être exposées à diverses conditions environnementales, comme l'indique le tableau 1

Table 1 – Application et exposition de la structure

Application	Type de structure	Emplacement dans la structure	
		Exposition intérieure	Exposition extérieure
Cours d'eau	Rond, arche, ellipse	Matériau de la charge de fond, eau (radier, côtés), matériau de remblai, sels de voirie	Enveloppe de remblai, eaux de surface, sels pulvérisés et infiltrations
	Arche à radier ouvert, ponceaux rectangulaires	Eau, matériau de remblai, sels de voirie (côtés sous le niveau d'eau théorique)	Enveloppe de remblai, eaux de surface, sels pulvérisés et infiltrations
Saut-de-mouton	Passage inférieur, rond, ellipse	Matériaux de remblai (radier), sels de voirie (côtés, radier)	Enveloppe de remblai, eaux de surface, sels pulvérisés et infiltrations
	Arche à radier ouvert	Sels de voirie (côtés)	Enveloppe de remblai, eaux de surface, sels pulvérisés et infiltrations

Lignes directrices sur le rendement des structures d'acier enterrées

Definitions

- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials
- AH – Ratio d'accélération des ondes horizontales dans le sol
- ASTM – American Society for Testing and Materials
- CHBDC – Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CAN/CSA-S6-F06)
- CSA – Association canadienne de normalisation
- CAN/CSA-G401-F07 – Norme de l'Association canadienne de normalisation sur les tuyaux en tôle ondulée (disponible par l'intermédiaire du CSPI)
- CSPI – Institut pour les tuyaux de tôle ondulée
- DCSP – Tôle forte à ondulations profondes [Deep Corrugated Structural Plate]
- DL – Charge statique [Dead Load]
- DSL – Durée de vie théorique [Design Service Life]
- DWE – Niveau d'eau théorique [Design Water Elevation]
- EAA – Éthylène d'acide acrylique
- EMSL – Durée de vie utile estimative [Estimated Material Service Life]
- LL – Charge utile [Live Load]
- LFRD – Calcul des facteurs de charge et de résistance [Load and Resistance Factor Design]
- MSE – Terre stabilisée mécaniquement [Mechanically Stabilized Earth]
- SPCSP – Buses en tôle forte d'acier ondulé [Structural Plate Corrugated Steel Pipe]
- BSR – Bactéries sulfato-réductrices [SRB – Sulfate Reducing Bacteria]
- MDT – Matières dissoutes totales [TDS – Total Dissolved Solids]

Revêtements externes et internes disponibles

Revêtements externes (suivant la norme CSA G401)

- Galvanisé par immersion à chaud
- Revêtement polymère

Revêtements internes

- Béton
- Plaque d'acier

Nota : Le présent document ne s'applique pas au rendement des ponceaux en TTO (tuyaux de tôle ondulée). La durabilité des TTO fait l'objet d'un document intitulé « Lignes directrices sur la durabilité des ponceaux en tuyaux de tôle ondulée (diamètre de 300 mm à 3600 mm) » – disponible auprès du CSPI.

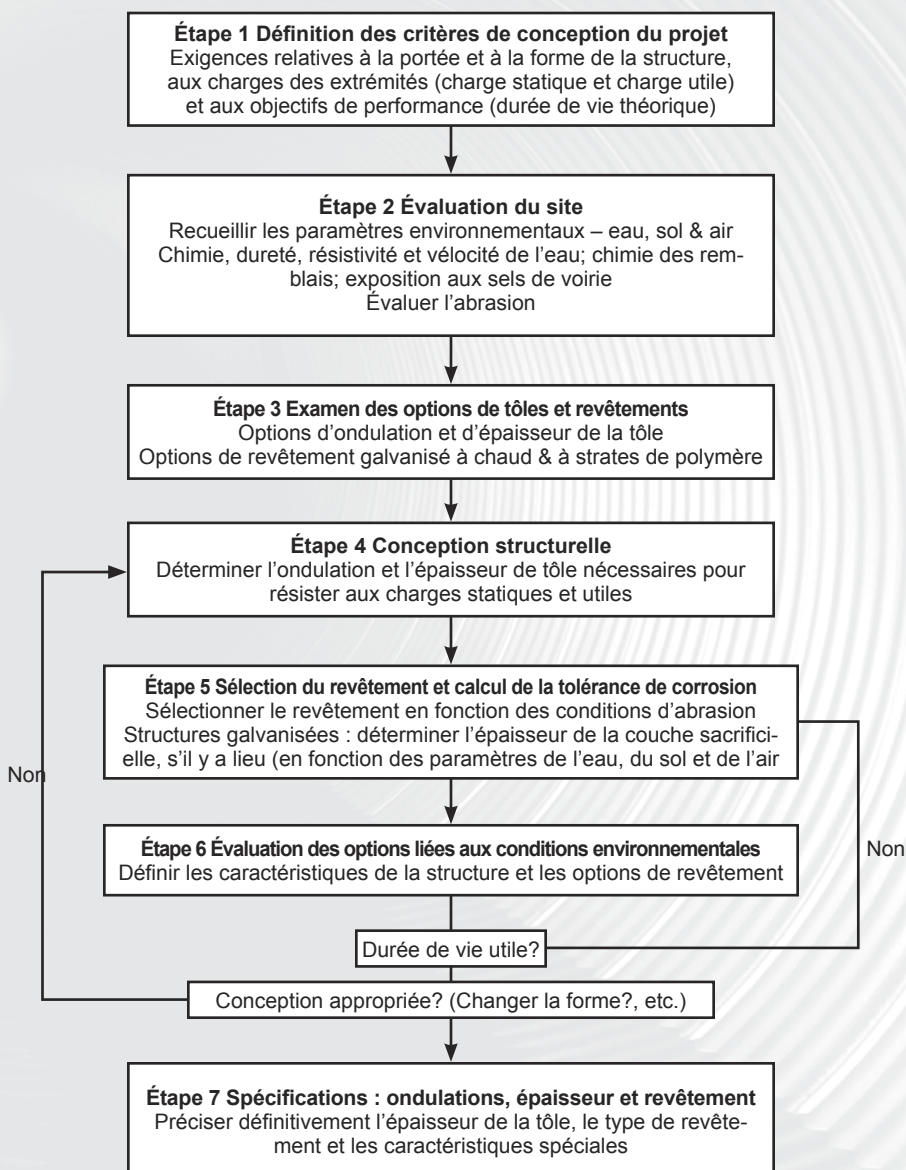
Les présentes lignes directrices ne constituent aucunement une solution de remplacement à des conseils d'ingénieur et sont fournies sans garantie ni représentation quant aux résultats. Bien que tous les efforts raisonnables aient été faits pour en assurer l'exactitude, ni l'Institut pour les tuyaux de tôle ondulée (CSPI), ni aucun de ses membres ou représentants ne garantit ni n'assume la responsabilité de leur utilisation ou de leur caractère approprié pour une application donnée.

Lignes directrices sur le rendement des structures d'acier enterrées

2.0 Lignes directrices sur la sélection des tôles et revêtements

La sélection d'une épaisseur de tôle théorique et du revêtement se fait en sept étapes. Les étapes et l'information sur les détails de chaque étape sont illustrées à la figure 2.

Figure 2 – Étapes de sélection des tôles et revêtements



Lignes directrices sur le rendement des structures d'acier enterrées

3.0 Étape de sélection des tôles et revêtements

Étape 1 – Définition des critères de conception du projet

On s'attend à ce que le concepteur recueille les critères de conception nécessaires, comme la géométrie du site, les exigences hydrauliques et les besoins généraux de l'application.

Cette ligne directrice s'applique à toute application de tôle forte ou de tôle forte à ondulations profondes, peu importe ses dimensions et son profil d'ondulation. Les formes et tailles de structure disponibles sont indiquées dans le Manuel des produits de tôle pour le drainage et la construction routière du CSPI [Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products]. De plus amples renseignements sur les formes de structure disponibles peuvent être obtenus auprès des sociétés membres du CSPI.

Les conditions de charge comprennent la profondeur du terrain de recouvrement au-dessus de la couronne de la structure (charge statique – DL), la charge imposée par les véhicules (charge utile – LL) et les charges sismiques, déterminées par le ratio d'accélération des ondes horizontales dans le sol (AH) pour le site.

La durée de vie théorique se définit comme le nombre d'années où la structure doit être utilisée. Cette durée de vie utile des structures routières varie généralement de 25 à 75 ans. Les organismes publics responsables des projets d'infrastructure établissent normalement la durée de vie théorique en fonction du type et de l'importance de la route, des volumes de circulation et des tendances de croissance futures.

Étape 2 – Évaluation du site

Des essais et observations sur le terrain ont déterminé que le rendement et la durabilité d'une tôle enterrée dépend de sa protection contre les paramètres environnementaux. Les principaux paramètres environnementaux (eau, sol et air) et leur interrelation avec les objectifs de rendement sont abordés ci-dessous.

Eau

Les applications sur des cours d'eau, que l'eau soit en contact régulier avec les tôles du radier ou des parois de la structure, requièrent une évaluation des paramètres chimiques et de débit ci-dessous. Les conditions de l'eau sont prises en compte lorsqu'une partie de la structure repose sous le niveau d'eau théorique. Ce niveau d'eau doit être déterminé par le propriétaire. Nota : certains propriétaires déterminent le niveau d'eau théorique comme étant le niveau d'orage maximal bisannuel (Q2) + 300 mm.

Chimie de l'eau

- pH – mesure de l'acidité ou de la basicité de l'eau. Dans les solutions acides, le pH est inférieur à 7 ($\text{pH} < 7$) et dans les solutions basiques, le pH est supérieur à 7 ($\text{pH} > 7$). Une solution au pH = 7 est considérée comme étant neutre.

Lignes directrices sur le rendement des structures d'acier enterrées

- Résistivité (ohm-cm) – indication de l'aptitude de l'eau à transmettre un courant électrique. Cette caractéristique est fonction de la concentration des matières dissoutes totales (MDT) ou ions de sel dans l'eau.
- Chlorures (Cl) – chlorures are highly soluble compounds commonly found in deicing salts, seawater and evaporation pools. Chloride ions are the most likely contributor to low resistivity values and will promote the corrosion of unprotected steel.
- Chlorures (Cl) – ions hautement solubles que l'on trouve couramment dans les sels de voirie, l'eau de mer et les bassins d'évaporation. Ces ions sont généralement les plus importants facteurs de faible résistivité et favorisent la corrosion de l'acier non protégé.
- Sulfates (SO₄) – naturellement présents dans l'eau. De plus, ils sont couramment présents dans l'air pollué d'où ils se déposent sur le sol et dans l'eau. Ils contribuent à réduire le pH de l'eau (pluies acides). Ils peuvent réduire la résistivité et soutenir les bactéries sulfato-réductrices dans des conditions anaérobiques. Toutes ces conditions peuvent favoriser la corrosion de l'acier non protégé.
- Dureté totale – indiquée par la quantité de carbonate de calcium (CaCO₃) dissoute dans l'eau et en détermine la capacité tampon, soit l'aptitude de l'eau à neutraliser l'acidité. L'eau douce naturelle présente une faible concentration de CaCO₃, ce qui, malgré une haute résistivité, peut être corrosive pour l'acier galvanisé. L'eau dure est riche en CaCO₃, qui neutralise l'acidité et forme une croûte protectrice à la surface des tuyaux.

Les limites environnementales des tôles en acier galvanisé et à revêtement polymère sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2

Limites environnementales pour les tôles en acier galvanisé ou à revêtement polymère

Paramètre environnemental	Limites suggérées Acier galvanisé	Limites suggérées pour l'acier à revêtement polymère		
		EMSL de 50 ans	EMSL de 75 ans	EMSL de 100 ans
Fourchette de pH préférable	De 5 à 9	De 3 à 12	De 4 à 9	De 5 à 9
Résistivité	De 2 000 à 8 000 ohm-cm	> 250 ohm cm	> 750 ohm cm	> 1,500 ohm cm
Chlorures	< 250 ppm	s.o. ¹	s.o. ¹	s.o. ¹
Sulfates	< 600 ppm	s.o. ¹	s.o. ¹	s.o. ¹
Dureté	> 80 ppm CaCO ₃	s.o. ¹	s.o. ¹	s.o. ¹

Nota :

¹ La résistivité est fonction des matières dissoutes totales (MDT) et peut dénoter la présence de chlorures, de sulfates, de calcium et d'autres ions.

Vitesse du courant

La vitesse du courant influe directement sur la charge de fond et, par conséquent, sur le taux d'abrasion. L'abrasion peut détériorer le fini de la tôle et entraîner une perte d'épaisseur de celle-ci dans les crêtes d'ondulation en amont, en raison des impacts des agrégats ou débris en suspension dans le courant. Le Tableau 3 définit les niveaux d'abrasion (de 1 à 4) en fonction de la description de la charge de fond et de la vitesse du courant.

Lignes directrices sur le rendement des structures d'acier enterrées

Tableau 3

Paramètres de niveau d'abrasion

Niveau d'abrasion	Description de la charge de fond	Vitesse maximale du courant prévue (m/s) ¹
1	Non abrasive – très faibles vitesses et charge de fond nulle (égouts pluviaux, réseaux de collecte des eaux pluviales, arches, etc.)	NA
2	Faiblement abrasive – Charges de fond mineures de sable et de gravier	1.5
3	Modérément abrasive – Charges de fond modérées de sable et de gravier	4.5
4	Fortement abrasive – Charges de fond majeures de sable, de gravier et de pierres	> 4.5

Nota :

¹ Les vitesses d'abrasion doivent être évaluées selon la fréquence et la durée. Un orage fréquent, tel qu'un orage bisannuel (Q2) ou un débit annuel moyen (Q2.33), doit être utilisé pour déterminer la vitesse.

Sol

Matériaux de remblai – les remblais de terre stabilisée mécaniquement qui entourent les structures de tôle enterrées sont sélectionnés en fonction des propriétés physiques connues (structurelles), mais doivent également présenter des propriétés électrochimiques précises. Les remblais doivent être constitués de matériaux granulaires se drainant librement, exempts de matière organique, et présenter la densité et les propriétés électrochimiques connues indiquées au Tableau 4. Ces matériaux sont généralement importés et leurs propriétés peuvent grandement différer de celles des matériaux constituant le sol d'origine. Les enveloppes de terre de remblai stabilisée mécaniquement isolent la structure du sol d'origine présentant des propriétés inconnues.

- Matériaux organiques – le contenu organique dans le remblai peut occasionner la formation de poches de sol anaérobiques qui pourraient être contaminées par des bactéries sulfato-réductrices, donnant ainsi lieu à des attaques microbiennes sous forme de graves piqûres de corrosion. Un faible contenu organique est également nécessaire à des fins structurelles. Le contenu organique total doit être limité à 1 % du poids de la fraction totale du sol, tel que déterminé suivant la norme AASHTO T-267 « Méthode standard d'essai de détermination du contenu organique des sols par perte par ignition ».
- Sulfates (SO₄) – ces minéraux sont généralement considérés comme étant plus bénins que les ions de chlorure, du point de vue de la corrosion métallique. Cependant, la présence de sulfates présente un risque pour les matériaux métalliques, car ils peuvent être transformés en sulfures hautement corrosifs sous l'action de bactéries sulfato-réductrices en milieu anaérobique. Comme les sulfates ne représentent qu'une seule des formes sous lesquelles le soufre peut se présenter dans le sol, l'extraction et la quantification du soufre dans le sol peuvent constituer un processus complexe. La norme AASHTO T-290, « Méthode standard d'essai pour la détermination du contenu en ions de sulfate hydrosolubles dans le sol », décrit une méthode de titrage chimique pour mesurer les concentrations de sulfate hydrosoluble.

Lignes directrices sur le rendement des structures d'acier enterrées

Tableau 4

Paramètres du matériau de remblai et méthodes d'essai

Paramètres du matériau de remblai	Essai AASHTO	Essai ASTM	Limites pour l'acier galvanisé	
			R.-U. ¹	AASHTO
pH	T289-91	G-51	6 - 9	5 - 10
Résistivité	T288-91	G-57	> 3000 ohm-cm	> 3000 ohm-cm
Chlorures	T291-91	D-512	< 50 ppm	< 100 ppm
Sulfates	T290-91	D-516	< 240 ppm	< 200 ppm
Contenu organique	T267-86	NA	< 1% ²	< 1% ²

Notes :

¹ L'indice de plasticité de la fraction passant dans un tamis de 425 µm doit être ≤ 6.

² Un faible contenu organique est nécessaire à des fins structurelles

Air

L'exposition atmosphérique est considérée comme ayant un effet minime sur le rendement des structures de tôle, à l'exception des structures exposées à une haute concentration de gaz industriels, à des sources de chaleur extrêmes ou à des zones côtières salines.

Étape 3 – Examen des options de tôles et de revêtements

Cette ligne directrice s'applique à toute application de tôle forte ou de tôle forte à ondulations profondes, peu importe ses dimensions et son profil d'ondulation. Les profils d'ondulation disponibles sont indiqués dans le Manuel du CSPI. De plus amples renseignements sur les formes de structure disponibles peuvent être obtenus auprès des sociétés membres du CSPI.

Les produits de tôle forte sont disponibles dans deux principaux profils d'ondulations – superficielles ou profondes. Les deux produits sont décrits dans la norme CSA G401-F01.

La tôle forte en acier ondulé à profil superficiel présente des ondulations d'un pas de 152,4 mm et d'une profondeur de 50,8 mm. Elle est offerte en épaisseurs de tôle nominales de 2,69 à 7,0 mm.

La tôle forte à ondulations profondes existe en deux profils d'ondulation, de type 1 ou 2.

- Les tôles fortes à ondulations profondes de type 1 présentent des ondulations d'un pas de 381 mm et d'une profondeur de 140 mm. Elles sont offertes en épaisseurs nominales de 4,19 à 7,94 mm.
- Les tôles fortes à ondulations profondes de type 2 présentent des ondulations d'un pas de 400 mm et d'une profondeur de 150 mm. Elles sont offertes en épaisseurs nominales de 4,30 à 7,94 mm.

Lignes directrices sur le rendement des structures d'acier enterrées

Structural plate products are available with hot dip galvanized coating options as detailed in Table 5.

Tableau 5

Revêtement de zinc pour les produits en tôle galvanisée selon la norme CSA G401-F01

Épaisseur nominale de tôle (mm)	Revêtement de zinc standard		Revêtement de zinc non standard	
	Masse totale – 2 côtés (g/m ²)	Épaisseur par côté (µm)	Masse totale – 2 côtés (g/m ²)	Épaisseur du zinc par côté (µm)
< 4.0	915	64	NA	NA
4.0 – 8.0	915	64	1220	87

Un revêtement polymère peut être utilisé pour éliminer ou réduire au minimum le contact de l'acier avec l'environnement pendant une certaine période. Il s'agit d'un système à deux volets où un copolymère éthylène-acide acrylique est appliqué sur une couche à base de zinc pour assurer un revêtement à la plus longue durée de vie utile pour les tôles fortes. Des boulons et écrous sont disponibles galvanisés, avec revêtement appliqué sur le terrain ou pré-enrobés avec un revêtement protecteur. Le choix du matériau des boulons et écrous dépend des paramètres environnementaux. Plusieurs rapports d'essai, évaluant le système de revêtement polymère, sont disponibles auprès des sociétés membres du CSPI. Ce revêtement est appliqué en usine et le rendement de la tôle ainsi revêtue est supérieur aux exigences de la norme ASTM A742 « Norme pour les tuyaux en tôle d'acier ondulé à revêtement métallique et à revêtement polymère appliqué en usine ».

Étape 4 – Conception structurelle

Le profil d'ondulation et l'épaisseur de la tôle nécessaire pour répondre aux conditions de charge définies à l'étape 1 peuvent être déterminés à partir de trois sources :

1. Le Manuel des produits de tôle pour le drainage et la construction routière du CSPI (2007) [Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products] (2007) contient des méthodes de conception, ainsi que de nombreux tableaux et exemples de conception.
2. Le chapitre 7, « Structures enterrées », du Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CAN/CSA S6-F06), explique en détail la procédure de conception de structures métalliques présentant un profil à ondulations superficielles ou profondes.
3. Les fabricants de produits de tôle forte ondulée peuvent fournir de l'expertise de conception.

Lignes directrices sur le rendement des structures d'acier enterrées

Étape 5 – Sélection du revêtement et calcul de la tolérance de corrosion

La sélection initiale du revêtement prend en compte l'état d'abrasion établi à l'étape 2. Le tableau 6 indique les options de revêtement en fonction de l'état d'abrasion observé.

Tableau 6

Options de revêtement en fonction du niveau d'abrasion

Options de revêtement en fonction du niveau d'abrasion			
1 Nul	2 Faible	3 Modéré	4 Élevé
Tôle à revêtement polymère			
Tôle galvanisée			
Structure de remplacement ¹ – Systèmes en composites ²			

Notes :

¹ Sélection d'une structure sans fond afin d'éliminer les problèmes d'abrasion du radier

² Voir l'étape 6.

La tolérance de corrosion est une estimation calculée de la perte métallique moyenne prévue pendant la durée de vie théorique. En ajoutant une tolérance de corrosion à l'épaisseur requise pour résister aux charges statique et dynamique, nous pouvons nous assurer que la structure satisfasse aux exigences de conception pendant toute la durée de vie théorique. Un revêtement protecteur peut être ajouté à la structure, ou à des portions de la structure, pour réduire ou éliminer la tolérance de corrosion estimative. La durée de vie utile estimative dépasse la durée de vie théorique si le devis prévoit une épaisseur de tôle supérieure à celle de la tôle majorée de la tolérance de corrosion.

Une structure est généralement exposée aux éléments environnementaux de base – l'eau, le sol et l'air. Une tolérance de corrosion est calculée pour chaque élément environnemental auquel la structure est exposée. La corrosion agit à la fois de l'intérieur et de l'extérieur de la structure, une tolérance de corrosion pour chaque côté d'une tôle doit être additionnée afin de déterminer la tolérance de corrosion totale requise. Par exemple, pour des tôles submergées d'un franchissement de ruisseau, il peut être approprié d'utiliser la tolérance de corrosion par l'eau à l'intérieur et la tolérance de corrosion par le sol à l'extérieur.

Lignes directrices sur le rendement des structures d'acier enterrées

Éléments environnementaux : eau

Le taux de corrosion dans l'eau peut varier grandement en fonction de plusieurs facteurs. Les effluents peuvent être classés en trois catégories selon la dureté, le pH, la résistivité, les chlorures et les sulfates solubles. Le tableau 7 montre la classification résultante sur le plan de la corrosivité. La classification globale doit être basée sur les conditions les plus graves et sur les propriétés limitatives les plus importantes.

Tableau 7

Propriétés de l'eau et de l'effluent

Corrosivité	pH	Ions de chlorure (ppm)	Sulfates solubles (ppm)	Dureté CaCO ₃ (ppm)	Résistivité (ohm-cm)
non corrosif	$6 \leq \text{pH} \leq 9$	≤ 50	≤ 240	> 80	2000-8000
corrosif	$5 \leq \text{pH} < 6$	$> 50 \text{ et } \leq 250$	$> 240 \text{ et } \leq 600$	> 80	2000-8000
très corrosif	$< 5 \text{ ou } > 9$	> 250	> 600	< 80	$< 2000 \text{ ou } > 8000$

Pour les environnements corrosifs et non corrosifs, les taux de corrosion du zinc et de l'acier peuvent être estimés à l'aide des équations du tableau 8. L'utilisation de l'acier galvanisé n'est pas recommandée pour des environnements très corrosifs.

Tableau 8

Taux de corrosion du zinc et de l'acier dans des eaux corrosives et non corrosives

Taux de corrosion du zinc (µm/année)		Calcul de l'épaisseur de la couche d'acier sacrificielle (M, µm) ¹	
Environnement non corrosif	Environnement corrosif	Environnement non corrosif	Environnement corrosif
4	14	$M = 22.5 * (t - 16)^{0.67}$	$M = 40 * (t - 4.57)^{0.80}$

Notes :

¹ t = Durée de vie utile théorique en années. Ces formules supposent une épaisseur de zinc de 64 µm par côté (masse du revêtement de 915 g/m²)

Le tableau 9 indique la tolérance de corrosion de l'acier calculée pour diverses périodes. On remarquera que ces taux de perte supposent que la surface interne de l'acier galvanisé est immergée en permanence. Pour les tôles qui ne sont exposées à l'eau que de façon intermittente, il est recommandé de réduire la tolérance de corrosion.

Tableau 9

Tolérance calculée de la corrosion de l'acier exposé à l'eau

Durée de vie utile théorique (années)	Tolérance de corrosion de l'acier ¹ (µm)	
	Environnement non corrosif	Environnement corrosif
25	98	447
50	239	847
75	346	1203
75 ²	66	145

Notes :

¹ La tolérance de corrosion de l'acier est l'épaisseur d'acier supplémentaire qu'il faut ajouter à l'épaisseur calculée à titre d'exigence structurelle.

² Tolérance de corrosion de l'acier pour une durée de vie utile théorique de 75 ans lorsque un revêtement polymère est utilisé dans des conditions d'abrasion de niveau 3 (modérée).

Lignes directrices sur le rendement des structures d'acier enterrées

Pour la surface du côté « sol » des tôles exposées à l'eau par le sol saturé, il faut utiliser les taux de corrosion du côté « sol » indiqués au tableau 11. L'eau contenue dans les sols saturés est pauvre en oxygène, un élément clé du processus de corrosion du côté « eau ».

Si un revêtement polymère est utilisé, on suppose qu'aucune corrosion ne se produit durant toute la durée de vie efficace du revêtement. Les recherches indiquent que les revêtements polymères peuvent assurer une durée de vie efficace de 80 ans et plus, selon les conditions d'abrasion. Le tableau 10 indique la durée de vie « supplémentaire » recommandée dont il faut tenir compte pour chacun des trois niveaux d'abrasion.

Tableau 10

Durée de vie efficace du revêtement polymère

Niveau d'abrasion	Durée de vie efficace du revêtement polymère (années)
1 Nul	80+
2 Faible	80+
3 Modéré	70
4 Élevé	Non recommandé

Éléments environnementaux : sol

Divers modèles ont été utilisés pour estimer une tolérance de corrosion des structures d'acier galvanisé en contact avec des matériaux de remblai. Le modèle de l'AASHTO, applicable aux murs de soutènement enterrés de terre stabilisée mécaniquement, est recommandé et a été utilisé par des organismes publics. Ce n'est cependant pas exigé par le Code canadien sur le calcul des ponts routiers. À des fins de comparaison, cette ligne directrice comprend également un modèle de corrosion du côté « sol » du Royaume-Uni. La corrosion du revêtement de zinc et du substrat d'acier peut être estimée à l'aide des valeurs de l'AASHTO indiquées dans le tableau 11.

Tableau 11

Taux de perte de zinc et d'acier au carbone, côté « sol »

Material	Period	AASHTO Standard Loss Rate/year/side (µm) ¹	UK Non-Aggressive LossRate/year/side (µm) ²
Zinc Coating	First 2 years	15	4
	Subsequently	4	4
Carbon Steel	After Zinc Depletion	12	M ³

Notes :

¹ AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications, article 7.6.4.2, Renforcements du sol.

² UK Design Manual for Roads and Bridges BD 12/01, volume 2, section 2, chapitre 6, Conception des structures en acier ondulé enterrées d'une portée de 0,9 mètres à 8,0 mètres.

³ M est la tolérance de corrosion de l'acier du Royaume-Uni après l'usure du zinc, par côté en µm (au lieu d'un taux de perte par année et par côté). M est calculée comme étant $M = 22,5 \cdot t_0^{0,67}$, où t_0 est la durée de vie utile théorique supplémentaire en années après l'usure du zinc (pour une épaisseur de zinc de 64 µm par côté, t_0 = durée de vie utile théorique – 16 ans).

Si on utilise une épaisseur galvanisée de 64 µm, la tolérance de corrosion de l'acier côté « sol » de l'AASHTO peut être calculée comme suit, où M est la tolérance de corrosion en microns (µm) et « t » est le nombre d'années.

$M = 0$ pour $t \leq 10,5$ ans; et

$M = 12 \cdot (t - 10,5)$, pour $t > 10,5$ ans

La tolérance de corrosion de l'acier résultante pour une durée de vie utile de 25, 50 et 75 ans est indiquée au tableau 12.

Lignes directrices sur le rendement des structures d'acier enterrées

Tableau 12

Tolérance calculée de la corrosion de l'acier du côté « sol »

Durée de vie utile théorique (années)	Tolérance de corrosion de l'acier de l'AASHTO (μm) ¹	Tolérance de corrosion de l'acier du R.-U. (μm) ¹
25	174	98
50	474	239
75	774	346

Notes :

¹ La tolérance de corrosion de l'acier est l'épaisseur d'acier supplémentaire qu'il faut ajouter à l'épaisseur calculée à titre d'exigence structurelle.

Ces taux de corrosion du côté exposé au sol supposent que la structure est enterrée à l'aide de terre stabilisée mécaniquement répondant aux critères résumés au tableau 4.

Pour en savoir plus, consulter le commentaire du Code canadien sur le calcul des ponts routiers, tableau C7.2.

Éléments environnementaux : air

Dans la plupart des applications, il n'est pas nécessaire de prévoir une tolérance de corrosion pour les structures d'acier galvanisé exposées à l'air.

Étape 6 – Évaluation des options liées aux conditions environnementales

Les conditions environnementales peuvent comprendre des propriétés chimiques du site dépassant les fourchettes recommandées ou des niveaux d'abrasion 3 ou 4. Le sel de voirie est un facteur important dans l'évolution des conditions environnementales.

Diverses options de conception sont disponibles pour la tôle forte ondulée afin de répondre aux exigences de durée de vie utile théorique lorsque des conditions environnementales extrêmes représentent un défi pour le concepteur.

Des structures de tôle forte sur toute la périphérie peuvent intégrer des caractéristiques spéciales pour tenir compte des problèmes d'abrasion et de vitesse du courant; par exemple, des blindages supplémentaires, des dissipateurs d'énergie ou des radiers asphaltés.

La nature segmentaire des structures en tôle forte peut accepter des combinaisons de tôle à revêtements galvanisés ou polymères dans la périphérie de la structure. Cela permet de mettre en place des tôles revêtues de polymères dans les zones aux conditions environnementales extrêmes. De même, varier les épaisseurs de tôle dans la périphérie permet de mettre en place des tôles fortes aux épaisseurs plus grandes le long du radier ou des côtés dans les zones aux niveaux d'abrasion élevés.

Lignes directrices sur le rendement des structures d'acier enterrées

On choisit souvent des structures en arc sans fond pour une abrasion de niveau 4 ou des conditions environnementales externes. Cette option permet d'éliminer les problèmes d'usure du radier. S'il faut remplacer une structure à périphérie complète par un arc sans fond, la décision de conception structurelle de l'étape 4 doit être réévaluée.

Dans le cas de structures à fond ouvert pour des applications sur des cours d'eau, il faut envisager d'accroître la portée et le haut de la fondation, de sorte que la tôle ne soit pas en contact avec l'eau (figure 3).

Figure 3 – Ponceau rectangulaire en tôle forte à ondulations profondes (comprend un mur d'amont en palplanches d'acier)



Pour protéger les structures en tôle à couverture superficielle contre les contaminants de la route qui infiltrent le terrain de recouvrement et entrent en contact avec l'enveloppe, on compte les options suivantes :

- Encastrer un revêtement interne en plastique imperméable et des collecteurs inférieurs dans l'enveloppe du remblai sur toute la portée de la structure et sur sa longueur
- Sélectionner un revêtement polymère de finition pour la tôle

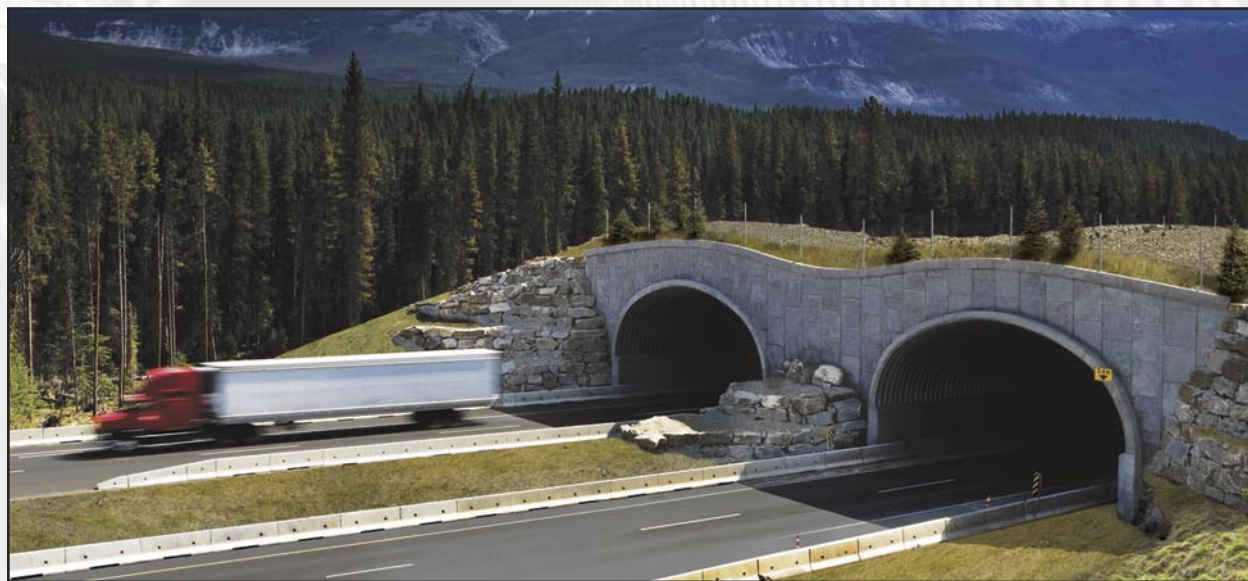
Des contaminants routiers peuvent également entrer en contact avec l'intérieur de la structure des passages souterrains véhiculaires. La protection des tôles contre ces éléments corrosifs peut être assurée en construisant des écrans

Lignes directrices sur le rendement des structures d'acier enterrées

de béton coulés sur place (figure 4). L'entretien des structures des passages souterrains peut comprendre le lavage sous pression de l'intérieur afin de prolonger la durée de vie utile.

Les applications sur des cours d'eau au courant très rapide doivent prévoir un traitement approprié des extrémités et des caractéristiques anti-cavitation. Celles-ci peuvent comprendre, entre autres, la construction de systèmes de mur d'amont/mur en aile, de barrage souterrain en palplanches, de membranes étanches, de murs d'amont en béton ou de colliers biseautés en béton. Les systèmes de traitement d'extrémité assurent une résistance structurelle aux forces de soulèvement hydraulique et aux impacts de glace et de débris lorsque le niveau d'eau s'élève, et protègent l'enveloppe de terre de remblai stabilisée mécaniquement contre l'érosion et la cavitation le long de l'extérieur de la structure lorsque les courants sont forts.

Figure 4 – Passage souterrain en tôle forte à ondulations profondes avec écrans, colliers et murs d'extrémité en béton



Lignes directrices sur le rendement des structures d'acier enterrées

Étape 7 – Spécifications : ondulations, épaisseur et revêtement

Les six étapes précédentes permettent au concepteur d'établir les spécifications ci-dessous relativement au produit fini :

- Une forme de tôle forte enterrée répondant aux critères conceptuels du projet
- Un profil d'ondulations approprié
- Des paramètres du sol pour l'enveloppe de terre de remblai stabilisée mécaniquement et importée
- L'épaisseur théorique des parois sur toute la périphérie de la structure et sur toute la longueur pour satisfaire aux exigences de la durée de vie théorique
- Le système de revêtement optimal sur toute la périphérie de la structure et sur toute la longueur pour satisfaire aux exigences de la durée de vie théorique
- Les caractéristiques spéciales nécessaires pour soutenir des conditions environnementales extrêmes ou des événements extrêmes

4.0 Exemple de conception

Étape 1 – Définition des critères de conception du projet

- Selon l'analyse hydraulique, il faut prévoir une zone d'extrémité du cours d'eau de 18,0 m²
- Une structure d'une largeur minimale de 5,5 m est nécessaire pour franchir le lit du cours d'eau
- Distance entre le lit du cours d'eau et la surface de la route = 5,6 m
- Le niveau d'eau théorique est de 5 m sous la route
- Une structure à périphérie complète est acceptable (élimine les exigences de fondation)
- Charge utile véhiculaire théorique de la route conforme au Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CL 265)
- Masse unitaire du terrain de recouvrement = 22,0 kN/m³ (catégorie de sol I, densité de 90 à 95 % à l'essai Proctor standard)
- Situation géographique : London (Ontario), zone sismique 0
- Durée de vie théorique = 75 ans

Étape 2 – Évaluation du site

- Propriétés chimiques de l'eau et paramètres du courant :
 - pH = 7,0
 - Résistivité = 2600 ohm-cm
 - Chlorures = 40 ppm
 - Dureté = 120 ppm
 - Vitesse maximale théorique du courant – 1,4 m/s
 - Lit du cours d'eau contenant du sable et du gravier

Lignes directrices sur le rendement des structures d'acier enterrées

- Propriétés électrochimiques de la terre de remblai stabilisée mécaniquement proposée :
 - pH = 7,0
 - Résistivité = 3000 ohm-cm
 - Chlorures = 40 ppm
 - Sulfates = 100 ppm
- Corrosion atmosphérique nulle ou négligeable

Étape 3 – Examen des options de tôles et de revêtements

- Sélectionner une arche en tuyau de tôle forte galvanisée standard, profil d'ondulation de 152 mm x 51 mm, portée de 6 250 mm x élévation de 3 910 mm, zone d'extrémité = 19,18 m², zone d'extrémité effective pour le courant = 18,22 m² (v. : tableau 2.19, page 42, du Manuel des produits de tôle pour le drainage et la construction routière du CSPI [Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products])
- Sélectionner un revêtement de zinc standard, masse de 915 g/m²

Étape 4 – Conception structurelle

- On peut trouver les calculs de l'épaisseur de la tôle dans l'exemple 2, page 264, du Manuel du CSPI. L'épaisseur de tôle recommandée pour satisfaire aux critères structurels est de 4,0 mm. Cette donnée est confirmée dans le tableau HC 8 du Manuel du CSPI (page 254).

Étape 5 – Sélection du revêtement et calcul de la tolérance de corrosion

- Selon le tableau 3, la vitesse du courant est considérée comme faiblement abrasive (niveau 2). L'option suggérée pour soutenir un niveau d'abrasion 2 pour les tôles du radier est un revêtement galvanisé ou polymère, tel qu'indiqué dans le tableau 6.
- Mesure des propriétés chimiques de l'eau d'une catégorie « non corrosive » (tableau 7) : pour les tôles galvanisées, la tolérance de corrosion de l'acier exposé à l'eau pour une durée de vie théorique de 75 ans est de 346 µm (tableau 9).
- Propriétés chimiques de la terre de remblai respectant les limites des normes du R.-U. et de l'AASHTO pour l'acier galvanisé (tableau 4) : pour les tôles galvanisées, la tolérance de corrosion de l'acier « côté sol » pour une durée de vie théorique de 75 ans est de 346 µm (tableau 12, suivant le modèle de la norme du R.-U.).
- La corrosion atmosphérique est nulle ou négligeable; la tolérance de corrosion de l'acier pour une durée de vie théorique de 75 ans est de 0 µm pour la surface interne des tôles au-dessus du niveau de l'eau.

Lignes directrices sur le rendement des structures d'acier enterrées

Tolérance de corrosion de l'acier pour les divers types de tôles considérés :

Au-dessus du niveau de l'eau

- Épaisseur de l'acier pour les tôles galvanisées : $4\,000\ \mu\text{m} + 346\ \mu\text{m} + 0\ \mu\text{m} = 4\,346\ \mu\text{m}$.
L'épaisseur de tôle standard la plus proche est de 5,0 mm.
- Épaisseur de l'acier pour les tôles à revêtement polymère : $4\,000\ \mu\text{m} + 0\ \mu\text{m} = 4\,000\ \mu\text{m}$.
Une épaisseur standard de 4,0 mm est adéquate.

Sous le niveau de l'eau

- Épaisseur de l'acier pour les tôles galvanisées : $4\,000\ \mu\text{m} + 346\ \mu\text{m} + 346\ \mu\text{m} = 4\,692\ \mu\text{m}$.
L'épaisseur de tôle standard la plus proche est de 5,0 mm.
- Épaisseur de l'acier pour les tôles à revêtement polymère : $4\,000\ \mu\text{m} + 0\ \mu\text{m} + 0\ \mu\text{m} = 4\,000\ \mu\text{m}$.
Une épaisseur de tôle standard de 4,0 mm est adéquate.

Étape 6 – Évaluation des options liées aux conditions environnementales

- Compte tenu des vitesses de courant élevées et du potentiel d'érosion, une protection par barrages est conseillée.
- À l'étape 5, il a été établi que certaines options permettraient à la durée de vie utile estimative de satisfaire à l'exigence de durée de vie théorique de 75 ans. L'évaluation du site effectuée à l'étape 2 indique qu'une évaluation plus poussée d'éventuelles conditions extrêmes n'est pas nécessaire.

Étape 7 – Spécifications : ondulations, épaisseur et revêtement

- Une arche en tuyau à tôle forte en acier ondulé à profil superficiel d'une portée de 6 250 mm et d'une hauteur de 3 910 mm permet de répondre aux critères hydrauliques, dimensionnels et structurels du projet.
- La terre de remblai stabilisée mécaniquement correspond aux paramètres électrochimiques environnementaux recommandés.
Le matériau et l'épaisseur suggérés pour les tôles au-dessus du niveau de l'eau est soit de l'acier galvanisé de 5,0 mm, soit de l'acier à revêtement polymère de 4,0 mm.
- Le matériau et l'épaisseur suggérés pour les tôles en-dessous du niveau de l'eau est soit de l'acier galvanisé de 5,0 mm, soit de l'acier à revêtement polymère de 4,0 mm.
- Des barrages souterrains en palplanches d'acier galvanisé sont recommandés.

Lignes directrices sur le rendement des structures d'acier enterrées

Passage souterrain véhiculaire avec tôles supérieures à revêtement polymère pour ruissellement d'eau contenant des sels de voirie d'une grande route



Arche en tôle forte en acier ondulé à profil superficiel avec tôle de radier à revêtement polymère

